

# Možnosti tvorby sestav na 3D tiskárně

Bc. Jan Strnad

---

Diplomová práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Strnad**  
Osobní číslo: **T16221**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Řízení jakosti**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Možnosti tvorby sestav na 3D tiskárně**

Zásady pro vypracování:

1. vypracujte literární rešerži na dané téma
2. provedte studii kinematiky 3D tištěných spojů
3. stanovte konstrukční vůle pro jednotlivé spojení
4. stanovte zásady modelování sestav pro 3D tisk
5. provedte ověření navrženého konstrukčního řešení

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2015
2. LAPČÍK, Lubomír a Miroslav RAAB. Nauka o materiálech II. Zlín : Vyd. 2., rozš. Univerzita Tomáše Bati, 2004. ISBN 80-7318-229-7.
3. dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Martin Řezníček, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**2. ledna 2018**

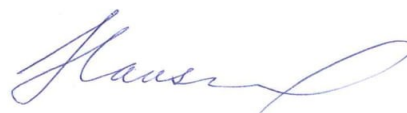
Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 7. května 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 11.5.2018

  
.....

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

<sup>2)</sup> *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).*

<sup>3)</sup> *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíádne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na technologii aditivní výroby. Zabývá se možnostmi tvorby sestav na FDM 3D tiskárnách. Tyto sestavy jsou nerozebíratelné. Z tohoto důvodu je důležité zvolit optimální velikost vůle (odchylky) mezi stěnami, aby mechanismus splňoval potřebnou pohyblivost. U několika materiálů s odlišnými reologickými vlastnostmi jsou zkoumány konstrukční vůle na základě kulového spojení. Na závěr jsou znázorněny závislosti mezi zvolenými konstrukčními vůlemi a mezi tloušťkami vrstev u daných materiálů. Výsledkem je pak doporučení modelovacích a tiskových parametrů.

Klíčová slova: FDM, 3D tisk, vůle, model, parametry

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with additive manufacturing technologies especially with ability to create reports on FDM 3D printers. These assemblies are non-disambiguable. Therefore, it is important to choose the optimal magnitude of the deviation between the walls so that the mechanism has the required mobility. For several materials with different rheological properties, is studied based on the ball joint. Finally, the dependence of the magnitude of the variance between the walls and the thickness of the layer for the given materials is shown. The result is the recommendation of modelling and printing parameters.

Keywords: FDM, 3D print, deviation, model, parameters

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu diplomové práce, Ing. Martinu Řezníčkovi Ph.D. za cenné rady, odborné vedení a čas, který mi během tohoto zpracování diplomové práce věnoval. Také bych rád poděkoval mé rodině za podporu během studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TECHNOLOGIE 3D TISKU</b> .....	<b>11</b>
1.1 HISTORIE.....	11
1.2 UPLATNĚNÍ 3D TISKU V SOUČASNOSTI.....	11
1.3 PROTOTYPOVÁNÍ NÁVRHŮ.....	12
1.4 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ (RE) .....	13
<b>2 FDM TECHNOLOGIE</b> .....	<b>15</b>
2.1 POLOHOVÁNÍ U FDM 3D TISKÁREN .....	16
2.1.1 Polohování pomocí kartézského souřadnicového systému .....	17
2.1.2 Delta systém .....	17
2.1.3 Polární souřadnicový systém.....	17
2.2 MATERIÁLY PRO FDM 3D TISK.....	17
2.2.1 Materiál ABS .....	18
2.2.2 Materiál PC .....	19
2.2.3 Materiál ASA .....	19
2.2.4 Materiál HIPS.....	20
2.2.5 Materiál PLA.....	20
2.2.6 Materiál Nylon .....	21
2.2.7 Materiál PETG .....	22
2.2.8 Speciální materiály.....	22
2.3 RYCHLOST 3D TISKU .....	24
<b>3 POSTUP TECHNOLOGIE 3D TISKU</b> .....	<b>25</b>
3.1 CAD .....	25
3.2 SOUBOR.....	26
3.3 MANIPULACE S STL SOUBOREM .....	26
3.4 NASTAVENÍ PROCESU .....	26
3.5 PROCES 3D TISKU.....	27
<b>4 ÚPRAVA POVRCHU A STRUKTURY TIŠTĚNÉHO VÝROBKU</b> .....	<b>28</b>
4.1 BROUŠENÍ .....	28
4.2 TRYSKÁNÍ .....	28
4.3 LEPTÁNÍ.....	28
4.4 OPRAVY .....	29
4.5 INSERTY .....	30
<b>5 TECHNOLOGICKÁ OMEZENÍ 3D TIŠTĚNÝCH SOUČÁSTÍ</b> .....	<b>31</b>



5.1	VLIV MINIMÁLNÍ VZDÁLENOSTI MEZI SOUSEDNÍMI STĚNAMI.....	31
5.2	VELIKOST OBJEKTU .....	31
5.3	PODPŮRNÝ MATERIÁL .....	31
5.4	SMRŠTĚNÍ MATERIÁLU .....	32
5.5	KALIBRACE 3D TISKÁRNY (TISKOVÉ PODLOŽKY).....	33
5.6	TUHOST ULOŽENÍ 3D TISKÁRNY .....	33
5.7	OPOTŘEBENÍ A ÚDRŽBA VODÍCÍCH TYČÍ .....	33
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>MECHANICKÉ SPOJENÍ.....</b>	<b>36</b>
7.1	STROJ .....	36
7.2	POUŽITÉ MATERIÁLY .....	38
7.2.1	Materiál Z-ULTRAT.....	38
7.2.2	Materiál Z-HIPS .....	39
7.2.3	Materiál Timberfill.....	40
<b>8</b>	<b>NÁVRH KULOVÉHO SPOJENÍ.....</b>	<b>41</b>
8.1	TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY OVLIVŇUJÍCÍ VÝROBU SPOJŮ A SESTAV .....	41
8.2	ZÁSADY PRO MODELOVÁNÍ SPOJENÍ A SESTAV .....	42
8.3	NÁVRH MODELU KULOVÉHO SPOJENÍ .....	43
8.4	NASTAVENÍ TISKU V SOFTWARE Z-SUITE.....	45
8.4.1	Nastavení tisku u kulového spoje z materiálu Z-ULTRAT .....	46
8.4.2	Nastavení tisku u kulového spoje z materiálu Z-HIPS .....	46
8.4.3	Nastavení tisku u kulového spoje z materiálu Timberfill .....	47
<b>9</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>48</b>
9.1	PŘESNOST TISKU U TISKÁRNY ZORTRAX M200 .....	48
9.1.1	Měřidlo a podmínky měření .....	48
9.1.2	Vzorové vyhodnocení .....	49
9.1.3	Vyhodnocení základní statistiky naměřených hodnot.....	52
9.2	VYHODNOCENÍ VZDÁLENOSTÍ MEZI STĚNAMI U KULOVÝCH SPOJŮ .....	55
9.2.1	Kulový spoj z materiálu Z-ULTRAT.....	56
9.2.2	Kulový spoj z materiálu Z-HIPS.....	57
9.2.3	Kulový spoj z materiálu Timberfill.....	58
9.2.4	Shrnutí výsledků kulových spojů .....	59
9.3	TVORBA SESTAV.....	59
9.4	NEPŘÍZNIVÉ VLIVY PŘI TISKU SESTAV .....	61
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>72</b>

## ÚVOD

3D tisk, známý také jako aditivní výroba, je v dnešní době populárním a rozšířeným odvětvím, jak v průmyslu, tak i v dílnách kreativních kutilů. Aditivní výroba je přesná technologie, díky které měníme virtuální data modelu na model fyzický. Tato technologie se také označuje jako třetí průmyslová revoluce. Nejrozšířenější je v automobilovém průmyslu podnázvem Rapid Prototyping, kde slouží k navrhování a inovacím jednotlivých dílů. Tuto technologii lze také využít v oborech jako je zdravotnictví, obuvnictví a architektura. Další uplatnění má i ve stavebnictví, kde jsou využity 3D tiskárny na beton.

Práce zkoumá především technologii FDM 3D tisku. Tato metoda patří k jednomu z nejpoužívanějších typů výroby součástí, a to především díky nízkým pořizovacím nákladům za stroj i materiál. Princip 3D tisku pod zkratkou FDM plyne z anglického výrazu „fused deposition modeling“, neboli modelování depozicí taveniny. Polotovarem pro modelování depozicí taveniny jsou vlákna z polymerního materiálu. Po návrhu modelu v 3D softwaru a po nastavení tiskových parametrů vzniká výrobek vytlačováním materiálu na tiskovou desku. Na tuto desku se nanášejí jednotlivé vrstvy polymerního materiálu. Po dokončení vrstvy se tisková deska posune dolů (o tloušťku vrstvy) a následuje tisk další vrstvy.

Cílem diplomové práce je navržení modelovacích či konstrukčních vůlí a následná studie kinematiky těchto tištěných spojení. Pod názvem konstrukční vůle si lze představit vzdálenost mezi sousedními stěnami dvou objektů. Tyto objekty tvoří po vyjmutí z prostoru pracovní plochy tiskárny a po odstranění podpůrného materiálu nerozebíratelné spojení. Jednotlivé části mechanismu se vůči sobě pohybují a musí plnit požadovaný rozsah pohybu. Je nutné se vyvarovat odchylkám mezi vytvořenou součástí v CAD softwaru a reálně vytištěným modelem. Na správný návrh konstrukčních vůlí mají velký vliv druh a nastavení tloušťky nanášeného materiálu. Po zohlednění všech technologických aspektů ovlivňujících přesnost jednotlivých spojení, následuje návrh nerozebíratelného mechanismu, kterým jsou ověřeny přesnosti návrhu konstrukčních vůlí.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 TECHNOLOGIE 3D TISKU

Existuje více technologií 3D tisku. Jako první byla použita stereolitografie, ale můžeme se setkat i s tiskárnami na bázi jiného principu. Například můžeme pracovat s tiskárnou využívající fotopolymery (SLA), tiskárnou na principu spékání práškové oceli (SLS), či tiskárnou na principu vytlačování polymerního materiálu (FDM). Při srovnání jednotlivých metod je metoda FDM nejlevnější na provoz, nevýhodou je pak menší přesnost tisku. [1,2]

### 1.1 Historie

Lidé začali vyrábět různé předměty už před několika tisíci lety. Od kamenů s dřevěnou rukojetí, se lidé postupem času dopracovali k odlévání hrotů kopí z bronzu. Nejnovější generace inovátorů a výrobců je schopna převádět své myšlenky do podoby digitální produkce. CNC stroje obrábějí kovy, laserové frézky tvoří reliéfy ve skle a dřevě. Desky s tištěnými spoji, napájené elektrickou energií dokáží ovládat i ty nejsložitější roboty, ale pravděpodobně žádný nástroj v tomto moderním arzenálu nemá takovou moc jako technologie 3D tisku. [2]

Průmyslový 3D tisk je dostupný již od 80. let 20. století. Poděkovat můžeme Charlesu Hullovi, který zkoumal fotopolymery inkoustových tiskáren a objevil jejich specifické fyzikální vlastnosti zajišťující tuhnutí materiálu při působení UV záření. I když dostupnost 3D tisku sahá až do 80. let 20. století, ke spotřebitelům a nadšencům se tato technologie dostává až v roce 2009. Vzestup 3D tisku se někdy označuje také jako počátek „třetí průmyslové revoluce“. V současnosti máme průmyslový segment, kde se 3D tisk využívá například v automobilovém průmyslu (rapid prototyping) a ve zdravotnictví. Dalším segmentem je segment spotřebitelský, kde si mohou i amatéři dovolit pořízení technologie, která byla donedávna pro spotřebitele velmi drahá. V případě spotřebitelů jde především o RepRap 3D tiskárny. [2,3,4]

### 1.2 Uplatnění 3D tisku v současnosti

V dnešní době se 3D tisk rozšiřuje hlavně u firem, které touží rozšířit svou nabídku, dále aby zlepšily stávající produkty a služby, nebo vytvářely nové. Nové technologie ovlivňují realitu hlavně tehdy, když se uplatňují v běžném životě. Nejrozšířenější je 3D tisk v oblasti automobilového průmyslu, kde tvoří převážnou polovinu uplatnění. Tato technologie lze také využít v oborech jako je zdravotnictví, obuvnictví, v architektuře. Další využití

je ve stavebnictví, kde jsou využity 3D tiskárny na beton. Beton je vytlačován z hubice na podložku po jednotlivých vrstvách. V budoucnu se bude možné setkat s 3D tiskárnami, které vytisknou domy včetně servisních potrubí za velmi krátkou dobu s minimální obsluhou. [2,5]

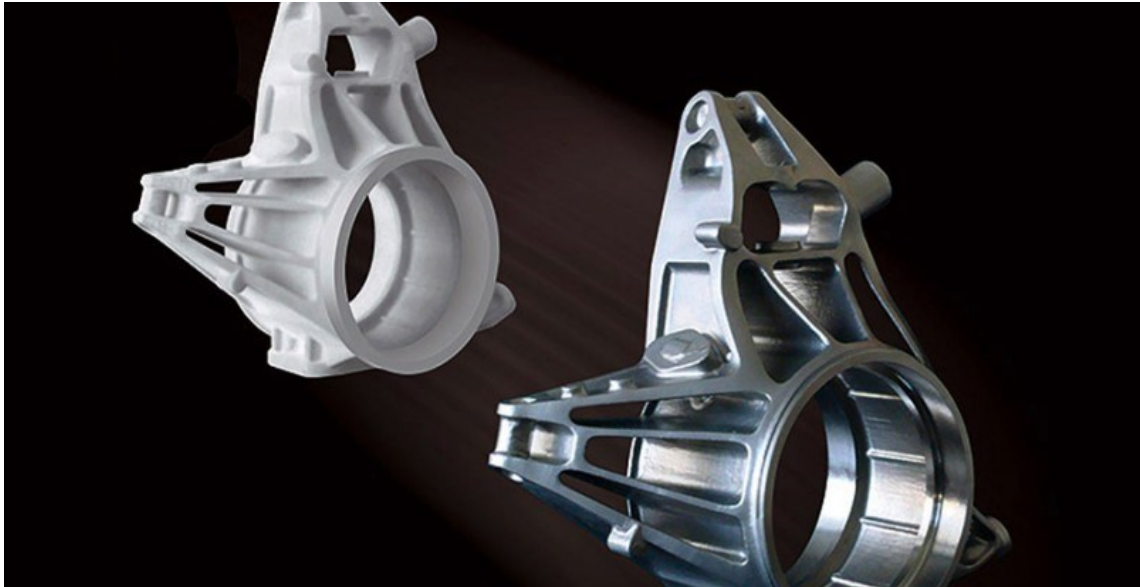


Obr. 1. První vytisknuté domy pomocí technologie 3D tisku v Dubaji [23]

### 1.3 Prototypování návrhů

Díky této technologii je možné rychle vytvořit fyzický model součásti, přičemž návrh modelu je vytvořen pomocí CAD softwaru. 3D tisk se ideálně hodí k rychlému prototypování, jelikož zhotovení jednotlivých vzorků je méně časově a finančně náročné než u ostatních technologií, jako je například technologie vstřikování. [3]

Při výrobě složitých součástí vždy platilo, že čím je součást tvarově složitější, tím bude výroba finančně nákladnější. U technologie vstřikování má složitost součásti značný vliv na konstrukci formy a tím je výroba prototypu podstatně dražší, než u technologie 3D tisku. 3D tiskárnu „nezajímá“ jak je předmět jednoduchý či složitý, registruje pouze kolik materiálu spotřebovává, nikoliv to, kolik detailů návrh obsahuje. [1,2]

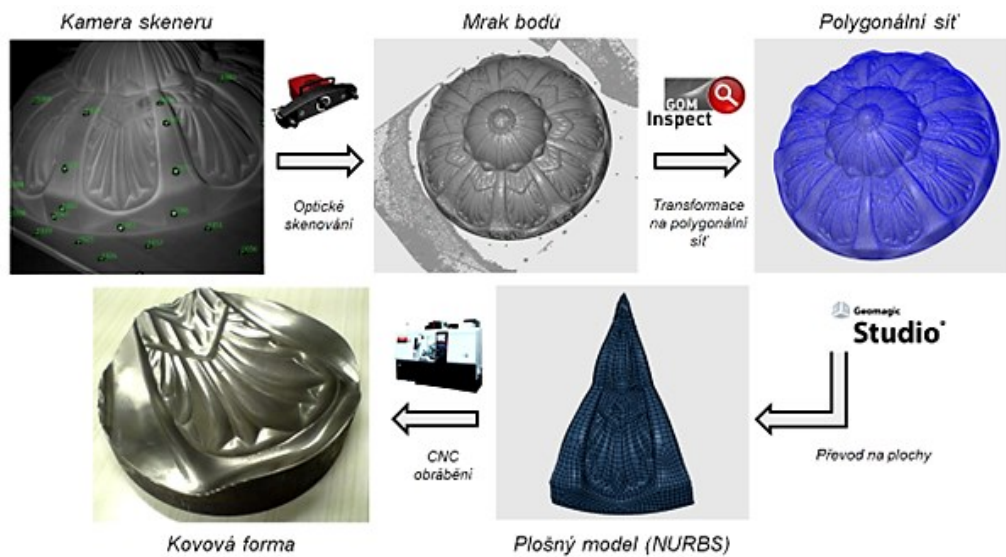


Obr. 2. Rapid prototyping [6]

#### 1.4 Reverzní inženýrství (RE)

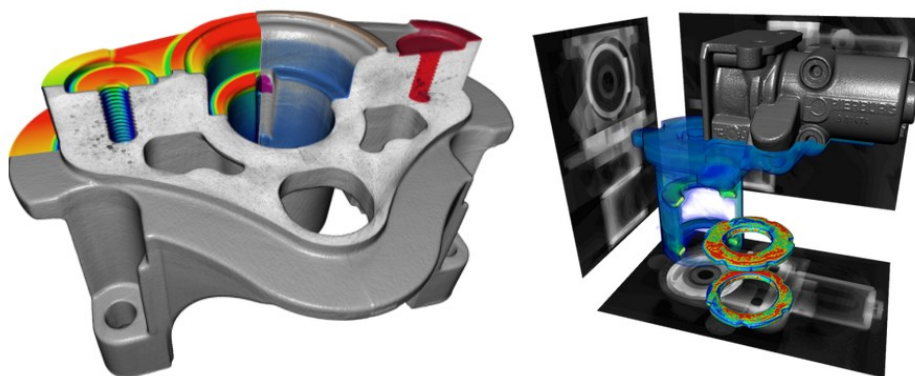
Stále více modelů je stavěno z dat generovaných pomocí reverzního inženýrství, pomocí 3D zobrazovací techniky a vhodného softwaru. V tomto kontextu je RE proces získávání geometrických dat z jiného objektu. Tato data jsou obvykle zpočátku dostupná v tom, co se nazývá forma bodového mraku. Tento pojem znamená nespojenou sadu bodů reprezentujících povrchy objektu. Tyto body je třeba spojit pomocí softwaru RE, jako je například software pod názvem Geomatic. Geomatic může být také použit pro kombinování bodových mraků z různých skenů a pro provádění dalších funkcí, jako je vyplňování otvorů. V mnoha případech nebudou data úplná. Vzorky mohou být například umístěny v upínacím úchytu a povrchy sousedící s tímto přípravkem nemusí být skenovány. Navíc některé povrchy mohou zakrývat jiné, například u součástí s hlubokými šterbinami a vnitřními útvary. Z tohoto důvodu se může stát, že se objekt nezobrazí přesně tak, jak je ve skutečnosti. [1,7]

Nedávno došlo k obrovským zlepšením v technologii skenování. Mobilní telefon s využitím vestavěné kamery nyní dokáže vygenerovat 3D sken. Tohoto výsledku by ještě před několika lety dosahovaly pouze drahé laserové skenovací přístroje nebo stereoskopický kamerový systém. Zkonstruované objekty by byly normálně skenovány pomocí technologie laserového snímání nebo dotykové sondy. [1,7]



Obr. 3. Proces reverzního inženýrství [8]

Objekty, které mají složité interní prvky nebo anatomické modely mohou využívat počítačovou tomografii, která byla zpočátku vyvinutá pro lékařské zobrazování, ale také dostupná pro skenování průmyslově vyráběných objektů. Tato technika v podstatě funguje podobně jako aditivní výroba (AM), což znamená skenování vrstvy po vrstvě. V tomto případě využijeme software ke spojení těchto vrstev a určení hranic povrchů. Hranice ze sousedních vrstev jsou spojeny dohromady a vytvářejí povrchy. Výhodou technologie počítačové tomografie je, že mohou být také generovány interní funkce. Vysokoenergetické rentgenové záření se používá v průmyslových technologiích k vytváření obrazů s vysokým rozlišením kolem 1 mikrometru. [1,7]



Obr. 4. Model snímáný pomocí počítačové tomografie [9]

Dalším způsobem, kterým můžeme digitalizovat objekt, je Capture Geometry Inside technologie. Tato technologie také pochází ze zpětné technologie AM. 2D zobrazování se používá k zachycení průřezů součásti, kdy je obrobena vrstva vrstvy. Je zřejmé, že jde o destruktivní přístup zachycení geometrie, takže jej nelze použít pro každý typ produktu. [1]



