Vliv procesních parametrů na mechanické vlastnosti, kvalitu a přesnost 3D výtisků

David Volařík

Bakalářská práce
2021

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**David Volařík**
Osobní číslo:	**A18240**
Studijní program:	**B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor:	**Inteligentní systémy s roboty**
Forma studia:	**Kombinovaná**
Téma práce:	**Vliv procesních parametrů na mechanické vlastnosti, kvalitu a přesnost 3D výtisků**
Téma práce anglicky:	**Influence of process parameters on mechanical properties, quality and accuracy of 3D prints**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši v oblasti 3D tisku, testování materiálů a metrologie.
2. Vyhledejte a zpracujte informace ohledně mechanických vlastností, kvality a přesnosti 3D výtisků od výrobců 3D tiskáren a z publikovaných výzkumných prací.
3. Připravte zkušební tělesa a provést testy. Navrhněte model pro vyhodnocení kvality a přesnosti 3D výtisku.
4. Vytiskněte navržený model na 3D tiskárně a provést statistické zhodnocení.
5. Vyhodnoťte a diskutujte získaná data.

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Ian GIBSON, David ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.
2. Andreas GEBHARDT a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich: Carl Hanser Verlag, 2016*. ISBN 978-1-56990-582-1.
3. Song ZHANG. *Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging. Boca Raton: CRC Press, 2013*. ISBN 978-1-4398-7219-2.
4. František DRASLÍK. *Přesnost strojních součástí podle mezinárodních norem*. Ostrava: Montanex a.s., 2007. ISBN 80-85780-18-6.
5. Edgar DIETRICH a Alfred SCHULZE. *Statistical Procedures for Machine and Process Qualification. Munich: Carl Hanser Verlag, 2010*. ISBN 9781569904695.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Aleš Mizera, Ph.D.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2021**

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.
děkan

UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ
Fakulta aplikované informatiky
L.S.

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 15. ledna 2021

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním 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;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji 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;
- beru na vědomí, že podle § 60 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 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování 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 bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem 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.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne …….

podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá procesními parametry v oblasti optimalizace 3D tisku. Cílem bakalářské práce je zhodnotit přesnost vybraných 3D tiskáren a materiálových vlastností výtisků. V teoretické části popisuji technologie 3D tisku, vývoj metrologie, softwarovou podporu výroby a testování v oblasti materiálů. V praktické části je následně objasněno navrhnutí těles pro testování kvality tisku, materiálových vlastností, průběh měření a následné vyhodnocení.

Klíčová slova: 3D tisk, metrologie, softwarová podpora výroby, měření, vyhodnocení procesu, vývoj metrologie, navrhování testovacích těles, statistika, materiály

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with process parameters in the field of 3D printing optimization. The aim of the bachelor's thesis is to evaluate accuracy of selected 3D printers and material properties of printed objects. In the theoretical part I describe 3D printing technology, metrology development, software support of production and material properties. The practical part then clarifies the design of CAD models for testing print quality, material properties, measurement and subsequent evaluation.

Keywords: 3D printing, metrology, software support of production, measurement, process evaluation, development of metrology, design of test models, statistics, materials

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Aleši Mizerovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, především trpělivost, asistenci při měření a 3D tisku a hlavně za všechen čas strávený nad touto prací.

Můj velký dík patří přítelkyni a nejbližšímu kruhu rodiny dále pak dobrovolným hasičům SDH Kněžpole, trenérovi, kamarádům Pavlu Stezkovi a Lukáši Pomykalovi.

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

OBSAH

ÚVOD **9**
I TEORETICKÁ ČÁST **10**
1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE **11**
1.1 Historie 11
1.2 Technologie 3D tisku 12
1.3 Materiály pro tisk 15
2 METROLOGIE **17**
2.1 Historie metrologie 17
2.2 Moderní metrologie 19
2.3 Základní pojmy metrologie 21
2.4 Soustava jednotek SI 21
2.5 Schéma návaznosti a kalibrace 23
2.6 Metody měření v závislosti na druhu snímání 25
3 SOFTWAROVÁ PODPORA VÝROBY **27**
3.1 CAM software 27
3.2 CAD software 28
4 TESTOVÁNÍ MATERIÁLŮ **31**
4.1 Proces testování materiálů 31
4.2 Nedestruktivní testování materiálů 31
4.3 Destruktivní testování materiálů 32
II PRAKTICKÁ ČÁST **35**
5 NAVRHUTÍ VHODNÝCH MODELŮ PRO TESTOVÁNÍ **36**
5.1 Návrh modelu pro mechanické testování materiálu 36
5.2 Navrhování součástky pro rozměrovou analýzu 37
5.3 Vytvoření výkresové dokumentace 39
6 VÝROBA 3D TIŠTĚNÝCH VZORKŮ **41**
6.1 Ultimaker 3 42
6.2 Anycubic kossel linear plus 43
6.3 Zortrax M200 plus 44
6.4 Stratasys Fortus 900mc 45
6.5 Formlabs Form 3 46
7 ROZMĚROVÁ ANALÝZA VÝTISKŮ **48**
7.1 Měření za pomoci 3D CMM 48

7.1.1 Programování CAD/CAM 50
7.1.2 Optimalizace DMIS kódu 51
7.1.3 Proces měření na 3D CMM 54
7.2 VYHODNOCENÍ ROZMĚROVÉ ANALÝZY 55
7.2.1 Formlabs Form 3 – Clear Resin 56
7.2.2 Anycubic kossel linear plus – PLA 57
7.2.3 Ultimaker 3 – PLA 58
7.2.4 Stratasys Fortus 900mc – ABS 58
7.2.5 Zortrax M200 Plus - Z-Ultrat 59
7.3 KOMPARACE MĚŘENÝCH VZORKŮ – ROZMĚROVÁ ANALÝZA 61
7.3.1 Srovnání pozice 2 61
7.3.2 Srovnání pozice 13 62
7.3.3 Srovnání pozice 14 63
7.3.4 Srovnání pozice 15 63
7.3.5 Srovnání pozice 17 64
7.3.6 Srovnání pozice 19 65
7.3.7 Srovnání pozice 25 65
7.3.8 Vyhodnocení rozměrové analýzy 66
8 DT ANALÝZA 67
8.1 PŘÍPRAVA A MĚŘENÍ VZORKŮ 67
8.2 VYHODNOCENÍ VZORKŮ 69
8.2.1 Tahová zkouška – Formlabs Form 3 69
8.2.2 Tahová zkouška – Stratasys Fortus 900mc 70
8.2.3 Tahová zkouška – Zortrax M200 Plus 75
8.2.4 Vyhodnocení tahové zkoušky 78
9 NDT ANALÝZA 80
9.1 MĚŘENÍ ZA POMOCÍ CT 80
9.2 VYHODNOCENÍ NDT 81
9.2.1 NDT analýza Clear Resin 81
9.2.2 NDT analýza ABS s tiskovou vrstvou 0,178mm 81
9.2.3 NDT analýza ABS s tiskovou vrstvou 0,33mm 82
9.3 VYHODNOCENÍ NDT ANALÝZY 83
ZÁVĚR 84
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 85
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 91
SEZNAM OBRÁZKŮ 93
SEZNAM TABULEK 95
SEZNAM GRAFŮ 96
SEZNAM PŘÍLOH 97

ÚVOD

3D tisk a jeho aplikace jsou praktickou a ukázkou běžně využívaných systémů robotiky v běžném životě. Tyto systémy mají ohromný potencionál a nyní se naplno rozvíjí v praxi pro použití v průmyslu 4.0. Ovšem většina publikací se nezaobírá touto problematikou a řeší pouze technologie 3D tisku samotné nebo jsou průvodcem pouze pro nastavení tiskáren. Úkolem této publikace je čtenářům poskytnout více informací a možných řešení k nahlédnutí do této problematiky.

Předmětem práce je vytvoření postupu pro posouzení kvality 3D tiskáren a materiálových vlastností 3D tištěných součástí. Za cíl práce si kladu vytvoření studijního materiálu, který umožní čtenáři pochopit tuto problematiku. Zároveň musí poskytnout dostatečné množství základních poznatků a nutných teoretických znalostí, které se následně aplikují v praktické části, aby mohlo být vybráno nejlepší možné řešení pro danou potřebu.

V teoretické části je shrnuta nutná teorie k probírané problematice, která se zaobírá technologií 3D tisku s vysvětlením, metrologií a jejím rozvojem, softwarovou podporou výroby nutnou pro potřeby složitých výrob a v neposlední řadě i testováním materiálových vlastností.

Praktická část následně přehledně aplikuje získané znalosti z teoretické části. Zaobírá se modelováním vhodných těles pro odzkoušení přesnosti 3D tiskáren a materiálových vlastností užitých materiálů. V praktické části jsou uvedeny technické parametry vybraných tiskáren, které byly využity při testech. Další kapitola podrobně popisuje proces rozměrové analýzy s přihlédnutím na programování měřících přístrojů a přehlednou analýzou získaných výsledků. Poslední dvě části jsou ukázkou analýzy materiálových testů, a to metodou destruktivního a nedestruktivního testování. Ve všech příkladech je vždy srozumitelně vysvětlen závěr z provedených analýz.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

První kapitola bakalářské práce se zabývá technologiemi, běžně nazývanými také 3D tiskem. 3D tisk se využívá nejenom v průmyslu, ale i v lékařství a rozvoj se očekává v biomedicíně. V běžném životě se s 3D tiskem můžeme setkat ve firmách při prototypování dílců a sestav, přes domácí kutily, až po začínající sériový tisk. V první kapitole bude demonstrována historie 3D tisku, technologie 3D tisku s důrazem na FFF, SLA/DPL, SLS, DOD či DMS a v poslední kapitole budou demonstrovány materiály pro 3D tisk. 3D tisk lze definovat jako proces, který je automatizovaný a při kterém z předem zadané digitální předlohy, nazývané jako 3D model, vytváří fyzický model [1].

1.1 Historie

První a druhý průmyslová revoluce přinesla rozvoj nových výrobních procesů, kdy docházelo k přechodu od ruční produkce k výrobě díky strojům či novým způsobům zpracování. V období druhé průmyslové revoluce došlo k zavádění montážních linek což přispělo k zavádění sériové výroby. Třetí průmyslovou revolucí, je nazýváno období, kdy dochází k vzestupu v oblasti 3D tisku, uvádí [2]. 3D tisk se na začátku označoval jako rychlá výroba prototypů, resp. *„Rapid Prototyping*“, což je pojem, se kterým se můžeme setkat i v dnešní době [1].

Rozvoj 3D tisku predikuje výrazné společenské změny, které se budou odrážet v následujících letech různými způsoby. [2].. *„3D tisk se v posledním desetiletí prudce rozvíjí. Dochází k neustálému vývoji tiskáren, a tiskových materiálů. Současně se tiskárny z firemního prostředí rozšířily mezi běžné uživatele – kutily“* [1].

3D tisk se podílí na tvorbě nových výrobních procesů a slibuje změnu v oblasti životního stylu. Výhodou 3D tisku je fakt, že ho lze využívat nejenom ve výrobních centrech, ale i v malých venkovských oblastech, výrobky lze vyrábět spíše kusově, nikoliv velkosériově. K tomu, abychom mohli vytvořit nový výrobek totiž není potřeba povolení správní rady či objednávka od zákazníků, ale stačí nám k tomu vlastní fantazie a představivost, uzavírají [2].

Porovnání vývoje 3D tisku v období 1., 2., 3 průmyslové revoluce a před průmyslovou revolucí interpretuje tabulka níže.

Tabulka 1 Vývoj průmyslu [2]

Před průmyslovou revolucí	**První a druhá prům. revoluce**	**3D tisk / „třetí“ průmyslová revoluce**
Tvorba jednotlivci	Mnoho továrních dělníků	Pracovní síla pracuje dle potřeby
Nízká produkce	Hromadná produkce	Produkce kusů či velkých sérii
Výroba na venkově	Výroba ve městech	Výroba na venkově i ve velkoměstě
Výroba je pomalá a drahá	Výroba levná, ale uniformní	Výroba je lehká a levná

Na základě výše uvedené tabulky můžeme konstatovat, že dochází v oblasti 3D tisku k vývoji. Před průmyslovou revolucí byl 3D tisk tvořen jednotlivci, přičemž docházelo k nízké produkci a výrobě na venkově. První a druhá průmyslová revoluce přispěla k vývoji společnosti a rozvoji měst, což vedlo ke zvýšení produkce a bylo potřeba, aby bylo zaměstnáno více dělníků. A „třetí“ průmyslová revoluce, resp. období, kdy dochází k výraznému vývoji v této oblasti, dochází k výrobě jak na venkově, tak i ve velkoměstě, z toho důvodu, že výroba je lehká a levná a pracovní síla pracuje podle potřeby [2].

1.2 Technologie 3D tisku

V roce 2015 byla vytvořena norma ISO / ASTM 52900, jejíž cílem byla standardizace terminologie a dále klasifikace jednotlivých metod 3D tisku. Celkem bylo vymezeno sedm kategorii procesů [3]. Dle Stříteského [1]. můžeme technologie 3D tisku rozdělit do tří hlavních kategorii, a to podle toho, jaký je tiskový materiál a jak se s ním zachází:

a) **extrudovaný materiál** – materiál, který je vytlačovaný tiskovou hlavou, a to pomocí rozehřáté trysky. Jedná se o technologii FDM, FFF;

b) **tekutý materiál** – materiál, který je vytvrzovaný na předem daných oblastech, jedná se např. o technologii SLA;

c) **jemný prášek** – materiál, který se neroztavuje, ale je sinterován laserem a jedná se o technologii SLS.

Existuje mnoho odlišných technologií 3D tisku [3].

1.2.1 Fused Filament Fabrication – FFF

Jednou z možností je technologie FFF, což můžeme nazvat jako výrobu, která vzniká na základě struny z termoplastu, která je protlačována vyhřívanou tryskou. Tiskárna dále ukládá materiál na předem určeném místě, kde se ochladí a je zde vytvořena pevná část. [3].

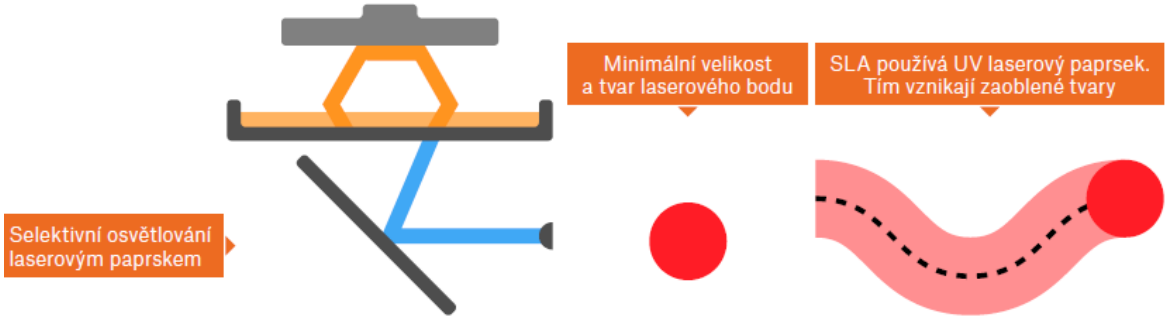
Autoři dále popisují nejčastější technologii výše zmíněného principu, což potvrzuje i Stříteský (2019). Cívku s vláknem vložíme do tiskárny a posuneme do vytlačovací hlavy. Jakmile je dosaženo teploty, kterou požadujeme, motor vlákno přes trysku roztaví. Tiskárna následně pracuje díky vytlačovací hlavě a skládá dole materiál na místo, kde dochází k jeho ochlazení a ztuhnutí. Po tomto procesu dojde k opakování, a to z důvodu sestavení vrstvy po vrstvě [3].

Mezi komponenty FFF tiskáren patří extruder, což je tisková hlava, která slouží k nanášení tiskových vrstev a je složena z šesti dílů: teflonová (PTFE) trubička, chladič, tiskový ventilátor, izolátor, topné těleso a tryska [1]. Autor dodává, že vyhřívaná podložka je součástí každé 3D tiskárny a slouží k tomu, aby nedošlo k deformacím součástek. Dále tuhý rám, který tvoří pevnou konstrukci 3D tiskárny a má vliv na kvalitu tisku. Krokové motory zajišťují mechanické pohyby a umožňují definovat velikost kroku. Řídící jednotka se pak stará o to, aby celá funkční a zabývá se čtením a zpracováním vstupního souboru.

1.2.2 Stereolithography / digital light processing – SLA/DPL

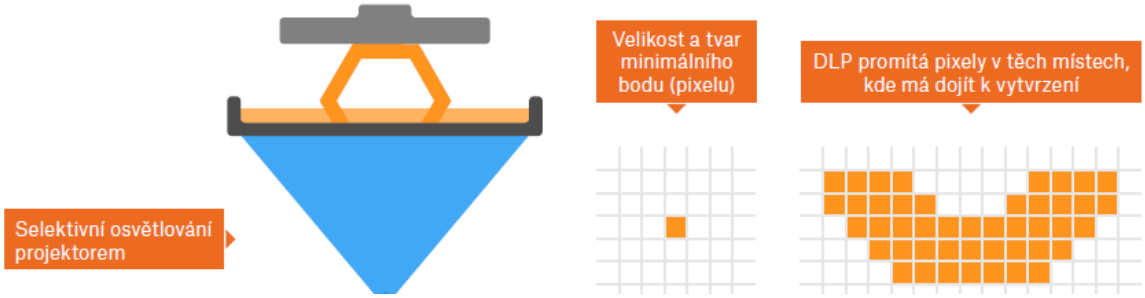
SLA je považována za originální technologii 3D tisku, která byla vytvořena autorem Chalerlesem W. Hull, jenž patentoval technologii v roce 1986 a následně založil společnost 3D System. Podstatou technologie SLA je fakt, že proces využívá zrcadla, nazývány jako galvanometry či galvas s účelem rychlého zaměření laserového paprsku. Jedná se o proces, který rozloží vrstvu po vrstvě na řadu bodů a čar. Existují tři kategorie SLA procesu [1].

a) **SLA – Laser** – dochází k osvícení pomocí UV laser paprsku a to tak, že dvěma zrcadly je paprsek směřován a vykresluje plochu. Doba tisku záleží na tom, kolik objektů se tiskne, viz. obrázek 1.



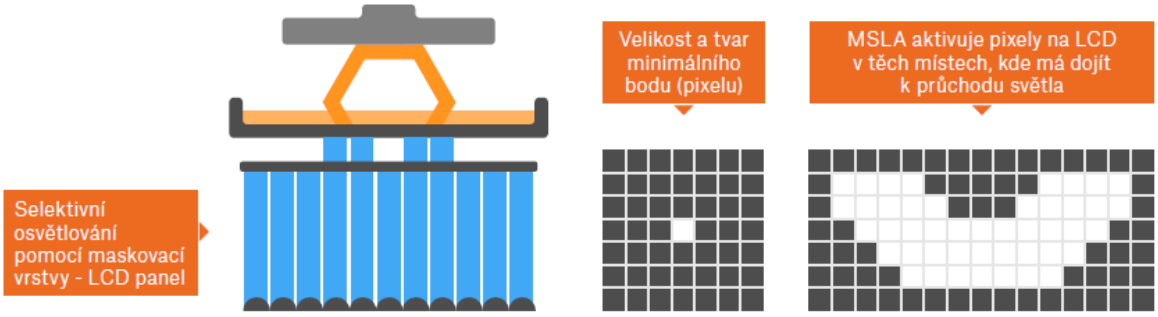
Obrázek 1 SLA laser [1]

b) **DPL – SLA** – dojde k osvícení celé tiskové vrstvy a doba tisku není závislá na počtu tiskových objektů, viz. obrázek 2



Obrázek 2 DPL – SLA [1]

c) **MSLA** – K vytvrzení dojde pouze tam, kde pixely svítí bíle. Jedná se o technologii, která je nezávislá na počtu objektů, které tiskneme, obrázek 3 viz. níže:



Obrázek 3 MSLA [1]

Technologie DLP má poměrně identický způsob výroby, ovšem používá digitální světlo. Zároveň může dosáhnout rychlejšího tisku v porovnání s SLS. Za nevýhodu SLS technologie můžeme považovat délku trvání oproti technologii DLP. [3].

1.2.3 Selective Laser Sintering – SLS

SLS je považována za technologii, která využívá tepelný zdroj k vyvolání fúze mezi práškovými částicemi na konkrétním místě stavební plochy. Takto dochází ke vzniku pevné části dané plochy [3]. Autoři dodávají, že v odvětví 3D tisku s využitím technologie polymerních prášků na výrobu dílů, se nazývá selektivní slinování (spékáním), resp. SLS.

Proces SLS začíná zásobníkem polymerního prášku, ve kterém dochází k zahřívání daného polymerního prášku těsně pod bodem tání daného polymeru. Následně dochází k nanášení tenké vrstvy práškového materiálu na stavební platformu. Dalším krokem je spuštění laserového paprsku, obvykle se jedná o CO_2 laser, přičemž takto můžeme říct, že dochází k selektivnímu slinutí prášku, [3]. Tento proces se opakuje do doby, než jsou všechny součásti zcela vyrobeny. Nesintrovaný prášek zůstává na svém místě, uzavírá autor. Díky tomuto řešení dochází k eliminaci podpůrných struktur. Výsledkem je sintrovaný produkt a nevyužitý prášek, který lze recyklovat za účelem dalšího použití.

1.2.4 Drop on Demand – DOD

Jedná se o technologii, která se porovnává s procesem 2D tisku. Princip je založen na tom, že místo tisku jedné vrstvy inkoustu, tisková hlava tryská stovky drobných kapek polymeru a pomocí UV světla vytvrzuje. Jedná se o technologii, kdy tento typ tiskárny je schopen tisknout více dílů na jeden řádek bez vlivu sestavení. Princip spočívá v tom, že tiskárna této technologie pracuje se dvěma materiály:

a) Stavební materiál;

b) Rozpustný podporový materiál [3].

Tento typ 3D tisku je jedním z nejpřesnějších, dokáže vyrábět díly až s výškou 16 mikrometrů. Údržba tiskárny je velmi důležitá a je taky důležité, aby materiál byl v čisté formě. Při manipulaci je důležité postupovat opatrně, protože díly se mohou deformovat v důsledku tepla, vlhka a slunečního světla, uzavírají autoři [3].

1.3 Materiály pro tisk

S rostoucí oblibou 3D tisku dochází i k rozvoji materiálů, a to v různých barvách a s různými specifickými vlastnostmi. Níže v textu bude představen materiál PLA, PETG, ASA, ale i kompozitní materiály, či materiály podpůrné [1].

PLA je nejčastější strunou, kterou tiskaři používají, a to hned z několika důvodu. Výhodou je fakt, že se z něj dobře tiskne, protože má dobrý povrch výtisku a je vhodný pro tisk malých objektů, při tisku nevzniká rušivý zápach, má malou teplotní roztažnost a jedná se o nejlevnější materiál. PLA je dále tvrdá struna, je teplotně málo odolná a je nejméně odolná povětrnostním vlivům [1].

PEG, ASA a ABS jsou materiály, které jsou velmi odolné, neboť i při mechanickém namáhání se ohnou bez prasknutí. V porovnání ASA, ABS, PETG, PLA – při tisku ASA a ABS vzniká daleko větší zápach, PETG v porovnání s PLA má lesklejší povrch [1]. ABS můžeme považovat za první dostupný tiskový materiál, ASA je dále považována za nástupce materiálu ABS. ASA a ABS umožňuje vyhlazení vrstev acetonem, či lepení jejich části a jedná se o přednost těchto povrchů [1].

Materiál **FLEX** při ohnutí nepraská, ale ohýbá se. **Kompozitní materiál** jako je woodfill či copperfiil) je složen z plastové matrice a plniva ve formě dřevěného či měděného prachu. Nylon je velmi pevný a odolný materiál, který je odolný vůči tření. V neposlední řadě je důležité zmínit i podpůrné materiály, jako je **PVA a BVOH**, které ale Stříteský [1] nedoporučuje. Jedná se o velmi drahé materiály a jedná se o materiály.

2 METROLOGIE

„Změřte vše, co je měřitelné, a udělejte to měřitelné, co tomu tak není.“
(Galileo Galilei)

Druhá kapitola bakalářské práce se zabývá tématem metrologie. V kapitole bude nastíněno krátce z historie metrologie, uvedeny základní pojmy a základní dělení metrologie. V neposlední řadě dojde k vymezení metod měření. Metrologie představuje spojení několika vědních odvětví, za účelem měření či reverzního inženýrství. Vytváří hlavně zpětnou vazbu pro danou výrobu či technologický proces a tvoří základní pilíř v mnoha oblastech. Metrologie se neustálé vyvíjí, neboť dochází k pokroku napříč technologiemi v celé populaci.

2.1 Historie metrologie

Slovo metrologie pochází z řečtiny a vychází ze slova „*metrologia*“ [4], což znamená míra. Touha měřit a porovnávat je předávána od zrodu samotného lidstva a je spojena nejen s technickým rozvojem, ale i s rozvojem ekonomickým. Váhy a míry jsou s lidstvem spojovány od jeho počátku. Rozvoj metrologie nastal v období rozvoje obchodu, stavebnictví a zemědělství. Váhy a míry jsou jedny z prvních vynalezených lidských nástrojů. Za účelem porovnávání a měření bylo nutné, aby došlo ke standardizaci věcí, které lidstvo běžně využívalo, stejně tak, jako je tomu i dnes. Metrologie a standardizace z tohoto důvodu měla vliv na výrobu zbraní k lovu, výrobu kožešin, přerozdělování a obchodování s potravinami [5].

Základní jednotky pro měření délky se od počátků využívaly dle Howrath [6] části lidského těla, a to zejména ruce. Čas se definoval jak roční období, který se ještě dodatečně rozděloval na jednotlivé měsíce. Další dělení bylo dle úplňku až po jednotlivé dny. První takové kalendáře pochází z období Mezopotámie. Stáří artefaktů, které se zde zachovaly se odhadují na 20 000 let. K nejvýznamnějším průkopníkům patří starobylá Egyptská civilizace. Účely časového měření měly největší význam při zemědělské a ekonomické činnosti civilizace.

Egypťané při svých pozorováních došli k závěru, že hvězda *„Psí hvězda“* (*Aschere nebo Canicula*), jež se nachází v souhvězdí Velkého psa, oběhne okolo Země přibližně za

365 dní. První takový dochovaný kalendář byl z doby 4236 let před n. l. Tímto byl vynalezen první praktický kalendář, který je aplikovatelný pro dnešní život [7].

V období sjednocení Horního a Spodního Egypta okolo roku 3000. před n. l. se dle archeologických nálezů traduje nejvýznamnější pokrok v oblasti měření a jeho následné standardizaci. Spolu s rozvojem obchodu v této oblasti středozemního moře a Arabského poloostrova pokračoval rozvoj váhových jednotek. V oblasti délkových jednotek nastal velký rozvoj, jakožto nutnost při výstavbě obrovských stavebních komplexů, s potřebou nauky o geometrii. Následný rozvoj v dalších staletích byl velmi pozvolný. Vždy záviselo na významnějším pokroku lidstva, který nutnost přesnějšího měření a preciznější výroby vyžadoval. [6].

2.1.1 Jednotlivé významné světové počiny

Dané významné pokroky v oblasti metrologie, její organizace a systém, jsou vyobrazeny níže v tabulce 2. V posledních dvou tisících letech byla hlavní hybným momentem metrologie snaha o standardizaci, která vyvrcholila ve 20. století zavedením Soustavy SI. K tomuto významnému kroku se lidstvo postupně přibližovalo. Jeden z nejvýznamnějších počinů bylo zavedení desetinné soustavy, která vedla ke zjednodušení celkového procesu. [8].

Tabulka 2 Vývoj metrologie [5, 8, 6, 4, 9, 10]

rok	Významný počin
732	V Anglickém království král Kent uzákonil používání **Akru**
960	Král Edgar, jako jeden z prvních, projevil snahu o kontrolu procesu měření a deklaroval: *„Všechna měření musí souhlasit s dodržovanými normami v Londýně a Winchesteru.“* (Howarth a kol. 2008, s 23.).
1215	Anglický král John začlenil národní standard pro váhy a míry do Magna Charta, kde je pevně zapsán v právech člověka.
1266	Anglický král Henry III definoval jednotky vah*: unce, libra a penny*
1304	Anglický král Edward deklaroval jednotky v lékařství a převody mezi nimi
1585	Simom Stevin, se svou knihou *„The Tenth“* navrhuje desetinnou soustavu pro využívání vah a mír
1670	vznik metrického systému díky Garlielovi Mountonovi
1790	Thomas Jefferson byl pověřen pro vytvoření desetinného měřícího systému pro Spojené státy.

1795	Francie jako 1. na světě přijala desetinný systém
1799	Vznikly etalony, které pevně definovaly kilogram a metr.
1812	Napoleon Bonaparte dočasně pozastavuje desetinný systém ve Francii.
1824	Jiří IV. V Británii vytváří *„Císařský systém vah a měr“*
1840	Byl obnoven Metrický systém, který byl zrušen Napoleonem Bonaparte, rovněž byl uzákoněn a používán jako povinný.
1866	Používání metrického systému na téměř celém území Evropy
1875	První diplomatická konference za účelem vytvoření jednotné mezinárodní organizace
1893	V USA se uznává metrický systém.
1900	Většina Evropy implementovala do svých zákonů metrický systém
1916	Založená nezisková organizace *„The Metric Association*“ prosazující přijetí metrického systému v USA a dalších zemích
1947	Založení Mezinárodní organizace pro normalizaci, která má za účel zavedení a administrativu norem. (ISO)
1960	Přijetí Soustavy jednotek SI
1970	Třetí průmyslová revoluce znamenala rozvoj CNC strojů i automatizace měření. Počátky digitalizace procesu i měření
1983	Nová definice délkové jednotky metr. Na 17. Generální konferenci o vahách a mírách byl definován jako délka dráhy, kterou urazí světlo ve vakuu po dobu 1 kmitu atomu.
1999	Dohoda MRA – představovala průlom v mezinárodním obchodě. Jednalo se o dohodu vzájemného uznávání certifikace, vyřešila tak, dlouhodobý mezinárodní problém.
2013	Zrod Průmyslu 4.0 znamenal prohloubení digitalizace, zjednodušení výrobních systémů, zrod autonomních systémů v procesech výroby.
2018	Nová definice jednotek, která je čistě závislá na fyzikálních konstantách

2.2 Moderní metrologie

Základ moderní metrologie nastal v 19. století, které bylo stoletím páry. Rozvoj umocnilo zavedení desetinné metrické soustavy a první průmyslová výstava. Průlom nadešel v Paříži roku 1875, kde se uspořádala diplomatická konference o metru. Této konference se účastnilo

17 států a všichni účastnící podepsali dohodu *„Metrická konvence*“. Účastníci se dále dohodli na vytvoření a zabezpečení instituce: „*Bureau International des Poids et Mesures“ (dále: BIPM),*[1] [6].

Další nejvýznamnějším krokem bylo v roce 1960 přijetí Soustavy SI, která se skládá ze základních 7 jednotek. Členské státy tuto skutečnost přijaly a následně implementovaly do svých vlastních zákonů [6].

Posledním obrovským skokem dopředu bylo přijetí definic jednotek Soustavy SI navázáním na přírodní konstanty. Tento krok začal od roku 2011 přípravou a vypracováním detailních definic. Přijetí tohoto významného kroku nastalo v listopadu 2018 ve Versailles. Na základě tohoto kroku již nebylo za potřebí fyzického etalonu a všechny jednotky jsou reprodukovatelné díky fyzikálním jevům [10].

Moderní metrologie a její organizace se zabývá hlavně třemi částmi [6]:

1. definice jednotek, které musí být fyzikálně definované;
2. uskutečněním samotného měření za využití fyzikálních jevů;
3. realizace řetězce na návaznost a administrativu tohoto procesu směrem k běžným uživatelům

2.2.1 Základní dělení metrologie

a.) **vědecká metrologie** – zde patří vývoj, výzkum a rozvoj etalonů. Rovněž i organizační stránka a rozvržení metrologie na mezinárodní a následně národní úrovni jednotlivých členských států;

b.) **průmyslová metrologie** – obstarává funkčnost jednotlivých podnikových etalonů a měřidel. Aktivně se zabývá návazností těchto měřidel jednotlivých podniků na kalibrační laboratoře a národní etalony;

c.) **legální metrologie** – zde spadají všechny měřidla, která mají návaznost na ekonomické transakce [8].

[1] Mezinárodní úřad pro váhy a míry

2.3 Základní pojmy metrologie

Základní pojmy vyskytující se v oboru metrologie či měření jsou přesně definovány mezinárodními a národními normami. Popisují samotný definice jednotlivých pojmů metrologie a procesu měření [6].

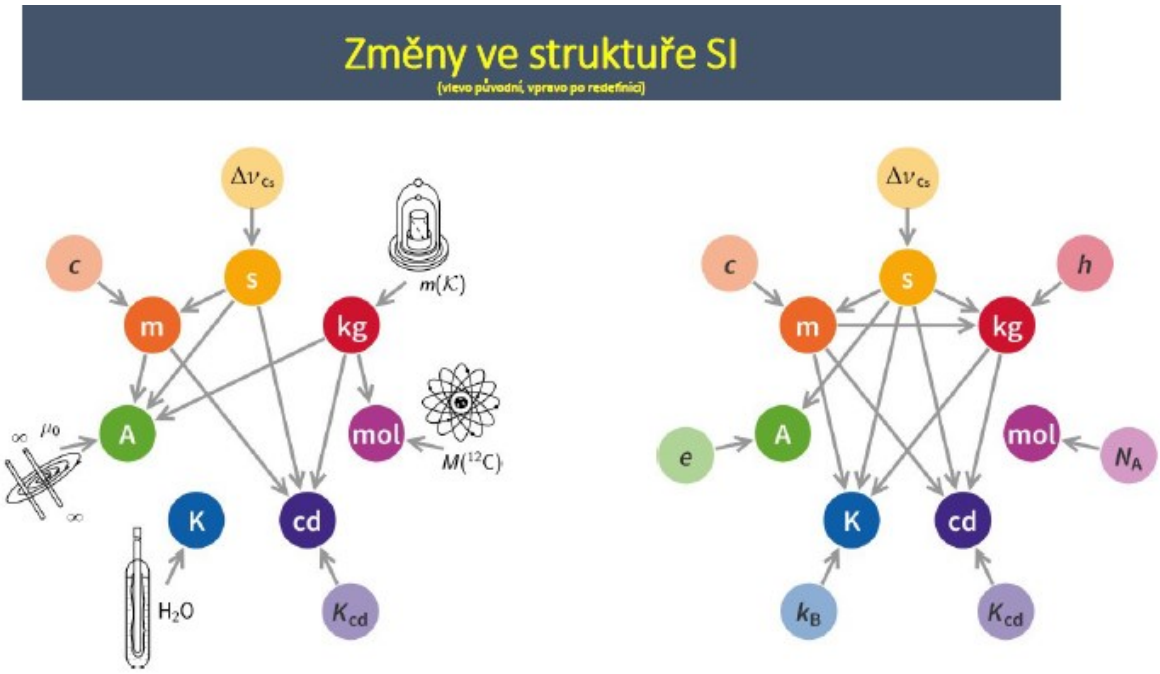
- **veličina** – může představovat vlastnost hmoty či jevu číselnou hodnotou a referencí;
- **měřidlo** – specifické zařízení, které slouží k určení hodnoty měřené fyzikální veličiny;
- **jednotka** – představuje míru fyzikální veličiny;
- **hodnota** – je přímo závislá na jednotce fyzikální veličiny a představuje její množství, je velmi důležitá hlavně pro správné porovnání verdiktu měření;
- **etalon** – představuje uchování a zhmotnění dané veličiny. Hlavní význam etalonu je při uchování a následném přenosu fyzikální veličiny na další měřidla. Při procesu uchovávání se dopodrobna rozumí všechny úkony vedoucí k uchování těchto veličin a jejich metrologických charakteristik;
- **návaznost** – jedná se o nepřerušený řetězec porovnávání, tento proces musí probíhat v souladu se normami a podmínkami vhodnými pro tento proces. Vždy se porovnává měřidlo či etalon s nižší rozlišovací hodnotou vůči větší hodnotě. Při tomto procesu musí odchylky zjištění při porovnávání být v souladu s dovolenými úchylkami;
- **kalibrace** – specifický proces, při kterém se za určitých podmínek porovnává měřidlo s etalonem, jenž má minimálně o řád přesnější hodnotu porovnávané veličiny. Naměřené hodnoty se následně porovnávají s dovolenými úchylkami;
- **nejistota** – představuje odhad a váže se na rozmezí daných hodnot při měření, v níž právě se nachází skutečná hodnota. Nejistoty se vždy zaznamenávají ke kalibracím a někdy k běžnému procesnímu měření;
- **zkoušení** – specifický technický postup, který je určen k zjištění vlastností daného předmětu nebo procesu [6].

