

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ZDRAVOTNICKÝCH STUDIÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2024**

**Anna Tomanová**

**FAKULTA ZDRAVOTNICKÝCH STUDIÍ**

Studijní program: Ortotika-protetika, B0914P360003

**Anna Tomanová**

**VYUŽITELNOST 3D TISKU V PROTETICE**

**Bakalářská práce**

Vedoucí práce: Mgr. Rita Firýtová

PLZEŇ 2024



## **Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a všechny použité prameny jsem uvedla v seznamu použitých zdrojů.

V Plzni dne

.....

vlastnoruční podpis

## **Abstrakt**

Příjmení a jméno: Tomanová Anna

Katedra: Katedra rehabilitačních oborů

Název práce: Využitelnost 3D tisku v protetice

Vedoucí práce: Mgr. Rita Firýtová

Počet stran – číslované: 39

Počet stran – nečíslované: 13

Počet příloh: 0

Počet titulů použité literatury: 20

Klíčová slova: 3D tisk, protetika, aditivní výroba, pahýlové lůžko

### **Souhrn:**

Tato bakalářská práce je zaměřena na téma využitelnosti 3D tisku v protetice a zkoumá tuto problematiku formou literární rešerše.

V teoretické části je pozornost zaměřena na krátké přiblížení protetiky a amputací. Větší prostor je věnován 3D tisku a to hned z několika úhlů pohledu. Je zde vysvětlena jeho definice a stručná historie. Dále jsou zde popsány jednotlivé druhy 3D tisku jako selektivní depozice, selektivní tuhnutí selektivní vazba. 3D tisk a jeho rozvoj je poté zasazen do

širokého kontextu vlivu na společnost. Další kapitoly se podrobně věnují výhodám a nevýhodám 3D tisku.

Hlavním cílem této práce je poté popsat využitelnost 3D tisku v protetice, čemuž se věnuje praktická část. Vedlejším cílem je vytvořit ucelený literární zdroj na toto téma. Na vhodnost užití technologie 3D tisku v protetice je zde nahlíženo z hlediska nosnosti a funkčnosti zhotovené pomůcky, vlivu na životní prostředí a finanční náročnosti výroby. Odpovědi na výzkumné otázky byly hledány pomocí důkladného rozboru 8 studií zahraničních autorů.

3 studie se věnovaly 3D tisku TT lůžek, 2 výzkumy byly zaměřeny na 3D tištěná TF lůžka, 3D tištěná TR lůžka byla předmětem 1 studie a dva autoři testovali výrobu protézy ruky pomocí 3D tisku. Ke každé výzkumné otázce byla vytvořena přehledná tabulka shrnující nejdůležitější poznatky dané studie. Nosnosti se věnovali 3 autoři a všichni se shodují, že za dodržení určitých podmínek lze 3D tiskem dosáhnout požadované nosnosti. Funkčnost zhotovené pomůcky hodnotilo 5 studií a všechny ve výsledku hlásí kladný výsledek. Otázka vlivu na životní prostředí se objevuje v 5 experimentech a ve všech je vnímána jako jedna z předností 3D tisku. Finanční stránku 3D tisku zmiňují pouze dva autoři, kteří spatřují nízkou nákladovost jako jeden z hlavních benefitů 3D tisku v protetice. Tyto výsledky následně byly zkompileovány a diskutovány.

**Abstract:**

Surname and name: Anna Tomanová

Department: Department of Rehabilitation Sciences

Title of thesis: Applicability of 3D printing in prosthetics

Consultant: Mgr. Rita Firýtová

Number of pages – numbered: 39

Number of pages – unnumbered: 13

Number of appendices: 0

Number of literature items used: 20

Keywords: 3D printing, prosthetics, additive manufacturing, prosthetic socket

**Summary:**

This bachelor thesis focuses on the topic of the applicability of 3D printing in prosthetics and explores this issue through a literature search.

The theoretical part focuses on a brief introduction to prosthetics and amputations. More space is devoted to 3D printing from several perspectives. Its definition and a brief history are explained. Furthermore, the different types of 3D printing such as selective deposition, selective solidification and selective bonding are described. 3D printing and its development is then set in the broad context of its impact on society. Further chapters discuss in detail the advantages and disadvantages of 3D printing.

The main aim of this thesis is then to describe the applicability of 3D printing in prosthetics, which is the focus of the practical section. A secondary aim is to create a comprehensive literature resource on the subject. The suitability of the use of 3D printing technology in prosthetics is considered from the point of view of the load-bearing capacity and functionality of the fabricated device, the environmental impact and the financial requirements of production. Answers to the research questions were sought through a thorough analysis of 8 studies by foreign authors.

3 studies focused on 3D printed transtibial sockets, 2 studies focused on 3D printed transfemoral sockets, 3D printed transradial sockets were the subject of 1 study, and 2 authors tested the fabrication of a prosthetic hand using 3D printing. For each research question, a table was created summarizing the most important findings of the study. Load capacity was addressed by 3 authors and all agree that under certain conditions 3D printing can achieve the desired load capacity. The functionality of the fabricated device was evaluated by 5 studies and all of them reported a positive result. The question of environmental impact appears in 5 experiments and in all of them it is perceived as one of the advantages of 3D printing. The financial aspect of 3D printing is mentioned by only two authors who see low cost as one of the main benefits of 3D printing in prosthetics. These results were subsequently compiled and discussed.

## **Předmluva**

Téma této bakalářské práce jsem si vybrala z toho důvodu, že v jiných oborech jde o velmi přelomovou technologii. V protetice tomu zatím tak není, proto jsem chtěla porozumět důvodům, které brání stejně rychlému rozvoji. Práce byla napsána za účelem vytvoření přehledného a uceleného zdroje informací, který může posloužit ostatním ortotikům-protetikům k seznámení s touto problematikou.

## **Poděkování**

Ráda bych zde poděkovala vedoucí práce paní Mgr. Ritě Firýtové především za trpělivost při vzniku této bakalářské práce, přínosné konzultace a její podněty.



# OBSAH

|  |   |
|--|---|
| Úvod .....   | 1 |
| Teoretická část .....                              | 2 |
| 1    Protetika.....                                | 2 |
| 1.1    Konvenční výroba .....                      | 2 |
| 2    Amputace.....                                 | 4 |
| 2.1    Příčiny amputace .....                      | 4 |
| 2.2    Druhy amputace.....                         | 4 |
| 2.2.1    Amputace dolních končetin.....            | 4 |
| 2.2.2    Amputace horních končetin.....            | 4 |
| 3    3D tisk .....                                 | 5 |
| 3.1    Co je 3D tisk.....                          | 5 |
| 3.2    Druhy 3D tisku .....                        | 5 |
| 3.2.1    Selektivní vazba.....                     | 5 |
| 3.2.2    Selektivní tuhnutí.....                   | 6 |
| 3.2.3    Selektivní depozice.....                  | 6 |
| 3.3    Historie 3D tisku.....                      | 6 |
| 3.3.1    Stereolitografie – SLA.....               | 6 |
| 3.3.2    Laminated Object Manufacturing – LOM..... | 6 |
| 3.3.3    Selective Laser Sintering – SLS .....     | 7 |
| 3.3.4    Fused Deposition Modeling – FDM.....      | 7 |
| 3.3.5    Zavedení pojmu 3D tisk .....              | 7 |
| 3.3.6    Velký rozvoj – Projekt Rep Rap.....       | 7 |
| 3.3.7    Zpřístupnění 3D tisku .....               | 8 |
| 4    Vliv 3D tisku na společnost.....              | 9 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.1    | Historie výroby .....                     | 9  |
| 4.1.1  | Třetí průmyslová revoluce.....            | 9  |
| 4.1.2  | Osobní průmyslová revoluce .....          | 9  |
| 5      | Výhody 3D tisku.....                      | 10 |
| 5.1    | Personalizace .....                       | 10 |
| 5.2    | Komplexita .....                          | 10 |
| 5.3    | Udržitelnost .....                        | 10 |
| 5.4    | Recyklace a plánované zastarávání .....   | 11 |
| 5.5    | Ekonomická stránka .....                  | 11 |
| 5.6    | Výhody konkrétních druhů 3D tisku .....   | 12 |
| 5.6.1  | FDM .....                                 | 12 |
| 5.6.2  | SLS .....                                 | 12 |
| 5.6.3  | SLA.....                                  | 12 |
| 6      | Nevýhody 3D tisku.....                    | 13 |
| 6.1    | Nevýhody konkrétních druhů 3D tisku ..... | 13 |
| 6.1.1  | FDM .....                                 | 13 |
| 6.1.2  | SLS .....                                 | 13 |
| 6.1.3  | SLA.....                                  | 13 |
|        | Praktická část .....                      | 14 |
| 7      | Cíle práce .....                          | 14 |
| 8      | Výzkumné otázky .....                     | 15 |
| 9      | Metodika.....                             | 16 |
| 10     | Analýza a interpretace výsledků.....      | 17 |
| 10.1   | Kvalitativní vyhodnocení studií.....      | 17 |
| 10.1.1 | Studie č. 1 .....                         | 17 |
| 10.1.2 | Studie č. 2 .....                         | 18 |
| 10.1.3 | Studie č. 3 .....                         | 19 |

|        |                                 |    |
|--------|---------------------------------|----|
| 10.1.4 | Studie č. 4 .....               | 21 |
| 10.1.5 | Studie č. 5 .....               | 21 |
| 10.1.6 | Studie č. 6 .....               | 22 |
| 10.1.7 | Studie č. 7 .....               | 23 |
| 10.1.8 | Studie č. 8 .....               | 24 |
| 10.2   | Výsledky.....                   | 26 |
| 10.2.1 | Výzkumná otázka č. 1.....       | 26 |
| 10.2.2 | Výzkumná otázka č. 2.....       | 28 |
| 10.2.3 | Výzkumná otázka č. 3.....       | 30 |
| 10.2.4 | Výzkumná otázka č. 4.....       | 32 |
|        | Diskuze .....                   | 33 |
|        | Závěr .....                     | 36 |
|        | Seznam použité literatury ..... | 38 |

## SEZNAM TABULEK

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| Tabulka 1- Výzkumná otázka č. 1 ..... | 26 |
| Tabulka 2- Výzkumná otázka č. 2 ..... | 28 |
| Tabulka 3- Výzkumná otázka č. 3 ..... | 30 |
| Tabulka 4- Výzkumná otázka č. 4 ..... | 32 |

## SEZNAM ZKRATEK

ABS – akrylonitril-butadién-styrén

ADL – activities of daily living

CFN – nylon vyztužený uhlíkovými vlákny

DK – dolní končetina

FDM – fused deposition modeling

HK – horní končetina

LOM – laminated object manufacturing

PET-G – polyethylentereftalát glykol

PLA – kyselina polyléčná

SLA – stereolitografie

SLS – selective laser sintering

TF – transfemorální

TR – transradiální

TT – transtibiální

3D – trojdimenzionální

# ÚVOD

3D tisk je rychle se rozvíjející technologií, který proniká do téměř všech oborů včetně stavebnictví, strojírenství či zdravotnictví a protetika není žádnou výjimkou. Jeho prudký nástup s sebou přináší ale různá rizika a limity, od technologických nedostatečností po legislativní omezení.