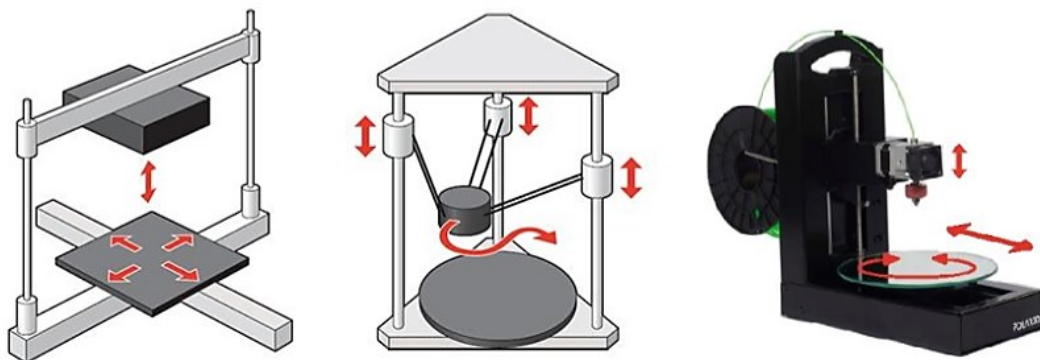


- Vlákno (struna) je obvykle vyrobeno z termoplastu a slouží jako surovina, z níž 3D tiskárna vytváří předměty. Vlákna jsou o dvou rozměrech a to 1,75 mm a 2,85 mm. Vlákna různých průměrů nelze zaměňovat, musejí být kompatibilní s danou 3D tiskárnou. Podle konstrukce tiskárny lze využít stejný materiál struny na tisk samotného objektu a tvorbu podpor nebo kombinaci dvou materiálů.
- Extrudér je sestava, která podává a posouvá vlákno topným blokem.
- Krokové motory posouvají pásy a extrudér ve směru x, y, z.
- Šasi tvoří rám 3D tiskárny.
- Horký konec (topné těleso) je část extrudéru kde dochází k natavení materiálu na potřebnou teplotu zvoleného materiálu.
- Tryska se nachází pod topným tělesem. Tryskou je přiváděn roztavený materiál na tiskovou desku.
- Ventilátor řídí teplotu tuhnutí každé z nanesených vrstev a zajišťuje tak úspěšnost ukládání a propojení jednotlivých vrstev. [2]

## 2.1 Polohování u FDM 3D tiskáren

Správné místo nanášení materiálu na povrch tiskové desky se udává kombinací pohybů tiskové hlavy tiskové desky. Jsou tři základní skupiny určování souřadnic, podle nichž můžeme dělit polohování FDM 3D tiskáren, a to:

- Kartézský
- Delta
- Polární



Obr. 6. Schéma pohybu kartézského souřadnicového systému (vlevo), delta systému (uprostřed) a polárního systému (vpravo) [25]

### 2.1.1 Polohování pomocí kartézského souřadnicového systému

V tomto systému jsou všechny pohyby translační, v osách X, Y a Z. Vertikální pohyb, neboli výšku udává osa Z. Jedná se o nejběžnější variantu většiny technologií. Kartézský souřadnicový systém se dále dělí podle toho, jak se vůči sobě pohybuje tisková deska a tisková hlava. Dělí se na:

- Standart – tisková deska se pohybuje pouze v ose Y, zatímco tisková hlava se pohybuje v osách X a Z. Každá osa je opatřena jedním motorem, který zajišťuje pohyb. Pohyb ve směru Z je někdy poháněn dvěma motory současně.
- Core XY – Zde se tisková hlava pohybuje v ose X a Y, pohyb zajišťují dva sprzęžené motory. Pohyb v ose Z je způsoben buď tiskovou hlavou, nebo tiskovou deskou poháněnou jedním až dvěma motory.
- Core XZ – princip tohoto polohování je obdobný jako u předchozího způsobu core XY, jen v jiných osách.
- Cubed shape printer – zde se tisková deska pohybuje v ose Z a v osách X a Y se pohybuje tisková hlava. Každá osa má opět přiřazen jeden motor. [31]

### 2.1.2 Delta systém

Delta 3D tiskárny jsou opatřeny třemi sloupky, které mezi sebou mají stejnou vzdálenost. Každý sloupek je vybaven jedním motorem, který pohání posuv s ramenem ve směru osy Z. Vlivem kombinace pojezdů na všech sloupcích se tisková hlava pohybuje nad tiskovou deskou. V ojedinělých případech se natáčí i tisková deska. [25,31]

### 2.1.3 Polární souřadnicový systém

Poslední možností polohování je poloha určena natočením tiskové desky o úhel  $\varphi$ , přičemž vzdálenost od osy může vykonávat jak tisková deska, tak i tisková hlava. Pohyb ve směru Z většinou vykonává tisková hlava. Nejvhodnější využití delta a polárního polohování je pro rotační díly, zatímco kartézský souřadnicový systém je více univerzální. [31]

## 2.2 Materiály pro FDM 3D tisk

Technologie FDM tisku využívá širokou škálu materiálů. Nabídka materiálu se postupem času rozšiřuje díky vývoji nových materiálů s různými mechanickými, fyzikálními či chemickými vlastnostmi.

Materiály pro metodu FDM jsou ve formě vláken namotaných na cívku. Většinou jsou cívky s materiálem o hmotnosti od 0,5 kg až do 2 kg. Hmotnosti se liší dle výrobce a dle velikostí tiskárny. [12,15]

### 2.2.1 Materiál ABS

Jedním z nejpoužívanějších materiálu je materiál ABS. Tento polymer představuje kombinaci monomerů akrylonitril-butadien-styren s výrazně lepší chemickou odolností a houževnatostí než má polystyren, a to při zachování dostatečné tuhosti.

Je to trvanlivý materiál, jehož unikátní vlastností je následná obrobiteľnosť a reakce na acetonové rozpouštědlo. Při styku materiálu ABS s acetonovým rozpouštědlem dochází ke zkapalnění (rozpuštění) materiálu. Výhodou je využití acetonových pár, při jejichž působení dochází k naleptání a tím i k vyhlazení povrchu vytisknuté součásti. [2,11]

Parametry tisku pro materiál ABS:

- Hustota materiálu: 1050 kg/m<sup>3</sup>
- Teplota tisku: 220 až 240 °C
- Teplota extrudéru: 220 až 270 °C
- Teplota podložky: 100 až 130 °C [12]



Obr. 7. Model z materiálu ABS [13]

### 2.2.2 Materiál PC

Polykarbonáty (PC) jsou obecně polyestery kyseliny uhličité a dihydroxysloučenin. Spojují několik velmi dobrých vlastností. Dosud nebylo dosaženo tolika dobrých vlastností souhrnně u jednoho termoplastu. Polykarbonát má výborné mechanické a dielektrické vlastnosti, konstantní a široké rozmezí teplot, vyznačuje se minimální nasákavostí a odolností vůči povětrnostním podmínkám. Tyto vlastnosti jsou spojeny s rozměrovou stabilitou, a tak je vhodný zejména k výrobě prototypů, funkčních výrobků a součástí. Většinou jde o směs polykarbonátu s materiálem ABS. [3,11,14]

Parametry tisku pro materiál PC/ABS:

- Hustota materiálu: 1140 kg/m<sup>3</sup>
- Teplota tisku: 220 až 240 °C
- Teplota podložky: 90 až 100 °C [10]

### 2.2.3 Materiál ASA

Akrylonitril-styren-akryl (ASA) je alternativou za materiál ABS. Je to velmi kvalitní konstrukční termoplast se zvýšenou odolností vůči povětrnostním podmínkám a výbornou odolností proti UV záření. Je tuhý, mechanicky odolný, odolný proti větším výkyvům teplot. Díky těmto vlastnostem lze i na malých objektech pozorovat náročnost detailů. U objektů, kde je kladen dlouhodobý důraz na jejich vzhled, je ASA vhodný pro jeho nízkou hladinu žloutnutí. ASA je vhodným materiálem pro modely s náročnou aplikací.

Parametry tisku pro materiál ASA:

- Hustota materiálu: 1070 kg/m<sup>3</sup>
- Teplota tisku: 250 až 255 °C
- Teplota extrudéru: 220 až 250 °C
- Teplota podložky: 60 až 100 °C [12]



Obr. 8. Model z materiálu ASA [13]

#### 2.2.4 Materiál HIPS

Houževnatý polystyren (HIPS) je termoplast, polystyren s přidavkem kaučuku. Jak vyplývá z názvu, materiál je velmi houževnatý, pevný a má dobrou teplotní stálost. HIPS je dobře obrobitelný materiál. Na rozdíl od jiných materiálů jako je například ABS, má HIPS daleko menší tepelné smršťování. Díky jeho vlastnostem je vhodný zejména pro modely s většími rozměry. [10,13]

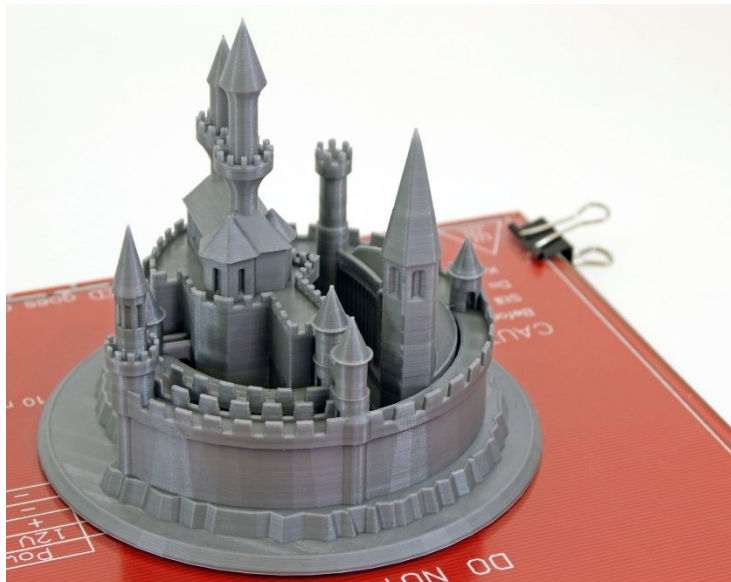
Parametry tisku pro materiál HIPS:

- Hustota materiálu: 1040 kg/m<sup>3</sup>
- Teplota extrudéru: 220 až 240 °C
- Teplota podložky: 100 až 120 °C [10]

#### 2.2.5 Materiál PLA

Polylactic acid (PLA) českým názvem kyselina polyléčná. Je to materiál vyrobený z bramborového nebo kukuřičného škrobu či z cukrové třtiny. Jde o biologický plně odbouratelný materiál, který lze rozpustit v hydroxidu sodném. Pro metodu FDM 3D tisku je nejuniverzálnějším materiálem. Je tvrdý, odolný a pružný jako jiné plasty a je vhodný i pro tisk velkých předmětů. [10,13]

Vzhledem k jeho vysoké navlhavosti je nutno materiál skladovat v suchém prostředí. Při nevhodném skladování pohlcuje vlhkost, což způsobuje vady na povrchu předmětu v podobě bublinek. Modely z materiálu PLA lze snadno brousit, vrtat a lakovat. [10,13]



Obr. 9. Model z materiálu PLA [13]

Parametry tisku pro materiál PLA:

- Hustota materiálu:  $1250 \text{ kg/m}^3$
- Teplota tisku: 185 až 235 °C
- Teplota extrudéru: 150 až 210 °C
- Teplota podložky: 0 až 60 °C [12]

### 2.2.6 Materiál Nylon

Nylon (PA) je všestranným materiálem a to díky své odolnosti a flexibilitě. Je vhodný pro tisk funkčních a technických dílů, a to díky svému nízkému součiniteli tření a vysoké teplotě tání. Stejně jako materiál PLA je nylon navlhavý a je nutné jej skladovat v suchém prostředí. [10,13]

Parametry tisku pro materiál Nylon:

- Hustota materiálu:  $1100 \text{ kg/m}^3$
- Teplota extrudéru: 235 až 260 °C
- Teplota podložky: 100 až 130 °C [12]

### 2.2.7 Materiál PETG

PETG (polyetyléntereftalát – glykol) je pevný a houževnatý materiál v transparentní nebo i neprůsvitné podobě. Je odolný proti nízkým i vysokým teplotám, a také vůči kyselinám a rozpouštědlům. Je vhodným materiálem pro tisk strojních součástí a velkých výtisků. PETG má skvělé tiskové vlastnosti a výsledný objekt má lesklý povrch. Další výhodou tohoto materiálu je, že při tisku nejde cítit. [10,12]

Parametry tisku pro materiál PETG:

- Hustota materiálu: 1350 kg/m<sup>3</sup>
- Teplota extrudéru: 210 až 235 °C
- Teplota podložky: 45 až 60 °C [12]

### 2.2.8 Speciální materiály

#### ABS+

Je to materiál ABS s 40% navýšením pevnosti od původního ABS materiálu. Největším rozdílem je pevnost a odolnost proti kolísání teplot při tisku. Tento materiál je vhodný pro tisk objektů s většími rozměry i při otevřeném pracovním prostoru 3D tiskárny. [12]

Parametry tisku pro materiál ABS+:

- Teplota tisku: 230 až 240 °C
- Teplota podložky: 90 až 100 °C [12]

#### Materiál Woodfill

Materiál Woodfill napodobuje materiál dřeva. Nejen že tak vypadá, ale jako dřevo i voní. Vlákno je směs z recyklovaného dřeva s vazujícím polymerem na bázi PLA. Zbarvení objektů je závislé na teplotě tisku. Čím vyšší je teplota, tím tmavší odstín má materiál výtisku. Výsledný objekt lze brousit a natírat. [15]

Parametry tisku pro materiál Woodfill:

- Hustota materiálu: 1070 kg/m<sup>3</sup>
- Teplota tisku: 170 až 250 °C
- Teplota extrudéru: 190 až 210 °C
- Teplota podložky: 50 až 70 °C [15]



Obr. 10. Modely z materiálu Woodfill [13]

### **Copperfill**

Copperfill (měděná tisková struna). Jde o vlákno z PLA s vysokým podílem měděných částic. Zhotovený 3D model, lze po vytištění brousit a vyleštit leštidlem na měď. Výsledný model má po upravení vzhled měděného odlitku. [15]

Parametry tisku pro materiál Copperfill:

- Teplota tisku: 195 až 250 °C
- Teplota podložky: 50 až 60 °C
- Rychlost tisku: 40-100 mm/s [15]

### **Bronzefill**

Bronzefill je tisková struna z PLA s vysokým podílem bronzových částic. Zhotovený model lze stejně jako u Copperfill vyleštit a dosáhnout tak vzhledu bronzového odlitku. Rozdíl mezi modelem před a po vyleštění můžeme pozorovat na obrázku. [15]

Parametry tisku pro materiál Bronzefill:

- Teplota tisku: 195 až 220 °C
- Teplota podložky: 50 až 60 °C
- Rychlost tisku: 40-100 mm/s [15]



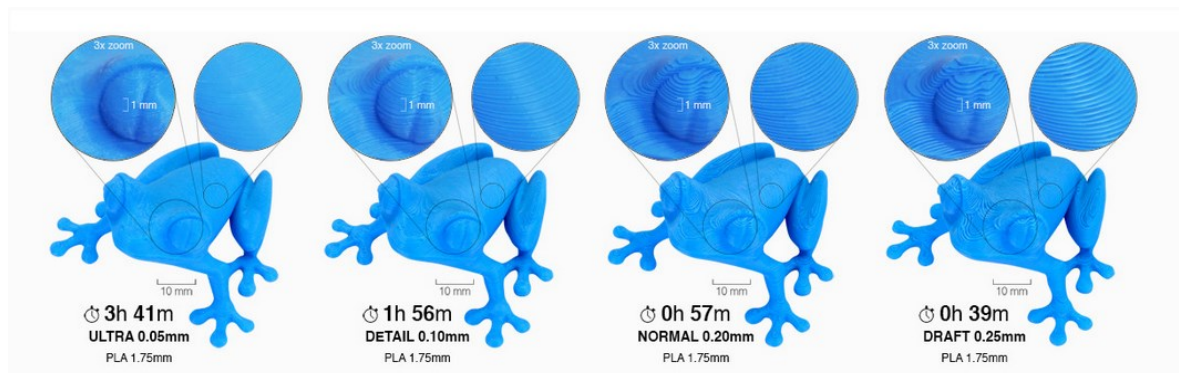


Obr. 11. Model z materiálu Bronzefill [13]

### 2.3 Rychlost 3D tisku

Mnoho termínů a definic popisuje proces 3D tisku jako rychlý. Ale rychlost je relativní termín. Termín je sám o sobě nebezpečný, protože naznačuje, že tato technologie je rychlejší než ostatní výrobní procesy. Rychlost závisí na geometrii výrobku a také na počtu vyráběných kusů. Jde-li o sériovou výrobu je vhodné zvolit jiný výrobní proces, například technologii vstřikování. Naopak v kusové výrobě či výrobě prototypů je 3D tisk vhodnější.

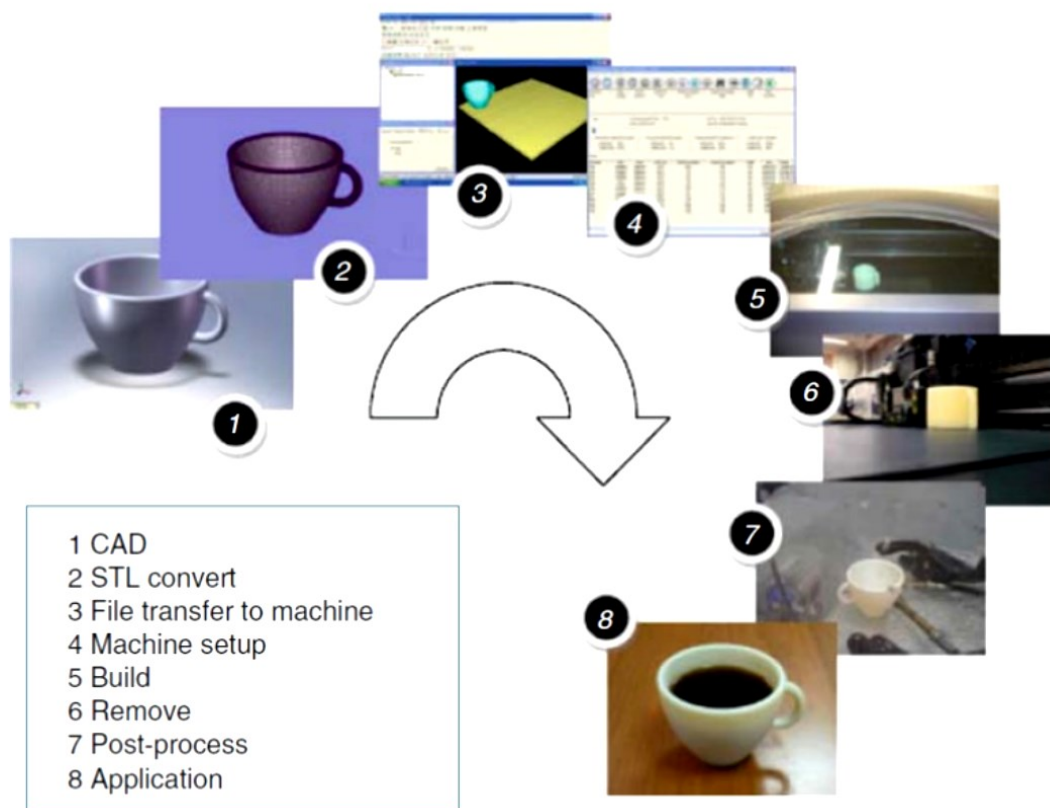
U metody FDM tisku závisí rychlost na požadované kvalitě tištěného objektu. Konkrétně záleží na tloušťce nanášené vrstvy. Čím je vyšší tloušťka vrstvy, tím je tisk rychlejší, ale kvalita a rozpoznání detailů se výrazně snižuje. Na obrázku 12 jsou zobrazena různá nastavení tloušťky vrstvy s přiblíženými pohledy. Zobrazené detaily zdůrazňují kvalitu rozlišení jednotlivých modelů. [1,7,13]



Obr. 12. Závislost rychlosti tisku na kvalitě povrchu modelu [13]

### 3 POSTUP TECHNOLOGIE 3D TISKU

Všechny tištěné součásti je nutné nejdříve zpracovat v CAD softwarech, které popisují jejich geometrii. Následuje převedení 3D modelu do potřebného souboru, podporujícího 3D tiskárnu. Dalším krokem ke zhotovení je transport souboru s nastavenými parametry tisku do tiskárny. Následuje nastavení tiskárny a její kalibrace a samotný proces vytvoření reálného modelu. Po dokončení tisku je model vyjmut z pracovního prostoru tiskárny a následuje očištění a samotná aplikace výrobku. Na obrázku 13 je znázorněn proces od návrhu v CAD softwaru až po samotnou aplikaci. [7]



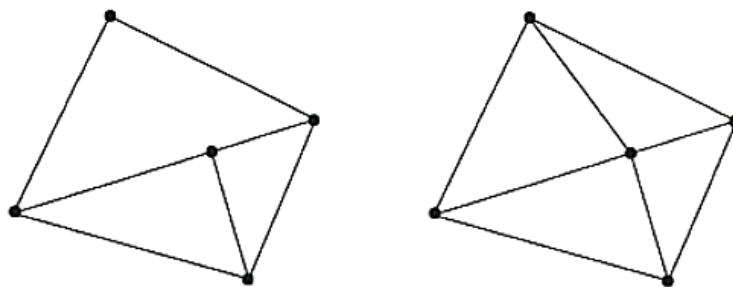
Obr. 13. Postup procesu 3D tisku [7]

#### 3.1 CAD

Je několik způsobů jak získat 3D model součásti, kterou chceme následně vytvořit pomocí technologie 3D tisku. Jedním, a to nejjednodušším ze způsobů je stažení modelu z internetových stránek v potřebném formátu. Další, kreativnější způsob je samotná tvorba modelu ve zmíněném CAD softwaru, díky kterému můžeme zhmotnit své myšlenky a následně je vytisknout na 3D tiskárně. Výstupem CAD softwaru je pak 3D model součásti, který dále použijeme. [1,16]

