



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

**Ústav mechaniky, biomechaniky
a mechatroniky**

Analýza alternativních materiálů pro FDM technologie
Analysis of alternative materials for FDM technologies

Diplomová práce

Studijní program: N 2347 Průmysl 4.0

Studijní obor: Mechatronika

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

Martin Táborský

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Táborský** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **424848**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Mechatronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza alternativních materiálů pro FDM technologie

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of alternative materials for FDM technology

Pokyny pro vypracování:

1. FDM technologie 3D tisku
2. Návrh metodiky testování a testovacích těles
3. Analýza mechanických vlastností a geometrických specifikací

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Šimota, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____



Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

24. 4. 2018
Datum převzetí zadání

Táborský
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Analýza alternativních materiálů pro FDM technologie“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Šimoty, s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze

Martin Táborský

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali. Především děkuji svému vedoucímu diplomové práce, Ing. Janu Šimotovi, za věnovaný čas a připomínky v teoretické i praktické části a za umožnění práce na tomografu.

Dále děkuji Ing. Lukáši Mandíkovi za jeho vedení ve firmě Doosan Bobcat a za celkovou pomoc při řešení různých obtíží, které při 3D tisku vyvstávaly. Stejně tak děkuji Ing. Aleši Košťákovi z Doosan Bobcat za umožnění práce na tomto projektu.

V neposlední řadě děkuji Ing. Eleně Čižmárové, Ph.D. za konzultace v oblasti mechanických zkoušek plastů, stejně jako za asistenci při jejich samotném provedení.

Anotační list

Jméno autora:	<i>Martin TÁBORSKÝ</i>
Název DP:	<i>Analýza alternativních materiálů pro FDM technologie</i>
Anglický název:	Analysis of alternative materials for FDM technology
Rok:	2018
Studijní program:	Strojní inženýrství
Obor studia:	Mechatronika
Ústav:	<i>Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie</i>
Vedoucí BP:	<i>Ing. Jan Šimota.</i>
Konzultant:	<i>Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.</i>
Bibliografické údaje:	počet stran 186 počet obrázků 212 počet grafů 39 počet tabulek 23 počet příloh 12
Klíčová slova:	3D tisk, aditivní výroba, FDM, FFF, alternativní materiály, ABS, PC, PC-ABS, mechanické zkoušky, tomograf, plasty
Keywords:	3D printing, additive manufacturing, FDM, FFF, alternative materials, ABS, PC, PC-ABS, mechanical testing, tomograph, plastics

Anotace:

V úvodu tato práce popisuje obecné postupy provázející celý proces výroby v 3D tisku, dále se zaměřuje na konkrétní problematiku technologie FDM.

V druhé části jsou analyzovány ekonomicky výhodnější materiály pro průmyslovou tiskárnu Fortus 900mc inovačního centra firmy Doosan Bobcat. Jsou zkoumány jejich vlastnosti v tahu, ohybu a při rázovém zatížení, dále jejich vlastnosti při tisku tvarově komplexních těles. Tělesa jsou podrobena 3D skenu v tomografu a jejich tvary a rozměry jsou porovnávány s původním počítačovým modelem. Práce je zakončena vyhodnocením jednotlivých materiálů a vhodnosti jejich použití pro firmu Doosan Bobcat, stejně jako dalších obecných jevů, které v dané tiskárně nastávají a jsou vhodné k dalšímu zkoumání.

Abstract:

In the introduction this work describes universal practices accompanying the whole process of manufacturing in 3D printing, furthermore with focus on concrete problematics of the FDM technology.

In the second section are analysed more economically advantageous materials for the industrial printer Fortus 900mc of the Innovation centre of the Doosan Bobcat company. The materials are subjected to tensile testing, three-point flexural testing and a Charpy impact test. Furthermore, their abilities of printing complex-shaped bodies are tested. The bodies are 3D scanned in a tomograph and their shapes and dimensions are compared with the original computer-generated model. The work is summarised by evaluating individual materials and their suitability for being used in the Doosan Bobcat company, as well as other general phenomena occurring in the particular printer and are advisable for further research.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Postup při aditivní výrobě	2
2.1. CAD.....	2
2.2. Konverze na STL a manipulace se souborem	2
2.3. Tisk.....	3
2.4. Odstranění výtisku z pracovní plochy	3
2.5. Post processing	4
3. Problematiky v FDM tisku.....	5
3.1. FDM tisk	5
3.2. Přilnavost vrstev	6
3.3. Anizotropie.....	6
3.4. Podpory	7
3.5. Zkroucení.....	7
4. Doosan Bobcat.....	9
4.1. Specifikace zadání	9
4.2. Zkoumané materiály	10
4.2.1. ABS-M30.....	10
4.2.2. PC.....	11
4.2.3. PC-ABS.....	11
4.3. Použitý hardware a software	12
5. Mechanické zkoušky	15
5.1. Nastavení tisku ve sliceru a polohování.....	16
5.2. Průběh mechanických zkoušek	17
5.3. Tahová zkouška	18
Analýza alternativních materiálů pro FDM technologie	3

5.3.1. Průběh zkoušky	20
5.3.2. Vyhodnocení	28
5.4. Zkouška rázové houževnatosti Charpy.....	30
5.4.1. Průběh zkoušky	31
5.4.2. Vyhodnocení	36
5.5. Ohybová zkouška	37
5.5.1. Ohybová zkouška.....	38
5.5.2. Průběh zkoušky	39
5.5.3. Vyhodnocení	43
6. Kombinovaná zkouška rozměrových přesností materiálů	45
6.1. Vyhodnocení jednotlivých zkoušek.....	46
7. Problematické a defektní tisky.....	80
7.1. Materiál PC od 3DFil	80
7.2. Tahová zkouška 1A	81
7.3. Problematiky tisku PC-ABS od Rychlý 3D tisk.....	84
8. Ekonomické vyhodnocení	89
9. Závěr.....	90
10. Seznam použité literatury.....	94
11. Zdroje obrázků:	97
12. Seznam zkratk	97
13. Obrazová příloha.....	99
13.1. Nastavení tisku těles v Stratasys Insight 10.4	99
13.1.1. Tělesa pro tahovou zkoušku 1BA – tisk naležato.....	100
13.1.2. Tělesa pro tahovou zkoušku 1BA – tisk na výšku	101
13.1.3. Tělesa pro rázovou zkoušku opatřená vrubem	102

