

Česká zemědělská univerzita v Praze

Provozně ekonomická fakulta

Katedra informačních technologií



Bakalářská práce

Využití 3D tisku ve zdravotnictví

Matěj Moc

© 2020 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Matěj Moc

Systémové inženýrství a informatika
Informatika

Název práce

Využití 3D tisku ve zdravotnictví

Název anglicky

Use of 3D printing in health care

Cíle práce

Hlavním cílem práce je určení nákladovosti výroby kranioimplantátu na základě experimentální výroby prototypu.

Dílní cíle práce jsou:

- Konstrukce modelu kranioimplantátu
- Výroba kranioimplantátu
- Technicko-ekonomická analýza

Metodika

Praktická část řešené bakalářské práce je založena na zkonstruování prototypu kranioimplantátu. K vytvoření modelu bude použit adekvátní software pro tvorbu 3D grafiky. Celý proces modelace bude detailně popsán. Vytvořený model bude poté realizován na 3D tiskárně. Vytvořený prototyp bude sloužit jako výchozí produkt pro ekonomickou analýzu. Nákladovost výroby prototypu bude určena jako součet celkových cen faktorů, vynaložených k realizaci prototypu (čas, energie, materiál). Na základě výsledků praktické části budou formulovány závěry.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

3D tisk, zdravotnictví, kraniointplantát, Modelace, 3D grafika

Doporučené zdroje informací

BERNIER, Samuel N, Bertier LUYT a Tatiana REINHARD, 2015. Make: Design for 3D Printing. San Francisco: Maker Media. ISBN 1457187361ID.

HORVATH, Joan. Mastering 3D Printing. Berkley, United States: aPress, 2014. ISBN 1484200268.

KLOSKI, Liza Wallach, Nick KLOSKI a Jakub GONER, 2017. Začínáme s 3D tiskem. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-4876-1.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – PEF

Vedoucí práce

Ing. Jan Masner, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra informačních technologií

Elektronicky schváleno dne 26. 8. 2019

Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 14. 10. 2019

Ing. Martin Pelikán, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 23. 03. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Využití 3D tisku ve zdravotnictví" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 17.3.2020

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Janu Masnerovi, Ph.D. za přínosné rady, věcné připomínky a čas, věnovaný naší spolupráci při zpracování předkládané bakalářské práce. Mé rodině za morální podporu při zpracování a mé přítelkyni za trpělivost.

Využití 3D tisku ve zdravotnictví

Abstrakt

Práce se v teoretické části zabývá vznikem a vývojem technologie 3D tisku. Popisuje jednotlivé metody 3D tisku a tiskárny, které dané metody podporují včetně materiálu používaných při tisku metodou FDM. Přibližuje využití 3D tisku ve zdravotnictví se zaměřením na opravy kraniálních defektů pomocí personalizovaných implantátů. V rámci této práce byl takovýto implantát navržen a realizován pomocí 3D technologie. Tento prototyp pak sloužil jako podklad pro zhotovení ekonomicko-technické analýzy, na jejímž základě byly zformulovány závěry a výsledky.

Klíčová slova: 3D tisk, zdravotnictví, kraniointplantát, modelace, 3D grafika

Use of 3D printing in health care

Abstract

The theoretical part deals with the origin and development of 3D printing technology. It describes the various methods of 3D printing and printers that support these methods, including the materials used in each production process. It introduces the use of 3D printing in healthcare with a focus on the repair of cranial defects using personalized implants. In this work, such an implant was designed and implemented using 3D technology. This prototype was then used as a source for economic and technical analysis, based on that analysis conclusions and results were formulated.

Keywords: 3D printing, health care, cranial implant, modelling, 3D graphics

Obsah

| | |
|---|-----------|
| 1 Úvod..... | 8 |
| 2 Cíl práce a metodika | 9 |
| 2.1 Cíl práce | 9 |
| 2.2 Metodika | 9 |
| 3 Teoretická východiska | 10 |
| 3.1 Vznik 3D tisku | 10 |
| 3.2 Vývoj 3D tisku | 11 |
| 3.3 Automatická výroba | 13 |
| 3.3.1 Subtraktivní výroba..... | 13 |
| 3.3.2 Aditivní výroba | 13 |
| 3.4 Technologie 3D tisku | 14 |
| 3.4.1 SLA | 14 |
| 3.4.2 SLS..... | 14 |
| 3.4.3 FDM..... | 15 |
| 3.4.4 Pohyb v trojrozměrném prostoru | 15 |
| 3.4.5 Konstrukce FDM tiskáren..... | 17 |
| 3.5 Využití 3D tisku ve zdravotnictví | 20 |
| 3.5.1 Didaktické pomůcky | 20 |
| 3.5.2 Předoperační modely | 21 |
| 3.5.3 Implantáty | 22 |
| 3.5.4 Biotisk..... | 23 |
| 3.5.5 Protézy | 25 |
| 3.5.6 Kranioimplantáty | 26 |
| 4 Vlastní práce | 31 |
| 4.1 Postup tvorby kranioimplantátu | 31 |
| 4.2 Geomagic Sculpt | 31 |
| 4.3 Modelace kranioimplantátu..... | 32 |
| 4.3.1 Vstupní data | 32 |
| 4.3.2 Proces modelace | 32 |
| 4.4 Realizace implantátu | 42 |
| 4.4.1 Parametry tiskárny a filament | 42 |
| 4.5 Analýza nákladovosti výroby..... | 44 |
| 4.5.1 Cena bez vstupních nákladů | 44 |
| 4.5.2 Cena včetně vstupních nákladů..... | 46 |

| | |
|--|-----------|
| 5 Výsledky a zhodnocení..... | 49 |
| 5.1 3D tisk | 49 |
| 5.2 Nákladovost výroby | 49 |
| 6 Závěr..... | 51 |
| 7 Seznam použitých zdrojů | 52 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: SLA – 1 | 10 |
| Obrázek 2: RepRap 1.0 (Darwin) | 12 |
| Obrázek 3: Konstrukce 3D tiskárny typu SLS..... | 15 |
| Obrázek 4: Tiskárna s Kartézským způsobem pohybu v prostoru | 16 |
| Obrázek 5: Tiskárna typu Delta | 16 |
| Obrázek 6: kraniointplantáty z různých materiálů..... | 20 |
| Obrázek 7: Fyzický 3D model srdce s vrozenou vadou pro předoperační přípravu..... | 22 |
| Obrázek 8: implantát pánevní kosti vyrobený pomocí 3D technologie..... | 23 |
| Obrázek 9: 3D biotiskárna | 24 |
| Obrázek 10: Biotisk nosu pomocí hybridního bioinkoustu | 25 |
| Obrázek 11: Protézy rukou vytisknuté domácí tiskárnou | 26 |
| Obrázek 12: 3D model lebky a návrh implantátu. | 27 |
| Obrázek 13: radiopakní kraniointplantát z titanu na rentgenovém snímku | 28 |
| Obrázek 14: CT sken hlavy načtený v programu Geomagic Sculpt..... | 32 |
| Obrázek 15: Ohraničení defektu křivkami..... | 33 |
| Obrázek 16: Nastavování sklonu křivky..... | 34 |
| Obrázek 17: Kompletní síť křivek | 34 |
| Obrázek 18: Rozdělená síť křivek | 35 |
| Obrázek 19: Prvotní náplast..... | 36 |
| Obrázek 20: Posunutí implantátu po ose Z..... | 37 |
| Obrázek 21: Posunutí částí implantátu po ose Z..... | 37 |
| Obrázek 22: Detailní síť křivek | 38 |
| Obrázek 23: Clay model (pohled shora) | 39 |
| Obrázek 24: Clay model (pohled ze strany/zesponu) | 39 |
| Obrázek 25: Před použitím nástroje Tug | 40 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 26: Po použití nástroje Tug | 40 |
| Obrázek 27: Označení oblasti pro nástroj smooth | 41 |
| Obrázek 28: Po použití nástroje smooth | 42 |
| Obrázek 29: Implantát s nosnou konstrukcí | 43 |
| Obrázek 30: Implantát bez nosné konstrukce | 43 |

Seznam grafů

| | |
|--|----|
| Graf 1: Predikce celosvětových tržeb v oblasti 3D tisku..... | 13 |
| Graf 2: Podíl jednotlivých položek na celkové ceně | 46 |
| Graf 3: Porovnání cen implantátů podle výrobního procesu | 47 |
| Graf 4: Náklady na výrobu | 48 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1: Porovnání PLA, ABS a PET-G materiálu | 18 |
| Tabulka 2: Porovnání ABS a PMMA | 29 |
| Tabulka 3: Ceny implantátů v Mexiku | 30 |
| Tabulka 4: Fixní náklady | 49 |
| Tabulka 5: Variabilní náklady | 49 |
| Tabulka 6: Ceny implantátů v Mexiku | 50 |

1 Úvod

Technologie 3D tisku změnila výrobní procesy v každém myslitelném oboru a usnadňuje životy lidem po celém světě. Každým rokem se objevují nové a nové technologie 3D tisku a jeho využití se stále rozšiřuje. Jeden z oborů, ve kterém je tento pokrok nejvíce znatelný je zdravotnictví. Od tisku pediatrických vložek do bot až po nově zkoumané technologie biotisku lidských orgánů se 3D tisk využívá v každé oblasti zdravotnictví. Právě hojně využití 3D tisku ve zdravotnictví mě motivovalo k napsání bakalářské práce na dané téma.

Poranění lebky, v důsledku úrazu či nemoci, je život ohrožující zranění. Absence lebeční kosti způsobuje vážné zdravotní komplikace. Těmi mohou být například poranění měkké mozkové tkáně, vznik infekce nebo přetrvávající tlak na mozkovou tkáň, který způsobuje intenzivní bolesti hlavy. Při defektu většího rozsahu mohou být ovlivněny kognitivní funkce člověka. Právě tyto zdravotní obtíže jsou důvodem k rekonstrukci lebeční kosti. Technologie 3D tisku umožňuje vytvoření fyzického modelu lebečního defektu na základě CT snímkování pacienta. Tímto výrobním procesem je možné vytvořit implantát, který kopíruje tvar defektu s dokonalou přesností.

V současné době se v České republice 3D tisk k výrobě personalizovaných implantátů lebky používá pouze jako pomocná technologie k výrobě modelu, či formy, ze které je výsledný implantát vyhotoven. K samotné výrobě implantátu se používají klasické výrobní procesy jako je vylévání z formy či obrábění. Takovouto formu výrobního procesu využívá v České republice například firma LASAK s r.o.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Hlavním cíle práce je určení nákladovosti výroby kranioimplantátu na základě experimentální výroby prototypu.

Dílčí cíle

- Konstrukce modelu kranioimplantátu
- Výroba kranioimplantátu
- Technicko-ekonomická analýza

2.2 Metodika

Praktická část řešené bakalářské práce je založena na zkonstruování prototypu kranioimplantátu. K vytvoření modelu bude použit adekvátní software pro tvorbu 3D grafiky. Celý proces modelace bude detailně popsán. Vytvořený model bude poté realizován na 3D tiskárně. Vytvořený prototyp bude sloužit jako výchozí produkt pro ekonomickou analýzu. Nákladovost výroby prototypu bude určena jako součet celkových cen faktorů, vynaložených k realizaci prototypu (čas, energie, materiál). Na základě výsledků praktické části budou formulovány závěry.

3 Teoretická východiska

Pro dosažení stanovených cílů práce je v rámci teoretické části práce popsán vznik a vývoj 3D tisku. Jsou uvedeny základní pojmy a vysvětleny principy fungování a metody 3D tisku. Je přiblíženo využití 3D tisku v oborech, kde se využívá nejvíce, se zaměřením na zdravotnictví a kranioimplantáty samotné.

3.1 Vznik 3D tisku

Nejranější zmínka o 3D tisku se datuje roku 1980. V tomto roce se Hideo Komoda pokusil patentovat technologii Rapid Prototyping (dnes se používá pro soubor technologií označující výrobu pomocí 3D tisku). Jeho patent však nikdy nevešel v platnost, a proto se za zakladatele 3D tisku považuje Charles Hull, zakladatel firmy 3D Systems, dnes jedné z největších a nejúspěšnějších firem na trhu s 3D tiskárnami. Svůj první patent získal roku 1984 pro svůj Stereolithography Apparatus (SLA, stereolitografický přístroj). I když je [SLA](#) (viz kapitola 3.3.1) základním kamenem vývoje pro dnešní 3D tiskárny, v této době se ještě 3D tiskárnami nenazývaly. Toto označení vzniklo až roku 1993. Zkratka SLA se dnes používá spíše pro označení metody tisku (stereolitografii), než pro stereolitografický přístroj. Na obrázku č.1 je vidět SLA-1, tedy první 3D tiskárna na světě. (Noorani, 2018)

Obrázek 1: SLA – 1



(Gareth Weeks, 2018)

3.2 Vývoj 3D tisku

Na počátku osmdesátých let bylo Computer Aided Design (CAD, počítačem podporované projektování) stále ve svých začátcích. Největším problémem byla nekompatibilita mezi CAD souborem a 3D tiskárnami. Firma Albert Consulting Group vytvořila nový formát STL, který podporovala každá tiskárna a mohl být transformován z CAD souboru. STL formát popisuje povrch objektu pomocí jednotkových normálových vektorů a vrcholů trojúhelníků ve trojrozměrné kartézské soustavě souřadnic, a to v bezrozměrných jednotkách. Formát STL se od svého vzniku využíval v nezměněné podobě až do roku 2009, kdy byl nahrazen novější verzí STL 2.0. Ta se používá doposud. STL se tedy stal standardním formátem využívaným pro 3D tisk. (Hrubý, 2020)

Roku 1992 firma Stratasys vytvořila a patentovala technologii 3D tisku FDM. Pro tuto metodu firma vynalezla materiál ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), který i dnes patří mezi nejvyužívanější plasty v oblasti 3D tisku.

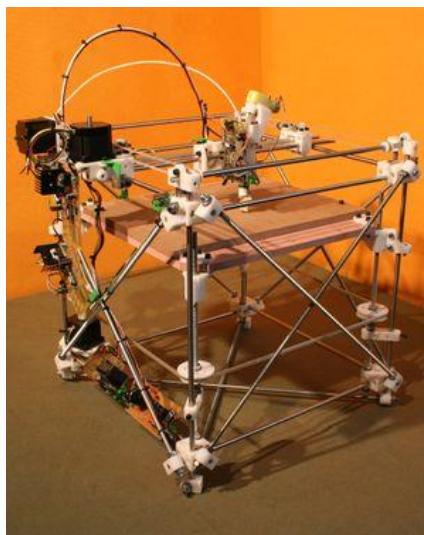
Zhruba ve stejnou dobu, se nezávisle na SLA a FDM metodách, podařilo dvěma doktorům z Texaské univerzity v Austinu vyvinout další metodu 3D tisku. Dr. Carl Deckard a Dr. Joe Beaman vynalezli a patentovali technologii Selective Laser Sintering (SLS, selektivní spékání laserem). Zatímco SLA a FDM technologie byly efektivní ve vyrábění plastových objektů, ani jedna z těchto metod nebyla schopná vyrábět kovové objekty. SLS byla tehdy jedinou známou technologií, která byla použitelná pro 3D výrobu kovových objektů. Původně tento patent patřil firmě DTM Corporation, pro kterou oba vynálezci pracovali, ta však byla později odkoupena firmou 3D Systems.

Roku 1993 si Massachusettský technologický institut nechal patentovat technologii 3D tisku, která používala práškový materiál a tekutý spojovač. Licenci k této technologii získala firma Z Corporation. Roku 2012 byla Z Corporation odkoupena firmou 3D Systems i se všemi patenty a licencemi. Mnoho průmyslových patentů firem 3D Systems a Stratasys vypršelo kolem roku 2005 a zejména vypršení patentu FDM technologie umožnilo vzniku spotřebního trhu 3D tisku. (Horne, 2017)

„Třetí průmyslová revoluce“ či „osobní výrobní revoluce“ těmito termíny je označován vzestup 3D tisku. Tato revoluce přenáší výrobu z továren do domů, bytů, či kanceláří. Každý člověk je schopen si z pohodlí domova, pomocí osobní 3D tiskárny, vytvořit téměř cokoli. Začátek této revoluce odstartoval open-source projekt RepRap roku

2005 v jehož čele stál Dr. Adrian Bowyer. Významnost RepRap projektu spočívala v úsilí vytvořit takovou tiskárnu, která by byla schopná vytvořit funkční klon sama sebe a takzvaně se replikovat. První takovou tiskárnou byla tiskárna Darwin, představená světu v roce 2007, zobrazená na obrázku č. 2. (Cimala, 2017)

Obrázek 2: RepRap 1.0 (Darwin)



(Sherman, 2016)

Tiskárny RepRap byly na svou dobu velmi levné (méně než 5000 \$) a odolné. Většina tiskáren používala metody tisku FDM a SLA. Tiskárny fungovaly na principu open-source softwaru a hardwaru, díky čemuž nebylo potřeba žádných licencí k využívání těchto tiskáren. Díky tomu se trh s 3D tiskem začal rychle rozšiřovat. Podle firmy Wohlers, která každoročně analyzuje data z předešlých let v oblasti 3D tisku, a na jejich základě vydává předpokládaný vývoj tržeb, by se celosvětové tržby měly v roce 2024 vyšplhat na 35,6 miliard dolarů. Na grafu č. 1 je zobrazen vývoj celosvětových tržeb v oblasti 3D tisku od roku 2013 do roku 2020. (Sherman, 2016)

Graf 1: Predikce celosvětových tržeb v oblasti 3D tisku



(Cimala, 2015)

3.3 Automatická výroba

3D tisk je součástí automatického výrobního procesu. Automatická výroba má mnoho výhod oproti typické manuální výrobě. Hlavní výhodou je možnost snadné a rychlé úpravy návrhu díky využití CAD technologie a naprosto přesné dimenzování. Všechny výrobní procesy, ať už automatické či manuální, se dělí do dvou kategorií, subtraktivní a aditivní.