### 3.2 Soubor

Než můžeme 3D model vytisknout, potřebujeme soubor v příslušném formátu. Tento soubor udává co má vůbec tiskárna tisknout. V oboru 3D tisku je nejčastějším formátem STL. Tato zkratka znamená „STereoLitografie“. Tiskárny různých typů jsou podporovány a pracují s tímto formátem. STL soubor definuje prostorové body a propojuje tyto body do série trojúhelníků, které nazýváme „sítí“. Základním pravidlem při popisu povrchu je, aby trojúhelníky k sobě vždy přiléhaly vrcholy. Toto pravidlo ilustruje obr.14. [2,16]



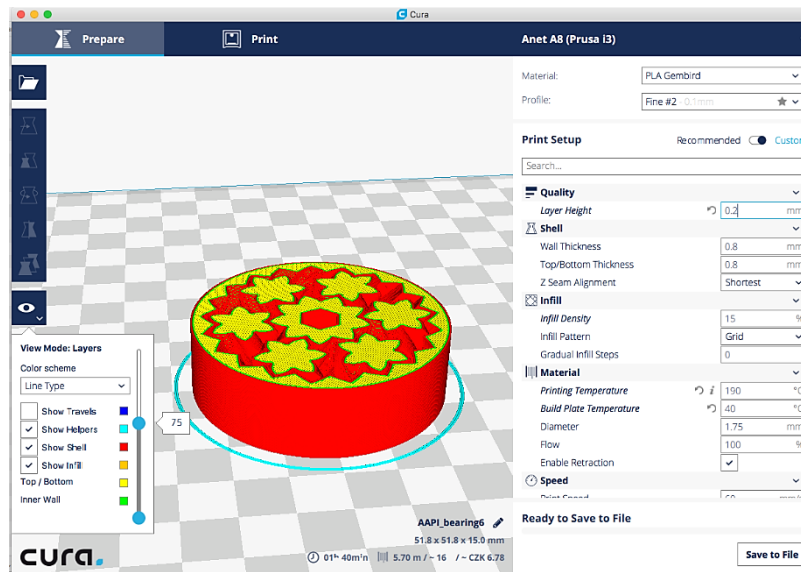
Obr. 14. Pravidlo vrcholů u STL souboru – vlevo špatně, vpravo správně [16]

### 3.3 Manipulace s STL souborem

STL soubor musí být převeden do softwaru podporujícího danou 3D tiskárnu. Zde se nastavují základní parametry uložení na tiskovou desku tiskárny. Nastavíme velikost objektu, polohu na desce a potřebnou orientaci. Jsou zde další dodatečné funkce, jako je možnost vytvoření řezu daným modelem, kdy jsme schopni model rozdělit na několik částí. Tato funkce je důležitá u rozměrnějších modelů, které se nevejdou do pracovního prostoru tiskárny. [1,7]

### 3.4 Nastavení procesu

Následujícím krokem po nastavení polohy 3D modelu je nastavení procesních parametrů a vlastností tištěného modelu. Je nutno nastavit parametry, související s vybraným materiálem, jako je teplota vytlačovací trysky, teplota tiskové desky a volba rychlosti vytlačování v daném rozmezí. Dalšími prioritními kroky jsou, volba tloušťky nanášené vrstvy materiálu, kvalita povrchu modelu nebo jeho vnitřní vyplnění. U tvarově složitých modelů je dále důležité nastavit tištění podpůrného materiálu. [1,7]

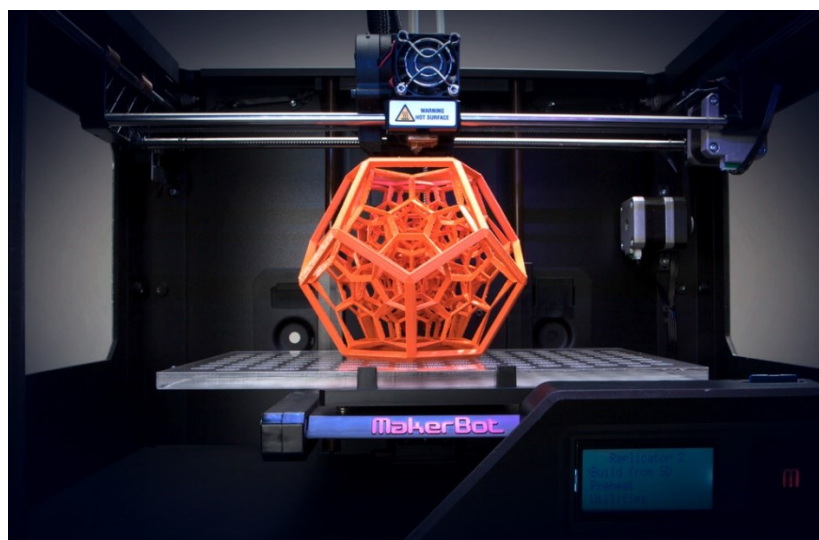


Obr. 15. Nastavení tisku Prusa i3 [13]

### 3.5 Proces 3D tisku

Po navržení 3D modelu s nastavenými podmínkami pro tisk v kompatibilním softwaru podporující daný stroj, následuje automatický proces. Při tomto procesu není potřeba kontroly. 3D tiskárna potřebuje pouze zdroj elektrické energie, místo kde pracuje, dostatek materiálu a čas na zhotovení reálného modelu.

Následuje pouze vyjmutí výrobku z tiskové desky, očištění, obrobení či dokončovací operace. Posledním krokem je samotná aplikace výrobku. [1,7]



Obr. 16. Proces 3D tisku [26]

## 4 ÚPRAVA POVRCHU A STRUKTURY TIŠTĚNÉHO VÝROBKU

Cílem úpravy povrchu tištěných výrobků je odstranění přechodů mezi jednotlivými vrstvami materiálu. Dále jde o docílení potřebných přesností a vzhledových vlastností jako například lesku díky leptání v acetonu. Mezi základní mechanické úpravy patří broušení a tryskání modelů. Nejvyužívanější chemická úprava je pak leptání, a to v podobě máčení v acetonové lázni nebo napařování v acetonových parách.

Dalšími možnostmi úprav modelu je například lepení při vzniku trhlin či úplnému oddělení materiálu nebo využití vkládání objektů v průběhu tisku, což vede k tvorbě kompozitních součástí. [17]

### 4.1 Broušení

Jedním z nejdostupnějších úprav povrchu tištěných objektů je broušení. Pro broušení se používají smirkové papíry nebo pásové brusky. Nevýhodou jsou komplikace s broušením geometricky složitých a malých dílů. Z hlediska časové náročnosti je tento proces obrobění vhodný pro kusovou či malosériovou výrobu. [17]

### 4.2 Tryskání

Tryskání, neboli pískování, je technologický postup, díky kterému se opracovává povrch různých, obvykle tvrdých materiálů. Opracování je způsobeno proudem jemných částic, tyto částice se nazývají abrazivní. Nejčastěji využívaným abrazivním materiálem jsou ocelové broky. Tento proces se využívá především k očištění výrobku, odstranění ořepů a nečistot.

Jsou dva způsoby jak dodat abrazivním částicím potřebnou rychlost, aby jejich využití bylo efektivní a aby bylo dosaženo požadovaného výsledku. První způsob je působení proudu jemných částic pomocí stlačeného vzduchu. Toto tryskání se nazývá tlakovzdušné. Druhým způsobem je využití metacích kol s lopatkami v uzavřené kabině. [28]

### 4.3 Leptání

Leptání je proces, kdy na daný model působí látka, která je rozpouštědlem použitého materiálu. Vlivem této látky jsme schopni vytvořit lesklý a sjednocený povrch modelu. Jednotlivé přechody mezi vrstvami materiálu zanikají. Splývají však také geometrické

detaily na modelu, což je velkou nevýhodou. Nejčastěji je leptán materiál ABS a jeho směs s jinými materiály. V případě ABS je rozpouštědlem aceton. Jsou dva způsoby leptání, a to leptání máčením a leptání v acetonových parách. [13,17]

Leptání máčením se provádí ponořením modelu do lázně s acetonem. Po několika sekundách následuje vyjmutí modelu z lázně. Vzhledem k tomu, že je model naleptán, nesmí se dostat do kontaktu s okolními objekty, po dobu vypřechání acetonu. Pověsí nebo se ustaví tak, aby se stýkal co nejmenší plochou potřebnou k ustavení modelu. Pro jednodušší uložení lze objekt máčet na dvakrát. Proces je možno opakovat dle potřeby. [13,17]



Obr. 17. Leptaný model (vlevo), neupravený model (vpravo) [18]

Napařování v acetonových parách je pomalejší a méně intenzivnější proces než přímý styk modelu s acetonovou lázní v případě máčení. Napařování se provádí v uzavřené komoře, s vanou ve spodní části a umístěním modelu v části horní. Při vypařování acetonu stoupají tyto páry vzhůru a leptají povrch modelu. Tento proces lze stejně jako máčení opakovat dle potřeby. [13,17]

#### 4.4 Opravy

Opravování modelů vytvořených 3D tiskem, souvisí s použitým materiálem výrobků. Mezi nejpoužívanější opravy patří lepení dvousložkovými lepidly, naleptání rozpouštědlem daného materiálu nebo opravy 3D pery. [13]

Například při opravách ABS lze opět využít jeho rozpouštědla. V případě lepení se naleptají styčné plochy modelu a přiloží se k sobě. V případě dostavby modelu lze rozpustit ABS strunu a nanést vrstvu materiálu na místo prohlubně, praskliny či jiné vady na modelu. Následně se povrch přebrousí.

Při opravě modelu lepením dvousložkovými lepidly je nutné zdrsňení povrchu styčných ploch modelu. Následuje nanesení lepidla a zajištění dílů proti pohybu. Je nutné dodržet dostatečnou dobu na ztuhnutí lepeného spoje.

Nejoriginálnějším způsobem je oprava modelu pomocí 3D pera. Velkou výhodou této technologie je, že na opravu modelu je možné použít přímo vlákno z cívky, která byla využita při tisku součásti. [13]

## 4.5 Insety

Další výhodou je možnost vložení jiných objektů do tištěné součásti v průběhu tisku. V nastavení tisku lze nastavit pozastavení v požadované vrstvě tisku, při které se tisk pozastaví a tryska odjede do počáteční polohy, odjíždí z důvodu snazšího přístupu k výrobku. V tomto okamžiku lze do rozpracované součásti vložit například matici, nebo jiný vybraný objekt z různého materiálu. Inset musí být uložen tak, aby nenarušil tištěnou součást a aby v průběhu dokončení tisku nedošlo ke kolizi mezi pohybující se tryskou a vloženým tělesem. Je důležité brát ohled na materiál vkládaného tělesa, vzhledem k teplotě trysky. Lze takto tvořit nerozebíratelnou soustavu například kov-plast. [13]



Obr. 18. Vložení matice [13]

## 5 TECHNOLOGICKÁ OMEZENÍ 3D TIŠTĚNÝCH SOUČÁSTÍ

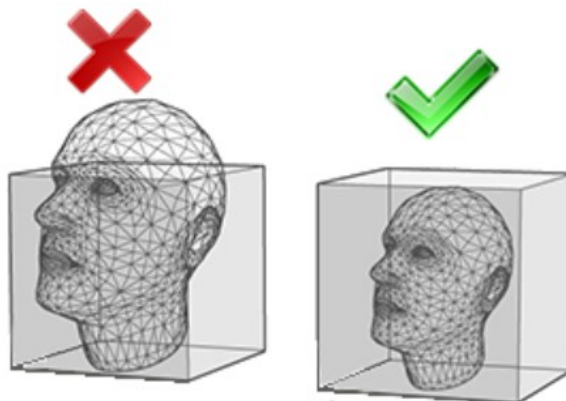
Při procesu 3D tisku musíme dbát na několik technologických parametrů, které mohou ovlivnit výslednou strukturu tištěného modelu či jeho tvar. Před zahájením tisku je potřeba dbát na následující vlivy a vyvarovat se odchylkám mezi vytvořenou součástí v CAD softwaru a reálně vytištěným modelem. Jednotlivé vlivy a omezení si následně popíšeme. [7,29]

### 5.1 Vliv minimální vzdálenosti mezi sousedními stěnami

Vzdálenost mezi sousedními stěnami je důležitá hlavně z hlediska tištění mechanických součástí. Tyto součásti se po vyjmutí z prostoru pracovní plochy 3D tiskárny a popřípadě po odstranění podpůrného materiálu vůči sobě pohybují. Jedná-li se o metodu FDM, může se stát, že při pohybu trysky dochází k tažení vláken materiálu mezi jednotlivými stěnami a tím vzniká spojení stěn, které by se měly vůči sobě pohybovat. [29,30]

### 5.2 Velikost objektu

Maximální velikost objektu udává pracovní prostor 3D tiskárny. Tento prostor je omezen velikostí tiskové desky v ose x a y. V ose z je prostor omezen umístěním extrudéru a výškovým posuvem tiskové desky. Minimální velikost objektu je dána tiskárnou a použitým materiálem. [12]



Obr. 19. Maximální velikost objektu [26]

### 5.3 Podpůrný materiál

Při tisku modelů mohou vzniknout zvláštní případy, kdy je potřeba využití podpůrného materiálu. Je-li tvar tištěného modelu rozšiřující se pod příliš velkým úhlem, převis materiálu



je moc velký a může dojít k nerovnoměrné struktuře či zhroucení modelu. Obecně platí, že se podpůrný materiál využívá do úhlu menšího jak  $45^\circ$ . Závisí však také na tloušťce nanášené vrstvy. [7,12]



Obr. 20. Odstranění podpor [20]

Podpory jsou tvořeny tak, aby bylo snadné jejich odstranění. Z tohoto důvodu nemají takovou hustotu vnitřní výplně jako model sám. Velkou nevýhodou podpor jsou malé povrchové vady na modelu, které vznikají při jejich odstranění. Tyto vady nelze vždy úplně odstranit. [12]

#### 5.4 Smrštění materiálu

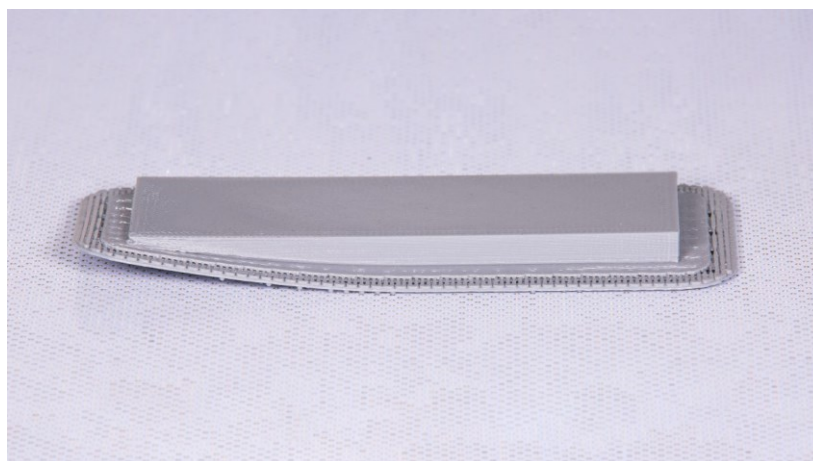
Velikost smrštění materiálu může mít značný vliv na tvarovou a rozměrovou přesnost tištěného modelu. Velikost smrštění ovlivňuje několik parametrů. Abychom docílili úspěšného výtisku, je nutné na tyto parametry myslet. Přizpůsobíme-li výběr správného stroje, nastavení procesu výroby a materiál výrobku, velikost smrštění může být nepatrné. [12,21]

Velikost smrštění může být ovlivněna:

- Vyhříváním tiskové podložky - tisková podložka by měla mít po celé ploše konstantní teplotu. Bohužel ve většině případů je nejvyšší teplota uprostřed podložky. Čím blíže ke kraji tiskneme, tím více se teplota snižuje.
- Typ 3D tiskárny - na velikost smrštění má důrazný vliv konstrukce tiskárny. A to z hlediska uzavřeného či otevřeného pracovního prostoru. Tiskárny s uzavřeným pracovním prostorem pomocí krytů, lépe udržují zabraňují větším výkyvům teplot vlivem působení okolí.

- Složení materiálu - částečně krystalické termoplasty mají větší hodnoty smrštění než termoplasty amorfni.
- Velikost tištěného objektu - při modelech o větším objemu dochází k většímu smrštění. Při plochách, zakrývajících většinu tiskové desky, může docházet k odlepení modelu. [7,12,21]

Důsledky smrštění se projevují například odlepením a zkroucením modelu na tiskové desce, čímž vznikají tvarové deformace a rozměrové nepřesnosti viz obrázek 14. [21]



Obr. 21. Zkroucení modelu na tiskové desce [20]

## 5.5 Kalibrace 3D tiskárny (tiskové podložky)

Před zahájením tisku, je nutné provést kalibraci tiskové desky. Kalibraci je důležité provést za účelem změření a korekce zkosení tiskové desky (os X/Y). Dále je důležité změřit pozice kalibračních bodů tiskové desky. Kalibrace se provádí automaticky, při zjištění odchylek se koriguje pomocí několika stavěcích šroubů. [2,12]

## 5.6 Tuhost uložení 3D tiskárny

Extrudér, pohybující se v ose X a Y, vyvolává kmity. Abychom předešli rozměrovým nepřesnostem je vhodné, aby rám 3D tiskárny byl uložen na místě, kde tyto kmity nezpůsobí rozpořbování celého stroje. [19]

## 5.7 Opatřbení a údržba vodících tyčí

Při nedostatečné údržbě vodících částí 3D tiskárny může dojít k omezení pohybu extrudéru, či k jeho zaseknutí. Proto po několika stovkách hodin tisku je vhodné vodící tyče očistit od prachu a následně je nutné jejich promazání. [19]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce bylo stanovit modelovací vůle při tvorbě sestav na FDM 3D tiskárně. Pro kinematickou studii byl zvolen nerozebíratelný kulový spoj. Modelovací vůle by měly být doporučenými hodnotami při návrhu nerozebíratelných spojů či mechanismů. Správnost návrhu vede k úspoře materiálu a času při tvorbě sestav.

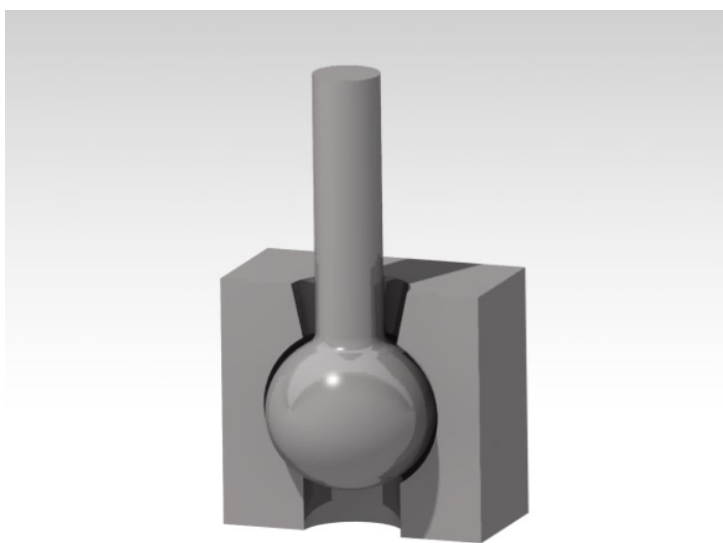
Návrh modelů byl vytvořen v softwaru Catia V5R19 a pro nastavení tisku bylo využito softwaru Z-Suite. Statistická část byla vyhodnocena v programu Minitab 17 a QC Expert.

Praktická část obsahuje:

- návrh 3D tištěných spojení pro kinematickou studii
- stanovení konstrukčních vůlí
- stanovení modelovacích zásad tvoření sestav pro FDM 3D tisk
- ověření navrženého konstrukčního řešení.

## 7 MECHANICKÉ SPOJENÍ

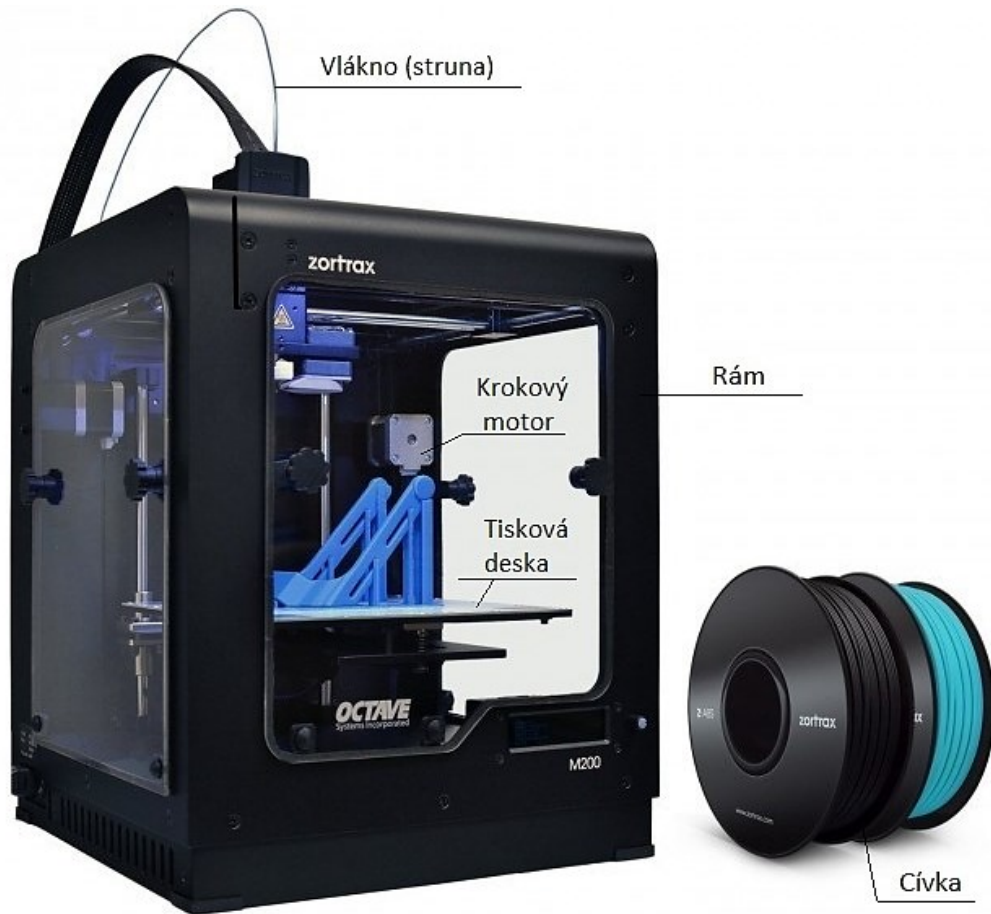
Pro kinematickou studii byl zvolen kulový spoj. Tento spoj je nerozebíratelný. Vzhledem k jeho konstrukci obsahuje širokou škálu úhlů, kde může docházet k nepřesnostem. Kostka zkušebního tělíska je o rozměrech (16 x 16 x 16) mm a o hmotnosti necelých 4 g. V této krychli se nachází kulová dutina se dvěma otvory. V horní části je otvor kuželovitého tvaru, kterým vede druhá část zkušebního tělesa, a to konkrétně rameno, jímž je zkoušena pohyblivost tohoto systému. Na spodní straně je potom kruhový otvor pro návrh podpůrného materiálu.