13.1.4. Tělesa pro rázovou zkoušku bez vrubu a tělesa pro zkoušku v ohybu	103
13.1.5. Umístění v Control Center.....	104
13.2. Mechanické zkoušky.....	106
13.2.1. Modelové vzorky vcelku	107
13.2.2. Vzorky tahová zkouška vzorků tištěných na šířku	108
13.2.3. Vzorky tahová zkouška vzorků tištěných na výšku.....	109
13.2.4. Vzorky zkouška rázové houževnatosti s vrubem.....	110
13.2.5. Vzorky zkouška rázové houževnatosti bez vrubu.....	111
13.2.6. Vzorky ohybová zkouška	112
13.2.7. Detail na lom – zkouška rázové houževnatosti s vrubem.....	113
13.2.8. Detail na lom – zkouška rázové houževnatosti bez vrubu.....	114
13.3. Vyhodnocení z tomografu.....	115
13.3.1. Celkový pohled na tělesa	116
13.3.2. Jednolitě těleso	118
13.3.3. Samonosné úhly	123
13.3.4. Zkroucení desky.....	129
13.3.5. Přemostění.....	131
13.3.6. Úzké profily	136
13.3.7. Úzké drážky	144
13.3.8. Díry kruhového profilu vertikální.....	148
13.3.9. Díry kruhového profilu horizontální.....	152
13.3.10. Díry nekruhových profilů horizontální	156
13.3.11. Stavba kruhových profilů	160
13.3.12. Polokoule	165
13.3.13. Zaoblení a zkosení.....	170

1. Úvod

Aditivní výroba (Additive manufacturing, často označovaná jako rapid prototyping nebo 3D tisk) je relativně mladá výrobní metoda, kde vrstvy materiálu jsou na sebe navršovány tak, aby vytvořily pevný objekt, a vyniká především schopností vytvářet velmi komplexní tvary a velmi rychlé prototypy. V současné době existuje nepřeberné množství technologických postupů tisku, které se mezi sebou liší v možných použitých materiálech, kvalitě mechanických vlastností tisknutých objektů, dosahovaných přesností, rozměrech a pořizovacích cenách tiskáren. Ať je finálním produktem prototyp, nebo plně funkční výrobek, obecný výrobní postup se nemění.

Do nedávna byly tyto technologie velmi exkluzivní, ale roku 2009 vypršel patent společnosti Stratasys zahrnující základní technologii FDM tisku. Od té doby se trh otevřel pro tisíce společností i jednotlivců po celém světě a jejich vzájemnou spoluprací a sdílením informací se technologie vyvíjí rapidním tempem. Zároveň se díky masovému rozšíření začaly značně snižovat ceny tiskáren, specializovaných materiálů i příslušenství. [1]

Společnost Stratasys však stále zůstává v popředí se svou výrobou vysoce kvalitních průmyslových tiskáren a nesdílením svých procesů si udržují exkluzivitu na trhu. Výtisky si udržují jedinečnou kvalitu a často (jako v případě tiskárny Fortus 900mc společnosti Doosan Bobcat) značně nadstandardní rozměry v oblasti aditivních technologií, avšak kvůli vysokým cenám autorizovaných materiálů mají tyto výtisky pouze úzké spektrum využití ve srovnání s konkurenčními technologiemi.

Cílem této práce je najít neautorizované, ekonomicky výhodnější materiály vhodné pro tisk v tiskárně Fortus 900mc za účelem rozšíření této technologie pro co nejvíce možných využití.

2. Postup při aditivní výrobě

2.1. CAD

Prvním krokem je výroba digitálního modelu. Nejběžnější metodou tvorby digitálních modelů je CAD. Existuje velká škála CAD softwarů – zdarma i profesionálních – které jsou kompatibilní s aditivní výrobou. Alternativou je použití reverzního inženýrství k vytvoření digitálního modelu pomocí 3D skeneru.

Přestože jednou z největších předností aditivních technologií je možná komplexita tisknutých produktů, při návrhu modelu je stále třeba zahrnout úvahy nad konstrukcí se znalostí konkrétní technologie. Nejčastěji se soustředí na geometrické a rozměrové limitace, nutnost tvorby podpor či potřebu díry pro odstranění nepoužitého materiálu v závislosti na použité technologii. [2]

2.2. Konverze na STL a manipulace se souborem

Zásadním krokem v aditivní výrobě, který v tradiční výrobě není potřeba, je konverze CAD modelu na STL soubor. STL používá trojúhelníky (polygony), aby popsal povrch objektu. Je několik parametrů, které je třeba mít na mysli před konverzí modelu na STL soubor – maximální velikost objektu, kterou je tiskárna schopná vytvořit, minimální tloušťku stěn, „vzduchotěsnost“ modelu (každá hrana musí spojit přesně jen dva polygony a povrch modelu nesmí mít díry) a počet použitých polygonů (čím členitější část povrchu, tím více polygonů je vhodné použít).

Jakmile je STL soubor vygenerován, je importován do slicer softwaru. Tento program vezme STL soubor a dále jej konvertuje na G-kód. G-kód je programovací jazyk, který je používán v CAM, což zahrnuje mimo 3D tisku například CNC obrábění. Slicer také umožňuje návrháři upravovat stavební parametry včetně podpor, výplní, výšky vrstev a natočení součástky v pracovním prostoru.

