

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA PEDAGOGICKÁ
KATEDRA MATEMATIKY, FYZIKY A TECHNICKÉ VÝCHOVY

**ENABLING THE FUTURE - ALTERNATIVNÍ POHLED NA
PROJEKTOVOU VÝUKU S PODPOROU 3D TISKU**
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ingrid Vácová

Přírodovědná studia, Technická výchova se zaměřením na vzdělávání

Vedoucí práce: Mgr. Jan Krotký, PhD.

Plzeň 2020

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně
s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

V Plzni, 25. dubna 2020

.....
vlastnoruční podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Mgr. Janu Krotkému, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK.....	2
ÚVOD	3
1 ZMAPOVÁNÍ VÝVOJE 3D TISKU A JEHO VYUŽITÍ	4
1.1 TECHNOLOGIE	4
1.2 FFF TISKÁRNY	6
1.2.1 Typy FFF tiskáren	6
1.2.2 Typy materiálů pro FFF	7
1.3 UPLATNĚNÍ 3D TISKU.....	8
1.3.1 Současnost	8
1.3.2 Budoucnost	9
2 MOŽNOSTI VYUŽITÍ 3D TECHNOLOGIÍ V PROTETICE.....	10
2.1 3D TISK V MEDICÍNĚ	10
2.2 VÝVOJ PROTETIKY	11
2.3 VÝVOJ PROTÉZ HORNÍCH KONČETIN	12
2.4 3D TISK PROTÉZ HORNÍCH KONČETIN	12
3 VÝHODY A NEVÝHODY TIŠTĚNÉ NÁHRADY.....	15
3.1 ŽIVOTNOST	15
3.2 NÁKLADY.....	15
3.3 CENA VYTIŠTĚNÉ PROTÉZY.....	16
3.4 PERSONALIZACE A JEJÍ VLIV NA PSYCHIKU	16
3.5 DOPADY TISKU NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	17
4 VZNIK A VÝVOJ PROJEKTU	19
5 MOŽNOSTI ZAPOJENÍ ORGANIZACÍ DO PROJEKTU	21
6 ZAPOJENÍ DO PROJEKTU	24
6.1 TISK.....	24
6.2 KOMPLETACE MODELU [12].....	27
6.3 SCHVALOVACÍ PROCES.....	31
6.4 SPOLUPRÁCE S E-NABLE CZECH	31
7 DISKUZE	32
ZÁVĚR	33
RESUMÉ	35
SEZNAM LITERATURY	36
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	41

SEZNAM ZKRATEK

FFF: fused filament fabrication.....	3
SLA: stereolitografický aparát.....	4
LOM: Laminated Object Manufacturing.....	4
FDM: fused deposition modeling.....	5
SLS: technika selektivního spékání.....	5
RIT: Rochester Institute of Technology.....	19
STL: nativní formát souboru stereolitografického programu pro 3D modelování.....	24

ÚVOD

Základem této práce je metoda 3D tisku, která dále vede k praktické aplikaci této technologie jakožto možnosti alternativního využití 3D tisku ve výuce.

Zabývá se teoretickým oblastmi 3D tisku, představuje historii této technologie jakožto i různé druhy a metody technologie 3D tisku. Soustředí se nejvíce na metodu vytlačování roztaveného plastu tryskou, jinak známé jako FFF metoda, která je v současnosti mezi běžnými uživateli hojně využívána, a která je zároveň součástí experimentální části této práce. Představuje úvod do problematiky protetiky - nahrazení postižené končetiny a její původní funkce speciálními pomůckami, kterou dále rozvíjí hlavně směrem k náhradám horních končetin. Tyto dvě teoretické oblasti se prolínají právě v možnosti výroby protéz pomocí 3D tisku a porovnáním vlastností těchto protéz s konvenčně vyráběnými protézami.

Soustředění na výrobu protéz horních končetin pomocí 3D tisku plyne ze zapojení do celosvětového projektu e-NABLE který pomáhá zajistit dostupnost individuálně připravených protéz spojením lidí, kteří je ke svému životu potřebují s decentralizovanou sítí majitelů a provozovatelů 3D tiskáren, kteří je pro ně mohou individuálně zajistit. Tato práce je zapojena do lokální části projektu e-NABLE CZECH a usiluje o informování vzdělávacích i jiných institucí o možnosti zapojení do tohoto projektu například jako součástí praktického využití 3D tisku ve výuce.

1 ZMAPOVÁNÍ VÝVOJE 3D TISKU A JEHO VYUŽITÍ

Z počátku byla technologie 3D tisku zamýšlena především pro usnadnění a zrychlení výroby prototypů. Dosud převažoval subtraktivní způsob výroby, což je metoda obrábění, během které je při výrobě modelu nutné materiál odebírat. Zatímco 3D tisk je výrobou aditivní, při které je materiál postupně vrstvu po vrstvě přidáván. Tímto způsobem také mimo jiné vzniká mnohem menší množství odpadového materiálu. [1, 16]

1.1 TECHNOLOGIE

Označení “3D tisk” bylo ale poprvé použito až v roce 1996. Za jeho zakladatele je považován Charles W. Hull, který si v roce 1984 nechal patentovat technologii stereolitografie. Jde o tvorbu 3D modelů vytvrzováním jednotlivých vrstev tekutého fotopolymeru laserem nebo světelným paprskem. Výrobek je po celou dobu ponořen v lázni fotopolymeru, do kterého se s každou vrstvou zanoří pod hladinu přesně o takovou vzdálenost, jako je požadovaná tloušťka další vrstvy. Následně je zásahem světla vrstva vytvrzena a celý proces začíná s dalším ponořením znovu. První na tomto principu pracující zařízení neslo název stereolitografický aparát (SLA-1). Původní zkratka SLA se však dodnes používá již jako obecné označení pro tiskárny tohoto typu. Postupně se k Hullově společnosti 3D Systems začaly přidávat další firmy vyrábějící vlastní tiskárny, čímž začal růst konkurence. Tím započalo období někdy také označované jako “třetí průmyslová revoluce”. [1, 15, 16]

Rok po patentování technologie stereolitografie začala výroba trojrozměrných objektů novou technologií LOM (Laminated Object Manufacturing). Ta může využívat nejen plastu, ale také papíru nebo kovu, přičemž papírové a plastové materiály bývají pro tyto účely pokryté lepidlem. Materiál se stáčí z role přes desku, na které je vyřezáván laserem. Dokončený výřez následně přejede horký válec, aby nahřátím upevnil vytvořenou vrstvu na vrstvě předchozí. Materiál se odtočí a proces začíná znova, buduje se vrstva po vrstvě dokud není výrobek hotový. [1, 3]

V současnosti by se používané technologie daly rozdělit do tří skupin podle podoby použitého materiálu na tekuté, práškové a pevné. Mezi technologie pracující na tekuté bázi by se řadila i výše zmíněná technologie SLA. Vrstvy vznikají na principu postupného vytvrzování tekutého materiálu (fotopolymerů) pomocí UV lamp nebo laserů. Fotopolymery používané k těmto účelům jsou známé také pod označením resiny (pryskyřice) a jsou pro

SLA typické. Jejich vlastnosti jsou ovlivnitelné přidáním různých přísad podle požadovaných konečných vlastností modelu. Lze tak vytvořit zdravotně nezávadné modely pro lékařské účely, nebo tvrdé a odolné modely vhodné pro mechanické zatížení například u vytváření různých prototypových dílů a součástek. SLA modely je po dokončení tisku třeba očistit od zbylé pryskyřice a dodatečně vytvrdit. Výhodou oproti jiným metodám je pak zejména hladký povrch modelu umožňující tisk drobných detailů, na kterém na rozdíl od modelů vytištěných FFF metodou, nejsou tolik patrné přechody mezi vrstvami. I díky tomu modely z resinů případně nepraskají ve spojích vrstev, ale lámou se. Dalším zásadním rozdílem od FFF tiskáren je také pořizovací cena materiálu, která je u resinů výrazně vyšší než u filamentů. [1, 16]

Tisk z práškových materiálů funguje prakticky na stejném principu jako zmíněná metoda SLA. Avšak zatímco v SLA laser vytvrzuje tekutý fotopolymer, zde laser zahříváním spéká vrstvy práškového materiálu. Jedná se o takzvanou techniku selektivního spékání neboli SLS. Nejčastějším materiálem používaným při výrobě je nylon. Po každé spečené vrstvě, následuje nové posypání práškem, při čemž se výrobek na desce posouvá směrem dolů, aby tak vytvořil místo pro další vrstvu. V SLS není rozdíl od SLA a FFF tiskáren třeba tvořit pevné podpory pro tisk výrobku, čímž dochází k šetření materiálu, a vzniká tak příležitost ke znovu použití zbylého prášku v další výrobě. Kvůli vysokým pořizovacím cenám, jsou tyto typy tiskáren ale zatím převážně doménou průmyslu. [1, 2, 16]

Oproti tomu FFF (fused filament fabrication) jsou mimo jiné i díky cenové dostupnosti v současnosti nejrozšířenějším typem 3D tiskáren. Často používaným synonymem je také zkratka FDM (fused deposition modeling). Za jejich rychlým vzestupem stojí projekt RepRap, který v roce 2006 spojil tvůrce za účelem vzájemné pomoci při samostatném sestavování 3D tiskáren. Hlavní myšlenkou bylo vytvořit zařízení, které bude schopné se z velké části také samo replikovat. Volný přístup k takto vzniklým návrhům a jejich možná úprava daly vzniknout samostatně se rozvíjející komunitě, která položila základní kámen vývoji cenově dostupných 3D tiskáren. [15, 16]

O rychlosti vývoje této technologie a její globální dostupnosti značí i tvrzení Kratochvílové, která ve své publikaci z roku 2015 označuje cenu 1000 dolarů (tedy v přepočtu kolem 25 tisíc korun) za FFF Cube 3D tiskárnu jako přívětivou. Zároveň předpovídá budoucí dostupnost těchto zařízení pro takřka každou domácnost. V současnosti lze její předpoklad na příkladu jedné z nejlevnějších tiskáren stejného typu, Original Prusa Mini v ceně necelých

10 tisíc korun¹, označit za naplněný. Během pěti let se totiž cena těchto tiskáren snížila o celých 40 %. [1]