2.4 Soustava jednotek SI

Soustava jednotek SI, jak ji známe v dnešní podobně, byla přijata roku 1960 na 11. Generální konferenci pro váhy a míry. Tato soustava vznikla jako logický vývoj předchozích systémů,

a to systémů MKSA z roku 1946 s cílem doplnit a zdokonalit systém o chybějící jednotky. Záměrem bylo rovněž systém zjednodušit. 16. listopadu 1990 v České republice vzešel v platnost zákon o metrologii č 505/1990 Sb., v němž bylo přijato povinné využívání Soustavy jednotek SI. V České republice legální a průmyslovou metrologii zaštituje Český metrologický institut, který spadá pod Ministerstvo průmyslu a obchodu. [8].

Definice veličin v posledních letech prošla obrovskou změnou, která má za úkol opětovnou definici základních jednotek. Účelem těchto změn byla aplikace na pevně vázané vlastnosti fyzikálních jevů, navíc jsou fyzikální veličiny navzájem provázány. Táto zásadní změna byla přijata 16. listopadu 2018 a následně vstoupila v platnost 20. května 2019. Nyní tuto změnu administrativně zpracovávají jednotlivé členské státy ve svých vlastních zákonech a novelách zákonů o metrologii. Táto zásadní změna v definici Soustavy SI je zobrazena na obrázku 4 [10].



Obrázek 4 Změny ve struktuře Soustavy SI [11].

V levé straně je vidět původní změní, vpravo se nachází nová přijatá definice Soustavy SI.

2.4.1 Dělení jednotek SI

Jednotky SI se přehledně dělí do čtyř kategorií a to sestupně, dle jejich významu a důležitosti [8].

- **Základní jednotky SI** – základem je jednotka základní veličiny v dané soustavě. Definice a samotné provedení veličiny SI podléhá metrologickému výzkumu a tomu právě jak takový výzkum dokáže dosáhnout nejen přesnější definice ale i samotné realizaci dané jednotky. Soustava SI je vyobrazena v tabulce 3 [8].

Tabulka 3 Soustava SI [8]

Veličina	***Základní jednotka***	***Značka***
délka	*metr*	*m*
hmotnost	*kilogram*	*kg*
čas	*sekunda*	*s*
elektrický proud	*ampér*	*A*
termodynamická teplota	*kelvin*	*K*
látkové množství	*mol*	*mol*
svítivost	*kandela*	*cd*

- **Odvozené jednotky SI** – jsou odvozeny od základních jednotek Soustavy SI a to v souznění s fyzikálními vlastnostmi a vztahy mezi určitými veličinami. Vznikají ze základních jednotek SI jakožto algebraické výrazy v určitých tvarech. Obvykle se při tomto procesu využívají součiny mocnin základních tvarů daných jednotek. Obrovské využití nachází v praxi, a to pro lepší využití spojenou s praxí. Například plocha či objem, obě jmenované vychází ze základní jednotky pro délku a to metr [6].

- **Odvozené jednotky SI se zvláštními názvy a značkami** – Tyto jednotky vznikly složením základních jednotek Soustavy SI spolu s jednotkami odvozenými. Například jednotka hertz [6].

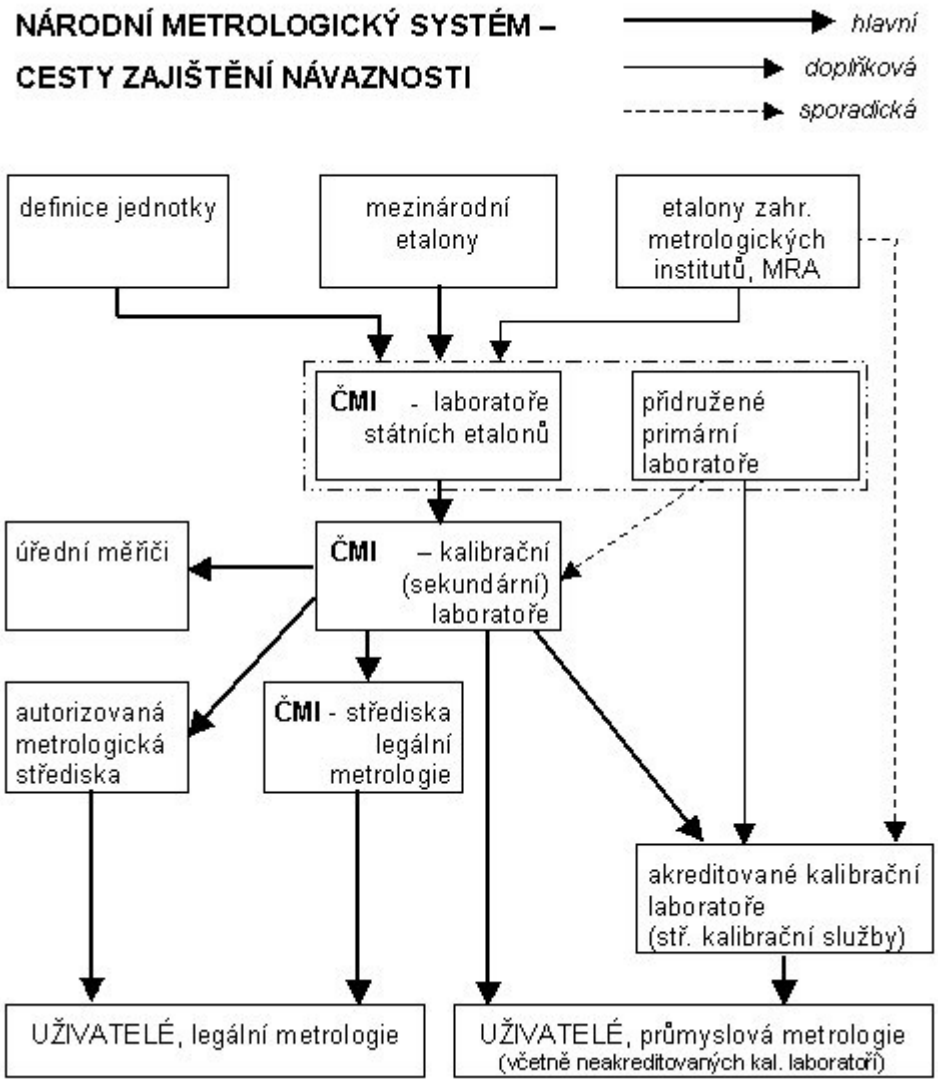
- **Odvozené** – Odvozené jednotky jsou obyčejně vyjádřeny za pomocí kombinací základních jednotek a odvozených jednotek se zvláštními názvy. Příklad: katal, jednotka veličiny katalytické aktivity [6].

2.5 Schéma návaznosti a kalibrace

Návaznost nám představuje schopnost přenášet veličinu od jejích základní fyzikální definice až ke koncovému uživateli. Tento proces se využívá napříč celou metrologií. Provází činnost

kalibrace jednotlivých měřidel a etalonů. Vždy se přenáší fyzikální vlastnost či jev z vyššího tedy přesnějšího řádu na nižší kategorie [8].

Základní myšlenka je, že se jedná o nepřerušený řetězec pevně specifikovaný Mezinárodním úřadem pro váhy a míry [8]. Toto provedení je zobrazeno v obrázku 5.



Obrázek 5 Řetězec návaznosti [12].

Tento řetězec je aplikován následně v praxi, samotné firmy, dle norem a mezinárodních úmluv jsou nuceny tento řetězec dodržovat [8].

Veškerá kalibrace či srovnání musí probíhat za předem definovaných podmínek, například kalibrace měřidel za pomocí etalonů v kalibrační laboratoři za podmínek daných normou pro dané měřidlo [8].

Členské státy mají svůj vlastní metrologický systém, který se podílí na tomto řetězci. V České republice tuto skutečnost spravuje Český metrologický institut, který zajišťuje i edukativní činnost nad celým systémem v České republice [8].

2.6 Metody měření v závislosti na druhu snímání

Proces samotného měření můžeme rozlišovat podle několika kategorií, ovšem nejvíce se pro praktické využití dělí dle metod měření na dvě zásadní skupiny: kontaktní a bezkontaktní měření [13].

Při využívání procesu měření ve výrobě se vyžaduje aplikovat nejen vhodná metoda měření, ale je i vyžadována přesnost a rychlost měření. Tyto parametry jsou naprosto důležité při určení vhodné metody [13].

Nejdůležitějším parametrem je dodržení *základního metrologického pravidla*: aplikovaná metoda měření musí být minimálně o řád přesnější něž je řád nejpřísnější tolerance vyhodnocovaného rozměru [14].

2.6.1 Kontaktní měření

Kontaktním měřením se myslí měření, při kterém dochází k přímému styku měřicího přístroje a měřeným objektem. Princip veškerého kontaktního měření je založen na mechanickém dotyku snímaného objektu. Při tomto principu se nesmí opomenout síla, která působí na daný snímaný objekt [13].

Při snímání záleží výsledek nejen na zvolené metodě výpočtu, ale i rovněž na metodě snímání, pokud použijeme jednotlivé body pro snímání či skenování, které nám vytvoří konturu. Z jednoduchých dílenských měřidel pro kontaktní měření se nejčastěji využívá posuvné nebo mikrometrické měřidlo. Přesnosti měření dílenským měřidlem je dána především obsluhou tohoto přístroje. Nelze zde garantovat přítlačnou sílu ani výbornou opakovatelnost toho měření [13].

2.6.2 Bezkontaktní měření

Bezkontaktní měření je zdaleka nejstarší technikou, která se pro měření využívá. První aplikací bezkontaktního měření se považuje všeobecně lidské oko. Bezkontaktní měření se vyjímá oproti kontaktnímu svojí rychlostí, ovšem může dojít k problémům s měřením míst objektů kde se nemůže dostat světlo [13].

Typickým zástupce je měření za pomocí optoelektronického senzoru. V dnešní době roli měřícího média převzali optoelektronické senzorické systémy. Tyto senzorické systémy jsou využívány z pravidla nad měřeným objektem a využívají se v kombinaci 2 os přístroje, vzniká tak 2D obraz, který můžeme dále vyhodnocovat. Fungování tohoto měření závisí na zvolení vhodného světelného zdroje, jehož zdroj světla se odráží od povrchu měřeného objektu. Odražené světlo následně dopadne na senzor, například na hranový senzor. Poloha snímaného bodu se určí následně za pomocí hranového senzoru kombinací s aktuálními souřadnicemi stroje a souřadnicí daného snímaného bodu [13].

3 SOFTWAROVÁ PODPORA VÝROBY

Třetí kapitola se zaobírá historií, zrodem a aplikací CAD/CAM systémů. Rozvoj této technologie nastal s dostupností mikročipů a s jejich následnou integrací do osobních počítačů. Samotná aplikace CAD[2] spadá do extrémně širokého spektra využití, které má dopad na každodenní život [15].

Vývoj systémů pro podporu výroby odstartovalo vývoj prvních NC (číslicově řízených strojů) strojů. NC stroje nahradily běžné obráběcí stroje z důvodu přesnosti a opakovatelnosti dílců, které nejčastěji z konstrukčního hlediska měly několik děr o přesných pozicích a hloubkách. Hnací silou byl začátek Studené války, vývoj plně financovalo letectvo, kvůli potřebě výroby přesných strojních součástí do leteckého průmyslu nové generace letadel s nadzvukovou rychlostí. První NC stroj byl tak představen 1949 na MIT[3] Byly zde využity zkušenosti z automaticky řízených zbraní za pomocí radarů, které MIT za 2. sv. války vyvinulo pro armádu USA [16].

Vznikla i následná spolupráce mezi MIT a letectvem USA na dalším vývoji, letectvo tento vývoj z velké části financovalo. Základní myšlenou byla stavba komplexních strojů pro víceosé obrábění, bylo upřednostňováno jednoduché vrtání otvorů. Další z požadavků bylo poziční rozlišení stroje 0,0005 palce a čtení uloženého programu. Takto vznikla myšlenka CNC stroje a nutnost CAM/CAD softwaru. Vedoucím pracovníkem ve výzkumu MIT a obrovským průkopníkem filozofie byl Douglas T. Ross [16].

3.1 CAM software

CAM[4] technologie je založena na principu, kdy se na externím počítači předem naprogramují pohyby výrobního stroje, následně se tento program vloží do stroje a program tak určuje pohyby stroje [15].

Prvním milníkem bylo vyvinutí PRONTO, a to pracovníkem Patrickem Hanratty na MIT v USA a to roku 1957. Tento systém byl použit u prvních aplikací CNC stroje [15].

Za nedlouho poté bylo kód upraven do podoby prvního G-kódu, na kterém dodnes běží většina výrobních strojů. Tento kód výrobní stroj následně načítal za pomocí děrné pásky. Nejstarší aplikace těchto strojů následně našly uplatnění v leteckém, lodním a

[2] Počítačem podporované navrhování
[3] Massachusetts Institute of Technology
[4] Počítačově podporované obrábění

automobilovém průmyslu. Obrovský posuv CAM nastal v letech 1966-1968, kdy se prostřednictvím pokročilejší výpočetní techniky objevily aplikace 3D povrchů. Tento systém UNISURF byl vyvinut ve Francii pro automobilku Renault a to autorem Pierrem Bézierem. Následný posuv nastal s příchodem osobních počítačů od IBM v roce 1981. Příchod technologicky a ekonomicky dostupné platformy pro vývoj následně urychlil veškerý vývoj v této oblasti [17].

3.2 CAD software

Jedná se o druhy programů primárně zaměřené na design a navrhování součástek a hotových sestav určených především pro strojírenský, elektrotechnický a stavební průmysl. Prvním zrodem CAD softwaru se považuje vytvoření *„Sketchpad“* na MIT Ivanem Sutherlandem v roce 1963. Šlo o první software určený pro počítačový design. Uživatel mohl za pomocí elektronického pera a ikon nacházejících se v panelu programu kreslit svůj návrh [17].

Následující vývoj je plně spjat se společným vývojem CAD/CAM systémů a jeho aplikací v jednotlivých odvětvích a průmyslových zaměřeních. V 70. letech nastala potřeba vytvořit software, který by kromě práce ve 2D umožnili i práci ve 3D. Tuto potřebu vyřešil ihned SynthaVision, který umožnil modelování ve 3D, a tak v roce 1971 byl vyvinut systém ADAM, který byl naprogramován ve Fortranu právě zakladatelem myšlenky Patrickem Hanratty. Byl vytvořen tak, aby program fungoval na 16 a 32bitových počítačích. Roku 1981 byl vyvinut software CATIA francouzskou firmou Dassault Systemes, která aplikace vyvinuté primárně pro své sesterské firmy následně uvolnila pro komerční použití [18].

Konec 80. a počátek 90. let 20. století znamenal revoluci v CAD, zvláště rozšíření do vzdělávacího systému a softwaru AutoCAD, byl označen jako *„obrovský milník“*. Samotní vývojáři toho systému se rozhodli sdílet principy a jádra tohoto programu. První průkopníkem v oblasti objemového modelování bylo vydání Pro/ENGINNER, který byl založen na parametrickém modelování. Tento princip byl aplikován na většině modelovacích programů, které v dnešní době známe [19].

V současné době CAD software je implementován do produktů PLM[5] (Product Lifecycle Management), díky tomuto řešení nastane digitální kontrola nad celým procesem

[5] Product Lifecycle Management

výroby. Hlavní předností využití těchto softwarů a jejich aplikací je predikce a analýz napříč výrobními systémy [20].

3.3 Současný vývoj a budoucnost CAD/CAM digitalizace

Se stále větší a větší potřebou přesnější výroby, optimalizace výroby, analýzy a v neposlední řadě i analýzou na vnější vlivy například životní prostředí vzrůstá vliv na PLM všeobecně na celou výrobu. Důležitost 3D CAD a obecně digitálních informací poroste i v příštích letech. V současné době se 3D CAD data využívá při rychlé či plně automatické tvorbě 2D standartní výkresové dokumentace, v neposlední řadě je výhodou propojení těchto systémů. Podle vytištěných výkresů se ve výrobě provádí výrobní či finální kontrola výrobků a sestav. V současné době probíhá snaha i o digitalizaci v této oblasti, a to z důvodu urychlení, ale rovněž pro plnou digitalizaci výroby [20].

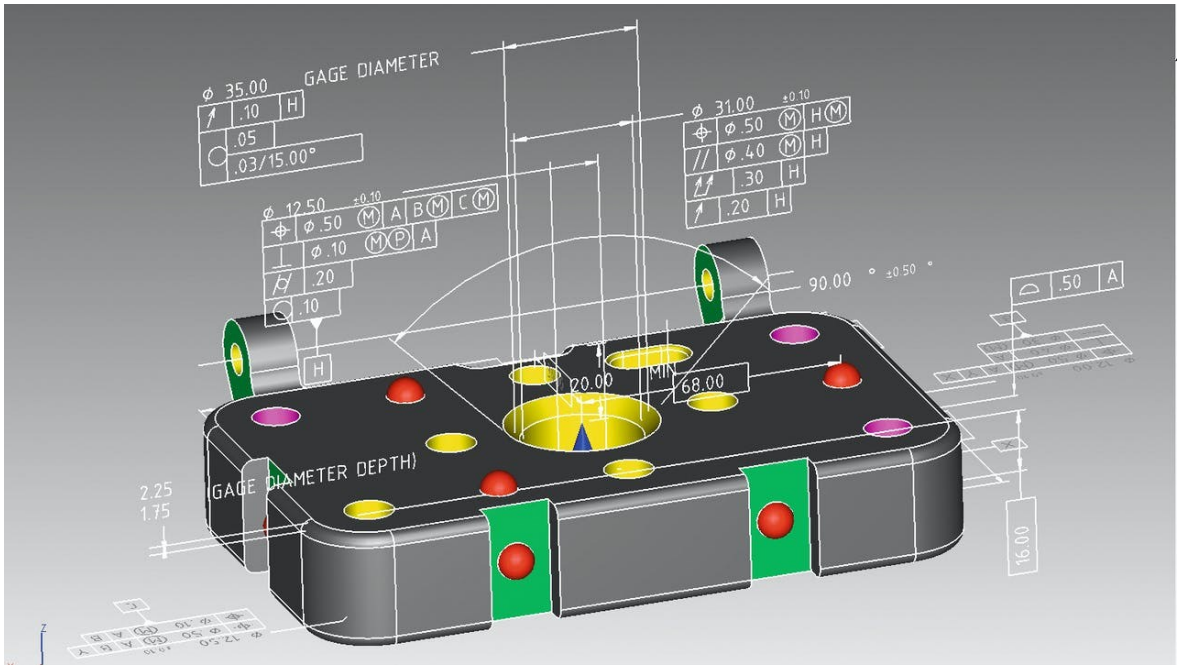
Většina firem se snaží i o digitalizaci a 3D výkresovou dokumentaci, tzv. **PMI** [6]. Tento způsob nové úrovně výkresové dokumentace lze aplikovat nejen pro výrobu, ale rovněž pro kontrolu výrobků přímo do měřících programů, tento koncept PMI s kombinací 3D CAD daty můžeme vidět na obr. 6 [20].

S digitalizací výroby a následnou simulací reality se dnes můžeme setkat za pomocí VR[7] nebo AR[8]. Již několik let probíhá takto výcvik pracovníků, jejichž výcvik je extrémně drahý nebo nebezpečný. Táto technologie ve spojení s CAD/CAM je jeden z prvků průmyslové revoluce 4.0. Zvláštní aplikace jsou především v automobilovém průmyslu [21].

- **VR prototypování** – dochází zde k extrémní úspoře času a prostředků, které by byly určeny pro vytváření a zkoušení těchto výrobků. Příkladem takové aplikace je předvýrobní návrh a schvalování.
- **VR pro výcvik** – příklad této aplikace je urychlení výcviku pracovníků a jejich ochrana zdraví při zaškolovaní budoucího výkonu povolání. Příkladem takového využití může být výcvik techniků či i uchazečů o řidičské oprávnění.
- **VR aplikace pro finální distribuci** – finální zákazníci mohou využít tuto vlastnost nejen v automobilovém průmyslu ale obecně i v celém spektru distribuce. Zákazník

[6] Product Manufacturing Information
[7] Virtual Reality
[8] Augmented Reality

může tímto způsobem prohlédnout interiér a exteriér ve 3D a zvolit tak nejlepší konfiguraci [21].



Obrázek 6 3D CAD dat s integrací PMI v měřícím software Calipso [22]

4 TESTOVÁNÍ MATERIÁLŮ

Tato kapitola bude představovat úvod do materiálového testování a hodnocení jejich vlastností. Každý materiál má naprosto jedinečné mechanické vlastnosti. Rovněž zde bude vysvětlen úvod do destruktivního a nedestruktivního testování. Tyto druhy testování se uplatňují v praxi nejen pro samotné materiálové testování, ale i na aplikace pro samotné rozměrové měření či další dílčí analýzy. Aplikace těchto analýz jsou následně praktickou ukázkou využití metrologie.

4.1 Proces testování materiálů

Hlavním cílem testování mechanických vlastností materiálů je určit vnitřní napětí a jejich možné užitečné zatížení, kterým dané součástky mohou být vystaveny. Můžeme tak předejít zatížením, která mohou způsobit nevratnou a závažnou poruchu. V mechanice materiálů se zkoumá napětí uvnitř vnitřní struktury, které má vliv na užitečné zatížení. Při zatížení materiálů dochází k deformacím, které mohou být velmi závažné a nevratné pro konstrukci. Při analýze se nejčastěji využívají zkoušky tlakové a tahové, které nám slouží k ověření zkoumaných materiálů. Ovšem součástí toho jsou i další dílčí analýzy [23].

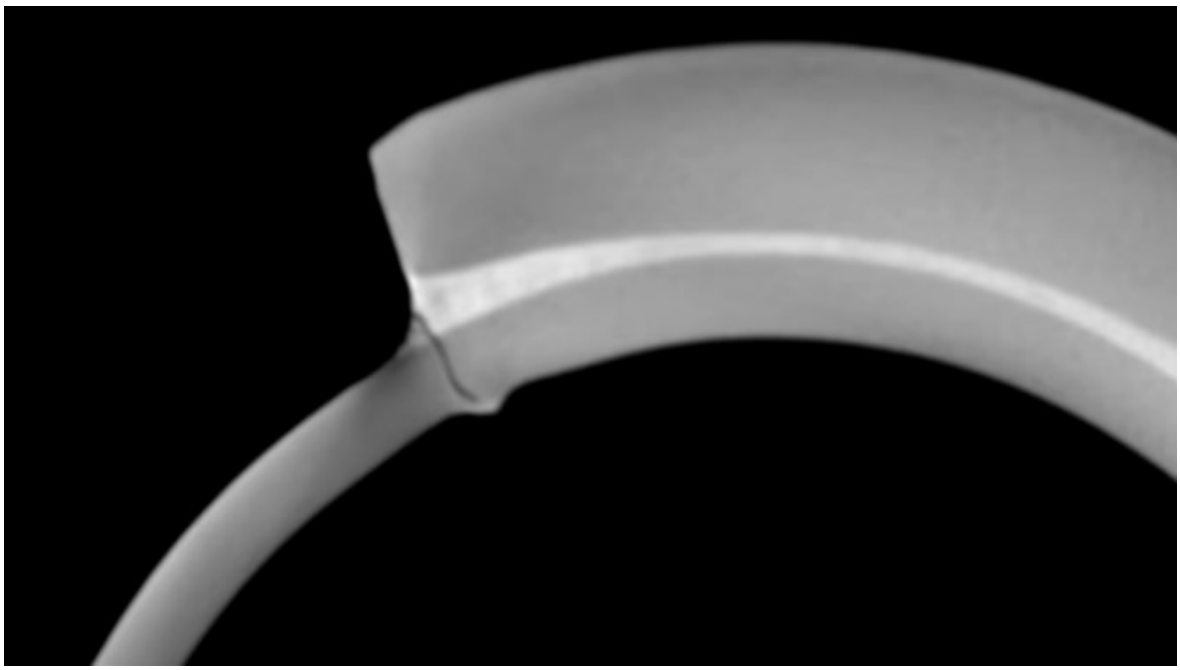
4.2 Nedestruktivní testování materiálů

Obecná definice NDT[9] je proces zkoušky, při které se testovaný objekt nijak nezničí nebo nezmění jeho vlastnosti. Nedestruktivní testy se provádí k měření mnoha charakteristik daného objektu. K těmto parametrům, patří: analýza vnitřní struktury, měření skrytých rozměrů, obsahy slitin a dalších nejrůznějších parametrů. NDT se v mnoho oblastech využívá pro určení skrytých vad, které mohou mít vliv na fatální selhání součástek. Právě toto mělo za následek obrovský rozvoj v bezpečnosti a spolehlivosti namáhaných součástek. Tyto technologie tak přispěly k bezpečnějšímu světu, jak jej dnes známe. V posledních desítkách let právě proto NDT zaznamenalo obrovský rozvoj z hlediska inovací. Mezi obrovskou výhodu NDT patří i to, že daná součástka a sestava může být dále aplikována v praxi [24].

V průmyslové oblasti NDT jsou praktické aplikace především v oblasti: počítačové tomografie, optických měřících přístrojů a multisenzorových přístrojů. Za pomocí počítačové tomografie můžeme zaznamenat nejen vnitřní, ale rovněž i vnější geometrii

[9] Nedestruktivní testování

daného objektu. Základním principem je, rentgenové záření, které proniká měřeným objektem. Toto záření je následně částečně absorbováno měřeným objektem a zbytky záření tohoto záření dopadají na detektor. Možnost použití této technologie je tak omezená hustotou zkoumaného objektu a výkonem rentgenového zářiče [13].



Obrázek 7 NDT analýza trhliny svaru [25]

Na obrázku 7 můžeme vidět praktickou ukázku NDT analýzy, ve které lze vidět prasklina v místě sváru ocelové trubky. Tento test vznikl za použití počítačové tomografie [25].

4.3 Destruktivní testování materiálů

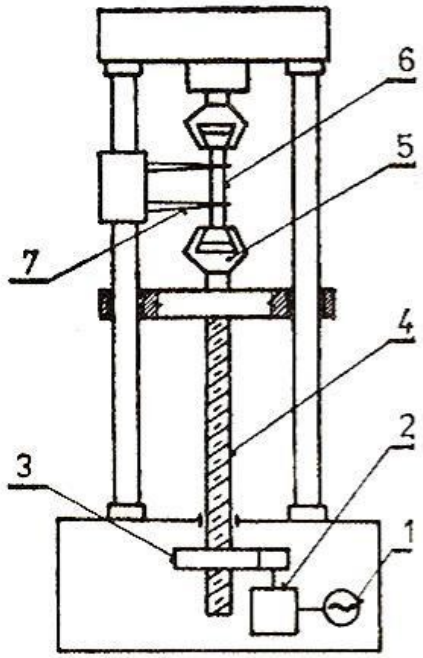
Testy za pomocí DT[10] vychází z normovaných součástí, které jsou stanoveny normami. Mezi tyto patří zkoušky: zjišťování opakovaného namáhaní, zkoušky tvrdosti materiálu, zkoušky tahu a zkoušky tlaku [26].

4.3.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška materiálů je prováděna na trhacím přístroji, který umožňuje provádět zkoušky přesně a bezpečně. Při zkoušce musí být dodržena konstantní rychlost testu a je sledována tahová deformace. Obvykle při této zkoušce sledujeme parametr „*meze pevnosti",* která určuje maximální dosažené napětí [26].

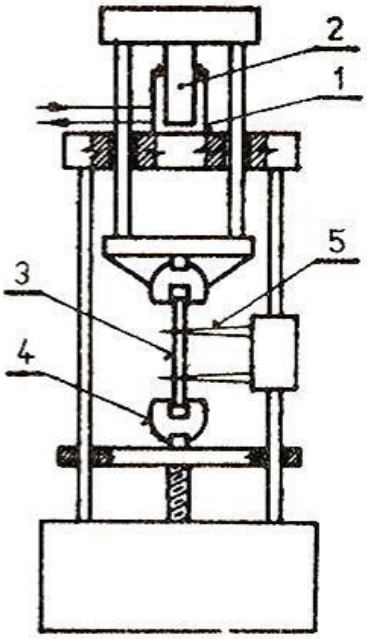
[10] Destruktivní testování

Zkoušky tahem v České republice u polymerních materiálů jsou normovány podle normy ČSN EN ISO 527-2. Zkouška je buď prováděna na mechanickém nebo na hydraulickém trhacím stroji, které jsou přímo pro tyto zkoušky navrhnuty, přístroje můžeme vidět na obrázku 8 [27].



Mechanický univerzální trhací stroj

1 — elektromotor, 2 — převodovka, 3 — ozubené kolo s maticí, 4 — pohybový šroub, 5 — upínací hlava, 6 — zkušební těleso, 7 — snímač prodloužení zkušebního tělesa

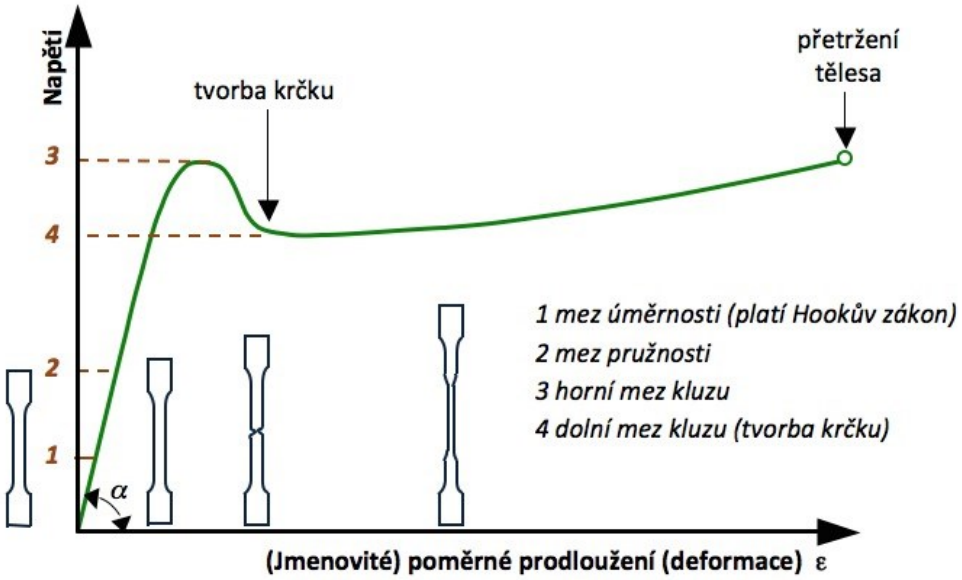


Hydraulický univerzální zkušební stroj

1 — hydraulický válec, 2 — píst, 3 — zkušební těleso, 4 — upínací hlava, 5 — snímač prodloužení zkušebního tělesa

Obrázek 8 Zkušební přístroje pro tahové zkoušky [27]

Průběh zkoušky je obvykle znázorněn graficky, pro lepší pochopení ukázka je průběhu zkoušky znázorněna společně i s tvarem testovaného tělesa na obr. 9 [28].



Obrázek 9 Znázornění deformační křivky a tvaru testovacího tělesa [28]

Při zkoušce tahem se následně určují následující parametry [27]:

- **Mez úměrnosti** – do určitého bodu je prodloužení zkoumaného tělesa lineární a nevzniká trvalá deformace tělesa.
- **Mez pružnosti** – deformace se roste rychleji přestává býti lineární, ale deformace je stále pružná.
- **Horní mez kluzu (napětí na mezi kluzu)** – zkušební těleso v tomto bodě získá trvalou deformaci, nedochází ke vzrůstu napětí ovšem deformace se stále zvětšuje, u některých materiálů to může být jen těžce pozorovatelné či téměř neměřitelné.
- **Dolní mez kluzi (napětí na mezi pevnosti)** – jde o maximální napětí, které se naměřilo v průběhu zkoušky testovaného vzorku [27].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

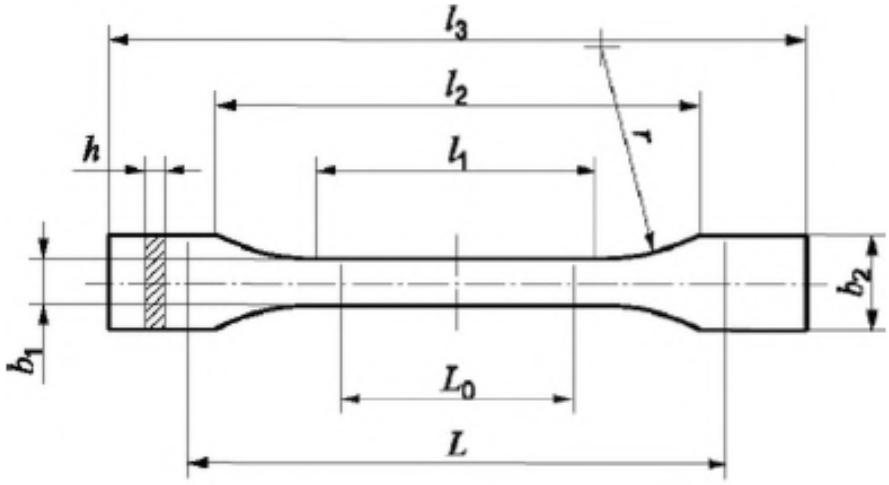
5 NAVRHUTÍ VHODNÝCH MODELŮ PRO TESTOVÁNÍ

V této kapitole je detailně vysvětlen proces návrhu modelů určených k testování pro rozměrovou analýzu a mechanickou analýzu s kombinací NDT analýzou. Při jednotlivých dílčích návrzích budou využity normy pro tento proces, a navíc je rovněž vytvořen výkres součástky pro rozměrovou analýzu, která je pro měření naprosto nutná. Veškerý návrh modelů a výkresu je prováděn za pomoci programu pro parametrické modelování Inventor Professional 2021 od firmy Autodesk.