V praxi v České republice zatím žádnou zásadní revoluci 3D tisk nezažehl, odborná veřejnost se k němu zatím staví spíše skepticky než pozitivně.

Otázkou je, zda tato nevole zařazovat nové technologie do výroby protetických pomůcek spočívá v nedokonalosti 3D tisku či spíše v neochotě ortotiků-protetiků měnit zaběhlé postupy, na které jsou zvyklí po celou dobu své kariéry. Zcela jistě zde ale hraje zásadní roli i fakt, že protetické firmy jsou od pojišťovny vypláceny v rámci hodinové sazby za odvedenou práci na dané pomůcce. Tato překážka v nastaveném systému brání protetickým firmám ochotně přistupovat na zbrusu nové technologie, které fungují z hlediska pracovní síly a času výroby na úplně jiných principech než zavedená konvenční výroba.

Dalším z důvodů, proč se technologie 3D tisku neaplikuje v protetice v tuzemsku tak intenzivně jako v jiných oborech, může být fakt, že ryze českých zdrojů na tuto problematiku je velký nedostatek. Neexistuje žádná ucelená literatura na využitelnost 3D tisku v protetice. Tato skutečnost byla jedním z inspirativních impulzů, které stojí za vznikem této práce.

Ta může sloužit jako zdroj pro ortotiky-protetiky pro jejich seznámení s tématem 3D tisku, jeho historií, vlivem na společnost a jeho druhy. Značná pozornost je věnována obecným výhodám a nevýhodám 3D tisku. Zásadní část je zaměřena na rozbor reálných zahraničních studií, v rámci kterých byl použit 3D tisk k výrobě různých protetických pomůcek.

Teprve když bude dostatek relevantních studií na téma využitelnosti 3D tisku v protetice, bude možné uvažovat o reálných legislativních změnách v tuzemském systému financování výroby protetických pomůcek. Do té doby nejspíš zůstane konvenční výroba hlavní zavedenou technologií, jež se v tomto oboru využívá.

# TEORETICKÁ ČÁST

## 1 PROTETIKA

*„Ortotika a protetika je multidisciplinárním oborem, který se zabývá navrhováním, stavbou a aplikací zdravotních prostředků zejména ortopedických pomůcek,“* přičemž *„protetika nahrazuje ztracenou funkci, včetně poškozené končetiny. Umožňuje základní lokomoci s využitím dalších technických pomůcek anebo bez nich“* (Půlpán, 2011, s. 4).

Ortotik-protetik je nelékařský zdravotnický pracovník, který pečuje o pacienty se ztrátou končetiny. Navrhuje design pomůcky tak, aby byl individuálně přizpůsoben potřebám pacienta, a to z funkční i estetické stránky. Dále snímá měrné podklady, vybírá vhodné materiály a komponenty a díky statickým i dynamickým zkouškám hodnotí, zda pomůcka pacientovi zcela vyhovuje. V neposlední řadě je jeho úlohou edukace pacienta o používání a údržbě pomůcky (Chui, 2019).

### 1.1 Konvenční výroba

V protetice se výrobní proces pomůcky skládá z několika fází. První fází je protetometrie, jinými slovy snímání měrných podkladů stěžejních pro výrobu protézy. Mezi tyto údaje patří základní údaje o pacientovi včetně jeho anamnézy, kde se ortotik-protetik zaměřuje především na faktory mající vliv na výběr typu pomůcky, zejména příčinu amputace a detaily o ní (Půlpán, 2014).

Následuje technické vyšetření pacienta, při kterém se klade důraz na vyšetření svalové síly, rozsahu pohybu v kloubech, přítomnost kontraktur a spazmů, posouzení kožního krytu. Na základě těchto činitelů se poté rozhoduje o zařazení pacienta do jednotlivých skupin podle stupně aktivity (Půlpán, 2014).

Dále se přistupuje ke sejmutí délkových a obvodových měr a zaznamenání nákresů či obkresů. Proces pokračuje zhotovením sádrových negativů. Podle hmotnosti aktivity pacienta dále přistupuje ortotik-protetik k volbě stavebnicových dílů, konkrétně chodidla, spojovacích trubek, v případě vyšší amputaci i kolenního či kyčelního kloubu. Po úpravě negativu dochází ke vzniku pozitivu, který je také nutné upravit, a to i podle získaných měr při vyšetření (Půlpán, 2014).

Tvar výsledného sádrového modelu se liší podle typu protézového lůžka (Půlpán, 2014). Zkušební protézové lůžko se dá vyrobit pomocí metody hlubokého tažení termoplastů, přičemž toto lůžko má tu výhodu, že je průhledné a je možné zkoumat problematické oblasti pahýlu (Černá 2018).

Další fáze výroby se nazývá stavba protézy. Ta spočívá v prostorovém uspořádání jednotlivých částí protézy vůči sobě i vzhledem k tělu pacienta a řídí se jasně danými pravidly, které se u typů protéz liší. Poté proběhne statická a dynamická zkouška. Při té jsou odstraněny nedostatky a ortotik-protetik může přistoupit k výrobě finálního lůžka. Pomocí přenosového zařízení lze zachovat vyzkoušenou stavbu protézy. Výroba finálního lůžka poté spočívá v okopírování upraveného zkušebního lůžka a následné laminaci (Černá 2018). Při předání pomůcky pacientovi se provede ještě jedna dynamická zkouška finální protézy (Půlpán, 2014).



## 2 AMPUTACE

### 2.1 Příčiny amputace

Nejčastější příčinou amputace je nedostatečné prokrvení končetiny, a to přibližně ve třech čtvrtinách případů. Predispozice pro tento zdravotní stav jsou diabetes, vysoký krevní tlak a dyslipidemie. Na druhém místě se statisticky umisťují amputace způsobené traumatem, které zastávají cca 16 %. Kolem jednoho procenta zbývá na vrozené vývojové vady a stejně tak na amputace způsobené rakovinou (Chui, 2019). Půlpán (2011) uvádí jako možné etiologie amputace: traumatická poranění, úrazy elektrickým proudem, diabetes, ischemickou chorobu a nádorová onemocnění.

### 2.2 Druhy amputace

Amputace lze rozdělit podle toho, zda se týká horních či dolních končetin. V drtivé většině případů amputací (90 %) se jedná o dolní končetiny, přičemž na první příčce četnosti figuruje transfemorální amputace (Raina, 2023). Z amputací horních končetin se nejčastěji setkáváme s transradiální a transhumerální amputací, a to až v 80 % (Chui, 2019).

#### 2.2.1 Amputace dolních končetin

Amputace se dělí podle místa zásahu. Mezi ty v oblasti nohy řadíme např. amputace v Lisfrankově a Chopartově kloubu (Půlpán, 2011). Amputace podle Symea spočívá v odstranění všech struktur distálně od tibie a fibuly (Chui, 2019). Dalším druhem amputace je *amputation in crure*, v překladu amputace v bérce neboli transtibiální amputace. Pokud je zachován celý femur a odstraněno vše distálně od něj, mluvíme o exartikulaci v koleni, pokud je odstraněna jeho část, je to transfemorální amputace. Pakliže je odstraněn celý femur, nazývá se zákrok exartikulace v kyčelním kloubu. V některých případech je nutné odoperovat i část pánevní kosti, pak se jedná o hemipelvektomii (Půlpán, 2011).

#### 2.2.2 Amputace horních končetin

Amputace horních končetin jsou klasifikovány podle segmentu, kde byly provedeny. Setkáme se s amputacemi prstů, části ruky nebo zápěstí. Patří sem i exartikulace v zápěstí. Amputace na úrovni radia a ulny se nazývá transradiální amputace. Pokud je zachován celý humerus, mluvíme o exartikulaci v lokti, pokud pouze jeho část, jedná se o transhumerální amputaci. Odstranění celé pažní kosti se nazývá exartikulace v ramenním kloubu. Někdy dojde k odoperování i části ramenního pletence, v těchto případech mluvíme o interthorakohumeroskapulohumerální amputaci (Chui, 2019).

## **3 3D TISK**

### **3.1 Co je 3D tisk**

Většina dnešní produkce je subtraktivní. Při té je na počátku blok materiálu (např. železa nebo dřeva), který je opracován. Na konci procesu stojí finální výrobek a hromada pilin či kovových hoblin. Oproti tomu 3D tisk spadá mezi formy výroby aditivní (Horvath, 2020).

Princip 3D tisku je ve svém základě přímočarý. Na počátku tvorby objektu není nic, postupně se pak přidává materiál vrstvu po vrstvě tak dlouho, než je předmět hotový. V historii najdeme mnoho zjednodušených verzí tohoto postupu, jako dobrý příklad poslouží proces stavění zdi z cihel. V přírodě existuje dokonce několik organismů, které aplikují něco jako 3D tisk, mezi ně patří např. měkkýši vyrábějící své schránky. Aby získali více prostoru během svého růstu, postupně přidávají uhličitan vápenatý na okraje svých schránek. Vrstvy jsou poté dobře viditelné. Stejně tak některé horniny vznikly díky tomu, že v oceánech v pravěku byly postupně ukládány vrstvy bahna. Mezi ně řadíme třeba pískovec (Horvath, 2020).

### **3.2 Druhy 3D tisku**

Podle Horvatha (2020) můžeme v dnešní době rozdělit principy 3D tisku v zásadě do tří skupin: selektivní vazba, selektivní tuhnutí a selektivní depozice. Všechny skupiny spojuje fakt, že na počátku každého 3D tisku nezávisle na druhu stojí počítačový 3D model. Podle něj robotické zařízení vytváří požadovaný objekt.

#### **3.2.1 Selektivní vazba**

Tento typ technologie využívá k tvorbě objektu prášek, přičemž nejčastější materiály jsou kov nebo sádra. K navázání jednotlivých částic dochází díky přidaným pojivům či aplikovanému teplu. Specifická metoda je poté SLS (selective laser sintering), kdy paprsek laseru má na svědomí propojení částic prášku daného materiálu, a to vždy po jednotlivých vrstvách. První vrstva je natavena přímo na podložku, na ni je přidána další, a tak pořád dále. Pomocí této technologie lze vytvořit komplexní objekty či předměty jemné v detailech. Manipulace s jemným práškem může být ale obtížná a tiskárny tohoto typu jsou drahé (Horvath, 2020).

### **3.2.2 Selektivní tuhnutí**

Tato metoda využívá kád' s pryskyřicí, na kterou je zespoda aplikována energie, díky níž tekutina tvrdne. Objekt většinou vzniká vzhůru nohama tak, že kád' je prosvětlována zespoda a podložka postupně vyjíždí z tekutiny nahoru. Osvětlená vrstva vždy ztuhne. SLA (stereolitografie) využívá UV záření v podobě laserového paprsku nebo někdy projektor světla pro ztuhnutí celé vrstvy najednou. V obou případech je ale často nutné objekt ještě opracovat. Manipulace s pryskyřicí může být náročná Horvatha (2020).