1.2 FFF TISKÁRNY

FFF tiskárny pracují na principu natavení pevného materiálu, vláken termoplastu, a jeho následné nanášení po vrstvách. Filament je veden do extrudéru, ve kterém se pomocí topného tělesa nataví. Nataveninu pak tryska nanese na podložku, kde materiál chladne a tuhne. Podložka bývá často vyhřívána, což rozšíří škálu použitelných tiskových materiálů a zároveň zajistí, aby se dal model po dokončení tisku z podložky co nejnáze odstranit. U podložek bez vyhřívání na ně za tímto účelem lze využít alternativních metod, jako je nanesení tenké vrstvy tuhého lepidla nebo připevnění malířské pásky. Tento způsob tisku je oproti SLS a SLA rychlý a bezpečný. Nevýhodou je naopak nutnost podpor a vizuální i hmatová rozlišitelnost jednotlivých vrstev na hotovém modelu. Volbou trysky různých průměrů se však dá výsledná kvalita i rychlost tisku částečně ovlivnit. Druhou možností pro dosažení požadovaného vzhledu modelu je výběr vhodného materiálu případně zařazení dodatečných povrchových úprav. [1, 15, 16]

1.2.1 TYPY FFF TISKÁREN

FFF tiskárny lze rozdělit do tří skupin podle způsobu pohybu trysky. Pokud tiskárna pracuje pohybem po osách x, y a z, tedy jinak řečeno využívá kartézské soustavy souřadnic, nazývá se tak podle ní kartézskou tiskárnou. Její základna má často tvar čtyřúhelníku, přičemž podložka využívá pohybu dopředu a dozadu po ose y. Zatímco extrudér na ní nanáší materiál pohybem po rámu konstrukce, a to jak do stran (osa x), tak přibližováním se a oddalováním od podložky (pohyb po ose z). U některých tiskáren se může po ose z místo extrudéru pohybovat podložka. [15, 16]

Tiskárny typu delta oproti tomu pracují s rámem trojúhelníkovitého tvaru. Pohyb extrudéru je zajištěn systémem složeným ze tří ramen a řemenů, na kterých je extrudér zavěšen. Podložka se v toto případě nepohybuje. Výška rámu a způsob pohybu trysky poskytuje v porovnání s FFF tiskárnami výhodu tisku mnohem vyšších modelů. Rozsah pohybu do výšky je u FFF tiskáren totiž omezen délkou vodicích šroubů, u kterých se může jejich prodlužováním snižovat kvalita a přesnost tisku. Kvůli využití závěsného systému delta tiskáren je nutné

¹ údaj dostupný z <https://www.prusa3d.cz> (10.4.2020)

snížit váhu extrudéru na minimum. Vedlejším produktem tohoto opatření je zároveň zrychlení jeho pohybu a tím pádem i celého tisku. Naopak jednou z nevýhod delta tiskáren je jejich podložka. Ta má totiž kruhovitý tvar, u kterého se kvůli omezenému pohybu ramen a potažmo i extrudéru, nedá využít celé její plochy. Do okrajových částí podložky se tryska dostane jen díky vysunutí některého z ramen do maximální možné výšky, čímž dochází ke snížení kvality tisku. A tak i přes to, že typ delta nabízí výrobu vyšších výtisků než FFF tiskárny, jsou jejich uživatelé značně omezeni velikostí tiskové plochy. [15, 16]

Posledním a nejméně využívaným typem jsou polar tiskárny. Stejně jako typ delta i polar tiskne na kruhovou podložku. Od obou výše zmíněných typů se nejvíce liší stavbou konstrukce, která umožňuje pohyb pouze po dvou osách. Zbylý rozsah tisku je zajištěn otočným systémem, na kterém je umístěná podložka. [16]

1.2.2 TYPY MATERIÁLŮ PRO FFF

Nejuniverzálnějším materiálem pro tisk s FFF tiskárnami je tisková struna z PLA. Jedná se o pevný ale křehký materiál s velmi malou pružností, který se při ohybu často láme. Nevykazuje vysokou odolnost ani proti povětrnostním podmínkám a teplotám vyšším než 60°C. Oproti ASA a PETG však při zpracování nezapáchá. Mezi jeho hlavní výhody patří zejména nízká pořizovací cena a velká škála dostupných barev. Hodí se převážně pro tisk modelů s mnoha detaily. [15, 16]

ASA a ABS se od sebe vlastnostmi prakticky neliší. Hodí se hlavně k tisku menších modelů, s velikostí modelů se totiž v tomto případě výrazně zhoršuje jejich kvalita. Může také docházet k odlepování vrstev od podložky a jejich kroucení. Výhodou ale je možnost povrchových úprav acetonem, kterým povrch modelu lze vyhladit, a nebo ho využít pro slepování více částí. Tiskovou strunou PETG lze vytvořit modely s vyšším leskem, problémem jsou ale tenká vlákna materiálu, která se při přechodech trysky na další vrstvu od něj úplně neoddělí. Tím vznikne nepřesný model, který bude po tisku od těchto vláken nutno dodatečně začišťovat. [15, 16]

Pro vytvoření výrobků o specifických vlastnostech lze využít několik dalších typů tiskového materiálu. Například flex je materiál disponující vlastnostmi podobnými gumě jako je elasticita a flexibilita. Naopak pro výrobu modelů se specifickým vzhledem se využívají

kompozitní materiály. Ty jsou sice v základu tvořeny plastem, obsahují ale příměs dalšího materiálu v podobě prachových částic. Použitím kompozitních materiálů vznikne po vyleštění například model s kovově lesklým vzhledem. Při častém používání tohoto druhu filamentu hrozí ale právě kvůli obsahu tvrdých částic příměsi rychlejší abrazivní opotřebení trysek. [16]

1.3 UPLATNĚNÍ 3D TISKU

Kromě průmyslu nachází 3D tisk uplatnění i v malosériové výrobě. Firmy si mohou sami tisknout prototypy nebo reklamní předměty s otevřenou možností úprav v další sérii tisku. Tím často odpadá delegace jiným výrobcům a dochází ke snížení vlastních nákladů. Zároveň se tím otevírají dveře k tvorbě složitějších modelů, než jaké by bylo možné vytvořit tradičními metodami jako je lisování nebo odlévání. Díky snadné tvorbě kreativních modelů je tato technologie hojně využívána i v oblastech designu, šperkařství, módním průmyslu, ale také pro tisk her a hraček. Dalo by se říci, že se díky 3D tisku spotřebitelé začínají více dostávat do pozice výrobců. [1, 15, 16]

1.3.1 SOUČASNOST

Experimentuje se i s použitím v architektuře. Nejen že se tak dají tvořit modely staveb, aby si zákazník mohl lépe představit vzhled svého budoucího domu, ale také je za pomoci 3D tisku lze realizovat. 3D tisk proniká také do samotných interiérů v podobě personalizovaných doplňků. Své uplatnění nachází i ve výrobě náhradních dílů například u starožitností, u kterých není možné získat poškozené části jiným způsobem. [1, 15, 16]

Tisk celých domů je poměrně novým způsobem využití. Zatím byla realizována výroba několika převážně pouze vzorových objektů, do budoucna se ale počítá s tiskem celých vesnic a měst. K nanášení vrstev tisku se používá konstrukcí s různým rozsahem pohybu. Základ tiskové směsi tvoří cement a písek, do kterých jsou v různém poměru přidávány další složky v podobě vláken nebo drobných částic. Podíl složek směsi se u každého výrobce liší. Někteří z nich směřují svůj vývoj především k výrobě ekologických směsí, které jsou buďto plně přírodní, nebo za účelem využití odpadového materiálu obsahují části plastů. Směs je do trysek vytlačována pumpami. Výhodou je především rychlost, jakou mohou stavby pomocí této technologie vzniknout, většinou se totiž jedná o hodiny nebo maximálně několik

málo dní. V budoucnu by se díky tisku domů mohlo snížit procento lidí bez domova a poskytnout domy i do oblastí, ve kterých je zděný dům luxusem. [44]

Samostatným oddělením využití je oblast medicíny. První velké úspěchy slavila technologie ve stomatologii při tvorbě zubních implantátů nebo třeba rovnátek. Takzvaná neviditelná rovnátka jsou tvořena na základě otisku pacientových zubů nebo jejich naskenování, které zubař následně využije k vytvoření počítačového modelu rovnátek. Ta jsou později vytištěna transparentním filamentem. Tím vznikne pomůcka na míru padnoucí každému případu. Podobným způsobem se postupuje i při výrobě pomůcek k nápravě ortopedických problémů jakými jsou například speciální vložky do bot. [1, 15, 16]

1.3.2 BUDOUCNOST

S 3D tiskem se počítá i při budoucím osídlování dalších planet. Tento způsob se zakládá na stejném principu jako výše zmíněná technologie tisku domů. Rozdílem je, že pro tyto účely byla patentována metoda tisku kamene, která má umožnit stavbu obydlí díky směsi spleené z místního písku a pryskyřice. Počítá se tedy jen s dopravou tiskového zařízení. [1]

Do budoucna lze očekávat další růst a expanzi 3D tisku. V roce 2016 činil obrat 3D průmyslu kolem 7 miliard dolarů, přičemž Kloski (Kloski, 2016) předpokládá, že do roku 2020 překročí hodnotu 17, 2 miliard. Podle dat sborníku z roku 2019, činila hodnota trhu v tomto roce 12,1 miliard dolarů, přičemž se v dalším roce počítá se hodnotami kolem 15,4 miliard. Počítá se tedy s růstem objemu zisků, ne však tak závratnými, jak Kloski předpovídala. [15, 26]

2 MOŽNOSTI VYUŽITÍ 3D TECHNOLOGIÍ V PROTETICE

2.1 3D TISK V MEDICÍNĚ

V posledních letech se technologie 3D tisku z využití v technických oborech jako je konstrukce prototypových strojních součástek, modelů ve stavebnictví nebo součástí v automobilovém průmyslu posunula i do dalších odvětví jako je například zdravotnictví. Tiskem se totiž, mimo jiné, dají získat jinak těžko dostupné náhrady všech různých typů a funkcí. Například studie pojednávající o použití titanového sternu² vytištěného za pomoci 3D tisku označuje tento způsob náhrady jako ideální. Nejen pro snadnou adaptovatelnost, se kterou se v lidském těle setkává, ale také kvůli nízkému riziku infekce a vysoké pevnosti materiálu s minimálním nebezpečím pozdějšího poškození. [25] New Yorkská nemocnice se dokonce začátkem roku 2020 chystá k otevření vlastního centra pro tisk náhrad z kovových materiálů. Bude se jednat o první zařízení svého druhu na světě. [26]