Volitelným krokem je simulace tisku ve specializovaném softwaru, která dovede odhalit pevnostní nedostatky modelu, teplotní deformace a napětí vzniklé jejich vlivem – a může vygenerovat nový model, který se díky těmto teplotním deformacím při tisku zkroutí do požadovaných geometrických tolerancí modelu. [3]

2.3. Tisk

3D tiskárny se často skládají z malých a komplikovaných součástek, proto je nutná jejich správná údržba a kalibrace, aby vznikaly přesné výtisky. V tomto kroku se také tištěný materiál dodává do tiskárny. Surové materiály v aditivní výrobě mají často omezené datum spotřeby a vyžadují opatrnou manipulaci. Přestože některé procesy nabízejí možnost recyklovat přebytečný stavební materiál, opakované užívání může mít za následek zhoršení vlastností materiálu, pokud není pravidelně měněn.

Většinu tiskáren není třeba kontrolovat poté, co byl zahájen tisk. Stroj vykonává automatizovaný pohyb daný vygenerovaným programem a potíže obvykle vznikají pouze když stroji dochází materiál nebo je chyba v softwaru. [4]

2.4. Odstranění výtisku z pracovní plochy

U některých aditivních technologií je odstranění výtisku jednoduché a zahrnuje pouze manuální sejmutí objektu z pracovní plochy. U jiných, často více průmyslových 3D tiskáren, je odstranění výtisku vysoce technický proces, který zahrnuje přesnou extrakci objektu, zatímco je obklopen výrobním materiálem nebo pevně spojen s pracovní plochou. Tyto metody vyžadují komplikované odstraňovací postupy a vysoce kvalifikovanou obsluhu vybavenou bezpečnostními prvky a k tomuto určenými stroji. [2]

2.5. Post processing

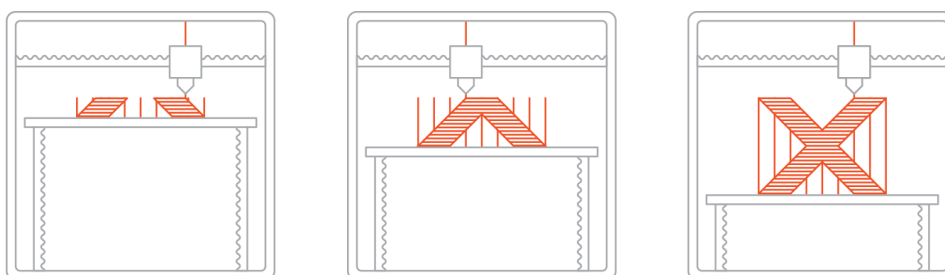
Technologie post processingu se opět liší podle technologie tisku. SLA vyžaduje, aby byl výtisk ozářen UV světlem před jakoukoliv manipulací, kovové výtisky často potřebují zbavit vnitřních pnutí popouštěním v pecích, zatímco FDM výtisky lze rovnou používat. U technologií, které používají podpory, jsou tyto odstraněny také v rámci post processingu. Většinu materiálů v 3D tisku je možné brousit. Jako další post processingové metody lze použít například omílání, pískování, čištění vzduchem, leštění, barvení, lakování, či lepení. [4]

3. Problematiky v FDM tisku

3.1. FDM tisk

FDM je jednou z nejběžnějších a nejznámějších technologií 3D tisku. Zahrnuje tři hlavní součásti: pracovní plochu, na kterou je objekt tištěn, tiskovou strunu (filament), která slouží jako stavební materiál, a vytlačovací hlavu zvanou extrudér.

Filament se taví v extrudéru, který nanáší materiál skrze trysku vrstvu po vrstvě na pracovní plochu. Podle konstrukce tiskárny buď pracovní plocha po každé nanesené vrstvě klesne o výšku vrstvy, nebo o stejnou výšku stoupne extrudér.



Obr. 1 – Stavba FDM výtisku vrstvu po vrstvě [1]

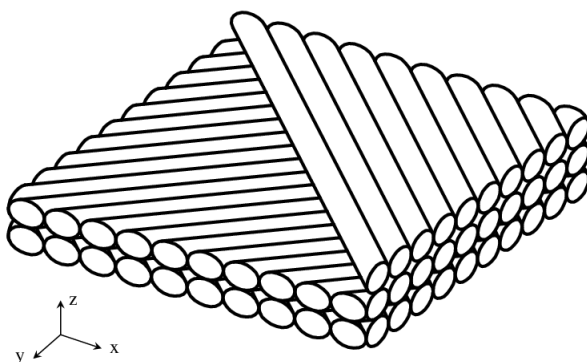
3D tiskárna zahájí tisk, když extrudér dosáhne požadované teploty, většinou kolem 200°C až 350°C. Tato teplota se liší dle použitého materiálu a je potřebná k jeho natavení. [5]

Nízká cena, snadné zacházení a rychlost výroby dělají z FDM tisku běžně používanou metodu. Používá se v automobilovém a leteckém průmyslu, zdravotnictví, architektuře, designu a v mnoha dalších odvětvích. Jeho hlavním využitím je rapid prototyping – ověřování a schvalování navrhovaných funkčních částí či názorných modelů. Dá se také používat v malosériových výrobcích. [6]

3.2. Přilnavost vrstev

Přilnavost vrstev je důležitým prvkem procesu FDM tisku. Jak je filament vytlačován z extrudéru, potřebuje se spojit s předešlými vrstvami a zatuhnout spolu s nimi. To vytvoří pevné, soudržné výtisky.

Z toho důvodu je filament tlačěn na předešlé vrstvy. Horký vytlačený materiál znovu ohřeje a nataví předešlé vrstvy. Tlak a natavení spodního materiálu umožní spojení nové s předchozí vytištěnou vrstvou. Z tohoto principu také vyplývá, že FDM vrstvy jsou ve skutečnosti v průřezu oválné, nikoliv kruhové. Protože jsou vrstvy tištěné v oválném tvaru, styky mezi nimi tvoří žlábký po celé délce styku.