5.1 Návrh modelu pro mechanické testování materiálu

Model pro mechanické testování musí být navrhnut v souladu s normami určenými pro testování mechanických vlastností. Proto byla zvolena norma určena pro testování tvářených plastů za pomocí trhacích přístrojů. Pro tuto možnost byla vybrána norma: ČSN EN ISO 527-2, která vychází z evropské normy: EN ISO 527-2:2012.

Zkušební tvar je tvarem oboustranných lopatek typu 1BA, který se používá pro vstřikované víceúčelová zkušební tělesa. Je nezbytné, aby proběhla kontrola připravených vzorků, aby byly všechny zkušební vzorky ve stejném stavu. Kóty tělesa lze vidět na obr. 10 [29].



Obrázek 10 Kontrolované rozměry zkušebních těles [29]

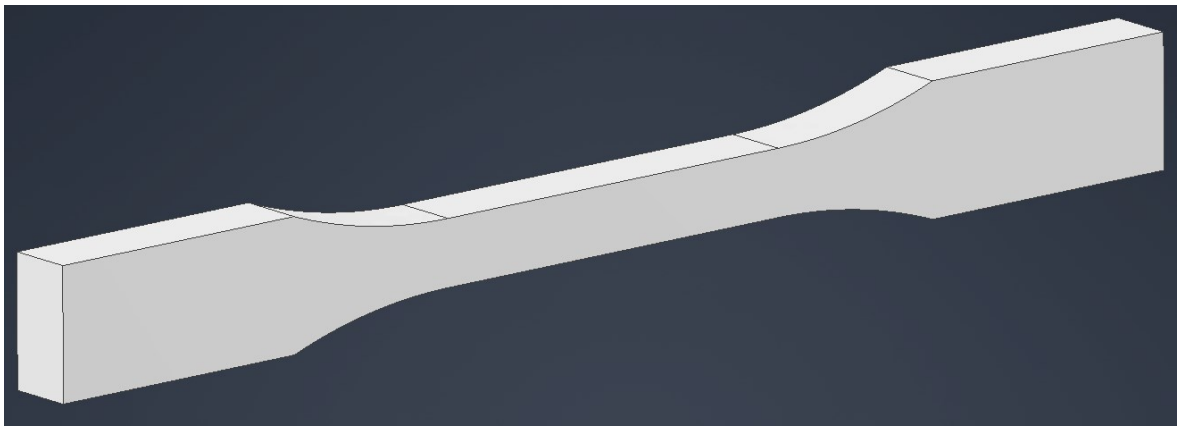
Po prostudování všech možností tiskáren a jejich možností v tiskových plochách, byly zvoleny rozměry dle tabulky 4, sloupec 1BA.

Tabulka 4 Rozměry zkušebních těles daných normou [29]

Rozměry v milimetrech

	Typ zkušebního tělesa	1BA	1BB
l_3	Celková délka	≥ 75	≥ 30
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	30,0 ± 0,5	12,0 ± 0,5
r	Poloměr	≥ 30	≥ 12
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	58 ± 2	23 ± 2
b_2	Šířka konců	10,0 ± 0,5	4 ± 02
b_1	Šířka zúžené části	5,0 ± 0,5	2,0 ± 0,2
h	Tloušťka	≥ 2	≥ 2
L_0	Počáteční měřená délka	25,0 ± 0,5	10,0 ± 0,2
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$l_2 {}^{+2}_{0}$	$l_2 {}^{+1}_{0}$
POZNÁMKA Zkušební tělesa typu 1BA a 1BB jsou tvarově úměrná typu 1B, s poměrem zmenšení 1:2 popř. 1:5, s výjimkou tloušťky.			

Navržený model je vidět na obr 11, tento model byl následně vytisknut na jednotlivých tiskárnách za účelem komparace jednotlivých materiálů použitých k 3D tisku. Tímto řešením se vyloučila možnost jiného procesního nastavení tiskárny.



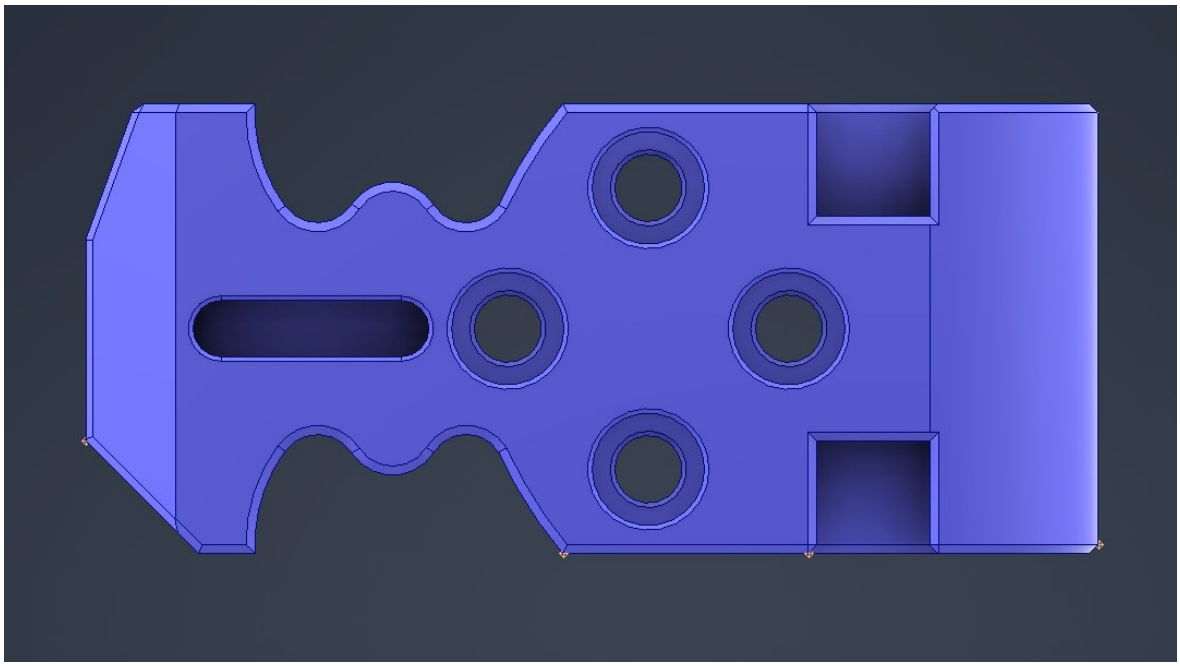
Obrázek 11 Kontrolované rozměry zkušebních těles

5.2 Navrhování součástky pro rozměrovou analýzu

Klíčem k posouzení funkčnosti tiskárny je navrhnutí modelu, který by reprezentoval standardně vyrobitelné součástky, které se běžně používají napříč celým průmyslem, hlavně v automobilovém a leteckém průmyslu. Zvolení tohoto kritéria je klíčové i proto, že právě tyto průmyslová odvětví mají obdobně propracované normy pro celkový proces výrobku, a navíc tato odvětví patří k průkopníkům nejnovějších technologií i k jejich velkým uživatelům. Na základě těchto zjištění jsem došel k závěru, že model bude mít obecně

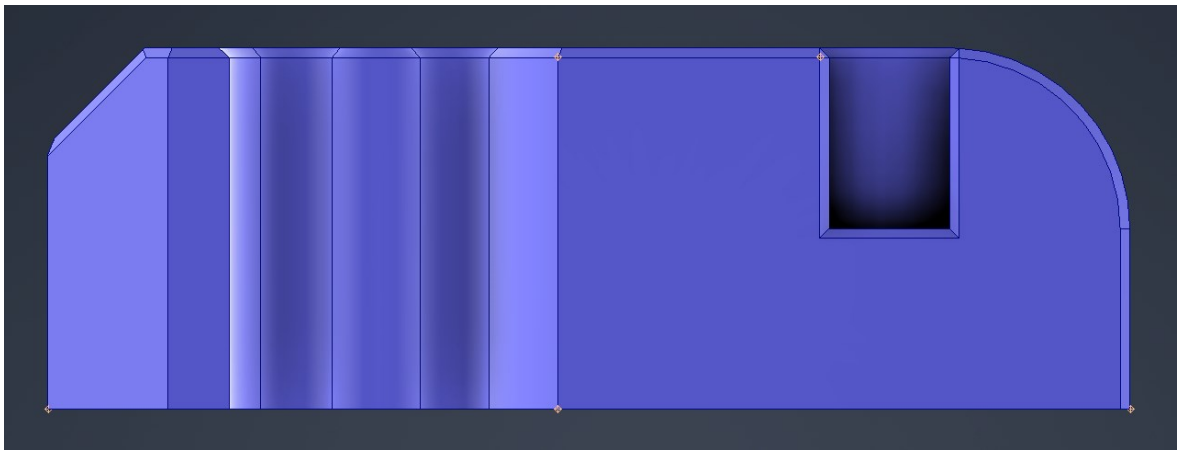
zakřivené plochy. Právě toto jsou velmi důležité aspekty pro určení přesnosti tiskárny napříč jejími osami.

Pro tento účel přesnosti polohy bylo zvoleno v modelu vytvořit standartní normované díry, které by představovaly nositele precizní polohy, u kterých lze sledovat i rozdílné natočení os tiskárny. Obecné zakřivené plochy budou indikovat precizní polohování tiskárny ve všech jejích osách. Tuto vymodelovanou součást můžeme vidět na obrázku 12.



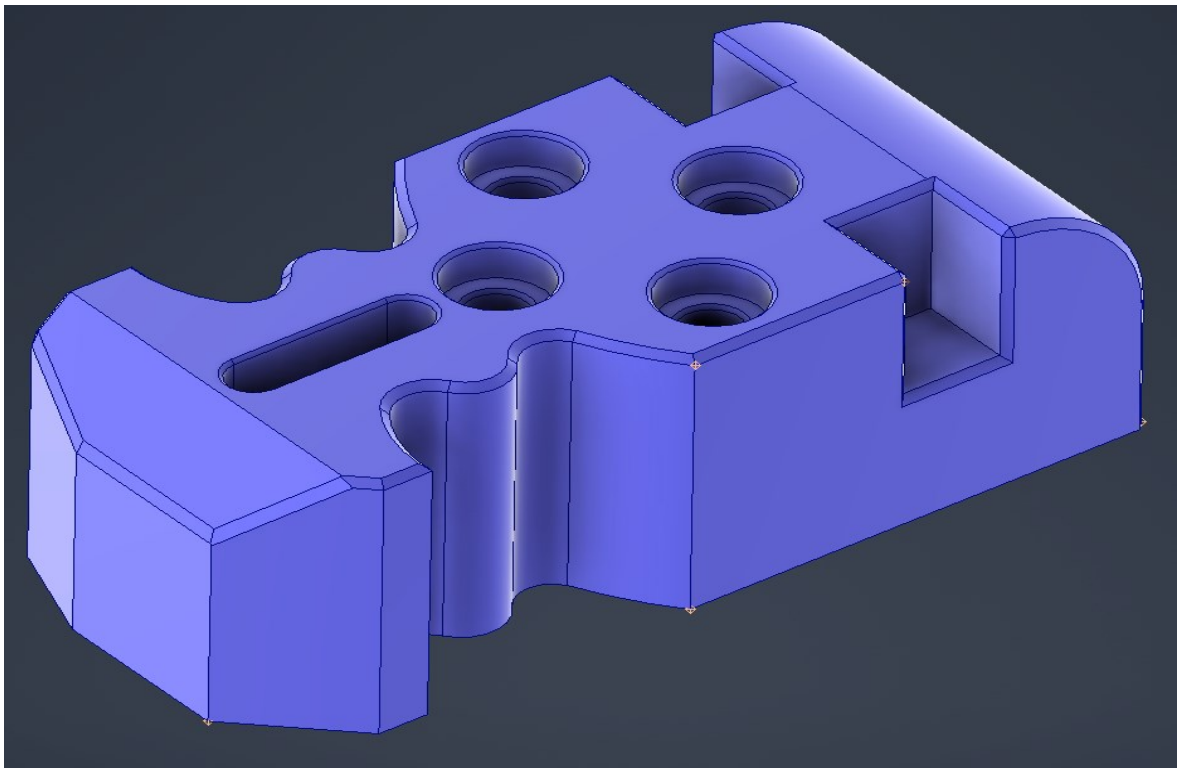
Obrázek 12 Obecné zakřivené plochy modelu

Pro další klíčované parametry výroby jsou v modelu vytvořeny i další prvky jako je drážka pro pero, specifické úhly, symetrické prvky a rádius. Toto lze názorně vidět z náhledu, obr. 13.



Obrázek 13 Detail sražených hran a rádiusu

Vytvořený model obsahuje všechny výše zmíněné prvky. Rovněž je aplikováno vyhodnocování odchylek tvaru, které zvýrazňují odchylku skutečné výroby od nominálního modelu.



Obrázek 14 Zobrazení modelu v perspektivě

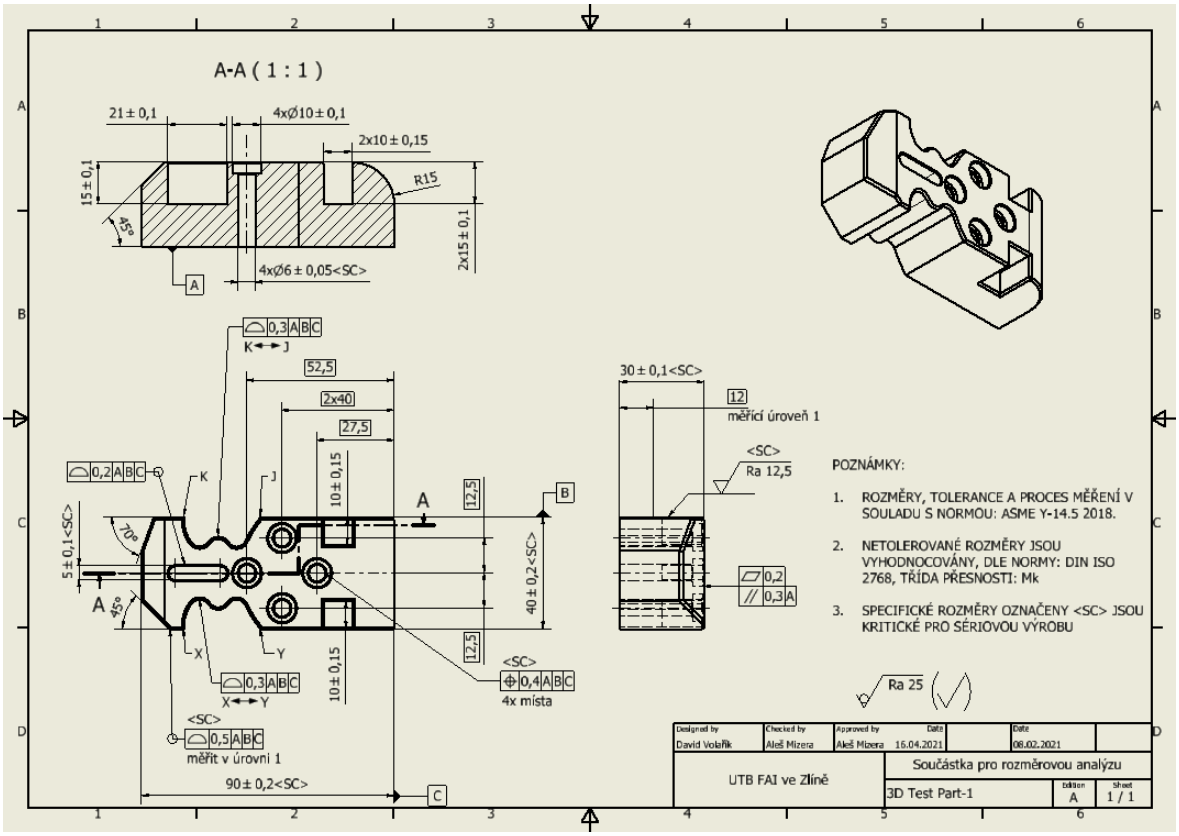
Výše můžeme vidět model na obr. 14, který představuje takto všechny vytvořené parametry. Rozměry, jež budou vyhodnocovány a budou představovat standartní výrobu pro sériovou součástku. Tyto rozměry jsou obecně dostupné v normě ASME Y14.5-2009 [30].

5.3 Vytvoření výkresové dokumentace

Při vytváření výkresové dokumentace je postupováno v souladu s normou ASME Y14.5-2009 [30]. Základní ustavení součástky na základny ABC dle vytvořené výkresové dokumentace je základní ustavení součástky na střed součástky. V tomto případě je to myšleno tak, že součástka se vkládá do vnitřního otvoru, který tvoří negativ vymodelované součástky. Definování těchto základen musí simulovat upnutí součástky v sestavě, do které následně spadá. Výkres je naprosto nezbytnou součástí pro sériovou výrobu. Dané rozměry budou komparovány mezi jednotlivými tiskárnami.

Ve výkresové dokumentaci jsou dále definovány rozměry, které jsou snadno měřitelné za pomocí standartních komunálních měřidel, například: posuvné měřidlo. Toto je

velmi důležitý parametr pro stabilní sledování procesu z důvodu sériové výroby a rychlosti reagovat na potencionální problémy ve výrobním procesu, navíc je zde i snadné odhalení těchto závad. Návrh výkresu je prováděn v programu Inventor Professiaonal 2021, lze vidět na obr. 15. Rozměry měřitelné pouze na 3D CMM[11] jsou výhodné z důvodu detailních indikací.



Obrázek 15 Návrh výkresu v rozhraní Inventor 2021

Výkrese je následně kompletní výkres součásti s opozicovanými rozměry uveden kompletně samotně v příloze I. Pozicování rozměrů u výkresů se dělá z praktických důvodů, a to za účelem přesné identifikace určitého rozměru.

[11]3D Souřadnicový měřící přístroj

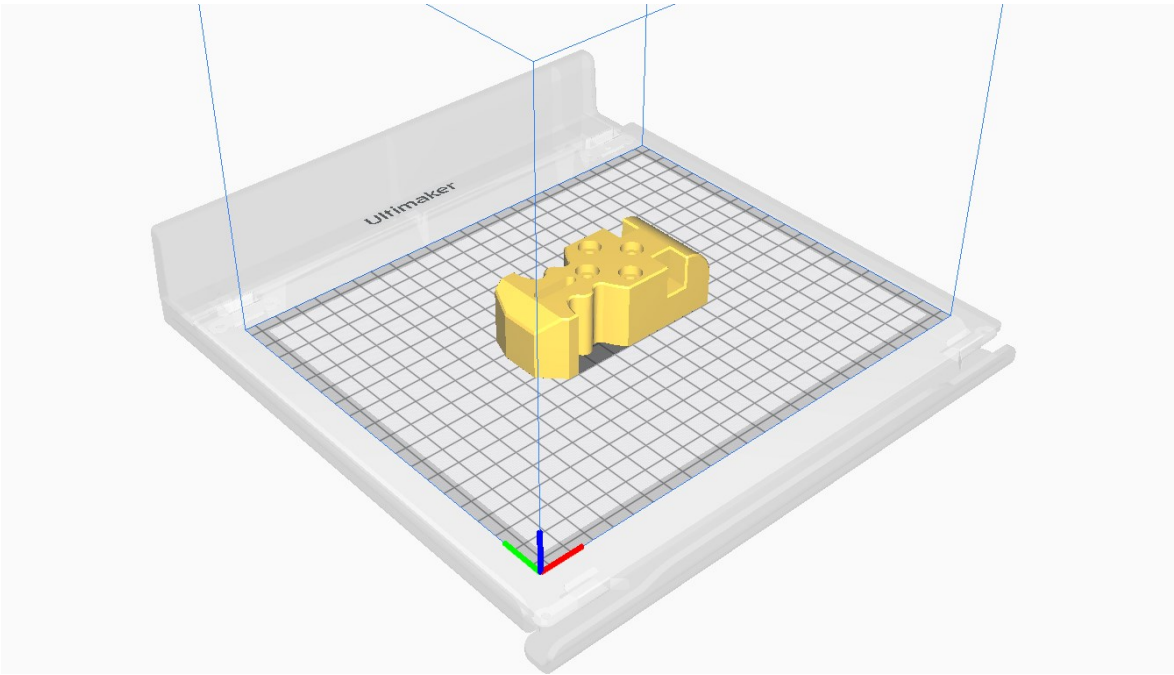
6 VÝROBA 3D TIŠTĚNÝCH VZORKŮ

Tato kapitola bude obsahovat informace ohledně výroby 3D výtisků, informace ze strany výrobců tiskáren a informace ohledně použitých materiálů. Pro zachování rovnocenných podmínek při 3D tisku s minimálním zásahem vnějších vlivů na měření bylo postupováno za následných podmínek:

a.) je provedena kalibrace tiskárny před samotným tiskem;

b.) je proveden zkušební tisk součástek pro měření;

c.) orientace všech tisknutých součástek musí být zachována a to tak, že tisknout se bude v rovině X/Y s orientací s osou X, zobrazeno na obrázku 16 níže;



Obrázek 16 Zobrazení pro tisk

d.) vždy se tisk provádí uprostřed pracovního prostoru tiskárny, vždy po jednom kusu z důvodu odzkoušení malosériové výroby;

e.) tiskne se 6 kusů ihned po sobě;

f.) kusy jsou označeny, podle pořadí při tisku;

g.) nastavení 3D tiskárny je dle parametrů daným výrobcem

Všechny takto vyrobené kusy vzhledem k pandemické situaci jsou zabaleny a odeslány k měření poštou. Kusy jsou pečlivě zabaleny a chráněny proti vnější vlhkosti.

6.1 Ultimaker 3

Tiskárna Ultimaker 3 patří do kategorie poloprofesionálních FDM tiskáren od nizozemského výrobce. Tiskárna se oproti většině neprofesionálních tiskáren liší především hlavicí, která má dvě trysky. Toto řešení umožňuje tisk hlavního materiálu a podpůrného materiálu [31].

Obrázek 17 3D tiskárna Ultimaker 3 [31]

Jedná se o tiskárnu s kartézskou konstrukcí. Na této tiskárně následně proběhl tisk, lze vidět na obrázku 17.

Podrobné specifikace jsou uvedeny pro tuto tiskárnu přehledně v tabulce 5.

Tabulka 5 Technické specifikace Ultimaker 3 [31]

Technický parametr	Hodnota
Maximální tištěná délka	215 mm
Maximální tištěná šířka	215 mm
Maximální tisková výška	200 mm
Výška tištěné vrstvy	0,09-0,390 mm

Tisková rychlost	neuvedena
Poziční přesnost	20-200 µm
Počet tiskových trysek	2

6.2 Anycubic kossel linear plus

Tiskárna Anycubic kossel plus reprezentuje tiskárnu konstrukci s delta kinematikou, která oproti ostatním je náročnější na výpočty pohybu přístroje a poskytuje oproti všem ostatním velmi rychlé pohyby přístroje při zachování obdobných parametrů nastavení. Technologie tisku je FDM. Technické specifikace včetně přesnosti v jednotlivých osách jsou uvedeny v tabulce 6 [32].

Tabulka 6 Technické specifikace Anycubis kossel linear plus [32]

Technický parametr	**Hodnota**
Maximální tištěný průměr	230 mm
Maximální tisková výška	300 mm
Výška tištěné vrstvy	0,1-0,4 mm
Tisková rychlost	20-60 mm/sec
Poziční přesnost	X/Y 0,0125 mm, Z 0,0025 mm
Počet tiskových trysek	1

Bohužel na této 3D tiskárně nemůže tisknout materiál s podpůrným materiálem. Konstrukci této tiskárny můžeme vidět na obrázku 18.

Obrázek 18 3D tiskárna Anycubic kossel linear plus [32]

6.3 Zortrax M200 plus

Tiskárna Zortrax M200 plus je konstrukčně řešena obdobně jako tiskárna Ultimaker 3 a je řešena kartézským konstrukčním systémem. Patří 3D tiskárna rovněž mezi poloprofesionální tiskárny. Specifikace jsou uvedeny v tabulce 7 [33].

Tabulka 7 Technické specifikace Zortax M200 plus [33]

Technický parametr	**Hodnota**
Maximální tištěná délka	200 mm
Maximální tištěná šířka	200 mm
Maximální tisková výška	180 mm
Výška tištěné vrstvy	0,09-0,390 mm
Tisková rychlost	neuvedena
Poziční přesnost	neuvedena

Počet tiskových trysek	1

V technických specifických daných výrobce nebyl přímo uveden údaj o pozičních přesnostech stroje, přesnost tak není nijak garantována. Tiskárnu můžeme vidět na obr 19.

Obrázek 19 3D tiskárna Zortrax M200 plus s krytem HEPA [34]

6.4 Stratasys Fortus 900mc

Táto 3D tiskárna patří do kategorie profesionálních velkých tiskáren. Velkou výhodou této tiskárny je především její obrovský tiskový prostor, detailní specifikace jsou uvedeny v tabulce 8 [35].

Tabulka 8 Technické specifikace Stratasys Fortus 900mc [35]

Technický parametr	**Hodnota**
Maximální tištěná délka	914 mm
Maximální tištěná šířka	610 mm
Maximální tisková výška	914 mm
Výška tištěné vrstvy	0,178-0,330 mm
Tisková rychlost	neuvedena
Poziční přesnost	0,089 µm nebo 1,5 µm/mm
Počet tiskových trysek	1

Tiskárna je hlavně využívána nadnárodními a velkými společnostmi pro prototypovou výrobu [35]. Táto tiskárna je umístněná v laboratořích UTB. Zobrazení tiskárny můžeme vidět na obrázku 20.

Obrázek 20 3D tiskárna Stratasys Fortus 900mc [35]

6.5 Formlabs Form 3

3D tiskárna Form 3 využívá k tisku technologii SLA. Táto technologie se velmi hodí na tisk menších součástek. Obvykle jsou to miniatury, či detailní součástky o velkosti hodinářských součástek. Technické specifikace tiskárny můžeme vidět v tabulce 9 [36].

Tabulka 9 Technické specifikace Formlabs Form 3 [36]

Technický parametr	**Hodnota**
Maximální tištěná délka	145 mm
Maximální tištěná šířka	145 mm
Maximální tisková výška	185 mm
Výška tištěné vrstvy	0,025-0,300 mm
Poziční přesnost	0,025 µm pro X/Y
Velikost laserového bodu	0,085 µm

Tento model tiskárny díky menší tiskové ploše rovněž poskytuje velmi kompaktní rozměry, tiskárna zobrazena na obrázku 21.

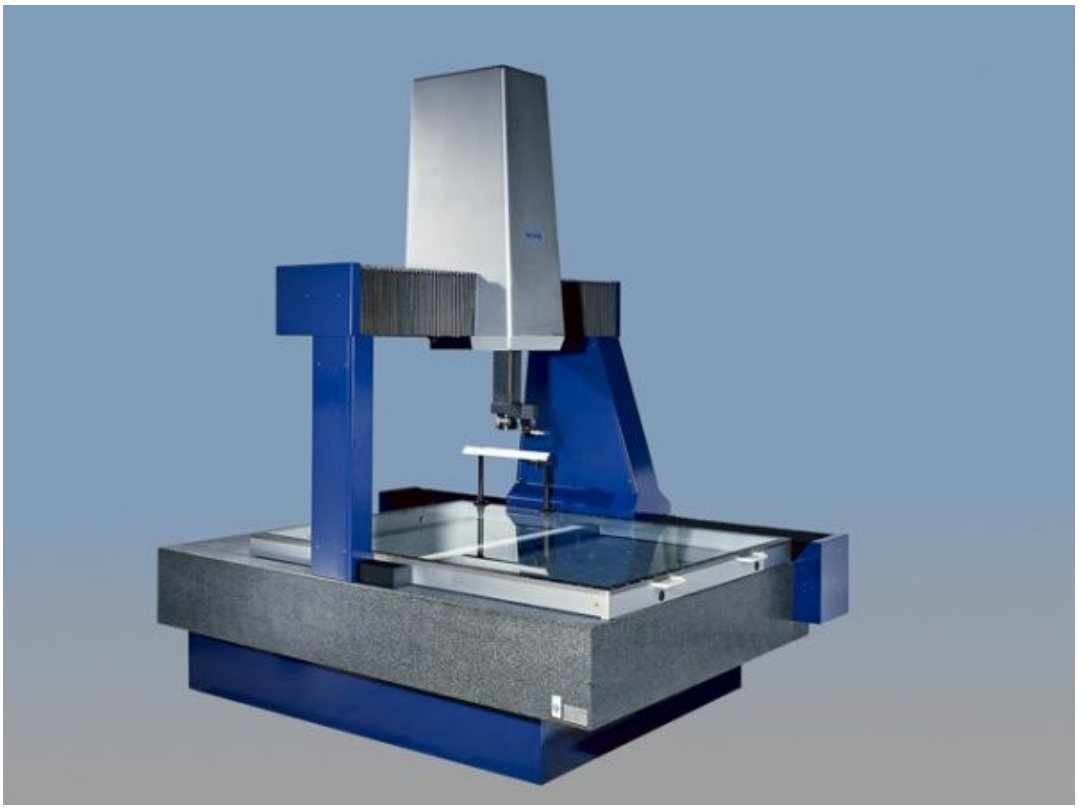
Obrázek 21 3D tiskárna Formlabs Form 3 [36]

7 ROZMĚROVÁ ANALÝZA VÝTISKŮ

V této kapitole bude popsán proces rozměrové analýzy, tato analýza je určena pro součástku, která byla navržena pro ověření rozměrových a pozičních schopností 3D tiskáren. Při tomto testování budou vyhodnocovány jednotlivé rozměry a díky technologii souřadnicových přístrojů je využita navíc možnost i komparace nominálních CAD dat se skutečnými měřenými daty. Veškerá rozměrová analýza probíhá v měřící místnosti, dle normy IATF 16949:2016.

7.1 Měření za pomoci 3D CMM

Rozměrová analýza je provedena prostřednictvím 3D CMM, protože všechny rozměry, kromě drsnosti (týká se většiny 3D CMM), lze měřit na souřadnicovém měřícím přístroji. K tomuto účelu byl vybrán stroj od německého výrobce multisenzorových měřících přístrojů Werth Messtechnik, model: Scope-Check MB 650, náhled na obr. 22.



Obrázek 22 Werth Scope-Check MB 650 [37]

Tento model poskytuje více než dostatečnou přesnost k potřebnému měření, je portálové konstrukce po velké a těžké dílce. Stroj sám poskytuje maximální povolenou chybu měření délky uvedenou v tabulce 10 [37].

Tabulka 10 Parametry maximální odchylky přístroje [37]

Osy přístroje:	**Optický senzor**	**Dotek:**
E1xy (jedna osa):	(1,8 + L/500) µm	-
E2xy (dvě osy):	(2,0 + L/400) µm	-
E3xyz (prostor):	(2,9 + L/300) µm	(1,9 + L/300) µm

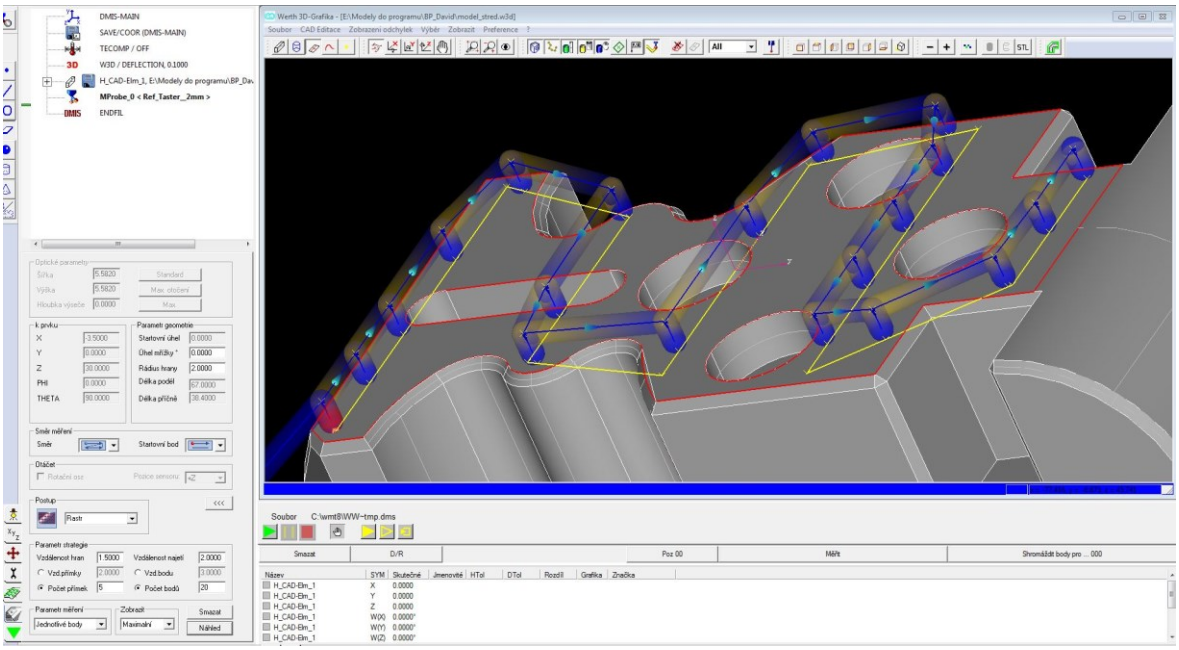
V tabulce 10 jsou uvedeny maximální odchylky přístroje v jednotlivých osách a jejich vzájemných kombinací použitých při měření v závisti na délce měření L [37]. Z uvedených parametrů můžeme usoudit, že nutná přesnost měření pro tuto součástku je naplněna.

Stroj je osazen optickým senzor a volitelnou skenovací sondou SP-25 modulem SM25-1 od firmy Renishaw. Tento model je optimalizován pro délky doteků do 400mm, náhled na obr. 23 [38].