### **3.2.3 Selektivní depozice**

Tato technologie je nejlevější ze tří zde uvedených. Během selektivní depozice je materiál umisťován pouze tam, kde je potřeba (Horvath, 2020). Také se tato metoda nazývá FDM (fused deposition modeling) a pracuje s filamenty nejčastěji z plastu či kovu. Ta jsou na jednom konci natavena a vytlačena. Postupně jsou pokládána do požadovaného tvaru v jednotlivých vrstvách a po vychladnutí ztuhnou (Gupta, 2023). Do kategorie selektivní depozice spadají také 3D tiskárny, které pomocí inkoustových trysek vstříkují tekutou pryskyřici a ta je následně ošetřena UV zářením (Horvath, 2020).

## **3.3 Historie 3D tisku**

Vznik 3D tisku se datuje na konec 70. let 20. století. Tehdy začaly být navrhovány a patentovány různé technologie využívající aditivní výrobu řízenou počítačem. Obsáhlejší a zásadnější patenty byly ale vynalezeny až v letech osmdesátých (Savini, 2015). Následující technologie jsou uvedeny chronologicky podle data vzniku:

### **3.3.1 Stereolitografie – SLA**

Tuto metodu objevil Charles Hull a jeho patent byl vydán v srpnu 1984. Proces spočívá v tvrdnutí tekutých polymerů pod UV zářením. První objekt vyroben tímto způsobem byl hrníček o výšce 5 cm a jeho zhotovení trvalo několik měsíců. O dva roky později založil společnost produkující výrobní stroje s názvem 3D System (Savini, 2015).

### **3.3.2 Laminated Object Manufacturing – LOM**

Koncem 80. let byla vynalezena metoda LOM. Pomocí laseru se z plastu vyříznou průřezy objektu a jejich spodní část je poté natavena a přilepena k dalším vrstvám (Savini, 2015).

### **3.3.3 Selective Laser Sintering – SLS**

Metoda SLS spočívá v tavení prachu pomocí laserového paprsku. Tento postup byl objeven na Texaské univerzitě a byl patentován C. R. Deckardem v roce 1989. Univerzitní start-up DTM Co. nejprve vyráběl tiskárny pro akademické účely, poté v roce 2001 ve spolupráci s 3D System přenesl svou produkci i do komerčního světa (Savini, 2015).

Tato technologie je velmi podobná té s názvem GMB (granular materials binding), kdy jsou vrstvy prachu taveny do výsledného tvaru pomocí laseru, horkého vzduchu či jiných zdrojů energie (Gupta, 2023).

### **3.3.4 Fused Deposition Modeling – FDM**

V roce 1992 si nechal C. S. Crump patentovat svou technologii a zařízení FDM. Jedná se o proces, při němž je termoplastický materiál ukládán vrstvu po vrstvě pomocí robota pohybujícím se ve třech osách (Savini, 2015). Tato metoda bývá často označována Fused Filament Fabrication kvůli využití natavených filament (Horvath, 2020).

### **3.3.5 Zavedení pojmu 3D tisk**

Pod ochrannou známkou se pojem 3D tisk začal používat počátkem 90. let 20. stol. na Massachusettském institutu technologií. Výrobní technologie aplikovaná zde byla inspirována systémem inkoustových trysek vynalezených v roce 1979 společností Canon Co. Americký patent E.M. Sachse byl komercializován firmou Z Co. a od té doby se pojem 3D tisk rozšířil do celého světa (Savini, 2015).

### **3.3.6 Velký rozvoj – Projekt Rep Rap**

Do začátku 21. století byly 3D tiskárny drahé stroje existující pouze v průmyslu za účelem prototypování. Kolem roku 2005 začaly vznikat iniciativy s cílem zpřístupnit veřejnosti levné 3D tiskárny, které nejsou proprietární. Na Bathské univerzitě byl v tomto roce realizován projekt Rep Rap (Replicating Rapid prototyping). Metoda FDM byla modifikována na Fused Filament Fabrication (FFF) (Savini, 2015). Tato metoda je založena na tom, že roztavený materiál se vytlačuje, vrství se a tak vzniká konečný objekt. Tato technologie spočívá v roztavení jednoho konce filamenta (plastového, kovového, či z jiného materiálu) (Gupta, 2023). Software a hardware byly zpřístupněny veřejnosti, včetně elektroniky, která byla založena na platformě Arduino (malý jednodeskový počítač). Cílová

skupina byli jednotlivci, kteří tímto byli vyzváni k 3D tisku ve svých domovech (Savini, 2015).

Italská zařízení Arduino byla navržena tak, aby umožňovala jednoduché programování hardwarového či softwarového prostředí pro studenty a nadšence. Jejich uvedení na trh se datuje do roku 2005. Postupně vyšlo najevo, že Arduino vystačí přesně akorát k obsluze 3D tiskáren. Jedná se o levnou a zároveň open-source alternativu ke standartním počítačům, která také přispěla k zpřístupnění 3D tisku širší populaci (Horvath, 2020).

### **3.3.7 Zpřístupnění 3D tisku**

Po roce 2006 se vývojáři a kodéři napříč celým světem dali dohromady v projektu RepRap a vytvořili svobodnou a otevřenou kódovou bázi, pomocí které si i široká veřejnost může sestavovat své 3D tiskárny. Díky tomu je tato do té doby drahá technologie výrazně dostupnější (Kloski, 2017).

## 4 VLIV 3D TISKU NA SPOLEČNOST

### 4.1 Historie výroby

Období před první průmyslovou revolucí je charakterizováno tím, že produkce je situována na venkově, její objem je nízký a celkově panuje nízký životní standard. Proces výroby zprostředkovávají jednotliví pracovníci, výroba je pomalá, drahá, na druhou stranu ale zakázková (Kloski, 2017).

První průmyslovou revoluci datujeme na konec 18. století. Ta je charakterizována manufakturami, jež zužitkovávaly energii získanou z páry či vodních toků (Kloski, 2017).

Druhá průmyslová revoluce propukla začátkem 20. století a vystihuje ji pásová výroba, spalovací motory a využívání elektrické energie (Korbel, 2015). Po druhé průmyslové revoluci pozorujeme vyšší životní standard, výrobu rychlou, levnou, ale zároveň uniformní. Její centra se nacházejí především ve městech, kde je do procesu hromadné produkce zapojeno mnoho továrních dělníků (Kloski, 2017).

#### 4.1.1 Třetí průmyslová revoluce

Rozšíření 3D tisku bývá někdy popisováno pojmem „třetí průmyslová revoluce“. První a druhá průmyslová revoluce zásadně ovlivnily nejen výrobní procesy, ale i aspekty každodenního života. Nastalo odklonění od ruční produkce k výrobě pomocí strojů, vznikaly převratné způsoby chemického zpracování, produkce se stala masovou atd. Obě tyto revoluce šly ruku v ruce s výrazným růstem průměrných příjmů, zvýšení počtu obyvatel a v poslední řadě díky nim vzrostl životní standard majoritě populace (Kloski, 2017).

Třetí průmyslová revoluce předpokládá ještě vyšší životní standard. V rámci výroby se objevuje variabilita: produkují se jednotlivé kusy, několik kusů či velké série, geograficky nezávisí na umístění ve městě versus na venkově a pracovní síla se nasazuje podle potřeby (Kloski, 2017).

#### 4.1.2 Osobní průmyslová revoluce

Další pojem, se kterým se v souvislosti s 3D tiskem setkáváme, je „osobní výrobní revoluce“ (personal manufacturing revolution). Tento pojem je připisován Avimu Reichentalovi. Výrobní proces je totiž možné přenést do domácnosti a je velmi osobní. Jednotlivci mohou realizovat své idey nezávisle na průmyslovém prototypování, což dříve bylo nepředstavitelné (Kloski, 2017).

## 5 VÝHODY 3D TISKU

Velkou výhodou je možnost využít technologii 3D tisku v široké škále odvětví od módy či umění přes průmysl až po dopravu (Pirjan, 2013).

Hausman (2014) rozděluje výhody 3D tisku do pěti oblastí: personalizace, komplexita, udržitelnost, recyklace a plánované zastarávání, ekonomická stránka.

### 5.1 Personalizace

Personalizace patří mezi hlavní benefity aditivní výroby, je schopna velmi dobře vyhovět individuálním požadavkům jednotlivců co se tvaru, materiálu, designu či barvy týče. Další výhodou 3D tisku spočívá v jeho dobré reaktivitě na požadavky zákazníka. V tradiční výrobě se často pracuje s formami, do kterých je vstříkovan natavený materiál jako kov, plast či sklo. Případná nová forma je nákladnější a komplikovanější na výrobu než upravení digitálního modelu v případě 3D tisku (Hausman, 2014).

### 5.2 Komplexita

Aditivní výroba nabízí možnosti vytvoření komplexních 3D objektů s jemnými detaily a to z různých materiálů a v relativně krátkém čase. Některé tvary dokonce nelze vyrobit jinými technologiemi (Pirjan, 2013).

V rámci tradiční výroby je nemožné dosáhnout takové komplexity jako při té aditivní. Díky tomu, že objekt vzniká vrstvou po vrstvě po celém svém obvodu, mohou se vytvářet vnitřní struktury, které jsou již od počátku navzájem propojené (Hausman, 2014).

### 5.3 Udržitelnost

Jedním z velmi důležitých benefitů 3D tisku oproti standardní výrobě je výrazné zmenšení objemu odpadu, který během procesu vzniká. Při aditivní výrobě se použitý materiál přidává vrstvou po vrstvě, a tak se spotřebuje jenom téměř takové množství, které je potřeba. V subtraktivní výrobě naopak dochází k opracování materiálu a tím pádem ke vzniku velkému množství odpadu (Pirjan, 2013).

V rámci metody aditivní výroby, kdy jsou natavovány plastové filamenty, je prostor k výzkumu jejich ekologičtějších alternativ. Aby se výrobci mohli vyhnout plastům

získaných z neobnovitelných zdrojů, mohou použít PLA filamenty. Jejich název je odvozen od polylactic acid – kyseliny mléčné a běžně se vyrábí z kukuřičného či bramborového škrobu (Hausman, 2014).

Díky téměř nulovému plýtvání materiálem je 3D tisk šetrný ke zdrojům, spotřebě energie a životnímu prostředí (Pirjan, 2013).

#### **5.4 Recyklace a plánované zastarávání**

Třetí průmyslová revoluce nabízí cestu k eliminaci konceptu plánovaného zastarávání. Náhradní díly do aut by tak teoreticky mohly být jednoduše k dispozici i u hodně starých modelů. Ty by pak byly vytištěny podle zakázek klienta kdykoliv. Navíc se zde nabízí možnost využít již existující celé objekty či díly a předělat je tak, aby stále vyhovovaly potřebám zákazníka. Ato by mohlo vést k vymanění se z kolotoče plánovaného zastarávání, kdy jsou lidé neustále nuceni kupovat si nové módní zboží (Hausman, 2014).

#### **5.5 Ekonomická stránka**

Zároveň ale rozšíření 3D tisku přináší i nové příležitosti v oblasti produkce 3D tiskáren či materiálů, vývoje softwaru nebo designu objektu. Navíc 3D tisk umožňuje použití levných recyklovaných materiálů, což vede ke snížení cen dovozu (Pirjan, 2013).