3.3.1 Subtraktivní výroba

Příkladem subtraktivního výrobního procesu je typické Computer Numerical Control (CNC, Číslicové řízení) strojů. Na začátku výrobního procesu je nepracovaný blok materiálu, z něhož se postupným odebráním hmoty vytváří požadovaný objekt. K vytvoření komplikovaných tvarů pomocí subtraktivní metody je zapotřebí až 5 numericky řízených os. (Menken, 2012)

3.3.2 Aditivní výroba

Aditivní výroba je přesným opakem subtraktivního výrobního procesu. Výsledný objekt je vytvářen postupným přidáváním materiálu. Hlavní výhodou aditivní výroby je podstatně menší množství zbytkového materiálu. Všechny metody 3D tisku spadají právě do kategorie aditivní výroby. (Menken, 2012)

3.4 Technologie 3D tisku

Cílem technologie 3D tisku je schopnost rychle a levně vytvořit jakýkoli objekt komplexního tvaru přímo z CAD dat bez nutnosti využití strojního obrábění. Vytvořený CAD model musí být rozřezán na vrstvy předem stanovené tloušťky pomocí speciálního softwaru. Tento software je proprietární pro každou 3D tiskárnu. Neexistuje tedy žádný software, který by se dal použít pro rozřezání CAD modelu pro všechny typy 3D tiskáren. Takto rozřezané vrstvy vyskládané na sebe pak definují celkový tvar a geometrii daného objektu. Nejvyžívanější technologie 3D tisku se dají rozdělit do 3 kategorií, podle způsobu zpracování a podoby tiskového materiálu. (Jedlička, 2019)

3.4.1 SLA

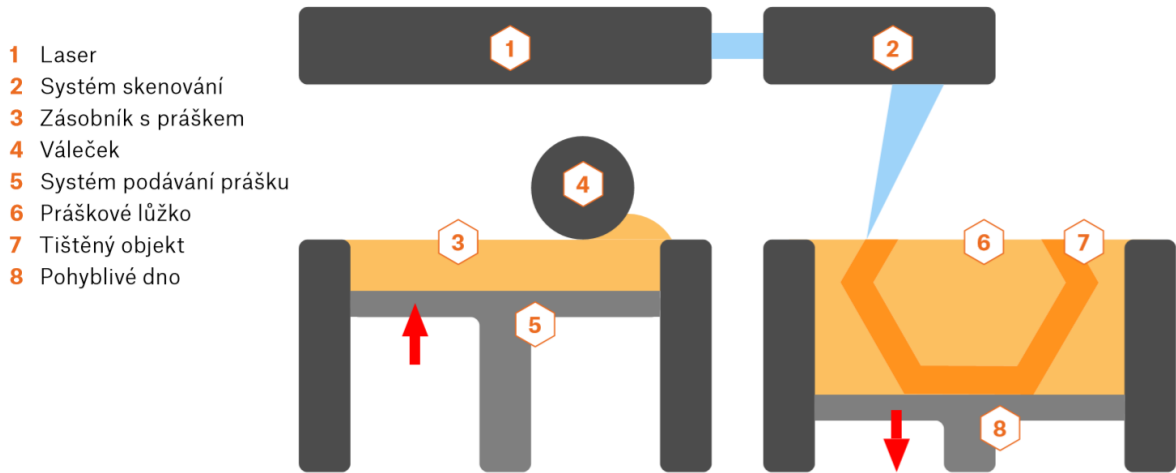
Stereolitografie je založena na principu vytvrzování fotopolymerní pryskyřice. Fotopolymer je látka, která se za použití správného záření dá přeměnit z tekutého skupenství do pevného, a to téměř okamžitě. Díky této vlastnosti je ideálním materiálem pro 3D tisk. SLA tvoří 4 hlavní části. Nádrž, která je naplněná tekutým fotopolymerním materiálem, nejčastěji pryskyřicí. Perforovanou plošinu, na které vzniká výsledný objekt. UV laser a počítač, který ovládá plošinu a laser. Postupným zaměřováním UV záření stroj vytváří další a další vrstvy fotopolymeru, které se skládají jedna na druhou. Po každé vytvořené vrstvě se plošina ponoří níže do kapaliny a tím umožní vzniku další vrstvy, dokud se nevytvoří výsledný objekt. Ten se poté opláchne rozpouštědlem, který odstraní přebytečný materiál. Posledním krokem je ztvrdnutí plastu pečením v UV peci. SLA se člení na 3 další podkategorie. I když jsou si všechny 3 metody velmi podobné, liší se zejména v kvalitě výsledného produktu a době potřebné k tisku. (Noorani, 2018)

3.4.2 SLS

V mnoha ohledech je SLS metoda podobná metodě SLA s tím rozdílem, že laser se používá ke spečení tavného prášku (nejčastěji PVC, dříve například nylon) místo vytvrzení fotopolymerní hmoty. V tomto procesu je tenká vrstva termoplastického prášku rozprostřena válcem po povrchu tiskové plochy a laserem zahřáta na teplotu lehce pod bodem tání daného materiálu. Válec poté odsune přebytečný prášek do odpadní kádě a tisková plocha se posune

dolů, aby mohla vzniknout další vrstva. Tento proces se opakuje, dokud nevznikne požadovaný objekt. (Homola, 2013) Obrázek č. 3 ilustruje konstrukci SLS tiskárny.

Obrázek 3: Konstrukce 3D tiskárny typu SLS



(Průša, 2019)

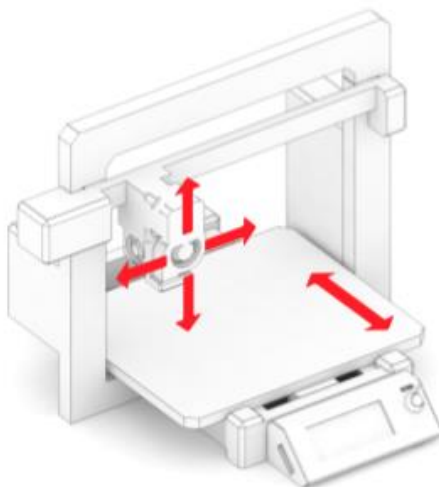
3.4.3 FDM

Jedná se o nejrozšířenější a nejdostupnější technologii 3D tisku. Svůj podíl na tom má zejména projekt RepRap, ze kterého pochází většina spotřebitelských tiskáren typu FDM pro širokou veřejnost. Funguje na principu nanášení taveného plastu ve formě vlákna do tenkých vrstev pomocí extruzní hlavy, která se pohybuje ve 2 osách. Hlavní výhodou této metody je jednoduchost a bezpečnost práce s filamentem (tiskový materiál, vlákno v pevné formě), oproti pryskyřici či jemnému prášku, využívaných v ostatních technologiích. Vzhledem ke způsobu nanášení tiskového materiálu, jsou na objektu patrné tiskové stopy, které se většinou pohybují v rozsahu od 0,05mm do 0,3mm v závislosti na použité extruzní hlavě. (Kloski, 2017)

3.4.4 Pohyb v trojrozměrném prostoru

3D tiskárny typu FDM se dají rozdělit do 3 kategorií, podle způsobu, jakým se nanášecí hlava pohybuje v prostoru. Kartézská tiskárna je založena na principu pohybu po třech lineárních osách, přičemž tisková hlava vytlačující materiál (extruder) se pohybuje ve dvou osách (X, Z) a podložka po jedné (Y). Tisková podložka je proto u většiny tiskáren pravoúhlého tvaru. Na obrázku č. 4 je nastíněn pohyb extruderu a podložky v kartézském způsobu pohybu. (Menken, 2019)

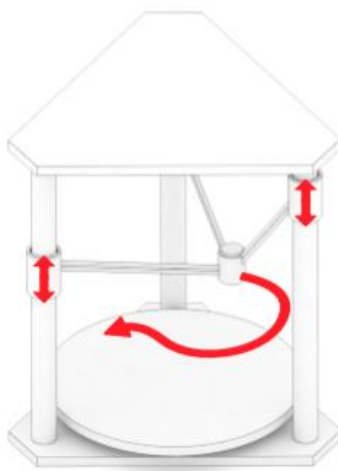
Obrázek 4: Tiskárna s Kartézským způsobem pohybu v prostoru



(Průša, 2019)

Druhým typem jsou tiskárny Delta. Delta tiskárna využívá zavěšeného extruderu na třech ramenech, která jsou spolu spojena právě v místě extruderu. Výhodou jsou rychlé pohyby a velký tiskový prostor především v ose Z. Tiskárna typu delta vyžadují vysokou přesnost při stavbě a následné kalibraci. Složitá geometrie vyžaduje náročné výpočty pro pohyby krokových motorů jednotlivých ramen. Obrázek č. 5 naznačuje směr pohybu a otáčení v prostoru. (Průša, 2019)

Obrázek 5: Tiskárna typu Delta



(Průša, 2019)

Posledním a nejméně používaným systémem pro pohyb v trojrozměrném prostoru je Polar. 3D tiskárny postavené na polárním systému využívají dvě osy pro pohyb tiskové hlavy a rotační podložky. Výhodou tohoto systému je jednoduchost sestavení, nevýhodou pak složité ovládání. Tato technologie je velice nová, proto není příliš využívána. (Michálek, 2016)

3.4.5 Konstrukce FDM tiskáren

Všechny FDM tiskárny jsou si konstrukcí velmi podobné a z pravidla se skládají ze 6 komponentů:

1. Extrudér
2. Tisková deska
3. Konstrukce lineárního pohybu
4. Nosný rám
5. Vlákno (materiál)
6. Řídící jednotka

Extrudér (tisková hlava) se skládá z několika dílů, které dohromady zajišťují nanášení jednotlivých tiskových vrstev. Do extruderu je přiveden filament v pevné formě, který je v průběhu procesu roztaven. Takto upravený filament je vytlačován tryskou. Různými průměry trysky pak může uživatel ovlivnit kvalitu a dobu tisku. Čím větší je tištěný objekt, tím větší by měl průměr trysky být a naopak. (Pohořelecký, 2016)

Tisková deska je místo k vrstvení roztaveného filamentu. Modernější tiskárny jsou vybaveny deskou, kterou je možné zahřát na určitou teplotu. Pokud je tisková deska dostatečně zahřátá, zamezuje kroucení součástek při tisku z materiálu s velkou tepelnou roztažností.

Konstrukce lineárního pohybu je popsána v kapitole 3.3.8. Každá tiskárna musí být vybavena jedním z výše uvedených typů, aby byla funkční. Nosný rám tvoří konstrukci 3D tiskárny. Je důležité, aby byl rám dostatečně tuhý a robustní. V opačném případě hrozí snížení kvality tisku vibracemi. (Grames, 2019)

V dnešní době už existují desítky různých materiálů, které mohou být pro 3D tisk využívány. ABS je nejstarším plastem využívaným pro 3D tisk a zároveň jedním

z nejvyžívanějších. Je velice odolný proti mechanickému poškození, takže se nejčastěji využívá pro výrobu koncových produktů. Mezi jeho nevýhody patří tepelná roztažnost, je tedy nutné tiskárny vybavit vyhřívanou podložkou, aby nedošlo k deformacím. (Vosynková, 2020)

Dalším velmi často užívaným materiálem je Polylactic Acid (PLA, kyselina polymléčná). Jedná se o biologicky rozložitelný plast, který se vyrábí z kukuřice, cukrové třtiny či brambor. Zajímavostí je možnost ovlivnit výsledný povrch teplotou tisku. Pokud je teplota při tisku vyšší než 230 °C, bude výsledný povrch matný, při teplotě nižší je povrch lesklý. PLA se využívá zejména při tisku větších objektů, nemá totiž tak vysokou tepelnou roztažnost jako ABS a není tedy nutné používat vyhřívanou podložku. Má ovšem i svá negativa, PLA je sice tvrdý, ale zároveň i velice křehký materiál. Při mechanickém namáhání má tendenci praskat. Dále není příliš odolný proti povětrnostním vlivům a vysoké teplotě (měkne při teplotě 60 °C). Posledním obvyklým filamentem je PET-G. Jedná se o modifikaci klasického PET materiálu (láhve, nádoby, obaly na potraviny), který kombinuje vlastnosti ABS i PLA. Jeho největší výhodou je možnost materiál recyklovat. V tabulce č. 1 jsou uvedeny další mechanické vlastnosti tří nejpoužívanějších materiálů. Z údajů uvedených v tabulce je kromě zmíněné tepelné a mechanické odolnosti možné vyčíst například teplotu trysky a podložky při tisku. (Vosynková, 2017)

Tabulka 1: Porovnání PLA, ABS a PET-G materiálu

| | PLA | ABS | PET-G |
|---|--------------|-----------------|-----------------|
| Teplota trysky | 180 - 230 °C | 210 - 250 °C | 220 - 260 °C |
| Teplota podložky | 20 - 60 °C | 80 - 110 °C | 60 - 90 °C |
| Tisková podložka | Nepovinná | Povinná | Doporučuje se |
| Komora při tisku | Nepovinná | Doporučuje se | Nepovinná |
| Přilnutí první vrstvy | Dobré | Drobné problémy | Drobné problémy |
| Výpary | Skoro žádné | Silné | Silné |
| Absorbce vlhkosti | Ano | Ano | Ano |
| Youngův modul (GPa) | 3,5 | 2,4 | 2,2 |
| Modul pružnosti (GPa) | 4 | 2,2 | 1,9 |
| Pevnost v ohybu (MPa) | 80 | 65 | 64 |
| Poměr pevnosti k hmotnosti (kN*m/kg) | 40 | 31-80 | 42 |
| Pevnost v tahu (MPa) | 110 | 37-110 | 53 |
| Odolnost proti nárazu (J/m) | - | 70-370 | 77 |
| Tvrdoost Rockwell R | - | 94 | 108 |
| Teplota skelného přechodu (°C) | 60 | 105 | 81 |
| Deformace při teplotě (°C) | 65 | 100 | 70 |
| Teplota tání (°C) | 160 | - | 140 |
| Tepelná kapacita (J/kg*K) | 1800 | 1470 | 1200 |
| Tepelná vodivost (W/m*K) | 0,13 | 0,17 | 0,29 |
| Tepelná difuzivita (m^2/s) | 0,058 | 0,12 | 0,19 |

(Vosynková, 2017)

Mimo 3 výše uvedené materiály se využívá celá řada méně typických materiálů, vhodných jen na okrajové využití. Prvním z nich je materiál označovaný jako TPE (termoplastický elastomer), který vyniká zejména vysokou ohebností. Vyrábí se smícháním tvrdých plastických polymerů a měkkých gum. Přimícháním dalších přísad do směsi se TPE dělí do kategorií:

- TPE-O – termoplastické polyolefiny
- TPE-S – styrenové směsi na bázi polyolefinu a SBS
- TPE-V – vulkanizovaná směs
- TPE-E – kopolyestrová směs
- TPE-U – termoplastický polyuretan
- TPE-A – termoplastický polyamid

Pro technologii 3D tisku jsou nejdůležitější materiály TPE-U a TPE-E, jelikož se z nich vyrábí filamenty. I když jsou si oba materiály velmi podobné, mají jisté odlišnosti. Termoplastický polyuretan je odolnější vůči působení chemických látek, olejům a některým typům rozpouštědel. Kopolyestrová směs je zase pružnější a tvrdší, a proto lépe drží na tiskové podložce. (Vosynková, 2017)

Syntetické biomateriály je skupina materiálů, které se využívají ve zdravotnictví. Aby mohl být materiál použit pro výrobu implantátu musí splňovat normy ISO 9001:2009 a ISO 13485:2003. Nejpoužívanějším materiálem v České republice splňující tyto normy je technicky čistý titan, který se vyznačuje vysokou mechanickou pevností a dobrou biokompatibilitou. Kromě technicky čistého titanu využívá firma LASAK s.r.o. Polyetereterketon (PEEK). Tento materiál má mechanické vlastnosti blízké kosti člověka. Implantát vyrobený z tohoto materiálu je i hmotností mnohem bližší kosti než implantát vyrobený z jiného materiálu, například titanu, jelikož se jedná o semi-krytalický plast. Polyetereterketon má také mnohem lepší biokompatibilitu než jiné plasty. Na obrázku č. 6 je prototyp kranioimplantátu vyrobeného z titanu (vlevo) a polyetereterketonu. (Cranio-Oss, 2020)

Obrázek 6: kraniointlantáty z různých materiálů



(Cranio Oss, 2020)

Posledním komponentem FDM tiskárny je řídicí jednotka, která zajišťuje činnost celé tiskárny. Hlavní funkcí je zpracování vstupních dat, podle kterých řídí pohyby podložky a tiskové trysky. (Průša, 2019)

3.5 Využití 3D tisku ve zdravotnictví

Zdravotnictví je nejrozsáhlejší a nejrychleji se rozrůstající specializovaný segment průmyslového 3D tisku. Od roku 2003, kdy zastoupení zdravotnictví představovalo pouhé 4 %, se v roce 2013 toto číslo zvedlo na 35 % a očekává se jeho další růst, který by podle odhadů firmy Wohler měl roku 2020 překonat 40% podíl celkového trhu. 3D tisk se ve zdravotnictví využívá například pro diagnostiku, léčbu a monitorování lidských nemocí, výrobu didaktických pomůcek při studiu medicíny, zhotovování koncových produktů jako jsou implantáty a protézy. Izraelští vědci jako první na světě dokázali vytisknout 3D srdce z lidských buněk. I když je toto srdce nepoužitelné pro člověka, je to jasným důkazem toho, jaký má 3D tisk v tomto odvětví potenciál. (Klíma, 2019)

3.5.1 Didaktické pomůcky

Rapid prototyping se používá pro výrobu modelů jakékoliv části těla, či nasimulování poškození orgánu. Tyto modely jsou užitečným nástrojem pro vědce a pedagogy.