Obrázek 23 Konfigurace doteků pro sondu SP-25 [38]

7.1.1 Programování CAD/CAM

Přístroj je vybaven měřícím certifikovaným metrologickým softwarem WinWerth, který umožňuje standartní měření, ale rovněž programování za pomoci CAD/CAM. Software tak za pomocí daných nastavení uživatelem může vytvářet DMIS kód pro snadné programování měřících programů. Největší výhodou programování za pomocí CAD/CAM technologie jsou rychlost programování a preciznost měření díky nominálním parametrů, které se převezmou z CAD modelu. Uživatel tak má možnost programovat s využitím nominálních CAD dat nebo i bez nich. Tento proces můžeme vidět na obr. 24.

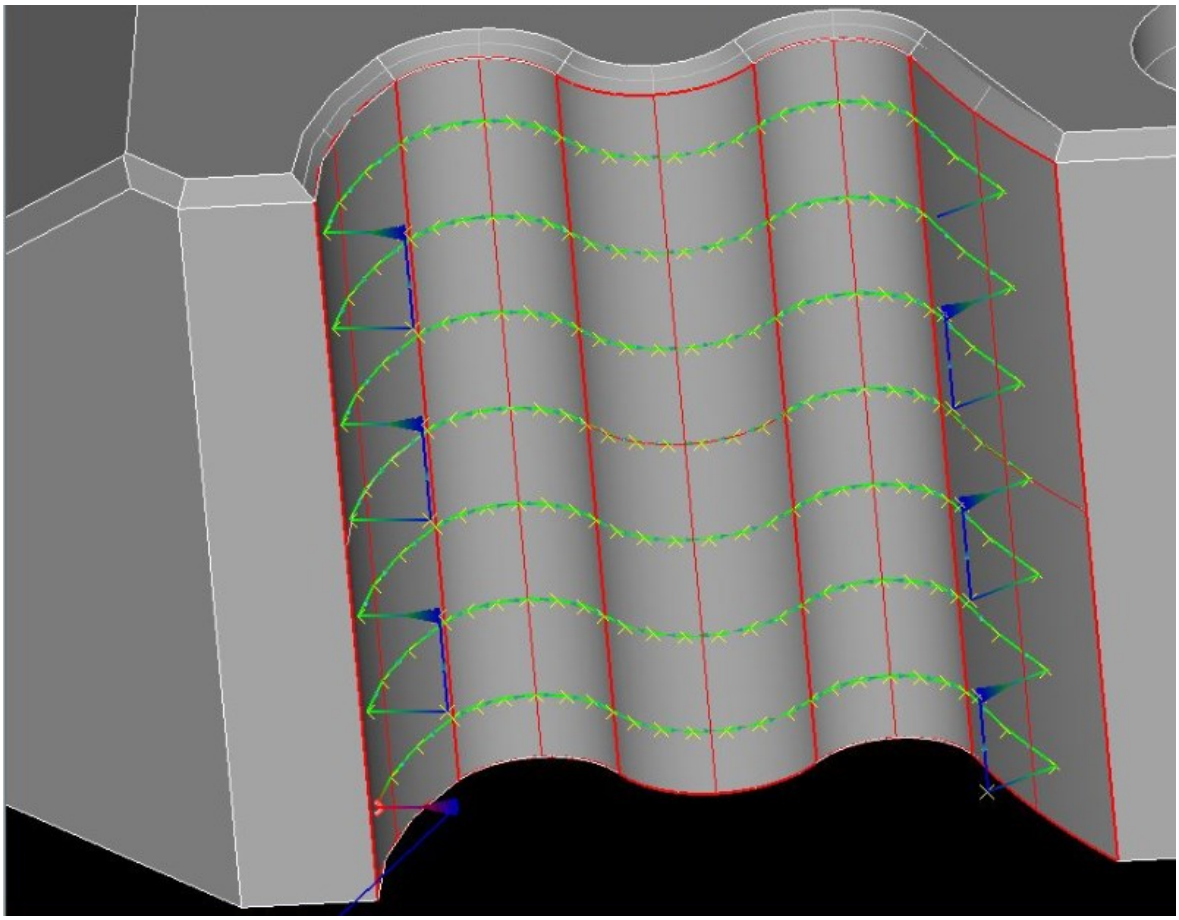


Obrázek 24 Programování technologií CAD/CAM v programu WinWerth

Uživateli se na základě přednastavených parametrů vygeneruje pojezdová dráha při měření daného elementu, který se právě programuje. V tomto případě, jsou vygenerovány pojezdy pro měření označené rovina na 3D CAD modelu.

Samotný software umožnuje i přednastavení modu měření, dle konfigurace daného stroje. Například u skenovacího dotyku můžeme mít volbu pro měření jednotlivými body, popřípadě volbu skenování. Skenování je výbornou volbu ze jména pro rovinné a obecně zakřivené plochy. Protože umožňuje velmi detailní sběr měřených bodů, které jsou důležité pro následné odladění procesu. Velkou výhodou pro měření skenovací sondou spolu s vyhodnocením odchylky tvaru je detailní simulace skutečného tvaru, například pro místa, kde může být těsnění, stykové plochy atd. Dle nastavení snímání kontury následně se nastaví rozteč jednotlivých bodů pro skenování. V případě měření 3D výtisků pro tuto bakalářskou

práci je nastavena v programu rozteč 0,01mm mezi jednotlivými body při skenování sondou SP-25. Jako příklad praktického skenování pro měření obecně zakřivených ploch můžeme vidět na obrázku 25.



Obrázek 25 Programování skenovací sondy v programu WinWerth

Můžeme vidět praktické nastavení pro skenování obecně zakřivené plochy mezi body danými výkresem. Software WinWerth vygeneruje body, které následně sonda reálně naskenuje. Následně takto získané elementy můžeme vyhodnocovat nebo tvořit konstrukční elementy a vytvářet matematické komparace.

7.1.2 Optimalizace DMIS kódu

Vytvořený program je uložen v textovém souboru. Tento soubor obsahuje program napsaný v jazyce DMIS. Ovšem pro následnou optimalizaci či funkce, které nejsou v softwaru je nedílnou součástí znalost tohoto programovacího jazyka.

DMIS je standardizovaný programovací jazyk postavený na základech BASIC původně určen pro 3D CMM za účelem standardizace a zjednodušení programování. DMIS

byl původně používán v roce 1993 jako komunikační protokol řídícího softwaru. Následně po dvou letech byla licence DMIS uvolněna a vznikl tak plnohodnotný programovací jazyk, který je dnes využíván nejrůznějšími výrobci měřících systémů, ale i výrobních strojů jako jsou například moderní obráběcí centra [39].

Níže je uvedena tabulka 11 s nejvíce používanými příkazy pro optimalizaci programů určených pro měření na souřadnicových přístrojích.

Tabulka 11 Nepoužívanější DMIS příkazy [40].

Syntaxe DMIS	**význam a vysvětlení příkazu**
$$ Comment	řádek, který slouží jako komentář v kódu
DECL / REAL, r1, r2	deklarování reálných proměnných r1 a r2
DECL / CHAR, r1, r2	deklarování textového řetězce STRING r1 a r2
FILE/OPEN, 'Filename'	otevře daný soubor
FILE/CLOSE	Uzavření souboru
FILE/OUTPUT, 'Text'	Zapíše do souboru ‚Text“
CAD / IMPORT, 'Filename'	Otevře CAD soubor Filename
CAD / CLEAR	Vymaže z paměti všechny CAD soubory
PROTOCOL / PRINTER, [0|1|FORMEED]	Vytisknutí (odeslání dat) protokolu na výstup do přednastaveného výstupu
PROTOCOL / HEADER, 'Filename'	Vyvolání přednastavené hlavičky protkolu
PROTOCOL / LOOP	Vytvoření smyčky protokolu
TOL / [POINTX], (Name), nominal, otol, utol	Výstup tolerance u naměřeného elementu s definicí nominálních hodnot a tolerance
GOTO / x,y,z	Přesunutí stroje na pozici x, y, z
ROTSET / [A-AXIS|B-AXIS|C-AXIS]	Nastavení rotace
CALL / up|ext, para1, para2	Vyvolání podprogramu za použití parametrů
MACRO / name, para1, para2	Definice podprogramu s parametry
ENDMAC	Konec podprogramu

ENDFIL	Konec programu v DMIS kódu
D(COORD_0001)=TRANS / XORIG, FA(P1) [, YORING, FA(P2), ZORING, FA(P3)]	Definice souřadného systému s názvem 1. Nastává posuv v osách: osa x do elementu P1, osa y do elementu P2, osa z do elementu P3
SAVE / D (COOR_0001)	Uložení souřadného systému s názvem 0001
RECALL / D (COOR_0001)	Opětovné vyvolání uloženého souřadného systému
IF / (condition, (Label if true), (Label if falce))	Podmínka když pro větvení programu
BEGIN / DIALOG, Name, dX, dY, 'Text'	Vytvoří dialogové okno s názvem: Name. Dialog bude na souřadnicích dX, dY. Zobrazí se text: Text.
SNSLCT / S([Senzor])	Zvolí se určitý senzor uložený v paměti jako: Senzor
SNSET / VL([Light channel]), Intesity	Zvolí se optický senzor s optickým kanálem „Light channel“, intenzitu zapíšeme v rozmezí 0-1
(Label)	Označená část programu s názvem „Label“
JUMPTO / (Label)	Program skočí na označení uvedené v závorce

Programování či optimalizace za pomocí DMIS programování je velmi přehledné a intuitivní. Editace může probíhat v jakémkoliv textovém editoru. Zápis souřadnic pro pohyby stroje podléhá matematickým zvyklostem. Programovací jazyk dále umožňuje standartní matematické funkce s návratovou hodnotou. Jedná se tak o programovací jazyk, který obsahuje veškeré potřebné funkce nutné k programování přístrojů běžně využívaných napříč výrobou i s grafickým rozhraním. Samotná optimalizace v tomto případě probíhala v programu PSPAD, kód v editoru můžeme vidět na obrázku 26.

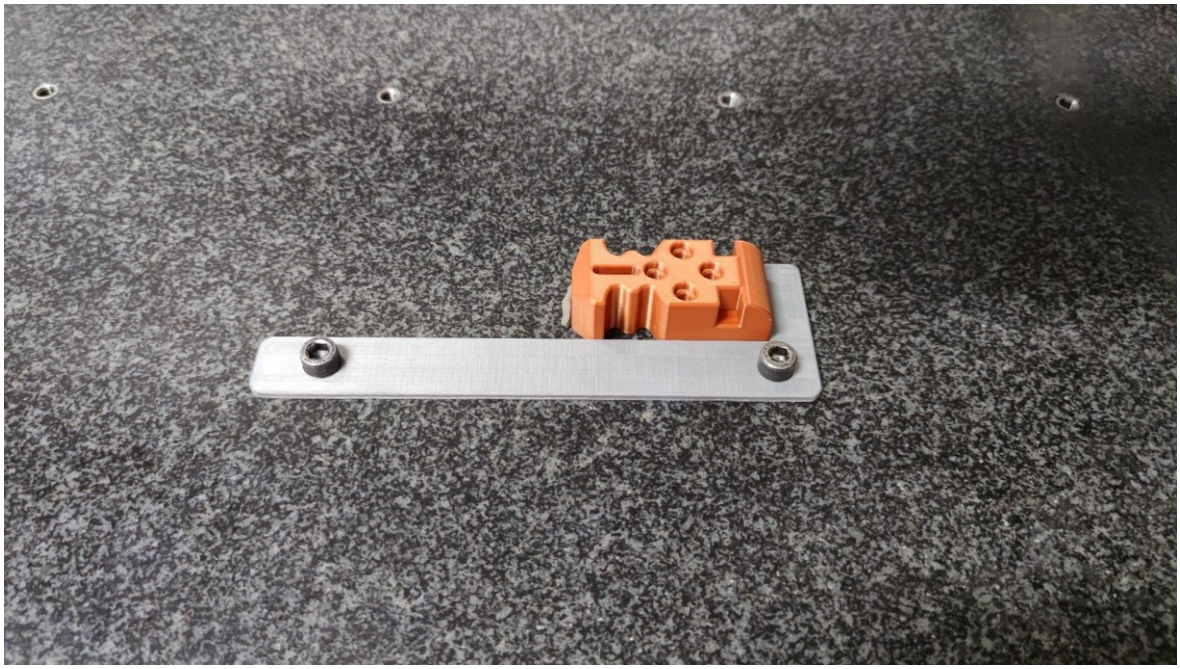
```
57 FILNAM / 'C:\wmt8\dmis\BP_David_2021-04-01.dms'
58 TECOMP / OFF
59 W3D / DEFLECTION, 0.10000000
60 PROTOCOL / REPORT, OPEN, 0, 'template.odt', ''
61 PROTOCOL / REPORT, OUTCHANNEL, 0, ODT, 'E:\Série lisovna\BP_David\3D Test part.odt'
62 BEGIN / PROTOCOLREPORTDLG
63 PROTOCOL / REPORT, DEFINEUSERFIELD, 'Part_0001', STRING, 'Dílec', '3D Test Part', FIXED
64 PROTOCOL / REPORT, ADDUSERFIELD, 0, 'Part_0001', 'Dílec', TABLE
65 PROTOCOL / REPORT, DEFINEUSERFIELD, 'PartNumber_0002', STRING, 'Tiskárna', '', REQUEST
66 PROTOCOL / REPORT, ADDUSERFIELD, 0, 'PartNumber_0002', 'Tiskárna', TABLE
67 PROTOCOL / REPORT, DEFINEUSERFIELD, 'DobaLisovani_0003', STRING, 'Materiál tisku', '', REQUEST
68 PROTOCOL / REPORT, ADDUSERFIELD, 0, 'DobaLisovani_0003', 'Materiál tisku', TABLE
69 PROTOCOL / REPORT, DEFINEUSERFIELD, 'Comments_0004', STRING, 'Poøadí pøi tisku', '', REQUEST
70 PROTOCOL / REPORT, ADDUSERFIELD, 0, 'Comments_0004', 'Poøadí pøi tisku', TABLE
71 END / PROTOCOLREPORTDLG
72 DID(Model) = DEVICE / STOR, 'E:\Modely do programu\BP_David\model_stred.w3d'
73 OPEN / DID(Model), CAD, W3D
74 G(H_CAD-Elm_1) = GEOM / DID(Model)
75 SNSLCT / S(MPROBE_0)
76 GOTO / -5.50603590, 133.13226661, 160.24100760
77 GOTO / -147.60860334, 91.36082393, 61.88918646
```

Obrázek 26 DMIS kód

Celkový program má 5343 řádků, optimalizována byla například hlavička protokolu pro zapisování textových polí jakožto je: materiál tisku, číslo výtisku atd. V neposlední řadě byly optimalizovány pojezdové dráhy dotykové sondy.

7.1.3 Proces měření na 3D CMM

Všechny 3D výtisky jsou kondicionovány v měřící místnost minimálně 24 hod před samotným měřením, aby proběhla teplotně-rozměrová stabilizace kusů určených k měření. Podmínky pro měření jsou detailně uvedeny v normě ASME , jsou to například teplota okolí 20 +/- 2°C a vlhkost vzduchu 40 +/- 15%. Vytisky jsou měřeny v pořadí, ve kterém byly tisknuty. Pro snadné měření a urychlení měření všech vzorků byl vytvořen přípravek, který umožňuje vyrobené vzorky snadno upnout a nejen, že tak urychlit samotné měření, ale navíc zajistí vždy stejné před vyrovnání, lze vidět na obrázku 27.



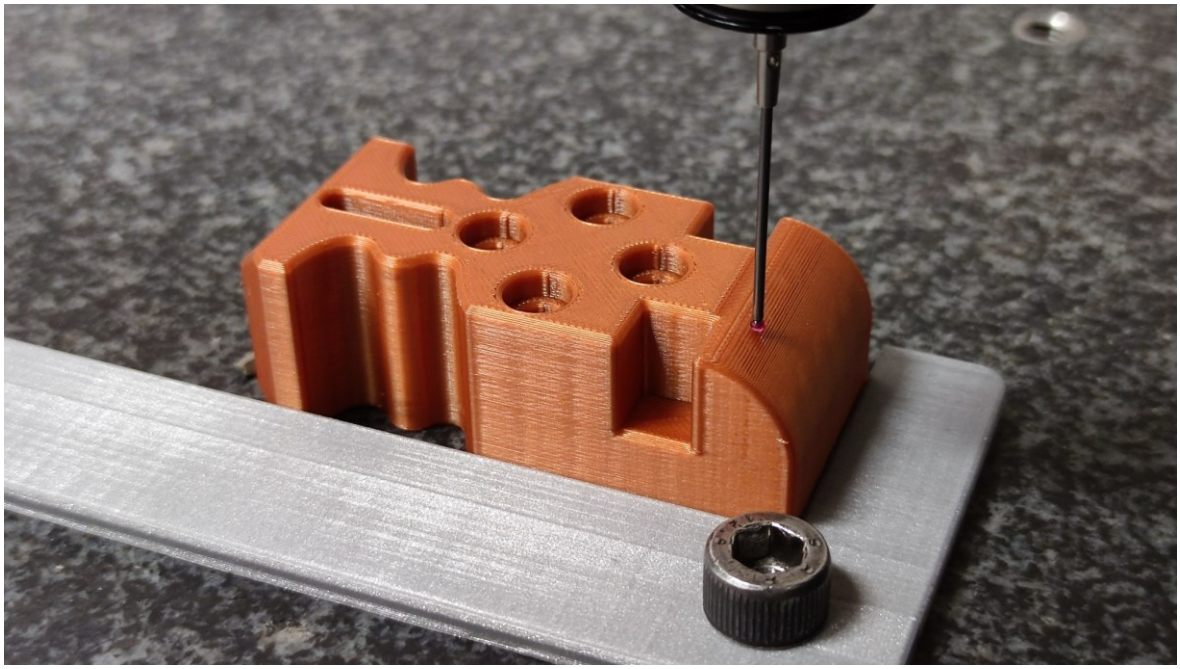
Obrázek 27 Vyrovnání pro měření za pomocí přípravku

U výtisku je tak zajištěno vždy naprosto stejná rotace a pozice, kde se nachází na měřícím stroji souřadnicového přístroje na granitovém stole. Toto bylo umožněno za vytištěného přípravku tvaru *L* o tloušťce 3,5mm, který nemá vliv na dané měření. Upnutí je řešeno za pomocí standartních šroubů M10 do předvrtaných děr. Dotlačení je pak vyřešeno za pomocí standartní plastelíny.

7.2 Vyhodnocení rozměrové analýzy

Všechny rozměry byly změřeny v rámci měření celkového měření kusu, ovšem pro malosériovou výrobu, dle standardů se nemusí měřit všechny rozměry. Pro tento účel jsou zaváděny takzvané „kritické rozměry“, které jsou funkční pro danou součástku, tyto rozměry musí být tak v sériové výrobě pravidelně kontrolovány. Pro tento účel ve výkrese součástky jsou právě tyto rozměry označeny znakem <CS>, kritické rozměry jsou následně komparovány pro zhodnocení dané výroby. Celkové protokoly jsou následně v příloze bakalářské práce, přílohy II-VII.

V každé tabulce vyhodnocení jsou uvedeny vyhovující rozměry černou barvou a nevyhovující jsou zvýrazněny červenou barvou. Tyto data byla následně statisticky zhodnocena a přehledně komparována mezi sebou. Proces měření skenovací sondou SP-25 můžeme vidět na obrázku 28.



Obrázek 28 Proces měření skenovací sondou SP-25

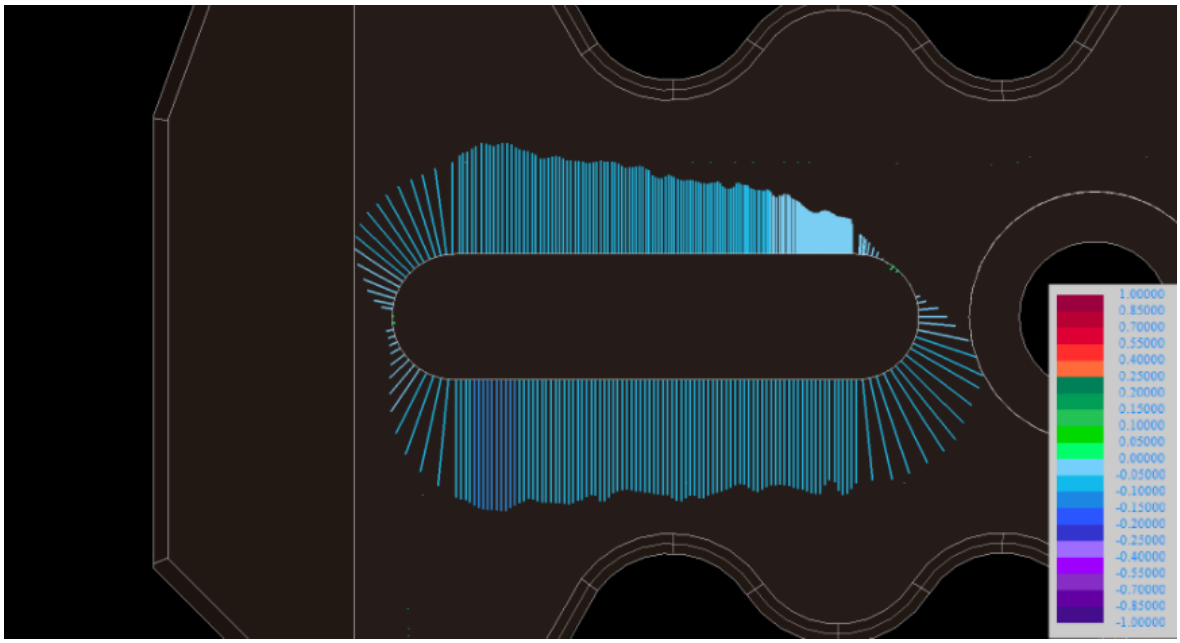
7.2.1 Formlabs Form 3 – Clear Resin

SLA technologie 3D tisku byla vyzkoušena na tiskárně Formlabs Form 3 s použitím materiálu čisté pryskyřice (Clear Resin) dodanou přímo výrobcem tiskárny. Výsledky z provedeného měření kritických rozměrů jsou následně uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12 Výsledky měření: Formlabs Form 3 – Clear Resin

Dílec:		**3D Test Part-1**							
Tiskárna:		Formlabs Form 3							
Materiál tisku:		Clear Resin (čirá pryskyřice)							
Pozice	nominal [mm]	Tolerance [mm]		Naměřené výsledky [mm]					
		+	-	1	2	3	4	5	6
2	15,00	+0,10	-0,10	**15,218**	**15,238**	**15,303**	15,063	15,088	15,065
13	90,00	+0,20	-0,20	89,895	89,908	89,907	89,922	89,907	89,913
14	0,50	+0,00	-0,50	**0,718**	0,380	0,370	0,415	0,381	**0,520**
15	0,30	+0,00	-0,30	**0,313**	**0,329**	**0,346**	**0,484**	**0,423**	**0,374**
17	0,40	+0,00	-0,40	0,147	0,190	0,079	**0,537**	0,318	0,328
19	40,00	+0,20	-0,20	**39,781**	**39,788**	**39,793**	39,815	**39,795**	**39,789**
25	0,30	+0,00	-0,30	0,185	0,183	0,193	0,266	0,203	0,221

Z daného měření můžeme vyčíst, že tiskárna v délkových rozměrech není zcela stabilní pro tisk v sériové výrobě. Délka drážky při měření této výroby dopadla nejhůře, odchylku tvaru můžeme vidět na obrázku 29.



Obrázek 29 Odchylka tvaru drážky – Formlabs Form 3

7.2.2 Anycubic kossel linear plus – PLA

Tiskárna Anycubic kossel linear plus slouží jako zástupce tiskárny využívající konstrukci, která využívá delta kinematiku, tisk byl prováděn za pomocí materiálu PLA. Výsledky z provedeného měření kritických rozměrů jsou následně uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13 Výsledky měření: Anycubic kossel linear plus – PLA

Dílec:		**3D Test Part-1**							
Tiskárna:		Anycubic kossel linear plus							
Materiál tisku:		PLA							
Pozice	nominal [mm]	Tolerance [mm]		Naměřené výsledky [mm]					
		+	-	1	2	3	4	5	6
2	15,00	+0,10	-0,10	15,044	15,044	15,033	15,037	15,036	15,026
13	90,00	+0,20	-0,20	**89,792**	**89,778**	**89,756**	**89,784**	89,911	89,853
14	0,50	+0,00	-0,50	0,441	0,455	**0,508**	0,445	0,457	0,453
15	0,30	+0,00	-0,30	0,244	0,262	0,261	0,241	0,243	0,251
17	0,40	+0,00	-0,40	0,196	0,197	0,038	0,174	0,211	0,195
19	40,00	+0,20	-0,20	39,862	39,855	39,848	39,862	39,854	39,851
25	0,30	+0,00	-0,30	0,274	0,264	0,290	**0,303**	0,275	0,277

Z daného měření můžeme vypozorovat, že tiskárna je v tisku značně přesná a disponuje i přijatelnou poziční přesností. Z vyzkoušených 3D tiskáren poskytuje nejlepší volbu s podílem rozumné ceny. Můžeme konstatovat, že tiskárna dodržuje velmi dobře parametry přesnosti udávané výrobcem. Nevychází pouze délkový rozměr daný smrštěním výrobku.

7.2.3 Ultimaker 3 – PLA

Tisk za pomocí tiskárny Ultimaker 3 a materiálu ze všech vykazuje nejlepší kvalitu povrchu. Výsledky z provedeného měření kritických rozměrů následně jsou následně uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14 Výsledky měření: Anycubic kossel linear plus – PLA

Dílec:		**3D Test Part-1**							
Tiskárna:		Ultimaker 3							
Materiál tisku:		PLA							
Pozice	nominal [mm]	Tolerance [mm]		Naměřené výsledky [mm]					
		+	-	1	2	3	4	5	6
2	15,00	+0,10	-0,10	14,935	14,947	14,937	14,947	14,958	14,949
13	90,00	+0,20	-0,20	89,812	89,881	89,813	89,864	89,864	89,924
14	0,50	+0,00	-0,50	**0,730**	**0,698**	**0,681**	**0,672**	**0,662**	**0,648**
15	0,30	+0,00	-0,30	**0,422**	0,295	0,299	**0,337**	0,277	0,263
17	0,40	+0,00	-0,40	0,205	0,238	0,280	0,236	0,234	0,226
19	40,00	+0,20	-0,20	39,952	40,107	39,961	39,947	39,950	40,019
25	0,30	+0,00	-0,30	**0,380**	**0,305**	**0,348**	0,283	0,294	0,283

Z měření můžeme usoudit, že na rozdíl od tiskárny Anycubic kossel linear plus při použití naprosto stejného materiálu jsou délkové rozměry naprosto vyhovující, ovšem nevychází pozice. Pozice nám ovlivňuje kvalita zpracování konstrukce a následná kalibrace.

7.2.4 Stratasys Fortus 900mc – ABS

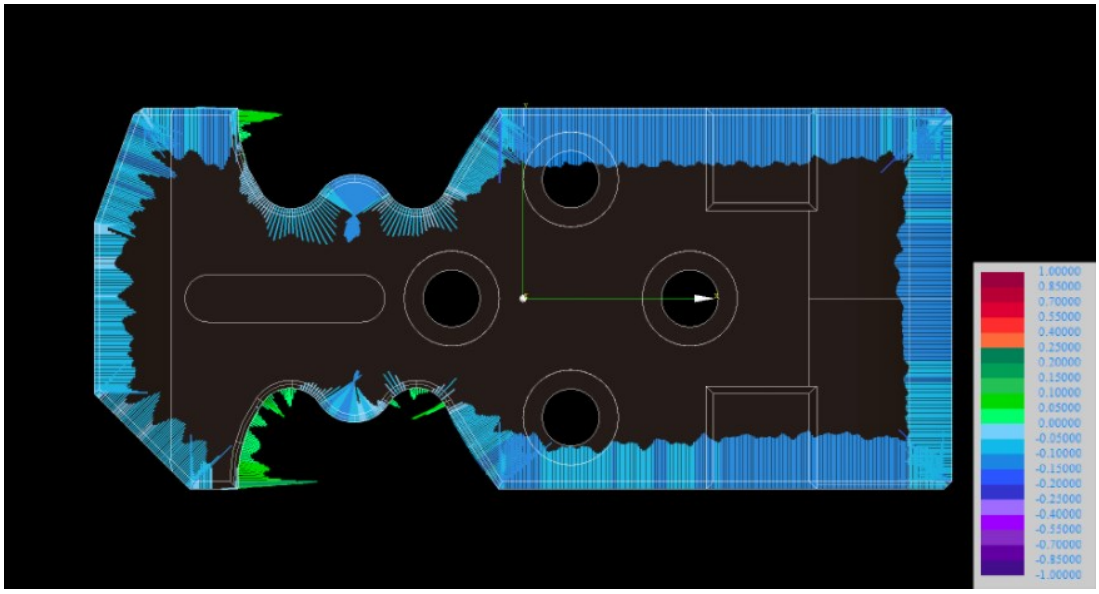
Tiskárna Stratasys Fortus 900mc představuje profesionální tiskárnu, zároveň je nejdražší s nejlepšími specifikacemi danými výrobcem mezi použitými tiskárnami. Výsledky z provedeného měření kritických rozměrů jsou následně uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15 Výsledky měření: Stratasys Fortus 900mc – ABS

Dílec:	**3D Test Part-1**
Tiskárna:	Stratasys Fortus 900mc

Materiál tisku:		ABS							
Pozice	nominal [mm]	Tolerance [mm]		Naměřené výsledky [mm]					
		+	-	1	2	3	4	5	6
2	15,00	+0,10	-0,10	**15,147**	**15,144**	**15,139**	**15,142**	**15,153**	**15,127**
13	90,00	+0,20	-0,20	89,835	89,886	89,849	89,930	89,798	89,974
14	0,50	+0,00	-0,50	0,381	0,262	0,357	0,217	0,361	0,392
15	0,30	+0,00	-0,30	**0,352**	0,126	**0,379**	0,237	**0,379**	**0,370**
17	0,40	+0,00	-0,40	0,091	0,052	0,183	0,211	0,136	0,072
19	40,00	+0,20	-0,20	39,805	39,894	39,801	39,889	39,805	39,907
25	0,30	+0,00	-0,30	0,172	0,126	0,136	0,190	0,150	0,402

Tiskárna má naprosto úžasné a nejlepší výsledky v oblasti pozičních rozměrů v komparaci se všemi uvedenými tiskárnami. Nevychází délka drážky a boční odchylka tvaru. Odchylku tvaru při měření můžeme vidět na obrázku 30.



Obrázek 30 Odchylka tvaru – Stratasys Fortus 900mc – ABS

7.2.5 Zortrax M200 Plus - Z-Ultrat

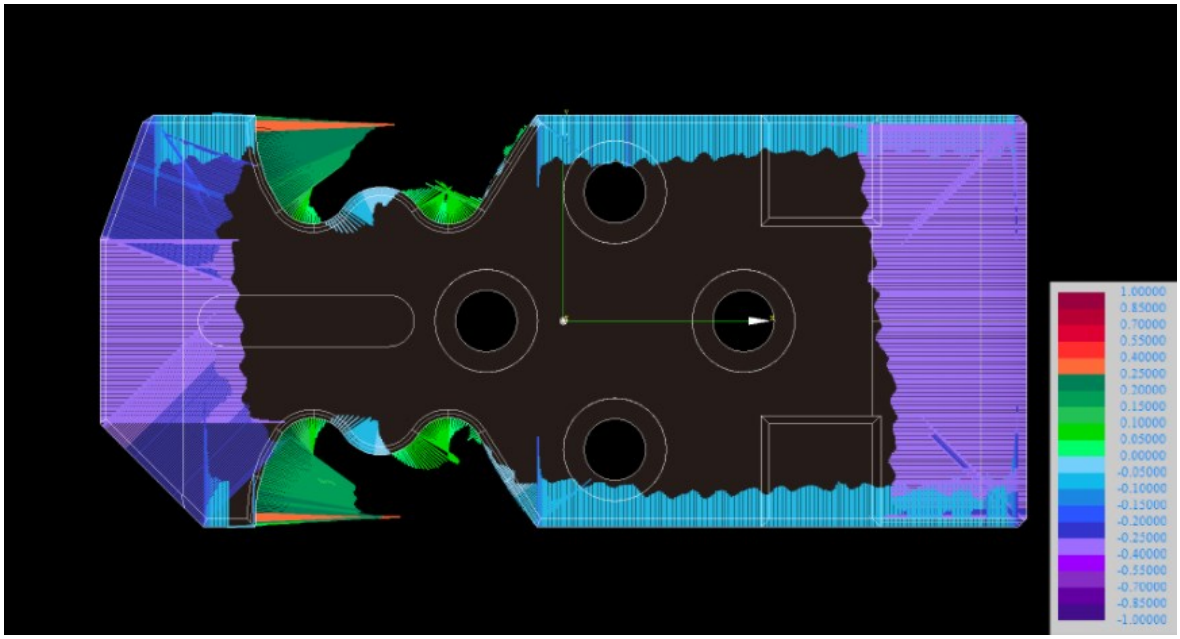
Na tiskárně Zortrax M200 Plus byl v prvním testu použit materiál Z-Ultrat dodaný výrobcem tiskárny. Materiál by měl kombinovat vlastnosti ABS a PLA materiálu. Výsledky z provedeného měření kritických rozměrů následně jsou následně uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 16 Výsledky měření: Zortrax M200 Plus – Z-Ultrat

Dílec:	**3D Test Part-1**
Tiskárna:	Zortrax M200 Plus
Materiál tisku:	Z-Ultrat

Pozice	nominal [mm]	Tolerance [mm]		Naměřené výsledky [mm]					
		+	-	1	2	3	4	5	6
2	15,00	+0,10	-0,10	14,968	14,969	14,968	14,967	14,974	14,966
13	90,00	+0,20	-0,20	**89,448**	**89,448**	**89,447**	**89,451**	**86,450**	**89,453**
14	0,50	+0,00	-0,50	**0,762**	**0,771**	**0,757**	**0,773**	**0,813**	**0,769**
15	0,30	+0,00	-0,30	0,201	0,244	0,260	0,237	0,217	0,247
17	0,40	+0,00	-0,40	0,194	0,126	0,074	0,184	0,273	0,126
19	40,00	+0,20	-0,20	39,839	39,875	39,839	39,832	39,816	39,848
25	0,30	+0,00	-0,30	**0,313**	**0,364**	**0,336**	**0,333**	**0,322**	**0,329**

Z výsledku měření můžeme usoudit, že tisk s touto tiskárnou a materiálem je nevhodný pro délkové rozměry. Z výsledku měření a následného skenu můžeme usoudit, že kus je smrštěný, můžeme tuto skutečnost vidět na obrázku 31.