Aditivní výroba také přispívá ke záměnám v dovozu konstrukčních materiálů. Některé jsou dostupné lokálně (Pirjan, 2013).

Aditivní výroba nabízí stejnou cenu za výrobek u individuální i masové výroby. To je velký rozdíl oproti tradiční výrobě, kde cena výrobku s jeho větší produkcí výrazně klesá. Klasická výroba bývá také často situována do oblastí a zemí, kde se tolik nedbá na bezpečnost a pracovní právo. 3D tisku se tato problematika pochopitelně netýká. Přesunutí výroby blíže k cílovému klientovi může vést k eliminaci zbytečného transportu zboží pomocí nákladních lodí, vlaků či aut (Hausman, 2014).

Rozšíření 3D tisku ovlivňuje globální ekonomiku a nároky na pracovní sílu. Jedna z příčin je fakt, že umístění výroby pomocí 3D tisku může být umístěno do jiných lokalit než tradiční výroba. To může zredukovat aktuální ekonomickou nerovnováhu v regionech (Pirjan, 2013).



Aditivní výroba je řízena počítačem, což vede ke zmenšení nároků na lidskou práci a mezilidskou interakci. Nejenže je potřeba méně pracovníků během samotné výroby, ale díky možnosti posílat digitální model k zákazníkovi, který si ho pak sám vytiskne, jsou sníženy i personální požadavky na export (Pirjan, 2013).

3D tisk také profituje z toho, že je k jeho aplikaci v porovnání s klasickým výrobním procesem zapotřebí mnohem méně strojové techniky. 3D tiskárny jsou navíc schopné vytisknout výrobek už ve finálním tvaru, odpadá tedy spousta kroků během výroby (vrtání děr či dutin, obrušování ploch), to také vede k redukci potřebných pracovních sil. Vzhledem k tomu, že není opracováván přebytečný materiál, jeho spotřeba nižší, což vede k benefitům i z ekonomického hlediska (Hausman, 2014).

## **5.6 Výhody konkrétních druhů 3D tisku**

Srovnání výhod týkajících se konkrétních druhů 3D tisku se věnuje ve své studii Ntousia (2019) a uvádí zde následující:

### **5.6.1 FDM**

Metoda spočívající v práci s nataveným filamentem vyniká ve velké variabilitě barev, jednoduchosti, vysoké rychlosti a velkém výběru materiálů (Ntousia, 2019).

### **5.6.2 SLS**

Typ výroby, kde jsou postupně propojovány vrstvy prášku, má velkou výhodu v tom, že pomocí této metody lze vyrobit i velké objekty. Dále je jeho přínosem velký výběr materiálů, rychlá výroba, vysoká odolnost a tuhost (Ntousia, 2019).

### **5.6.3 SLA**

Tato technologie profituje z nízkého času výroby, přizpůsobenému barvení, možnosti dosažených detailů, vysoké kvality a dobrému rozlišení (Ntousia, 2019).

## 6 NEVÝHODY 3D TISKU

Pirjan (2013) uvádí jako jednu ze zásadních nevýhod 3D tisku nedostatečnou legislativu v tomto odvětví, jelikož nikdo nereguluje možnou výrobu zbraní, části letadel či vojenské techniky, padělky určené pro reklamu nebo sabotáž či chemické zbraně. Navíc vše zde uvedené může být vyrobené jednoduše, rychle a levně. Další úskalí přináší fakt velké dostupnosti 3D tisku i k dětem, které bez dohledu mohou tisknout nebezpečné objekty. Tomu se dá zabránit díky softwarovým omezením a nastavení rodičovské kontroly.

Podle Pirjana (2013) je zásadní nevýhoda 3D tisku je jeho vysoká cena. 3D tisk se vyplatí při výrobě nízkého počtu požadovaných objektů, při velkém počtu se ale tato technologie stala z ekonomického hlediska silně nevýhodnou. Stejně tak 3D tisk velkých objektů se finančně nevyplácí. Další limity přináší samotné materiály, které jsou často citlivé na působení vnějších sil a časem je jejich kvalita a odolnost snižována.

### 6.1 Nevýhody konkrétních druhů 3D tisku

Ntousia (2019) ve své studii zkoumá výhody a nevýhody jednotlivých technologií 3D tisku:

#### 6.1.1 FDM

Při metodě FDM, kde se pracuje s natavovanými filamenti, je proces limitován tím, že jsou potřebné podpory pro komplexní struktury. Dále se zmiňuje o nedostatečných mechanických vlastnostech, omezeném rozlišení a špatné povrchové úpravě (Ntousia, 2019).

#### 6.1.2 SLS

Selective Laser Sintering (SLS) zase vyžaduje následné zpracování a celkově se jedná o drahou technologii (Ntousia, 2019).

#### 6.1.3 SLA

Stereolitografie (SLA) má své největší slabiny v materiálech a jejich křehkosti. Pokud je potřeba tisknout výrobek s převisy, výroba jejich podpor je drahá (Ntousia, 2019).

# PRAKTICKÁ ČÁST

## 7 CÍLE PRÁCE

Takto bakalářská práce si klade za cíl popsat využitelnost 3D tisku v protetice. Formou literární rešerše by tato práce měla zhodnotit historický vývoj a zmapovat současný stav této problematiky včetně přiblížení výhod a nevýhod užívání 3D tisku v protetice. Náhled na využitelnost 3D tisku v protetice zde pak bude zkoumán z několika perspektiv jako je časová náročnost výroby, funkčnost zhotovené pomůcky, vliv na životní prostředí či finanční náročnost.

Ucelených zdrojů na toto téma je v českém jazyce po málu, proto celý tento text by měl být přínosem pro pracovníky i studenty oboru ortotika-protetika, kteří by se chtěli s problematikou 3D tisku v protetice seznámit.

Získané informace z literárních zdrojů budou zhodnoceny a diskutovány.

## 8 VÝZKUMNÉ OTÁZKY

- Je vhodné užití technologie 3D tisku v protetice z hlediska nosnosti zhotovené pomůcky?
- Je vhodné užití technologie 3D tisku v protetice z hlediska funkčnosti zhotovené pomůcky?
- Je vhodné užití technologie 3D tisku v protetice z hlediska vlivu na životní prostředí?
- Je vhodné užití technologie 3D tisku v protetice z hlediska finanční náročnosti?

## 9 METODIKA

K vyhledávání literárních zdrojů byly použity tyto webové stránky: PubMed, ResearchGate, Google Scholar a web Technické národní knihovny.

V různých kombinacích byla hledána tato klíčová slova: 3D printing, additive manufacturing, prosthetic socket, upper limb prostheses, lower limb prostheses. Stejně tak byly použity jejich české ekvivalenty. Klíčová slova byla používána především v anglickém jazyce, protože ryze české zdroje se na problematiku 3D tisku zaměřují opravdu zřídka.

Jelikož se tato bakalářská práce zaměřuje na problematiku využitelnosti 3D tisku v protetice, v rámci literárních zdrojů se soustředí zejména na ty, kde proběhl praktický výzkum použití 3D tisku v rámci výroby protetických pomůcek. Pokud se jednalo o review, byly dohledány původní zdroje, ze kterých se následně čerpalo. Výsledky celkem osmi těchto studií jsou posléze popsány, srovnány a zhodnoceny.

Z vyhledaných zdrojů byly eliminovány ty, které nespádají svým rokem vydání do časového rozmezí 2014-2024.

## 10 ANALÝZA A INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

### 10.1 Kvalitativní vyhodnocení studií

#### 10.1.1 Studie č. 1

##### *3D tištěné TF lůžko pro adolescentního pacienta*

Marinopoulos (2022) ve své studii popisuje výrobu pahýlového lůžka pro dětské pacienty s transfemorální amputací. K výrobě dvou pahýlových lůžek byla použita metoda FDM a filamenta byla z materiálu PLA (polyactic acid). Pro porovnání vzniklo v rámci experimentu ještě jedno pahýlové lůžko z nylonu vyztuženého karbonovými vlákny.

Autor zde uvádí, že testování pahýlových lůžek přináší s sebou komplikace. Podle ISO (International Organization for Standardization) a jejího prohlášení ISO 10328:2016 týkajícího se protéz dolních končetin totiž nelze testování pahýlových lůžek zahrnout do standardizovaného testovacího protokolu jako všechny ostatní části protézy. Přesto jsou tyto guidelines široce používány v různých studiích při zátěžových testech i konvenčně vyráběných pahýlových lůžek.

V této studii byl použit počítačový model již existujícího pahýlového lůžka dospělého muže, který byl následně upraven tak, aby odpovídal velikosti pahýlu čtrnáctiletého chlapce. Model byl v programu následně rozdělen na vrstvy o výšce 0,2 mm a vytisknut na stolní tiskárně Ultimaker 2+.

Za použití PLA filament byla vytištěna dvě lůžka, která se lišila tvarem na svém distálním konci. U prvního byl zachován tvar a systém přichycení adaptéru, jako to bylo na původním lůžku, tzn. byl ponechán kulatý tvar a pyramidový čtvercový adaptér se přišrouboval na plochou distální část. Model druhého lůžka byl upraven ještě v počítači a jeho čtvercová distální část zakomponovaná přímo do lůžka umožňovala přichycení pyramidového systému s eliminací koncentrace napětí na plochém zakončení. Třetí pahýlové lůžko bylo vyrobeno z nylonu vyztuženého uhlíkovými vlákny (CFN) pro srovnání materiálu.

Pahýlová lůžka byla testována při statickém tlakovém zatížení pomocí speciálního zařízení. To mělo napodobit lidský pahýl; ten byl vyroben ze silikonové pryže

s mechanickým vlastnostmi podobnými vlastnostem lidské tkáně. Požadavky na zatížení byly vypočteny pro případ chlapce ve věku 14 let o hmotnosti na 98. percentilu.

Po počátečních vylepšeních konstrukce byla 3D tištěná lůžka schopná vydržet zatížení až pětkrát vyšší než byla hmotnost uživatele, aniž by došlo k selhání.

Při zátěžových testech se zkoumala strukturální integrita lůžka. Proběhly 3 sady statického kompresivního testu a to pod 65 kg, pod 85 kg a nad 100 kg. Tyto hodnoty ale nejsou relevantní k pacientovi v adolescentním věku. Proto byla aplikována hmotnost vybraného pacienta z 98. percentilu hmotnosti a tím se dospělo k závěru, že toto pahýlové lůžko musí vydržet zatížení 3850 N.

První typ lůžka, který kopíroval tvar původního, měl plochý distální konec a byl vyroben z PLA nevydržel zatížení 3400 N z potřebných 3850 N. Zato lůžko vyrobené také z PLA, ale s upraveným distálním koncem, obstálo až do zatížení 4050 N a lůžko z nylonu vyztuženého uhlíkovými vlákny dokonce až do 4280 N.

Další důležitý závěr pozorování spočívá v zákonitostech místa poškození. Všechna lůžka praskla v laterálně-posteriorní části distálního konce a prasklina pokračovala do laterálně anteriorní části zhruba v půlce výšky lůžka. Lůžka vyrobená z PLA navíc přesně kopírovala vrstvy, po kterých byl výrobek vytištěn, zatímco u lůžka z CFN následovala přímá dráha typická pro vyztužené homogenní materiály.