Modely mohou být distribuovány do škol, kde studentům poskytují praktickou ilustraci určitých částí lidského těla. To jim umožní nacvičit lékařské procedury a lépe porozumět anatomii člověka. Možnost uchopit 3D model kosti, je určitě lepší didaktickou pomůckou než obrázek v učebnici. Vytisknuté 3D modely mohou být použity na lékařských fakultách a ve výcvikových kurzech, kde studentům umožní zdokonalovat své dovednosti, aniž by používaly kadáver (Mrtvé tělo určené ke studijním či výzkumným účelům). (Horne, 2017)

3.5.2 Předoperační modely

Zobrazování, jako je CT nebo MRI, a jeho transformace do 3D modelů se stalo standardem pro diagnostiku a personalizovanou chirurgickou léčbu. Přestože lékaři cvičí a studují každý chirurgický zákrok, který provádějí, žádná osoba není úplně stejná, proto ani žádná operace neprobíhá stejně. Provedení CT vyšetření pacienta umožňuje lékaři provádějícímu operaci určit přesnou anatomii daného pacienta, účinně zkrátit čas strávený na operačním sále a lépe připravit lékaře na chirurgický zákrok. Operace, které byly dříve neproveditelné nebo extrémně obtížné a potenciálně nebezpečné, se pro lékaře staly dostupnější možností. V nedávném případě lékaři u pacienta odhalili nádor na mozku a navrhli velice invazivní zákrok, otevření lebky. Tento pacient hledal jiné alternativy a snažil se o méně invazivní postup. Pomocí snímků pořízených magnetickou rezonancí byl vytvořen 3D modely jeho lebky, který byl zaslán chirurgovi. Důkladnou analýzou a praktikováním cvičných zákroku na modelu, byl chirurg schopen odstranit nádor malým otvorem, mnohem méně invazivním postupem. Výhoda použití 3D tisku se značně zvyšuje obzvláště v případě, kdy má pacient anatomické abnormality nebo deformace. (Noorani, 2018) Na obrázku č. 7 je vytisknutý model srdce s vrozenou srdeční vadou, který byl použit při přípravě k operaci.

Obrázek 7: Fyzický 3D model srdce s vrozenou vadou pro předoperační přípravu



(Materialise, 2019)

3.5.3 Implantáty

Patrně nejspecializovanější využití 3D tisku je vytváření lékařských implantátů, které musí plnit svou funkci a zároveň být přijatelné pro organickou strukturu lidského těla. Dnešní typické implantáty jsou standardizované, to znamená, že musí být upravené na míru až na operačním sále, taky aby vyhovovaly potřebám pacienta. S využitím 3D technologie je možné vytvářet implantáty na míru podle potřeb každého pacienta individuálně. Díky takto předem vytvořeným implantátům, se snižuje doba strávená na operačním sále a výskyt případných komplikací během operace. Největší využití v budoucnu se předpovídá ortopedickým implantátům, zejména kyčelním a kolenním kloubům na míru. (Ivanko, 2018)

Nejhojněji se 3D tisk využívá ve stomatologii, trh 3D tisku v dentálním segmentu je téměř stejně veliký, jako trh veškerých dalších aplikací technologie 3D tisku v medicíně. Tisknou se korunky, můstky a celá další řada ortodontických aparátů. Společnost Invisalign, využívá 3D tisk pro tvorbu neviditelných rovnátek, které dokonale kopírují tvar chrupu konkrétního pacienta. Pomocí 3D technologie vytvoří lékař kompletní léčebný plán založený na počáteční poloze chrupu až po konečnou požadovanou pozici. Potom je vyrobena série průhledných rovnátek na míru, které se po dobu užívání postupně obměňují, dokud není léčba u konce. (Kloski, 2017) Na obrázku č. 8 je implantát pánevní kosti.

Obrázek 8: implantát pánevní kosti vyrobený pomocí 3D technologie



(Adlughmin, 2015)

3.5.4 Biotisk

Podle statistik zveřejněných Koordinačním střediskem transplantací bylo v roce 2018 na čekací listině 1176 a provedlo se 895 transplantací orgánů. Počet zemřelých zapsaných na čekací listině byl 96. (Statistiky | Koordinační středisko transplantací (KST), 2019)

Tento nedostatek by mohla technologie biotisku odstranit. 3D tisk by mohl mít velkou budoucnost ve tvorbě cév, kostí, tkáně ale i celých orgánů. Vývoj v tomto segmentu brzdí zejména etická otázka pěstování lidské tkáně. K tomu je zapotřebí užít lidských kmenových buněk, to není ve všech zemích povoleno a v zemích, kde to legislativa umožňuje, je jejich využití k vědeckým účelům striktně regulováno a monitorováno.

Biotisk je označení pro 3D tisk živých orgánů a tkání. V tomto procesu je prvním krokem provedení biopsie orgánu nebo tkáně, která má být nahrazena. Tato tkáň je po odebrání vyšetřena a určité buňky s regeneračním potenciálem jsou izolovány a namnoženy. Tyto buňky jsou poté smíchány s tekutým materiálem, který dodává buňkám kyslík a další živiny potřebná k udržení buněk při životě. Takto namíchané buňky jsou dále umístěny do jedné z dvou nádob určených pro tiskový materiál. V druhé nádobě je biomateriál, ze kterého se tiskne nosná struktura daného orgánu. Při samotném tisku se pak namíchané buňky umísťují do nosné konstrukce z biomateriálu. Pokud je dosaženo ideální

kombinace živin, růstového faktoru a správného prostředí, tyto buňky se spojí a vytvoří organickou tkáň. I když je tato technologie 3D tisku orgánů pouze zvětšenou verzí současných procesů pro růst orgánů v laboratořích, její využití umožňuje, aby byl proces přesnější a reprodukovatelnější. (Mihulka, 2019) Na obrázku č. 9 je k vidění biotiskárna používaná k tisku tkáně na univerzitě v Alabamě.

Obrázek 9: 3D biotiskárna



(Zhuang, 2020)

Schopnost tisknout tkáň a orgány je ohromným průlomem nejen ve světě 3D tisku ale i medicíně samotné. Při zdokonalení toho procesu by v budoucnu mohl vyřešit problém s nedostatkem dárců orgánů, jelikož bychom byli schopní si potřebné orgány vytisknout. Významný je také fakt, že tyto orgány jsou vyrobeny z buněk pacienta, a proto nehrozí odmítnutí orgánu tělem, tak jako tomu může být při darování. (Jirkovec, 2016)

Společnost TeVido BioDevices v současnosti vyvíjí tkáň pro kultivaci organických prsních implantátů pro ženy po rakovině prsu. Tým profesora Forgasca, stojí za úspěšným tiskem kožní tkáně, cév, jaterní tkáně a srdeční tkáně, která je schopna kontrakcí. Americký team Wake Forest Institute for Regenerative Medicine pracuje na metodě „in situ“, což je metoda, při které se kožní buňky natisknou přímo na tělo pacienta. Tělo pak funguje jako vlastní inkubátor a natištěné buňky by mělo kultivovat do výsledné celistvé tkáně. I když je dnes biotisk ve svých začátcích, je zjevné, že postupem času bude významnější a významnější ve světě 3D tisku i medicíny. Na obrázku č. 10 je vytisknutý nos z hybridního bioinkoustu, který podporuje životaschopnost buněk. (Carlota, 2019)

Obrázek 10: Biotisk nosu pomocí hybridního bioinkoustu



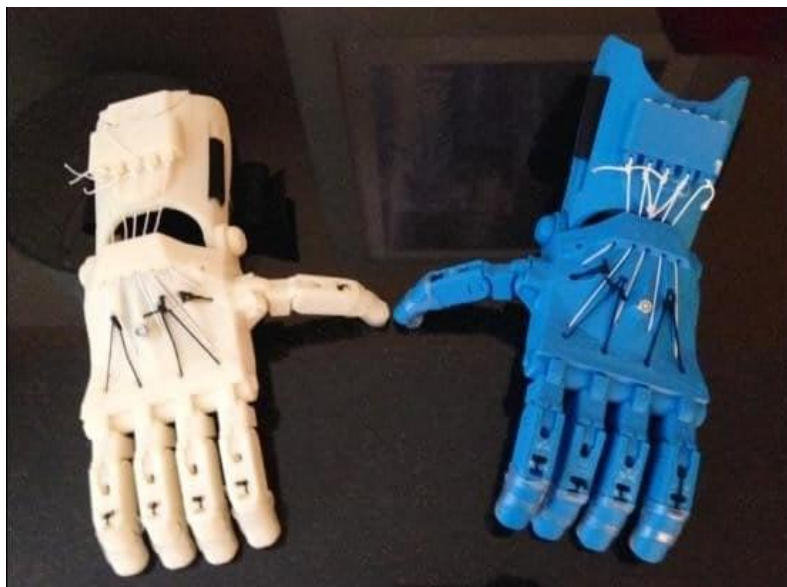
(Kloski, 2017)

3.5.5 Protézy

Aplikace 3D technologií pro výrobu protéz se přirozeně nabízí už jen kvůli podstatě protézy jako takové, ta musí být pro každého člověka vyrobena přesně podle jeho anatomie, tím pádem se hlavní přednost 3D tisku stává v tomto případě nezbytnou podmínkou. Tisk protéz nemusí být vůbec nákladný. V roce 2013 Paul McCarthy vytiskl svému synovi robotickou protézu na domácí 3D tiskárně. K tomu mu stačil návod, který našel na internetu. Jeho syn se narodil bez prstů na jedné ruce a díky vytištěné mechanické protéze mohl poprvé uchopit nejrůznější předměty, což výrazně zlepšilo jeho kvalitu života. Cenu takto vyrobené protézy McCarthy vyčíslil na pár amerických dolarů.

V rozvojových zemích, či oblastech postižených válkou je 3D technologie často jediným způsobem, jak pacientovi protézu obstarat, ať už je to z důvodů finanční náročnosti klasických metod nebo nedostatečného přístupu k lékařské péči. Team amerických vědců se právě o pomoc v těchto oblastech snaží. Vědci z univerzit Friedrich Alexander Universität a Fachhochschule Lübeck pracují na projektu 3DPro. Pro svůj projekt vytvořili vlastní systém pro 3D skenování těla, který by měl být jednoduchý na použití a ke skenování by měli stačit normální kamery. V ideálním případě by pak protézu mohl vytvářet i nezkušený člověk, bez asistence odborníků. Pro samotný tisk by opět měla postačit běžná 3D tiskárna, která bude pro tisk využívat recyklovaný plast, získaný například z kelímků. Na obrázku č. 11 jsou protézy ruky, vytisknuté na domácí tiskárně z volně dostupného online modelu. (Manero 2018)

Obrázek 11: Protézy rukou vytisknuté domácí tiskárnou

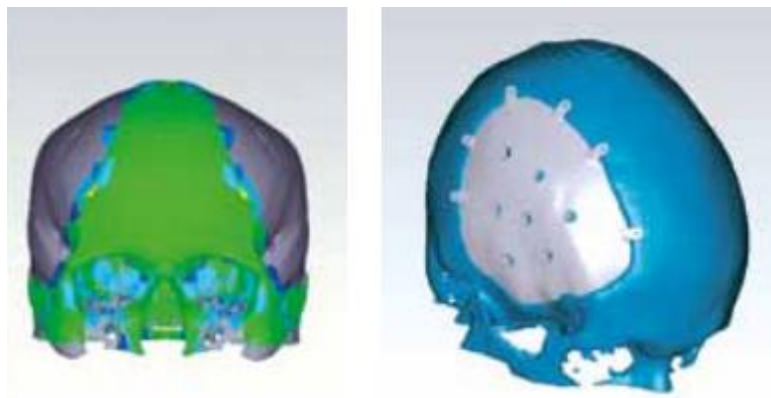


(Suarkeo, 2019)

3.5.6 **Kranioimplantáty**

Kranioimplantát je určený k anatomické rekonstrukci kostních defektů v oblasti lebky a obličeje. Tyto defekty vznikají například dekompresivní kraniektomií, což je zákrok, při kterém je pacientovi částečně odstraněna část kosti, aby se snížil nitrolebeční tlak, či tříštivou zlomeninou, odstraněním kosti kvůli nádorovému onemocnění anebo infekcí. Hlavním cílem kranioplastiky je zabránit úrazům a infekci nechráněného mozku, opravit kranialní deformace a obnovit estetiku lebky. V České republice se výrobou kranioimplantátů zabývá například firma LASAK s r.o., která svým zákazníkům nabízí 2 různé modely. Prvním z nich je Cranio-Oss TI z technicky čistého titanu. Druhou variantou je Cranio-Oss PEEK vyrobený z Polyetereterketonu. Na začátku výrobního procesu jsou pacientovi provedeny CT snímky příslušné anatomické oblasti. Takto pořízené snímky potom slouží jako podklad pro vytvoření trojrozměrné rekonstrukce postižené oblasti a anatomicky správný 3D model lebky (nalevo) s návrhem implantátu, k vidění na obrázku č. 12. (Cranio-Oss, 2020)

Obrázek 12: 3D model lebky a návrh implantátu.



(Cranio-Oss, 2020)

Dalším krokem je vytvoření fyzických modelů pro kontrolu shody se vstupními údaji. Pokud model splňuje požadavky, chirurg zvolí polohu upevňovacích prvků. Posledním krokem je samotná výroba. Ta se neprovádí pomocí 3D tisku, ale pomocí konvenčních výrobních metod, jako je obrábění, a to soustavou CNC strojů. (Cranio-Oss, 2020)

Použitý materiál je vždy vybrán na základě individuálního případu. Výroba kranioimplantátu z titanu je levnější, titan také nabízí větší pevnost a dokáže se lépe adaptovat s okolními kostmi. Hlavní nevýhodou titanu je fakt, že je radiopakní, což znemožňuje zobrazení tkáně (například mozku) pod implantátem na rentgenu a podobných zobrazovacích zařízeních. Kranioimplantát z polyetereterketon má mechanické vlastnosti blízké kosti stejně tak jako hmotnost. Oproti titanu je PEEK radiolucenční, takže lze pozorovat tkáň za implantátem pomocí rentgenu a dalších metod. Nevýhodou pak je nedostatek dlouhodobých klinických studií a neschopnost materiálu reagovat s okolními kostmi. Na obrázku č. 13 je vidět kranioimplantát z titanu na rentgenovém snímku. (Kloski, 2017)

Obrázek 13: radiopakní kranioimplantát z titanu na rentgenovém snímku



(TH Medical, 2019)

Podle studie vypracované na Universitě v Soulu se použitím 3D modelu během kranioplastiky zkrátila doba operace až o polovinu. Při použití 3D technologie se střední hodnota doby strávené na sále pohybovala kolem 184 ± 26 minut, zatímco v předchozích případech bez využití 3D technologie se tato hodnota značně zvyšuje na 285 ± 128 minut. Kromě časové úspory studie uvádí jako největší výhodu fakt, že většina použitých implantátů nevyžadovala buď žádná, či minimální oříznutí před tím, než správně zapadla do lebečního defektů. (Maricevich, 2019)

Ve výjimečných případech je možné použít materiál ve formě kostního štěpu, například z žeber, kterým lze léčit poranění minimálního rozsahu. Výhodou v tomto případě je absolutní kompatibilita a nízké riziko infekce. Aby kostní štěpy mohly být použity, musí být odebrány s dostatečným odstupem od plánované operace a hluboce zmrazeny. Rizikem je v tomto případě možnost nepředvídatelné kostní resorpce po zákroku. (Veldman, 2018)

Výběr vhodného materiálu určí lékař na základě několika faktorů:

- riziko infekce
- rozsah defektu
- zdravotní stav
- estetický vzhled
- cena

Nejvyužívanějším plastem při kranioplastice je akrylátové sklo (PMMA, Polymethylmethakrylát). Oproti titanu umožňuje využití rentgenů a jiných zobrazovacích technik pro sledování tkáně pod implantátem, v případě výskytu nádorového onemocnění, nebo zánětu. Oproti biomateriálu PEEK je PMMA výrazně levnější. (Rauker, 2017)

V praktické části této bakalářské práce proto bude pro realizaci kraniointplantátu využit materiál s vlastnostmi podobnými jako PMMA. Z možných metod 3D tisku bude využita metoda FDM, která se nejlépe hodí pro zpracování materiálu ve formě pevného vlákna. V tabulce č. 2 jsou porovnány mechanické vlastnosti materiálu PMMA a ABS, který bude využit pro realizaci prototypu v praktické části. Z tabulky lze vyčíst vysokou podobnost mechanických vlastností obou materiálů.