Obrázek 31 Odchylka tvaru – Zortrax M200 PLUS – Z-ULTRAT

7.2.6 Zortrax M200 Plus - Z-ABS

Tiskárna následně byla rovněž komparována za použití materiálu Z-ABS. Jedná se o standartní ABS materiál dodaný přímo od výrobce. Výsledky z provedeného měření kritických rozměrů následně jsou následně uvedeny v tabulce 17.

Tabulka 17 Výsledky měření: Zortrax M200 Plus – Z-ABS

Dílec:	**3D Test Part-1**
Tiskárna:	Zortrax M200 Plus

Materiál tisku:		Z-ABS							
Pozice	nominal [mm]	Tolerance [mm]		Naměřené výsledky [mm]					
		+	-	1	2	3	4	5	6
2	15,00	+0,10	-0,10	14,969	14,977	14,973	14,979	14,970	14,972
13	90,00	+0,20	-0,20	**89,441**	**89,444**	**89,447**	**89,439**	**89,446**	**89,460**
14	0,50	+0,00	-0,50	**0,856**	**0,838**	**0,804**	**0,805**	**0,810**	**0,786**
15	0,30	+0,00	-0,30	0,290	0,253	0,251	0,260	0,202	0,205
17	0,40	+0,00	-0,40	**0,445**	0,115	0,122	0,077	0,239	0,151
19	40,00	+0,20	-0,20	39,811	39,809	39,810	39,802	39,811	**39,783**
25	0,30	+0,00	-0,30	**0,341**	**0,301**	0,286	**0,322**	**0,305**	**0,316**

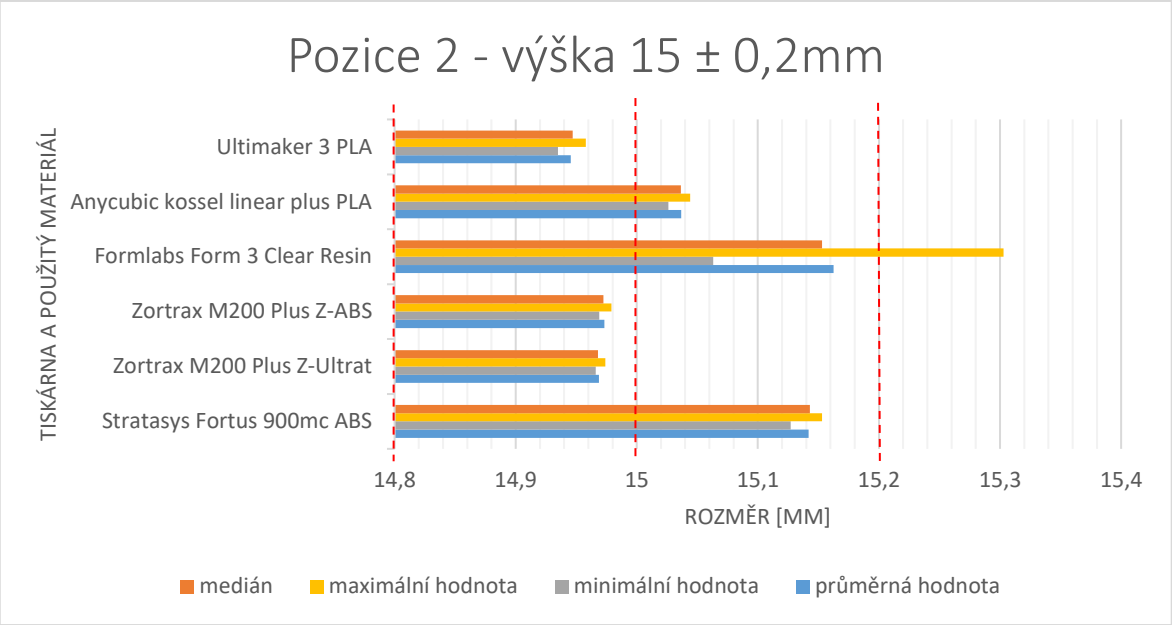
Můžeme z výsledků usoudit, že použití jiného materiálu nemělo na délkové rozměry vliv. Jedná se tak téměř o stejný výrobek.

7.3 Komparace měřených vzorků – rozměrová analýza

Pro přehlednou komparaci měřených vzorků, byly z naměřených hodnot vytvořeny přehledné grafy, které tak snadno usnadní komparaci a výběr nejlepší tiskárny pro daný rozměr ať už se bude jednat o poziční rozměr, délkový nebo jiný geometrický rozměr. Statistickou komparaci můžeme provádět různými způsoby. Pro tento účel bylo zvoleno vyhodnocení za pomocí: průměrné hodnoty, minimální hodnoty, maximální hodnoty a mediánu.

7.3.1 Srovnání pozice 2

Pozice číslo 2, rozměr 15 ± 0,2mm, vycházelo nejlépe na tiskárně Zortrax, a to i při použití rozdílného materiálu pro tisk, naopak nejhůře rozměr vycházel na tiskárně Formlabs Form 3. Detailní srovnání můžeme vidět na grafu 1.

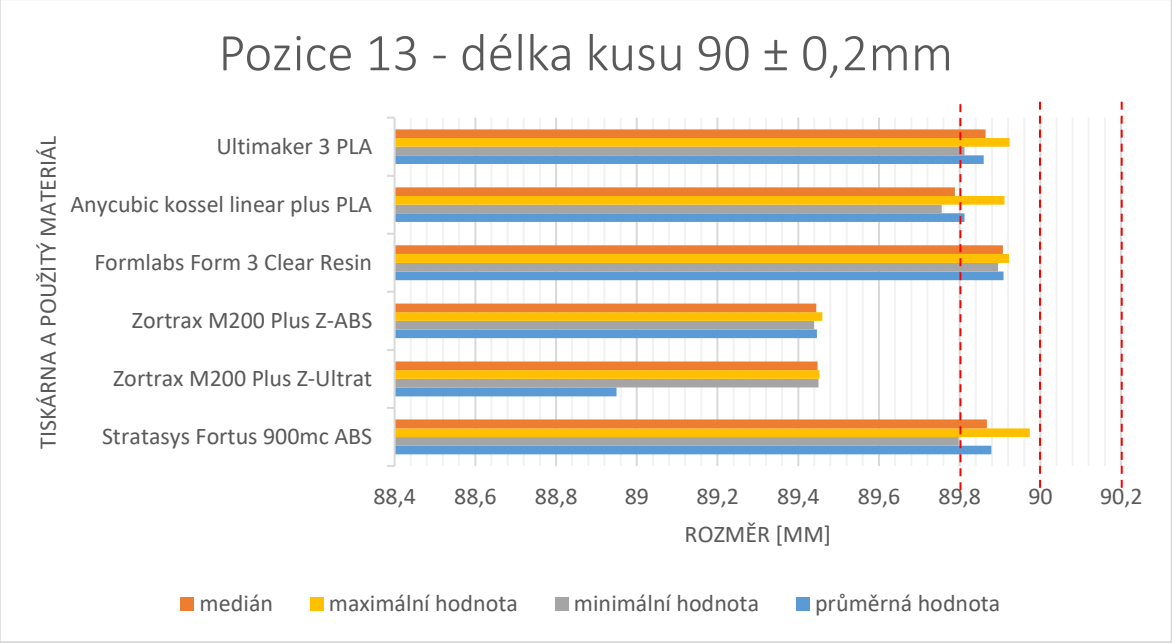


Graf 1 Pozice 2 – výška 15 ± 0,2mm

Dále nejvíce stabilní produkce rovněž vycházela na tiskárně Zortrax M200 Plus a Stratasys Fortus 900mc.

7.3.2 Srovnání pozice 13

Pozice číslo 13, rozměr 90 ± 0,2mm znázorňuje celkovou délku kusu. Produkce byla u všech tiskáren stabilní kromě použitého materiálu Z-Ultat u tiskárny Zortrax M200 Plus, detailně můžeme vidět na grafu 2.

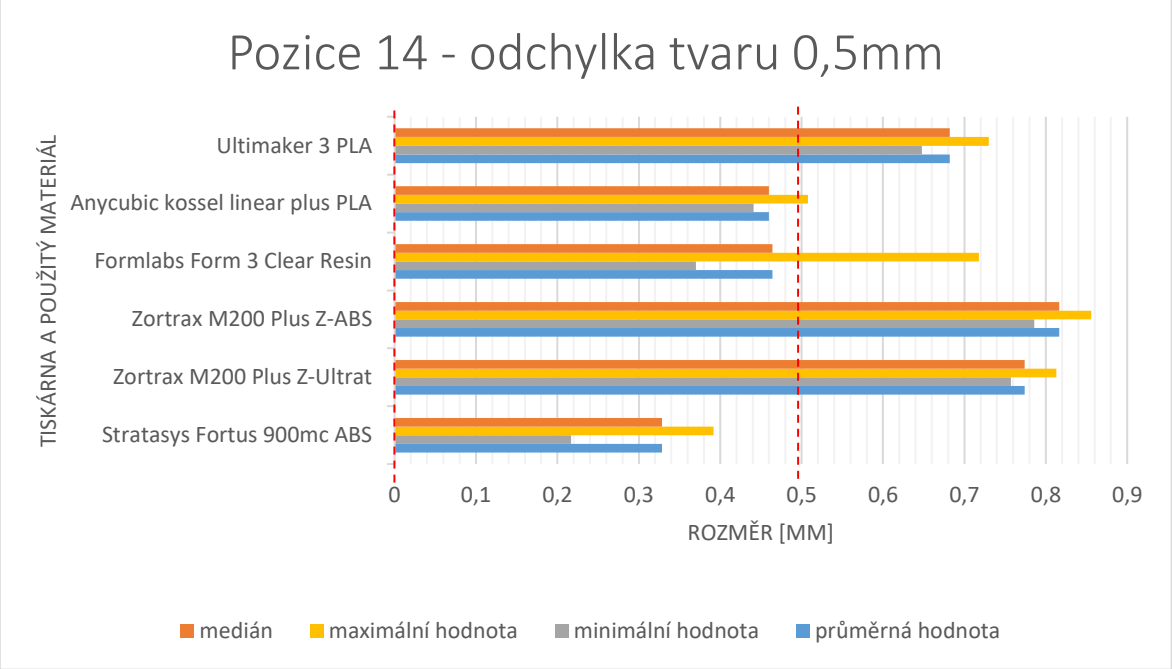


Graf 2 Pozice 13 – délka kusu 90 ± 0,2mm

Bohužel se požadovaného rozměru nepodařilo dosáhnout ve všech případech. Zde je nejlepší volbou Formlabs Form 3 s použitím materiálu Clear Resin.

7.3.3 Srovnání pozice 14

Pozice číslo 14, odchylka tvaru 0,5mm, nejlépe vychází na tiskárně Fortus 900mc, navíc dle specifikací daných výrobcem byla táto skutečnost i dodržena. Detailní komparaci můžeme vidět na grafu 3.

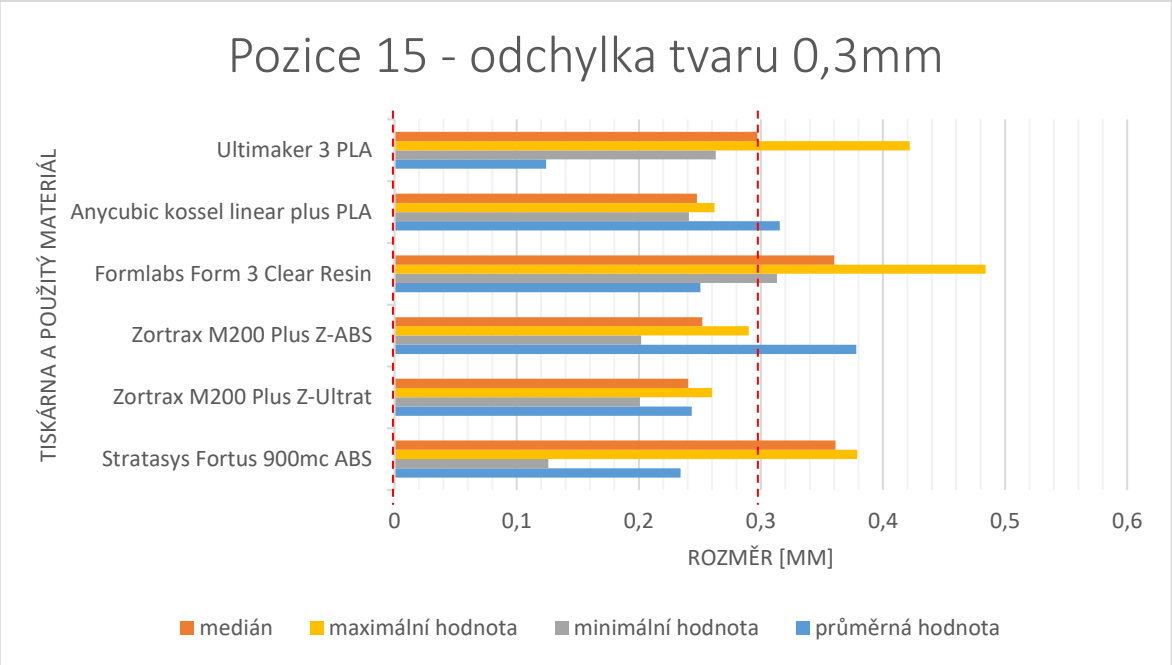


Graf 3 Pozice 14 – odchylka tvaru 0,5mm

Velmi dobře rovněž byla výroba provedena na tiskárně Anycubic kossel linear plus. Formlabs Form 3 neměl při tomto rozměru zcela stabilní výsledky.

7.3.4 Srovnání pozice 15

Pozice číslo 15, odchylka tvaru 0,3mm, nám označuje odchylku tvaru vůči CAD modelu, a to v oblasti mezi bodem X a Y daným výkresem. Srovnání je zobrazeno na grafu 4.

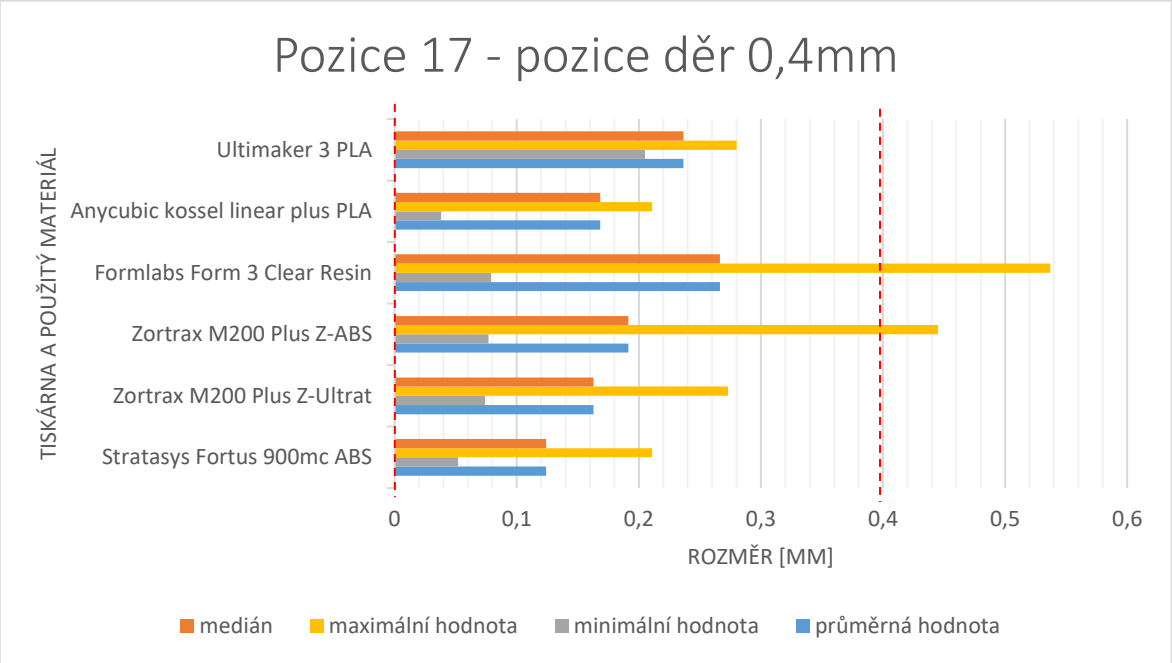


Graf 4 Pozice 15 – odchylka tvaru 0,3mm

Odchylka tvaru nejlépe dopadla na tiskárně Stratasys Fortus 900mc, nejhorší hodnoty a zároveň nejméně stabilní byly na tiskárně Formlabs Form 3.

7.3.5 Srovnání pozice 17

Pozice číslo 17, pozice děr 0,4mm je extrémně důležitý parametr. Na přesnost děr či jiných montážních tvarů je kladen extrémní důraz. Srovnání můžeme vidět na grafu 5.

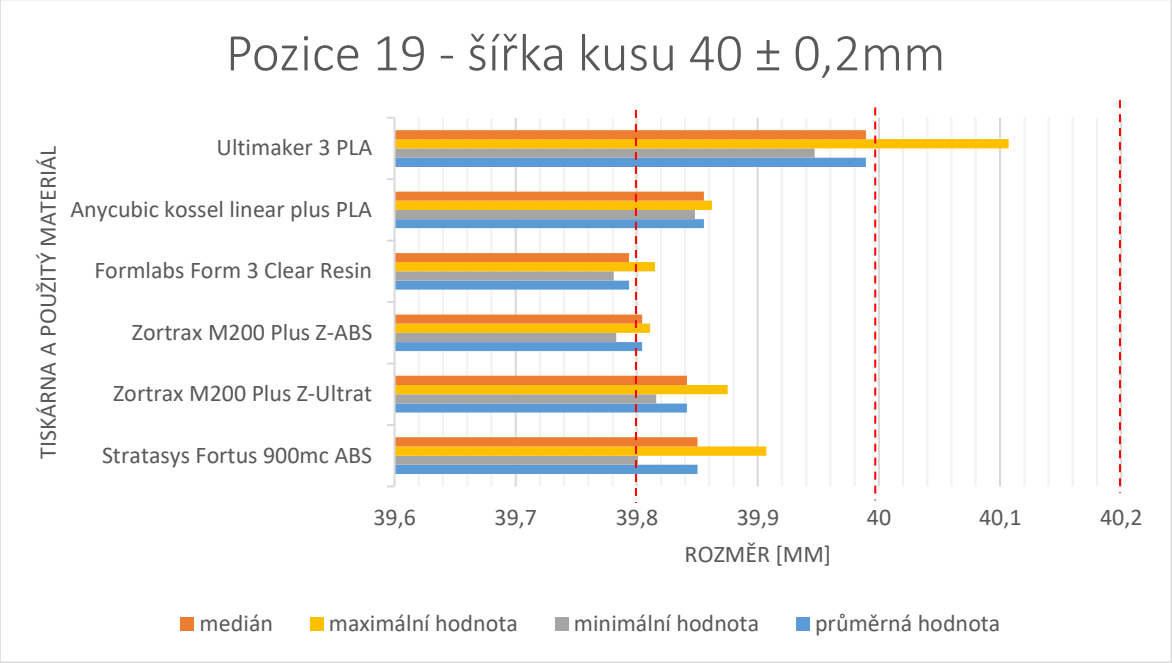


Graf 5 Pozice 17 – pozice děr 0,4mm

Nejlépe dopadla výroba na tiskárně Stratasys Fortus 900mc následovanou Anycubic kossel linear plus s delta kinematikou.

7.3.6 Srovnání pozice 19

Pozice číslo 19, šířka kusu ± 0,2mm měla nejlepší hodnoty s tiskárnou Ultimaker 3. Následovanou tiskárnou Fortus 900mc. Srovnání je uvedeno na grafu 6.

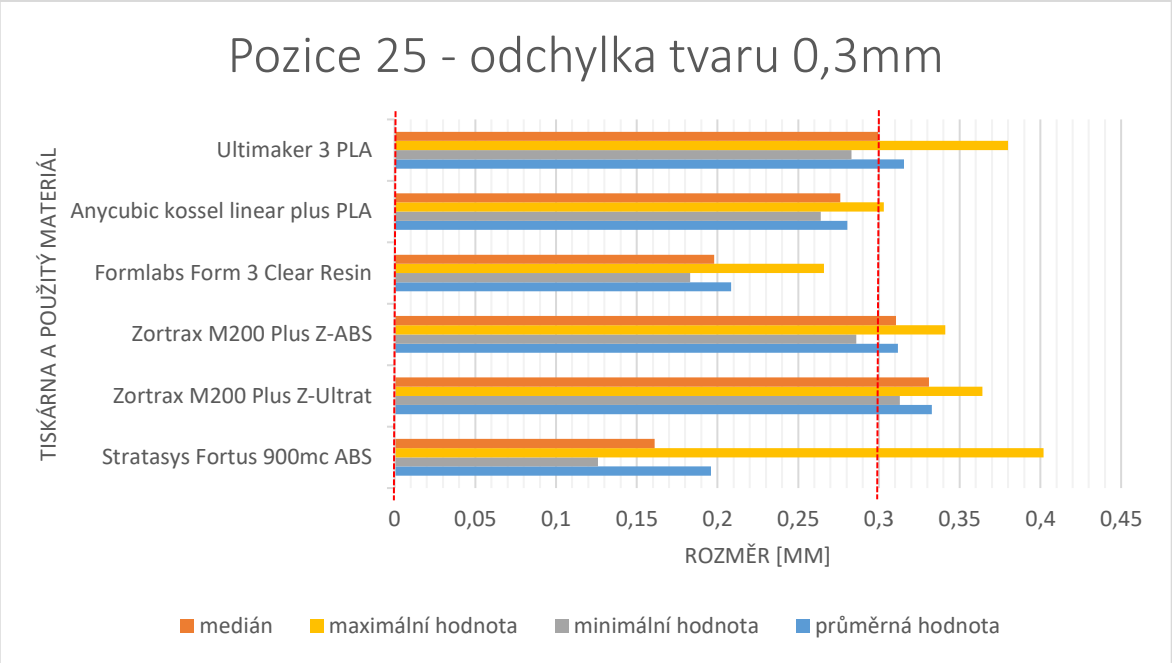


Graf 6 Pozice 19 – šířka kusu 40 ± 0,2mm

Nejhorší hodnoty vykazovala tiskárna Formlabs Form 3.

7.3.7 Srovnání pozice 25

Pozice číslo 25, odchylka tvaru 0,3mm, je stejně jako výkresová pozice 15 odchylka tvaru, která nám označuje odchylku tvaru vůči CAD modelu, a to v oblasti mezi bodem K a J daným výkresem. Srovnání můžeme vidět na grafu 7.



Graf 7 Pozice 25 – odchylka tvaru 0,3mm

Opět nejlepší odchylku tvaru vykazuje tiskárna Fortus 900mc následována tiskárnou Anycubic kossel linear plus i s tiskárnou Formlabs Form 3, ovšem poslední jmenovaná vykazuje značnou odchylku mezi minimální a maximální hodnotou.

7.3.8 Vyhodnocení rozměrové analýzy

Celkově rozměrová analýza dopadla nejlépe pro tiskárnu Stratasys Fortus 900mc při použití materiálu ABS. Další výborné výsledky měla tiskárna s delta kinematikou Anycubic kossel linear plus při použití materiálu PLA. Z uvedených grafů je zcela zjevné, že tiskárna s použitím technologie SLA je nevyhovující pro výrobu obdobných součástek. Tiskárna Zortrax M200 Plus neměl uvedenou poziční přesnost, dá se říci, že kvůli špatným výsledkům naprosto oprávněně. Pro účely sériové výroby bychom následně museli i zhodnotit pořizovací ceny jednotlivých tiskáren. Jednoznačně se dá určit, že pro účely naprosté přesnosti je nejlepší tiskárna Stratasys Fortus 900mc, ovšem s přihlédnutím na pořizovací ceny 3D tiskáren nejlépe vychází 3D tiskárna Anycubic kossel linear plus.

8 DT ANALÝZA

Analýza formou DT zkoušek nám prokáže možné povolené mechanické namáhaní, kterým můžeme zatížit vzorek o určité tloušťce stěny. Obvykle se jedná o jednu z nejvýznamnějších zkoušek pro ověření bezpečnosti před samotným uvedením výrobku na trh. Pro účel DT analýzy nám poslouží elektromechanický zkušební přístroj od českého výrobce Labortech, model LabTest E.2 se zatížením do 50kN. Přístroj slouží k měření výrobků v tahu, tlaku, ohybu, smyku a krutu. Bližší technické specifikace můžeme vidět v tabulce 18.

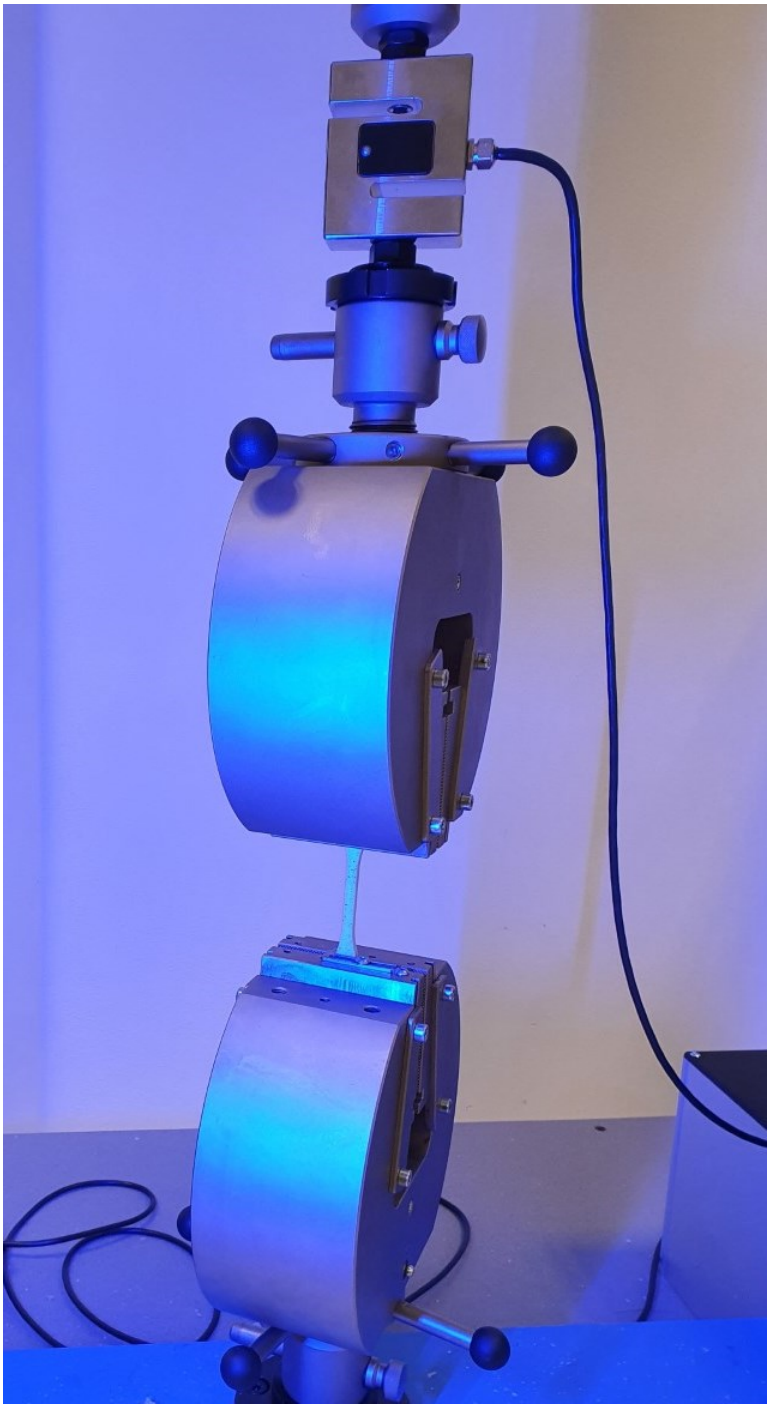
Tabulka 18 Technické parametry LabTest E.2, verze 50kN [41]

Technický parametr	**Hodnota**
Jmenovité zatížení tah/tlak	50kN
Počet sloupů	2
Počet kuličkových šroubů	2
Počet lineárních vedení	2+2
Minimální zkušební rychlost	0,0005 mm/min
Maximální zkušební rychlost	1500 mm/min
Rozlišení polohy stroje	0,0651 µm
Opakovatelnost polohy	+/- 2 µm
Výška pracovního prostoru	1145 mm
Šířka pracovního prostoru	640 mm

8.1 Příprava a měření vzorků

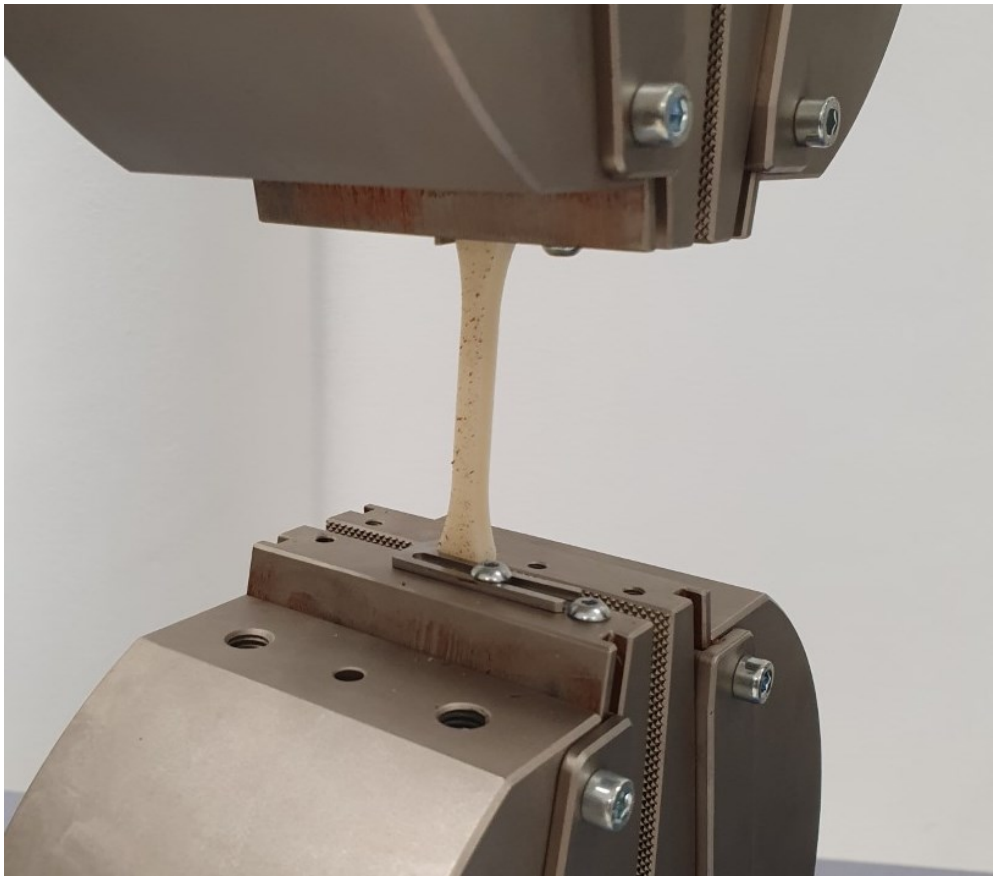
Komparace měřených vzorků a jejich příprava probíhá hlavně mezi jednotlivými materiály tisknutých na určité 3D tiskárně, aby bylo zachováno co nejvíce procesních parametrů a nastavení stroje. Budou vyhodnocovány a komparovány jak jednotlivé materiály, ale rovněž i rozdíly v jejich vrstvách materiálů.

Vzorky jsou po vytištění na 3D tiskárnách měřeny ve stroji, uchopení těchto vzorků je za pomocí samosvorných čelistí, které dané vzorky pevně drží, a navíc je i precizně centrují na centrální osu přístroje, můžeme vidět na obrázku 32.



Obrázek 32 Upnutí testovacího vzorku při měření tahové zkoušky

Detailní pohled na středovou část čelistí je následně zobrazen na obrázku 33.



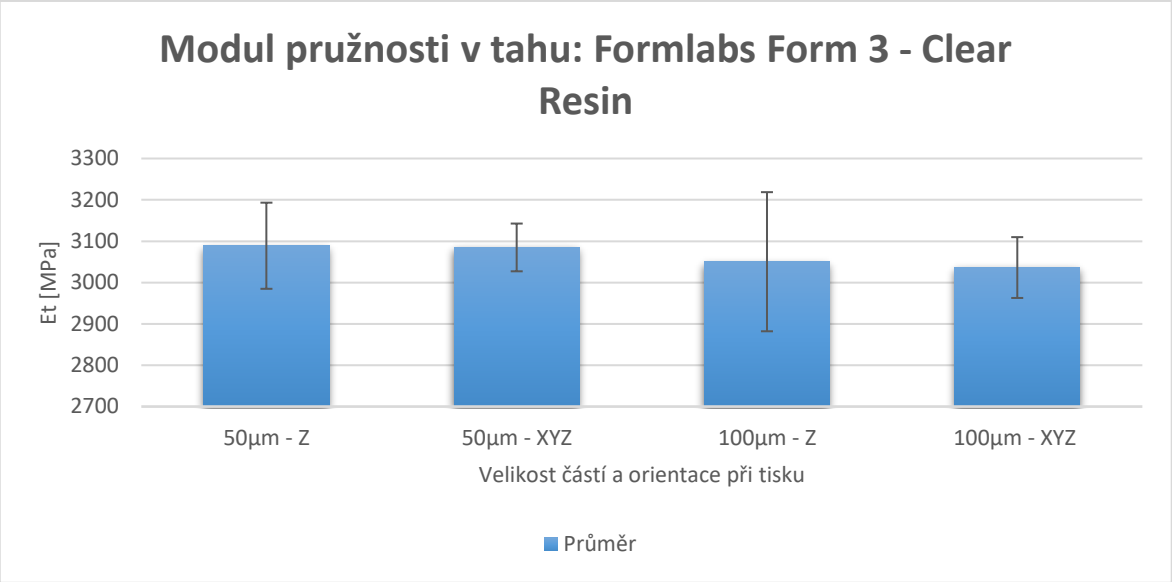
Obrázek 33 Detailní pohled na upnutí – zkouška tahu

8.2 Vyhodnocení vzorků

Veškeré měření v DT analýze byla provedeno metodou měření pevnosti v tahu. Táto metoda je společně s metodou pevnosti v tlaku velmi obvyklá při měření v běžných průmyslových laboratořích. Při měření byly srovnány i jednotlivé technologie 3D tisku, a to SLA a FDM. U každého jednotlivého měření je vyhodnocen vždy parametr modulu pružnosti v tahu společně se směrodatnou odchylkou a pevnost materiálu rovněž společně se směrodatnou odchylkou.