Obr. 2 – Oválný průřez konečných FDM vrstev [2]

To vytváří koncentraci napětí, což může zapříčinit vznik trhliny, když je objekt vystaven zatížení, a vede k anizotropickým mechanickým vlastnostem a hrubějšímu povrchu FDM výtisků, stejně jako vrstvenému vzhledu. [2]

3.3. Anizotropie

Důležitým omezením FDM tisku je anizotropická povaha objektů, které produkuje. Anizotropie způsobuje proměnlivé mechanické vlastnosti v různých směrech zatížení. Pevnost výtisku častěji ovlivňuje kvalita přilnutí vrstev spíše než materiál, ze kterého je vyroben. Přilnavost vrstev je závislá na kalibraci

tiskárny, nastavení tisku a vlastnostech materiálu, a je zodpovědností obsluhy stroje.

Anizotropie může značně ovlivnit chování výtisku. Horizontálně tištěný objekt může mít pevnost v tahu až pětinasobnou oproti objektu tištěnému vertikálně se 100% výplní.

Při používání FDM technologie je velmi důležité správně nastavovat orientaci tisku, aby anizotropie neovlivnila negativně funkčnost zatíženého výtisku. Objekty, na které působí napětí, by měly být při tisku orientovány tak, aby dané napětí působilo kolmo ke směru tisku (ose Z).

Je také důležité, aby konstruktér věděl, jestli tabulkové hodnoty materiálu, se kterým pracuje, reprezentují netištěný plast v podobě filamentu či pelet, nebo jestli tyto hodnoty jsou pro 3D výtisk tělesa. [6]

3.4. Podpory

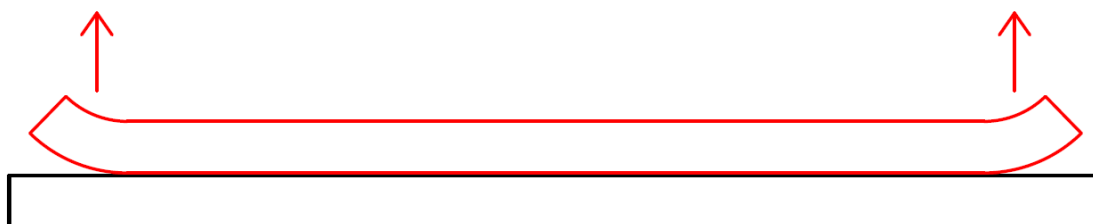
Podpory podpírají model v kritických místech v průběhu tisku. Tato kritická místa jsou nejčastěji převisy a zkosení nad 45° . V závislosti na vlastnostech tiskárny a použitém materiálu je v některých případech možné tisknout převisy i do vzdálenosti do 5 mm. [2]

Podpory mohou být ze stejného materiálu jako tištěný objekt, nebo z materiálu rozpustného ve vodě či vodných roztocích. Některé komplikovanější 3D tiskárny mohou být vybaveny několika extrudéry, aby bylo možné kombinovat několik barev či typů materiálů. [7]

3.5. Zkroucení

Zkroucení FDM výtisků se děje z důvodu postupného průběžného chladnutí. V průběhu tisku odlišné úseky výtisku chladnou různými rychlostmi a smršťují se. To působí na okolní oblasti (viz Obr. 3), a tím vytváří vnitřní napětí, které může mít za následek zkroucení či deformace výtisku. Vyhřívaná podložka, stejně jako

dobrá přilnavost k podložce, hrají důležitou roli v ukotvení FDM výtisku, což omezuje pravděpodobnost (popřípadě rozsah) výskytu zkroucení a deformací.
[2]



Obr. 3 – Nově tvořená vrstva chladne, zkrucuje vrstvu pod sebou nahoru

4. Doosan Bobcat

Tato práce vznikla na základě požadavku firmy Doosan Bobcat optimalizovat materiály pro FDM 3D tisk.

Bobcat Company byla založena v Gwinneru v Severní Dakotě roku 1947. [8] Výrobou se soustředí především na smykem řízené nakladače, kompaktní rypadla, teleskopické manipulátory a mnoho dalších hydraulických strojů a vozidel. [9]

Od roku 2001 Bobcat operuje v České republice v Dobříši, kromě výroby zde postupně otevřel i inovační, tréninkové a distribuční centrum. [8]

Doosan je rodinná korejská firma založená roku 1896 v Soulu. [10] Kromě stavebních vozidel – pásových rypadel, kolových nakladačů, damperů a dalších – se soustředí i na přenosné zdroje energie – generátory, kompresory a osvětlovací techniku. [9]

Doosan koupil společnost Bobcat roku 2009. [8]

3D tisk se zde využívá v inovačním centru, kde se pomocí něj vyrábí především prototypy pro nově vyvíjené bagry, nakladače či příslušenství.

4.1. Specifikace zadání

Materiály v této práci jsou optimalizovány pro tiskárnu Stratasys Fortus 900mc. Firma Stratasys pro tuto tiskárnu vydává vlastní optimalizované materiály, které jsou však násobně dražší oproti konkurenčním produktům. Cílem této diplomové práce je analyzovat ekonomicky výhodnější materiály se srovnatelnými mechanickými vlastnostmi – pevností v tahu, ohybu a rázu. Toho je dosaženo pomocí normovaných mechanických zkoušek tahových, ohybových a rázové houževnatosti (viz kapitola 5. Mechanické zkoušky).

Dále se zabývá vlastnostmi tisku materiálu – ověření jeho samonosnosti, zdali nedojde v rámci stavby ke zhroucení či poškození vlivem stavby, smrštivosti (včetně ověření, zda při tisku velkých základních ploch nedochází k „odlepení“ od základní stavební fólie) a dalších parametrů.

V neposlední řadě je kontrolován vliv alternativních materiálů na zacpávání trysek, jejich zasekávání se v důsledku špatného navinutí na cívku a podobných faktorů. Tyto faktory kromě škody na samotné trysce či cívce často překazí celý tisk a všechny již použitý materiál je tak zmařen. V měřítku vytištěných objemů materiálu nelze v této oblasti činit definitivní statistické závěry, případný výskyt těchto jevů však může poskytnout alespoň přibližný náhled na možnou problematiku.