Tabulka 2: Porovnání ABS a PMMA

| Plast | Hustota (g/cm³) | Pevnost v tahu (N/mm²) | E-modul (N/mm²) | Tvarová stálost – HDT 1,8 Mpa (°C) | Tepelná odolnost (°C) max. krátkodobá | Tepelná odolnost (°C) max. trvalá | Tepelná odolnost (°C) min. trvalá | Navlhavost při nasycení % |
|--------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|---|--|--|--|----------------------------------|
| ABS | 1,02-1,09 | 45-65 | 2200-3000 | 95-105 | 85-100 | 75-85 | -40 | 0,3-0,5 |
| PMMA | 1,15-1,20 | 38-75 | 2700-3200 | 75-105 | 85-105 | 65-90 | -40 | 0,6 |

(Vacula, 2018, vlastní zpracování)

Výroba kraniointplantátů pomocí 3D technologie je ve světě zaběhnutým výrobním procesem, zejména v zemích, kde tato operace a náklady s ní spojené nejsou hrazeny pojišťovnou a pacient musí uhradit všechny nebo většinu nákladů. V takovém případě je cena důležitým faktorem. Pokud tedy zdravotní stav pacienta umožňuje použití implantátů vyrobeného z PMMA využívá se technologie Rapid prototyping k jeho realizaci. K tisku se používají profesionální tiskárny pracující na principu FDM, které ovšem musejí mít udělené příslušné certifikace k použití ve zdravotnictví. Při použití jiného materiálu se 3D tisk využívá pouze jako pomocná technologie při výrobě, nevyužívá se však k výrobě koncového

implantátu. V tabulce č. 3 jsou uvedeny orientační ceny implantátů vyrobených a používaných v Mexiku.

Tabulka 3: Ceny implantátů v Mexiku

| Materiál | Titan | PEEK | PMMA |
|----------|---------------------|----------------|---------------|
| Cena | 55 000 – 130 000 Kč | cca 180 000 Kč | cca 15 000 Kč |

(De La Peña, 2018, vlastní zpracování)

4 Vlastní práce

V rámci vlastní práce byl nejdříve detailně popsán samotný proces modelace kranioimplantátu v programu Geomagic sculpt, konkrétně jeho bezplatné verze, od firmy 3D systems. Následně byla popsána realizace vytvořeného modelu, na jehož základě byla provedena technicko-ekonomická analýza z níž byly formulovány závěry.

4.1 Postup tvorby kranioimplantátu

Před samotnou modelací je potřeba provést CT vyšetření pacienta příslušné anatomické oblasti, kde je skelet poškozen. Z takto získaných dat se vytvoří anatomicky přesný 3D model lebky, který slouží jako výchozí podklad pro vytvoření prvotního návrhu kranioimplantátu. Po dokončení modelace je užito technologie rapid prototypingu k vytvoření fyzického modelu. Ten slouží k chirurgovi pro kontrolu shody se vstupními daty. Pokud je model v pořádku, chirurg zvolí polohu upevňovacích prvků a další případné úpravy v ploše implantátu.

4.2 Geomagic Sculpt

Pro vytvoření modelu zvolil autor software pro tvorbu 3D grafiky, se zaměřením na využití ve zdravotnictví, Geomagic Sculpt. V následujícím seznamu budou uvedeny jednotlivé nástroje použité při modelaci spolu s popisem jejich funkce.

- Select – Slouží k označení aktivního prvku, se kterým chce uživatel pracovat, případně posouvat v prostoru v jakékoliv rovině.
- Draw curve – Slouží k nakreslení 3D křivky, umožňuje křivku nakreslit do prostoru, či křivku „připnout“ na povrch již existujícího objektu.
- Split curves – Slouží k rozdělení 3D křivek do jednotlivých křivek v bodě, či bodech, které se dají definovat.
- Curve Network to SubDivison – Slouží k vytvoření 3D roviny, určenou sítí křivek.
- Edit SubD – Slouží k využití nástrojů pro úpravu 3D roviny.
- Convert to Clay – Slouží k přetransformování objektu do clay verze daného objektu, umožňuje používat další nástroje pro úpravu a určit tloušťku objektu.

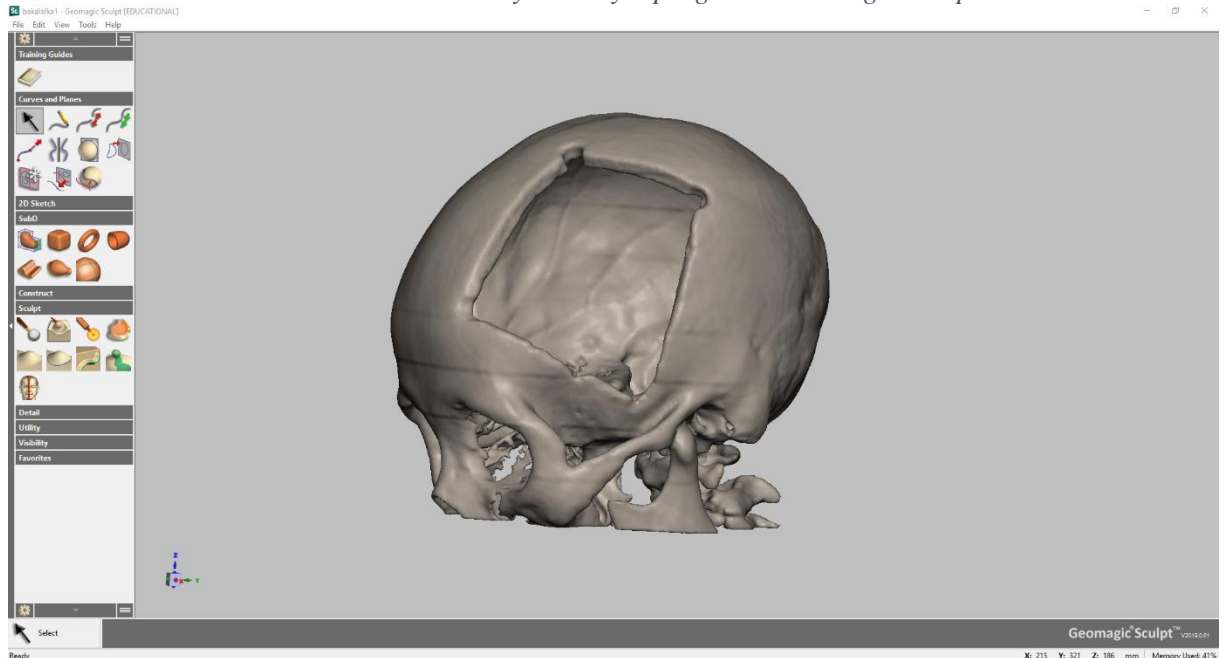
- Tug – Slouží ke změně hloubkové souřadnice vybrané oblasti.
- Smooth – Slouží k úpravě oblasti na základě jejího okolí.

4.3 Modelace kraniointantátu

4.3.1 Vstupní data

Výchozí CT snímek hlavy, podle kterého byl implantát vytvářen byl převzat ze studie zabývající se na automatizovaným procesem modelace kraniointantátu. Jedná se pouze o CT sken hlavy pacienta s kraniální defektem v oblasti levé čelní kosti, který je k vidění na obrázku č. 14. (Egger, 2017)

Obrázek 14: CT sken hlavy načtený v programu Geomagic Sculpt



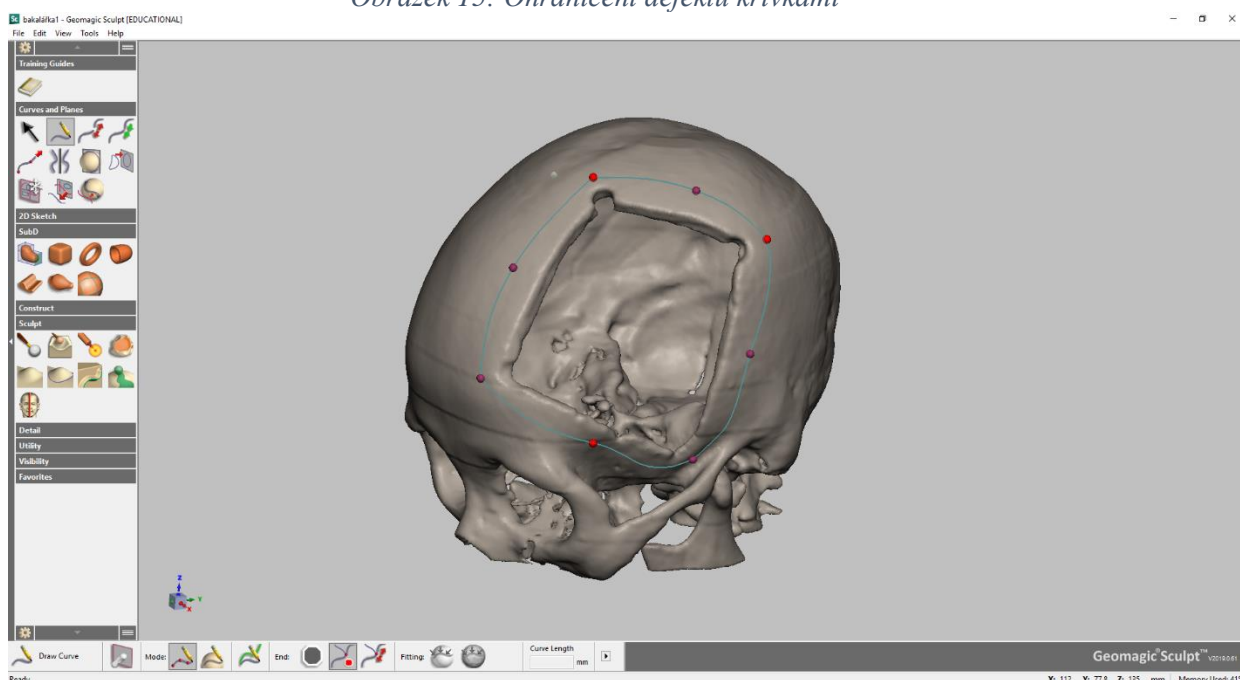
(Egger, 2017, vlastní zpracování)

4.3.2 Proces modelace

Celý proces modelace vychází z instruktážního videa od výrobce softwaru Geomagic Sculpt, ve kterém demonstrují modelaci kraniointantátu.

Prvním krokem k vytvoření implantátu je označení místa defektu soustavou křivek, které ohraničují postiženou oblast využitím funkce draw curve, viz obrázek č. 15. Při kreslení křivek je důležité správné nastavení parametru fitting, aby se křivky vykreslovaly na povrch již existujícího objektu, či do prázdného prostoru.

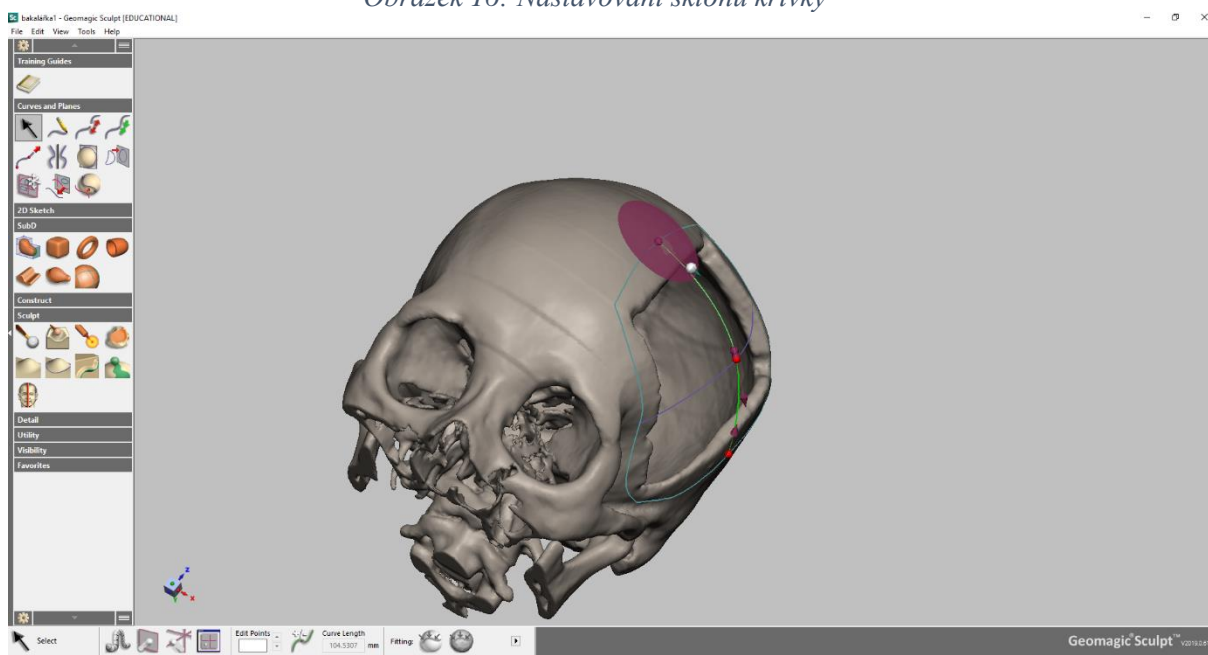
Obrázek 15: Ohraničení defektu křivkami



(Vlastní zpracování)

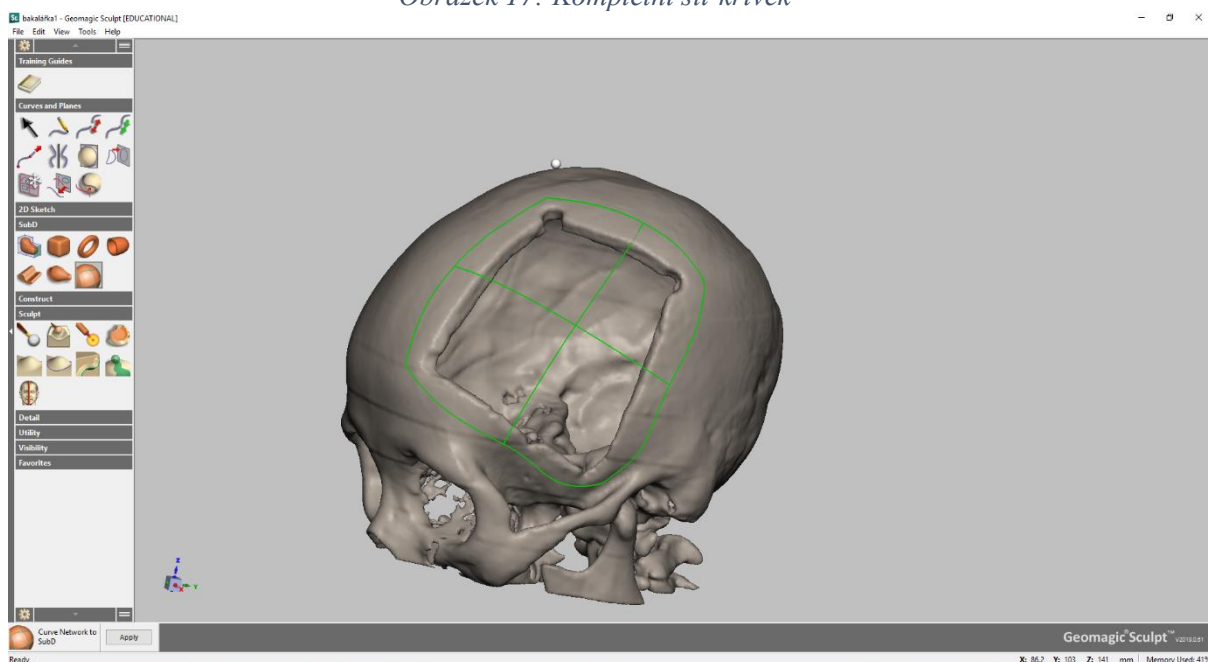
K takto vytvořeným křivkám je potřeba přikreslit další dvě do pomyslného kříže, čímž vznikne síť v prostoru nad defektem, která bude sloužit jako podklad pro vytvoření 3D roviny, ve které se bude implantát nacházet. Navrhnutým křivkám je nutné nastavit správný tvar a sklon od povrchu lebky, aby vzniklá rovina nebyla příliš vypuklá nebo naopak příliš plochá (implantát by měl co nejlépe kopírovat přirozený tvar lebky.) Na obrázku č. 16 je vidět proces nastavování sklonu křivky k ploše lebky, aby bylo dosaženo co možná nejlepšího tvaru implantátu. Na obrázku č. 17 je znázorněna hotová síť křivek.