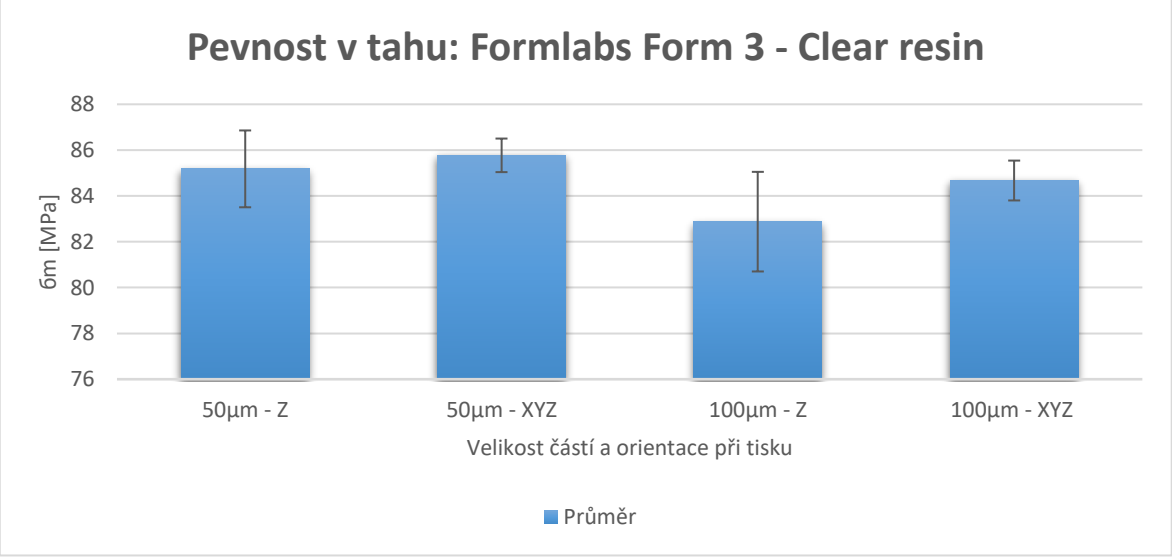
8.2.1 Tahová zkouška – Formlabs Form 3

Za pomocí 3D tiskárny Formlabs Form 3 při tisku ve vrstvě 50 a 100µm pryskyřice – Clear Resin. Orientace pro tisk byla zvolena v ose Z a kombinací os XYZ (napříč pracovním prostorem tiskárny). Výsledky modulu pružnosti v tahu můžeme vidět na grafu 8.



Graf 8 Modul pružnosti v tahu: Formlabs Form 3 – Clear Resin

Na grafu můžeme přehledně vidět, že nejlepší modul pružnosti v tahu je s použitím tiskové vrstvy 50µm v ose Z. Další detailní srovnání pevnosti v tahu je uvedena v grafu 9.



Graf 9 Pevnost v tahu: Formlabs Form 3 – Clear Resin

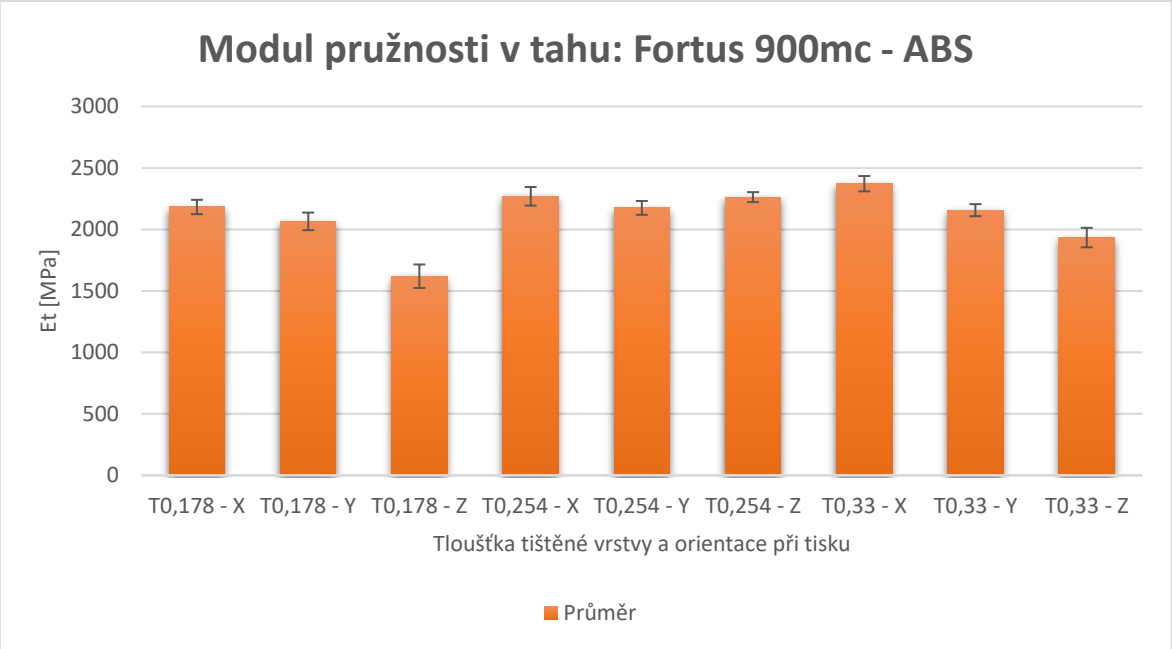
Pevnost v tahu nejlépe vychází ovšem při využití prostorového tisku ve všech osách XYZ s tiskovou vrstvou 50µm.

8.2.2 Tahová zkouška – Stratasys Fortus 900mc

Na 3D tiskárně Stratasys Fortus 900mc byl za účelem komparace vyrobeny zkušební tělesa z materiálu ABS a ULTEM, rovněž bylo vyrobeno i několik variant orientace tiskového materiálu s možností různých vrstev.

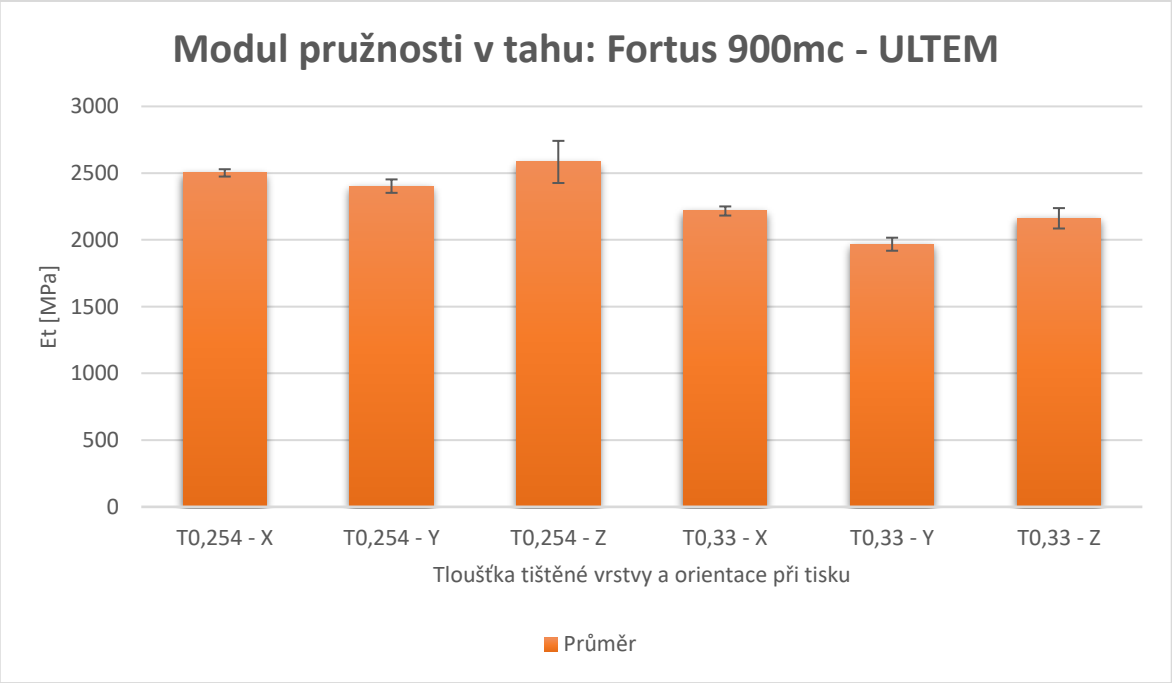
8.2.2.1 Modul pružnosti v tahu: Fortus 900mc

Modul pružnosti v tahu se testoval na vzorcích s tiskovou vrstvou 0,178, 0,254 a 0,33mm. Celkově nebyly rozdíly extrémně výrazné jako u předcházející tiskárny a matriálů. Na grafu 10 může vidět výsledky měření modelu pružnosti v tahu. Nejlepší výsledky má materiál s tiskovou vrstvou 0,33mm a orientací v ose X.



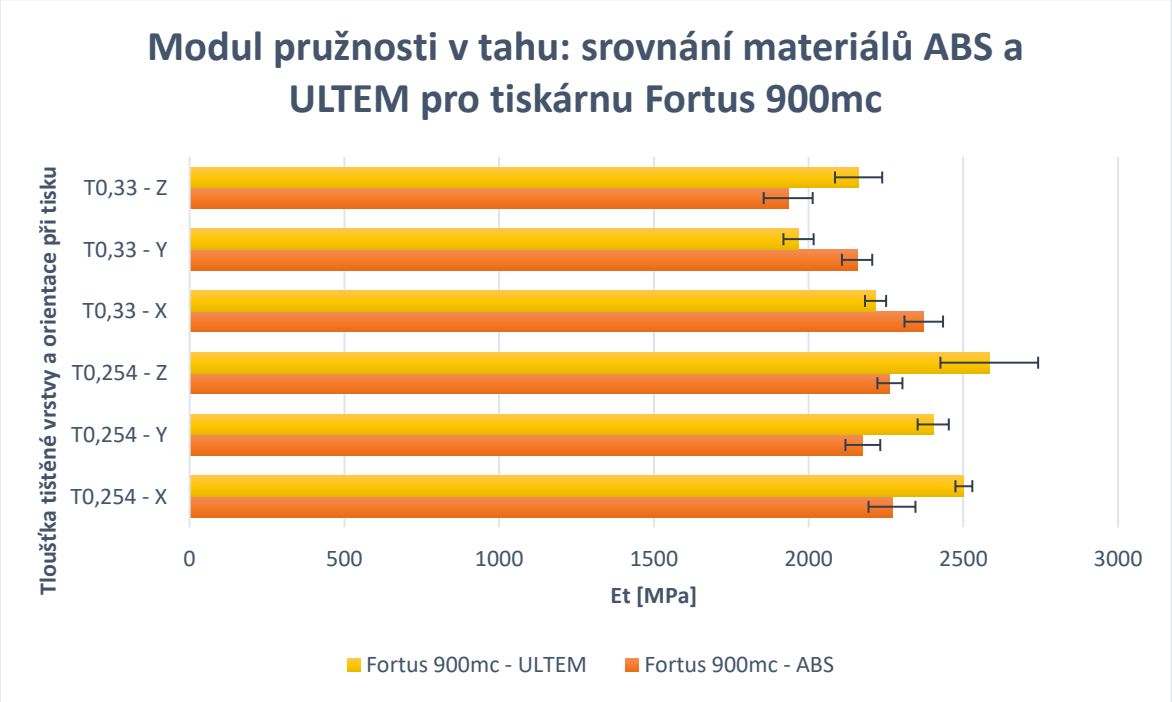
Graf 10 Modul pružnosti v tahu: Fortus 900mc – ABS

Další testovaný materiál ULTEM má naopak nejlepší vlastnosti při s tiskovou vrstvou 0,254mm a orientaci v ose Z, výsledky jsou uveden v grafu 11.



Graf 11 Modul pružnosti v tahu: Formlabs Form 3 – ULTEM

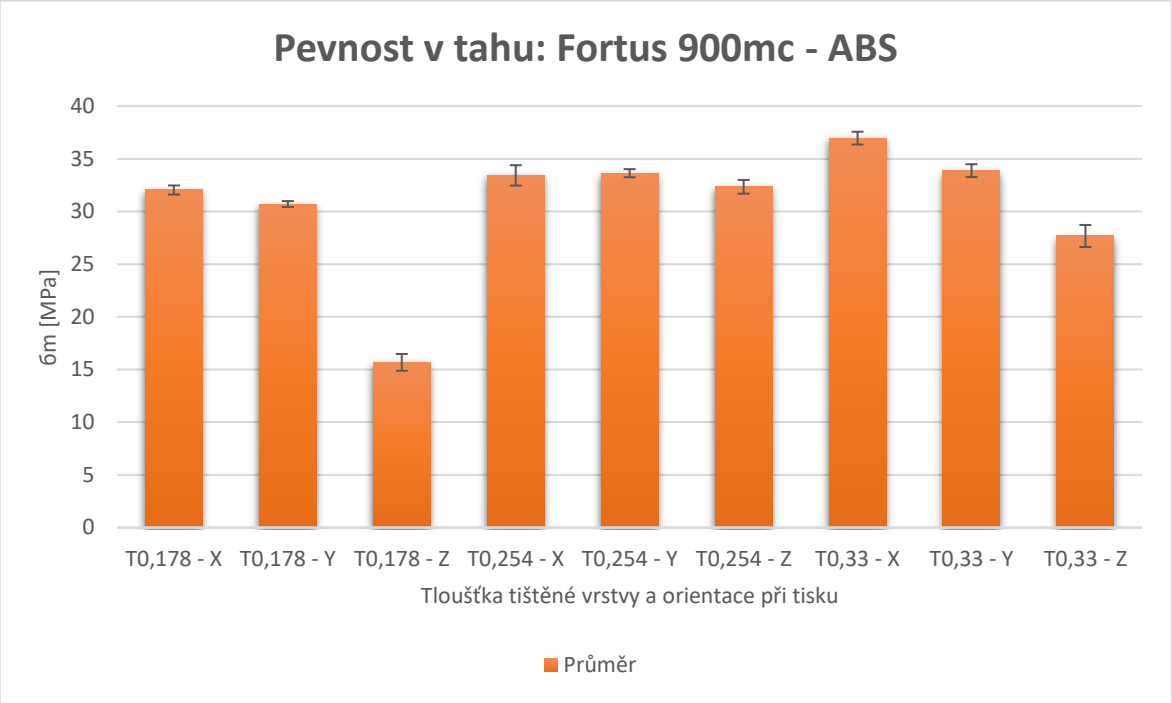
Celkové srovnání – modul pružnosti v tahu ABS a ULTEM, Nejlepší výsledky ve srovnání výše uvedených testu má materiál ULTEM při tiskové vrstvě 0,254mm a tisku orientovaném v ose Z, srovnání je uvedeno v grafu 12.



Graf 12 Modul pružnosti v tahu: srovnání materiálů ABS a ULTEM pro tiskárnu Fortus900 mc

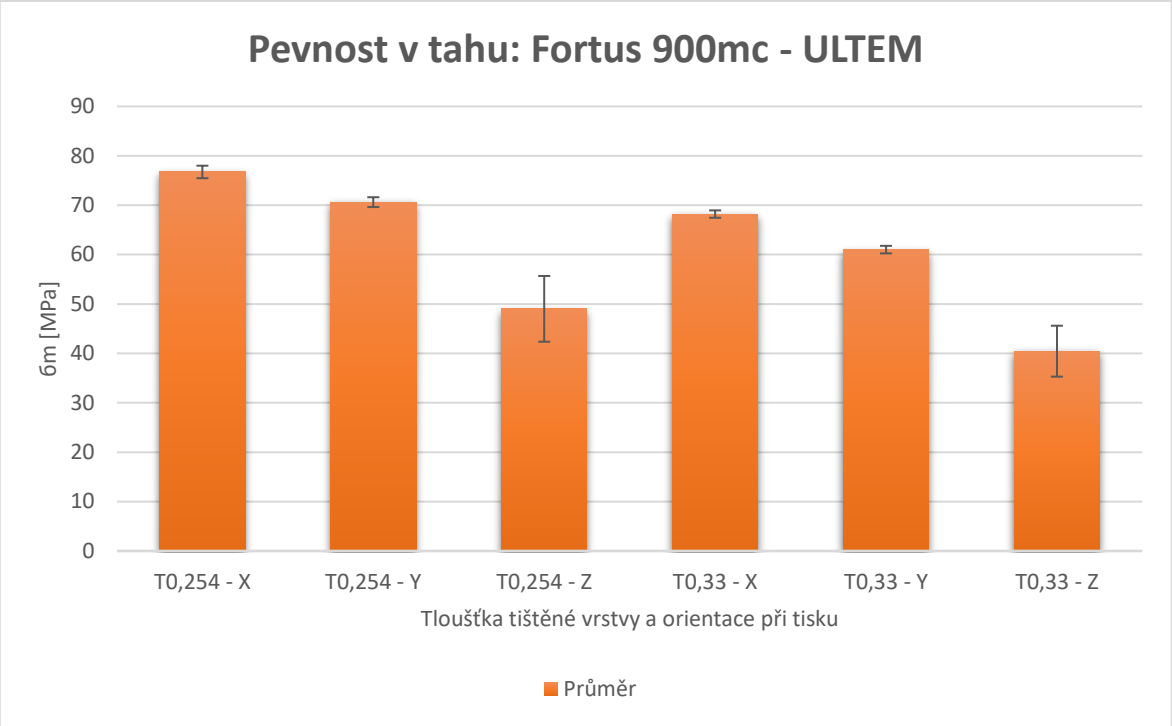
8.2.2.2 Pevnost v tahu: Fortus 900mc

Pevnost v tahu u použitého materiálu ABS je zobrazena na grafu 13, nejlepší výsledky jsou při vrstvě 0,33mm a orientaci tisku v ose X.



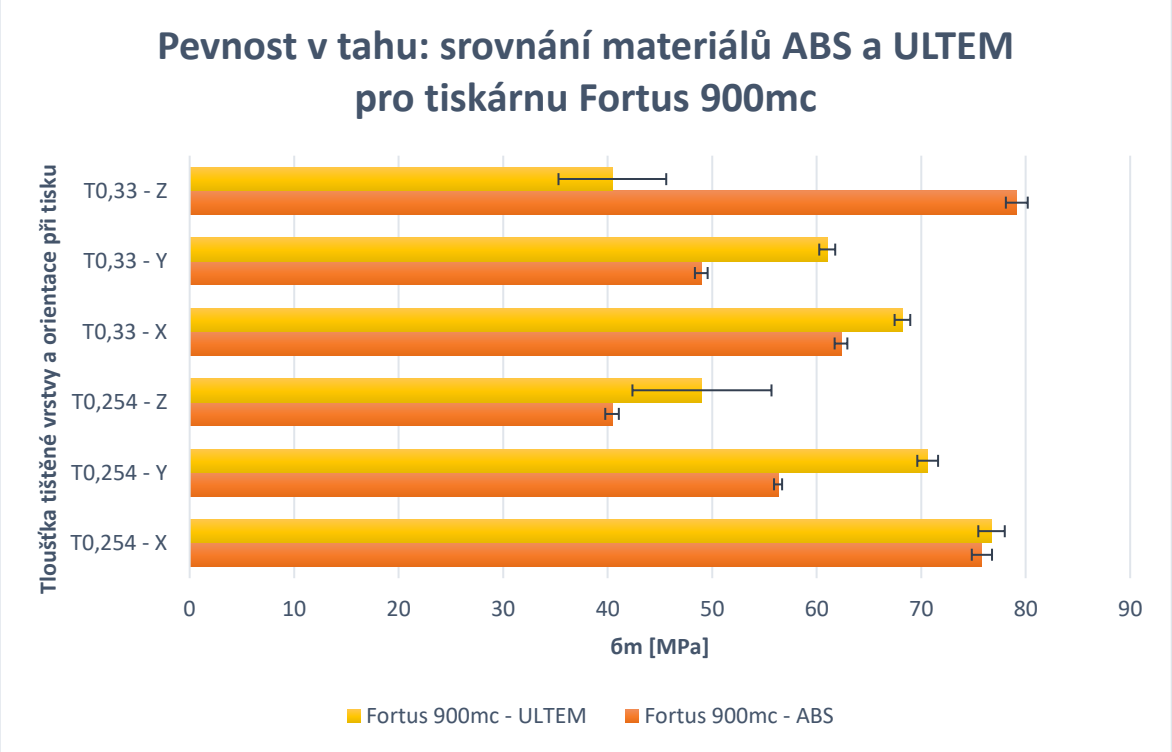
Graf 13 Pevnost v tahu: Fortus 900mc – ABS

Pevnost v tahu u použitého materiálu ULTEM je zobrazena na grafu 14, nejlepší výsledky jsou naopak při vrstvě 0,254mm při orientace tisku v ose X.



Graf 14 Pevnost v tahu: Fortus 900mc – ULTEM

Celkové přehledné srovnání materiálu ABS a ULTEM pro tiskárnu Fortus 900mc je zobrazeno v grafu 15. Nejlepší výsledky jsou při tloušťce tištěné vrstvy 0,33mm a orientaci Z při tisku s použitím materiálu ABS.



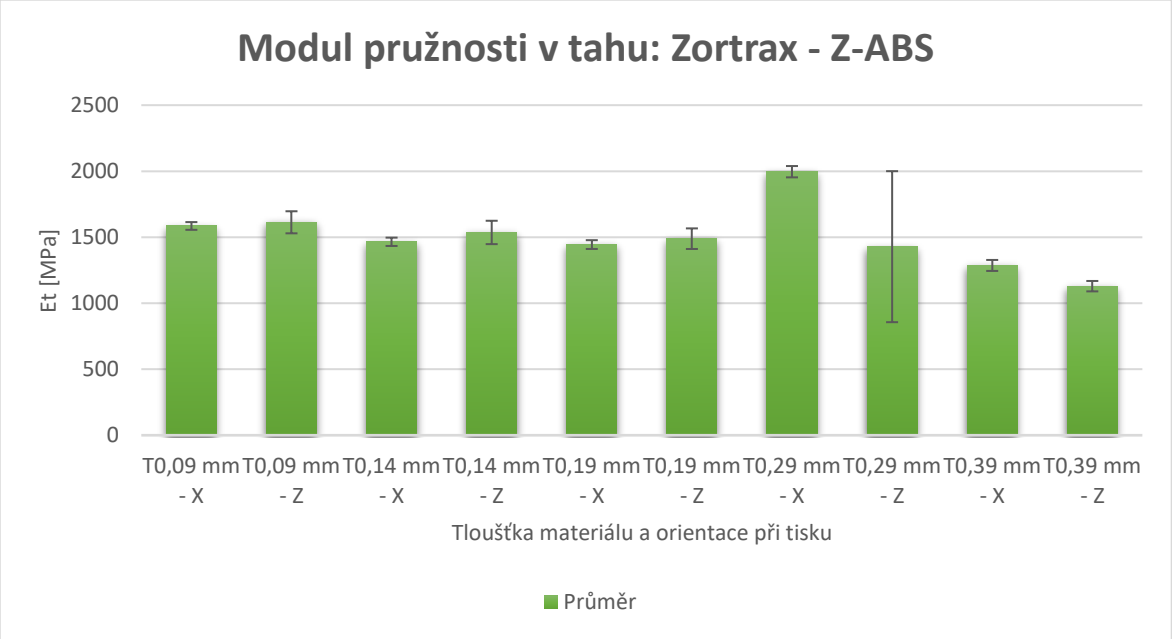
Graf 15 Pevnost v tahu: srovnání materiálů ABS a ULTEM pro tiskárnu Fortus 900mc

8.2.3 Tahová zkouška – Zortrax M200 Plus

Na 3D tiskárně Zortrax M200 Plus byly za účelem komparace vyrobeny zkušební tělesa z materiálu Z-ABS a Z-ULTRAT. Tyto dva materiály jsou dodávány přímo výrobcem tiskárny. Následně při tisku bylo vyrobeno i několik variant orientace tiskového materiálu s možností různých vrstev.

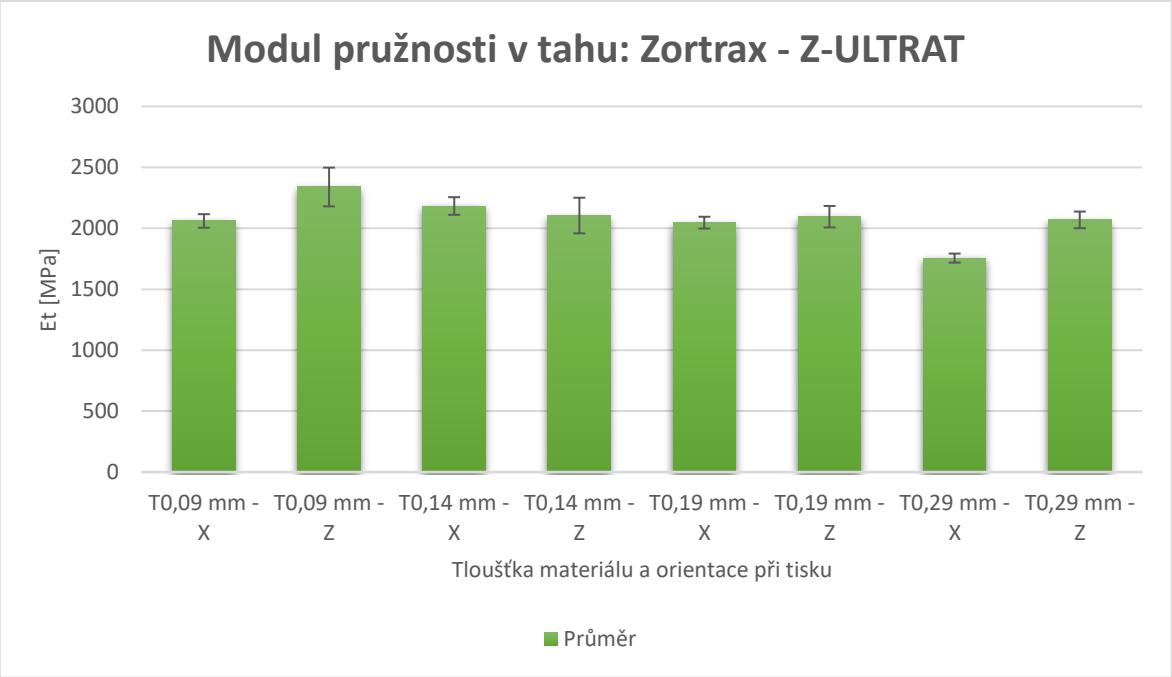
8.2.3.1 Modul pružnosti v tahu: Zortrax M200 PLUS

Modul pružnosti v tahu s použitým materiálem Z-ABS je zobrazen na grafu 16. Nejlepší vlastnosti jsou při tloušťce tiskové vrstvy 0,29mm a orientaci X při tisku.



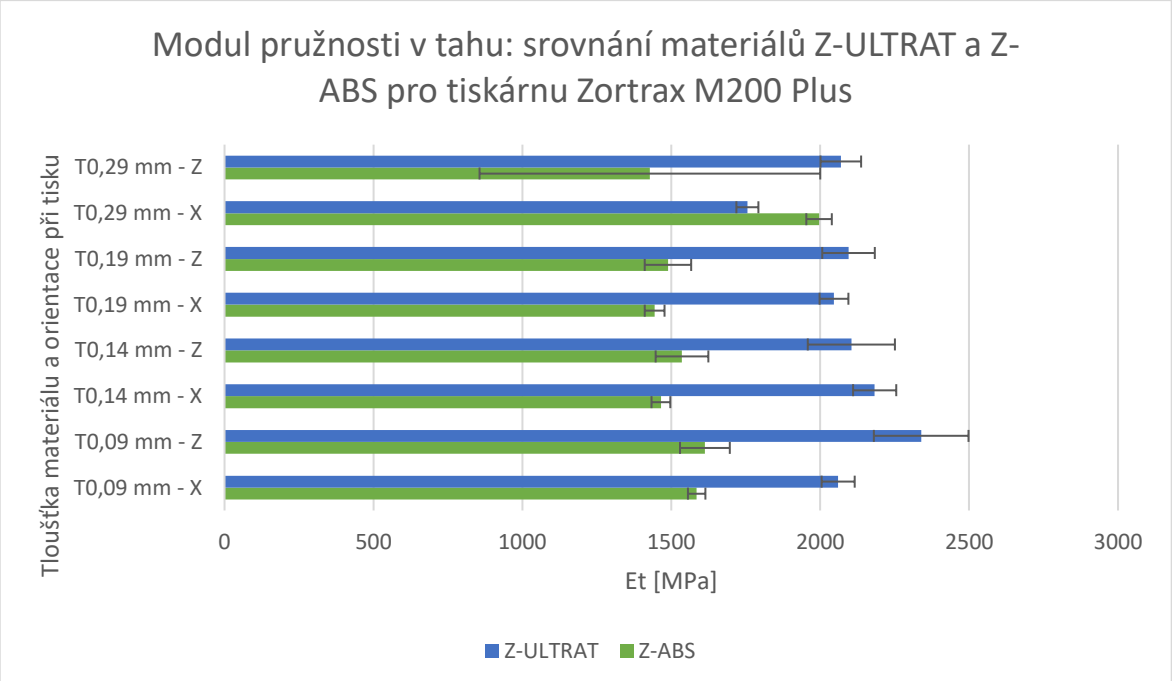
Graf 16 Modul pružnosti v tahu: Zortrax – Z-ABS

Modul pružnosti v tahu s použitým materiálem Z-ULTRAT je zobrazen na grafu 17. Nejlepší vlastnosti jsou naopak při tloušťce tiskové vrstvy 0,09mm a orientaci Z při tisku.



Graf 17 Modul pružnosti v tahu: Zortrax – Z-ULTRAT

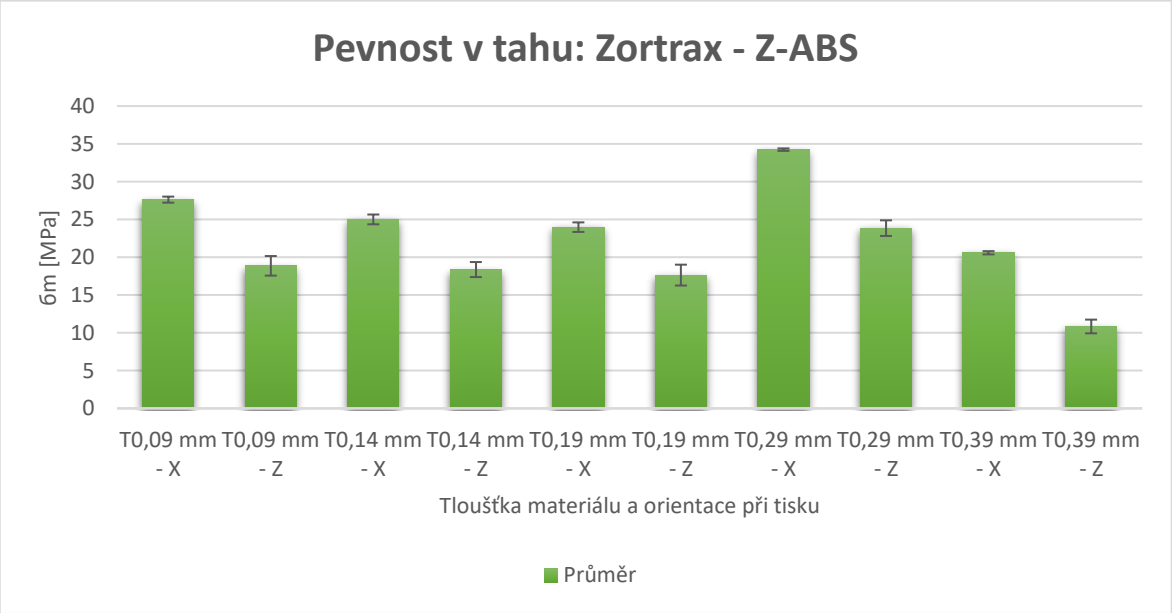
Celkové srovnání modulu pružnosti v tahu je uvedeno v grafu 18. Absolutně nejlepší vlastnosti z testovaných možností jsou při použití tloušťce tiskové vrstvy 0,09mm a orientaci Z při tisku.



Graf 18 Modul pružnosti v tahu: srovnání materiálů Z-ULTRAT a Z-ABS pro tiskárnu Zortrax M200 Plus

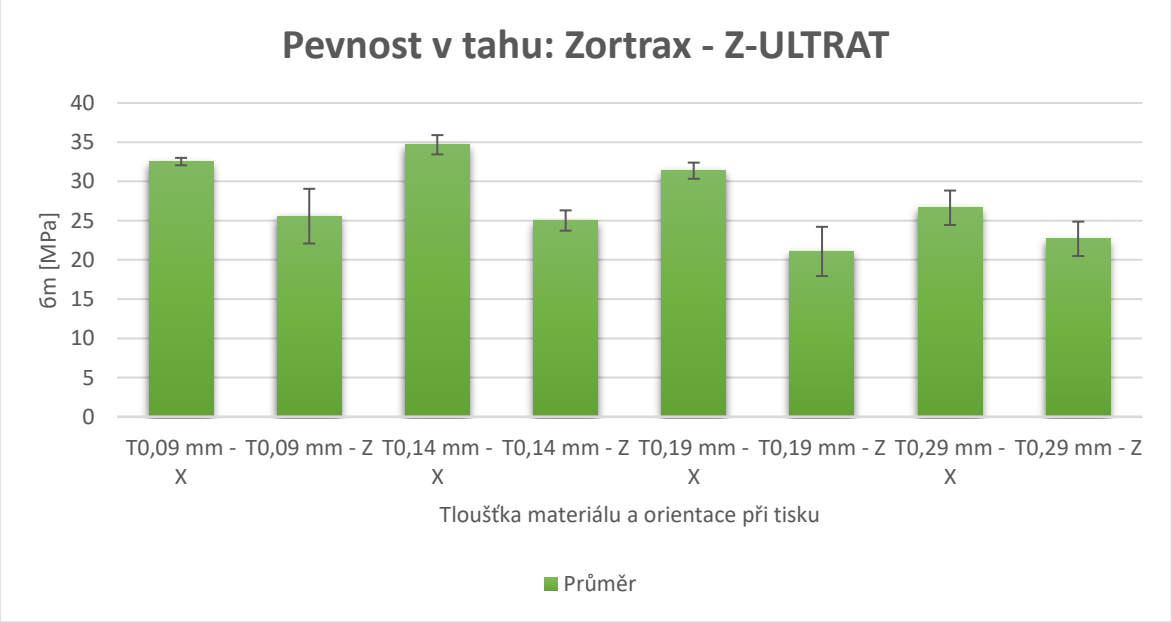
8.2.3.2 Pevnost v tahu: Zortrax M200 PLUS

Pevnost v tahu při použití materiálu Z-ABS je uvedena na grafu 19. Nejlepší vlastnosti jsou při tloušťce tiskové vrstvy 0,29mm a orientaci X při tisku.