4.2. Zkoumané materiály

V této práci jsou testovány firmou Bobcat nejpoužívanější materiály **ABS-M30**, **PC** a **PC-ABS** od autorizovaného Stratasys dodavatele Tecnotrade. Jako alternativy k ABS-M30 je zkoumán materiál ABS od dodavatele 3DFil a ABS od dodavatele Rychlý 3D tisk. Dle [10] by se ABS-M30 mělo vyznačovat lepšími mechanickými vlastnostmi, proto lze předpokládat, že běžné ABS nebude dosahovat stejných výsledků, ale pokud by dosahovalo dostatečné kvality, je možné ho používat pro méně mechanicky namáhané části. Jako alternativu k Stratasys PC je zkoumáno PC od dodavatele 3DFil a pro materiál PC-ABS je testována alternativa od dodavatele Rychlý 3D tisk.

4.2.1. ABS-M30

Materiál ABS je ideální pro tělesa a součásti s mírnými požadavky na mechanické vlastnosti – například funkční prototypy, přípravky, upínače, výrobní nástroje a části pro koncové použití. Jeho předností je především pružnost a nízká cena. Největší nevýhodou je jeho teplotní roztažnost [11].

ABS-M30 je podle výrobce Stratasys o 25-70 % silnější než klasické ABS, má významně lepší přilnavost vrstev a vyšší pevnost v tahu, rázu i ohybu. Výtisky z ABS-M30 jsou silnější, hladší a mají větší přesnost detailů. [10]

4.2.2. PC

Se svou vysokou odolností a pevností se polykarbonát hodí především pro Rapid tooling – rychlé vytváření nástrojů a dalších součástí, u kterých je vyžadována dlouhá životnost. Nabízí přesnost, trvanlivost, stabilitu a teplotní odolnost a vytváří dostatečně pevné výtisky k funkčnímu použití. Použití PC umožňuje skloubit rychlost a přizpůsobivost 3D tisku se spolehlivostí nejvíce používaného průmyslového termoplastu. [12]

4.2.3. PC-ABS

PC-ABS je směs obou materiálů a nabízí dobrou kombinaci jejich vlastností – pevnost a teplotní odolnost od PC a pružnost ABS. Díky tomu je velmi vhodná pro použití na součásti vystavené rázovému zatížení. Používá se především pro náročné aplikace, jako nástroje do zátěžových použití nebo průmyslové součásti. [13]

Stratasys u svých materiálů zaručuje určité mechanické vlastnosti (viz Tabulka 1).

Tabulka 1 – Uváděné mechanické vlastnosti materiálů Stratasys [14,15,16]

Materiál	ABS-M30	PC	PC-ABS
Pevnost v tahu (Typ 1) [MPa]	31(osa vrstvy), 26(osa ⊥ vrstvy)	68	41
Pevnost v ohybu (Typ 1) [MPa]	61	104	68
Rázová houževnatost (Typ A, s vrubem) [J/m]	139	53	196
Maximální teplota extruze [°C]	320	365	330
Maximální teplota v komoře [°C]	95	145	110
Deklarovaná životnost trysky T12 [cm³]	12620 (8,5 kanistrů)	12060 (8 kanistrů)	9010 (6 kanistrů)
Použitý materiál podpor	SR20	SR100	SR20

Velmi podstatná je poznámka pod čarou, zde je proto citován její překlad: „Prezentované informace jsou obvyklé hodnoty myšlené pouze pro **referenční a porovnávací důvody**. Neměly by být používány pro návrhovou specifikaci nebo kontrolu kvality. Vlastnosti používaného materiálu mohou být ovlivněny mimo jiné: konstrukcí výtisku, provozními podmínkami, podmínkami při testování atd. Skutečné hodnoty se budou lišit kvůli podmínkám tisku. Testované objekty byly vytištěny na Fortus 400mc 0,254 mm vrstva. Produktové specifikace se mohou bez upozornění měnit.

Vlastnosti materiálů se mohou lišit podle **aplikace, provozních podmínek a koncového užívání**. Každý uživatel je zodpovědný za vyhodnocení, jestli je Stratasys materiál bezpečný, zákonný a technicky vhodný pro zamýšlené použití...“

„...**Stratasys neposkytuje žádné záruky, vyjádřené ani implicitní**, včetně záruk prodejnosti, vhodnosti pro dané použití, nebo záruku proti patentovým zásahům.“ [14,15,16]

Z citace je patrná přibližnost uváděných hodnot.

Ověřování těchto mechanických vlastností je součástí této práce.

4.3. Použitý hardware a software

Pro všechny tisk a optimalizaci byla použita FDM tiskárna **Stratasys Fortus 900mc**. Tato průmyslová tiskárna dokáže vyrábět odolné a přesné díly o rozměrech až **914 x 914 x 610 mm** z až 12 různých druhů termoplastů, z nichž tři jsou předmětem této práce. [17]



Obr. 4 – Tiskárna Stratasys Fortus 900mc [3]

Na této tiskárně lze nastavit tři různé výšky vrstvy tisku – podle tří různých trysek:

Tryska T12 – výška vrstvy 0,178 mm

Tryska T16 – výška vrstvy 0,254 mm

Tryska T20 – výška vrstvy 0,330 mm [18]

Volba výšky nanášené vrstvy plastu je ovlivněna požadovanou tvarovou přesností objektu, stejně jako rychlostí, se kterou ho chceme vytisknout. Úzká tryska produkuje tvarově přesnější výtisky na úkor pomalejšího tisku. [19]

V této práci je používána výhradně **tryska T12**. Je tak činěno jednak kvůli snaze o co nejpresnější tvary, tudíž i o nejlepší výsledky měření, jednak kvůli vyšší možnosti zaseknutí se materiálu v této užší trysce, což je předmětem pozorování této práce.

Pro modelování vzorků v CAD formátu a jejich exportu do formátu STL byla použita studentská licence softwaru **Autodesk Inventor Professional 2018**.