### **10.1.2 Studie č. 2**

#### *Proces výroby 3D tištěného TF lůžka*

Comotti (2015) se své studii zaměřuje na integraci nízkonákladových technologií do designu, testování a výroby zdravotnických prostředků, zejména pak tato práce cílí na výrobu pahýlového lůžka u protéz dolních končetin. Proces je zde rozdělen na tři části: návrh, testování a výroba. Do studie se zapojili lékaři i pracovníci v oboru ortotika-protetika.

Nejdříve je tvar lůžka navrhnut pomocí programu Socket Modelling Assistant. Tento program přibližuje Comotti v další své studii s názvem *Low Cost 3D Scanners Along The Design Of Lower Limb Prosthesis* z roku 2015:

SMA je CAD systém, který umožňuje ortotikovi-protetikovi navrhnout design pahýlového lůžka na základě digitálního modelu pahýlu pacienta, a to jak u trasfemorální,

tak i u transtibiální amputace. K získání všech důležitých informací o pahýlu slouží kromě povrchového scanu ještě magnetická rezonance nebo její levnější alternativa v podobě RGB D hloubkového senzoru. Tyto metody jsou zásadní v tom, že ukáží i vnitřní struktury pahýlu a ortotik-protetik může při navrhování tvaru vzít v potaz všechny měkké i kostěné tkáně. Následuje návrh pahýlového lůžka. Program ortotika-protetika provází tvorbou krok po kroku, přičemž může využít předem stanovené návrhy. Tvůrci programu vycházeli ze znalostí a zkušeností odborníků v oboru. Při úpravě tvaru jsou zde dodržovány stejné zákonitosti a pravidla, jako se aplikují při během této fáze konvenční výroby; snímání měrných podkladů a modelace pomocí sádrování. Poslední fází je simulace zátěže. Pomocí SMA lze navrhnout takový tvar, kde jsou respektovány zátěžové a nezátěžové plochy, navíc lze docílit rovnoměrného rozložení tlaku. Model je následně ve formě STL poslán do tiskárny. Výhodou je, že na základě této simulace lze na různé části pahýlového lůžka použít při tisku jiný materiál. Díky tomu jsou některé části lůžka měkké a jiné zase tvrdé.

Design výsledného pahýlového lůžka závisí na několika vlastnostech pahýlu pacienta. Komplikace ale může přinést fakt, že při užívání protézy se kvůli vyvíjenému tlaku pahýl různě deformuje. Proto se ještě před tiskem provádí tlaková numerická simulace založená na datové analýze. Pokud simulace je úspěšná, je automaticky přecházeno k dalšímu kroku výroby a tou je samotný tisk lůžka.

SMA, dále se provede tlaková analýza, na základě které je navrhnout upravený tvar lůžka. Poté je STL soubor poslán do multi materiálové 3D tiskárny, která lůžko vytiskne.

### **10.1.3 Studie č. 3**

#### *Zátěžové testy 3D tištěného TT lůžka*

Nickel (2020) se ve své studii zaměřuje na zátěžové testování definitivního pahýlového lůžka vyrobeného pomocí 3D tisku pro pacienta s transtibiální amputací. Stejně jako Marinopoulos (2022) hned v počátku svého textu zmiňuje nemožnost provádět zátěžové testy pahýlových lůžek podle zajetých mezinárodních standardů ISO 10328, které se běžně aplikují na ostatní komponenty protéz. Strukturální pevnost a odolnost lůžka je však ale podstatná pro bezpečnost pacienta, jelikož při kolapsu lůžka může dojít k pádu a poranění. Obecně je považováno za bezpečné používat komponenty protéz po dobu 3 miliónů opakování, což obvykle odpovídá 3 rokům. Komponenty jako chodidla, trubkové adaptéry či pyramidové adaptéry prochází zátěžovými testy s tímto daným počtem iterací



zátěže. Při správném uvážení hmotností pacienta a jeho aktivity tak ortotik-protetik minimalizuje riziko poškození materiálu téměř k nule. Na rozdíl od sériově vyráběných komponentů, individuálně zhotovená pahýlová lůžka mají každé jiný tvar i hmotnost. V oblasti zátěžových testů se dlouho nedalo v této oblasti o co opřít, jelikož počet výzkumů a datových analýz zaměřujících se na zátěžové testy není vůbec dostačující.

V posledních letech ale bylo v několika studiích přistoupeno na zátěžové testování inspirováno standardy ISO 10328, ačkoliv primárně tyto testy pro zkoumání materiálu lůžek nejsou.

Zkušební norma ISO 10328 obsahuje tři různé testy: statickou zkoušku, zkoušku pevnosti v tahu a cyklickou zkoušku. Každá zkouška má své vlastní parametry zatížení a cílová zatížení na základě cílových hodnot, které jsou určeny podle hmotnosti těla uživatele: P5 (100 kg), P6 (125 kg), P7 (150 kg) a P8 (175 kg). Tato studie se zaměřila na úroveň zatížení P6, která by představovala uživatele s tělesnou hmotností do 125 kg, tedy s hmotností, na kterou je dimenzováno mnoho standardních protetických komponentů.

Celkově na dvou pracovištích bylo vyrobeno 25 3D tištěných pahýlových lůžek pro pacienta po TT amputaci. Na všechny byl použit materiál obohacený o karbonová vlákna, která zpevňovala každou samostatnou vrstvu a měla bránit delaminaci. 24 lůžek podstoupilo statickou zkoušku a zkoušku pevnosti v tahu. Jedno lůžko, které bylo vyrobené jako poslední a na základě předchozích výsledků bylo upravováno k větší pevnosti, podstoupilo i cyklickou zkoušku o 3 mil. opakování.

Lůžka vyrobená podle prvotního designu nebyla schopna ustát zatížení pacienta o hmotnosti 125 kg (3419 N), po úpravách ale další prototypy nepoškodilo ani zatížení z horní hranice P6 (4425 N). Princip zavěšení na pin je kvůli velkým nárokům na pevnost materiálu nejméně vhodný, naopak dosáhnout větší nosnosti není problém pro lůžka fungující na podtlakovém principu.

Finální typ dokonce obstál i v cyklické zkoušce s 3 mil opakováním stejně jako sériově vyráběné protetické komponenty. Lze tedy říci, že pahýlová lůžka vyrobená pomocí 3D tisku mohou dosáhnout požadované pevnosti. Proces vývoje designu musí být, avšak založen na vícero opakování a zdokonalování jednotlivých prototypů.

#### **10.1.4 Studie č. 4**

##### *Numerická analýza 3D tištěného TT lůžka*

Plesec (2023) ve své studii uvádí limity konvenční výroby a to že stále závisí především na dílenském postupu pokusů a omylů za použití drahých nerecyklovatelných kompozitních materiálů, což vede k časové náročnosti, velké spotřebě materiálu a v konečném důsledku je finální protéza drahá. Proto se zaměřil na využití technologie 3D tisku metodou FDM s levným biologickým a biologicky odbouratelným materiálem kyseliny polymlečné (PLA) pro vývoj a výrobu pahýlového lůžka TT protéz. Metoda FDM byla zvolena z důvodu své dostupnosti a nízkonákladovosti. Pro zajištění bezpečnosti a stability navrhované 3D tištěného PLA pahýlového lůžka byl k analýze použit obecný numerický model zaměřený na transtibiální amputaci s nově zakomponovanými realistickými fázemi cyklu chůze od úderu paty po odraz palce podle normy ISO 10328. Vhodný materiál byl na základě svých vlastností určen pomocí jednoosých tahových a tlakových zkoušek na materiálu z 3D tištěného PLA.

Výsledky ukázaly, že objímka z 3D tištěného PLA odolává vyskytujícímu se napětím za podmínek chůze při dopadu na patu a i při odrazu. Maximální deformace zjištěné u 3D tištěného PLA pahýlového lůžka byly 0,74 mm a 2,66 mm, podobné (0,67 mm a 2,52 mm) byly naměřeny u kontrolního lůžka vyrobeného konvenčním procesem. Proto lze tvrdit, že i PLA lůžko zajišťuje stejnou stabilitu během chůze.

Závěr je takový, že PLA jakožto materiál na biologické bázi, který je biologicky rozložitelný a navíc levný lze považovat za vhodný pro výrobu protézy dolních končetin. Toto řešení je ekologické a málo finančně náročné. Vzhledem k nutnosti častých výměn protéz jsou lůžka zhotovená s využitím počítačových technologií a biologicky odbouratelných materiálů jako je PLA vhodná, protože se u jejich výroby významně zkrátí čas a sníží náklady.

#### **10.1.5 Studie č. 5**

##### *Testování funkčnosti 3D tištěného TT lůžka pomocí pacientů*

Nickel (2023) se ve své další studii zaměřuje na používání 3D tištěných TT pahýlových lůžek u reálných pacientů. Zkoumané aspekty byly především mobilita, pohodlí, pocit stability a přijetí uživatelem. Cílem studie bylo porovnat konvenční pahýlová lůžka s těmi vyrobenými pomocí 3D tisku.

Studie se zúčastnilo devět veteránů s transtibiální amputací, z nichž každý používal jako metodu ulpění pin nebo podtlak pomocí lineru v kombinaci s manžetou nebo lineru, který má už v sobě těsnící manžetu zabudovanou. Účastníkům byla pomocí 3D tisku zhotovena kopie jejich finálního lůžka, které bylo vyrobeno konvenčním způsobem. Následně bylo provedeno měření, nejdříve s jejich konvenčním pahýlovým lůžkem. Pacienti absolvovali dvouminutový test chůze, po kterém došlo na hodnocení vnímané námahy, vyšetření mobility a důvěry v rovnováhu při specifických činnostech. Dále pacienti vyplnili vybrané části standardizovaného dotazníku (Prosthesis Evaluation Questionnaire a Amputee Body Image Scale–Revised), zaměřených na hodnocení protézy a vnímání vlastního těla u lidí s amputací. Po provedení tohoto měření si pacienti vyzkoušeli 3D tištěné lůžko a následně ho běžně používali po dobu dvou týdnů. Po uplynutí této doby byl sběr dat zopakován stejným způsobem.

Tři účastníci nemohli studii dokončit. U žádného z měření nebyly pozorovány velké rozdíly. Účastníci byli obecně spokojeni s tím, jak jim 3D tištěná pouzdra seděla, ale vyskytly se problémy s tím, aby 3D tištěná pouzdra podporovala zvýšený podtlak, tedy u pacientů užívajících liner v kombinaci s manžetou či liner s manžetou již zabudovanou. U pacientů používajících čep nebyly zjištěny žádné rozdíly ve výkonnosti nebo přijatelnosti 3D tištěného lůžka a jejich původního vyrobeného konvenčním způsobem. Limity 3D tištěného lůžka podle této studie spočívají v jeho neschopnosti podpořit podtlakový systém.