Obr. 22. Kulový spoj v řezu

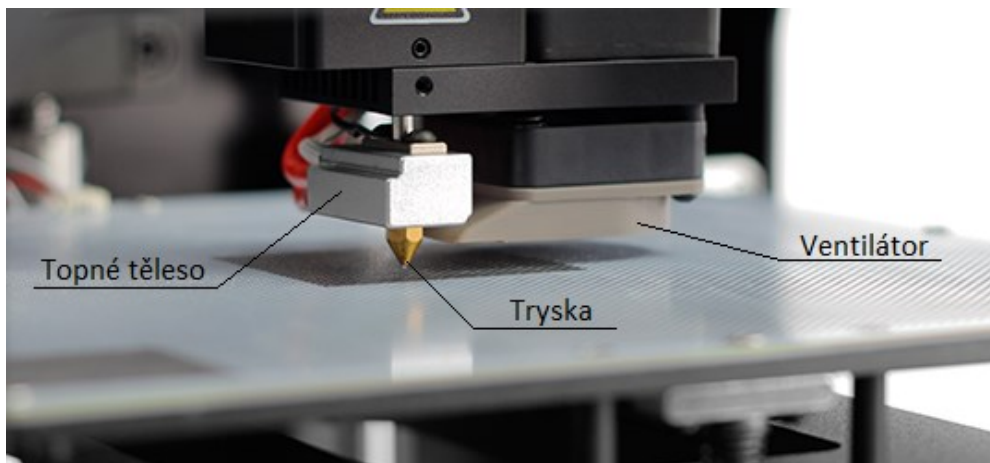
### 7.1 Stroj

Pro výrobu zkušebních tělísek byla vybrána 3D tiskárna od výrobce Zortrax se značením M200. Jedná se o tiskárnu s tuhovou kovovou konstrukcí a vysokou přesností výroby. Tento stroj s technologií Layer Plastic Deposition umožňuje při tisku použití různých materiálů s odlišnými fyzikálními vlastnostmi. Podporovaný rozměr struny s materiálem je 1,75 mm. Při využití podpůrného materiálu je materiál podpor stejný jako materiál modelu. Vnitřní průměr trysky, kterou je materiál vytlačován je 0,4 mm. Teplotní parametry jsou znázorněny v tab. 1 a základní části tiskárny jsou zobrazeny na obr. 23.



Obr. 23. Tiskárna Zortrax M200 [20]

Velkou výhodou oproti ostatním tiskárnám je zde vyhřívaná pórovitá tisková deska o rozměrech (200 x 200 x 180) mm, která zajišťuje přilnavost tisknutého výrobku. Dalším faktorem, ovlivňujícím přesnost výroby je uzavřený pracovní prostor tiskárny, čímž se předchází vyšším výkyvům teploty, jež by mohly zapříčinit odchylky od požadované přesnosti.



Obr. 24. Vyhřívaná deska s popisem částí tiskové hlavy [20]

Topné těleso vyhřívá trysku na potřebnou teplotu danou použitým materiálem. Po vytlačení materiálu na tiskovou desku následuje ochlazování vrstvy materiálu pomocí ventilátoru. Nejintenzivnější chlazení je především u vyšších objektů s malým průřezem v ose x a y.

Tab. 1. Teplotní parametry tiskárny Zortrax M200

<b>Maximální teplota tisku (extrudéru)</b>
290 °C
<b>Tisková deska</b>
vyhřívána
<b>Maximální teplota tiskové desky</b>
105 °C
<b>Teplota okolí temperature</b>
20 - 30 °C
<b>Skladovací teplota</b>
0 - 35 °C

## 7.2 Použité materiály

Výroba kulových spojů byla provedena za pomoci tří materiálů. A to materiálu Z-ULTRAT, Z-HIPS a materiálu Timberfill. Materiály Z-ULTRAT a Z-HIPS jsou originálními materiály, doporučené výrobcem 3D tiskárny Zortrax M200, zatímco materiál Timberfill je od jiného výrobce značky Fillamentum. Každý z těchto materiálů má rozdílné fyzikální a mechanické vlastnosti, díky kterým nabízí širokou škálu použití.

### 7.2.1 Materiál Z-ULTRAT

Z-ULTRAT je originální materiál, doporučený výrobcem. Je to materiál akrylonitril-butadienstyren (ABS) s několika procenty polykarbonátu (PC). Je vhodný především pro výrobu konstrukčních dílů či mechanicky namáhaných součástí. Má vysokou houževnatost, pevnost a tvrdost. Vzhledem k obsahu ABS je jeho rozpouštědlem aceton. Procesní parametry materiálu jsou znázorněny v tab. 2. Materiálový list Z-ULTRAT viz příloha č. 2.

Tab. 2. Materiálové parametry Z-ULTRAT [20]

Hustota: 1080 kg/m <sup>3</sup>
Teplota extrudéru: 255 až 270 °C
Teplota tiskové desky: 100 až 120 °C
Rychlost tisku: 30 mm/s

### 7.2.2 Materiál Z-HIPS

Z-HIPS je vysoko-hustotní polystyren od stejného výrobce jako materiál Z-ULRTAR. Je to termoplast, polystyren s přidavkem kaučuku. Vyrábí se polymerací styrenu v přítomnosti 5 - 10 % kaučuku nebo kopolymeru butadienu do polystyrenové matrice. Díky obsahu kaučukové složky je snížena křehkost polystyrenu.

Jak už plyne z názvu, materiál je velmi houževnatý, pevný a má dobrou teplotní stálost. Z-HIPS je dobře obrobitelný a odolává většině běžných rozpouštědel kromě d-limonenu. Na rozdíl od jiných materiálů jako je například ABS, má Z-HIPS daleko menší tepelné smrštění. Procesní parametry materiálu jsou znázorněny v Tab. 3. Materiálový list Z-HIPS viz příloha č. 2.

Tab. 3. Materiálové parametry Z-HIPS [20]

Hustota: 1040 kg/m <sup>3</sup>
Teplota extrudéru: 220 až 240 °C
Teplota tiskové desky: 100 až 120 °C
Rychlost tisku: 30 mm/s



Obr. 25. Originální cívky s materiály od výrobce Zortrax, materiál Z-ULTRAT (vlevo) a materiál Z-HIPS (vpravo) [20]



### 7.2.3 Materiál Timberfill

Timberfill je jako jediný neoriginální materiál od jiného výrobce. Výrobce je společnost Fillamentum. Vláknem je směs z recyklovaného dřeva s polymerem na bázi PLA. Je to biopolymer s obsahem 15 % přírodních vláken. Obsahuje různé biopolymery: polyhydroxyalkanoát, polyester, kyselinu polymléčnou, polykaprolakton, lignin, škrob, celulózu, organická aditiva, vosky, přírodní pryskyřice, přírodní vlákna.



Obr. 26. Cívka s materiálem Timberfill od výrobce Fillamentum [32]

Je 100 % bio-based, biodegradabilní, zpracovatelný běžnými technologiemi s výbornými vlastnostmi. Jeho vzhled a vlastnosti napodobují materiál dřeva.. Zbarvení objektů je závislé na teplotě tisku. Čím vyšší je teplota, tím tmavší odstín materiál modelu má. Procesní parametry materiálu jsou znázorněny v tab. 4. Materiálový list Timberfill viz příloha č. 3.

Tab. 4. Materiálové parametry Timberfill [32]

Hustota materiálu: 1280 kg/m <sup>3</sup>
Teplota extrudéru: 170 až 185 °C
Teplota podložky: 40 až 50 °C
Rychlost tisku: 20 až 30 mm/s

## 8 NÁVRH KULOVÉHO SPOJENÍ

Při návrhu nerozebíratelných spojů a sestav je nutné dbát na modelovací zásady. Tyto zásady vedou k požadované přesnosti a funkčnosti spojů. Další vliv na přesnost výroby mají také technologické aspekty, popsány v podkapitole 8.1.

3D návrh mechanického spojení byl vytvořen pomocí programu Catia V5R19. Model byl zkonvertován do souboru STL, podporujícího software Z-Suite v němž byly nastaveny parametry tisku kulového spoje. Tento software je navržen výrobcí samotného stroje, na kterém byly jednotlivé vzorky zhotoveny.

### 8.1 Technologické aspekty ovlivňující výrobu spojů a sestav

Na přesnost mechanických spojení působí spousta vlivů. Aby byl kulový spoj či daný mechanismus co nejpřesnější, byl kladen důraz na technologické aspekty, ovlivňující výrobu spojů a sestav. Tyto spojení se po vyjmutí z prostoru pracovní plochy 3D tiskárny a po odstranění podpůrného materiálu, vůči sobě pohybují a jsou nerozebíratelné.

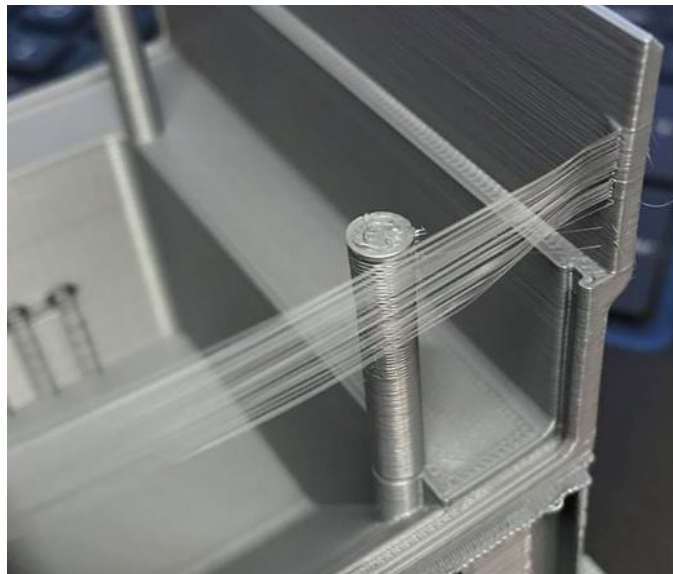
Do technologických aspektů ovlivňujících výrobu spoje, spadá správná kalibrace polohy tiskové desky, kdy je důležité mít desku v rovině, aby nedocházelo k nepřesnostem. U tiskárny Zortrax M200 byla kalibrace provedena automaticky. Při větší výchylce bylo možné desku vyrovnat pomocí tří stavěcích šroubů, což nebylo nutné.



Obr. 27. Autokalibrace 3D tiskárny Zortrax M200

Výroba kulových spojů byla provedena v uzavřeném pracovním prostoru tiskárny. Díky uzavřenému prostoru uniká minimum tepla a materiály nejsou tak náchylné na smršnění. To se týkalo hlavně materiálu Z-ULTRAT. Tento materiál je převážnou částí tvořen z materiálu ABS, který je na smršnění náchylný. Procesní parametry tisku u jednotlivých vzorků byly nastaveny vzhledem k použitému materiálu, dle doporučení výrobce Zortrax a Fillamentum.

U metody FDM, vzniká další nepříznivý jev, jež může ovlivňovat výslednou přesnost spoje. Při pohybu trysky dochází k občasnému tažení vláken materiálu mezi jednotlivými protilehlými stěnami a tím vzniká spojení těchto stěn, které by se měly vůči sobě pohybovat. Tento aspekt nelze vyobrazit na nerozebíratelném spoji, proto byl zvolen odlišný model součásti, kde je tento nepříznivý jev viditelný, viz obr. 28.



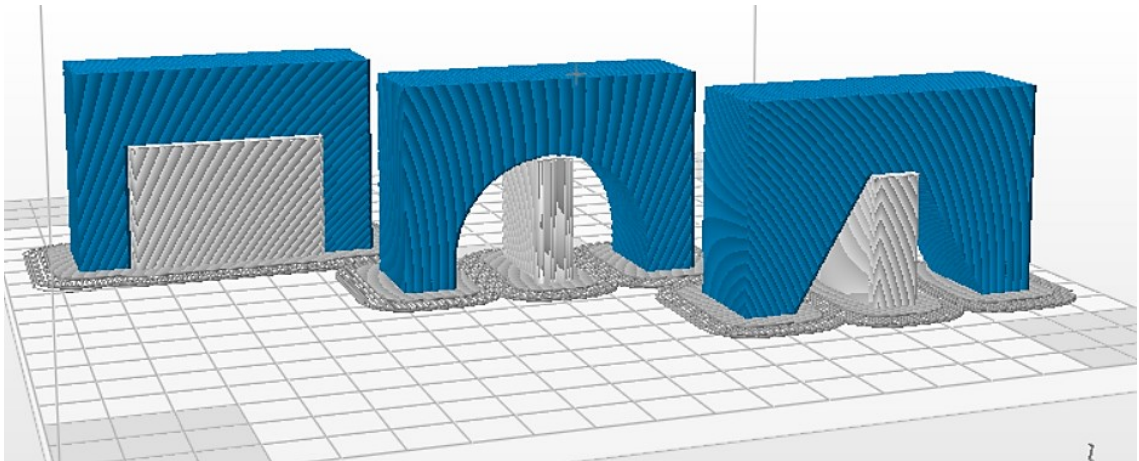
Obr. 28. Tažení vláken materiálu

## 8.2 Zásady pro modelování spojení a sestav

V návaznosti na zmíněné technologické aspekty, ovlivňující přesnost výroby mechanických spojení, je nejdůležitějším faktorem ovlivňující požadovanou funkci právě samotná konstrukce a návrh nerozebíratelného spoje. Tyto modelovací vůle mezi dvěma objekty byly navrženy tak, aby jejich hodnota obsahovala součet všech nepřesností, vzniklých nepříznivými jevy. Pokud je tato podmínka splněna, tak spojení plní požadovaný rozsah pohybu.

Dalším z důležitých faktorů je umístění podpurného materiálu. Vzhledem ke složitosti sestav či jednotlivých spojení byly vygenerovány podpory. Tyto podpory lze mechanicky oddělit od vtištěných objektů. Sestava byla vymodelována tak, aby podpurný materiál zasahoval pouze v prostoru kde jej lze odstranit.

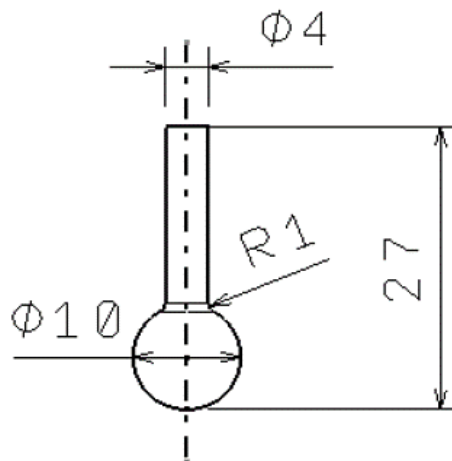
Nastavení podpor lze korigovat konstrukcí modelu, například vytvořením zaoblení, či skosením hran. Pro názornější zobrazení byly vytvořeny vzorové příklady kompenzace generování podpor viz obr. 29.



Obr. 29. Příklad úpravy modelu: neupravený model (vlevo), model se zaoblením (uprostřed), model se skosením (vpravo)

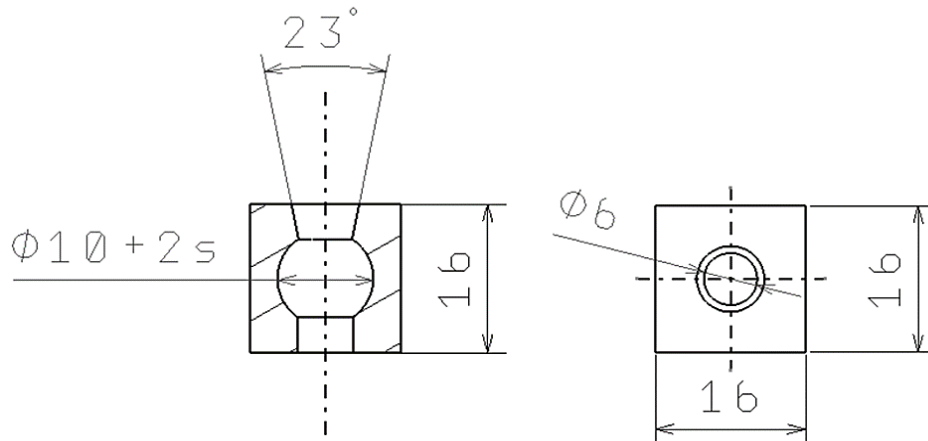
### 8.3 Návrh modelu kulového spojení

Vzhledem k jeho konstrukci obsahuje širokou škálu úhlů, kde může docházet k nepřesnostem. Proto byl kulový spoj zvolen jako vzorek pro kinematickou studii. Tento spoj je nerozebíratelný. Byla vytvořena sestava kulového čepu s krychlí opatřenou kulovou dutinou se dvěma otvory. Kulový čep je veden otvorem kuželovitého tvaru v horní části krychle. Na spodní straně krychle je potom kruhový otvor pro návrh podpůrného materiálu.



Obr. 30. Návrh kulového čepu

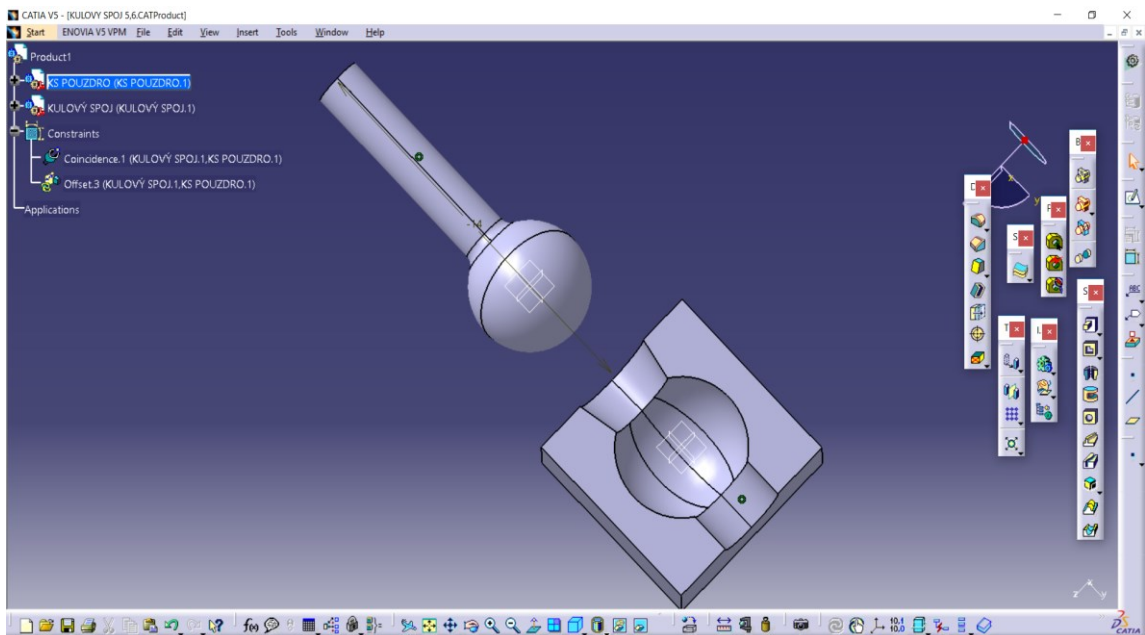
Na obr. 31 u zakótování kulového otvoru o průměru 10 mm je dále zobrazena hodnota  $2s$ , což je na průměru dvakrát hodnota zvolené konstrukční vůle, neboli vzdálenosti mezi stěnami.



Obr. 31. Náčrtek kostky s kulovým otvorem – řez kostkou (vlevo), pohled shora (vpravo)

### Software CATIA V5R19

CATIA (*Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application*) je software francouzské firmy Dassault Systèmes, který patří mezi nejpokročilejší konstruktérsko-analytické programy dnešní doby. Skládá se z mnoha modulů, od vlastní konstrukce, přes různé simulace a analýzy, až po tvorbu výkresové dokumentace. Systém Catia je nejvíce rozšířený v automobilovém průmyslu, letectví a spotřebním průmyslu. Na obr. 32 je zobrazeno prostředí softwaru s kulovým spojem před vytvořením vazby, která vede k tvorbě nerozebíratelné sestavy.