Využití technologie 3D tisku dalo na poli medicíny také vzniknout stále se vyvíjející technologii biotisku. Metoda biotisku se více méně zakládá na stejných technologických principech, rozdíl je především ve stavebním materiálu. Zatímco u klasického tisku se na sebe vrství filament, při biotisku se střídá vrstva atramentu a hydrogelu. Atramentem jsou označovány stavební buňky, nejčastěji se pro své vlastnosti a možnosti pozdější diferenciace používají buňky kmenové. Dostatek živin je těmto živým buňkám zajištěn přítomností hydrogelu. V tomto složení už je možné za vhodných inkubačních podmínek vypěstovat celé tkáně. Různých tvarů tkání se dá dosáhnout aplikací této metody tisku na předem připravené podpůrné konstrukce, kterým se říká skáfoldy. Pro jejich výrobu se používá pórovitý, většinou biodegradabilní materiál. Pórovitý proto, aby byla umožněna snadná kultivace rostoucích buněk. Skáfoldy se po dokončení růstu tkání ze vzorku buďto odstraní, a nebo dojde k jejich rozpuštění. [28]

Přípravě výroby takové tkáně předchází proces skenování, aby bylo možné vytvořit model skáfoldů, které budou tvarově přesně odpovídat příjemci. Následuje odebrání vzorku tkáně pro výrobu atramentu a jeho pozdější uchycení na skáfoldy. Tkáň se poté nechává růst. [28] Takto připravené tkáně se používají zejména k testování léčiv, jedná se tedy o způsob, který by postupně mohl cele nahradit testování na zvířatech. V budoucnu se také nabízí možnost

² hrudní kost

tisku celých orgánů, čímž by se výrazně urychlil proces transplantací, zejména pak čekání na vhodného dárce. Problém s tiskem celých soustav je především v tisku cévního systému. Momentálně se nabízí pouze možnost tisku orgánů bez cévní soustavy, která by se musela tisknout zvlášť a do orgánu se přidat až později. Vyřešení tohoto problému by v budoucnu mohlo přinést možnost opravy tkání přímo v místě poškození. [28]

2.2 VÝVOJ PROTETIKY

Půlpán označuje protetiku jako obor zabývající se náhradou poškozené končetiny včetně její funkce. [29] K potřebě takového nahrazení může v oblastí horních končetin docházet hned z několika důvodů. Prvním je výskyt vrozených vad. Ty se nejčastěji objevují u dětí do šesti let, poté začíná převažovat druhý důvod, kterým jsou vady získané, tedy poúrazové defekty a amputace. [30]

Mezi vrozené vady vedoucí k potřebě protézy zejména v oblasti dlaně a předloktí se řadí například vady vzniklé amniotickými konstrikcemi. Jedná se o defekty vzniklé během prvních týdnů těhotenství vlivem poškození plodových obalů. Ty způsobí zaškrcení nejčastěji v oblasti prstů na horních nebo dolních končetinách. V některých případech je však možné tyto vady řešit i plastickými chirurgickými výkony, kdy dojde k rekonstrukci postižených částí. [11]

Podobné vnější projevy vykazuje také tzv. symbrachydaktylie, vada, která je pravděpodobně způsobená poruchami zásobení cévního systému ve vývoji plodu. Tím dochází ke špatnému vývoji prstů, které se mohou vyvinout jen do určité míry, nebo se také nemusí vyvinout vůbec. [11]

Získanými vadami je myšlena hlavně absence končetiny nebo jejích částí z důvodu nehod či na základě odebrání končetiny při chirurgickém zákroku nutném například pro odstranění tumoru. Amputace horních končetin je prováděna v pěti různých částech ruky, a to buď v oblasti zápěstí, pod loktem, v lokti, nad loktem a nebo v rameni. Přičemž platí, že čím delší je zbylý pahýl, tím lepší možnost budoucího uchycení protézy a tím větší rozsah přirozeného pohybu. [17, 30]

2.3 VÝVOJ PROTÉZ HORNÍCH KONČETIN

Všechny výše uvedené vady je možné řešit nahrazením v podobě protézy. Jedny z historicky prvních protéz datujících se od roku 2000 př. n. l. sloužily především jako estetická náhrada, bez možnosti funkčního využití. S tímto typem se v jisté úpravě lze setkat i dnes. Jedná se o takzvané kosmetické protézy. Neplní totiž žádnou jinou funkci, než je přirozený vzhled postižené končetiny. Pro dosažení co nejreálnějšího vzhledu se dá použít i kosmetické rukavice v příslušné barvě kůže, sloužící jako návlek na samotné tělo protézy. [29, 30]

Teprve s nástupem středověku a rozvojem zbrojířství se začaly objevovat i první funkční předloketní protézy. V průběhu 16. století tak byla vyvinuta protéza s pasivním ovládním pomocí zápalkového mechanismu umístěného v lokti protézy. [30]

Dalšího podstatného vývoje se pažní protézy dostaly až mezi 18. a 19. stoletím, kdy se začalo s vývojem tahových protéz. Tedy takových, jejichž části jsou spojeny systémem pásů ke zdravým částem těla. Pokud pak pacient pohne například ramenem, může zavřít dlaň protézy. [17, 30]

Před začátkem druhé světové války se technologie posunula k vývoji protéz pneumatických a elektrických, z nichž se další pozornosti dostalo hlavně těm elektrickým. Z nich vycházejí i dnes používané myoelektrické protézy. Ty pro svůj chod sice také využívají elektrického zdroje, ale jejich ovládní na rozdíl od elektrických protéz není řízeno zdravou končetinou, nýbrž elektrickými potenciály z jednotlivých svalů pažní. Elektrické potenciály svalu jsou zaznamenány snímačem převedeny z mikropotenciálu na makropotenciál, který rozpojuje motorek ovládající pohyb požadovaných částí. [29, 30, 31]

Do Čech přišla další velká změna až kolem roku 1980, kdy se u nás začaly vlivem firmy Otto Bock používat protézy s trubkovou konstrukcí, které tak nahradily dosud používané dřevěné a kožené protézy. [29]

2.4 3D TISK PROTÉZ HORNÍCH KONČETIN

Pro své vlastnosti si technologie 3D tisku našla své místo i v protetice. Výhodou je kromě rychlosti samotného tisku a možnosti individuálních úprav i vytvoření modelu pomocí skenování pacienta. Tím odpadá nutnost fyzického měření a s tím spojený možný výskyt

nepřesností měření, nebo tvorba pracovního sádrového odlitku, podle kterých se ve většině případů klasické protetické pomůcky dosud vytváří. [29]

V současnosti pokryly návrhy modelů pro tisk všechny tři typy protéz horních končetin, a to jak kosmetické, tak i tahové a myoelektrické. Díky variabilitě barevných filamentů se dá každý model vytisknout v co nejuvěrnějším odstínu odpovídajícím barvě pacientovi kůže, čímž odpadá i potřeba gumových návleků nebo rukavic, které se u kosmetických protéz využívají. [29]

Nízké náklady na tisk dávají prostor k rychlému a snadnému ověření nejrůznějších experimentů a kombinacím s jinými nákladnými technologiemi. Mimo jiné také k návrhům a výrobě adjuvatik, tedy kompenzačních pomůcek modifikovaných pro vykonávání konkrétních činností. Lze se tak setkat například s modely uzpůsobenými pro držení karet, bubenických paliček nebo s adaptéry pro nejrůznější fyzické aktivity jako je posilování nebo lední bruslení. Pacient tak získá pomůcku, která mu umožní pokračovat ve stejných činnostech, jakých se účastnil před amputací. Kompenzací těchto omezení je tak i pro pacienty po amputaci možné žít aktivním životem. [30, 32, 34, 35]

Začínají se také objevovat první vytištěné modely s novými metodami ovládní a vlastnostmi usnadňujícími jejich nositeli kontakt s vnějším prostředím. Řadil by se mezi ně například model opatřen vibrační reakcí na dotyk protézy s povrchem, kterého se dotýká. Systém je řízen tlakovými senzory umístěnými na posledních člancích protetických prstů. Ty na základě síly dotyku vysílají signál do motoru, který spustí adekvátní míru vibrace. Nositel má tak přehled o tom, jak silně daný předmět svírá nebo jaký tlak na něj vyvíjí. [33]

Znám je i návrh využívající k ovládní technologie rozšířené reality, který by v budoucnu mohl nahradit myoelektrické protézy. Principem této metody je použití speciálních brýlí snímajících jak pohyb očí, tak i prostor před nimi. Ke spuštění reakcí protézy by se tak dalo využít nejen personalizovaného nastavení gest pohybem očí, ale také pouhého pohledu směrem na určité předem stanovené body přímo na protéze. Díky těmto vlastnostem by se tak mohlo jednat o metodu aplikovatelnou i pro případy paraplegie a kvadruplegie. Pro tyto účely by se místo plnohodnotné protézy použila jen vnější konstrukce obepínající končetinu postiženého. Použití rozšířené reality tímto způsobem s cílem cenové dostupnosti pro co

největší množství uživatelů je opět možné jen ve spojení s nízkonákladovou výrobou konstrukcí metodou 3D tisku. [36]

3 VÝHODY A NEVÝHODY TIŠTĚNÉ NÁHRADY

3.1 ŽIVOTNOST

Klasická protéza vyrobená v protetických centrech má životnost okolo dvou let, přičemž se na jednotlivé komponenty se v České republice vztahuje zákonná záruka ve stejné délce. Opotřebení nezávisí jen na materiálu, ale také na míře aktivity v životě pacienta. [17]

V případě dětských protéz se musí počítat s tím, že dítě roste a vyvíjí se, tím pádem by se ve velmi krátkém časovém horizontu muselo řešit několik výměn protéz. S tím je samozřejmě spojená i značná finanční zátěž. Nespornou výhodou tištěné protézy tak je, že může být kdykoli zhotovena ve větším formátu. Náklady na její výrobu jsou totiž minimální, a tedy rodinu nezatěžující. Dítě tak nemusí čekat až do ukončení růstu, aby mu byla poskytnuta funkční pomůcka k usnadnění každodenních činností. Zároveň je mu tak umožněno začlenění do kolektivu v mnohem větší míře. Výroba klasické protézy může být totiž díky složitosti použitých technologií a materiálů v některých případech natolik zdlouhavá, že se ještě před jejím dokončením stihnou míry dětského pacienta změnit. [10]