Obrázek 16: Nastavování sklonu křivky



(Vlastní zpracování)

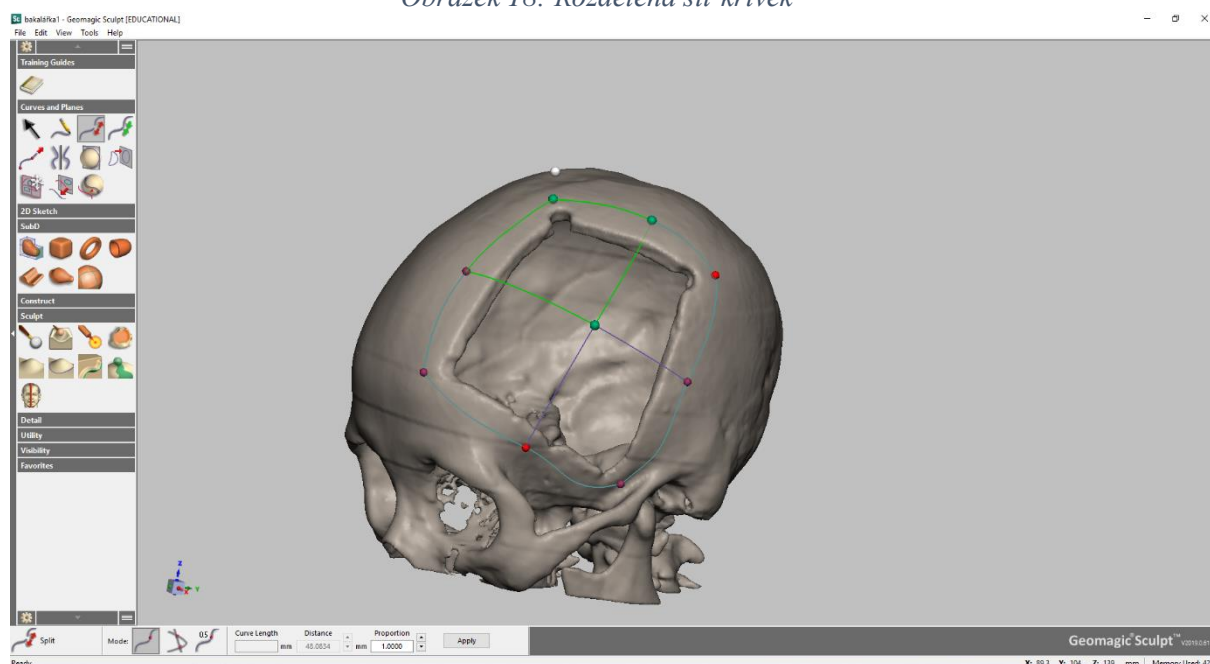
Obrázek 17: Kompletní síť křivek



(Vlastní zpracování)

Tyto vytvořené křivky je poté nutné rozdělit funkcí split curves. Tato funkce rozdělí síť na 12 vzájemně propojených křivek, které je možné individuálně upravovat podle potřeb. Na obrázku č. 18 jsou zeleně označené křivky v levé horní části. Zelené (aktuálně ve výběru) a červené body pak určují místa, kde se křivky vzájemně protínají.

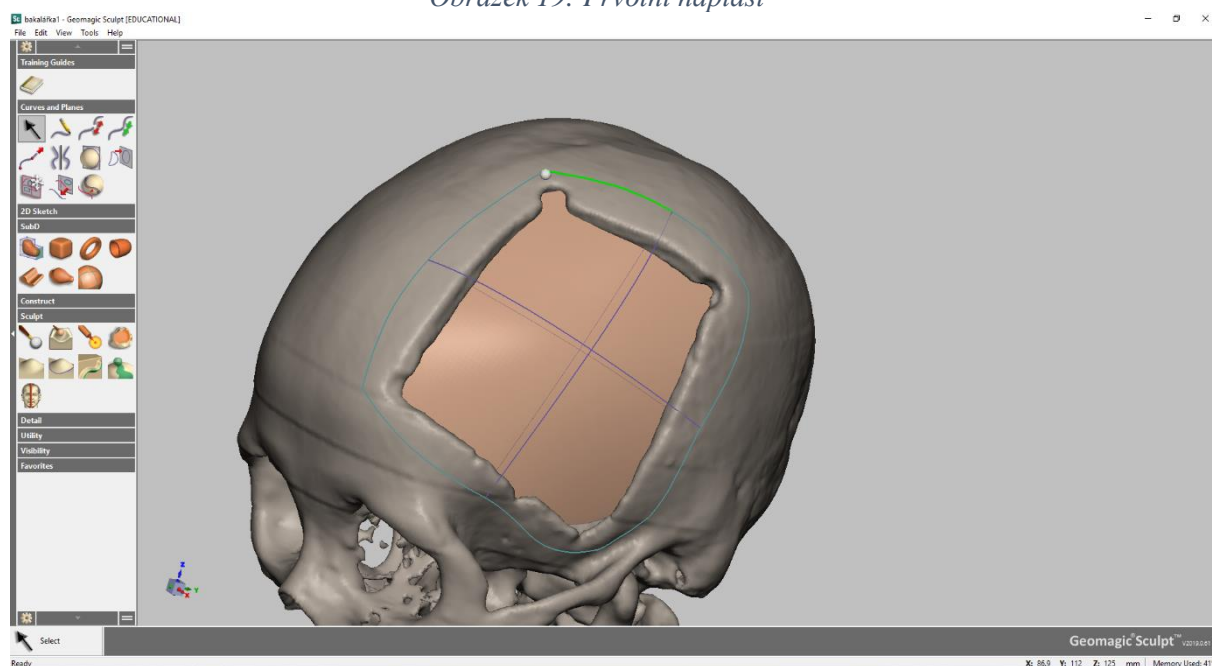
Obrázek 18: Rozdělená síť křivek



(Vlastní zpracování)

Pomocí funkce Curve Network to SubDivision je možné takto rozdělené křivky převést na 3D rovinu, tím získáme prvotní „náplast“ ze které budeme následně implantát modelovat do konečné podoby. Na obrázku č. 19 je tato náplast zobrazena. V pravé dolní části je vidět značná mezera mezi lebkou a vytvořenou náplastí, stejně tak, jako v pravé horní části. Po celém okraji implantátu je pak vidět, že je zasazen příliš do vnitřku lebky namísto aby kopíroval původní tvar lebky po okraji defektu.

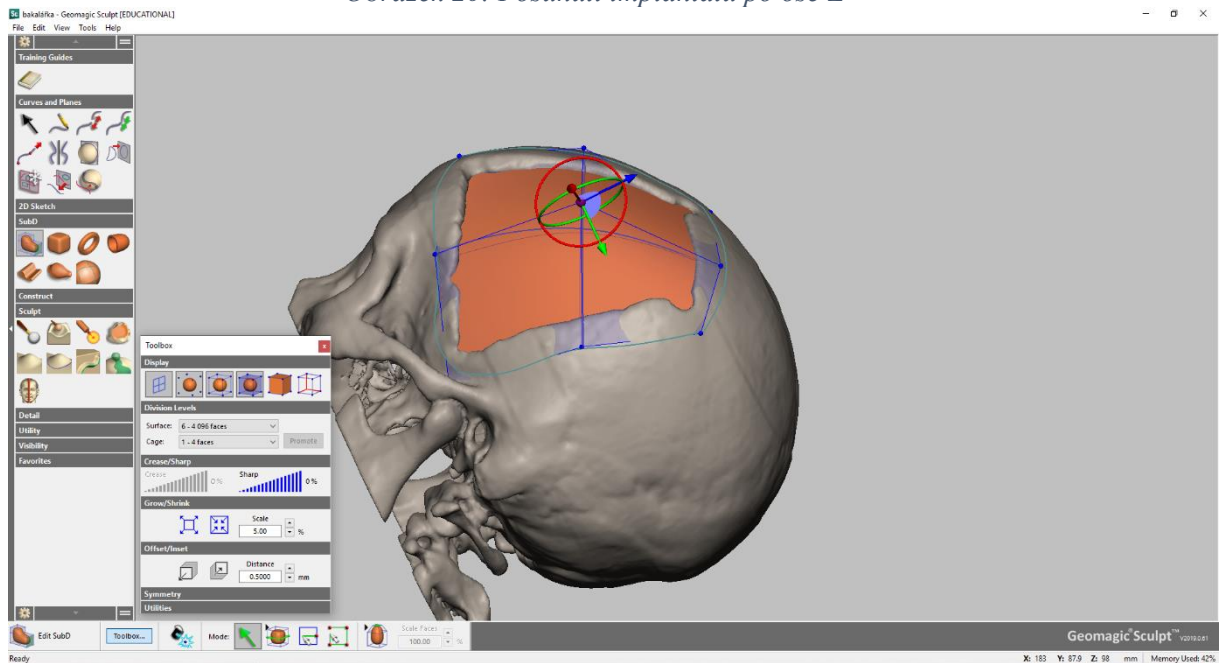
Obrázek 19: Prvotní náplast



(Vlastní zpracování)

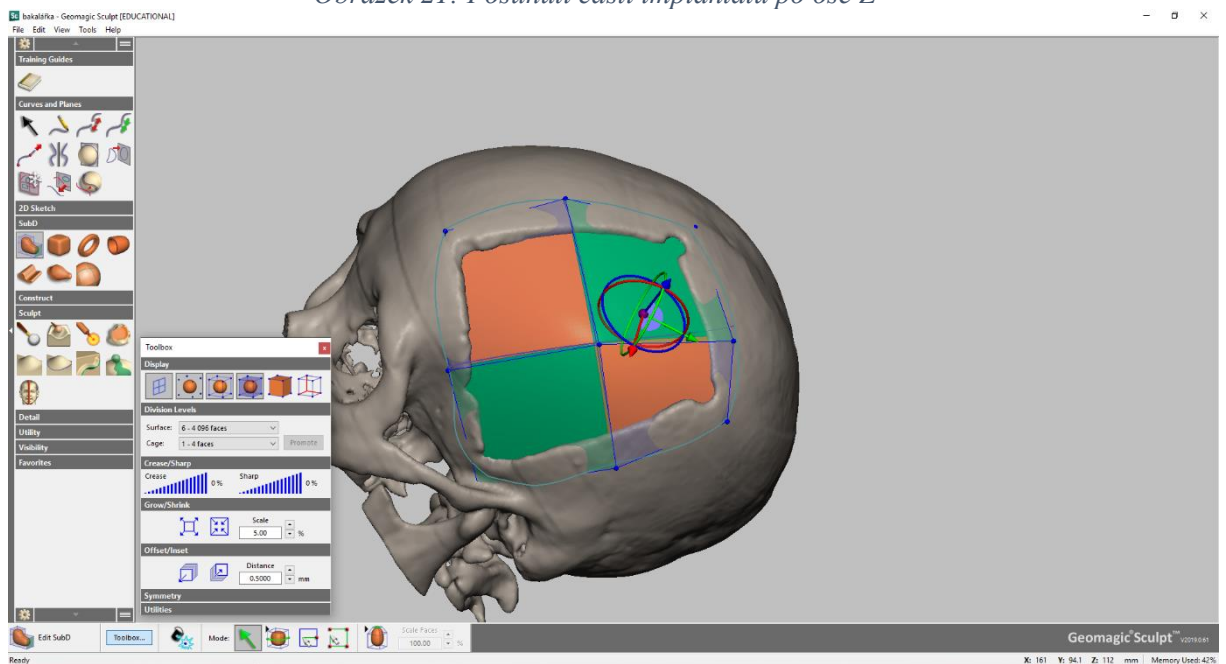
Dalším krokem je úprava celkové hloubky implantátu, tedy povytažení celého implantátu po ose „Z“ směrem nahoru, k vidění na obrázku č. 20. Tím se zaplní mezery mezi implantátem a lebkou a částečně se vyřeší kopírování okrajů s původní lebkou. Díky tomu, že křivky byly v předchozím kroku rozděleny, je nyní možné pracovat jen s částmi plochy implantátu. Na obrázku č. 21 je znázorněno vytažení částí ploch implantátu, rovněž po ose Z, jelikož celkový posun plochy by zapříčinil nadbytečné vyzdvižení v jiných částech implantátu. Tím, že se upravuje jen část implantátu, vzniknou mezi jednotlivými částmi nesrovnalosti. Implantát by byl nepravidelně „zkroucen“ namísto lehce vypouklého tvaru, který má původní lebka v dané části. Tyto nesrovnalosti tak budou muset být odstraněny v pozdějších úpravách.

Obrázek 20: Posunutí implantátu po ose Z



(Vlastní zpracování)

Obrázek 21: Posunutí částí implantátu po ose Z

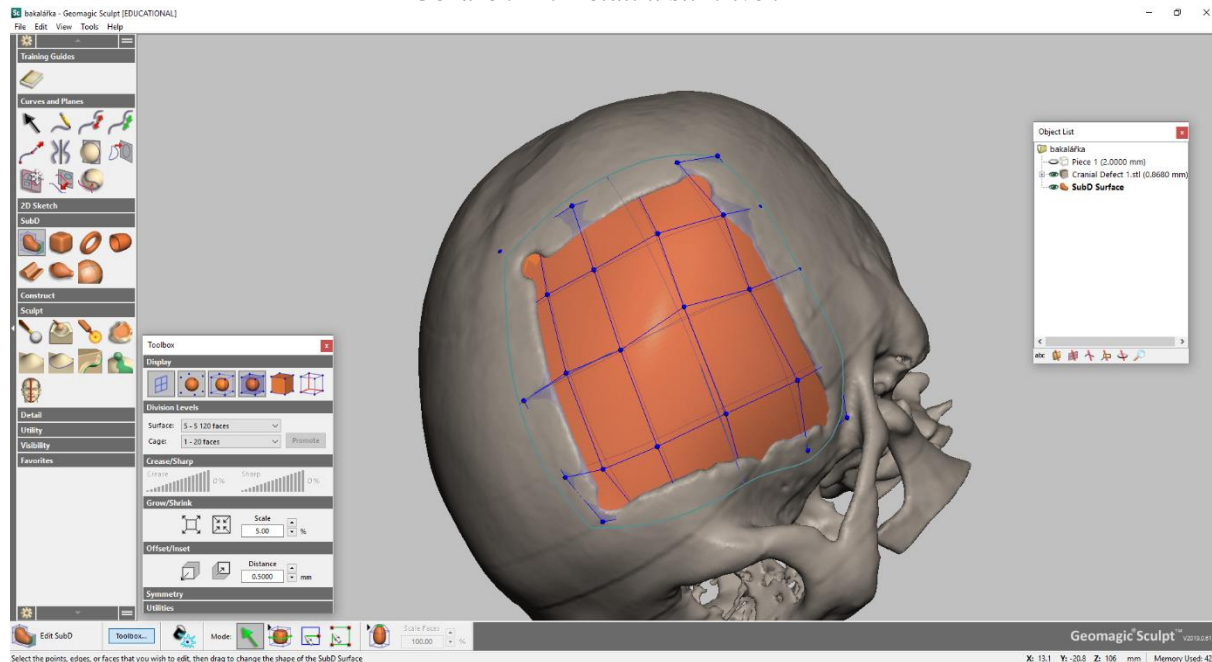


(Vlastní zpracování)

Vzhledem k tomu, že okraje defektu jsou příliš nepravidelné, je potřeba implantát rozdělit na menší části, než je čtvrtina vzniklá rozdělením křivek, a pracovat s nimi, aby byl zajištěn ideální tvar implantátu. Takováto síť je zobrazena na obrázku č. 22. Jednotlivé body,

spojující křivky, se nacházejí v různých rovinách, to je důsledkem pohybu v různých osách pro zachování ideálního tvaru a zároveň vyrovnání nepřesností u okrajů implantátu.