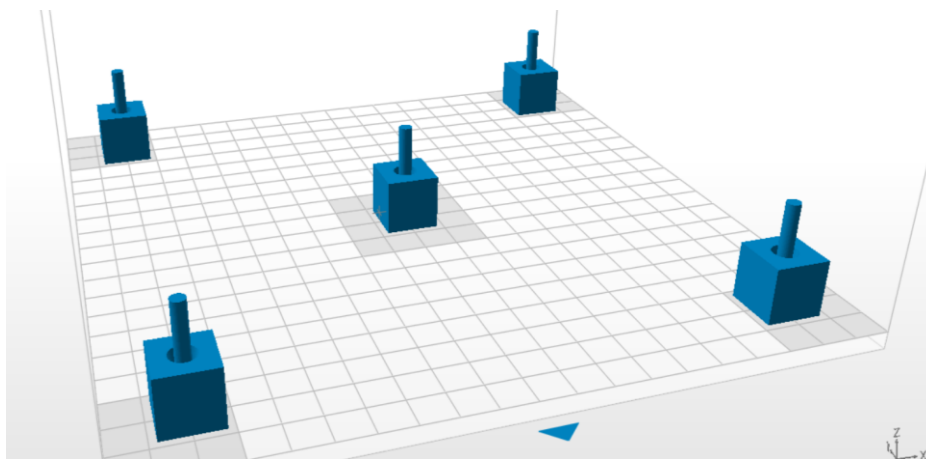


Obr. 32. Prostředí softwaru Catia V5R19

## 8.4 Nastavení tisku v softwaru Z-Suite

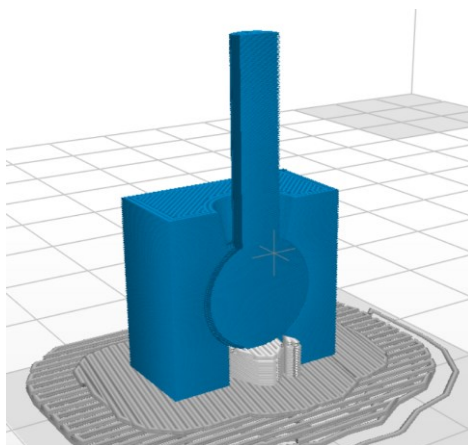
Nastavení polohy 3D modelu, nastavení parametrů souvisejících s vybraným materiálem, volba tloušťky nanášené vrstvy, kvalita povrchu modelu, jeho vnitřní vyplnění a generování podpůrného materiálu byly nastaveny v softwaru Z-Suite. Tento software je doporučený výrobcem Zortrax.

Všechny vzorky kulového spojení byly nejprve uloženy a tištěny uprostřed tiskové desky pro dosažení nejvyšší přesnosti polohování tištěné součásti. Aby se eliminovaly chyby vzniklé možnými nepřesnostmi v krajních polohách tiskové desky, byly spoje také uloženy a tištěny v polohách viz obr. 33.



Obr. 33. Uložení ve střední poloze tiskové desky a v polohách krajních

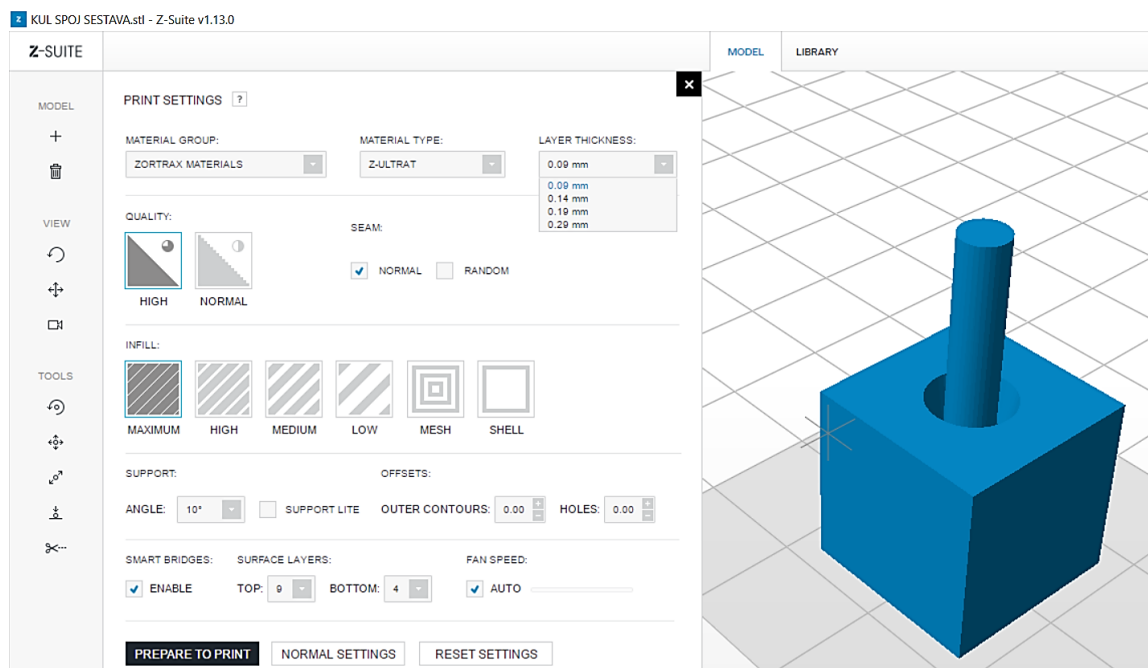
Vzhledem ke konstrukci kulového spoje bylo nutno využít podpůrného materiálu. Tyto podpory byly automaticky vygenerovány po zadání úhlu stoupání, který je nastaven do úhlu stoupání  $10^\circ$ . Podpory se nachází pouze ve spodní části spoje, v otvoru navrženém pro jejich umístění. Toto umístění je zobrazeno na řezu kulovým spojem na obr. 34.



Obr. 34. Kulový spoj v řezu – umístění podpor

### 8.4.1 Nastavení tisku u kulového spoje z materiálu Z-ULTRAT

Na obr. 35 je zobrazeno prostředí softwaru s konkrétním nastavením vzorku z materiálu Z-ULTRAT. Byl nastaven požadovaný materiál a byla zvolena tloušťka nanášené vrstvy, která je v tomto případě na hodnotě 0,09 mm.

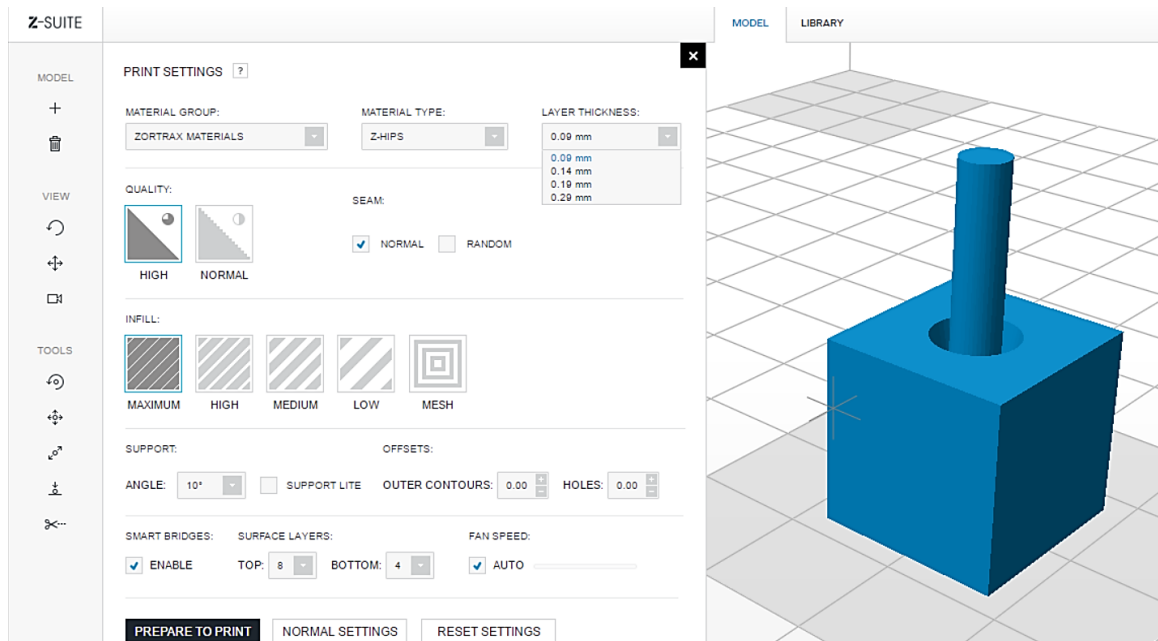


Obr. 35. Nastavení tisku kulového spoje z materiálu Z-Ultrat

Dalším krokem bylo nastavení vysoké kvality tisku, maximální vnitřní výplň objektu a také nastavení podpurného materiálu tak, aby se vygeneroval pouze do úhlu  $10^\circ$ . Nastavení všech zkušebních tělísek s danými vzdálenostmi mezi stěnami (konstrukčními vřely) z materiálu Z-ULTRAT se potom lišilo pouze tloušťkou nanášené vrstvy.

### 8.4.2 Nastavení tisku u kulového spoje z materiálu Z-HIPS

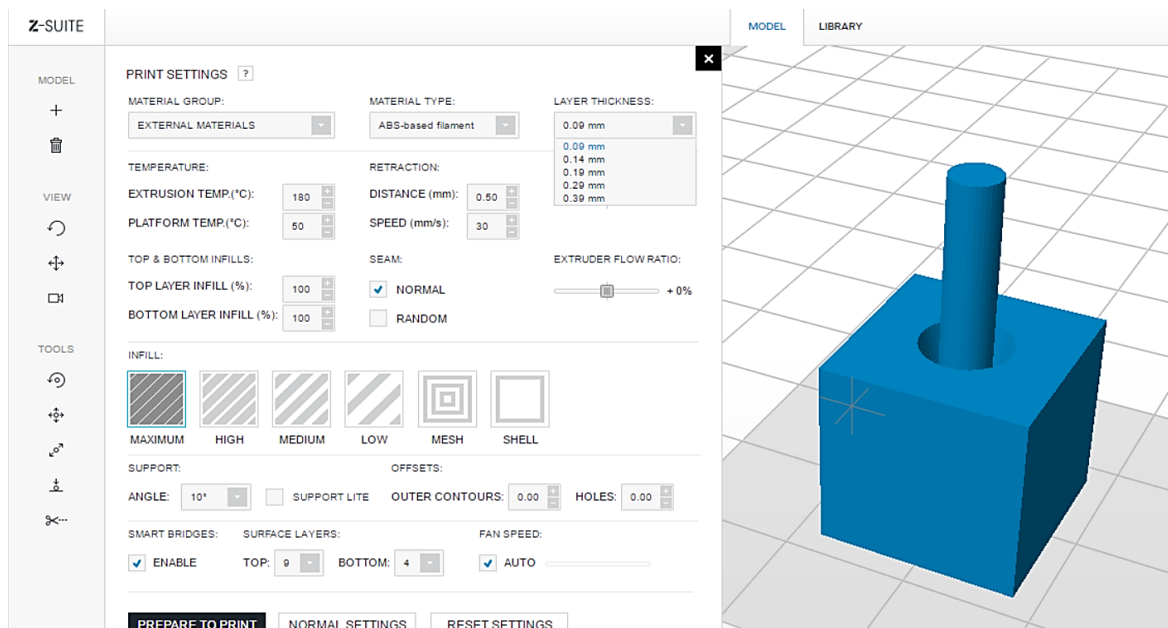
Z obr. 36 je zřetelné, že jedinou změnou v nastavení je pouze volba materiálu. A to konkrétně z materiálu Z-ULTRAT na materiál Z-HIPS. Jinak platí stejné pravidlo jako v předchozím případě, kdy se v nastavení všech zkušebních tělísek o daných vzdálenostech mezi stěnami z materiálu Z-HIPS, měnila pouze tloušťka nanášené vrstvy.



Obr. 36. Nastavení tisku kulového spoje z materiálu Z-HIPS

### 8.4.3 Nastavení tisku u kulového spoje z materiálu Timberfill

Posledním zkoumaným materiálem byl materiál Timberfill. Tento materiál je jako jediný od jiného výrobce než Zortrax. Proto jsou parametry tisku nastaveny podrobněji. Kolonka s názvem MATERIAL TYPE ztrácí svou důležitost. Každá podmínka, či nastavení procesních parametrů byly upraveny dle doporučených nastavení výrobce materiálu Timberfill. Jednotlivé nastavení procesních podmínek bylo doporučeno výrobcem Filamentum.



Obr. 37. Nastavení tisku kulového spoje z materiálu Timberfill



## 9 VÝSLEDKY A DISKUZE

Tato kapitola je rozdělena na 3 části. První částí je vyhodnocení přesnosti tisku tiskárny Zortrax M200. Dalším krokem je vyhodnocení kinematiky kulových spojů. A v poslední části je ověřeno nastavení tisku a návrh konstrukčních vůlí pomocí sestav kuličkových ložisek.

### 9.1 Přesnost tisku u tiskárny Zortrax M200

Aby došlo k potřebnému rozpořívování nerozebíratelných součástí a k návrhu optimální konstrukční vůle, je nutné k jejich zhotovení zjistit, s jakou přesností daný stroj tiskne. Z tohoto důvodu bylo nutné ověřit přesnost tisku před samotným návrhem spoje.

Měřenou součástí byla kostka kulového spoje viz obr. 30. Hodnoty byly naměřeny a byla vyhodnocena jejich rozměrová přesnost v osách (x, y, z) s rozdílným nastavením tloušťky vrstvy u tří zvolených materiálů.

#### 9.1.1 Měřidlo a podmínky měření

Všechny činnosti prováděné měřícím přístrojem byly v souladu se zákonem o metrologii. Měřidlo bylo akreditováno a kalibrováno. Měřícím přístrojem bylo digitální posuvné měřidlo s těmito parametry:

Výrobce: Mitutoyo

Rozsah měření: 0 – 150 mm

Rozlišitelnost: 0,01 mm

Nejistota měření:  $U = (0,015 + 0,015L)$  mm; L = jmenovitá délka v m

Kalibrováno: 9/2017 s platností do 9/2019



Obr. 38. Digitální posuvné měřidlo

Přesnost měření v oblasti délek úzce souvisí s klimatickými podmínkami v pracovních prostorách měření. Měření proběhlo v bezprašném prostředí za těchto podmínek:

Teplota okolí: 20 °C

Vlhkost vzduchu: 52 %

Tlak: 1070 hPa

### 9.1.2 Vzorové vyhodnocení

Všechny naměřené soubory dat byly vyhodnoceny stejným postupem jako vzorový příklad u materiálu Z-ULTRAT, viz níže. Vyhodnocení bylo zhotoveno za pomoci softwaru Minitab 17 a výsledky byly ověřeny v softwaru QC Expert.

Tab. 5. Naměřené hodnoty materiálu Z-ULTRAT v ose X s tloušťkou nanášené vrstvy 0,09 mm

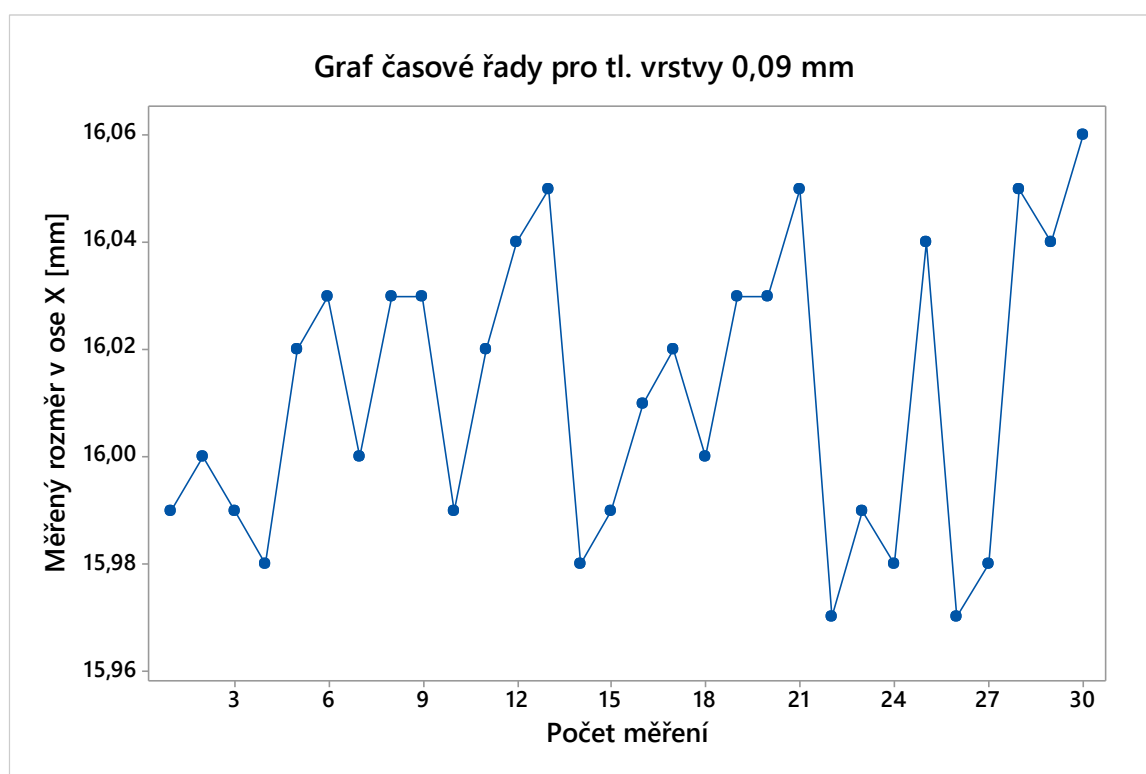
Materiál Z-Ultrat osa X			
Počet měření	Tloušťka vrstvy 0,09 [mm]	Počet měření	Tloušťka vrstvy 0,09 [mm]
1	15,99	16	16,01
2	16,00	17	16,02
3	15,99	18	16,00
4	15,98	19	16,03
5	16,02	20	16,03
6	16,03	21	16,05
7	16,00	22	15,97
8	16,03	23	15,99
9	16,03	24	15,98
10	15,99	25	16,04
11	16,02	26	15,97
12	16,04	27	15,98
13	16,05	28	16,05
14	15,98	29	16,04
15	15,99	30	16,06

Prvním krokem bylo vyhodnocení základní statistiky z 30 naměřených hodnot. Pomocí funkce Display Descriptive Statistics byly vypočteny parametry jako je odhad aritmetického průměru, směrodatná odchylka od aritmetického průměru, minimum, maximum, šikmost a špičatost souboru naměřených hodnot. Jedním z výpočtů byl i výpočet variačního koeficientu, který posuzuje kvalitu dat. Vyhodnocení základní statistiky je zobrazeno v tab. 6.

Tab. 6. Vyhodnocení základní statistiky

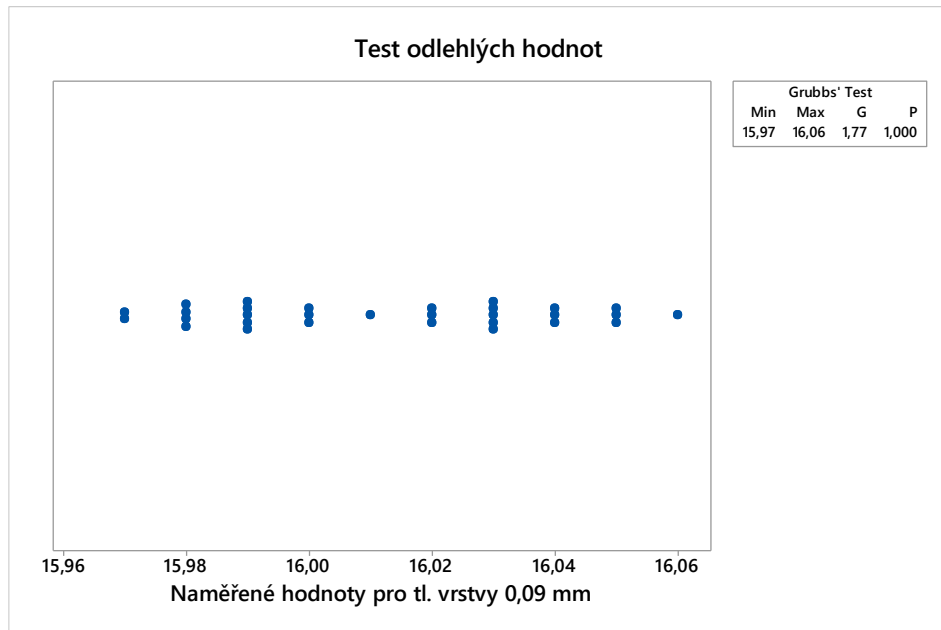
Tloušťka vrstvy 0,09 mm pro osu X	
Počet měření [-]	30
Ar. Průměr [mm]	16,012
Sm. odchylka [mm]	0,027
Šikmost [-]	0,06
Špičatost [-]	-1,32
Median [mm]	16,015
Minimum [mm]	15,97
Maximum [mm]	16,06
Variační koeficient [-]	0,17

Po těchto výpočtech byla využita funkce Time Series Plot, z které lze odvodit výskyt možných systematických chyb. Z grafu viz obr. 39 je patrné, že data nejsou zatížena systematickou chybou.