V průběhu života je protéza několikrát měněna i u dospělých pacientů. S tím souvisí i zajímavé vyčíslení nákladů výměn a zdravotní péče, která je s postižením spojená. U vojáků s amputací v důsledku služby ve válce v Afghánistánu a Iráku, činí průměrné životní náklady spojené s postižením nejméně 823 299 dolarů. Přičemž tento výpočet bere v potaz jen amputace a náhrady horních končetin. Veteráni jsou pro tyto případy zabezpečeni pojištěním poskytovaným armádou. Tato čísla však dávají jasnou představu o životních nákladech i v případě nepojištěných pacientů. Pokud to situace a úroveň amputace dovoluje, je vytištěná protéza možným řešením těchto případů. [39]

3.2 NÁKLADY

Cena protetické náhrady pro horní končetinu se v případě klasické tahové protézy pohybuje v rozmezí 50 000 - 80 000 korun. Některé základní typy protéz jsou buďto zcela nebo z části hrazené pojišťovny. Ty většinou hradí jen jednu náhradu. Není tak možné v případě potřeby střídát například kosmetickou a tahovou protézu. Což je způsob, který někteří odborníci doporučují i navzdory odlišným ovládacím mechanismům a způsobům nošení. [41]

V zemích, kde hrazení zdravotního pojištění není uděleno zákonem, bývá pro pacienty problém náhradu získat. Pokud si pacient amerického zdravotního systému platí pojištění, obvykle k náhradě doplácí 10–50 % z celkových nákladů na její pořízení. Stejně v jiných zemích se získání protézy odvíjí nejen od posouzení zdravotního stavu, ale také na základě vyhodnocení potřeby náhrady v souvislosti s mírou aktivit nebo dosud vykonávaným povoláním. Tato kritéria určují také typ náhrady, zda se bude nárok vztahovat jen na protézu kosmetickou, tahovou nebo myoelektrickou. Bez částečného pokrytí nákladů pojišťovnou by se náklady na kosmetickou protézu pohybovaly kolem 5 000 dolarů, zhruba 10 000 dolarů za tahovou ukončenou základním hákem a mezi 20 000 až 100 000 dolary za svaly ovládanou myoelektrickou. Například u konkrétní protézy horní končetiny s elektrickým ovládním na předloktí činí cena protézy 42 000 dolarů, tedy kolem 1 milionu korun. [8][40]

3.3 CENA VYTIŠTĚNÉ PROTÉZY

Díky možnosti využití 3D tisku k výrobě mechanických protéz, je vzhledem k pořizovací ceně použitého materiálu a nízkých výrobních nákladů možné snížit jejich cenu na minimum. Cena klasické protetické pomůcky by se měla vypočítávat podle následujícího vzorce:

$$[(\text{výrobní čas} \times \text{hodinová sazba}) + \text{materiál}] + \text{DPH}$$

Příčemž hodinovou sazbu v případě smlouvy daného zařízení se zdravotní pojišťovnou určuje právě pojišťovna. V případě nákladů na vytištěnou protézu by se bralo v potaz jen množství spotřebovaného filamentu, náklady na elektřinu v průběhu tisku a cena ostatních mechanických součástí. Cena vytištěné protézy horní končetiny se tak náklady na tisk a materiál pohybuje kolem 20 dolarů tedy kolem 500 korun. V případě tištěné náhrady prstu se jedná o podobnou částku. V tomto případě jsou však maximální ceny klasické protetické pomůcky v porovnání s náhradou větší části ruky nižší. Cena komerčních protéz prstu se totiž pohybuje mezi 9 000 a 19 000 dolary. V obou případech však rozdíl tištěné pomůcky od klasické náhrady může činit i statisíce. [7, 29, 42]

3.4 PERSONALIZACE A JEJÍ VLIV NA PSYCHIKU

Protéza by končetině neměla vracet jen její funkčnost, ale měla by být také esteticky přívětivá. Vzhled protézy a zapojení příjemce do procesu jejího výběru, má totiž zásadní vliv na jeho psychiku. Personalizace náhrady se dá za použití 3D tisku v podstatě snadno

dosáhnout. Buďto může jít o nahrazení běžně používané kosmetické rukavice tiskem z filamentu barvy odpovídající odstínu kůže příjemce, nebo může být naopak využita široká škála barev filamentu. Výhodou první možnosti je její aplikovatelnost jak pro kosmetické protézy, tak pro funkční tahové. Klasické tahové protézy totiž bývají často zakončeny modifikací specifickou pro vykonávání konkrétní činnosti. Tedy jejich předloktí mohou plnit kosmetickou funkci, avšak zakončení už ji většinou neplní. Vytisknutá tahová protéza může mít zakončení prsty stáhnutelnými v sevření, čímž bude zajištěna jak funkční, tak estetická stránka náhrady. K druhé možnosti, tedy použití barevného filamentu, je vhodné se přiklonit především v případě dětských pacientů. V rámci projektu e-Nable bylo právě pro tyto účely vytvořeno již několik nyní volně dostupných modelů imitujících oblíbené superhrdiny. Díky úpravám stávajících modelů nebo tvorbě vlastních lze vytvořit zcela unikátní vzhled dle přání a potřeb konkrétního příjemce. [29, 30]

3.5 DOPADY TISKU NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Nejčastějším materiálem používaným pro 3D tisk v závislosti na využívání FFF tiskáren je PLA. Tento materiál se vyrábí převážně ze sacharidové složky získávané z přírodních zdrojů jako je kukuřičný škrob, cukrová třtina nebo například kořeny manioku. Dalo by se tedy předpokládat, že rozložitelnost tohoto v podstatě přírodního materiálu nebude problémem. Pravdou však je, že se PLA dá kompostovat jen v některých k tomu speciálně určených průmyslových zařízeních, která samozřejmě nemohou pojmout veškeré množství tohoto odpadu. Zbylý odpad tak končí na skládkách, kde se jeho rozložitelnost počítá v rozmezí sta až tisíce let. V průběhu této doby bude ale potřeba vypořádat se i s dalším problémem, kterým je množství metanu, které se z rozkládajícího se PLA materiálu uvolňuje. [18]

Jeden z posledních výzkumů zaměřených na tuto problematiku se však zabýval druhou možností naložení s PLA odpadem, a to možnostmi jeho recyklace. Tým Brazílských vědců zrealizoval řadu pokusů založenou na opětovném roztavení materiálu. PLA tak bylo nejprve roztříděno dle barev a nakonec, díky nízké teplotě tání, také roztaveno a různými způsoby zakonzervováno k dalšímu použití. Takto zpracovaný materiál se pak dá znovu roztavit a využít v další výrobě. [19]

I SLA jako metoda využívající k tisku resinů se má v budoucnu přeměňovat na využití ekologičtějších materiálů. Experimentuje se s využitím použitého fritovacího oleje, který se

v laboratořích mění v plně rozložitelný resin. Z jedno litru přefiltrovaného oleje lze vytvořit kolem půl litru resinu. Při ceně kolem 300 dolarů za tunu oleje by se tak jednalo o dosud nejlevnější tiskový materiál. Jeho snadná roztažitelnost by ale mohla být zároveň nevýhodou, a to zejména díky nízké odolnosti proti povětrnostním podmínkám a rozkladu mikroby. Jedny z prvních takto vytištěných modelů totiž při testech rozložitelnosti v půdě ztratily kolem 20 % své váhy. [38]

Otázka dopadů plastového odpadu z 3D tisku by ale měla být také postavena před argument zakládající se na redukcí ostatního odpadu právě díky implementaci 3D tisku do procesu výroby. A to hned z někomu důvodů. Prvním by byla možná výroba jinak nedostupných náhradních dílů, která umožňuje vlastní opravy nejrůznějších typů bez nutnosti nahrazení poškozeného kusu kusem novým. Tím teoreticky dochází ke snížení celkového odpadu a nabízejí se tak nové možnosti opětovného použití. Díky zakázkové kusové výrobě 3D tiskem může dojít k částečnému nahrazení masové výroby a s ní spojeného množství odpadu a jiného znečištění, protože rychlost tisku umožňuje realizaci výroby až po obdržení objednávky. Ze stejných důvodů nebudou výrobci muset disponovat ani velkoplošnými sklady připravených výrobků. Přesunutím výroby z velkých společností do rukou rozrůstající se sítě tvůrců, se také zmenší vzdálenost nutná k přepravě výrobků a tím i ke snížení dopravními prostředky produkovaných emisí. [15]

4 VZNIK A VÝVOJ PROJEKTU

Za vzniknutím projektu stála událost z roku 2011, kdy si jihoafrický tesař Richard při nehodě uřízl prsty a záhy zjistil, že jsou protetické pomůcky mimo jeho finanční schopnosti. Zvláště pokud postižený přijde pouze o prsty a zbytek ruky zůstane zachován. Jedna taková náhrada prstu by totiž vyšla na 10,000 amerických dolarů tedy v přepočtu skoro na čtvrt milionu korun. Richard našel na internetu video od cosplayera Ivana Owena, který si pro svůj kostým vyrobil mechanicky ovládané drápy. Richard kontaktoval Ivana s prosbou a výrobu podobného zařízení, které by vyřešilo jeho problém. Ivan přijal žádat jako výzvu a tím začal skoro rok postupného vývoje prototypu. [7, 9]

Richard poslal Owenovi do Ameriky odlitek svojí ruky, aby podle ní mohl být vyvinut přesně padnoucí prototyp. Inspirací pro prototyp mu byl model vyrobený kolem roku 1800 australským zubařem Robertem Normanem. Na začátku se k jeho realizaci používaly předměty běžně dostupné v každé domácnosti jako jsou gumičky, lanka, lepenka, zipy a jiné. Zároveň se začalo i s propagací této neobvyklé spolupráce mimo jiné za účelem získání prostředků k realizaci setkání prvního makera a příjemce. Toto setkání se nakonec uskutečnilo necelý rok od odeslání Richardova emailu. [9]

Vlna medializace způsobila, že se tvůrci začali spontánně ozývat další zájemci. Mezi nimi i rodina pětiletého Liama, který se kvůli syndromu kongenitálních konstrukčních pruhů narodil bez prstů. Začala tak nová etapa vývoje tentokrát pro protézu s dlaní a prsty. Model byl konstruován převážně z kovových částí, šroubů a termoplastu. Umožňoval Liamovi uchopení předmětů i přes to, že byl zkonstruován bez palce. Díky videozáznamům zachycujícím Liama cvičícího úchopy s jeho novou protézou, mohli tvůrci pracovat na řadě vylepšení pro budoucí model. [9]