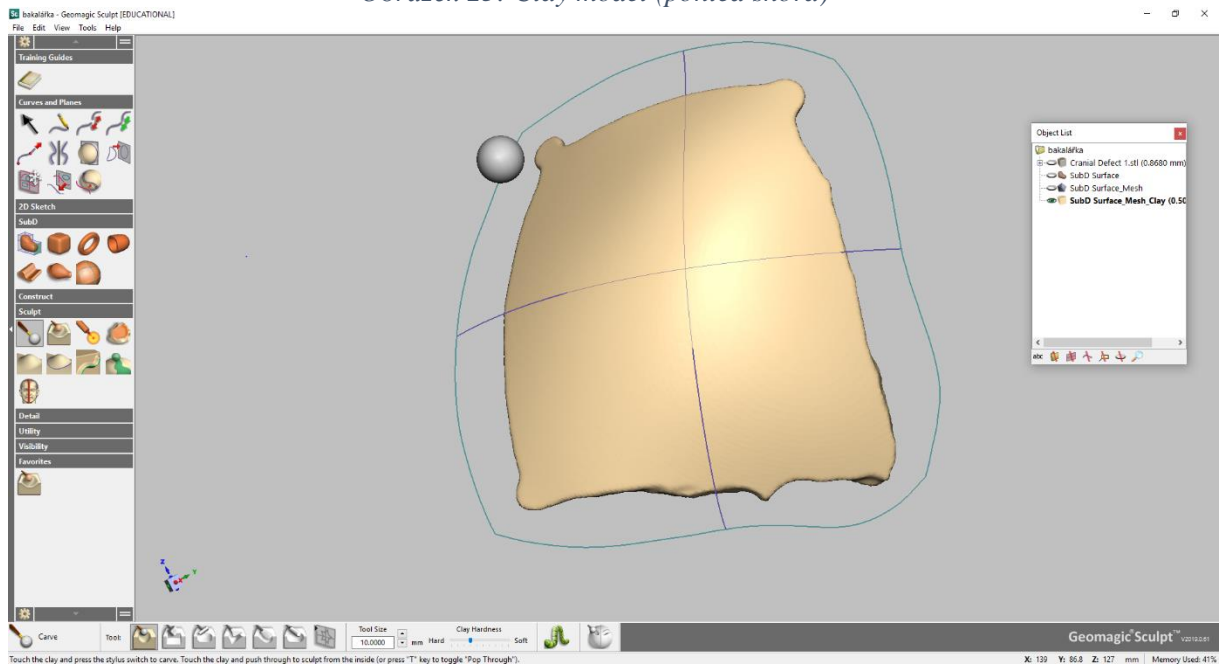
Obrázek 22: Detailní síť křivek



(Vlastní zpracování)

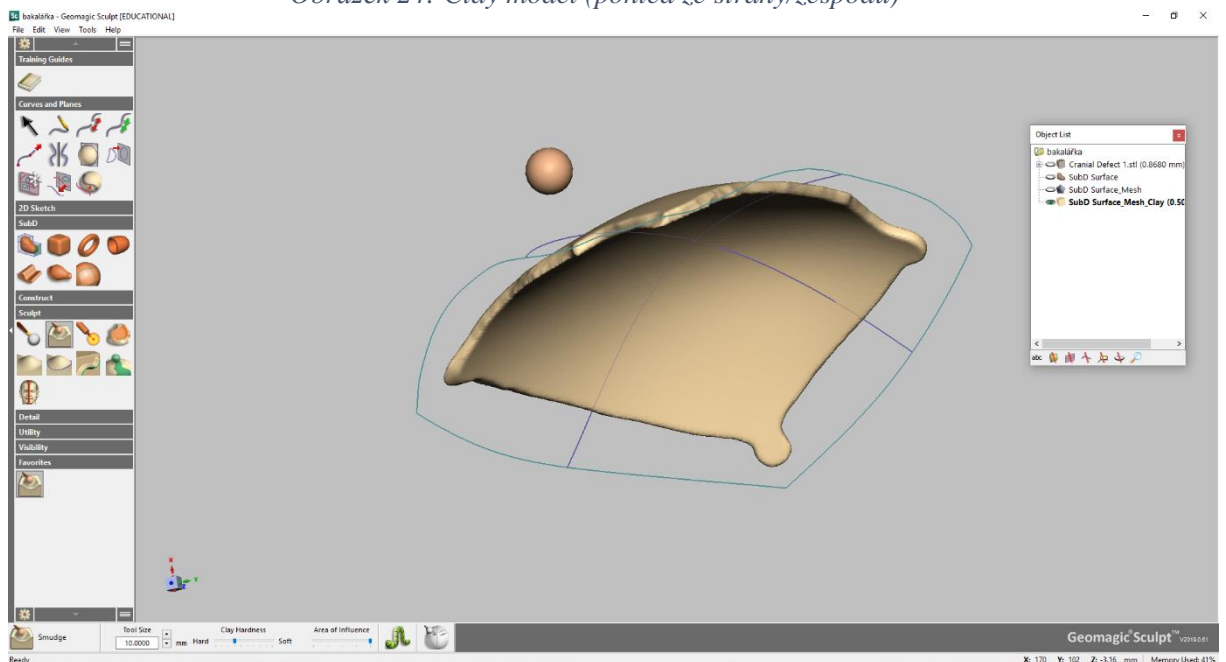
Takto upravený model je následně převeden do takzvaného Clay modelu. Při práci s Clay modelem je možné nastavit tloušťku, což značně usnadní vytvoření ideálního tvaru, na obrázku č. 23 a č. 24 je zobrazen vytvořený model, bez původního CT skenu lebky, převedený do Clay modelu s tloušťkou 1 cm.

Obrázek 23: Clay model (pohled shora)



(Vlastní zpracování)

Obrázek 24: Clay model (pohled ze strany/zespodu)

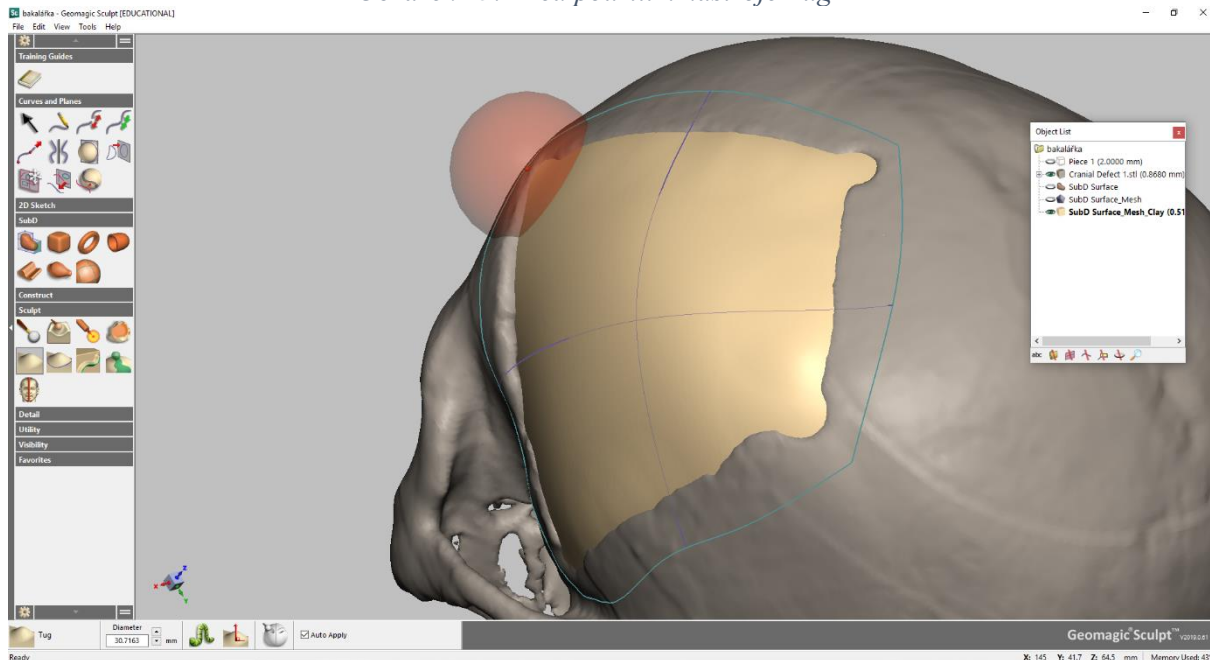


(Vlastní zpracování)

Práce s Clay modelem umožňuje použití nástroje Tug, která slouží k vyzdvižení či k zapuštění vybrané části modelu. Na obrázku č. 25 je detailní pohled na místo, kde se model dotýká původní lebky. V ideálním případě by neměl být znatelný přechod mezi původní lebkou a vytvořeným modelem, k odstranění toho přechodu je použit právě nástroj Tug,

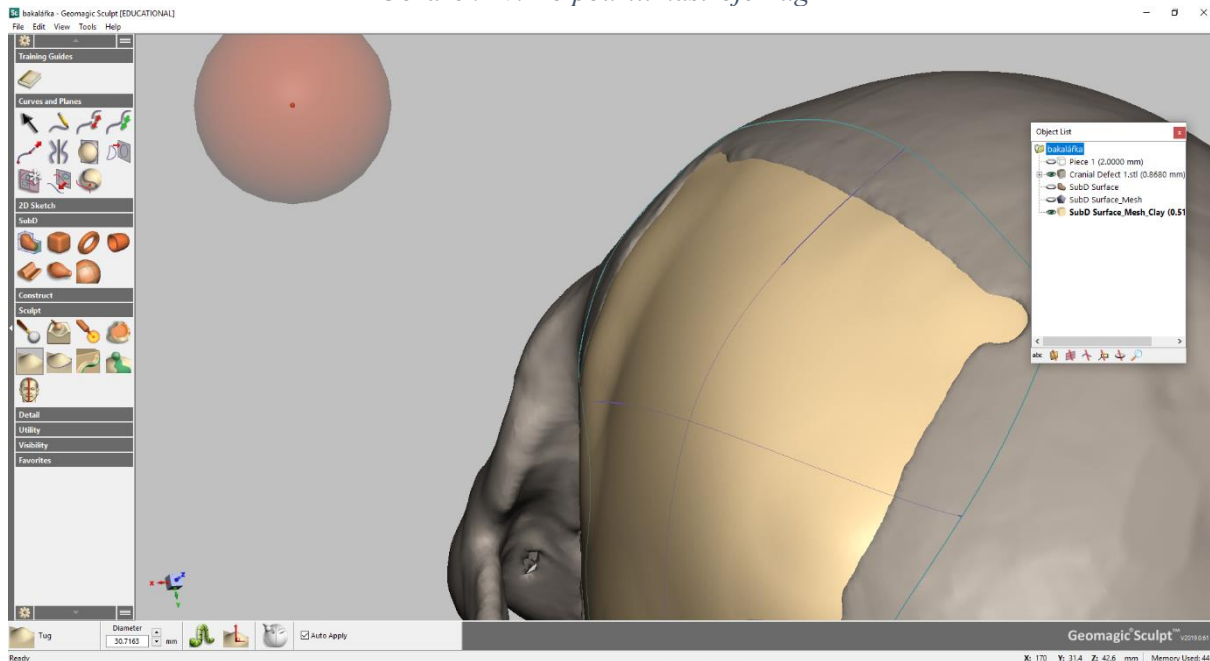
kteřá okraj implantátu povytáhne a zarovná s okrajem původní lebky. Na obrázku č. 26 je model po úpravě funkcí Tug.

Obrázek 25: Před použitím nástroje Tug



(Vlastní zpracování)

Obrázek 26: Po použití nástroje Tug

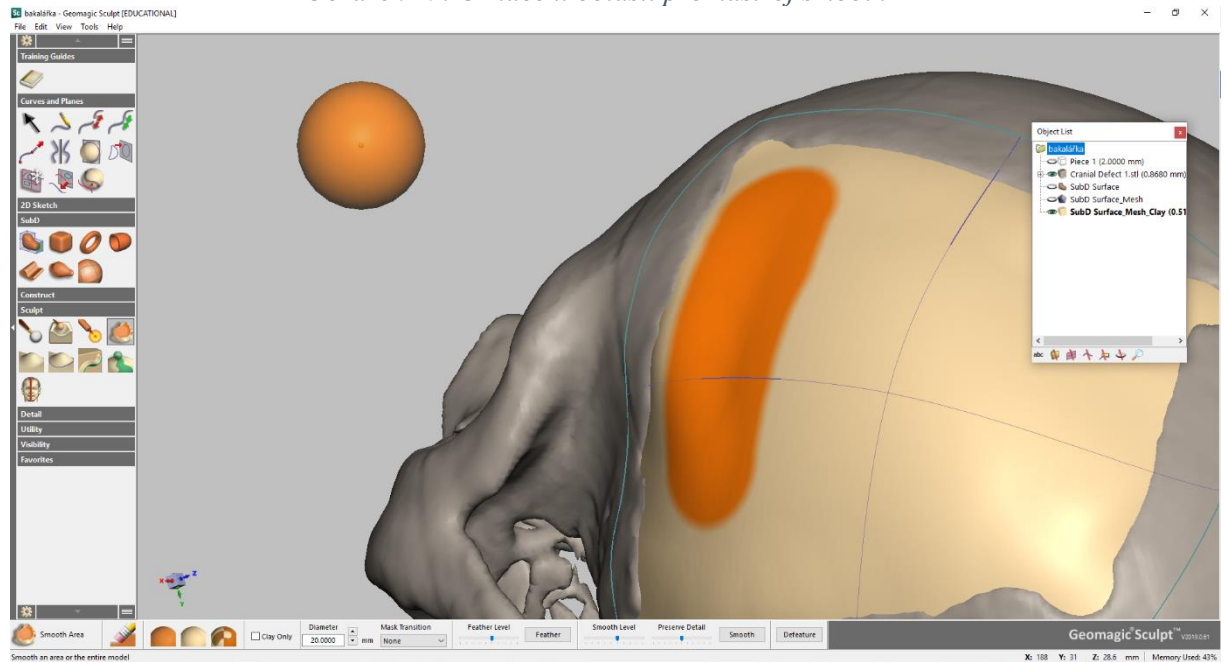


(Vlastní zpracování)

Použitím nástroje Tug je zarovnan okraj implantátu s původní lebku. V důsledku toho však vznikla propadlá oblast mezi okrajem a zbytkem implantátu (viditelné na obrázku

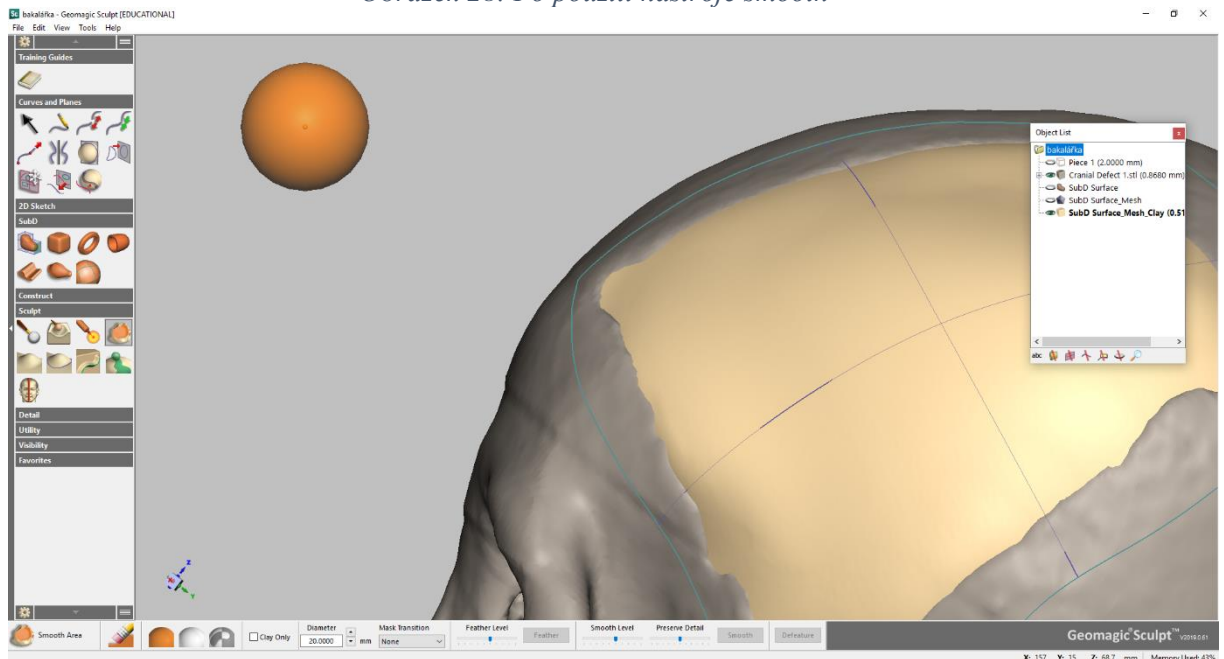
č. 26), která se funkcí Tug nedá odstranit (stále by vznikala vyvýšená oblast). Pro zarovnání této oblasti je zapotřebí využít nástroje smooth. Tento nástroj vyrovná nesrovnalosti, a to na základě výpočtu nových voxelů (částice objemu představující hodnotu v 3D prostoru). Podle hodnot okolních voxelů ve vybrané oblasti vypočítá novou hodnotu voxelů a tím vytvoří vyhlazený povrch. Na obrázku č. 27 je vidět označená oblast, kde bude použit smooth. Na obrázku č. 28 je již daná oblast upravena.