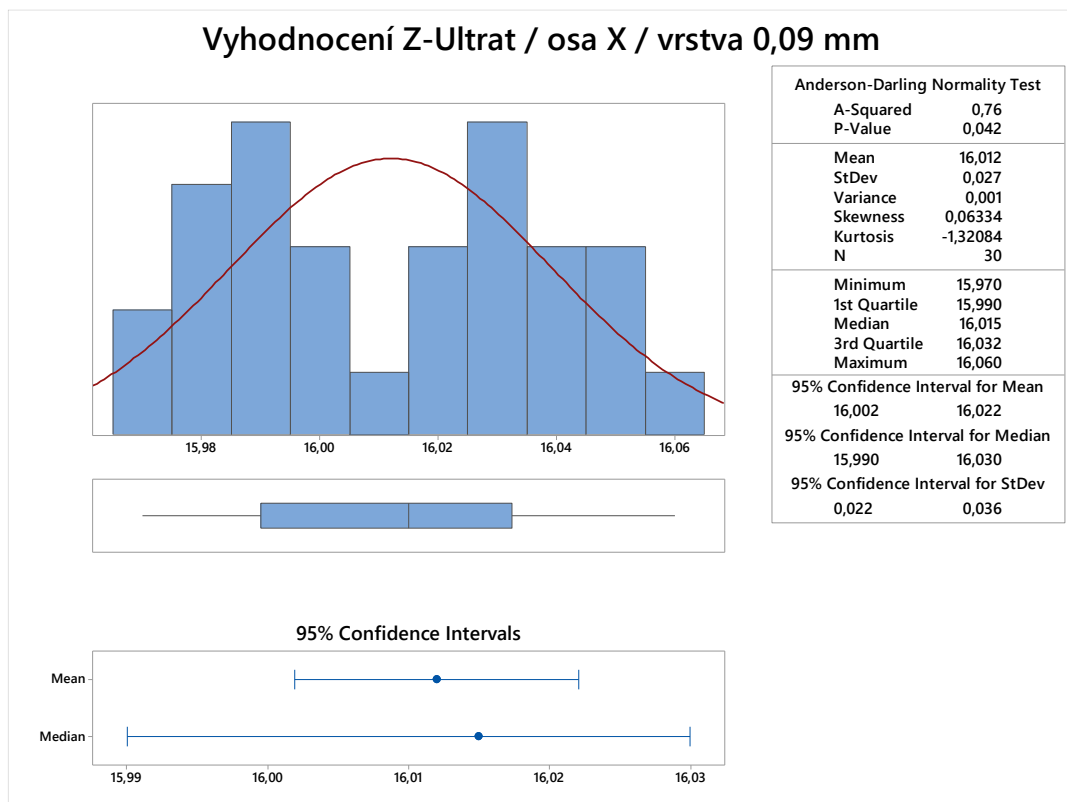
Obr. 39. Graf časové řady materiálu Z-ULTRAT v ose X při tloušťce vrstvy 0,09 mm

Dalším krokem byla detekce hrubých chyb, jež by mohly nepříznivě ovlivňovat soubor naměřených hodnot. Odlehlé hodnoty byly zkoumány pomocí funkce Outlayer Test, kde byly otestovány podle Grubbsova testu. Pomocí této statistické metody byly zobrazeny naměřené hodnoty v bodech. V momentě výskytu hrubé chyby je tato hodnota zobrazena červeně. Z grafu viz obr. 40 je patrné, že soubor neobsahuje žádné hrubé chyby, tzv. outlary.



Obr. 40. Grubbsův test na odlehlé hodnoty

Následovala funkce s názvem Graphical Summary, kde byly opětovně spočteny některé z parametrů základní statistiky, ale především byly zobrazeny grafy jako sloupcový graf (histogram) a box-plotový diagram. Box-plotový diagram ukazuje rozptyly souboru v jednotlivých částech a také zobrazuje výskyt odlehlých hodnot.



Obr. 41. Celkový report naměřených hodnot

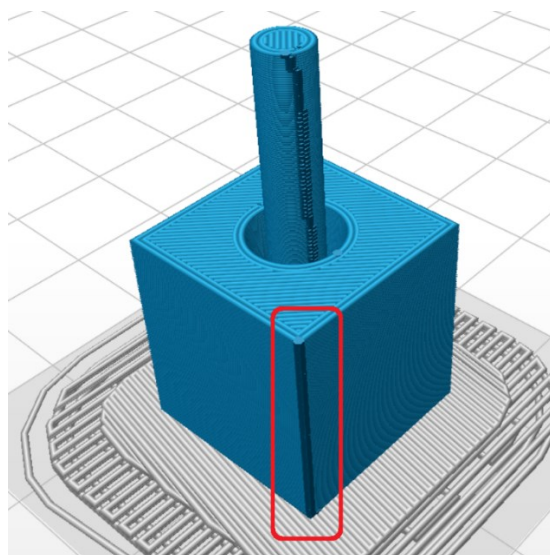


Tab. 9. Vyhodnocení základní statistiky naměřených hodnot u materiálu Timberfill

	Materiál Timberfill											
	osa X				osa Y				osa Z			
	0,09	0,14	0,19	0,29	0,09	0,14	0,19	0,29	0,09	0,14	0,19	0,29
Tloušťky vrstev [mm]	0,09	0,14	0,19	0,29	0,09	0,14	0,19	0,29	0,09	0,14	0,19	0,29
Počet měření [-]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Ar. Průměr [mm]	16,152	16,111	16,217	16,208	16,193	16,189	16,283	16,288	16,137	16,115	16,104	16,129
Sm. odchylka [mm]	0,014	0,015	0,014	0,018	0,015	0,017	0,022	0,018	0,017	0,030	0,020	0,026
Šikmost [-]	-0,12	0,32	0,15	-0,01	0,15	-0,33	0,17	0,08	0,54	0,08	0,17	0,38
Špičatost [-]	-1,04	-0,64	-0,67	-0,92	-0,40	-1,06	-1,25	-0,78	0,23	-1,55	-0,37	-0,29
Median [mm]	16,150	16,110	16,220	16,210	16,195	16,190	16,280	16,280	16,140	16,110	16,105	16,130
Minimum [mm]	16,13	16,09	16,19	16,18	16,17	16,16	16,25	16,25	16,11	16,07	16,07	16,09
Maximum [mm]	16,17	16,14	16,24	16,24	16,23	16,21	16,32	16,32	16,18	16,16	16,15	16,19
Variační koeficient [-]	0,08	0,09	0,08	0,11	0,09	0,10	0,14	0,11	0,11	0,19	0,12	0,16
Outlayer test	Nenalezeny	Nenalezeny	Nenalezeny	Nenalezeny	Nenalezeny	Nenalezeny	Nenalezeny	Nenalezeny	Nenalezeny	Nenalezeny	Nenalezeny	Nenalezeny
Normality test	Přijata	Přijata	Přijata	Přijata	Přijata	Přijata	Přijata	Přijata	Přijata	Přijata	Přijata	Přijata

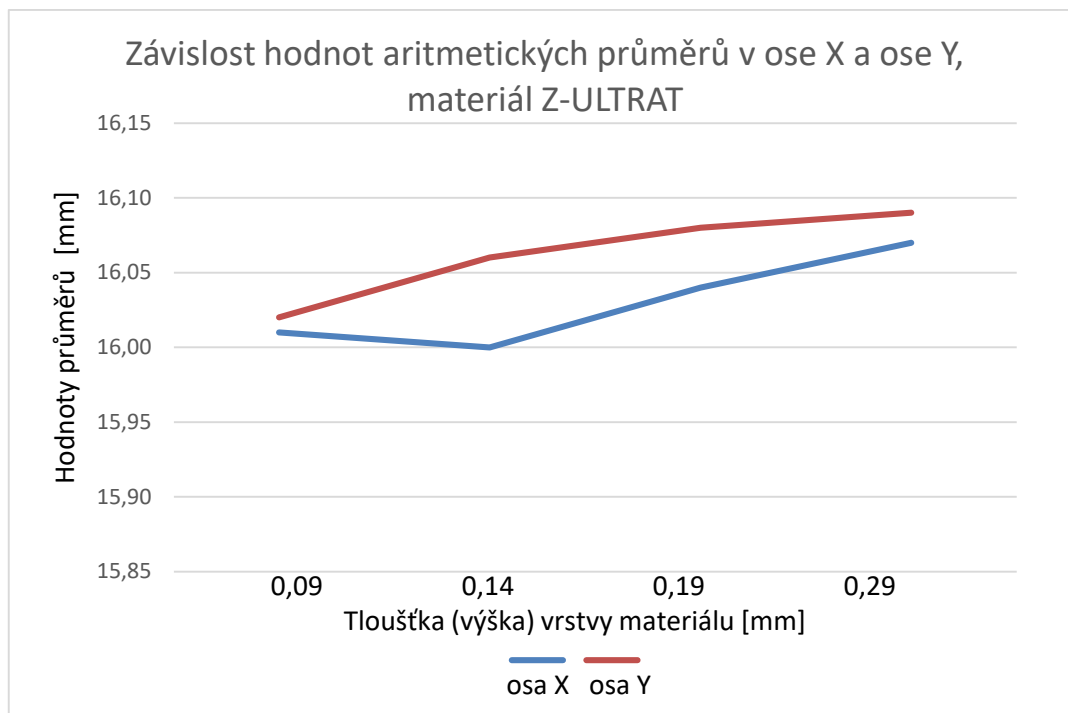
V naměřených datech nebyla nalezena žádná hrubá chyba. Data dle vyhodnocení v softwaru QC Expert spadala do normality. V porovnání měřené součásti (kostky kulového spoje) s původním návrhem 3D modelu v softwaru Catia V5, byly zjištěny odlišnosti.

V případě měření kostky kulového spoje přes její celé strany mohlo dojít k nepřesnosti, tedy jevu, vznikajícímu na jednom z rohů měřené součásti. Jev byl způsoben ukončením trajektorie při pohybu trysky. Jednotlivé nanášení vrstvy materiálu začíná a končí v daném bodě. V tomto bodě při nanášení vrstev na sebe vzniká tzv. šev. Ten může způsobit odchylky od přesnosti. Umístění švu bylo automaticky vygenerováno softwarem Z-Suite. Umístění švu závisí také na tvaru tištěné součásti. V některých případech nemusí umístění ovlivnit měření. Na obr. 42 je zobrazeno nastavení tisku s vyznačeným švem na kostce kulového spoje.



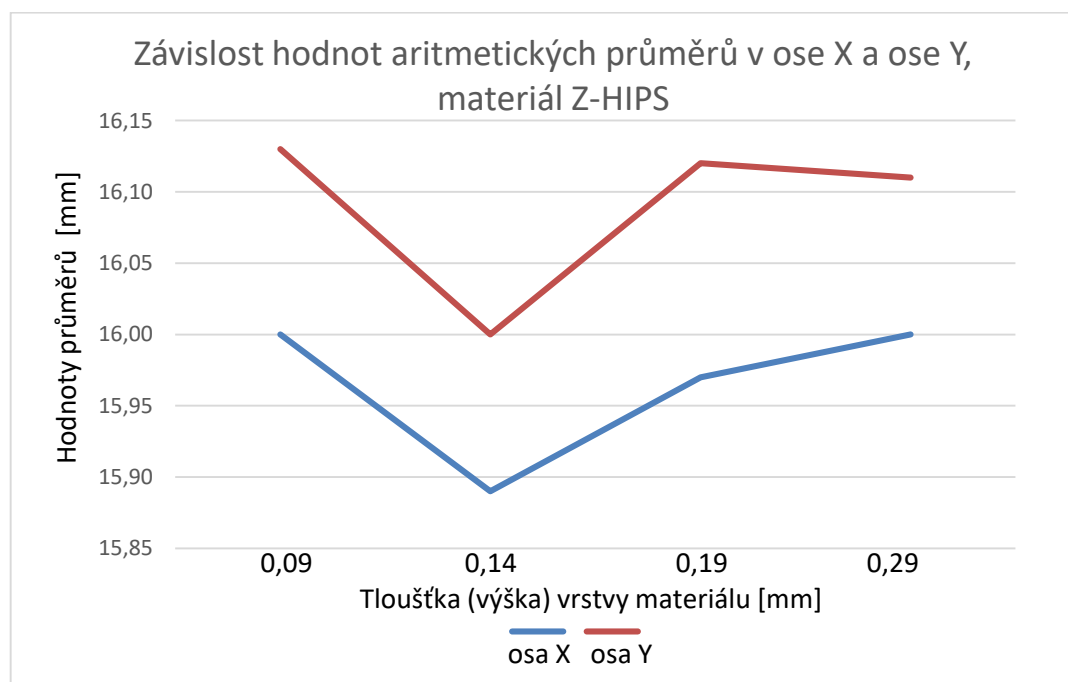
Obr. 42. Zobrazení umístění švu při nastavení tisku kulového spoje

Dále bylo dle hodnot aritmetických průměrů zřejmé, že hodnoty v ose Y byly vždy vyšší než hodnoty v ose X. Toto platilo u všech tlouštěk nanášených vrstev a taktéž u každého ze zvolených materiálů.



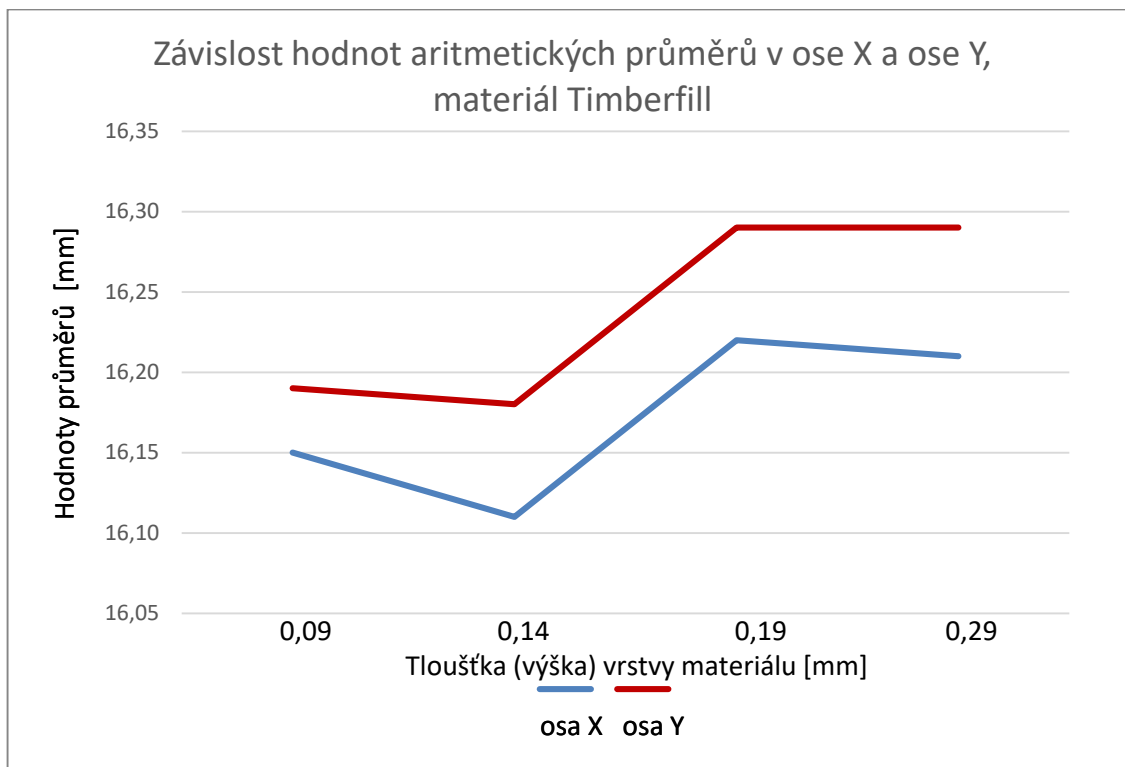
Obr. 43. Grafické znázornění závislosti hodnot aritmetických průměrů v ose X a Y u materiálu Z-ULTRAT

Lze tvrdit že odlišnosti v ose X a Y nebyly způsobeny nesprávným návrhem modelu kulového spoje, ani nesprávnou kalibrací tiskové desky, či systematickou chybou měření. Nastavení procesních parametrů tuto nepřesnost také neovlivnilo.



Obr. 44. Grafické znázornění závislosti hodnot aritmetických průměrů v ose X a Y u materiálu Z-HIPS

Tudíž se lze domnívat, že odlišnosti v osách X a Y byly způsobeny softwarovou chybou. I když výrobce 3D tiskárny Zortrax M200 udává chybu polohování tiskové hlavy v ose X a Y o hodnotě 0,015 mm, ve skutečnosti bylo vlákno pokládáno s chybou 0,15 mm



Obr. 45. Grafické znázornění závislosti hodnot aritmetických průměrů v ose X a Y u materiálu Timberfill

Vzhledem k výsledkům z naměřených hodnot, byly zavrhnuty konstrukční vůle do hodnoty 0,15 mm. Nepřesnosti v jednotlivých osách vykazovaly rozptýlené hodnoty vyvracející spolehlivou možnost tvorby mechanismů se vzdálenostmi mezi stěnami do této hodnoty.

## 9.2 Vyhodnocení vzdáleností mezi stěnami u kulových spojů

Podkapitola obsahuje vyhodnocení zhotovených nerozebíratelných kulových spojů. Tyto spoje byly navrženy s různými tloušťkami vrstev materiálu a s odlišnými konstrukčními vůlemi (vzdálenostmi mezi stěnami) mezi dvěma tělesy, ze kterých byl kulový spoj zhotoven. Model spojení byl navržen tak, aby jeho funkce byla bezprostředně splněna, okamžitě po vyjmutí z tiskové desky a po odstranění podpůrného materiálu, bez další montáže.

Kulové spoje byly vyhodnoceny u každého materiálu (Z-Ultrat, Z-Hips, Timberfill) zvlášť a hodnoty doporučených konstrukčních vůlí jsou zobrazeny v tab. 10 až 12.

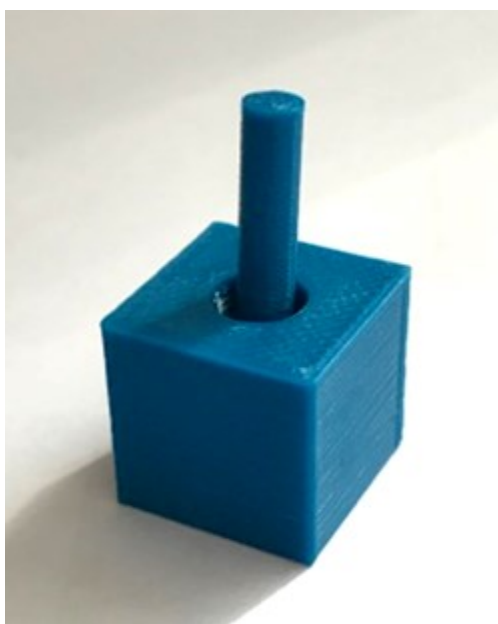


### 9.2.1 Kulový spoj z materiálu Z-ULTRAT

Z vytištěných vzorků bylo u materiálu Z-ULTRAT zjištěno, že možnosti tvorby mechanismů či nerozebíratelných spojení jsou možné od nejmenší vzdálenosti mezi stěnami o hodnotě 0,25 mm. Pro tuto velikost vůle bylo nutné nastavení tloušťky vrstvy 0,09 mm. U této vrstvy byly optimální hodnoty vůlí 0,25; 0,30 a 0,35 mm. U tloušťky vrstvy 0,14 mm plnila funkci vůle o nejnižší hodnotě 0,30 mm. Doporučenými hodnotami u této vrstvy byly pak hodnoty vůlí od 0,30 do 0,40 mm. Vrstvy 0,09 a 0,14 mm dosahovaly nejlepších výsledků ze tří zkoumaných materiálů. Konstrukční vůle byly nejmenší. U tloušťky vrstvy 0,19 mm byly doporučené hodnoty modelovacích vůlí 0,40; 0,45; 0,50 mm. Přesnost u nejvyšší tloušťky o hodnotě 0,29 mm byla poněkud nižší. Velikost vůle plnící potřebný rozsah pohybu začínala od hodnoty 0,55 mm.

Tab. 10. Vyhodnocení pro materiál Z-ULTRAT; hodnoty výšky (tloušťky) vrstvy a konstrukční vůle jsou v mm; X – omezená pohyblivost či úplné spojení; OK – vhodné modelovací vůle; ↑ - nevhodný rozsah pohybu, nežádoucí přímočarý pohyb ve všech směrech.

		Z-Ultrat								
výška vrstvy/vůle	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
0,09	X	OK	OK	OK	↑	↑	↑	↑	↑	↑
0,14	X	X	OK	OK	OK	↑	↑	↑	↑	↑
0,19	X	X	X	X	OK	OK	OK	↑	↑	↑
0,29	X	X	X	X	X	X	X	OK	OK	OK



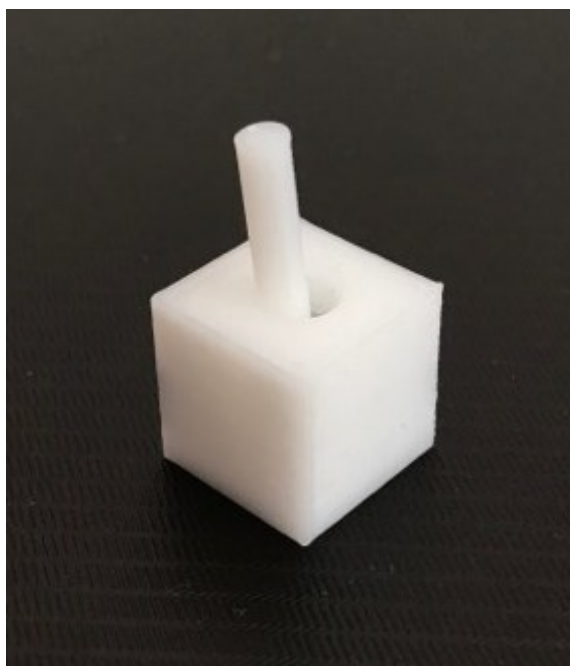
Obr. 46. Kulový spoj z materiálu Z-ULTRAT

### 9.2.2 Kulový spoj z materiálu Z-HIPS

Dalším zkoumaným materiálem byl materiál Z-HIPS. Z vytištěných vzorků bylo zjištěno, že možnosti tvorby mechanismů či nerozebíratelných spojení jsou možné od nejmenší vzdálenosti mezi stěnami o hodnotě 0,35 mm. Pro tuto velikost vŕle bylo nutné nastavení tloušťky vrstvy 0,09 a 0,14 mm. U těchto vrstev byly optimální hodnoty vŕlí 0,35; 0,40 a 0,45 mm. U tloušťky vrstvy 0,19 mm plnily funkci vŕle o nejnižší hodnotě 0,40 mm. Doporučenými hodnotami u této vrstvy byly pak hodnoty vŕlí od 0,40 do 0,50 mm. U nejvyšší tloušťky vrstvy 0,29 mm byla přesnost poněkud nižší, velikost vŕle plnicí potřebný pohyb začínala až od 0,50 mm. Takže vhodným nastavením u tloušťky vrstvy 0,29 mm byly vŕle o hodnotě 0,50; 0,55 a 0,60 mm. Materiál Z-HIPS je spíše vhodný pro mechanismy o větších rozměrech. Nepůsobí na něj smrštění tak, jako na ostatní materiály na bázi ABS.