Po tomto úspěchu začalo pátrání po efektivnějším způsobu výroby. Poprvé se tak v historii projektu objevuje využití 3D tiskárny, kterou projektu darovala společnost Makerbot. V roce 2013 byla vytištěna a sestavena první mechanická protéza, jejíž model nabídli tvůrci volně ke stažení. [9]

Společnost Makerbot natočila o Liamově vytištěné protéze krátké video, které se ukázalo jako klíčové pro další vývoj projektu. Video si totiž všiml profesor z RIT (Rochester Institute

of Technology), Jon Schull. Schull již dříve pracoval s podobnou myšlenkou. Vytvořil plány, které by později daly vzniknout projektu, který pracovně nazval “e-nable”. Tehdy však o projektu e-nable zatím uvažoval pouze jako o předmětu pro univerzity, kde by se studenti nejen naučili protézu vyvinout, ale zároveň jí obdarovat konkrétního příjemce. Při snaze začlenit předmět do výuky se však na univerzitách neseťkal s úspěchem. Video ho inspirovalo k tvorbě interaktivní webové mapy, do které se mohli zapisovat jak ti, kteří tiskem chtěli pomoc, tak i ti, kteří pomoci sami potřebovali. [7, 8, 9]

V roce 2014 byly vytvořeny internetové stránky Enabling The Future, které zájemcům umožňují snazší zapojení do projektu, jehož motem je “podávat světu pomocnou ruku”. Zapojení velkého množství dobrovolníků a příjemců dalo s dalšími lety za vznik řadě personalizovaných podob a úprav původního modelu. Vzniklo tak třeba množství návrhů na motivy superhrdinů vhodných pro dětské příjemce. [9]

V rámci projektu se začalo také se vzděláváním a všeobecným šířením osvěty na půdě škol i mimo ně. Došlo ke spuštění různých typů akcí, mimo jiné například workshopů pro děti a jejich rodiče, kde se protetické ruce vyráběly. Rodiče i děti se tak seznámily nejen s jejich výrobou, ale i sestavováním a celou myšlenkou tohoto projektu. Do projektu se zapojily také některé nemocnice, které využily svého působení k vytvoření spojovacích bodů mezi pacienty a dobrovolníky. Do mapy dobrovolníků a příjemců se nově rokem 2015 začaly registrovat i místa nabízející tvůrcům volně přístupné tiskárny. [8]

Do roku 2019 bylo celkem vytištěno zhruba 7 000 mechanických protéz pro příjemce z více než 100 zemí světa. Komunita na počátku svého založení čítala jen 100 členů má nyní více než 30 000 dobrovolníků. [9]

5 MOŽNOSTI ZAPOJENÍ ORGANIZACÍ DO PROJEKTU

Spojení dobrovolníka a příjemce předchází schvalovací proces který začíná registrací do seznamu dobrovolníků. K plnému zařazení dobrovolníka do systému projektu vede několik kroků. [20]

1. Obeznámit se s pravidly a zásadami
2. Seznámit se s aktuálně dostupnými modely
3. Vytvořit testovací model
4. Předložit testovací model ke schválení
5. Naučit se, jak správně změřit e-NABLE model
6. Vytvořit účet na webové centrále e-NABLE
7. Najít někoho, kdo zařízení potřebuje a nabídnout pomoc
8. Připojit se k e-NABLE fóru na Wikifactory
9. Připojit se k místní e-NABLE skupině nebo vytvořit novou
10. Vyhledat další příjemce

Tyto kroky jsou v podstatě stejné jak pro jednotlivé dobrovolníky, tak školy, instituce a jiné skupiny. Školy mohou například využít dostupných materiálů k tisku i bez toho, že by se do projektu chtěly aktivně zapojit. Každý dostupný model je možné jednoduše upravit v programech pro 3D modelování, čímž se otevírají dveře různým kreativním zpracováním. Studenti tak mohou využít stávajících modelů jak k základnímu seznámí s funkcemi programů, tak k prohlubování dosavadních schopností jejich redesignem nebo návrhem modelů vlastních. [20]

Projekt má na výběr z několika různých typů protéz a jejich různých úprav. Základem jsou modely téměř pro všechny úrovně amputace horní končetiny. Výjimku by mohly tvořit amputace v rameni, při kterých by mohl být pahýl pro uchycení vytištěné tahové protézy příliš krátký. Pahýl musí délkou zasahovat alespoň do prostoru mezi ramenem a loktem, aby bylo možné využít nejdelšího dostupného modelu protézy. K výběru správného typu náhrady lze využít podrobného návodu. Ten obsahuje jednoduché ilustrace úrovní amputací, přičemž je ke každé uvedeno několik návrhů vyhovujících modelů. [43]

Zajímavým konceptem je také přístup k výrobě modelů bez použití 3D tisku. Jedná se o výzvu vytvořenou tvůrci projektu. Výzva je časově neomezená a jejím cílem je sestavit funkční mechanický model protézy za použití běžně dostupných prostředků. Mohlo by se tak například jednat o činnost zařazenou do výuky ještě před tím, než se začne s tiskem modelu, aby si žáci mohli lépe představit fungování modelu a složitý proces, který stál za jeho návrhem a realizací jako prvního modelu v historii celého projektu. I tehdy se totiž použily jen běžně dostupné materiály. Na stránkách výzvy jsou napsaná pravidla popisující nejen navrhované materiály, ale také činnosti, které by mělo být možné s protézou provést. Každý si tak může vybrat, jestli jeho model bude přizpůsoben ke sbírání mincí, uchopení zubního kartáčku, a nebo třeba držení lahve s vodou. Každý model se pak může stejně jako jeho tištěné verze zdokumentovat a poslat ke schválení pro získání odznáčku. [22]

Systém odznaků je dalším ve školách využitelným motivačním aspektem. Jedná se o ocenění za různé splněné úkoly či výzvy. Například při schvalování testovacího modelu, žádá dobrovolník o uznání dvou různých odznaků. První je za vytištění modelu, a nárok na něj se dokládá natolik detailními fotografiemi, aby bylo možné posoudit kvalitu tisku. Druhý odznak se získává za sestavení modelu, a jeho potvrzení předchází natočení videa s krátkým představením dobrovolníka, ukázkou funkčnosti modelu a několika větami o použité tiskárně a průběhu tisku. [22, 23]

Například návrhem a tiskem funkčních anatomických modelů založených na stejném tahovém principu jako již vytvořené modely e-Nable, lze dosáhnout i jisté provázanosti mezi předměty. Studenti se tak s konkrétními částmi seznámí formou hry již během modelování, což může sloužit jako základ, na který budou stavět další odborné znalosti. [15]

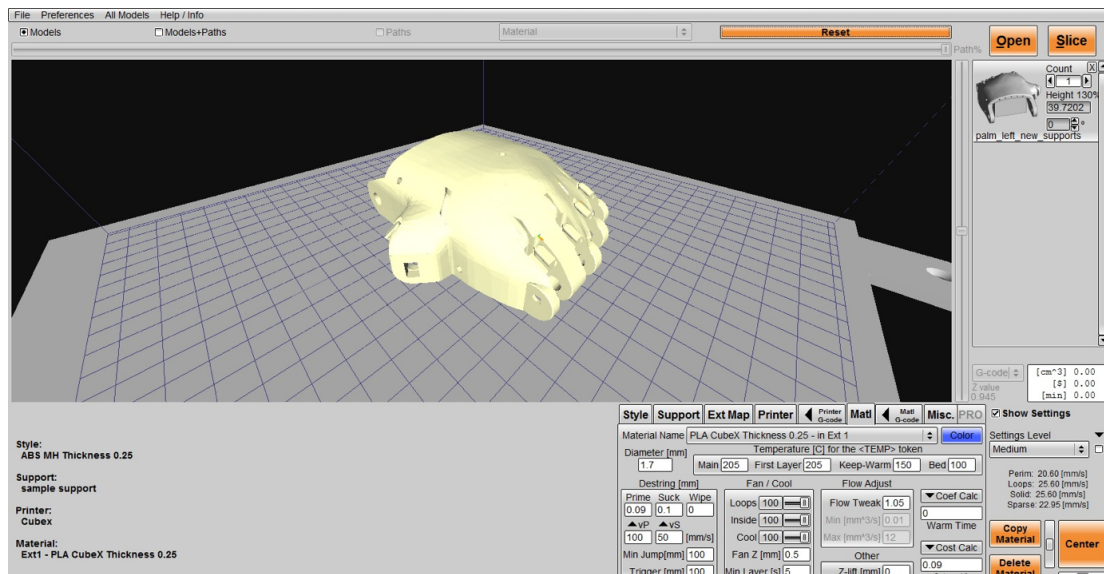
Propojitelnost účasti na projektu mezi různými předměty dokládá i další bod a tím je komunikace v cizím jazyce. V orientaci na stránkách projektu, při práci s návodem k sestavení, ale i při schvalování testovacího zařízení mohou žáci otestovat své dovednosti praktickým použitím angličtiny. Na druhou stranu například v případě mladších žáků je možné účastnit se projektu i bez větších znalostí angličtiny. V tomto případě se totiž učitelé mohou obrátit na českou pobočku projektu, E-Nable Czech, která je stejně jako každá jiná existující pobočka k nalezení v interaktivní mapě dobrovolníků. Na mapě se nachází také kontakt na konkrétní zástupce poboček a odkazy na jejich stránky. E-Nable Czech vznikla

teprve v průběhu roku 2019, Česká republika se tak řadí k nejmladším státům zapojeným do projektu. [24]

6 ZAPOJENÍ DO PROJEKTU

6.1 TISK

Modely byly v podobě již připravených souborů stl staženy z webu Thingiverse [5], kam byly jako volně dostupný materiál poskytnuty členy komunity. Pro tisk funkčního modelu ke schválení, byl vybrán doporučený model Phoenix V2. Po stažení bylo nutné každý soubor, představující jednotlivé díly, zvětšit na 130 %. Zvětšování bylo prováděno v programu KISSlicer. Pokud by se jednalo o model určený konkrétnímu příjemci, zvětšovaly by se soubory v poměru k předem změřeným mírám jejího nositele. Zvětšování modelu ke schválení se provádí hlavně z důvodu usnadnění následné kompletace vytištěných dílů. Zároveň se jedná o velikost, která je odpovídající pro většinu dětských příjemců. Dále prošly soubory předtiskovou kontrolou v podobě provedení simulace tisku.