Pro nastavení všech parametrů tisku – použitého materiálu tělesa a podpor, stylu vyplnění tělesa a podpor materiálem, umístění podpor, výšky vrstvy, úhlu rastrování, výpočtu dráhy nástroje a dalších – byl použit software **Stratasys Insight 10.4**.

Pro umístění jednotlivých prvků na vakuovou fólii sloužil software **Stratasys Control Center 10.4**.

5. Mechanické zkoušky

Z mechanických vlastností byla testována odolnost v tahu, v ohybu a rázová houževnatost. Tyto způsoby zatížení budou nejčastější v používaných prototypch tisknutých v Doosan Bobcat. Kromě toho jsou tyto hodnoty uvedeny i v materiálech pro oficiální Stratasys materiály (viz Tabulka 1), takže je možné porovnat námi naměřené hodnoty s těmi udávanými výrobcem.

Z důvodů uvedených v kapitole 7.1 Materiál PC od 3DFil byl materiál PC od dodavatele 3DFil hned v první fázi tisku vyloučen jako nevhodný a v testech se neobjevuje.

Před každou zkouškou se měří šířka b a tloušťka h jednoho ze série těles pro zjištění, zda rozměry odpovídají zvolenému typu zkušebního tělesa.

Každé zkušební těleso bylo tisknuto po šesti kusech – pět je minimální počet pro statisticky hodnocené měření [20], šesté z důvodu možného pokazeného tisku či zkoušky. U zkoušek, kde těleso nakonec nebylo použito, je v tabulkách označeno znakem „x“ a dále se počítá s pěti hodnotami.

Z důvodu velkých rozdílů v měření u některých testů bylo zahrnuto do zkoumání pozorování směrodatné odchylky s jako jednotky statistické variability. Dle pravidla šest sigma se 68 % vzorků nachází do $\pm s$ okolo průměrné hodnoty, 95 % vzorků do $\pm 2s$ a 99,5 % vzorků do $\pm 3s$. Pro znázornění rozdílů ve spolehlivosti hodnot mezi některými materiály jsou součástí zkoušky grafy vykreslující okolí $\pm 2s$.

5.1. Nastavení tisku ve sliceru a polohování

K modelování všech těles byl použit Autodesk Inventor Professional 2018.

Pro zpracování v programu Stratasys Insight 10.4 byl soubor z Autodesk Inventoru exportován ve formátu STL – došlo k převodu na model s konečným počtem prvků.

Styl vyplnění tělesa materiálem byl zvolen **Solid**, tedy těleso je ze 100 % vyplněno materiálem, styl vyplnění podpor byl zvolen **Sparse** (velké mezery s proměnnými odstupy podle vzdálenosti od tělesa) [21]. Úhel rastrování byl zvolen **45°** za účelem co nejmenšího působení anizotropických vlivů – například nerovnoměrné rozměrové kontrakce při chladnutí, nebo u zkoumaných vlastností při mechanických zkouškách. Sklon se mění po každé vrstvě o 90°, takže spolu rastry mezi dvěma vrstvami vždy svírají pravý úhel.

Dále bylo zvoleno nastavení Base – tedy pod výtiskem se vytvoří základna tvořená třemi vrstvami stavebního materiálu a dále třemi vrstvami podpůrného materiálu. To má za cíl vyrovnat samotné tištěné těleso.

V obrazové příloze (viz kapitola 13.1) jsou obrázky každého tělesa v Stratasys Insight 10.4 zobrazující cestu nástroje a skládání tělesa do vrstev.

5.2. Průběh mechanických zkoušek

Dle [20] byla přeměřena šířka b a tloušťka h jednoho vzorku z každé série těles. Měření probíhalo na středu těles, v případě těles s vrubem do 2 mm od vrubu.

Tabulka 2 – měřené rozměry tělesa z každé série

		Těleso tahová zkouška 1BA na šířku	Těleso tahová zkouška 1BA na výšku	Těleso ohybová zkouška a rázová zkouška v ohybu na výšku	Těleso rázová zkouška v ohybu na šířku s vrubem
ABS-M30 Tecnotrade	h [mm]	4,18	4,00	4,00	4,19
	b [mm]	5,02	5,02	10,18	10,01
ABS 3DFil	h [mm]	4,15	4,00	4,00	4,18
	b [mm]	4,99	5,01	10,17	9,99
ABS Rychlý 3D tisk	h [mm]	4,15	3,95	3,98	4,16
	b [mm]	4,97	4,96	10,16	9,95
PC-ABS Tecnotrade	h [mm]	4,13	4,03	4,01	4,18
	b [mm]	5,03	5,08	10,17	10,03
PC-ABS Rychlý 3D tisk	h [mm]	3,89-4,20- 3,93*	x	4,00	3,77-4,23- 3,92*
	b [mm]	5,02	x	9,05-10,23- 9,12*	10,10

Rozměry těles odpovídají požadovaným tolerancím kromě hodnot s *.

* jedná se o hodnoty: na jednom kraji – na středu – na druhém kraji tělesa. Tělesa jsou deformovaná a jejich zkouška je brána pouze orientačně (viz kapitola 7.3. Problematiky tisku PC-ABS od Rychlý 3D tisk). Pro rázovou a ohybovou zkoušku jsou použity hodnoty na středu tělesa, kde byla tělesa zatěžována, pro tahovou je brána krajová hodnota, kde docházelo k přerušení (viz obrazová příloha kapitola 13.2.1).