Obrázek 27: Označení oblasti pro nástroj smooth



(Vlastní zpracování)

Obrázek 28: Po použití nástroje smooth



(Vlastní zpracování)

Takto upravený model už je připraven k výtisku, z programu je nutné model vyexportovat ve vhodném formátu, například STL. (Geomagic, 2015)

4.4 Realizace implantátu

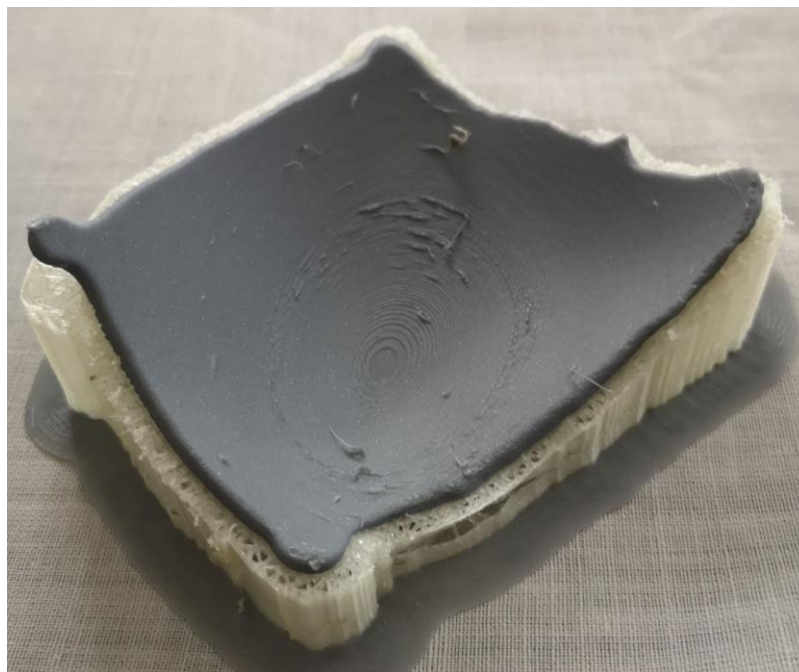
4.4.1 Parametry tiskárny a filament

Implantát byl realizován na tiskárně Ultimaker 3 s následujícími parametry:

- Požadavky na napájení: 100–240 V, 4 A, 50–60 Hz
- Průměr trysky: 0,4 mm
- Průměr tiskové struny: 2,85 mm
- Výška vrstvy: 0,1 mm

Pro realizaci implantátu byl zvolen materiál Ultimaker ABS díky vlastnostem a ceně podobné jako u PMMA a kompatibilitě s vybranou tiskárnou. Jako podpurný materiál byl použit Ultimaker NFC PVA. Na obrázku č. 29 (pohled shora) je vidět vytisknutý implantát s podpurnou konstrukcí.

Obrázek 29: Implantát s nosnou konstrukcí



(Vlastní zpracování)

Podpůrná konstrukce z PVA je rozpustná ve vodě. Ponořením do vody tedy dojde k oddělení od implantátu. Na obrázku č. 30 je implantát očištěn od pomocné konstrukce.

Obrázek 30: Implantát bez nosné konstrukce



(Vlastní zpracování)

4.5 Analýza nákladovosti výroby

Nákladovost výroby prototypu kranioimplantátu je určena jako součet všech výrobních nákladů. Vzhledem k vysokým vstupním nákladům (107 632 Kč), je určena cena bez vstupních nákladů i cena včetně vstupních nákladů.

4.5.1 Cena bez vstupních nákladů

Jednotlivé variabilní nákladové položky, které budou v kalkulačním vzorci započteny:

- Proces modelace (mzda) – Q
- Doba tisku (spotřeba el. energie) – E
- Spotřeba materiálu – M

Proces modelace autorovi zabral 8 hodin. Průměrná hrubá měsíční mzda v roce 2018 na pozici 3D grafika byla podle českého statistického úřadu 34 487 Kč. Pro vyčíslení nákladu za proces modelace je potřeba určit superhrubou mzdu, přičtením 24, 8 % za sociální pojištění a 9 % za zdravotní pojištění k hrubé mzdě, které za zaměstnance platí firma. Průměrná superhrubá mzda zaokrouhlená na celé koruny je 46 144 Kč. Průměrný počet odpracovaných hodin za měsíc na stejné pozici a ve stejném období byl 173,8 h. (Český statistický úřad, 2019) Ohodnocení položky Proces modelace (Q) získáme výpočtem následujícího vzorce:

$$Q = \left(\frac{\text{Měsíční superhrubá mzda}}{\text{Měsíční hodinový fond}} \right) \times \text{Doba modelace}, \quad (4.1)$$

Po dosazení do vzorce $Q = \left(\frac{46\,144\text{ Kč}}{173,8\text{ h}} \right) \times 8\text{ h}$ a zaokrouhlení na celé koruny získáme hodnotu $Q = 2\,124\text{ Kč}$.

Čas, po který byla tiskárna v provozu je 11 hodin a 28 minut, po převedení na hodiny 11,47 h. Na území české republiky byla průměrná cena silové elektřiny pro firmy (C02d) v roce 2018 bez DPH 1,71 Kč za kWh (kilowatthodina). (Bohemia Energy, 2019) K výpočtu je potřeba znát příkon tiskárny Ultimaker 3, který není výrobcem udáván a je nutné ho vypočítat. Výrobce k tiskárně udává hodnotu elektrického napětí (U) 100–240 V (počítáme

s hodnotou 240 V) a hodnotu elektrického proudu (I) 4 A. Okamžitý elektrický příkon (P) se pak vypočítá jako:

$$P = U \times I, \quad (4.2)$$

Po dosazení do vzorce $P = 240 \text{ V} \times 4 \text{ A}$ získáme hodnotu okamžitého elektrického příkonu $P = 960 \text{ W}$. Nyní již máme všechny potřebné proměnné a můžeme určit cenu za spotřebovanou elektrickou energii podle vzorce:

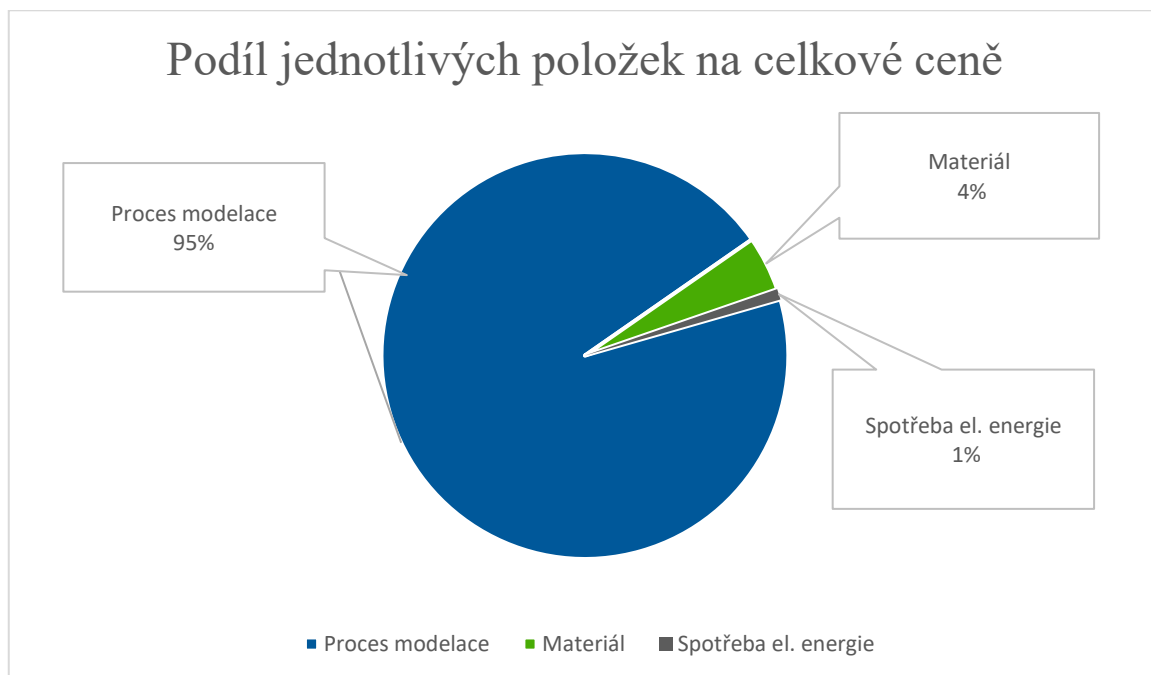
$$E = \text{doba tisku} \times \text{příkon} \times \text{cena}, \quad (4.3)$$

Dosazením do vzorce $E = 11,47 \text{ h} \times 0,96 \text{ kW} \times 1,71 \text{ Kč}$ získáme cenu za spotřebu elektrické energie $E = 18,83 \text{ Kč}$.

Dalším variabilním nákladem je spotřebovaný materiál, zde je nutné rozlišit materiál, ze kterého byl vytisknut samotný implantát a materiál využitý na tisk pomocné nosné konstrukce. Tiskárna Ultimaker 3 určí množství spotřebovaného materiálu ještě před tiskem samotným na základě modelu. Firma Ultimaker má v České republice pouze jednoho oficiálního distributora, který prodává filamenty značky Ultimaker a tím je firma 3Dwiser. Veškeré ceny proto budou převzaty od tohoto prodejce. Materiálu PVA (nosná konstrukce) se při tisku spotřebovalo 23 g. Cena tohoto filamentu bez DPH činí 2 290 Kč za 750 g. Po přepočtu a zaokrouhlení na celé koruny vychází cena PVA spotřebovaného při tisku na 70 Kč. Materiálu ABS se při tisku spotřebovalo 21 g. Cena toho materiálu bez DPH je 999 Kč za 750 g. Po přepočtu a zaokrouhlení na celé koruny vychází cena spotřebovaného ABS materiálu na 28 Kč. Dohromady se tedy spotřeboval materiál v hodnotě 98 Kč. Pro srovnání, pokud by byl použit materiál PMMA, který se ve světě k výrobě kranioimplantátů používá nejvíce celková cena bez DPH za materiál by se zvýšila na 108 Kč.

Celková výše variabilních nákladů se určí jako součet výše vypočtených nákladových položek, tedy $2\,124 \text{ Kč} + 19 \text{ Kč} + 98 \text{ Kč}$ po sečtení $2\,241 \text{ Kč}$. Na grafu č. 2 je zobrazen podíl jednotlivých nákladových položek na celkové ceně.

Graf 2: Podíl jednotlivých položek na celkové ceně



(Vlastní zpracování)

4.5.2 Cena včetně vstupních nákladů

V předchozí kapitole byla vypočtena celková cena bez vstupních nákladů na výrobu. Těmi v tomto případě jsou:

- Zakoupení licence na software
- Pořízení 3D tiskárny

Autor model vypracoval v programu [Geomagic Sculpt](#) (viz kapitola 4.2). Firma 3D systems, která program vyvinula a poskytuje licence pro jeho využívání nabízí pouze jednu variantu licence, a to časově neomezenou. Tato licence stojí v přepočtu na koruny kolem 26 752 Kč

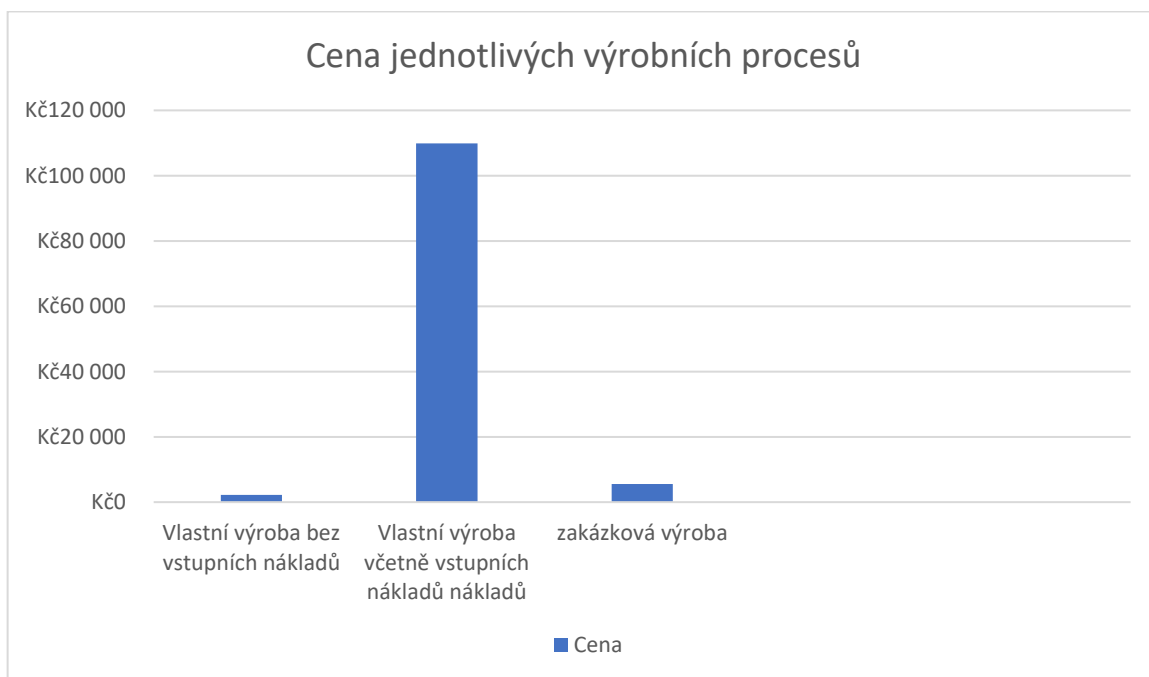
Tiskárna Ultimaker 3, na které autor model realizoval stojí bez DPH 80 880 Kč. Její funkci by však mohla zastoupit jakákoli profesionální 3D tiskárna pracující na principu FDM. Celková cena tisku se v případě zakoupení licence na software a pořízení 3D tiskárny (neuvažuje se pořizovací, cena ale cena pořízení) určí jako součet všech nákladů, tedy $2\,241\text{ Kč} + 26\,752\text{ Kč} + 80\,880\text{ Kč} = 109\,873\text{ Kč}$.

Pokud by nemocnice 3D tiskárnu nevlastnila a její pořízení nezvažovala, nabízí se zde řešení v podobě zakázkového tisku. Jeho cena se odvíjí od použitého materiálu, složitosti modelu a době tisku. Hodinová sazba se v takovém případě pohybuje v rozmezí 100-500 Kč/h. Pokud by byl implantát vymodelován a vytisknut na zakázku, jeho celková cena (C) by se vypočítala podle vzorce:

$$C = (\text{doba modelace} \times \text{mzda grafika}) + (\text{doba tisku} \times \text{sazba za tisk}), \quad (4.4)$$

Po dosazení: $C = (8 \times 266) + (11,47 \times 100 \sim 500)$. Cena za implantát by se tedy pohybovala v rozmezí 3 275~7863 Kč v závislosti na hodinové sazbě za výtisk. V průměru tedy 5 569 Kč za implantát. Na grafu č. 3 je porovnání nákladů na výrobu jednoho kusu implantátů podle jednotlivých způsobů výroby.