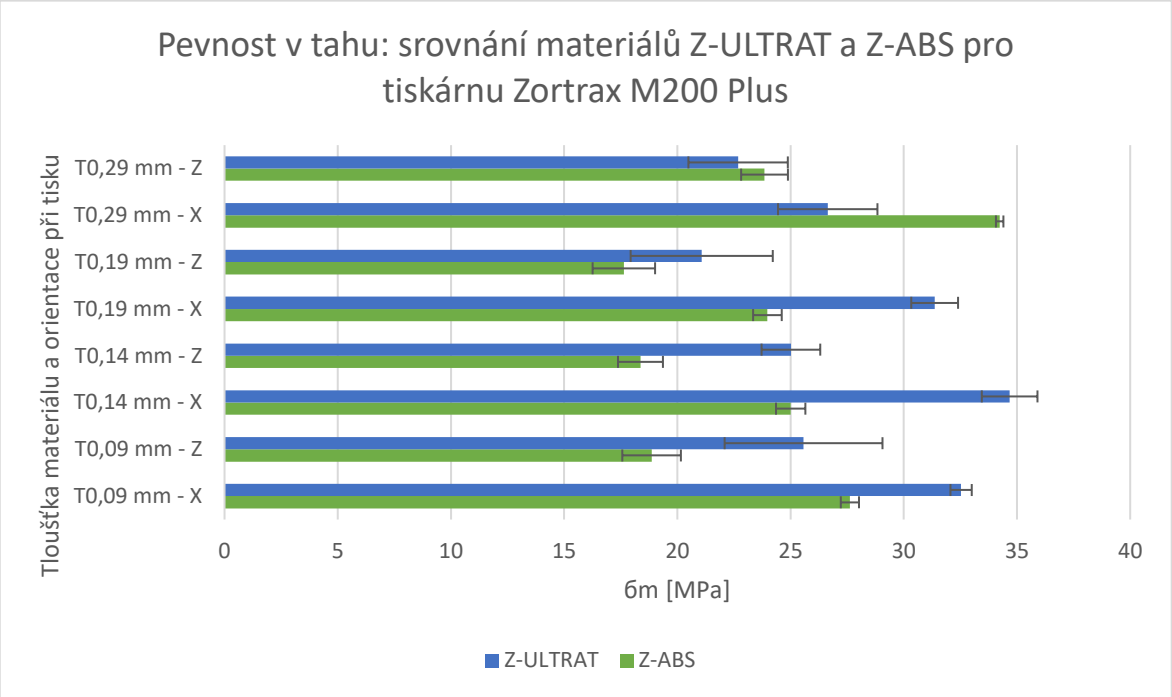
Graf 19 Pevnost v tahu: Zortrax - Z-ABS

Pevnost v tahu při použití materiálu Z-ULTRAT je uvedena na grafu 20. Nejlepší vlastnosti jsou při tloušťce tiskové vrstvy 0,14mm a orientaci X při tisku.



Graf 20 Pevnost v tahu: Zortrax - Z-ULTRAT

Celkové vyhodnocení pevnosti v tahu při použití materiálu Z-ABS a Z-ULTRAT jsou uvedena na grafu 21. Nejlepší vlastnosti jsou při použití materiálu Z-ULTRAT tloušťce tiskové vrstvy 0,14mm a orientaci X při tisku.



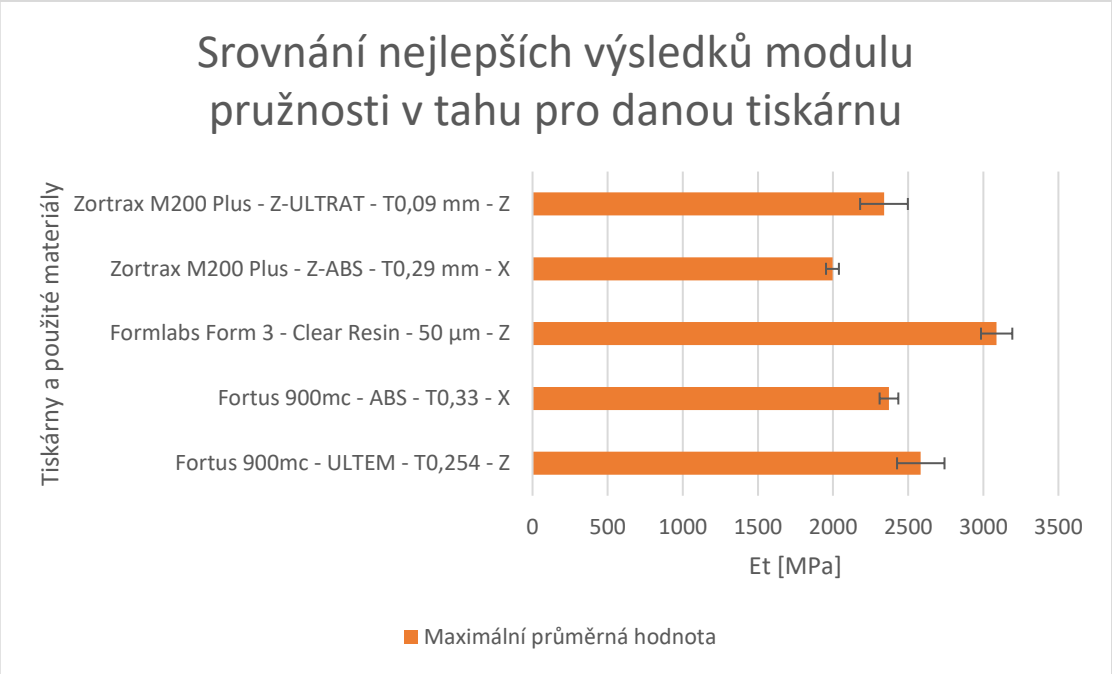
Graf 21 Pevnost v tahu: srovnání materiálů Z-ULTRAT a Z-ABS pro tiskárnu Zortrax M200 Plus

8.2.4 Vyhodnocení tahové zkoušky

Po změření všech výše uvedených variant byla data statisticky spravována a vzájemně komparována. Na níže uvedených grafech jsou vyobrazeny dosažené maximální průměrné hodnoty pro každý použitý materiál s použitým dané 3D tiskárny.

8.2.4.1 Celkové srovnání – modul pružnosti v tahu

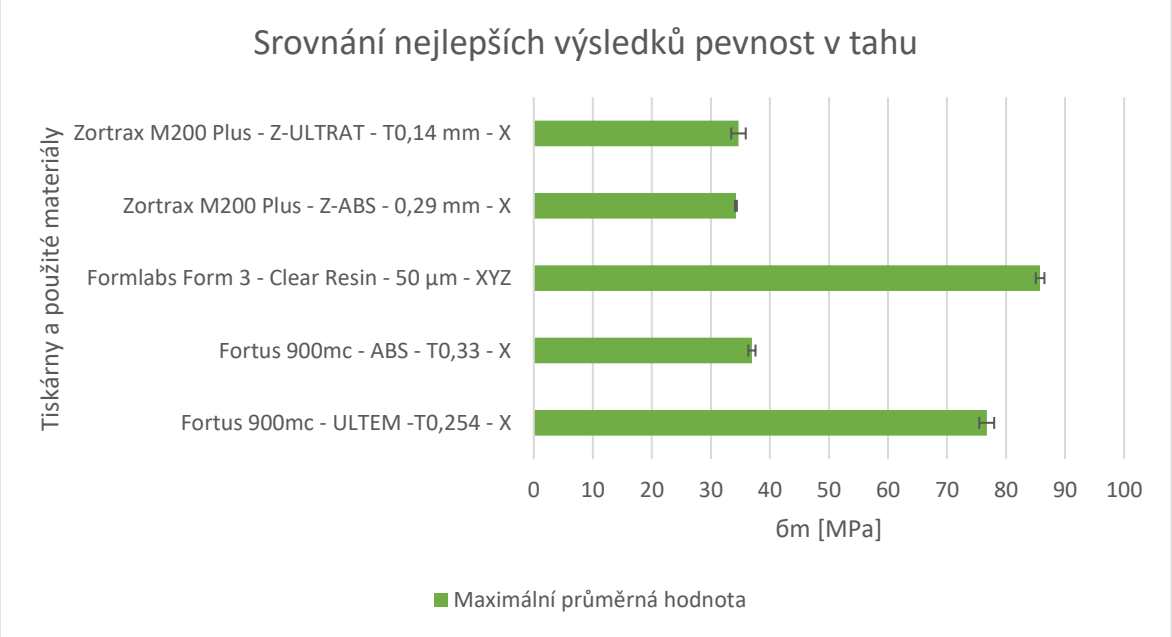
Na grafu 22 můžeme vidět srovnání výsledků modulu pružnosti v tahu, nejlepší vlastnosti pro tento modul má Clear Resin s tiskovou vrstvou 50µm v ose Z na SLA tiskárně Formlabs Form 3.



Graf 22 Srovnání nejlepších výsledků modulu pružnosti v tahu

8.2.4.2 Celkové srovnání – pevnost v tahu

Na grafu 23 můžeme vidět srovnání výsledků pevnosti v tahu, nejlepší vlastnosti pro tento modul má Clear Resin s tiskovou vrstvou 50µm ovšem vytisknutý v osách XYZ (prostorový tisk) na SLA tiskárně Formlabs Form 3.



Graf 23 Srovnání nejlepších výsledků pevnost v tahu

Výborné vlastnosti má taktéž materiál ULTEM při tloušťce vrstvy 0,254mm.

9 NDT ANALÝZA

NDT analýza poskytuje nejrůznější vyhodnocení, které má neocenitelný vliv za účelem odhalení vad procesu s následnou analýzou. Pro tento účel zde bylo využito NDT analýza za pomoci metrologického CT. Díky analýze vnitřní struktury můžeme predikovat, jak se bude daný vzorek chovat a aplikovat tuto skutečnost na DT analýzu.

9.1 Měření za pomocí CT

K tomuto byl použit stroj TomoScope HV 500 od německého výrobce Werth. Výhoda analýzy na tomto přístroji je, že poskytuje nejen NDT analýzu, ale rovněž může standartně vyhodnocovat rozměry. Přístroj je zobrazen na obrázku 34 a technické specifikace konkrétního přístroje jsou uvedeny v tabulce 19.

Obrázek 34 TomoScope HV 500 [42]

Tabulka 19 Technická konfigurace metrologického CT TomoScope HV 500 [43]

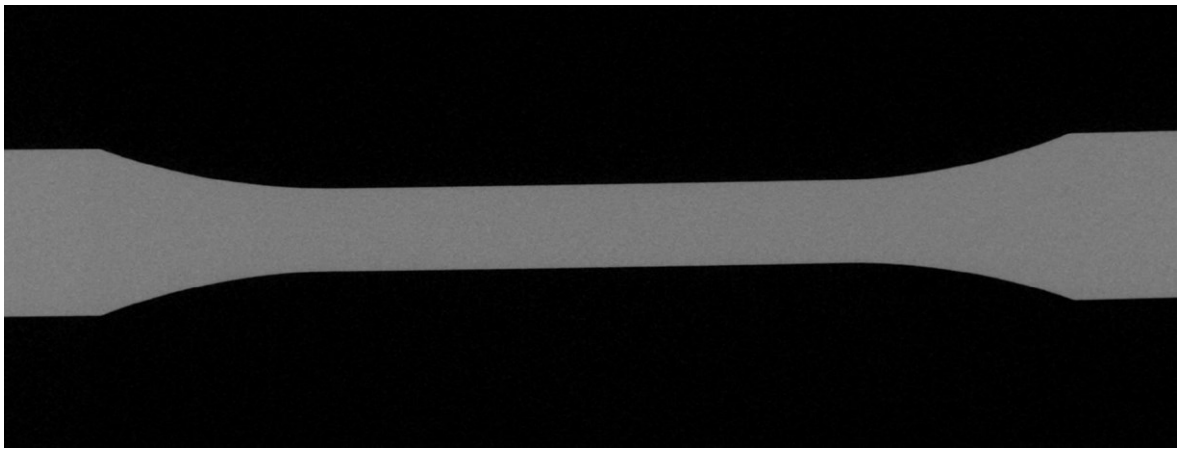
Technický parametr	***Hodnota***
Maximální urychlovací napětí zářiče	*300 kV*
maximální výkon zářiče	*300 W*
Rozlišení detektoru	*2048x2048 pix.*
Maximální měření odchylka snímače MPE	*4,5 + L/75 µm*

9.2 Vyhodnocení NDT

V tomto případě NDT analýza byla aplikována na předem vybrané vzorky, kvůli finanční a časové náročnosti tohoto detailního postupu. Vyhodnocení je provedeno ve formátu *.rek, který umožňuje nahlížet na sken z metrologického či běžného CT v 3D grafice a umožnit tak velmi precizní možnost nahlížení. Aplikovaní takového postupu bylo dosaženo i k potvrzení DT analýzy a následně potvrzení jednotlivých výsledků.

9.2.1 NDT analýza Clear Resin

Zkušební těleso vytvořeno za pomocí technologie SLA na tiskárně Formlabs Form 3 s použitím pryskyřice v tiskové vrstvě 50µm s orientaci v Z ose. Nebyla zjištěna žádná vnitřní vada, žádné vnitřní bublinky a ani vnější nepravidelná struktura, zobrazení můžeme vidět na obrázku 35.

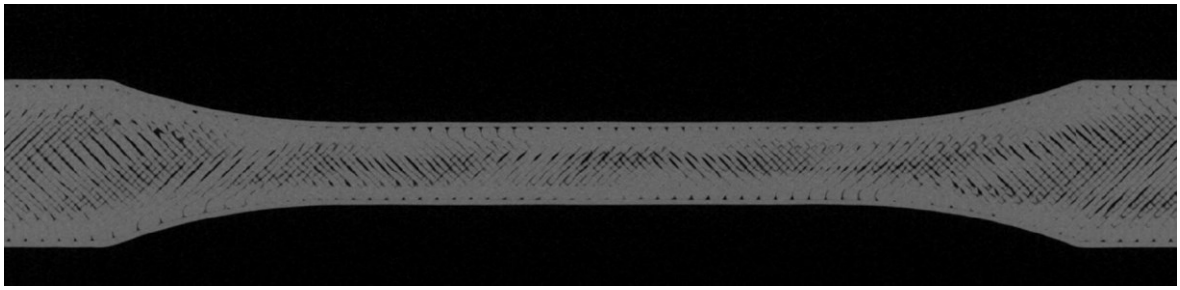


Obrázek 35 CT sken Clear Resin 50µm

Došlo tak k potvrzení naměřených hodnot v předchozí DT analýze, že 3D tisk z materiálu Clear Resin má nejlepší tahové vlastnosti oproti ostatním uvedeným.

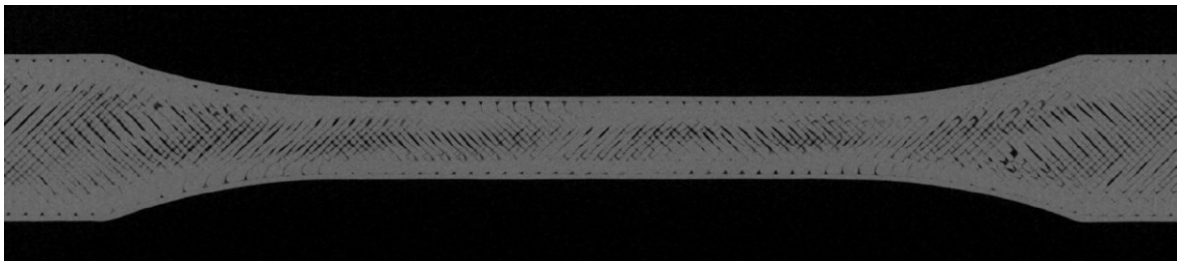
9.2.2 NDT analýza ABS s tiskovou vrstvou 0,178mm

Další zkoumaný vzorek byl vytvořen za pomocí FDM tiskárny Stratasys Fortus 900mc s použitím tiskové tloušťky 0,178mm a orientaci X při tisku. Detailní sken odhalil vnitřní vady na díle jako jsou nedokonalosti spojení jednotlivých vrstev s obvodem a vnitřní mezery. Tyto vady můžeme vidět na obrázku 36.



Obrázek 36 CT sken spodní strana – vrstva 0,178mm

Můžeme pozorovat i stejné vady nacházející se i na další straně zkoumaného dílce, které se navíc s vrstvou mění, detail na obrázku 37.

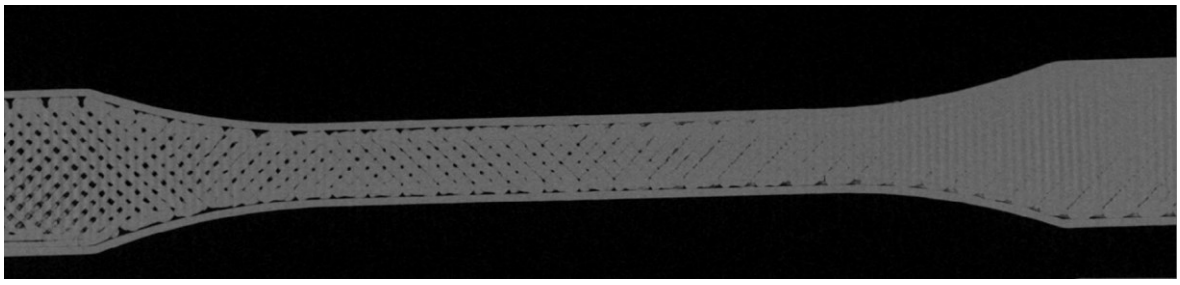


Obrázek 37 CT sken horní strana – vrstva 0,178mm

Při této zkoušce došlo k odhalení vnitřních nepravidelných vad, které mají neblahý vliv na mechanické vlastnosti.

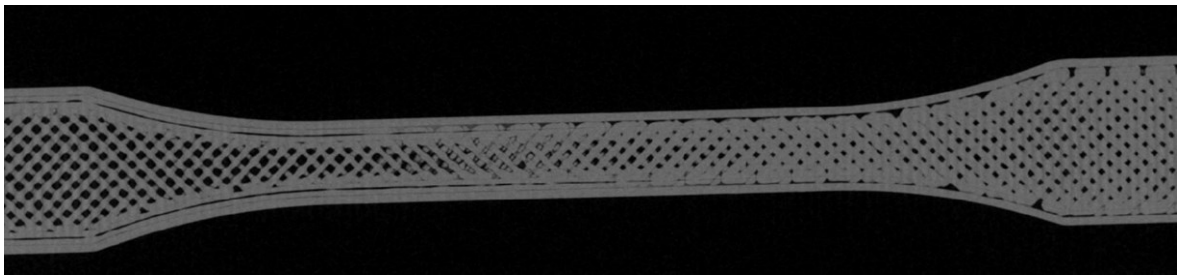
9.2.3 NDT analýza ABS s tiskovou vrstvou 0,33mm

Vzorek byl rovněž tisknut kvůli komparaci na stejné tiskárně FDM tiskárny Stratasys Fortus 900mc s použitím materiálu ABS s tiskovou tloušťkou vrstvy 0,33mm a orientaci X při tisku. NDT analýza toho zkoumaného kusu dopadla nejhůře. Vnitřní vady jsou snadno pozorovatelné a můžeme rovněž vidět oblasti bez materiálu, detail můžeme vidět na obrázku 38.



Obrázek 38 CT sken spodní strana – vrstva 0,33mm

Na obrázku můžeme pozorovat nedokonalosti s napojením jednotlivých vrstev a následně mírnou deformaci vnitřní struktury. Sken z horní vrstvy součástky odhaluje postupně se měnící deformace na obrázku 39.



Obrázek 39 CT sken horní strana – vrstva 0,33mm

9.3 Vyhodnocení NDT analýzy

Z uvedených obrázků můžeme usoudit, že při této analýze se prokázala příčina horších výsledků u tiskové tloušťky 0,33mm materiálu stejně tak jako v tahové zkoušce, které byly uvedeny v předchozí analýze.

Můžeme tak usoudit, že NDT analýza naprosto přesně prokázala výsledky DT analýzy, a navíc se dokázaly objevit i vnitřní skryté vady nebo i nedokonalosti napojení jednotlivých vrstev. Došlo i k potvrzení lepší výsledků při tisku technologií SLA. Zároveň pro další optimalizaci procesu má NDT analýza naprosto nepostradatelné přínosy.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala tématem „Vliv procesních parametrů na mechanické vlastnosti, kvalitu a přesnost 3D výtisků“, cílem práce bylo zjistit a ověřit skutečné vlastnosti po stránce přesnosti a mechanických vlastností s přihlédnutím k tomuto celému procesu a popsat tento proces ověřování a komparace krok po kroku.

Práce byla rozdělena do dvou hlavních částí. První teoretická část se zabývá technologiemi 3D tisku, metrologií a jejím vývojem, dále zkouškami mechanických vlastností a v poslední kapitole je podrobně popsána technologie CAD/CAM. Druhá praktická část bakalářské práce popisuje celkově proces od výroby přes měření až po vyhodnocení daných náměrů. Táto část je přehledně rozdělaná na navrhnutí těles pro analýzy, provedení rozměrové analýzy, DT analýzu a NDT analýzu.

Zadání a cíle bakalářské práce byly naplněny, navíc se podařilo vytvořit detailní pohled na CAD/CAM technologii, náhled do programování za pomocí DMIS kódu. Většina měření se naplnila, dle očekávání a navzájem se dokázaly potvrdit při porovnání z dokumentací dodaných výrobcem.

Věřím, že práce byla přínosem pro mě i pro mnoho aplikací v budoucnu. Z této práce se může následně vycházet pro optimalizaci již prováděných aplikací a může být i dostatečně inspirativní pro použití v nejrůznějších odvětvích. Výsledky by mohly a měly být použity pro další potencionální práci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] STŘÍTESKÝ, Ondřej. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. 1. Praha: Prusa Research a.s, 2019.

[2] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. 1. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-802-5148-761.

[3] REDWOOD, Ben, Filemon FILEMON SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. 1. Amsterdam: 3D Hubs B.V., 2017. ISBN 978-90-827485-0-5.

[4] RAGHAVENDRA, N.V. a L. KRISHNAMURTHY. *ENGINEERING METROLOGY AND MEASUREMENTS*. 1. Oxford: Oxford University Press, 2013. ISBN 978-0-19-808549-2.

[5] BENNETT, Keith, Jay L. BUCHER, Hershal BREWER, David BROWN, Christopher GRACHANEN a Emil HAZARIAN. *The Metrology Handbook*. Second Edition. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2012. ISBN 978-0873898386.

[6] HOWARTH, Preben a Fiona REDGRAVE. *METROLOGY – IN SHORT*. 3rd. Dánsko: Schultz Grafisk, 2008. ISBN 978-87-988154-5-7.

[7] PODBORSKÝ, Vladimír. *Úvod do studia archeologie*. Brno: Masarykova univerzita, 2012. ISBN 978-80-210-6160-6.

[8] JELÍNEK, František, Silvie HOFFMANOVÁ a A KOL. *Metrologie v kostce*. Třetí upravené a doplněné vydání. Praha: Bořivoj Kleník, PhDr. – Q-art, 2009. ISBN neuvedeno.

[9] KAMINSKÝ, Daniel. Průmysl a spektrum. *Průmysl 4.0 a čtvrtá průmyslová revoluce* [online]. ČR: neuvedeno, 2016 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/prumysl-4-0-a-ctvrta-prumyslova-revoluce

[10] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky. *Revoluční změna definice jednotek soustavy SI vstupuje v platnost* [online]. ČR: neuvedeno, 2019 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/revolucni-zmena-definice-jednotek-soustavy-si-vstupuje-v-platnost--246278/

[11] Změny ve struktuře soustavy jednotek SI (Grafické zobrazení vazeb mezi základními jednotkami SI před a po redefinici). Český metrologický institut [online]. neuvedeno: neuvedeno, neuvedeno [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/Zm%C4%9Bny%20ve%20struktu%C5%99e%20SI.pdf

[12] ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT. *Návaznost metrologické kalibrace* [online]. ČR: neuvedneno, 2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/obr%20NMSB.jpg

[13] CHRISTOPH, Ralf, NEUMANN, Joachym. *Multisenzorová souřadnicová měřící technika : měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti - opticky, dotykově a rentgenovou tomografii*. 4. Uherské Hradiště : PRIMA Bilavčík, 2008. ISBN: neuvedeno

[14] Ideu Průmyslu 4.0 nelze realizovat bez inline metrologie. Technicky portal [online]. neuvedeno: Business Media CZ, 2016, 4. dubna 2016 [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/ideu-prumyslu-4-0-nelze-realizovat-bez-inline-metrologie_35069.html

[15] SEVECOMM. *The History of CAD/CAM since 1957* [online]. SEVOCOMM: neuvedeno, 2021 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://sevocomm.com/2020/10/16/the-history-of-cad-cam-since-1957/

[16] WEISBERG, David E. The Engineering Design Revolution: The People, Companies and Computer Systems That Changed Forever the Practice of Engineering [online]. 1. Englewood: neuvedeno, 2008 [cit. 2021-5-10]. ISBN neuvedeno. Dostupné z: https://www.cadhistory.net/toc.htm

[17] GEDDES, Duncan. Technical foam services engineering excellence in foam conversion. *The history of computer-aided design and computer-aided manufacturing (CAD/CAM)* [online]. 2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://www.technicalfoamservices.co.uk/blog/blog-history-of-cad-cam/

[18] BÉZIER, Pierre. Computers in Industry. *Computers in Industry*. 1983, **4**(2), 115-126. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0166361583900179).

[19] COHN, David. Evolution of Computer-Aided Design: How we got to where we are, and where are we headed. *Digital Engineering* [online]. neuvedeno: neuvedeno, 2010, 1 December 2010 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: https://www.digitalengineering247.com/article/evolution-of-computer-aided-design/

[20] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe.* Praha: Grada, 2018. ISBN 978-802-7106-141.

[21] SCIENCESOFT. *Virtual Reality in the Automotive Industry: Market, Adoption, Use Cases* [online]. ScienceSoft USA Corporation: neuvedeno, 2021 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.scnsoft.com/virtual-reality/automotive

[22] ZEISS CALYPSO PMI. *ZEISS CALYPSO PMI – automaticky od CAD modelu k plánu měření* [online]. ČR, 2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/software/zeiss-calypso/zeiss-calypso.html

[23] GERE, James M. Mechanics of Materials. SIXTH EDITION. neuvedeno: Thomson Learning, 2004. ISBN 0-534-41793-0.

[24] HELLIER, Charles J. a Chuck HELLIER. Handbook of Nondestructive Evaluation. neuvedeno: McGraw-Hill Professional, 2001. ISBN 978-0070281219.

[25] BILAVČÍK, PRIMA. Zakázkové měření na CT. *Analýza netěsnosti trubky. Prima Bilavčík* [online]. neuvedeno: neuvedeno, 2015 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: http://ct-ndt.cz/analyza-netesnosti-trubky.html

[26] Univerzita Karlova - matematicko-fyzikální fakulta. *Pevnost a lom látek* [online]. ČR: neuvedeno, 2021 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_6

[27] Zkouška tahem [online]. Neuvedeno. Olomoucký kraj: ELUC, neuvedeno [cit. 2021-5-10]. ISBN neuvedeno. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1566

[28] SMOLEK, Jan. Pevnostní zkouška statická na tah [online]. CZ.1.07. Brno: neuvedeno, neuvedeno [cit. 2021-5-10]. ISBN neuvedeno. Dostupné z:

http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_23%E2%80%9307.pdf

[29] ČSN EN ISO 527-2. Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. 2012. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[30] ASME Y14.5-2009. Dimensioning and Tolerancing: Engineering Drawing and Related Documentation Practices. 2009. Fairfield: The American Society of Mechanical Engineers, 2009.

[31] ULTIMAKER. *Ultimaker 3* [online]. Ultimaker BV: neuvedeno, 2021 [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-3

[32] ANYCUBIC. *Kossel Plus* [online]. ANYCUBICKÝ 3D tisk: neuvedeno, 2021 [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: https://www.anycubic.com/products/anycubic-kossel-3d-printer

[33] ZORTRAX. *M200 plus specification* [online]. neuvedeno: Zortrax, 2021 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: https://support.zortrax.com/m200-plus-specification/

[34] 3DJAKE. *M200 Plus včetně krytu HEPA* [online]. Niceshops GmbH: neuvedeno, 2021 [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: https://www.3djake.cz/zortrax/m200-plus-vcetne-krytu-hepa?gclid=Cj0KCQjw1PSDBhDbARIsAPeTqrdOU0KYvTiPiCAI6WZYS3yGqjJ9LkJk_WgXwjNhWjbXpGc7HMpTqUcaApf3EALw_wcB

[35] MCAE Systems. *Stratasys F900* [online]. ČR: neuvedeno, 2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://www.mcae.cz/produkty/stratasys-f900/?gclid=Cj0KCQjw4v2EBhCtARIsACan3nxuQF6ecD9w2Q1N2-aBKmR4wXqBpWMJIxc6Sddx5-K5ldpBXtXar7EaAgB8EALw_wcB

[36] FORMLABS. *Low Force Stereolithography (LFS) 3D Printer.* Formlabs, 2019.

[37] PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ A METROLOGII 2021 [online]. Neuvedeno. Uherský Brod: neuvedeno, 2020 [cit. 2021-5-10]. ISBN neuvedeno. Dostupné z: https://www.merici-pristroje.cz/files/ckeditor/kestazeni/katalog/KATALOG_PDF_2021.pdf

[38] RENISHAW. *SP25M* [online]. Renishaw plc.: neuvedeno, 2021 [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: https://www.renishaw.cz/cs/sp25m--6688

[39] KEITH, Mills. Demystifikace DMIS. *QUALITY DIGGEST* [online]. neuvedeno: neuvedeno [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: https://www.qualitydigest.com/oct99/html/dmis.html

[40] User Manual: DMIS Programming. Edition 1/2007. Giessen: Werth Messtechnik, 2007. ISBN neuvedeno.

[41] LABOR TECH. *Production of materials testing equipment and automation* [online]. CZ: neuvedeno, 2019 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: https://www.labortech.cz/wp-content/uploads/2019/10/LabTest-E.2-up-50kN-EN.pdf

[42] WERTH. *Werth TomoScope® HV 500* [online]. Gießen: neuvedeno, 2019 [cit. 2021-4-2]. Dostupné z: https://www.werth.de/us/unser-angebot/products/multisensor-cmms/for-computer-tomography/werth-tomoscope-hv-500.html

[43] BILAVČÍK, PRIMA. Zakázkové měření na CT. *Přístroje pro měření a metrologie Prima Bilavčík* [online]. neuvedeno: neuvedeno, 2015 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: https://ct-ndt.cz/zakazkove-mereni-na-ct.html

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D CMM	3D Souřadnicový měřící přístroj
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AR	Augmented Reality
ASA	Acrylonitrile styrene acrylate
BIPM	Mezinárodní úřad pro váhy a míry
BVOH	Butenediol vinylalkoholový kopolymer
CAD	Počítačem podporované navrhování
CAM	Počítačově podporované obrábění
DMIS	Dimensional Measuring Interface Standard
DOD	Drop on Demand
DPL	Digital light processing
DT	Destruktivní testování
FDM	Fused filament fabrication
FFF	Fused Filament Fabrication
FLEX	Flexibilní materiál
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MSLA	Proprietary liquid crystal mask technology
NDT	Nedestruktivní testování
PEG	Polyethyleneglycol
PLA	Polylaktidová vlákna
PLA	Polylactic acid
PLM	Product Lifecycle Management
PMI	Product Manufacturing Information
PVA	Polyvinylalkohol
SLA	Stereolithography

SLS	Selective Laser Sintering
ULTEM	Polyeterimid
VR	Virtual Reality
Z-ABS	Zortrax ABS
Z-ULTRAT	Zortrax ULTAT

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 SLA laser 14
Obrázek 2 DPL – SLA 14
Obrázek 3 MSLA 14
Obrázek 4 Změny ve struktuře Soustavy SI. 22
Obrázek 5 Řetězec návaznosti. 24
Obrázek 6 3D CAD dat s integrací PMI v měřícím software Calipso 30
Obrázek 7 NDT analýza trhliny svaru 32
Obrázek 8 Zkušební přístroje pro tahové zkoušky 33
Obrázek 9 Znázornění deformační křivky a tvaru testovacího tělesa 34
Obrázek 10 Kontrolované rozměry zkušebních těles 36
Obrázek 11 Kontrolované rozměry zkušebních těles 37
Obrázek 12 Obecné zakřivené plochy modelu 38
Obrázek 13 Detail sražených hran a rádiusu 38
Obrázek 14 Zobrazení modelu v perspektivě 39
Obrázek 15 Návrh výkresu v rozhraní Inventor 2021 40
Obrázek 16 Zobrazení pro tisk 41
Obrázek 17 3D tiskárna Ultimaker 3 42
Obrázek 18 3D tiskárna Anycubic kossel linear plus 44
Obrázek 19 3D tiskárna Zortrax M200 plus s krytem HEPA 45
Obrázek 20 3D tiskárna Stratasys Fortus 900mc 46
Obrázek 21 3D tiskárna Formlabs Form 3 47
Obrázek 22 Werth Scope-Check MB 650 48
Obrázek 23 Konfigurace doteků pro sondu SP-25 49
Obrázek 24 Programování technologií CAD/CAM v programu WinWerth 50
Obrázek 25 Programování skenovací sondy v programu WinWerth 51
Obrázek 26 DMIS kód 54
Obrázek 27 Vyrovnání pro měření za pomocí přípravku 55
Obrázek 28 Proces měření skenovací sondou SP-25 56
Obrázek 29 Odchylka tvaru drážky – Formlabs Form 3 57
Obrázek 30 Odchylka tvaru – Stratasys Fortus 900mc – ABS 59
Obrázek 31 Odchylka tvaru – Zortrax M200 PLUS – Z-ULTRAT 60
Obrázek 32 Upnutí testovacího vzorku při měření tahové zkoušky 68
Obrázek 33 Detailní pohled na upnutí – zkouška tahu 69

Obrázek 34 TomoScope HV 500 80
Obrázek 35 CT sken Clear Resin 50µm 81
Obrázek 36 CT sken spodní strana – vrstva 0,178mm 82
Obrázek 37 CT sken horní strana – vrstva 0,178mm 82
Obrázek 38 CT sken spodní strana – vrstva 0,33mm 82
Obrázek 39 CT sken horní strana – vrstva 0,33mm 83

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vývoj průmyslu 12
Tabulka 2 Vývoj metrologie 18
Tabulka 3 Soustava SI 23
Tabulka 4 Rozměry zkušebních těles daných normou 37
Tabulka 5 Technické specifikace Ultimaker 3 42
Tabulka 6 Technické specifikace Anycubis kossel linear plus 43
Tabulka 7 Technické specifikace Zortax M200 plus 44
Tabulka 8 Technické specifikace Stratasys Fortus 900mc 45
Tabulka 9 Technické specifikace Formlabs Form 3 46
Tabulka 10 Parametry maximální odchylky přístroje 49
Tabulka 11 Nepoužívanější DMIS příkazy. 52
Tabulka 12 Výsledky měření: Formlabs Form 3 – Clear Resin 56
Tabulka 13 Výsledky měření: Anycubic kossel linear plus – PLA 57
Tabulka 14 Výsledky měření: Anycubic kossel linear plus – PLA 58
Tabulka 15 Výsledky měření: Stratasys Fortus 900mc – ABS 58
Tabulka 16 Výsledky měření: Zortrax M200 Plus – Z-Ultrat 59
Tabulka 17 Výsledky měření: Zortrax M200 Plus – Z-ABS 60
Tabulka 18 Technické parametry LabTest E.2, verze 50kN 67
Tabulka 19 Technická konfigurace metrologického CT TomoScope HV 500 80