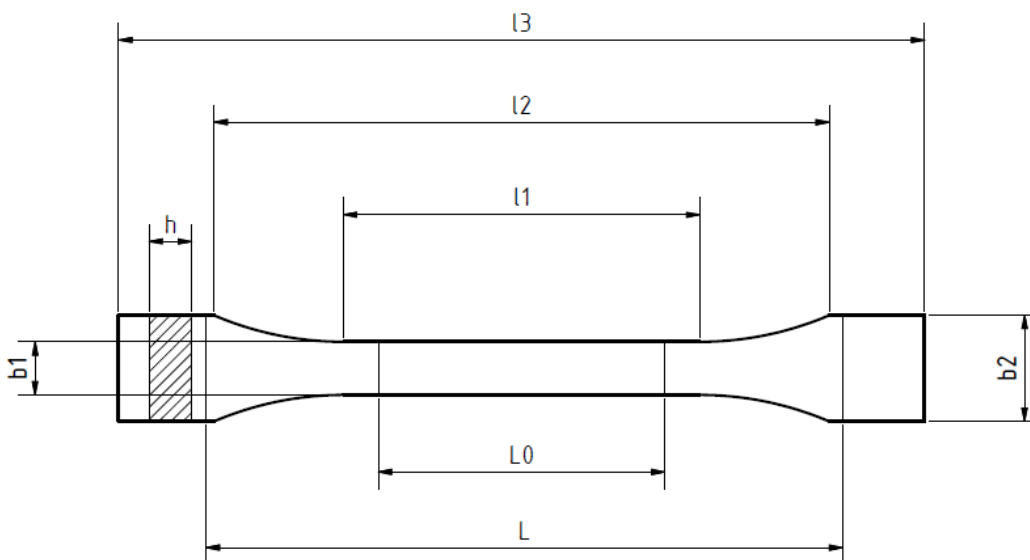
5.3. Tahová zkouška

Tato zkouška se využívá pro vyhodnocení chování materiálů, ze kterých jsou vyrobená zkušební tělesa, při namáhání tahem v krátkém časovém úseku, pro stanovení modulu pružnosti v tahu, meze pevnosti v tahu a dalších tahových charakteristik. To je vypočteno z poměru měřených proměnných: napětí v tahu – poměrné prodloužení.

Zkouška probíhá natahováním zkušebního tělesa silou F ve směru své hlavní podélné osy. Čelisti zkušebního trhacího stroje se pohybují konstantní rychlostí v . Zkouška končí v okamžiku porušení, popřípadě dosažením předem stanovené hodnoty deformace.

Označí se počáteční měřená délka L_0 dle [22], aby tím nedošlo k ovlivnění výsledků zkoušky.

Byla použita zkušební tělesa 1BA dle normy [22] z důvodů uvedených v kapitole 7.2. Tahová zkouška 1A.



Obr. 5 – Zkušební těleso pro tahovou zkoušku 1BA

Tabulka 3 – rozměry tělesa 1BA pro tahovou zkoušku

	Parametr	Těleso 1BA	Zvolené hodnoty
l_3 [mm]	Celková délka	≥ 75	76
l_1 [mm]	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	$30,0 \pm 0,5$	
r [mm]	Poloměr	≥ 30	31
l_2 [mm]	Vzdálenost mezi rozlišenými částmi s rovnoběžnými hranami	58 ± 2	
b_2 [mm]	Šířka konců	$10,0 \pm 0,5$	
b_1 [mm]	Šířka zúžené části	$5,0 \pm 0,5$	
h [mm]	Tloušťka	≥ 2	4
L_0 [mm]	Počáteční měřená délka	$25,0 \pm 0,5$	
L [mm]	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$l_2 \begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}$	58

Rozměry v milimetrech

5.3.1. Průběh zkoušky

Zkouška probíhala na univerzálním trhacím stroji Instron 5582 (rozsah zatížení až 10 tun). Normovaná rychlost příčnicku byla zvolena 5 mm/min.

Vztahy a symboly [23]:

b [mm] šířka vzorku

h [mm] tloušťka vzorku

L [mm] upínací vzdálenost mezi čelistmi

ΔL_{tb} [mm] zvětšení upínací vzdálenosti při přetržení

F_y [kN] síla na mezi kluzu

A [mm²] počáteční průřez zkušebního tělesa

σ_y [MPa] mez kluzu

ε_{tb} [-] jmenovité poměrné prodloužení při přetržení

s – směrodatná odchylka

Vztahy:

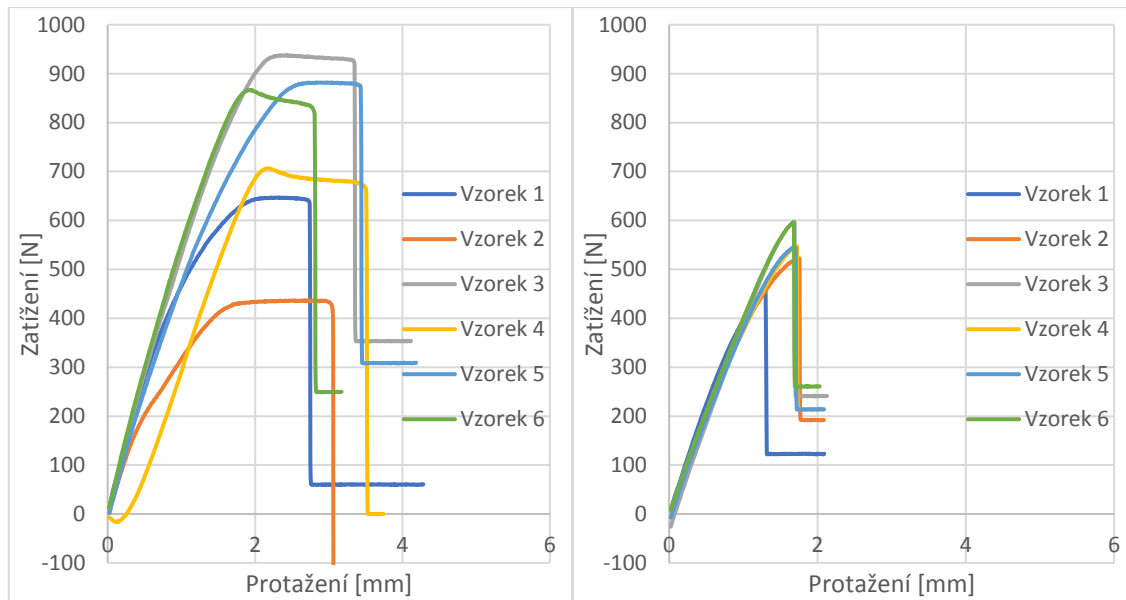
$$A = b * h \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta L_{tb}}{L} \quad (3)$$