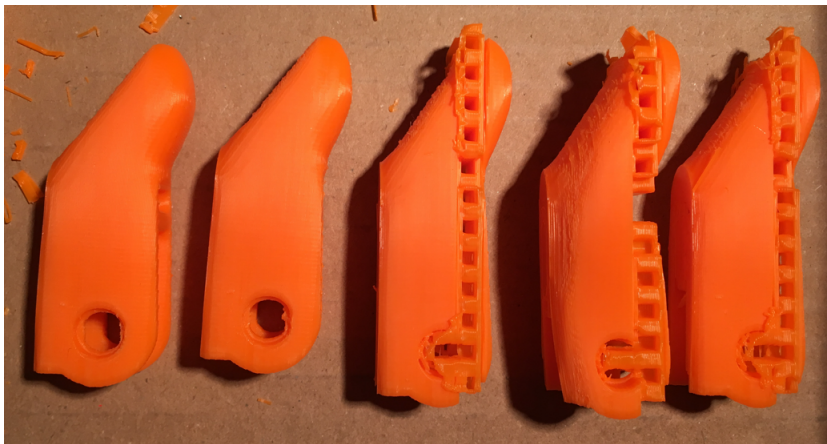
Obrázek 1 Proces zvětšování

S výjimkou následujících dílů, byl každý díl vytištěn jen jednou:

- 2x fingertip_long_v2
- 2x fingertip_short_v2
- 4x finger_phalanx
- 4x fingertip_pin
- 2x knuckle_pin_short
- 2x wrist_pin_thermo
- 2x wrist_pin_cap

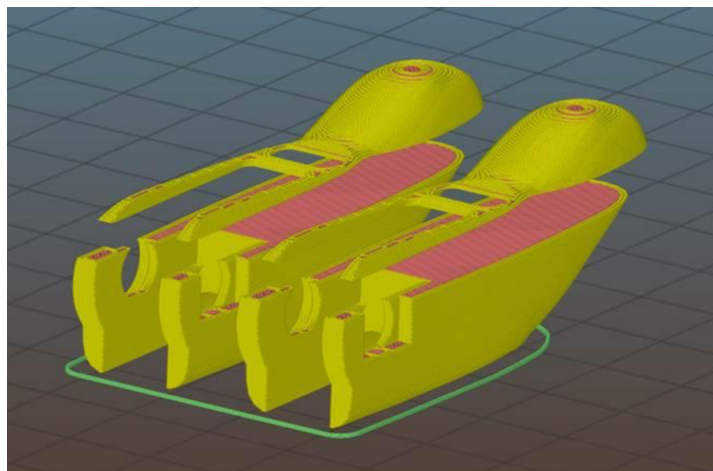
Pro kontrolu shodnosti rozměrů stl modelu s později vytištěným, byl určen díl gripper_box_right, jehož rozměry byly při softwarové kontrole 39x14x36mm.

K tisku byla použita kartézská tiskárna typu Průša i3 MK3 a PLA struna. Tato tiskárna disponuje vyhříváním podložky, díky kterému v závěru nebylo třeba použití žádných jiných metod pro snadné odstranění vytištěných částí. První pokus byl proveden s nastavením podpor tisku. Ty ale daly vzniknout několika vadným výtiskům. Chyba se projevila zejména u dílů ukazováku a palce, které podpory rozdělily na dvě oddělitelné části. V tomto případě nepřicházelo v úvahu ani opětovné slepení dílů. Podpory totiž zasahovaly do části otvoru pro zasazení pinů způsobem, který by znemožňoval následnou kompletaci.



Obrázek 2 Vadný výtisk prstů

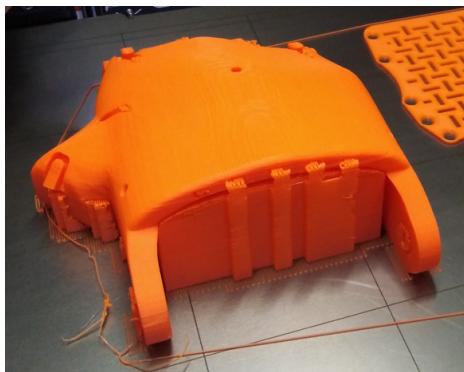
Na druhý pokus byl u prstů zvolen postup bez použití jakýchkoli podpor. Ten měl však výsledky srovnatelné s prvním pokusem. Proto bylo provedena kontrolní simulace, při které byly programem vykreslena prázdná místa v modelu, která defekt způsobovala.



Obrázek 3 Výsledek simulace

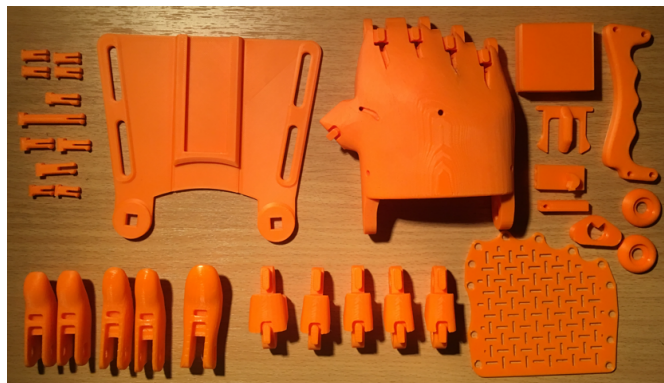
Aby se v co nejkratším možném čase vyloučila možnost chyby v stl souboru, byla pro třetí pokus použita odlišná tiskárna. Soubor stl zůstal beze změn. Byl opět zvolen tisk bez podpor. Tentokrát byl tisk úspěšný. Potvrdilo se tím, že chyba nebyla v stl souboru, nýbrž byla pravděpodobně provedena jeho úpravami v programu před tiskem.

Podobný vývoj měl i tisk další problematické části, již byl díl dlaně. Vizuálně byl díl nejevil žádné známky poškození. Problém nastal až při začišťování všech dílů od podpor. Ty v dlaňové části vyplnily vnitřní prostory pro následné vedení lanek. K odstranění nahromaděného materiálu byl použit rozžhavený drát, který měl v teorii překážející plastový materiál natavit a vyčistit lankové drážky. Tato metoda se ukázala kvůli zakřivení dílu, a tudíž i drážek, jako nefunkční. Muselo tak být přistoupeno k novému tisku, který byl opět nastaven bez podpor. Stejně jako u prstů i v tomto případě byl tisk úspěšný. V závěru došlo k porovnání rozměrů s kontrolním dílem gripper box.



Obrázek 4 Vadný výtisk dlaně

Vhodným krokem je po tisku také označení jednotlivých pinů, které může při následné kompletaci modelu do značné míry pomoci s orientací a správným upevněním. Piny se totiž liší hlavně, co se velikosti týče, tímto způsobem se tak dá předejít jejich možné záměně.



Obrázek 5 Vytištěné díly

6.2 KOMPLETACE MODELU [12]

Byl pořízen doporučený balíček s díly pro dokončení protézy dostupný z partnerských stránek projektu. [6] Obsahem balíčku byly:

4 ks upevňovacích šroubů (3 velikosti)

15 ks šroubů do dlaně (3 velikosti)

5 m rybářského lanka

3 m elastické šňůry (2 průměry)

100 elastických gumiček (2 velikosti)

1ks pěnová výztuha

10ks gelových návleků

2ks suchého zipu s uchycení

Sestavování bylo uskutečňováno převážně dle pdf návodu a za pomoci video návodu. [12, 13]

Předloketní část bylo třeba před sestavením ponořováním do teplé vodní lázně upravit. Ponoření trvalo zhruba 10 sekund. Následně se díl z vody vyjmul a formoval se pomocí zarážky, dokud se postranní části neohly do požadovaného úhlu. [14] Výhodou tohoto postupu je možnost jeho opakovaného použití, čímž je možné upravovat možné nedokonalosti. V případě schvalovacího modelu nemá tento krok takovou důležitost, jakou by měl v přípravě modelu pro konkrétního příjemce, kde jde více než o estetičnost než o pohodlnost. Pohodlnost je zajištěna také vplením pěnové výztuhy do vnitřního prostoru předložením i dlaňové části. Výztuha byla vystřihována dle papírové předlohy přiložené v balíčku s kompletovacími díly. Po nalepení byly přečnívající hrany zabroušeny pilníkem.



Obrázek 6 Výztuha dlaně



Obrázek 7 Výztuha předloktí

Při spojování dílů pomocí pinů byla odhalena další, ne však tisková chyba. Piny sloužící ke spojení dlaně s předloktím nebyly zvětšeny na 130 %. Nebylo tak možné díly pevně spojit. Proto se musela provést dodatečná úprava příslušného souboru stl a provést další tisk. Upevněním dílů pomocí pinů byla dokončena hrubá kompletace ruky.



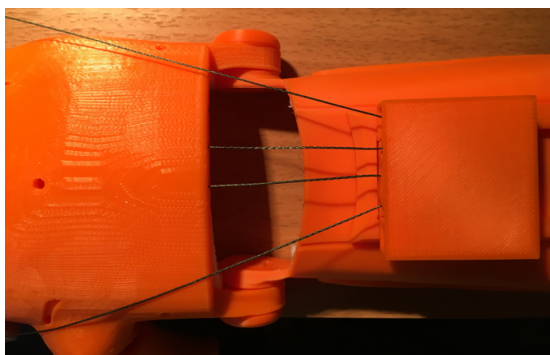
Obrázek 8 Porovnání pinu bez a se zvětšením

Dalším krokem byla fixace prstů pomocí dentálních gumiček. Základní balení obsahovalo dva typy gumiček – menší 1/4“ pro model vytištěný ve 100% velikosti a větší 5/6“ pro ostatní velikosti. Pro sestavovaný model tak byly využity 5/6“ gumičky, neboť byl model vytisknut ve 130% velikosti.