Graf 3: Porovnání cen implantátů podle výrobního procesu

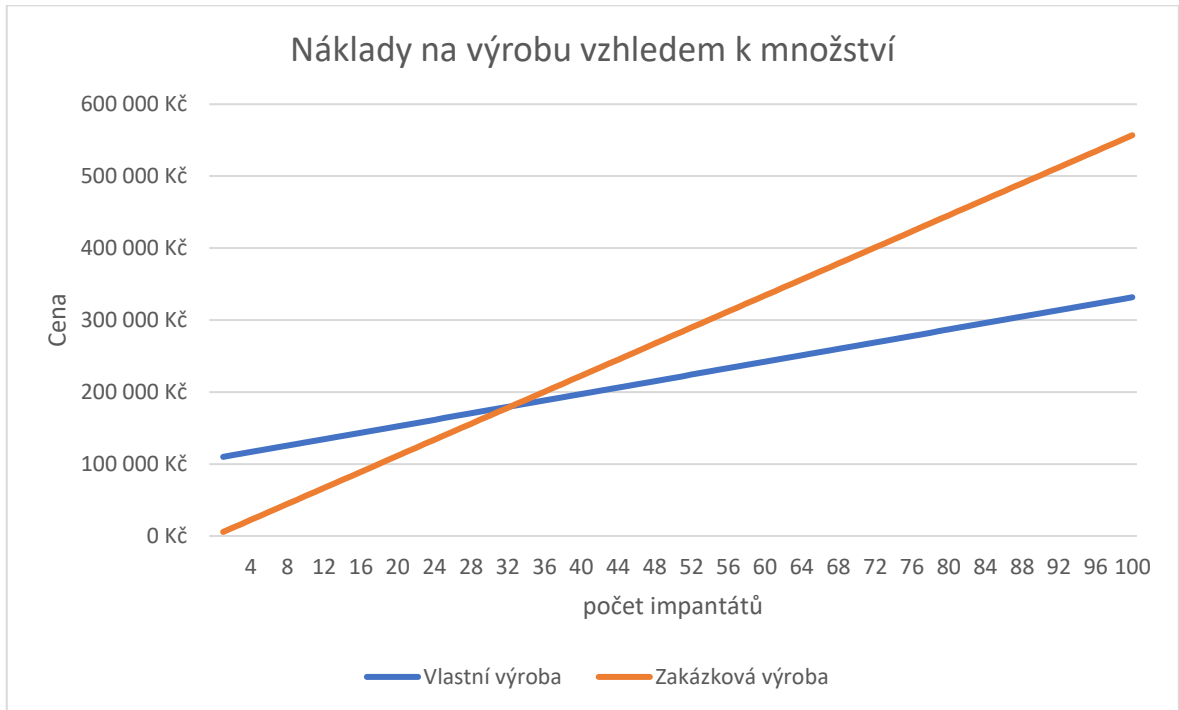


(Vlastní zpracování)

Na grafu č. 4 jsou náklady vlastní výroby a zakázkové výroby vzhledem k vyrobenému množství implantátů. Při výrobě více než 32 ks implantátů přestává být zakázková výroba výhodnější, i přes nulové vstupní náklady. Při výrobě více než 65 ks

implantátu vlastní výrobou jsou ušetřené výrobní náklady vyšší, než vstupní náklady na výrobu.

Graf 4: Náklady na výrobu



(Vlastní zpracování)

5 Výsledky a zhodnocení

5.1 3D tisk

Technologie 3D tisku je nesmírně rychle se vyvíjející alternativa ke konvenčním výrobním metodám napříč všemi obory. Její využití ve zdravotnictví, zejména v chudých oblastech, či místech bez profesionálního zázemí lékařů, je naprosto zásadní a životy zachraňující.

5.2 Nákladovost výroby

Z analýzy nákladovosti byla cena implantátu se vstupními náklady vyčíslena na 109 873 Kč. Největší část tvoří vstupní náklady, které dosahují 98 % celkových nákladů, viz tabulka č. 4. V rámci variabilních nákladů zaujímá největší část mzda 3D grafika, která tvoří 95 %, viz tabulka č. 5.

Tabulka 4: Fixní náklady

| Náklad | 3D tiskárna | Licence k softwaru |
|--------|-------------|--------------------|
| Cena | 80 880 Kč | 26 752 Kč |

(Vlastní zpracování)

Tabulka 5: Variabilní náklady

| Náklad | Mzda 3D grafika | Spotřeba el. energie | Spotřeba materiálu ABS | Spotřeba materiálu PVA |
|--------|-----------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Cena | 2 124 Kč | 19 Kč | 28 Kč | 70 Kč |

(Vlastní zpracování)

Aby se nemocnici vyplatilo investovat do vlastní výroby a implantáty si vyrábět, musela by vyrobit více než 32 ks implantátu. V Krajské nemocnici Liberec se v období od ledna 2006 do února 2008 (14 měsíců) využilo ke kranioplastice 10 implantátů. (Buchvald, 2009). Nemocnici by se tedy vstupní náklady vrátily po 3 letech a 9 měsících. Nutné je ovšem započítat náklady na údržbu 3D tiskárny, reálná doba by tedy byla delší.

První implantát (vyrobený 3D technologií) použitý v České republice byl na zakázku objednan z Ameriky v roce 2007 do Fakultní nemocnice v Ostravě a jeho cena byla necelých 200 000 Kč. Pro srovnání jsou v tabulce č. 6 uvedeny orientační ceny implantátů v Mexiku a variabilní náklady na výrobu prototypu realizovaného v rámci této práce, data o cenách implantátů vyrobených v České republice není možné dohledat. Ceny se liší v závislosti na rozsahu defektu, náročnosti na výrobu, dopravu a dalších faktorech.

Tabulka 6: Ceny implantátů v Mexiku

| Materiál | Titan | PEEK | PMMA | Prototyp (ABS) |
|----------|---------------------|----------------|---------------|----------------|
| Cena | 55 000 – 130 000 Kč | cca 180 000 Kč | cca 15 000 Kč | 2 241 Kč |

(De La Peña, 2018, vlastní zpracování)

PMMA je jednoznačně nejlevnějším materiálem, který lze použít. V Mexiku či USA, kde je výroba kranioimplantátů pomocí 3D tisku běžnou praxí, často pacient platí veškeré náklady spojené s operací. Oproti tomu v České republice je tato operace hrazena pojišťovnou v plném rozsahu. To může být jedním z důvodů, proč se namísto PMMA využívá PEEK nebo Titan, i přes jejich vyšší cenu.

6 Závěr

Cílem předkládané práce bylo určení nákladovosti výroby prototypu kranioimplantátu vyrobeného pomocí 3D technologie. Pro určení výše celkových výrobních nákladů byl vymodelován 3D model implantátu prostřednictvím softwaru [Geomagic Sculpt](#) (viz kapitola 4.2). Proces modelace autorovi zabral 8 h. Tento model byl následně realizován pomocí technologie [Rapid Prototyping](#) (viz kapitola 4.4). Realizace na tiskárně Ultimaker 3 trvala 11 hodin 28 minut.

Bylo zjištěno, že náklady na výrobu plastového kranioimplantátu pomocí 3D technologie jsou mnohonásobně nižší, než při výrobě konvenčními metodami za použití titanu či biomateriálu. Vzhledem k nízkému počtu operací (méně než 10 za rok) vyžadující použití kranioimplantátu mohou být vysoké vstupní náklady jedním z faktorů pro využití zakázkové výroby či konvenčních výrobních metod namísto vlastní výroby pomocí 3D tisku.

Vzhledem k systému zdravotní péče v České republice, není cena pro pacienta hlavním faktorem, jelikož je operační zákrok hrazen v plném rozsahu. I z tohoto důvodu je upřednostňováno využití dražšího biomateriálu PEEK, u kterého hrozí menší riziko pooperačních komplikací namísto levnější varianty v podobě PMMA. I když je využití 3D technologií v oblasti kranioplastiky ve světě běžnou praxí, využívá se hlavně v zemích, kde pacient hradí buď celou, nebo větší část nákladů za poskytnutou zdravotní péči. V takovém případě je využitím 3D technologie možné snížit výrobní náklady.

7 Seznam použitých zdrojů

3D-Printed Congenital Heart Defect Models for Pre-Surgical Planning, ©2020.

In: *Materialise / 3D Printing Innovators* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z:

<https://www.materialise.com/en/cases/3d-printed-congenital-heart-defect-models-for-pre-surgical-planning>

ADLUGHMIN, 2015. 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing.

In: *Surgeon Turns Horrid Tumor Prognosis into Amazing Story by 3D Printing a Pelvic Prosthesis* [online]. [cit. 2019-09-26]. Dostupné z:

<https://3dprint.com/55566/3d-printed-titanium-pelvic/>

BOHEMIA ENERGY, 2019. *Ceník 2018* [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z:

https://www.bohemiaenergy.cz/wp-content/uploads/price_lists/100/BE-PD-EC-PO-BA-CR_20180101-01.PDF

BUCHVLAD, P., L. ČAPEK a P. SUCHOMEL, 2009. Počítačem modelované náhrady kostních defektů lební klenby. *Česká a slovenská neurologie a neurochirurgie* [online].

2009(2) [cit. 2020-01-23]. Dostupné z:

<https://www.csmn.eu/casopisy/ceska-slovenska-neurologie/2009-2/pocitacem-modelovane-nahrady-kostnich-defektu-lebni-klenby-32944>

CARLOTA, V., 2019. Wake Forest Institute for Regenerative Medicine develops mobile 3D bio-printer to heal extensive wounds. *3Dnatives* [online]. [cit. 2019-09-01]. Dostupné z:

<https://www.3dnatives.com/en/mobile-3d-bio-printer-0503320195/>

CIMALA, Petr a Michal KOKORŤ, 2015. 3D tisk: Další průmyslová revoluce? *Klub Investorů* [online]. [cit. 2019-11-10]. Dostupné z:

<http://www.klubinvestoru.com/cs/article/2649-3d-tisk-dalsi-prumyslova-revoluce>

CRANIO-OSS, ©2020 LASAK s r.o. – výroba, výzkum, prodej zubních implantátů a materiálů pro regeneraci kostní tkáně [Online]. [cit. 2019-08-13]. Dostupné z:

<https://www.lasak.cz/pro-odborniky/produkty/neurochirurgie-2/cranio-oss>

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD, 2019. *Struktura mezd zaměstnanců - 2018* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z:

<https://www.czso.cz/documents/10180/91606471/11002619a22.xlsx/46a32a7b-44e5-40b4-9219-d9f1789ab449?version=1.0>

DE LA PEÑA, Abel. A kol. 2018. Low-cost customized cranioplasty using a 3D digital printing model: a case report. *3D Printing in Medicine* [online]. **4**(1) [cit. 2020-03-22].

DOI: 10.1186/s41205-018-0026-7. ISSN 2365-6271. Dostupné z:

<https://threedmedprint.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41205-018-0026-7>

EGGER J, Gall M, Tax A, Ücal M, Zefferer U, a kol., 2017. Interactive reconstructions of cranial 3D implants under MeVisLab as an alternative to commercial planning software.

GABRIEL, Mastný, 2014. Technologie 3D tisku. In: *Itnetwork* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/hardware-pc/3d-tisk/technologie-3d-tisk/>

GEOMAGIC, 2015. How to – Cranial Implant Designs using Geomagic Sculpt. In: Youtube [online]. Zveřejněno 05. 08. 2015 [vid. 2019-06-03]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=4EO_BSRhfv&t=1s

GRAMES, Emmett, 2019. *FDM (3D Printing) – Simply Explained* [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>

HOMOLA, Jan, 2013. Selective Laser Sintering. *3D-tisk.cz* [online]. [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>

HORNE, Richard a Kalani Kirk HAUSMAN, 2017. *3D printing for dummies*. 2nd edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. ISBN 978-1-119-38631-5.

HRUBÝ, Zdeněk, ©2020. Historie a současnost 3D tisku. *3D tisk na zakázku* [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <http://www.3dtisknazakazku.cz/9-clanky/15-historie-a-soucasnost-3d-tisku.html>

IVANKO, Miroslav, 2018. *3D tištěné implantáty v medicíně* [online]. [cit. 2019-08-10]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/medicinska-technika/3d-tistene-implantaty-v-medicine_45813.html

JEDLIČKA, Jakub, 2019. Jak funguje stolní 3D tiskárna: Základní technologie 3D tisku. *TonerPartner.cz - Tonery a cartridge za super ceny* [online]. [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.tonerpartner.cz/clanky/jak-funguje-stolni-3d-tiskarna-zakladni-technologie-3d-tisku-24967cz39332/>

JIRKOVEC, Radek, 2016. Využití buněčného tisku k přípravě biologického kompozitního materiálu. Liberec. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta textilní. Katedra netkaných textilií a nanovlákných materiálů

KLÍMA, Jan, 2019. Využití 3D tiskáren ve zdravotnictví. Praha. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Provozně ekonomická fakulta. Katedra informačních technologií.

KLOSKE, Liza Wallach a Nick KLOSKE, 2016. *Getting started with 3D printing: a hands-on guide to the hardware, software, and services behind the new manufacturing revolution*. San Francisco: Maker Media. Make. ISBN 978-1-680-45020-0.

LASAK IBERIA / TH MEDICAL, ©2020. In: *Rehabilitación craneofacial* [online]. [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: <https://thmedical.es/79-2/neurocirugia/rehabilitaciones-craneofaciales/>

MANERO, Albert, ©2016-2020. 3D tisk podává pomocnou ruku. *Vše pro 3D tisk* [online]. [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: <https://www.vsepro3dtisk.cz/s/3d-tisk-podava-pomocnou-r>

MARICEVICH, a kol., 2019. Functional and aesthetic evaluation after cranial reconstruction with polymethyl methacrylate prostheses using low-cost 3D printing templates in patients with cranial defects secondary to decompressive craniectomies: A prospective study. *Surgical Neurology International* [online]. **10**(1) [cit. 2019-06-20]. DOI: 10.4103/sni.sni_149_18. ISSN 2152-7806. Dostupné z: <https://surgicalneurologyint.com/surgicalint-articles/functional-and-aesthetic-evaluation-after-cranial-reconstruction-with-polymethyl-methacrylate-prostheses-using-low-cost-3d-printing-templates-in-patients-with-cranial-defects-secondary-to-decompressiv/>

MENKEN, Ivanka, 2012. *3D printing: complete certification kit*. Brisbane: Art of service. Core series for IT. ISBN 978-1-4864-5645-1.

MIHULKA, Stanislav, 2019. Nová metoda 3D biotisku zajistí extrémně rychlou výrobu lidských tkání. *100+1 zahraniční zajímavost* [online]. [cit. 2019-10-08]. Dostupné z: <https://www.stoplusjednicka.cz/nova-metoda-3d-biotisku-zajisti-extremne-rychlou-vyrobu-lidskych-tkani>

MICHÁLEK, T., 2016. Typy 3D tiskáren. *MakersLab | 3D tiskárny, 3d tisk Praha, firemní školení a workshopy* [online]. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <https://makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/>

NOORANI, Rafiq, 2018. *3D printing: technology, applications, and selection*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-4987-8375-0.

POHOŘELECKÝ, Zbyněk, 2016. FDM technologie (Fused Deposition Modeling). *Inventor 3D blog* [online]. [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/fdm-technologie/>

PLOS ONE [online]. 12(3): e0172694. [cit. 2019-06-21]. DOI: 10.1371/journal.pone.0172694. Dostupné z: <https://journals.plos.org/plosone/article/metrics?id=10.1371/journal.pone.0172694#citedHeader>

PRŮŠA, Josef, 2019. Základy 3 D tisku [online]. [cit. 2019-11-03] Praha: Prusa Research a.s., 2019, Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>

RAUKER, Josip, 2017. PMMA cranial implants – a more cost effective solution. *Linkedin* [online]. [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/pmma-cranial-impants-more-cost-effective-solution-josip-rauker>

SHERMAN, Douglas, 2016. The Official History of the RepRap Project [online]. [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>

SUARKEO, Mark, 2015. 89.3 KPCC – Southern California Public Radio. In: *3D printers are rewriting prosthetics production, scientific research* [online]. [cit. 2019-07-03]. Dostupné z: <https://www.scpr.org/news/2015/03/31/50702/3d-printers-are-rewriting-prosthetics-production-s/>

VACULA, Josef, 2018. Rozdělení plastů: STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA JEDNOTLIVÝCH PLASTŮ. VACULA s.r.o. [online]. [cit. 2019-10-02]. Dostupné z: <https://www.vacula.cz/prehled-polymeru/rozdeleni-plastu/>

VAROTSIS, ©2020. Alkaios Bournias. *Introduction to SLA 3D Printing* [online]. [cit. 2019-06-27]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>

VELDMAN, Michael, 2018. PEEK for Custom Cranial Implants: Invibio Biomaterial Solutions. <http://www.emergingmedicalsolutions.com/> [online]. [cit. 2019-7-20]. Dostupné z: https://invibio.com/-/media/files/en/2018/peek-for-custom-cranial-implants_final_09-21-2018.ashx

VOSYNKOVÁ, Jana, 2016. *Materiály a doplňky pro 3D tisk – filamenty - Materialpro3d.cz* [online]. Brno: Marie Zukalová [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/>

VYORÁLEK, J., 2017. Jaký použít materiál pro 3D tisk – PLA vs. ABS. blog.vyoralek.cz. [online]. [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://blog.vyoralek.cz/3d-tiskarny/jaky-pouzit-material-3d-tisk-pla-vs-abs/>

WEEKS, Gareth, 2018. History of 3D Printing SLA-1. In: *EngineeringClicks* [online]. [cit. 2019-08-12]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/history-of-3d-printing-2/history-of-3d-printing-sla-1/>

ZHUANG, Pei, 2020. Bioprinter ~ 3D Bioprinting Technology – Biomaterials ~ BioInk – regenHU ~ Biosystem architects. In: *3D bioprinters* [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: <https://www.regenhu.com/3d-bioprinters>