Tab. 11. Vyhodnocení pro materiál Z-HIPS; hodnoty výšky vrstvy a konstrukční vŕle jsou v mm; X – omezená pohyblivost či úplné spojení; OK – vhodné modelovací vŕle; ↑ - nevhodný rozsah pohybu, nežádoucí přímočarý pohyb ve všech směrech.

HIPS (high impact polystyrene)										
výška vrstvy/vŕle	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
0,09	X	X	X	OK	OK	OK	↑	↑	↑	↑
0,14	X	X	X	OK	OK	OK	↑	↑	↑	↑
0,19	X	X	X	X	OK	OK	OK	↑	↑	↑
0,29	X	X	X	X	X	X	OK	OK	OK	↑



Obr. 47. Kulový spoj z materiálu Z-HIPS

### 9.2.3 Kulový spoj z materiálu Timberfill

Posledním zkoumaným materiálem je materiál Timberfill. Z vytištěných vzorků bylo zjištěno, že možnosti tvorby mechanismů či nerozebíratelných spojení jsou možné od nejmenší vzdálenosti mezi stěnami o hodnotě 0,30 mm. Pro tuto velikost vůle bylo nutné nastavení tloušťky vrstvy 0,09 mm. U této tloušťky vrstvy byly pak doporučené hodnoty 0,30; 0,35; 0,40 mm. U tloušťky vrstvy 0,14 mm spojení plnily svou funkci při velikosti vůle 0,35; 0,40 a 0,45 mm. U tloušťky vrstvy 0,19 mm plnily funkci vůle o nejnižší hodnotě 0,40 mm. Doporučenými hodnotami u této vrstvy byly pak hodnoty vůlí od 0,40 do 0,50 mm. U nejvyšší tloušťky vrstvy 0,29 mm byla přesnost výrazně nižší, velikost vůle plnící potřebný pohyb začínala až od 0,60 mm. Takže vhodným nastavením u tloušťky vrstvy 0,29 mm byla hodnota 0,60 mm a hodnoty vyšší.

Tab. 12. Vyhodnocení pro materiál Timberfill; hodnoty výšky vrstvy a konstrukční vůle jsou v mm; X – omezená pohyblivost či úplné spojení; OK – vhodné modelovací vůle; ↑ - nevhodný rozsah pohybu, nežádoucí přímočarý pohyb ve všech směrech.

Timberfill										
výška vrstvy/vůle	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
0,09	X	X	OK	OK	OK	↑	↑	↑	↑	↑
0,14	X	X	X	OK	OK	OK	↑	↑	↑	↑
0,19	X	X	X	X	OK	OK	OK	↑	↑	↑
0,29	X	X	X	X	X	X	X	X	OK	OK



Obr. 48. Kulový spoj z materiálu Timberfill

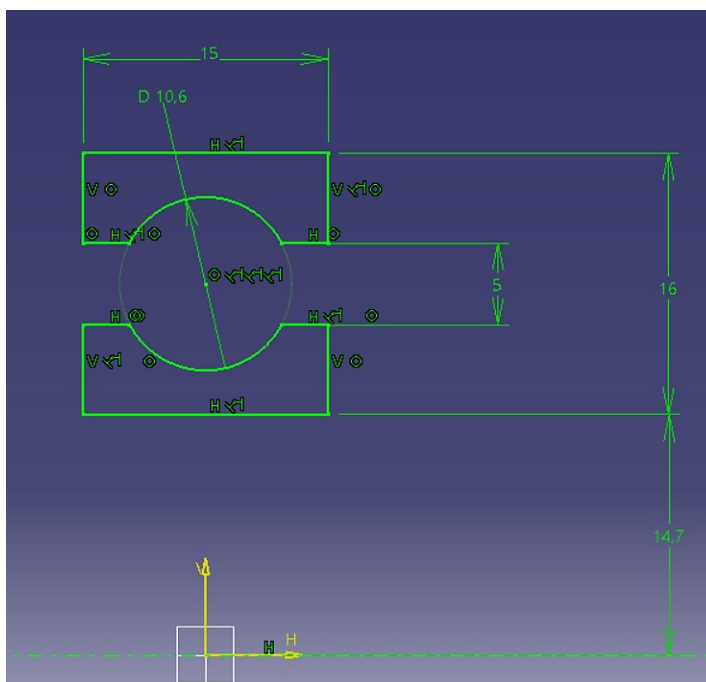
### 9.2.4 Shrnutí výsledků kulových spojů

Nejoptimálnější volba vrstvy při tvorbě mechanismů či jednotlivých spojení byla vrstva 0,09 a 0,14 mm, kdy všechny materiály dosahovaly největší přesnosti. Při vyšší vrstvě nanášeného materiálu byly spoje náchylnější na vylomení a docházelo k větším nepřesnostem. Hodnoty konstrukčních vůlí nižší než doporučené, nesplňovaly podmínky pohyblivosti v úplném rozsahu. Ve většině případů docházelo k úplnému spojení protilehlých stěn. Hodnoty naopak vyšší než doporučené způsobovaly nevhodný rozsah pohybu. Způsobovaly nežádoucí krátký přímočarý pohyb ve všech směrech.

Zkušební tělíska byla modelována a vyrobena dle doporučených procesních podmínek stanovených výrobcí použitých materiálů. Tisk byl proveden v uzavřeném prostoru 3D tiskárny s kryty. Vytlačovací tryska a tisková deska byly řádně očištěny. Deska byla kalibrována do roviny. Pro ověření přesnosti tisku byly kulové spoje tištěny jak uprostřed tiskové desky, tak i v krajních polohách.

## 9.3 Tvorba sestav

Pro ověření správnosti návrhu vzdálenosti mezi stěnami v závislosti na tloušťce vrstvy byla navržena a zhotovena sestava kuličkového ložiska. Ložisko se skládalo z vnějšího kroužku, vnitřního kroužku a ze 14 valivých těles, uložených mezi těmito kroužky. Valivá tělesa měla stejný průměr jako byl průměr kulového čepu při návrhu kulového spoje.



Obr. 49. Náčrt rotační části vnitřního a vnějšího kroužku kuličkového ložiska

Kuličková ložiska byla vytištěna za použití tří materiálů a to konkrétně za použití materiálu Z-ULTRAT, Z-HIPS a Timberfill. Nastavení tisku se nelišilo pouze typem materiálu, ale také nastavením tloušťky nanášené vrstvy na tiskovou podložku. Vrstvy byly o tloušťkách 0,09; 0,14; 0,19 a 0,29 mm. Každé ložisko bylo vyrobeno s nejnižší hodnotou konstrukční vůle, viz výsledky v kapitole 9.



Obr. 50. 3D model vytvořený v softwaru Catia

Ložisko bylo opatřeno příčkou uvnitř vnitřního kroužku pro jednodušší manipulaci při odstraňování podpor, a také pro popis parametrů viz obr. 50. Nastavení tloušťky vrstvy vlevo (0,19) a zvolení konstrukční vůle vpravo (0,4).



Obr. 51. Výtisk ložiska

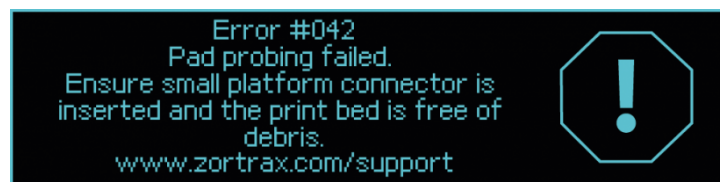
## 9.4 Nepříznivé vlivy při tisku sestav

Před zahájením procesu 3D tisku bylo nutné kalibrovat tiskovou desku do roviny. Tato deska se skládá ze dvou hlavních částí. Jedna je z kovu, opatřena rozvodem vytápění a druhá je z plastu, opatřena póry po celé její ploše. Při tisku se došlo k tomu, že se materiál použitý k tisku dostal mezi tyto dvě části tiskové desky a bylo nutné podložku demontovat a vyčistit. Čištění bylo nutné před zahájením tisku kuličkových ložisek, aby byla splněna kalibrace do roviny.



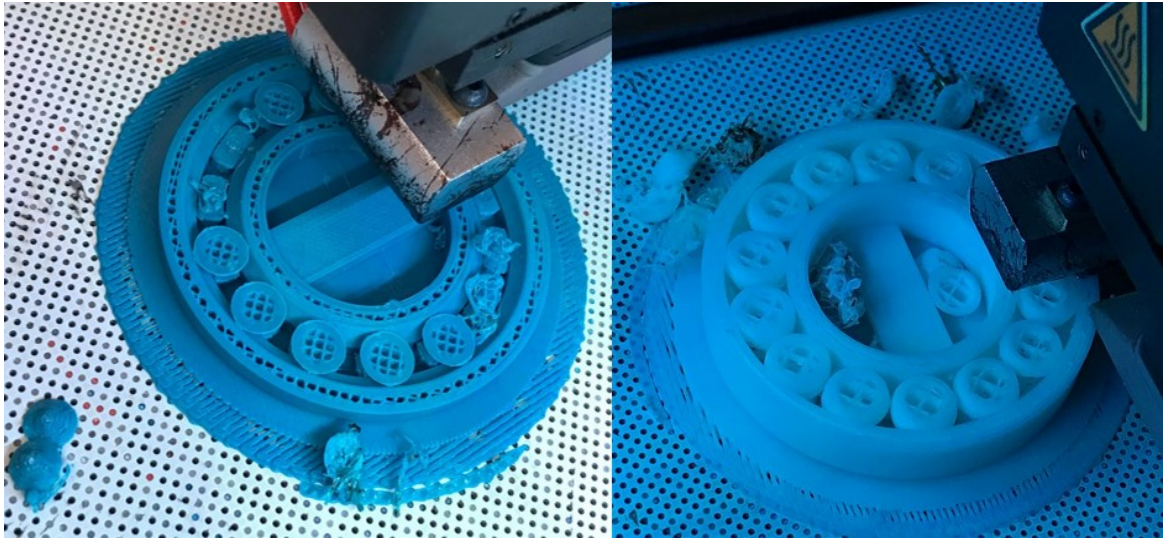
Obr. 52. Znečištění tiskové desky

Po zkompletování a zapojení tiskové desky k tiskárně došlo k chybě viz obr. 53. Chyba poukazovala na možnost nesprávného zapojení konektoru vyhřívané tiskové desky. Po opětovném přepojení konektorů desky proběhla kalibrace do roviny a stroj pracoval bez zobrazení dalších chyb. Na chyby vzniklé nesprávným zapojením stroj už dále nepoukazoval.



Obr. 53. Chyba konektoru

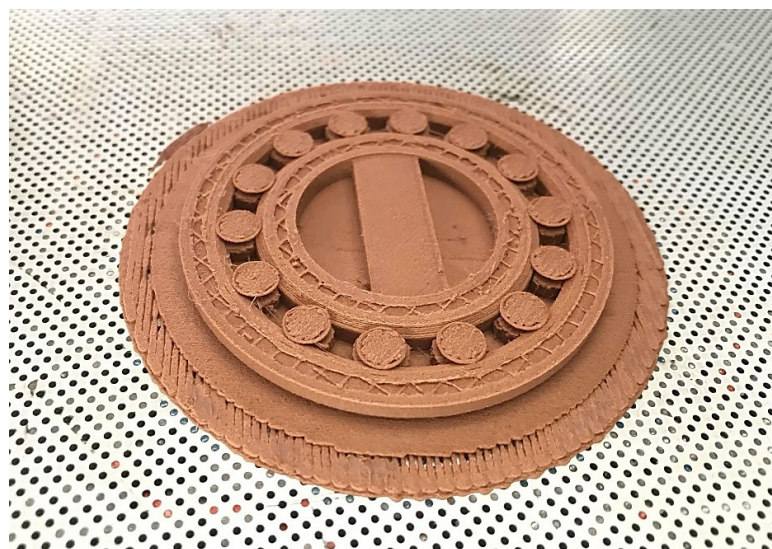
Další komplikací při průběhu tisku kuličkového ložiska bylo několikanásobné nalepení valivých těles na vyhřátou trysku, čímž došlo k znehodnocení celé sestavy a tisk musel být zastaven. Tato chyba vznikla nevhodným nastavením podpurného materiálu.



Obr. 54. Komplikace při tisku ložisek z materiálu Z-ULTRAT a Z-HIPS

V tomto případě při větší ploše tisku s několika kulovými objekty bylo vhodné nastavit generování podpor do většího úhlu stoupání. Zatímco u jednotlivých kulových spojů byly podpory nastaveny do úhlu  $10^\circ$ , u sestav bylo nutné zvětšit úhel na  $20^\circ$ . V tomto nastavení byl tisk úspěšný u všech materiálů a u každého nastavení tloušťky vrstev.

Poslední komplikací bylo pak nedotisknutí sestavy u materiálu Timberfill, kdy došlo k ucpaní trysky materiálem vytlačované součásti. Po vyčištění (vypálení) trysky tisk proběhl úspěšně. Další komplikace už se neobjevily.



Obr. 55. Komplikace při tisku z materiálu Timberfill

## ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce byla zmíněna historie a vývoj technologie 3D tisku. Následně byla popsána technologie FDM (fusion deposition modeling) a používané materiály. Praktická část se zabývala samotnými možnostmi tvorby nerozebíratelných spojení a sestav na FDM 3D tiskárnách.

V úvodu praktické části byla ověřena přesnost výroby 3D tiskárny Zortrax M200. Konkrétně byly zkoumány přesnosti výtisků z materiálu Z-ULTRAT, Z-HIPS a z materiálu Timberfill. Jednotlivé vzorky byly naměřeny v osách (x, y, z) a byla vyhodnocena jejich rozměrová přesnost v závislosti na tloušťce nanášené vrstvy materiálu. Na základě výsledků z naměřených hodnot byly zavrhnuty konstrukční vůle do hodnoty 0,15 mm. Nepřesnosti v jednotlivých osách vykazovaly rozptýly hodnot vyvracející spolehlivou možnost tvorby mechanismů se vzdálenostmi mezi stěnami do této hodnoty.

Hlavní část pak obsahovala volbu a návrh spoje pro kinematickou studii. Pro tuto studii byl vybrán kulový spoj. Vzhledem k jeho konstrukci obsahuje širokou škálu úhlů, kde může docházet k nepřesnostem. Model spojení byl navržen dle modelovacích zásad tak, aby jeho funkce byla bezprostředně splněna okamžitě po vyjmutí z tiskové desky a po odstranění podpůrného materiálu, bez potřeby další montáže. Na základě kinematické studie spojů, lze z tabulek v kapitole 9 vyčíst vhodné modelovací vůle v závislosti na tloušťce vrstvy u materiálu Z-ULTRAT, Z-HIPS a materiálu Timberfill. Neoptimálnějších výsledků dosáhl materiál Z-ULTRAT s tloušťkou vrstvy nanášeného materiálu 0,09 mm a velikostí konstrukční vůle o hodnotě 0,25 mm. Materiál Timberfill splňoval požadovaný rozsah pohybu se stanovenou konstrukční vůlí 0,30 mm a materiál Z-HIPS o tloušťce vrstvy 0,09 mm začínal na vůli o hodnotě 0,35 mm. Z dané studie bylo zjištěno, že neoptimálnější volba vrstvy při tvorbě jednotlivých spojení byla vrstva 0,09 a 0,14 mm, kdy všechny materiály dosahovaly největší přesnosti. Dále bylo zjištěno, že hodnoty konstrukčních vůlí nižší než doporučené, nesplnily podmínky pohyblivosti v úplném rozsahu. Ve většině případů došlo k úplnému spojení protilehlých stěn. Hodnoty naopak vyšší než doporučené způsobovaly nevhodný rozsah pohybu. Způsobily nežádoucí krátký přímočarý pohyb ve všech směrech.

Pro ověření správnosti spojů byla zhotovena sestava v podobě kuličkového ložiska. Vzhledem k počtu valivých těles mezi vnitřním a vnějším kroužkem ložiska byl výskyt nepřesností mezi jednotlivými tělesy pravděpodobnější než u kulového spoje. Ověření potvrdilo správnost návrhu konstrukčních vůlí při tvorbě nerozebíratelných mechanismů.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. . 2015, . ISSN:-. .
- [2] Liza Wallach Kloski, Nick Kloski. Začínáme s 3D tiskem. Brno : Computer Press, 2017.
- [3] LAPČÍK, Lubomír a Miroslav RAAB. Nauka o materiálech II. Zlín : Vyd. 2., rozš. Univerzita Tomáše Bati., 2004. ISBN 80-7318-229-7.
- [4] BERMAN, Barry. 3-D printing. Business Horizons [online]. Elsevier, 2012, 55(2), 155-162 [cit. 2017-12-02]. DOI: 10.1016/j.bushor.2011.11.003. ISSN 00076813.
- [5] KELLY, James. 3D printing. místo neznámé : Pearson, 2013. ISBN: 9780789752352.
- [6] Investment Casting by CIREX - CIREX [online]. Dostupné z: <https://cirexfoundry.com/engineering/product-development/rapid-prototyping/>. [Online]
- [7] GEBHARDT, Andreas; HÖTTER, Jan-Steffen. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. . 2016, . ISSN:-. .
- [8] 3D měření a optická digitalizace, reverzní inženýrství | Katedra výrobních systémů a automatizace. Úvod | Katedra výrobních systémů a automatizace [online]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/pro-firmy/3d-mereni-a-opticka-digitalizace-reverzni-inzenyrstvi>.
- [9] Počítačová tomografie (CT). Úvod | Počítačová tomografie (CT) [online]. Copyright © Počítačová tomografie [cit. 04.12.2017]. Dostupné z: <http://www.ct-ndt.cz/novinka/odborny-seminar-pocitacove-tomografie-ct-werth>.
- [10] Zortrax M200 3D Printer | Valued by THOUSANDS of users | Zortrax. 3D Printing Solutions for Professionals | Zortrax [online]. Copyright © 2016. All rights [cit. 18.11.2017]. Dostupné z: <https://zortrax.com/printers/zortrax-m200/>. [Online]
- [11] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. Praha : Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.

- [12] Prusa Research s.r.o. – 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši [online]. Copyright © [cit. 18.11.2017]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/downloads/manual/Prusa-i3-manual-mk2s-cz.pdf?1>. [Online]
- [13] Prusa Research s.r.o. – 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši. Prusa Research s.r.o. – 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši [online]. Copyright © Prusa Research s.r.o., [cit. 02.12.2017]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/>.
- [14] Ducháček, V. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Praha : VŠCHT, 2006. ISBN 8070806176.
- [15] 3Dwiser. #1 specialista na 3D tisk | 3Dwiser.com [online]. Copyright © 2016 3Dwiser s.r.o. [cit. 02.12.2017]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/spotrebni-material-pro-3d-tiskarny/tiskove-struny/>.
- [16] BERNIER, Samuel N, LUYT, Bertier a REINHARD, Tatiana. Design for 3D Printing: Scanning, Creating, Editing, Remixing, and Making in Three Dimensions. . 2015, . ISBN: 9781457187360.
- [17] How to Smooth 3D-Printed Parts | Machine Design. Machine Design [online]. Dostupné z: <http://www.machinedesign.com/3d-printing/how-smooth-3d-printed-parts>.
- [18] Vapor treating: How to smooth PLA or ABS prints | Ultimaker: 3D Printers . Ultimaker: 3D Printers [online]. Copyright © 2017 Ultimaker B.V. [cit. 04.12.2017]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/resources/17897-vapor-treating-how-to-smooth-pla-or-abs-pri>
- [19] 3D Printing Troubleshooting: 34 Common 3D Printing Problems | All3DP. All3DP | World's Leading 3D Printing Magazine [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/common-3d-printing-problems-troubleshooting-3d-printer-issues/>.
- [20] Problems with Failed Prints - Zortrax. Zortrax Support Center [online]. Copyright © 2016. All rights [cit. 04.12.2017]. Dostupné z: <http://support.zortrax.com/problems-with-incomplete-prints/>
- [21] ZEMAN, Lubomír. Vstříkování plastů: úvod do vstříkování termoplastů. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.