#### **10.1.6 Studie č. 6**

##### *Přísliby a nedostatky 3D tištěného TR lůžka*

Olsen (2021) ve své studii demonstruje silné stránky a nevýhody plně digitalizovaného, nízkonákladového procesu výroby pahýlového lůžka pro pacienta po transradiální amputaci pomocí 3D tisku na základě klinických principů. Je zde uvedena zpětná vazba pacientů ohledně jejich používání digitálně vytvořeného lůžka.

Lůžka byla vyrobena pomocí metody FDM z různých materiálů-PLA, PLA obohacená o měděné nanokompozity (tím pádem antibakteriální) a PET-G, což je upravená verze PET (polyethylentereftalát) a "G" znamená "modifikovaný glykol".

Pro každého pacienta byla vyrobena dvě lůžka, jedno nemodifikované, jehož tvar přesně odpovídal naskenovanému tvaru pahýlu a druhé modifikované, jehož tvar byl v CAD softwaru upraven podle standardních protetických postupů. Aby bylo možné uskutečnit

řádné srovnání modifikovaného a nemodifikovaného pahýlového lůžka, druh tiskárny, použitý materiál, software a nastavení tisku byla ponechána vždy stejná pro dvojici lůžek.

Pouze 4 účastníci výzkumu ze 6 byli schopni poskytnout zpětnou vazbu po vyzkoušení. Ta probíhala pomocí strukturovaného rozhovoru o pěti otázkách, které se zaměřovaly na pocíťovaný komfort či diskomfort, pocit dobrého ulpění a problematické zóny na lůžku.

Všichni pacienti považovali nemodifikované lůžko za velice pohodlné, u modifikovaného pouze polovina. Míra ulpění byla pro všechny neuspokojivá, ale nemodifikované lůžko bylo vnímáno jako více zabezpečené vůči nežádoucímu pohybu či spadnutí. Celkově vzato pacienti P1 a P4 vnímali jako pohodlné a zabezpečené alespoň jedno z 3D tištěných lůžek. Pacienti P2 a P3 sice ohodnotili lůžka jako pohodlná, ale míru ulpění nepovažovali za dostatečnou.

Tyto nedostatky jsou podle autorů studie zapříčiněny především kvůli nedostatečným odborným znalostem v oblasti protetiky jedinců v týmu, který za 3D tisk zodpovídal.

Tato studie poukazuje na fakt, že pro výrobu TR pahýlových lůžek je možné využít 3D skenování a tisk, ale pouze pokud je tento proces podložen odbornými znalostmi.

### **10.1.7 Studie č. 7**

#### *Nízkonákladová 3D tištěná dětská protéza ruky*

Zuniga (2015) se ve své práci věnuje nízkonákladové výrobě dětské protézy HK pomocí 3D tisku a končetiny a navrhnout metodiku montáže protézy, kterou lze provádět na dálku. Tato protéza nese název Cyborg Beast.

Přibývá totiž dětí s traumatickými a vrozenými amputacemi. Protetické potřeby dětí jsou složité vzhledem k malé velikosti pomůcek, neustálému růstu a psychomotorickému vývoji. Vzhledem ke složitosti a vysoké ceně nejsou dětské protézy HK dostupné dětem z nízkopříjmových či nepojištěných rodin nebo dětem z rozvojových zemí. Pokroky v aditivní výrobě a softwaru nabízejí možnost navrhovat, tisknout a montovat protetické pomůcky na ruce na dálku a za velmi nízkou cenu.

Studie se zúčastnilo 11 dětí s amputací HK ve věku od 3 do 16 let. U devíti z nich byly porovnávány výsledky antropometrického měření přímo ortotikem-protetikem a s daty

získanými pouze z fotografií. Následně jim byla vyrobena protéza pomocí metody FDM. Použité materiály byly: PLA a akrylonitril-butadién-styrén (ABS), doplněné o nýty, lanka a suché zipy. Elastická lanka umístěná na hřbetu ruky umožňují pasivní roztažení prstů. Flexe prstů je řízena nepružnými lanky vedoucích podél palmární plochy každého prstu a aktivuje se při 20-30° flexi zápěstí. Výsledkem je složená pěst (ohnutí prstů směrem do dlaně) pro hrubý úchop.

Nebyly zjištěny žádné významné průměrné rozdíly mezi antropometrickými měřeními a měřeními rozsahu pohybu odebranými přímo z horních končetin subjektů oproti měřením získaným z fotografií. Hlavním zjištěním průzkumu bylo, že tato protéza HK může mít významný potenciál pozitivně ovlivnit kvalitu života a každodenní používání a může být začleněna do běžných činností doma a ve škole. Hlavní předností protézy Cyborg Beast je její nízkonákladovost, ekologičnost díky použití rozložitelného materiálu a celosvětová dostupnost. To nabízí přístup ke kvalitnímu protetickému vybavení dětských pacientů i v rozvojových zemích.

#### **10.1.8 Studie č. 8**

##### *Sportovní 3D tištěná protéza ruky se zpětným návratem energie*

Park (2023) svou práci zaměřil na vývoj sportovní protézy HK zaměřené na basketbal se zpětným návratem energie. V rámci studie byl zkoumán a navrhnout design komponentů pro zpětný návrat energie, které jsou zakomponovány do protézy HK, a to vše je vyrobené pomocí 3D tisku. Jako materiál byla zvolena PLA v kombinaci s PLA obohacenou o karbonová vlákna. Cílem bylo identifikovat konfigurace a snímací mechanismy, které by umožnily efektivně implementovat tyto prvky pro návrat energie do protézy horní končetiny.

Pro tuto práci byly iterativně navrženy dva samostatné mechanismy, a to spirálová a konzolová pružina, které sloužily jako funkční prvky pro návrat energie. Tyto dva druhy protézy byly následně testovány při střelbě na basketbalový koš z čáry trestného hody. Nejprve se hodnotil pouze subjektivní pocit pacientů, teprve poté byly využity senzory pro snímání energie. Testující reportovali potíže s nastavením adaptéru tak, aby se protéza pohodlně přizpůsobila, ale jinak se jim systém používal snadno. Bylo pozorováno, že střelec byl schopen přizpůsobit svoji formu a dosáhnout očekávanou trajektorii míče směrem k obroučce. Tato přizpůsobení probíhala bez zpětné vazby od senzorů.

Design byl navrhnout tak, aby bylo dosaženo kompaktnosti, aby se protéza vytiskla na 3D tiskárně, aby parametry byly nastavitelné, aby byla zajištěno snímání síly a potřebná návratnost energie pro efektivní využití. Vyvinuté návrhy by neměly být považovány za optimalizované, ale mají spíše demonstrovat, jak lze vytvořit a vyladit komponenty pro návrat energie pro využití v rámci protéz HK.

Jedná se o první horní končetinu protézu, o které víme, že obsahuje systém pro návrat energie použitý tímto způsobem. Prvky pro návrat energie umožnily vytvořit protézový design, který více napodobuje některá pohyby lidské ruky pro přirozenější střelbu v rámci basketbalu. Pružina snímající sílu a pružina spirálová či konzolová může být přizpůsobena a použita v dalších 3D tištěných protéžách HK nebo jiných konstrukcích pro zvýšení výkonu nebo přidání funkčních prvků.

## 10.2 Výsledky

Tato kapitola je věnována souhrnnému přehledu výsledků všech osmi studií. Pro každou výzkumnou otázku je zde uvedena přehledná tabulka, která obsahuje číslo a název studie, autora, rok vydání a krátké poznámky. Ty shrnují nejdůležitější informace ze studie týkající se konkrétní výzkumné otázky. Studie jsou v tabulce seřazeny vzestupně podle roku vydání.

### 10.2.1 Výzkumná otázka č. 1

Je vhodné užití technologie 3D tisku v protetice z hlediska nosnosti zhotovené pomůcky?

| č. | Název  | Autor        | Rok  | Poznámky   |
|----|--|--------------|------|--|
| 3  | Strength testing of definitive transtibial prosthetic sockets made using 3D-printing technology                      | Nickel       | 2020 | Prvotní design TT lůžka neobstál<br>Nutnost iterace a zdokonalování prototypů<br>Systém zavěšení na pin méně pevný<br>Vhodnější podtlakový systém (nosnost až 4425 N)<br>Finální typ obstál i v cyklické zkoušce (3 mil. opakování)  |
| 1  | Structural integrity of 3D-printed prosthetic sockets: An experimental study for paediatric above-knee applications. | Marinopoulos | 2022 | Požadovaná nosnost na adolescentního pacienta 3800 N<br>TF lůžko z PLA klasického tvaru neobstálo (3400 N)<br>TF lůžko z PLA s upraveným tvarem obstálo (4050 N)<br>TF lůžko z CFN obstálo nejlépe (4280 N)<br>Průběh poškození: PLA po vrstvách<br>Průběh poškození: přímá dráha jako u homogenních materiálů |
| 4  | Numerical analysis of a transtibial prosthesis socket using 3D-printed bio-based PLA                                 | Plesec       | 2023 | Testování TT lůžka- numerická analýza chůze<br>3D tištěné TT lůžko z PLA a konvenční TT lůžko<br>--> podobné deformace při chůzi<br>--> zajišťuje stejnou stabilitu  |

Tabulka 1- Výzkumná otázka č. 1

V tabulce jsou zmíněny 3 studie z let 2020-2023, v rámci kterých byla věnována pozornost zátěžovým testům 3D tištěných pahýlových lůžek DK.

Nickel (2020) dochází k závěru, že výsledné TT lůžko vyrobené pomocí technologie 3D tisku může mít dostatečnou nosnost, ale je k cílenému výsledku zapotřebí několika iterací a zdokonalování jednotlivých prototypů. Tento typ poté obstál i v cyklické zkoušce s 3 mil. opakováním, které podstupují i sériově vyráběné protetické komponenty. Zajímavé zjištění

této studie je fakt, že systém ulpění pomocí systému využívajícímu pin je méně pevný a z hlediska pevnosti je vhodnější použití podtlakového systému díky více rovnoměrnému rozložení působící sil.

Marinopoulos (2022) ve své studii zkoumal několik materiálů pro 3D tisk TF lůžka pro adolescentního pacienta a jeho různé úpravy tvaru na distálním konci. TF lůžko z PLA s klasickou úpravou distálního konce, jaká je používána v konvenční výrobě, nevydrželo požadované zatížení, zatímco lůžko z téhož materiálu s upraveným tvarem obstálo. Největší zatížení vydrželo lůžko z CFN, které dokonce vykazovalo při poškození podobný mechanismus jako u homogenních materiálů.

Plesec (2023) se zaměřil na testování 3D tištěných TT lůžek numerickou analýzou chůze. Došel k závěru, že vykazují podobné deformace jako lůžka vyrobená konvenčním způsobem.

Všichni 3 autoři se shodují, že za určitých podmínek lze pomocí technologie 3D tisku dosáhnout požadované nosnosti materiálů u TF a TT pahýlových lůžek.