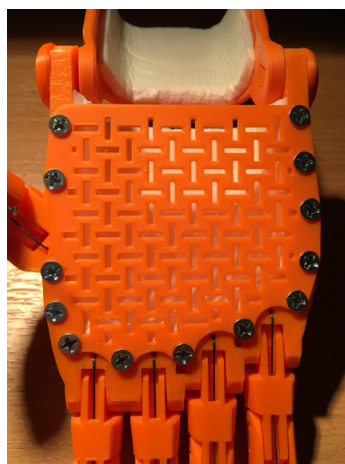
Obrázek 9 Aplikace gumiček

Následujícím krokem bylo provlečení a řádné upevnění vedoucích lanek. I v tomto případě bylo postupováno dle návodu, tedy od prstů skrze dlaň k zadní části, kde byla lanka vedena skrze díl s názvem whippetree. Z tohoto dílu pak lanka opět vycházela ven a byla vedena do zbylých prstů. Whippetree byl poté pomocí #6 x 1" šroubů upevněn do gripperboxu. Celý tento celek byl vložen do drážek předloketního dílu a zajištěn zarážkou. Jako poslední bylo lanko vedeno palcem, u kterého bylo v předloktí uchyceno skrze thumbtensioner pin. Posledním krokem před dokončením celého procesu bylo nastavení 30° úhlu mezi vrchní částí dlaně a předloktí. Jedná se o optimální úhel umožňující později příjemci snadno manipulovat s protézou tak, aby pohybem tlakem dlaně na stěnu dlaňové části došlo k semknutí prstů. Teprve v tomto nastavení se mohla lanka vycházející z prstů na jejich konci zajistit pomocí uzlu a lepidla. Před nanesením lepidla byla provedena poslední kontrola plynulosti pohybu několikerým sevřením a otevřením prstů pohybem předloktí.



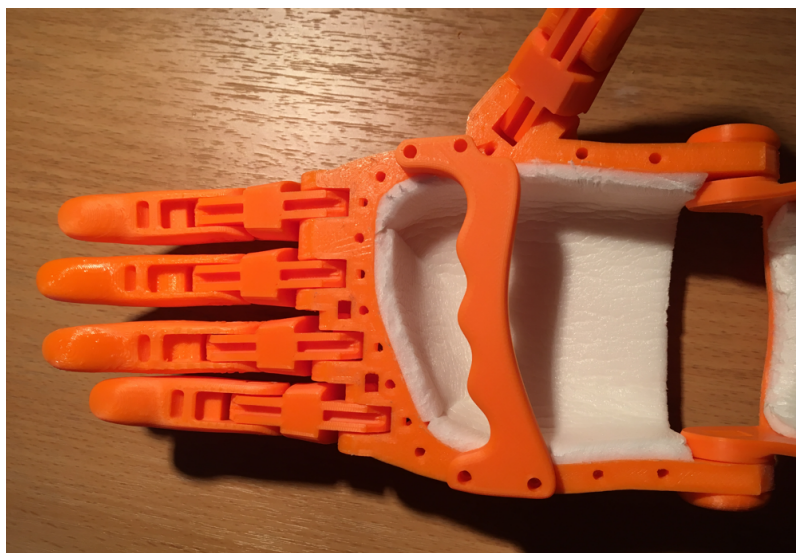
Obrázek 10 Upevnění lanek

Posledním přichycovaným dílem byla vnitřní strana dlaně. Ta byla připevněna pomocí #6 x 1/2" šroubů s plochou hlavou. U tohoto dílu je stejně jako u dílu předloktí možné provádět dodatečné termoplastické úpravy, aby bylo dosaženo maximálního pohodlí příjemce.



Obrázek 11 Připevnění vnitřní části dlaně

V případě využití modelu pro demonstrační účely, je možné na místo vnitřní části dlaně upevnit díl s názvem demo bar. Jedná se o podélný díl, který svým umístěním vytvoří příčku uprostřed dlaně a umožní tak úchop a následnou manipulaci i zdravému člověku. Kromě demonstrace plní tato část i funkci snadného ověření fungování úchopu, jako kontrola synchronního uzavírání všech prstů do dlaně.



Obrázek 12 Konfigurace s dílem demo bar

Pro snadné upínání předloketního dílu na končetinu příjemce byly otvory v dílu provlečeny pásky suchého zipu, který umožňuje nastavitelnost pevnosti obemknutí ruky.



Obrázek 13 Kompletní model

6.3 SCHVALOVACÍ PROCES

Na závěr byl zkompletovaný model zdokumentován za účelem postoupení schvalovacího procesu. Následovalo vyplnění krátkých formulářů k získání náležitého odznaku. První pokus však byl neúspěšný z důvodu podání žádosti o odznak na základě neaktuálních informací na webových stránkách projektu. Schvalování již neprobíhá na základě zažádání o jeden odznak dokládající kvalitu tisku i sestavení a funkčnost modelu, ale je rozdělen na dva samostatné odznaky. Podle instrukcí z následné zpětné reakce od tvůrců projektu, bylo o tyto odznaky zažádáno. První formulář se týkal doložení kvality tisku, pro který bylo vyžadováno pouze několik detailních fotografií tištěných částí modelu. Za úspěšné schválení byl udělen Phoenix V2 Fabrication odznak. Nárok na získání druhého odznaku, Phoenix V2 Assembly, byl doložen fotografiemi a videem sestaveného modelu, včetně videa obsahujícího krátké představení žadatele. Toto video obsahovalo i informace o použité tiskárně, zdroji vytištěného modelu, problémech, se kterými se při tisku setkal, demonstrací funkčnosti modelu a jeho pevnosti. Odznaky byly schváleny a uděleny během následujících sedmi dní.

6.4 SPOLUPRÁCE S E-NABLE CZECH

V průběhu psaní práce byl také navázán kontakt s českou pobočkou projektu e-Nable. Vzhledem ke krátké době fungování projektu na území České republiky nebyla zatím v rámci projektu realizována pomoc žádnému konkrétnímu příjemci. V rámci spolupráce byl ale zatím vytvořen návrh loga pobočky, které by mělo sloužit nejen k prezentaci na vlastních stránkách e-Nable Czech, ale také jako prezentace v náhledu světové mapy tvůrců na oficiálních webových stránkách projektu.



Obrázek 14 Logo

7 DISKUZE

Model byl sestavován na začátku psaní této práce. Od té doby byla v průběhu roku na modelu pozorována degradace zejména v oblasti uchycení mezikloubového spojení pomocí dentálních gumiček. Ty s časem začaly ztrácet na elasticitě. Lze předpokládat, že se bude jednat o jednu z částí modelu, kterou bude potřeba pravidelně měnit v relativně krátkém časovém intervalu.

S jistou mírou opotřebení a potřebou budoucích výměn je třeba počítat i v případě upevňovacích pásků suchého zipu které by časem zejména ve smyčkové části mohly ztrácet schopnost pevné fixace. Všechny mechanické části jsou snadno dostupné v obchodech s vybavením pro kutily. V případě poškození vytištěných částí je možné příjemci konkrétní díly kdykoli rychle a pohodlně dotisknout.

Výjimku by, co se týče dostupnosti, mohly tvořit gelové návleky na konečky prstů. Ty v Čechách na základě vlastního průzkumu trhu nejsou běžně dostupné. Aby bylo možné zachovat pevnost úchopu, daly by se návleky teoreticky nahradit obalováním jednotlivých prstů v potravinářském silikonu. Tento experimentální přístup však v rámci práce nebyl realizován.

Jednou z nevýhod této tištěné protézy by mohla být otázka hromadění bakterií mezi jednotlivými vrstvami tisku. Například Kloski ve své publikaci mluví i o možnostech povrchových úprav vytištěných modelů. Zejména o vyhlazení jednotlivých vrstev tisku pomocí roztoku acetonu (Kloski 2017), do kterého se modely na několik sekund ponoří. To je však možnost týkající se pouze tisku provedeného pomocí ABS nebo ASA materiálů, které jsou touto látkou rozpustné. [15]

V případě použití PLA by se dalo spekulovat nad podobným řešením. Průša ale upozorňuje na to, že PLA se acetonem vyhlazovat nedá. Reaguje sice s chloroformem, nikoli však způsobem použitelným pro vyhlazování, nýbrž spíše pro lepení. Chloroform totiž PLA naleptává v mnohem větší míře než aceton ABS. Pro pozdější vytvoření hladké protézy by se tak od začátku muselo počítat s tiskem z jiného materiálu, než byl použit v tomto případě. [16]

Realizací modelu bylo dosaženo jednoho z hlavních cílů práce.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo zmapovat systém zapojení do projektu e-Nable, jeho podmínky, případně průběh tisku a schvalovací proces modelu. Připravit půdu pro možné zapojení zejména vzdělávacích institucí jejich seznámením s existencí projektu a možnostmi využití aktivního zapojení v rámci výuky. Zároveň bylo záměrem práce představit technologii 3D tisku a možnosti jejího využití jak na poli techniky, tak medicíny.

První kapitola teoretické části pojednává o vývoji technologie 3D tisku a jeho metodách potažmo možnostech tiskových materiálů. Základem je popis metod počínaje technologií SLA, která položila základní kámen dalším metodám a celému odvětví 3D tisku. Přes další metody, jakými je SLS a LOM, až k v současnosti nejhojněji používané FFF technologii. Součástí kapitoly je i souhrn používaných druhů tiskových materiálů a jejich specifické vlastnosti a možnosti vhodného použití. Důraz byl kladen především na obsáhnutí materiálů pro FFF tiskárny, neboť byla použita při vypracování praktické části. Kapitola také nastiňuje očekávaný budoucí vývoj technologie a pojednává o možnostech využití 3D tisku a jeho uplatnění v různých oborech.

Další část rozvádí uplatnění 3D tisku v oboru medicíny. A to jak využití v rámci výroby náhrad vnitřního oporného systému jako jsou různé části kostry, tak i vývoj v oblasti biotisku jakožto rozvíjející se možnosti mimotělní kultivace ostatních buněk a orgánů. Závěr kapitoly je věnován seznámení s protetickými náhradami horních končetin a vznikem a příčinám vad, které tyto pomůcky kompenzují. Zejména pak jejich možná výroba pomocí technologie 3D tisku, která je dostupnější a levnější alternativou klasickým protetickým náhradám.

Součástí práce je dále představení a projektu e-Nable. Jakým způsobem projekt vznikl a jakým směrem se ubírá v současnosti. Dále jsou popsány možnosti zapojení do projektu společně s popsáním jednotlivých kroků vedoucích k nabytí statusu tvůrce. V kapitole jsou rozvedeny úvahy nad možnými výhodami, ze kterých by organizace v případě zapojení mohly těžit.