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Pozice 2 – výška 15 ± 0,2mm 62
Graf 2 Pozice 13 – délka kusu 90 ± 0,2mm 62
Graf 3 Pozice 14 – odchylka tvaru 0,5mm 63
Graf 4 Pozice 15 – odchylka tvaru 0,3mm 64
Graf 5 Pozice 17 – pozice děr 0,4mm 64
Graf 6 Pozice 19 – šířka kusu 40 ± 0,2mm 65
Graf 7 Pozice 25 – odchylka tvaru 0,3mm 66
Graf 8 Modul pružnosti v tahu: Formlabs Form 3 – Clear Resin 70
Graf 9 Pevnost v tahu: Formlabs Form 3 – Clear Resin 70
Graf 10 Modul pružnosti v tahu: Fortus 900mc – ABS 71
Graf 11 Modul pružnosti v tahu: Formlabs Form 3 – ULTEM 72
Graf 12 Modul pružnosti v tahu: srovnání materiálů ABS a ULTEM pro tiskárnu Fortus900 mc 72
Graf 13 Pevnost v tahu: Fortus 900mc – ABS 73
Graf 14 Pevnost v tahu: Fortus 900mc – ULTEM 74
Graf 15 Pevnost v tahu: srovnání materiálů ABS a ULTEM pro tiskárnu Fortus 900mc 74
Graf 16 Modul pružnosti v tahu: Zortrax – Z-ABS 75
Graf 17 Modul pružnosti v tahu: Zortrax – Z-ULTRAT 76
Graf 18 Modul pružnosti v tahu: srovnání materiálů Z-ULTRAT a Z-ABS pro tiskárnu Zortrax M200 Plus 76
Graf 19 Pevnost v tahu: Zortrax - Z-ABS 77
Graf 20 Pevnost v tahu: Zortrax - Z-ULTRAT 77
Graf 21 Pevnost v tahu: srovnání materiálů Z-ULTRAT a Z-ABS pro tiskárnu Zortrax M200 Plus 78
Graf 22 Srovnání nejlepších výsledků modulu pružnosti v tahu 79
Graf 23 Srovnání nejlepších výsledků pevnost v tahu 79

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: OPOZICOVANÝ VÝKRES KONTROLNÍ SOUČÁSTI

Příloha P II: MĚROVÝ PROTOKOL: FORMLABS FORM 3 – CLEAR RESIN

Příloha P III: MĚROVÝ PROTOKOL: ANYCUBIC KOSSEL LINEAR PLUS – PLA

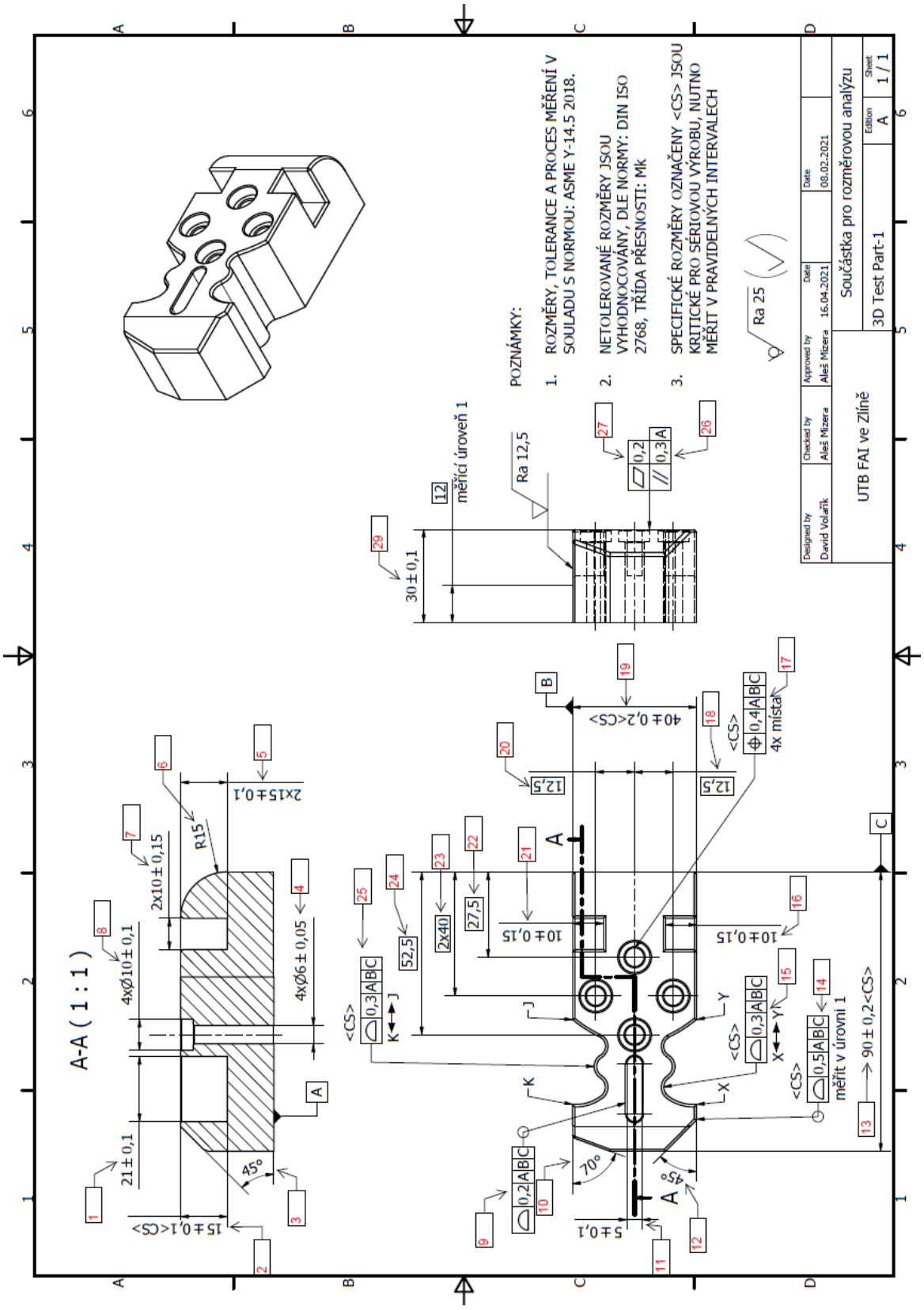
Příloha P IV: MĚROVÝ PROTOKOL: ULTIMAKER 3 – PLA

Příloha P V: MĚROVÝ PROTOKOL: STRATASYS FORTUS 900MC – ABS

Příloha P VI: MĚROVÝ PROTOKOL: ZORTRAX M200 PLUS – Z-ULTRAT

Příloha P VII: MĚROVÝ PROTOKOL: ZORTRAX M200 PLUS – Z-ABS

PŘÍLOHA P I: OPOZICOVANÝ VÝKRES KONTROLNÍ SOUČÁSTI



PŘÍLOHA P II: MĚROVÝ PROTOKOL: FORMLABS FORM 3 – CLEAR RESIN

Měrový protokol												
Dílec: 3D Test Part-1			**Tiskárna:**	Formlabs Form 3				**Materiál:**			CR	
Poz.	Metoda	znak	Nominal [mm]	Tolerance		Naměřené výsledky [mm]						pozn.
				+	-	1	2	3	4	5	6	
1	CMM		21,00	+0,10	-0,10	21,021	21,072	20,962	21,022	21,035	20,942	
2	CMM		15,00	+0,10	-0,10	**15,218**	**15,238**	**15,303**	15,063	15,088	15,065	
3	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	44,553	44,534	**44,453**	44,794	44,622	44,864	
4	CMM	ø	6,00	+0,05	-0,05	**6,064**	**6,076**	**6,064**	**6,055**	**6,051**	**6,084**	A
		ø	6,00	+0,05	-0,05	**6,100**	**6,091**	**6,057**	**6,074**	**6,070**	**6,101**	B
		ø	6,00	+0,05	-0,05	**6,114**	**6,108**	**6,098**	**6,089**	**6,088**	**6,108**	C
		ø	6,00	+0,05	-0,05	**6,127**	**6,122**	**6,117**	**6,105**	**6,112**	**6,116**	D
5	CMM		15,00	+0,10	-0,10	**15,282**	**15,339**	**15,481**	15,069	**15,104**	15,095	přední
			15,00	+0,10	-0,10	**15,264**	**15,329**	**15,400**	15,037	15,053	15,042	zadní
6	CMM	R	15,00	+1,00	-1,00	14,795	14,794	14,794	14,795	14,798	14,798	
7	CMM		10,00	+0,15	-0,15	**10,159**	**10,169**	**10,166**	**10,163**	**10,152**	**10,170**	přední
			10,00	+0,15	-0,15	**10,181**	**10,190**	**10,186**	**10,185**	**10,172**	**10,191**	zadní
8	CMM	ø	10,00	+0,10	-0,10	**10,127**	**10,127**	**10,129**	**10,125**	**10,115**	**10,129**	A
		ø	10,00	+0,10	-0,10	**10,129**	**10,139**	**10,137**	**10,134**	**10,116**	**10,141**	B
		ø	10,00	+0,10	-0,10	**10,135**	**10,144**	**10,141**	**10,139**	**10,122**	**10,141**	C
		ø	10,00	+0,10	-0,10	**10,142**	**10,144**	**10,142**	**10,140**	**10,128**	**10,143**	D
9	CMM		0,20	+0,00	-0,20	**0,210**	**0,212**	0,200	**0,210**	0,191	**0,221**	
10	CMM	°	70,00	+0,33	-0,33	69,953	69,988	**70,803**	70,017	69,982	**70,691**	
11	CMM		5,00	+0,10	-0,10	**5,150**	**5,152**	**5,147**	**5,150**	**5,134**	**5,156**	
12	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	45,332	45,356	45,326	45,349	45,345	45,317	
13	CMM		90,00	+0,20	-0,20	89,895	89,908	89,907	89,922	89,907	89,913	
14	CMM		0,50	+0,00	-0,50	**0,718**	0,380	0,370	0,415	0,381	**0,520**	
15	CMM		0,30	+0,00	-0,30	**0,313**	**0,329**	**0,346**	**0,484**	**0,423**	**0,374**	
16	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,951	9,957	9,947	9,951	9,941	9,947	
17	CMM		0,40	+0,00	-0,40	0,147	0,190	0,079	**0,537**	0,318	0,328	A
			0,40	+0,00	-0,40	0,074	0,041	0,223	**0,422**	0,188	0,264	B
			0,40	+0,00	-0,40	0,063	0,023	0,148	**0,410**	0,162	0,255	C
			0,40	+0,00	-0,40	0,194	0,104	0,254	**0,424**	0,181	0,328	D
18	CMM		12,50			12,431	12,421	12,428	12,426	12,418	12,433	
19	CMM		40,00	+0,20	-0,20	**39,781**	**39,788**	**39,793**	39,815	**39,795**	**39,789**	
20	CMM		12,50			12,461	12,465	12,451	12,470	12,474	12,458	
21	CMM		10,00	+0,15	-0,15	10,014	10,012	10,015	10,024	10,018	10,015	
22	CMM		27,50			27,476	27,493	27,483	27,496	27,482	27,496	
23	CMM		40,00			39,921	39,969	39,962	39,974	39,927	39,972	A
			40,00			40,031	40,039	40,026	40,055	40,022	40,050	D
24	CMM		52,50			52,480	52,501	52,486	52,511	52,481	52,501	
25	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,185	0,183	0,193	0,266	0,203	0,221	

26	CMM		0,30	+0,00	-0,30	**0,348**	**0,424**	**0,467**	**0,593**	**0,507**	0,287	
27	CMM		0,20	+0,00	-0,20	**0,254**	**0,332**	**0,447**	0,136	0,143	0,131	
28			změna									
29	CMM		30,00	+0,10	-0,10	**30,506**	**30,543**	**30,691**	**30,400**	**30,413**	**30,322**	
30			změna									

PŘÍLOHA P III: MĚROVÝ PROTOKOL: ANYCUBIC KOSSEL LINEAR PLUS – PLA

Měrový protokol												
Dílec: 3D Test Part-1			**Tiskárna:**		Anycubic kossel linear plus			**Materiál:**			PLA	
Poz.	Metoda	znak	Nominal [mm]	Tolerance		Naměřené výsledky [mm]						pozn.
				+	-	1	2	3	4	5	6	
1	CMM		21,00	+0,10	-0,10	20,794	20,773	20,773	20,783	20,760	20,744	
2	CMM		15,00	+0,10	-0,10	15,044	15,044	15,033	15,037	15,036	15,026	
3	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	45,042	45,074	44,975	44,905	44,923	44,953	
4	CMM	ø	6,00	+0,05	-0,05	5,822	5,800	5,793	5,832	5,793	5,798	A
		ø	6,00	+0,05	-0,05	5,754	5,751	5,783	5,785	5,744	5,740	B
		ø	6,00	+0,05	-0,05	5,817	5,797	5,821	5,830	5,792	5,783	C
		ø	6,00	+0,05	-0,05	5,787	5,774	5,796	5,813	5,766	5,756	D
5	CMM		15,00	+0,10	-0,10	15,042	15,053	15,020	15,055	15,052	15,032	přední
			15,00	+0,10	-0,10	14,970	14,962	14,949	14,967	14,945	14,938	zadní
6	CMM	R	15,00	+1,00	-1,00	15,114	15,090	15,090	15,065	15,177	15,075	
7	CMM		10,00	+0,15	-0,15	10,085	10,084	10,076	10,088	10,060	10,056	přední
			10,00	+0,15	-0,15	10,062	10,063	10,063	10,050	10,046	10,042	zadní
8	CMM	ø	10,00	+0,10	-0,10	9,821	9,808	9,820	9,829	9,799	9,800	A
		ø	10,00	+0,10	-0,10	9,787	9,773	9,793	9,795	9,767	9,764	B
		ø	10,00	+0,10	-0,10	9,813	9,812	9,813	9,822	9,794	9,797	C
		ø	10,00	+0,10	-0,10	9,787	9,776	9,790	9,797	9,759	9,767	D
9	CMM		0,20	+0,00	-0,20	0,336	0,361	0,375	0,594	0,351	0,359	
10	CMM	°	70,00	+0,33	-0,33	70,371	70,342	70,310	70,376	70,349	70,349	
11	CMM		5,00	+0,10	-0,10	4,916	4,902	4,904	4,753	4,905	4,910	
12	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	45,258	45,268	45,261	45,246	45,248	45,212	
13	CMM		90,00	+0,20	-0,20	89,792	89,778	89,756	89,784	89,911	89,853	
14	CMM		0,50	+0,00	-0,50	0,441	0,455	0,508	0,445	0,457	0,453	
15	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,244	0,262	0,261	0,241	0,243	0,251	
16	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,901	9,893	9,899	9,905	9,885	9,885	
17	CMM		0,40	+0,00	-0,40	0,196	0,197	0,038	0,174	0,211	0,195	A
			0,40	+0,00	-0,40	0,126	0,152	0,177	0,133	0,164	0,138	B
			0,40	+0,00	-0,40	0,147	0,171	0,201	0,201	0,190	0,189	C
			0,40	+0,00	-0,40	0,219	0,237	0,274	0,269	0,255	0,253	D
18	CMM		12,50			12,568	12,556	12,442	12,561	12,554	12,554	
19	CMM		40,00	+0,20	-0,20	39,862	39,855	39,848	39,862	39,854	39,851	
20	CMM		12,50			12,450	12,451	12,450	12,443	12,442	12,445	
21	CMM		10,00	+0,15	-0,15	10,012	10,015	9,993	10,006	10,023	10,006	
22	CMM		27,50			27,437	27,439	27,444	27,377	27,455	27,452	
23	CMM		40,00			39,861	39,850	39,846	39,801	39,856	39,864	A
			40,00			39,943	39,940	39,943	39,886	39,943	39,952	D
24	CMM		52,50			52,366	52,363	52,384	52,314	52,364	52,371	
25	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,274	0,264	0,290	0,303	0,275	0,277	

26	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,085	0,078	0,122	0,077	0,073	0,062	
27	CMM		0,20	+0,00	-0,20	0,077	0,071	0,100	0,074	0,067	0,064	
28			změna									
29	CMM		30,00	+0,10	-0,10	30,075	30,057	30,045	30,047	30,081	30,095	
30			změna									

PŘÍLOHA P IV: MĚROVÝ PROTOKOL: ULTIMAKER 3 – PLA

Měrový protokol												
Dílec: 3D Test Part-1			**Tiskárna:**	Ultimaker 3					**Materiál:**		PLA	
Poz.	Metoda	znak	Nominal [mm]	Tolerance		Naměřené výsledky [mm]						pozn.
				+	-	1	2	3	4	5	6	
1	CMM		21,00	+0,10	-0,10	20,532	20,562	20,536	20,566	20,535	20,535	
2	CMM		15,00	+0,10	-0,10	14,935	14,947	14,937	14,947	14,958	14,949	
3	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	44,766	44,831	44,817	44,851	45,017	44,698	
4	CMM	ø	6,00	+0,05	-0,05	5,514	5,539	5,534	5,546	5,546	5,544	A
		ø	6,00	+0,05	-0,05	5,567	5,609	5,575	5,582	5,587	5,578	B
		ø	6,00	+0,05	-0,05	5,566	5,591	5,577	5,576	5,585	5,575	C
		ø	6,00	+0,05	-0,05	5,568	5,585	5,583	5,596	5,606	5,605	D
5	CMM		15,00	+0,10	-0,10	14,925	14,978	14,925	14,916	14,944	14,951	přední
			15,00	+0,10	-0,10	14,940	14,970	14,946	14,956	14,975	14,963	zadní
6	CMM	R	15,00	+1,00	-1,00	14,830	14,852	14,818	14,909	14,900	14,898	
7	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,782	9,676	9,796	9,829	9,827	9,795	přední
			10,00	+0,15	-0,15	9,813	9,787	9,823	9,850	9,850	9,818	zadní
8	CMM	ø	10,00	+0,10	-0,10	9,624	9,676	9,618	9,628	9,625	9,620	A
		ø	10,00	+0,10	-0,10	9,647	9,710	9,640	9,648	9,639	9,653	B
		ø	10,00	+0,10	-0,10	9,642	9,709	9,647	9,652	9,642	9,639	C
		ø	10,00	+0,10	-0,10	9,662	9,677	9,673	9,680	9,680	9,674	D
9	CMM		0,20	+0,00	-0,20	0,649	0,586	0,683	0,564	0,651	0,651	
10	CMM	°	70,00	+0,33	-0,33	69,486	69,423	69,348	69,487	69,476	69,491	
11	CMM		5,00	+0,10	-0,10	4,638	4,718	4,579	4,643	4,623	4,626	
12	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	45,183	45,403	45,272	45,159	45,187	45,276	
13	CMM		90,00	+0,20	-0,20	89,812	89,881	89,813	89,864	89,864	89,924	
14	CMM		0,50	+0,00	-0,50	0,730	0,698	0,681	0,672	0,662	0,648	
15	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,422	0,295	0,299	0,337	0,277	0,263	
16	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,895	9,934	9,897	9,907	9,902	9,893	
17	CMM		0,40	+0,00	-0,40	0,205	0,238	0,280	0,236	0,234	0,226	A
			0,40	+0,00	-0,40	0,115	0,091	0,309	0,213	0,145	0,102	B
			0,40	+0,00	-0,40	0,186	0,111	0,355	0,265	0,179	0,180	C
			0,40	+0,00	-0,40	0,173	0,188	0,316	0,212	0,148	0,122	D
18	CMM		12,50			12,457	12,500	12,436	12,440	12,427	12,448	
19	CMM		40,00	+0,20	-0,20	39,952	40,107	39,961	39,947	39,950	40,019	
20	CMM		12,50			12,497	12,495	12,508	12,498	12,506	12,497	
21	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,920	9,888	9,890	9,897	9,886	9,907	
22	CMM		27,50			27,643	27,600	27,629	27,571	27,586	27,565	
23	CMM		40,00			40,067	40,062	40,055	39,988	40,034	39,996	A
			40,00			40,094	40,082	40,080	40,015	40,056	40,016	D
24	CMM		52,50			52,566	52,557	52,562	52,507	52,541	52,504	
25	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,380	0,305	0,348	0,283	0,294	0,283	
26	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,112	0,079	0,248	0,144	0,126	0,152	

27	CMM		0,20	+0,00	-0,20	0,056	0,060	0,056	0,095	0,075	0,063	
28			změna									
29	CMM		30,00	+0,10	-0,10	29,947	30,047	30,017	**29,880**	29,925	**29,845**	
30			změna									

PŘÍLOHA P V: MĚROVÝ PROTOKOL: STRATASYS FORTUS 900MC – ABS

Měrový protokol												
Dílec: 3D Test Part-1			**Tiskárna:**		Stratasys Fortus 900mc			**Materiál:**			ABS	
Poz.	Metoda	znak	Nominal [mm]	Tolerance		Naměřené výsledky [mm]						pozn.
				+	-	1	2	3	4	5	6	
1	CMM		21,00	+0,10	-0,10	**20,884**	20,902	**20,885**	20,933	20,953	**20,885**	
2	CMM		15,00	+0,10	-0,10	**15,147**	**15,144**	**15,139**	**15,142**	**15,153**	**15,127**	
3	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	44,838	44,864	44,814	44,894	44,897	44,795	
4	CMM	ø	6,00	+0,05	-0,05	6,027	6,040	6,049	6,012	6,021	6,026	A
		ø	6,00	+0,05	-0,05	6,049	6,029	**6,072**	6,024	6,038	6,033	B
		ø	6,00	+0,05	-0,05	6,044	6,049	**6,075**	**6,052**	**6,067**	6,041	C
		ø	6,00	+0,05	-0,05	6,044	6,035	**6,055**	6,010	6,031	6,023	D
5	CMM		15,00	+0,10	-0,10	**15,192**	**15,197**	**15,376**	**15,152**	**15,241**	**15,142**	přední
			15,00	+0,10	-0,10	**15,157**	**15,179**	**15,128**	**15,138**	**15,142**	15,100	zadní
6	CMM	R	15,00	+1,00	-1,00	14,850	14,918	14,841	15,002	14,867	15,026	
7	CMM		10,00	+0,15	-0,15	10,092	10,087	10,098	10,109	10,084	10,087	přední
			10,00	+0,15	-0,15	10,060	10,083	10,091	10,102	10,047	10,073	zadní
8	CMM	ø	10,00	+0,10	-0,10	9,999	10,004	10,009	9,994	9,989	9,995	A
		ø	10,00	+0,10	-0,10	10,052	10,035	10,049	10,048	10,028	10,050	B
		ø	10,00	+0,10	-0,10	10,045	10,028	10,050	10,051	10,062	10,048	C
		ø	10,00	+0,10	-0,10	10,028	10,013	10,037	9,998	10,003	10,013	D
9	CMM		0,20	+0,00	-0,20	0,131	0,132	0,153	0,191	0,136	0,129	
10	CMM	°	70,00	+0,33	-0,33	69,846	69,721	69,996	69,886	69,754	69,904	
11	CMM		5,00	+0,10	-0,10	5,069	5,042	5,069	5,093	5,083	5,059	
12	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	44,915	44,933	44,792	45,063	44,955	44,925	
13	CMM		90,00	+0,20	-0,20	89,835	89,886	89,849	89,930	**89,798**	89,974	
14	CMM		0,50	+0,00	-0,50	0,381	0,262	0,357	0,217	0,361	0,392	
15	CMM		0,30	+0,00	-0,30	**0,352**	0,126	**0,379**	0,237	**0,379**	**0,370**	
16	CMM		10,00	+0,15	-0,15	10,081	10,121	10,112	10,054	10,081	10,060	
17	CMM		0,40	+0,00	-0,40	0,091	0,052	0,183	0,211	0,136	0,072	A
			0,40	+0,00	-0,40	0,106	0,103	0,025	0,100	0,076	0,088	B
			0,40	+0,00	-0,40	0,137	0,095	0,006	0,138	0,073	0,102	C
			0,40	+0,00	-0,40	0,324	0,204	0,268	0,149	0,248	0,224	D
18	CMM		12,50			12,408	12,446	12,418	12,424	12,400	12,461	
19	CMM		40,00	+0,20	-0,20	39,805	39,894	39,801	39,889	39,805	39,907	
20	CMM		12,50			12,387	12,428	12,370	12,425	12,408	12,439	
21	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,990	9,932	9,987	9,963	9,946	9,912	
22	CMM		27,50			27,383	27,188	27,361	27,542	27,315	27,501	
23	CMM		40,00			39,820	39,653	39,813	39,999	39,785	39,964	A
			40,00			39,853	39,663	39,846	40,038	39,804	39,991	D
24	CMM		52,50			52,354	52,177	52,366	52,500	52,270	52,502	
25	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,172	0,126	0,136	0,190	0,150	**0,402**	

26	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,153	0,139	0,149	0,173	0,183	0,151	
27	CMM		0,20	+0,00	-0,20	0,097	0,084	0,128	0,110	0,123	0,096	
28			změna									
29	CMM		30,00	+0,10	-0,10	30,077	**30,133**	30,083	**30,122**	**30,126**	**30,163**	
30			změna									

PŘÍLOHA P VI: MĚROVÝ PROTOKOL: ZORTRAX M200 PLUS – Z-ULTRAT

Měrový protokol												
Dílec: 3D Test Part-1			**Tiskárna:**		Zortrax M200 Plus					**Materiál:** Z-ULTRAT		
Poz.	Metoda	znak	Nominal [mm]	Tolerance		Naměřené výsledky [mm]						pozn.
				+	-	1	2	3	4	5	6	
1	CMM		21,00	+0,10	-0,10	20,635	20,663	20,654	20,652	20,665	20,665	
2	CMM		15,00	+0,10	-0,10	14,968	14,969	14,968	14,967	14,974	14,966	
3	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	44,932	44,906	44,996	45,020	44,955	44,755	
4	CMM	ø	6,00	+0,05	-0,05	5,749	5,749	5,746	5,752	5,760	5,746	A
		ø	6,00	+0,05	-0,05	5,739	5,732	5,743	5,748	5,750	5,736	B
		ø	6,00	+0,05	-0,05	5,722	5,719	5,734	5,730	5,734	5,716	C
		ø	6,00	+0,05	-0,05	5,798	5,782	5,786	5,787	5,800	5,794	D
5	CMM		15,00	+0,10	-0,10	15,041	15,032	15,038	15,032	15,022	15,019	přední
			15,00	+0,10	-0,10	15,030	15,015	15,010	15,001	15,033	14,978	zadní
6	CMM	R	15,00	+1,00	-1,00	14,500	14,467	14,496	14,496	14,516	14,525	
7	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,849	9,859	9,855	9,848	9,845	9,855	přední
			10,00	+0,15	-0,15	9,833	9,831	9,833	9,839	9,827	9,824	zadní
8	CMM	ø	10,00	+0,10	-0,10	9,769	9,781	9,772	9,773	9,767	9,761	A
		ø	10,00	+0,10	-0,10	9,745	9,741	9,749	9,746	9,757	9,732	B
		ø	10,00	+0,10	-0,10	9,751	9,742	9,752	9,744	9,756	9,729	C
		ø	10,00	+0,10	-0,10	9,792	9,784	9,787	9,784	9,790	9,780	D
9	CMM		0,20	+0,00	-0,20	0,508	0,493	0,499	0,484	0,597	0,504	
10	CMM	°	70,00	+0,33	-0,33	70,177	70,135	70,205	70,225	70,148	70,110	
11	CMM		5,00	+0,10	-0,10	4,810	4,791	4,798	4,794	4,799	4,782	
12	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	45,196	45,199	45,211	45,151	45,201	45,117	
13	CMM		90,00	+0,20	-0,20	89,448	89,448	89,447	89,451	86,450	89,453	
14	CMM		0,50	+0,00	-0,50	0,762	0,771	0,757	0,773	0,813	0,769	
15	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,201	0,244	0,260	0,237	0,217	0,247	
16	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,849	9,859	9,845	9,853	9,822	9,851	
17	CMM		0,40	+0,00	-0,40	0,194	0,126	0,074	0,184	0,273	0,126	A
			0,40	+0,00	-0,40	0,037	0,218	0,128	0,082	0,059	0,125	B
			0,40	+0,00	-0,40	0,317	0,431	0,350	0,343	0,343	0,288	C
			0,40	+0,00	-0,40	0,311	0,498	0,355	0,308	0,316	0,372	D
18	CMM		12,50			12,396	12,396	12,401	12,403	12,437	12,394	
19	CMM		40,00	+0,20	-0,20	39,839	39,875	39,839	39,832	39,816	39,848	
20	CMM		12,50			12,416	12,410	12,419	12,399	12,379	12,393	
21	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,893	9,878	9,881	9,890	9,886	9,882	
22	CMM		27,50			27,295	27,319	27,326	27,385	27,325	27,311	
23	CMM		40,00			39,700	39,728	39,710	39,767	39,711	39,738	A
			40,00			39,729	39,742	39,734	39,796	39,749	39,743	D
24	CMM		52,50			52,128	52,138	52,114	52,175	52,139	52,130	
25	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,313	0,364	0,336	0,333	0,322	0,329	

26	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,140	**0,359**	0,163	0,116	0,114	0,157	
27	CMM		0,20	+0,00	-0,20	0,127	0,112	0,113	0,110	0,117	0,124	
28			změna									
29	CMM		30,00	+0,10	-0,10	30,003	30,004	30,032	30,016	30,016	30,018	
30			změna									

PŘÍLOHA P VII: MĚROVÝ PROTOKOL: ZORTRAX M200 PLUS – Z-ABS

Měrový protokol												
Dílec: 3D Test Part-1			**Tiskárna:**		Zortrax M200 Plus			**Materiál:**				
Poz.	Metoda	znak	Nominal [mm]	Tolerance		Naměřené výsledky [mm]						pozn.
				+	-	1	2	3	4	5	6	
1	CMM		21,00	+0,10	-0,10	**20,666**	**20,666**	**20,672**	**20,672**	**20,668**	**20,664**	
2	CMM		15,00	+0,10	-0,10	14,969	14,977	14,973	14,979	14,970	14,972	
3	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	45,358	44,930	44,843	45,021	45,107	44,914	
4	CMM	ø	6,00	+0,05	-0,05	**5,762**	**5,764**	**5,769**	**5,764**	**5,777**	**5,773**	A
		ø	6,00	+0,05	-0,05	**5,761**	**5,762**	**5,755**	**5,750**	**5,756**	**5,777**	B
		ø	6,00	+0,05	-0,05	**5,722**	**5,744**	**5,749**	**5,735**	**5,745**	**5,751**	C
		ø	6,00	+0,05	-0,05	**5,789**	**5,792**	**5,796**	**5,790**	**5,800**	**5,806**	D
5	CMM		15,00	+0,10	-0,10	15,042	15,024	15,046	15,050	15,035	15,032	přední
			15,00	+0,10	-0,10	15,031	15,036	15,035	15,040	15,029	15,038	zadní
6	CMM	R	15,00	+1,00	-1,00	14,718	14,724	14,721	14,758	14,748	14,721	
7	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,874	9,860	9,862	9,874	9,870	9,872	přední
			10,00	+0,15	-0,15	**9,843**	9,853	9,863	9,852	**9,840**	9,852	zadní
8	CMM	ø	10,00	+0,10	-0,10	**9,765**	**9,756**	**9,754**	**9,751**	**9,751**	**9,769**	A
		ø	10,00	+0,10	-0,10	**9,764**	**9,751**	**9,757**	**9,758**	**9,756**	**9,759**	B
		ø	10,00	+0,10	-0,10	**9,759**	**9,751**	**9,734**	**9,744**	**9,758**	**9,760**	C
		ø	10,00	+0,10	-0,10	**9,779**	**9,770**	**9,772**	**9,764**	**9,784**	**9,779**	D
9	CMM		0,20	+0,00	-0,20	**0,442**	**0,492**	**0,478**	**0,523**	**0,475**	**0,456**	
10	CMM	°	70,00	+0,33	-0,33	69,977	70,013	70,042	70,120	70,084	70,044	
11	CMM		5,00	+0,10	-0,10	**4,809**	**4,808**	**4,815**	**4,809**	**4,805**	**4,834**	
12	CMM	°	45,00	+0,50	-0,50	45,171	45,195	45,176	45,227	45,215	45,163	
13	CMM		90,00	+0,20	-0,20	**89,441**	**89,444**	**89,447**	**89,439**	**89,446**	**89,460**	
14	CMM		0,50	+0,00	-0,50	**0,856**	**0,838**	**0,804**	**0,805**	**0,810**	**0,786**	
15	CMM		0,30	+0,00	-0,30	0,290	0,253	0,251	0,260	0,202	0,205	
16	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,860	9,851	9,871	9,853	9,883	**9,813**	
17	CMM		0,40	+0,00	-0,40	**0,445**	0,115	0,122	0,077	0,239	0,151	A
			0,40	+0,00	-0,40	0,285	0,107	0,181	0,179	0,023	0,087	B
			0,40	+0,00	-0,40	**0,699**	0,345	**0,401**	0,340	0,370	0,324	C
			0,40	+0,00	-0,40	**0,578**	0,289	0,365	0,335	0,250	0,226	D
18	CMM		12,50			12,439	12,428	12,436	12,428	12,423	12,445	
19	CMM		40,00	+0,20	-0,20	39,811	39,809	39,810	39,802	39,811	**39,783**	
20	CMM		12,50			12,450	12,438	12,429	12,432	12,426	12,438	
21	CMM		10,00	+0,15	-0,15	9,914	9,892	9,913	9,904	9,910	9,889	
22	CMM		27,50			27,301	27,337	27,362	27,367	27,319	27,383	
23	CMM		40,00			39,700	39,742	39,761	39,778	39,721	39,791	A
			40,00			39,702	39,746	39,766	39,781	39,724	39,787	D
24	CMM		52,50			52,092	52,157	52,162	52,180	52,127	52,178	
25	CMM		0,30	+0,00	-0,30	**0,341**	**0,301**	0,286	**0,322**	**0,305**	**0,316**	

26	CMM		0,30	+0,00	-0,30	**0,598**	0,156	0,175	0,164	0,139	0,134	
27	CMM		0,20	+0,00	-0,20	0,114	0,129	0,125	0,137	0,138	0,132	
28			změna									
29	CMM		30,00	+0,10	-0,10	30,021	30,003	30,006	30,043	30,012	30,025	
30			změna									