## 10.2.2 Výzkumná otázka č. 2

Je vhodné užití technologie 3D tisku v protetice z hlediska funkčnosti zhotovené pomůcky?

| č. | Název   | Autor   | Rok  | Poznámky   |
|----|---|---------|------|--|
| 2  | Multi-material design and 3D printing method of lower limb prosthetic sockets. In: <i>Proceedings of the 3rd 2015 workshop on ICTs for improving patients rehabilitation research techniques.</i> | Comotti | 2015 | Popsané všechny fáze výroby TT lůžka: návrh, testování, tisk<br>Kombinace různých materiálů respektujících svou tvrdostí zatížitelné a nezatížitelné plochy pahýlu                                 |
| 7  | Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences  | Zuniga  | 2015 | 3D tištěná protéza ruky pro děti<br>Aktivace flexe prstů 20-30° flexí v zápěstí<br>Funkční při běžných ADL činnostech (doma i ve škole)  |
| 6  | 3D-printing and upper-limb prosthetic sockets: promises and pitfalls  | Olsen   | 2021 | Modifikované a nemodifikovaná TR lůžka, subjektivní pocity<br>- pohodlné nemodifikované<br>- míra ulpění nedostatečná, lepší nemodifikovaný typ<br>Nedostatečné znalosti protetiky výzkumného týmu |
| 4  | Numerical analysis of a transtibial prosthesis socket using 3D-printed bio-based PLA  | Plesec  | 2023 | Testování TT lůžka- numerická analýza chůze<br>3D tištěné TT lůžko z PLA a konvenční TT lůžko<br>--> podobné deformace při chůzi<br>--> zajišťuje stejnou stabilitu                                |
| 5  | Pilot Test of a Definitive Prosthetic Socket Made with 3D Printing Technology   | Nickel  | 2023 | Pacientům 3D tištěné TT lůžko sedělo stejně jako konvenční<br>Systém na pin fungoval bez problémů<br>Problémy s podtlakovým systémem   |
| 8  | 3D printed energy return elements for upper limb sports prosthetics   | Park    | 2023 | 3D tištěná protéza ruky pro basketbal<br>Zpětný návrat energie   |

Tabulka 2- Výzkumná otázka č. 2

Funkčností zhotovené protetické pomůcky pomocí technologie 3D tisku z různých úhlů pohledu se zabírali autoři šesti studií, které se věnovaly TF, TT i TR lůžkům a dvě byly zaměřeny na 3D tisk celé protézy ruky.

Comotti (2015) vyzdvihuje možnost kombinace různých materiálů o různé tvrdosti při výrobě TT lůžka, což vede k respektování zatížitelných a nezatížitelných ploch pahýlu.

Zuniga (2015) popisuje 3D tištěnou dětskou protézu ruky, kterou považuje jako velký přínos do kvality života uživatele díky aktivní flexi prstů. Tu je možné aktivovat 20-30° flexí v zápěstí a protéza se tím stává funkční při činnostech běžného života.

Olsen (2021) zaměřuje svou studii na subjektivní pocity pacientů při nošení 3D tištěných TR lůžek a porovnání modifikovaného a nemodifikovaného tvaru. Upravená lůžka na základě protetických principů vyšla v hodnocení pohodlnosti i míry ulpění hůře než ta neupravená. Autoři ale vidí možný důvod v nedostatečných zkušenostech v oboru ortotika-protetika.

Plesec (2023) v rámci své studie došel k závěru, že 3D tištěné TT lůžku zajišťuje při chůzi stejnou stabilitu jako to vyrobené konvenčním způsobem. Naměřené hodnoty deformace během numerické analýzy chůze byly totiž podobné.

Nickel (2023) hodnotí ve svém výzkumu zkušenost pacientů s jejich klasickým TT lůžkem a jeho kopií vyrobené pomocí 3D tisku. Pacienti referovali, že oba typy lůžek jim sedí stejně. Z hlediska funkčnosti při používání je mnohem spolehlivější systém využívající pin. Naopak podtlakový systém nevyšel s dobrým hodnocením.

Park (2023) popisuje 3D tištěnou protézu ruky, která díky zakomponovaným pružinám umí docílit zpětného návratu energie, což je potřeba při střelbě v basketbalu. K využití energie došlo, je však ještě nutná optimalizace prototypu.

Všichni tito autoři se shodují v tom, že při použití technologii 3D tisku v protetice lze dosáhnout dobré funkčnosti zhotovené pomůcky. Někteří ale uvádějí výjimky či oblasti, kde je ještě nutná optimalizace pro požadovaný výsledek.

### 10.2.3 Výzkumná otázka č. 3

Je vhodné užití technologie 3D tisku v protetice z hlediska vlivu na životní prostředí?

| č. | Název  | Autor        | Rok  | Poznámky  |
|----|--|--------------|------|---|
| 7  | Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences                         | Zuniga       | 2015 | 3D tištěná protéza ruky, kombinace materiálů:<br>1) PLA<br>- rozložitelný materiál<br>-obnovitelný zdroj (z kukuřičného či bramborového škrobu)<br>-dobře recyklovatelný<br>2) akrylonitril-butadién-styrén (ABS)<br>-dobře recyklovatelný<br>3) kovové komponenty  |
| 6  | 3D-printing and upper-limb prosthetic sockets: promises and pitfalls   | Olsen        | 2021 | Lůžka HK z různých materiálů<br>1) PLA<br>- rozložitelný materiál<br>-obnovitelný zdroj (z kukuřičného či bramborového škrobu)<br>-dobře recyklovatelný<br>2)PLA obohacená o měděné nanokompozity<br>-recyklovatelný materiál<br>-z části z obnovitelného zdroje<br>-rozložitelný<br>3) PET-G<br>-dobře recyklovatelný materiál |
| 1  | Structural integrity of 3D-printed prosthetic sockets: An experimental study for paediatric above-knee applications. | Marinopoulos | 2022 | jeden z typů materiálu TF lůžek:<br>PLA<br>- rozložitelný materiál<br>-obnovitelný zdroj (z kukuřičného či bramborového škrobu)<br>-dobře recyklovatelný  |
| 4  | Numerical analysis of a transtibial prosthesis socket using 3D-printed bio-based PLA                                 | Plesec       | 2023 | 3D tištěné TT lůžko z PLA<br>- rozložitelný materiál<br>-obnovitelný zdroj (z kukuřičného či bramborového škrobu)<br>-dobře recyklovatelný  |
| 8  | 3D printed energy return elements for upper limb sports prosthetics  | Park         | 2023 | 3D tištěná protéza ruky z PLA<br>- rozložitelný materiál<br>-obnovitelný zdroj (z kukuřičného či bramborového škrobu)<br>-dobře recyklovatelný  |

Tabulka 3- Výzkumná otázka č. 3

Otázkou vlivu použitého materiálu na životní prostředí se zabývalo 5 studií, přičemž nejčastěji používaný materiál byla PLA. Jedná se o velmi dobře rozložitelný a recyklovatelný materiál a zároveň se získává díky rostlinné výrobě z obnovitelného zdroje. Na výrobu protézy ruky ho použil Zuniga (2015) i Park (2023). Pro zhotovení TF lůžek ho použil Marinopoulos (2022), pro výrobu TT lůžek Plesec (2023) a pro vytvoření TR lůžek si ho vybrala Olsen (2021).

Zuniga (2015) využil pro výrobu protézy ruky ještě ABS, který je dobře recyklovatelný.

Olsen (2021) na další typy lůžek aplikovala navíc PLA obohacenou o měděné nanokompozity, přičemž tento materiál má z hlediska vlivu na životní prostředí všechny výhody jako samotná PLA. V rámci výroby byl použit také PET-G, který je dobře recyklovatelný.

#### 10.2.4 Výzkumná otázka č. 4

Je vhodné užití technologie 3D tisku v protetice z hlediska finanční náročnosti?

| č. | Název  | Autor  | Rok  | Poznámky                 |
|----|--|--------|------|--------------------------|
| 4  | Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences | Zuniga | 2015 | nízká finanční náročnost |
| 7  | Numerical analysis of a transtibial prosthesis socket using 3D-printed bio-based PLA         | Plesec | 2023 | nízká finanční náročnost |

Tabulka 4- Výzkumná otázka č. 4

O finanční náročnosti výroby protetické pomůcky pomocí technologie 3D tisku se ve svých studiích výslovně zmiňují pouze dva autoři.

Zuniga (2015) považuje za jednu z největších předností jeho dětské 3D tištěné protézy nízkou finanční náročnost celého výrobního procesu.

Plesec (2023) v rámci jeho studie 3D tištěných TT lůžek z PLA došel ke stejnému závěru, totiž že tato technologie je nízkonákladová.

## DISKUZE

Ačkoliv 3D tisk proniká do většiny existujících oborů a přináší revoluční změny ve výrobě, v protetice žádné zásadní zařazení této technologie nepozorujeme. Otázkou je, proč zrovna v tomto oboru nedochází častěji k aplikaci 3D tisku, ačkoliv by se na první pohled tato metoda pro výrobu individuálních protetických pomůcek zdála vhodná.

Hortvath (2020) uvádí, že existují různé formy 3D tisku, které lze rozdělit podle jejich mechanismu na 3 typy. Prvním z nich je selektivní vazba, kam spadá SLS, druhým selektivní tuhnutí, do nějž se řadí SLA a třetí typ představuje selektivní depozice, která v sobě zahrnuje metodu FDM.

Ntousia (2019) přibližuje výhody a nevýhody zmíněných metod. Největší benefity FDM jsou velká variabilita barev, jednoduchost, vysoká rychlost výroby a velký výběr materiálů. Nejzásadnější limity pak představují nedostatečné mechanické vlastnosti, omezené rozlišení, špatná povrchová úprava a potřeba vnějších podpor při tisku komplexních struktur. U metody SLS spatřuje největší výhody v rychlosti výroby, vysoké odolnost a tuhosti produktu, velkém výběru materiálů a možnosti tisku velkých objektů. Na druhou stranu omezení této metody spočívá ve vysokých finančních nákladech a potřebě následného zpracování výrobku. Metodě SLA připisuje autor přednosti v podobě nízkého času výroby, přizpůsobenému barvení, vysoké kvality, dobrého rozlišení a možnosti dosažených detailů. Nejzásadnější nevýhody spočívají ale v použitelných materiálech a jejich křehkosti, navíc pro výrobu s převisy musí vznikat také velmi drahé podpory.

Navzdory existenci několika druhů technologie 3D tisku byl ve všech 8 studiích použit 3D tisk pomocí roztavených filament neboli metoda FDM. Předpokládám, že s výše uvedených výhod a nevýhod jednotlivých metod byla technologie FDM zvolena díky jednoduchosti procesu, velkému výběru materiálů a vysoké rychlosti výroby. Její nevýhody byly pro autory nejspíš méně závažné než vysoká finanční náročnost u SLS a velká křehkost materiálů u SLA.

Podle Hausmana (2014) se obecné výhody 3D tisku nezávisle na konkrétní metodě dají rozdělit do pěti oblastí, kterými jsou: personalizace, komplexita, udržitelnost, recyklace a plánované zastarávání a ekonomická stránka.

Vzhledem k tomu, že se všechny studie zabývaly výrobou protetické pomůcky na míru konkrétnímu pacientovi, lze s jistotou říci, že výhodu 3D tisku v podobě personalizace ztělesnily všechny.