- [22] Technologie 3D tisku. itnetwork.cz - Ajt'ácká sociální síť a materiálová základna pro C#, Java, PHP, HTML, CSS, JavaScript a další. [online]. Copyright © 2017 itnetwork.cz. Veškerý obsah webu [cit. 16.11.2017]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/nezarazen>. [Online]
- [23] Muzeum budoucnosti vytiskne v Dubaji 3D tiskárna – Ekologické bydlení. Ekologické bydlení – Ekologie, nízkoenergetické bydlení, zelená energie, solární elektrárny [online]. Copyright © 2018 [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/architektura/muzeum-budoucnosti-vytiskne-v-dubaji-3d-tiskarna>
- [24] Home | Faculteit Engineering Technology (ET). Universiteit Twente in Enschede: High Tech Human Touch | Universiteit Twente [online]. Dostupné z: <https://www.utwente.nl/nl/et/>
- [25] Polar 3D Launches Unique Polar Coordinate-Based FFF 3D Printer at CES 2015 | 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing. 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing [online]. Copyright © 2018. 3DR Holdings, LLC, All Rights Reserved. [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: <https://3dprint.com/35656/polar-3d-printer-ces-2015/>
- [26] FUTUR3D | Základní pravidla 3D modelování pro 3d tisk. FUTUR3D | 3D tiskárny, 3d tisk a 3d skenování [online]. Dostupné z: <https://www.futur3d.net/zakladni-pravidla-3d-modelovani-pro-3d-tisk>
- [27] Promising trend for innovators: 3D printer prices are falling | ZDNet. Technology News, Analysis, Comments and Product Reviews for IT Professionals | ZDNet [online]. Copyright © 2018 CBS Interactive. All rights reserved. [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: <https://www.zdnet.com/article/promising-trend-for-innovators-3d-printer-prices-are-falling/>
- [28] Piskovacky.cz - Piskovačky mobilní či kabinové, boxy, tryskací komory. Piskovacky.cz - Piskovačky mobilní či kabinové, boxy, tryskací komory [online]. Copyright © Piskovacky.cz 2005 [cit. 13.04.2018]. Dostupné z: <http://piskovacky.cz/>

- [29] ZHU, Zuowei, Nabil ANWER a Luc MATHIEU. Deviation Modeling and Shape Transformation in Design for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* [online]. Elsevier B.V, 2017, 60, 211-216 [cit. 2018-02-23]. DOI: 10.1016/j.procir.2017.01.023. ISSN 22128271.
- [30] LUAN, He a Qiang HUANG. Predictive modeling of in-plane geometric deviation for 3D printed freeform products. 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) [online]. IEEE, 2015, , 912-917 [cit. 2018-02-23]. DOI: 10.1109/CoASE.2015.7294215.
- [31] HORVATH, Joan C. *Mastering 3D printing*. Berkeley, California: Apress, 2014. Technology in action series. ISBN 978-148-4200-261.
- [32] Forbidden. Forbidden [online]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

HIPS	Zkratka pro materiál High Impact Polystyren
ABS	Zkratka pro materiál Akrylonitril butadien styren
PLA	Zkratka pro materiál Polylactid Acid
PC	Zkratka pro materiál Polycarbonat
ASA	Zkratka pro materiál Acrylonitrile Styrene Acrylate
PETG	Zkratka pro materiál Polyethylene terephthalate
STL	Zkratka Strereolitografický soubor
SLA	Zkratka metody 3D tisku Stereolithography
SLS	Zkratka metody 3D tisku Selective Laser Sintering
FDM	Zkratka metody 3D tisku Fused deposition modeling
UV	Zkratka ultrafialového záření
CNC	Zkratka Computer numerical control
RE	Zkratka Reverse engineering
AM	Zkratka Additive manufacturing
2D	Zkratka dvoudimenzionálního souboru
3D	Zkratka třídimeznionálního souboru
kg	Vyjádření hmotnosti (kilogram)
g	Vyjádření hmotnosti (gram)
mm	Vyjádření délky (milimetr)
m <sup>3</sup>	Vyjádření objemu (metr)
°C	Vyjádření teploty (stupeň Celsia)
Pa	Vyjádření tlaku (pascal)

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. První vytisknuté domy pomocí technologie 3D tisku v Dubaji [23].....	12
Obr. 2. Rapid prototyping [6] .....	13
Obr. 3. Proces reverzního inženýrství [8] .....	14
Obr. 4. Model snímáný pomocí počítačové tomografie [9].....	14
Obr. 5. Popis FDM 3D tiskárny [24] .....	15
Obr. 6. Schéma pohybu kartézského souřadnicového systému, delta systému a polárního systému [25].....	16
Obr. 7. Model z materiálu ABS [13] .....	18
Obr. 8. Model z materiálu ASA [13] .....	20
Obr. 9. Model z materiálu PLA [13].....	21
Obr. 10. Model z materiálu Woodfill [13].....	23
Obr. 11. Model z materiálu Bronzefill [13] .....	24
Obr. 12. Závislost rychlosti tisku na kvalitě povrchu modelu [13] .....	24
Obr. 13. Postup procesu 3D tisku [7].....	25
Obr. 14. Pravidlo vrcholů u STL souboru [16].....	26
Obr. 15. Nastavení tisku Prusa i3 [13].....	27
Obr. 16. Proces 3D tisku [26] .....	27
Obr. 17. Leptaný a neupravený model [18] .....	29
Obr. 18. Vložení matice [13] .....	30
Obr. 19. Maximální velikost objektu [26] .....	31
Obr. 20. Odstranění podpor [20].....	32
Obr. 21. Zkroucení modelu na tiskové desce [20].....	33
Obr. 22. Kulový spoj v řezu.....	36
Obr. 23. Tiskárna Zortrax M200 [20] .....	37
Obr. 24. Vyhřívaná deska s popisem částí tiskové hlavy [20].....	37
Obr. 25. Originální cívky s materiály od výrobce Zortrax [20].....	39
Obr. 26. Cívka s materiálem Timberfill od výrobce Fillamentum [32].....	40
Obr. 27. Autokalibrace 3D tiskárny Zortrax M200 .....	41
Obr. 28. Tažení vláken materiálu.....	42
Obr. 29. Příklad úpravy modelu.....	43
Obr. 30. Nákres kulového čepu .....	43
Obr. 31. Nákres kostky s kulovým otvorem .....	44

Obr. 32. Prostředí softwaru Catia V5R19.....	44
Obr. 33. Uložení ve střední poloze tiskové desky a v polohách krajních.....	45
Obr. 34. Kulový spoj v řezu – umístění podpor.....	45
Obr. 35. Nastavení tisku kulového spoje z materiálu Z-Ultrat.....	46
Obr. 36. Nastavení tisku kulového spoje z materiálu Z-HIPS.....	47
Obr. 37. Nastavení tisku kulového spoje z materiálu Timberfill.....	47
Obr. 38. Digitální posuvné měřidlo .....	48
Obr. 39. Graf časové řady materiálu Z-ULTRAT v ose X při tloušťce vrstvy 0,09 mm .....	50
Obr. 40. Grubbsův test na odlehle hodnoty .....	51
Obr. 41. Celkový report naměřených hodnot .....	51
Obr. 42. Zobrazení umístění švu při nastavení tisku kulového spoje.....	53
Obr. 43. Grafické znázornění závislosti hodnot aritmetických průměrů v ose X a Y u materiálu Z-ULTRAT .....	54
Obr. 44. Grafické znázornění závislosti hodnot aritmetických průměrů v ose X a Y u materiálu Z-HIPS .....	54
Obr. 45. Grafické znázornění závislosti hodnot aritmetických průměrů v ose X a Y u materiálu Timberfill .....	55
Obr. 46. Kulový spoj z materiálu Z-ULTRAT .....	56
Obr. 47. Kulový spoj z materiálu Z-HIPS .....	57
Obr. 48. Kulový spoj z materiálu Timberfill .....	58
Obr. 49. Náčrt rotační části vnitřního a vnějšího kroužku kuličkového ložiska.....	59
Obr. 50. 3D model vytvořený v softwaru Catia.....	60
Obr. 51. Výtisk ložiska .....	60
Obr. 52. Znečištění tiskové desky.....	61
Obr. 53. Chyba konektoru.....	61
Obr. 54. Komplikace při tisku ložisek z materiálu Z-ULTRAT a Z-HIPS .....	62
Obr. 55. Komplikace při tisku z materiálu Timberfill .....	62

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Teplotní parametry tiskárny Zortrax M200 .....	38
Tab. 2. Materiálové parametry Z-ULTRAT [20] .....	39
Tab. 3. Materiálové parametry Z-HIPS [20].....	39
Tab. 4. Materiálové parametry Timberfill [32].....	40
Tab. 5. Naměřené hodnoty materiálu Z-ULTRAT v ose X s tloušťkou nanášené vrstvy 0,09 mm.....	49
Tab. 6. Vyhodnocení základní statistiky.....	50
Tab. 7. Vyhodnocení základní statistiky naměřených hodnot u materiálu Z- ULTRAT .....	52
Tab. 8. Vyhodnocení základní statistiky naměřených hodnot u materiálu Z-HIPS ...	52
Tab. 9. Vyhodnocení základní statistiky naměřených hodnot u materiálu Timberfill	53
Tab. 10. Vyhodnocení pro materiál Z-ULTRAT .....	56
Tab. 11. Vyhodnocení pro materiál Z-HIPS.....	57
Tab. 12. Vyhodnocení pro materiál Timberfill.....	58



**SEZNAM PŘÍLOH**

- P I Materiálový list Z-ULTRAT
- P II Materiálový list Z-HIPS
- P III Materiálový list Timberfill
- P IV Vyhodnocení přesnosti tisku – naměřená data osa X
- P V Vyhodnocení přesnosti tisku – naměřená data osa Y
- P VI Vyhodnocení přesnosti tisku – naměřená data osa Z
- P VII CD – Diplomová práce

# PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST Z-ULTRAT

## TECHNICAL DATA SHEET

Date of issue: 01.08.2014 | Update: 03.01.2018 | Version: 2.00

# Z-ULTRAT

### Durability Comes in Colors

Z-ULTRAT is a material characterized by high impact resistance, which gives your models a uniform surface texture. This all-purpose material allows you to 3D print elements requiring durability, such as end-use parts, which, after continued use, keep their initial shape over time. With Z-ULTRAT, you can produce objects with properties comparable to those of models manufactured using injection molding technology, including functional prototypes, test casings, and mechanical parts. Z-ULTRAT allows you to test your tailor-made projects in unlimited ways, in one of twenty-two shades.



Mechanical Properties	Metric	English	Test Method
Tensile Strength	32.60 MPa	4730 psi	ISO 527:1998
Breaking Stress	30.70 MPa	4450 psi	ISO 527:1998
Elongation at max Tensile Stress	3.78%	3.78%	ISO 527:1998
Elongation at Break	4.87%	4.87%	ISO 527:1998
Bending Stress	54.00 MPa	7830 psi	ISO 178:2011
Flexural Modulus	1.85 GPa	268 ksi	ISO 178:2011
Izod Impact, Notched	5.26 kJ/m <sup>2</sup>	2.50 ft-lb/in <sup>2</sup>	ISO 180:2004
Thermal Properties	Metric	English	Test Method
Glass Transition Temperature	106.40° C	224° F	ISO 11357-3:2014
Other Properties	Metric	English	Test Method
Melt Flow Rate	43.88 g/10 min Load 5 kg Temperature 260° C	0.0968 lb/10 min Load 11 lb Temperature 500° F	ISO 1133:2006
Specific Density	1.179 g/cm <sup>3</sup>	9.84 lb/gal	ISO 1183-3:2003
Shore Hardness (D)	73.4	73.4	ISO 868:1998

# PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST Z-HIPS

## TECHNICAL DATA SHEET

Date of issue: 12.12.2014 | Update: 03.01.2018 | Version: 2.00

# Z-HIPS

### Smooth and Stable

Z-HIPS is a versatile thermoplastic perfect for 3D printing prototypes which can be used in thorough tests before starting the production processes. It exhibits a high level of hardness, allowing you to complete durable prints without compromises on their quality. With Z-HIPS, your boldest models can acquire a unique, smooth, semimat surface and resemble elements manufactured with mass production plastics, therefore, imitate complete consumer products or end-use parts. Z-HIPS is also fully suited for creating prototypes of mechanical parts or casing elements for performance tests.



Mechanical Properties	Metric	English	Test Method
Tensile Strength	16.90 MPa	2450 psi	ISO 527:1998
Breaking Stress	13.02 MPa	1890 psi	ISO 527:1998
Elongation at max Tensile Stress	1.87%	1.87%	ISO 527:1998
Elongation at Break	7.75%	7.75%	ISO 527:1998
Bending Stress	29.30 MPa	4250 psi	ISO 178:2011
Flexural Modulus	1.18 GPa	171 ksi	ISO 178:2011
Izod Impact, Notched	4.82 kJ/m <sup>2</sup>	2.29 ft-lb/in <sup>2</sup>	ISO 180:2004
Thermal Properties	Metric	English	Test Method
Glass Transition Temperature	98.68° C	210° F	ISO 11357-3:2014
Other Properties	Metric	English	Test Method
Melt Flow Rate	7.14 g/10 min Load 5 kg Temperature 200° C	0.0157 lb/10 min Load 11 lb Temperature 392° F	ISO 1133:2006
Specific Density	1.136 g/cm <sup>3</sup>	9.48 lb/gal	ISO 1183-3:2003
Shore Hardness (D)	73.2	73.2	ISO 868:1998

# PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST TIMBERFILL



## Technical Data Sheet

# Timberfill

Fillamentum Timberfill is a material for the **FFF (also known as FDM) 3D printing technology**. The advantage of this material is that it can be used in 3D printing easily, that it allows a **high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object**.

Timberfill filament is made of **biodegradable material based on wood**. The material exhibits similar mechanical features as ABS or PLA and models printed with this material have a genuine appearance of wood. We recommend using a 0,5 mm nozzle. Fillamentum guarantees **high precision of filament dimensions within the tolerance +/- 0,1 mm**, which is strictly controlled throughout the production.

**Note:** The color tone can have a slight inaccuracy due to natural origin of the material.

### Physical properties

Properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,28 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183	
Melt volume index	20 cm <sup>3</sup> /10 min	ISO 1133	190 °C, 2,16 kg
Diameter tolerance	± 0,01 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

### Mechanical properties

Properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	33,3 MPa	ISO 527	
Tensile modulus	2800 MPa	ISO 527	
Elongation at break	2,87 %	ISO 527	
Charpy impact strength	15,1 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179	23 °C
Charpy impact strength	2,8 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179	23 °C, notched
Ball indentation hardness	105 MPa	ISO 2039	



### Printing properties

Properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Print temperature	170–185 °C		
Hot pad	40–50 °C		
Speed of printing	20–30 mm/min		



# PŘÍLOHA P V: VYHODNOCENÍ PŘESNOSTI TISKU – NAMĚŘENÁ DATA

Naměřené hodnoty v ose Y												
č.	Z-Ultrat				Z-Hips				Timberfill			
	0,09	0,14	0,19	0,29	0,09	0,14	0,19	0,29	0,09	0,14	0,19	0,29
1	16,02	16,05	16,09	16,10	16,13	15,99	16,16	16,10	16,20	16,19	16,25	16,27
2	16,04	16,09	16,05	16,09	16,14	16,01	16,12	16,13	16,19	16,20	16,27	16,31
3	16,03	16,04	16,08	16,11	16,18	16,02	16,11	16,11	16,20	16,21	16,28	16,28
4	16,08	16,08	16,06	16,06	16,13	16,00	16,14	16,09	16,18	16,19	16,25	16,30
5	15,99	16,08	16,10	16,08	16,14	15,99	16,13	16,14	16,17	16,20	16,28	16,25
6	15,98	16,03	16,07	16,05	16,11	15,98	16,15	16,13	16,21	16,21	16,25	16,28
7	15,97	16,02	16,07	16,07	16,12	16,01	16,14	16,10	16,17	16,21	16,28	16,28
8	16,03	16,05	16,08	16,12	16,11	16,02	16,14	16,10	16,20	16,19	16,30	16,31
9	16,02	16,04	16,10	16,11	16,16	15,99	16,10	16,11	16,21	16,20	16,29	16,30
10	16,04	16,04	16,06	16,13	16,15	15,98	16,12	16,10	16,20	16,21	16,31	16,26
11	16,08	16,08	16,07	16,13	16,16	16,01	16,13	16,14	16,18	16,18	16,31	16,27
12	15,97	16,07	16,10	16,09	16,16	16,03	16,15	16,13	16,20	16,20	16,28	16,28
13	16,00	16,08	16,08	16,07	16,12	16,00	16,10	16,12	16,19	16,16	16,26	16,27
14	15,99	16,08	16,09	16,11	16,13	16,01	16,09	16,14	16,18	16,18	16,27	16,28
15	16,01	16,07	16,09	16,10	16,11	15,98	16,11	16,11	16,21	16,17	16,26	16,32
16	15,96	16,04	16,10	16,09	16,14	15,99	16,12	16,12	16,20	16,19	16,32	16,30
17	15,98	16,03	16,08	16,08	16,15	16,00	16,11	16,11	16,17	16,21	16,31	16,31
18	16,06	16,08	16,04	16,05	16,12	16,00	16,11	16,10	16,20	16,20	16,31	16,28
19	15,97	16,03	16,06	16,06	16,16	16,02	16,13	16,12	16,23	16,17	16,26	16,29
20	16,09	16,06	16,09	16,10	16,12	16,03	16,15	16,14	16,17	16,16	16,27	16,27
21	16,08	16,00	16,05	16,11	16,11	16,00	16,09	16,13	16,19	16,20	16,26	16,27
22	15,98	16,03	16,07	16,10	16,16	15,99	16,15	16,14	16,18	16,18	16,31	16,32
23	16,05	16,03	16,07	16,13	16,16	15,97	16,11	16,13	16,21	16,17	16,29	16,30
24	16,04	16,08	16,10	16,09	16,12	15,98	16,09	16,10	16,20	16,18	16,30	16,31
25	16,05	16,09	16,08	16,07	16,15	15,99	16,14	16,11	16,19	16,16	16,28	16,28
26	16,08	16,07	16,07	16,11	16,13	15,98	16,12	16,09	16,21	16,19	16,28	16,30
27	15,97	16,02	16,05	16,10	16,12	16,02	16,15	16,10	16,19	16,21	16,27	16,28
28	15,97	16,05	16,06	16,08	16,11	16,01	16,16	16,10	16,18	16,20	16,26	16,30
29	15,96	16,08	16,10	16,09	16,14	16,01	16,10	16,10	16,21	16,18	16,31	16,27
30	15,97	16,09	16,09	16,10	16,13	16,00	16,09	16,09	16,18	16,17	16,32	16,29
										Naměřená data jsou v [mm]		

## PŘÍLOHA P VI: VYHODNOCENÍ PŘESNOSTI TISKU – NAMĚŘENÁ DATA

Naměřené hodnoty v ose Z												
č.	Z-Ultrat				Z-Hips				Timberfill			
	0,09	0,14	0,19	0,29	0,09	0,14	0,19	0,29	0,09	0,14	0,19	0,29
1	16,05	16,20	16,10	16,20	16,05	16,15	16,10	15,98	16,13	16,16	16,09	16,19
2	16,05	16,13	16,14	16,22	16,03	16,12	16,16	15,99	16,14	16,11	16,10	16,15
3	16,03	16,10	16,16	16,20	16,04	16,14	16,14	15,96	16,14	16,15	16,08	16,17
4	16,01	16,15	16,15	16,20	16,02	16,12	16,12	16,02	16,18	16,09	16,12	16,16
5	16,00	16,16	16,12	16,17	16,05	16,16	16,16	15,99	16,17	16,10	16,13	16,14
6	16,01	16,18	16,13	16,21	16,03	16,13	16,13	16,00	16,13	16,08	16,11	16,13
7	16,03	16,17	16,14	16,21	16,07	16,14	16,14	16,00	16,14	16,13	16,15	16,14
8	16,02	16,13	16,16	16,23	16,04	16,13	16,15	15,99	16,16	16,15	16,08	16,12
9	16,02	16,16	16,11	16,19	16,08	16,14	16,17	15,96	16,11	16,07	16,11	16,13
10	16,01	16,17	16,14	16,19	16,09	16,12	16,09	15,97	16,13	16,09	16,12	16,12
11	16,03	16,16	16,14	16,16	16,09	16,12	16,11	16,02	16,12	16,11	16,11	16,15
12	16,05	16,17	16,13	16,17	16,08	16,13	16,10	15,97	16,14	16,07	16,10	16,16
13	16,03	16,16	16,11	16,18	16,05	16,17	16,12	16,04	16,13	16,08	16,07	16,15
14	16,04	16,16	16,12	16,19	16,04	16,15	16,13	15,98	16,14	16,09	16,11	16,11
15	16,00	16,18	16,14	16,18	16,03	16,15	16,11	16,03	16,15	16,12	16,10	16,12
16	15,99	16,19	16,13	16,17	16,05	16,18	16,12	16,04	16,14	16,14	16,13	16,09
17	16,03	16,14	16,15	16,16	16,04	16,15	16,14	16,00	16,13	16,16	16,11	16,11
18	16,01	16,17	16,14	16,17	16,10	16,15	16,12	16,01	16,14	16,09	16,08	16,17
19	16,00	16,14	16,13	16,22	16,09	16,14	16,10	15,99	16,16	16,08	16,09	16,09
20	15,99	16,17	16,14	16,19	16,04	16,12	16,09	15,98	16,11	16,11	16,10	16,11
21	16,03	16,16	16,13	16,20	16,08	16,15	16,11	15,97	16,12	16,13	16,07	16,13
22	16,01	16,17	16,15	16,17	16,04	16,16	16,13	15,98	16,14	16,08	16,13	16,13
23	16,00	16,18	16,11	16,16	16,06	16,17	16,09	16,04	16,12	16,15	16,09	16,14
24	15,99	16,17	16,12	16,20	16,05	16,16	16,11	16,02	16,16	16,15	16,11	16,11
25	16,03	16,14	16,14	16,17	16,08	16,13	16,13	16,00	16,15	16,09	16,08	16,13
26	16,02	16,13	16,12	16,18	16,03	16,14	16,15	15,99	16,14	16,15	16,10	16,09
27	16,00	16,13	16,12	16,16	16,07	16,14	16,11	15,97	16,13	16,14	16,09	16,10
28	16,00	16,19	16,14	16,17	16,07	16,16	16,12	15,98	16,11	16,09	16,11	16,10
29	16,02	16,17	16,16	16,19	16,04	16,14	16,11	16,01	16,12	16,13	16,12	16,13
30	16,03	16,16	16,11	16,19	16,06	16,17	16,16	16,03	16,13	16,15	16,13	16,11
										Naměřená data jsou v [mm]		