Jako základ pro nadcházející praktickou část jsou popsány nejdůležitější rozdíly mezi klasickou a vytištěnou protetickou pomůckou. Rozdíly v délce životnosti a případné dostupnosti náhradních dílů, pořizovací náklady a dostupnost individuálních přizpůsobení.

Praktická část popisuje průběh procesu účasti na projektu tvorbou vlastního modelu. Představuje průběh a problémy tisku a jejich řešení, společně s úpravami uskutečněnými před tiskem i po něm. Stejným způsobem je popsán i proces sestavování modelu a jeho schvalování.

Produktem práce je funkční protéza horní končetiny s uchycením na předloktí pravé ruky a umožňující manipulaci předměty sevřením vytištěné dlaně. Zhotovený model byl projektem schválen a umožnil tak tvůrci plné zapojení do projektu.

RESUMÉ

Main focus of this thesis is to cover system of e-Nable project and how it can be implemented to education purposes.

It is divided into two parts, it begins with theoretical part which shows technology and methods of 3D printing and its practical use in medicine. It also reveals the use and advantages of this method in prosthetics which is the foundation of e-Nable – project which help people in need with delivering of custom 3D printed artificial hands from independent creators.

Second part has more practical view and describes the participation process in e-Nable. It shows the preparations, alterations and printing process as well as discovered faults, final completion and approval process. Final product of this thesis is functional hand prosthesis attachable to the forearm and allowing manipulation of objects by gripping the palm and fingers. Completed model was approved by e-Nable and accepted for full involvement in the project. Future involvement in this project can be done by educational facilities as practical use of their 3D printers.

SEZNAM LITERATURY

- [1] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. *3D tisk*. Přeložil Petra MILLAROVÁ. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.
- [2] What is Selective Laser Sintering? [online]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html> [cit. 28.12.2018]
- [3] What is Laminated Object Manufacturing? [online]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html> [cit. 28.12.2018]
- [4] Enabling The Future [online]. Dostupné z: <https://enablingthefuture.org> [cit. 28.3.2020].
- [5] e-NABLE Phoenix Hand v2 [online]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:1453190> [cit. 28.3.2020].
- [6] Phoenix Hand by e-NABLE Assembly Materials Kit [online]. Dostupné z: https://shop3duniverse.com/products/phoenix-hand-by-e-nable-assembly-materials-kit?_pos=1&_sid=c7710823c&_ss=r [cit. 28.12.2020]
- [7] e-NABLE - volunteers changing the world with 3D-printed prosthetics, Jon Schull, TEDxFlourCity 2014 [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=H4Fwn3RHa14> [cit. 30.3.2020]
- [8] e-NABLE: Helping Hands in the Global Village, Jon Schull, TEDx Rochester 2015 [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=4UdmbXq-XTE> [cit. 30.3.2020].
- [9] About us [online] Dostupné z <https://enablingthefuture.org/about/> [cit. 30.3.2020].
- [10] How 3D Printing is Changing the Way We Solve Problems, Andreas Bastian, TEDxVilnius [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=WVx4L6kDZkc> [cit. 30.3.2010].

- [11] DUNGL, Pavel. Ortopedie. 2., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-4357-8
- [12] Assembling the Phoenix hand pdf, John Diamond, 2016 [online]. Dostupné z <http://enablingthefuture.org/phoenix-hand/> [cit. 12.2.2019]
- [13] Phoenix V2 hand assembly, John Diamond [vid. 12.2.2019]. Dostupné z https://www.youtube.com/watch?v=Der_DD2_zps
- [14] Thermoforming a gauntlet for an e-NABLE hand, John Diamond [online]. Dostupné z <https://www.youtube.com/watch?v=BihhKHjguZY> [cit. 15.2.2019]
- [15] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. Začínáme s 3D tiskem. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [16] STŘÍTESKÝ, Ondřej. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. Praha: Prusa Research, 2019.
- [17] SMUTNÝ, Milan. Informace pro pacienty po amputaci končetiny. 2. vyd. Přeložil Sylva HOMOLOVÁ. Brno: MS ortoprotetika, 2013. ISBN 978-80-260-3903-7.
- [18] MOLITCH-HOU, Michael. Climate Disrupted: The Problem(s) with PLA. In: 3dprint.com [online]. 13.3.2020 [cit. 31.3.2020]. Dostupné z: <https://3dprint.com/264490/climate-disrupted-the-problems-with-pla/>
- [19] DANDARA PEREIRA LEITE, Camilla a kol. Recovery and recycling of a biopolymer as an alternative of sustainability for 3D printing. In: AMBROSIO, Marcelo a Carlo VEZZOLI. Designing sustainability for all: Proceedings of the 3rd LeNS world distributed conference VOL. 1. Milán: Edizioni POLI.design, 2019, s. 207-210. ISBN 978-88-95651-26-2.
- [20] Lend a Hand [online]. Dostupné z: <http://enablingthefuture.org/lend-a-hand/> [cit. 31.3.2020]
- [21] e-NABLE Maker Camp [online]. Dostupné z: <https://enablingthefuture.org/e-nable-maker-camp/> [cit. 31.3.2020].

- [22] Device-Specific Badges [online]. 6.8.2019. Dostupné z: <https://hub.e-nable.org/s/e-nable-digital-badge-awards/wiki/page/view?title=Device-Specific+Badges> [cit.1.4.2020]
- [23] e-NABLE Digital Badge Awards Program [online]. 10.1.2020. Dostupné z: <https://hub.e-nable.org/s/e-nable-digital-badge-awards/wiki/page/view?title=e-NABLE+Digital+Badge+Awards> [cit.1.4.2020]
- [24] e-NABLE Community Chapters [online]. Dostupné z: <https://enablingthefuture.org/e-nable-community-chapters/> [cit. 1.4.2020].
- [25] DZIAN, Anton & Zivcak, Jozef & Penciak, Rastislav & Hudak, Radovan. (2018). Implantation of a 3D-printed titanium sternum in a patient with a sternal tumor. *World Journal of Surgical Oncology*. 16. 10.1186/s12957-018-1315-8.
- [26] 3D HUBS. 3D printing trends 2020: Industry highlights and market trends [online]. Dostupné z: https://downloads.3dhubs.com/3D_printing_trends_report_2020.pdf [cit. 2.4.2020].
- [27] K. BIRLA, Ravi a Stuart K. WILLIAMS. 3D bioprinting and its potential impact on cardiac failure treatment: An industry perspective. *APL Bioengineering*. 2020, 2020(4).
- [28] Ortopedická protetika: Odborný časopis Federace ortopedických protetiků technických oborů. 2019, 2019(22). ISSN 1212-6705
- [29] PŮLPÁN, Rudolf. Základy protetiky. Praha: Epimedia, 2011. ISBN 978-80-260-0027-3
- [30] HADRABA, Ivan. Ortopedická protetika. Praha: Karolinum, 2006. ISBN 80-246-1296-8
- [31] SOSNA, Antonín. Základy ortopedie. Praha: Triton, 2001. ISBN isbn80-7254-202-8
- [32] Using computed tomography and 3D printing to construct custom prosthetics attachments and devices [online]. Dostupné z:

- <https://threedmedprint.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41205-017-0016-1> [cit. 5.4.2020]
- [33] Lorenzo Spreafico's 3D-printed prosthetic arm provides tactile feedback for low cost [online]. Dostupné z: <https://www.dezeen.com/2020/01/03/lorenzo-spreafico-t1-prosthetic/> [cit. 5.4.2020]
- [34] Sometimes Fingers are Over-rated! [online]. Dostupné z: <http://enablingthefuture.org/2014/06/26/sometimes-fingers-are-over-rated/> [cit. 5.4.2020]
- [35] Custom prosthetic arm turns student into a bionic drummer [online]. Dostupné z: <https://newatlas.com/jason-barnes-robotic-drumming-prosthetic-arm/31130/> [cit. 5.4.2020]
- [36] HAZUBSKI, Simon, Harald HOPPE a Andreas OTTE. Non-contact visual control of personalized hand prostheses/exoskeletons by tracking using augmented reality glasses. *3D Printing in Medicine*. 2020, 2020(6).
- [37] Introduction to FDM 3D printing [online]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing> [cit. 10.1.2019]
- [38] U of T researchers turn McDonald's deep fryer oil into high-end 3D printing resin [online]. Dostupné z: <https://www.utoronto.ca/news/u-t-researchers-turn-mcdonald-s-deep-fryer-oil-high-end-3d-printing-resin> [cit. 8.4.2020]
- [39] K. BLOUGH, David a kol. Prosthetic cost projections for servicemembers with major limb loss from Vietnam and OIF/OEF. *Journal of Rehabilitation Research & Development*. 2010, 47(4), 387 - 402.
- [40] Prosthetic Arm Cost [online]. Dostupné z <https://health.costhelper.com/prosthetic-arms.html#extres5> [cit. 10.4.2020]
- [41] Srovnání jednotlivých typů protéz horních končetin [online]. Dostupné z: <http://www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc1dfa89a7ea17.htm>

- [42] YOUNG, Keaton J., James E. PIERCE a Jorge M. ZUNIGA. Assessment of body-powered 3D printed partial finger prostheses: a case study. *3D Printing in Medicine*. 2019, (5)
- [43] Which Design? [online]. Dostupné z: <https://hub.e-nable.org/s/e-nable-devices/wiki/page/view?title=Which+Design%3F> [cit. 8.4.2020]
- [44] 3D Printed House/Construction Materials: What Are They? [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printing-in-construction-what-are-3d-printed-houses-made-of/> [cit. 15.4.2020]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Proces zvětšování.....	24
Obrázek 2 Vadný výtisk prstů.....	25
Obrázek 3 Výsledek simulace.....	25
Obrázek 4 Vadný výtisk dlaně.....	26
Obrázek 5 Vytištěné díly.....	26
Obrázek 6 Výztuha dlaně.....	27
Obrázek 7 Výztuha předloktí.....	28
Obrázek 8 Porovnání pinu bez a se zvětšením.....	28
Obrázek 9 Aplikace gumiček.....	28
Obrázek 10 Upevnění lanek.....	29
Obrázek 11 Připevnění vnitřní části dlaně.....	29
Obrázek 12 Konfigurace s dílem demo bar.....	30
Obrázek 13 Kompletní model.....	30
Obrázek 14 Logo.....	31