Benefit v podobě možnost výroby komplexních tvarů, na které by bylo v konvenční výrobě potřeba nejprve zhotovit několik samostatných částí, se určitě neprojevuje v tisku pahýlových lůžek. Tímto pro 3D tisk metodou FDM v zásadě jednoduchým tvarem se zabývali Comotti (2015), Nickel (2020), Olsen 2021, Marinopoulos (2022), Plesec (2023) a Nickel (2023). Naopak z možnosti výroby komplexnějších tvarů v celku profitovali Zuniga (2015) při zhotovení dětské mechanické protézy ruky a Park (2023) pro 3D tisk sportovní protézy ruky se zpětným návratem energie.

Otázkou udržitelnosti se zabývali Zuniga (2015), Olsen (2021), Marinopoulos (2022), Plesec (2023) a Park (2023), kteří pro výrobu protetické pomůcky zvolili materiál PLA. Zuniga (2015) použil v rámci své studie k produkci i ABS a Olsen (2021) vybrala PET-G, přičemž oba tyto materiály jsou také šetrné k životnímu prostředí. Pirjan (2013) přitom vyzdvihuje jako jeden ze zásadních benefitů 3D tisku téměř nulové plýtvání odpadem. Při aditivní výrobě se totiž spotřebuje téměř přesně tolik materiálu, kolik je na výrobek potřeba a mizí tak obrovské množství odpadu, které vzniká při klasické konvenční výrobě. Tuto skutečnost nezmiňuje žádný autor uvedených 8 studií.

Fenomén recyklace a plánovaného zastarávání se oblasti protetiky netýká, jelikož protézy musí pacient relativně často měnit. V České republice má každý pacient nárok na novou protetickou pomůcku jednou za dva roky.

Podle Pirjana (2013) je 3D tisk z ekonomicky velmi výhodný z hlediska materiálů, transportu, pracovní síly či distribuce průmyslových center. Hausman (2014) zdůrazňuje výrazné snížení počtu jednotlivých kroků a potřebných strojů v rámci výrobního procesu a nižší spotřebu materiálu.

Naproti tomu pouze dva autoři zde rozebraných studií uvádí zmiňují ve svém výzkumu ekonomickou stránku 3D tisku protetické pomůcky. Zuniga (2015) vnímá jako hlavní přednost 3D tištěné protézy ruky Cyborg Beast velmi nízké náklady na výrobu v porovnání s protézami zhotovenými tradiční metodou. Důvody vidí v použitém materiálu PLA a i v možnosti spolupráce protetiků na dálku bez nutného fyzického transportu osob či protetických pomůcek. Měrné podklady pacienta se pošlou odborníkovi, který protézu

navrhne, STL soubor pošle zpět a finální výrobek se tiskne opět v místě u pacienta. Plesec (2023) ve své studii dochází k závěru, že použití technologie 3D tisku k výrobě TT lůžek z PLA je nízkonákladové.

Paradoxní je fakt, že z hlediska nosnosti doporučuje Nickel (2020) podtlakový systém. V zátěžových testech obstála TT lůžka fungující na principu podtlaku lépe než ta využívající pin, protože u podtlakového systému dochází k rovnoměrnějšímu rozložení sil a materiál není namáhán pouze v jedné oblasti. Když potom ale Nickel (2023) testoval funkčnost 3D tištěných lůžek přímo na pacientech, výrazně lépe si vedla TT lůžka s pinem, ta s podtlakovým systémem byla při používání hodnocena pacienty záporně.

Problematika využitelnosti 3D tisku v protetice je velice komplexní a na důkladné popsání tohoto fenoménu zdaleka nestačí rozsah bakalářské práce. 8 vybraných studiích není dostatečný počet na to, abychom z jejich výsledků mohli docházet k jistým závěrům.

Pro důkladnější zkoumání využitelnosti 3D tisku v protetice je potřeba dalšího výzkumu. Ideální by bylo rozdělit toto téma na jeho podtémata jako jsou např. 3D tištěná TF, TT, TH a TR lůžka, protézy ruky a nohy, skenování apod. a jim věnovat dostatečnou pozornost v samostatných bakalářských, diplomových či dizertačních pracích. Využít by se mohla stejná metodika jako v této bakalářské práci.

Jelikož tématice 3D tisku v protetice nevěnuje pozornost dostatečný počet literárních zdrojů, může tato bakalářská práce sloužit jako důležitý zdroj informací pro seznámení s touto problematikou. Je zde uveden teoretický základ i příklady z aktuálních výzkumů.



## ZÁVĚR

Cílem práce bylo popsat využitelnost 3D tisku v protetice formou literární rešerše. K tomu byly stanoveny 4 výzkumné otázky, které cílí na vhodnost užití technologie 3D tisku v protetice z hlediska nosnosti zhotovené pomůcky, funkčnosti zhotovené pomůcky, vlivu na životní prostředí a finanční náročnosti.

Celkem 8 studií autorů z různých zemí bylo podrobena detailnímu rozboru. Následně byly jejich výsledky interpretovány v návaznosti na jednotlivé výzkumné otázky.

Nosností zhotovené 3D tištěné protetické pomůcky se zabývaly 3 z uvedených studií, z nichž se jedna věnovala zátěžovým testům TF lůžek a dvě zkoumaly stejný fenomén u TT lůžek. Všichni autoři se shodnou, že za dodržení určitých podmínek lze pomocí technologie 3D tisku dosáhnout požadované nosnosti finálního produktu.

Zda 3D tištěné protetické pomůcky jsou dostatečně funkční, zkoumalo 6 autorů. 3 výzkumy byly zaměřeny na TT lůžka, 2 na protézu ruky a 1 studie se věnovala TR lůžkům. Všichni autoři dospěli k závěru, že užití technologie při výrobě protetické pomůcky může zaručit potřebnou funkčnost pomůcky, přičemž 2 autoři upozorňují na limity této technologie.

Otázkou vlivu na životní prostředí u aplikace 3D tisku v protetice se zaobíralo 5 studií, ze kterých se 2 věnovaly 3D tisku protézy ruky. Vždy jeden experiment se zaobíral TF, TT a TR lůžky. Ve všech pěti výzkumech byl k výrobě použitý materiál PLA. Mezi jeho hlavní přednosti z hlediska životního prostředí patří jeho biodegradabilita, dobrá recyklovatelnost a fakt, že pochází z rostlinného, tudíž obnovitelného zdroje. Jako další materiály šetrné k životnímu prostředí byly využity ABS a PET-G, jež jsou oba recyklovatelné.

Problematikou finanční náročnosti 3D tisku věnovali pozornost ve svých studiích pouze 2 autoři z celkových 8 představených. První z nich vyzdvihuje nízkou nákladovost procesu výroby u 3D tištěné dětské protézy ruky a druhý zmiňuje, že 3D tisk TT lůžek je finančně úsporná metoda.

Celkově lze říci, že využití 3D tisku v protetice za dodržení určitých podmínek je možné a zhotovené pomůcky dosahují srovnatelných výsledků jako ty vyrobené konvenčním způsobem. K uvažování o úplném nahrazení konvenční výroby 3D tiskem chybí ale dostatečný počet zdrojů a je tedy nutné tuto problematiku ještě důkladně prozkoumat a odstranit všechny její limity.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- CHUI, Kevin C; JORGE, Milagros; YEN, Sheng-Che a LUSARDI, Michelle M. *Orthotics and prosthetics in rehabilitation*. Fourth edition. St. Louis: Elsevier, [2019]. ISBN 978-0-323-60913-5.
- COMOTTI, Claudio, et al. Low cost 3D scanners along the design of lower limb prosthesis. In: *Proceedings of the 6th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning Technologies. Lugano, Switzerland, 27-28 October 2015*. Hometrica Consulting, 2015. p. 147-154.
- COMOTTI, Claudio, et al. Multi-material design and 3D printing method of lower limb prosthetic sockets. In: *Proceedings of the 3rd 2015 workshop on ICTs for improving patients rehabilitation research techniques*. 2015. p. 42-45.
- ČERNÁ, Tereza, et al. *Technologie výroby transfemorálních lůžek*. 2018.
- GUPTA, Ram K. (ed.). *3D Printing: Fundamentals to Emerging Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2023.
- HAUSMAN, Kalani Kirk a HORNE, Richard. *3D printing for dummies*. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-66075-1.
- HORVATH, Joan C. a CAMERON, Rich. *Mastering 3D printing: a guide to modeling, printing, and prototyping*. Second edition. Technology in action. New York: Apress, [2020]. ISBN 978-1-4842-5841-5.
- KORBEL, P. (2015) Průmyslová revoluce 4.0: Za 10 let se továrny budou řídit samy a produktivita vzroste o třetinu, *Hospodářské noviny* 17. 5. 2015. Dostupné z: <https://byznys.ihned.cz/c1-64009970-prumyslova-revoluce-4-0-za-10-let-se-tovarny-budouridit-samy-a-produktivita-vzroste-o-tretinu>.
- MARINOPOULOS, Theodoros; LI, Simin; SILBERSCHMIDT, Vadim V. Structural integrity of 3D-printed prosthetic sockets: An experimental study for paediatric above-knee applications. *Procedia Structural Integrity*, 2022, 37: 139-144.
- NICKEL, Eric, et al. Pilot Test of a Definitive Prosthetic Socket Made with 3D Printing Technology. *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 2023, 35.1: 55-60.

- NICKEL, Eric A., et al. Strength testing of definitive transtibial prosthetic sockets made using 3D-printing technology. *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 2020, 32.4: 295-300.
- NTOUSIA, Margarita; FUDOS, Ioannis. 3D printing technologies & applications: an overview. In: *Proceedings of the CAD 2020 Conference, Singapore*. 2019. p. 248.
- OLSEN, Jennifer, et al. 3D-printing and upper-limb prosthetic sockets: promises and pitfalls. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2021, 29: 527-535.
- PARK, Jung Wook, et al. 3D printed energy return elements for upper limb sports prosthetics. *Prosthesis*, 2023, 5.1: 13-34.
- PLESEC, Vasja, et al. Numerical analysis of a transtibial prosthesis socket using 3D-printed bio-based PLA. *Materials*, 2023, 16.5: 1985.
- PŮLPÁN, Rudolf. *Základy protetiky*. Praha: Epimedia, 2011. ISBN 978-80-260-0027-3.
- PÎRJAN, Alexandru; PETROȘANU, Dana-Mihaela. The impact of 3D printing technology on the society and economy. *J. Inf. Syst. Oper. Manag*, 2013, 7.2: 360-370.
- RAINA, Sukhil, et al. Limb Loss: Facts and Statistics—Diabetes Mellitus and Vascular Insufficiency, a Real Harbinger of Major Limb Amputations—A Cross-sectional Study among Amputees Reporting to a Tertiary Care Center. *Journal of Orthopaedic Diseases and Traumatology*, 2023, 6.3: 223-227.
- SAVINI, A.; SAVINI, G. G. A short history of 3D printing, a technological revolution just started. In: *2015 ICOHTEC/IEEE international history of high-technologies and their socio-cultural contexts conference (HISTELCON)*. IEEE, 2015. p. 1-8.
- ZUNIGA, Jorge, et al. Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences. *BMC research notes*, 2015, 8: 1-9.