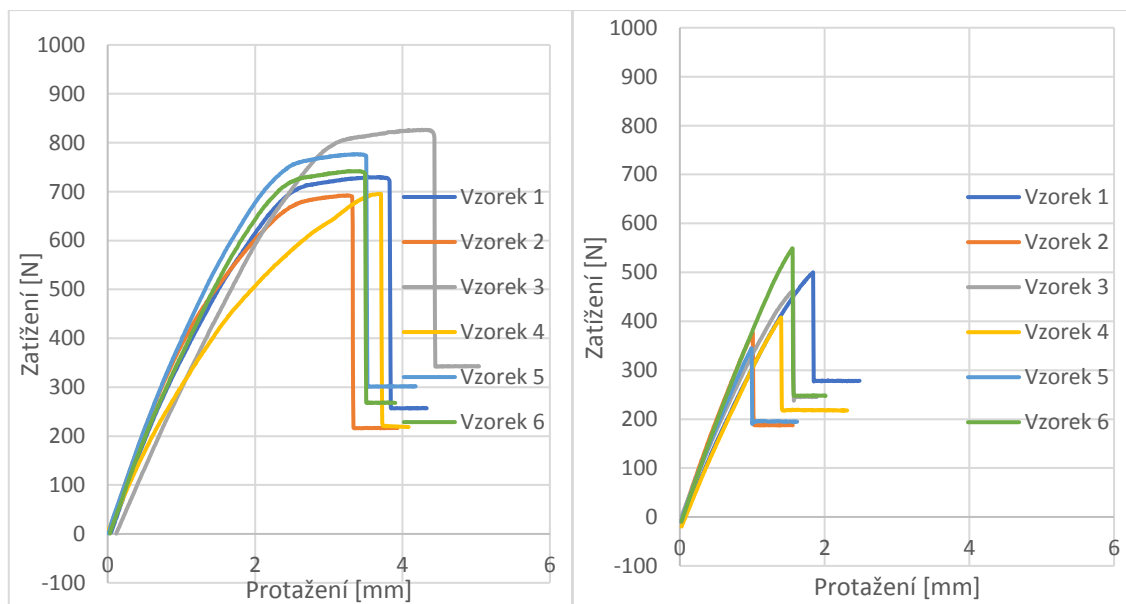
ABS-M30 Tecnotrade

Graf 1 a Graf 2 – Průběh tahové zkoušky materiálu ABS-M30 Tecnotrade u těles tištěných na šířku (vlevo) a na výšku (vpravo)



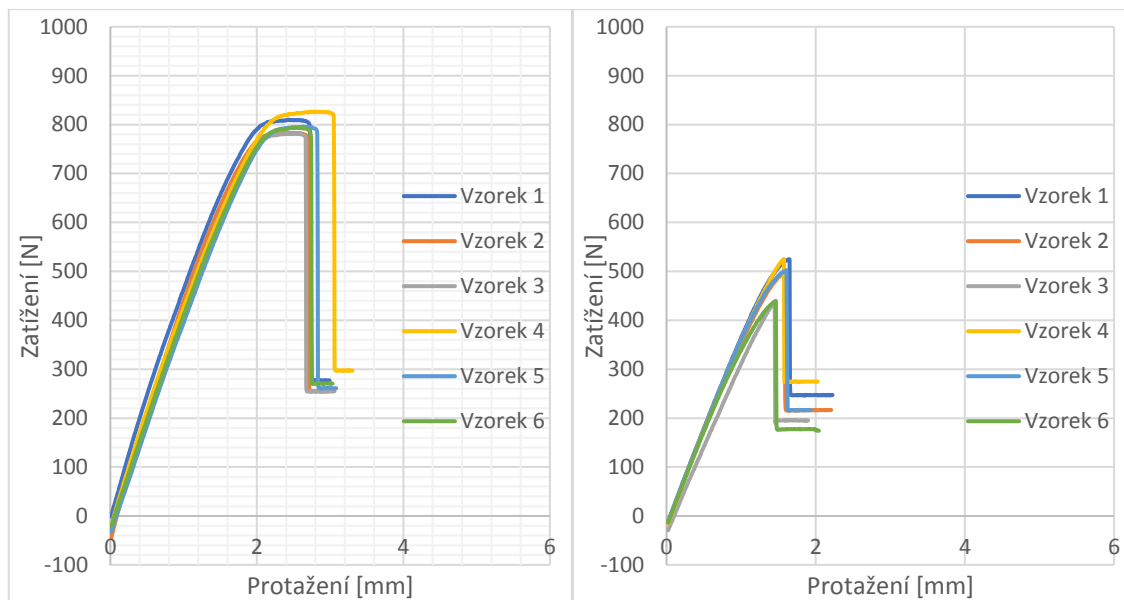
ABS 3DFil

Graf 3 a Graf 4 – Průběh tahové zkoušky materiálu ABS 3DFil u těles tištěných na šířku (vlevo) a na výšku (vpravo)



ABS Rychlý 3D tisk

Graf 5 a Graf 6 – Průběh tahové zkoušky materiálu ABS Rychlý 3D tisk u těles tištěných na šířku (vlevo) a na výšku (vpravo)



Z důvodu zkoumání možnosti opakovaného používání tištěných těles je pozorována jejich **mez kluzu** – její překročení je pro toto použití nevhodné, protože poté dochází k trvalým plastickým deformacím.

Dle [20] grafy “na šířku” odpovídají typickým křivkám napětí **typu c**: pro **houževnaté materiály** s mezí kluzu a grafy “na výšku” odpovídají křivkám **typu a**: pro **křehké materiály**.

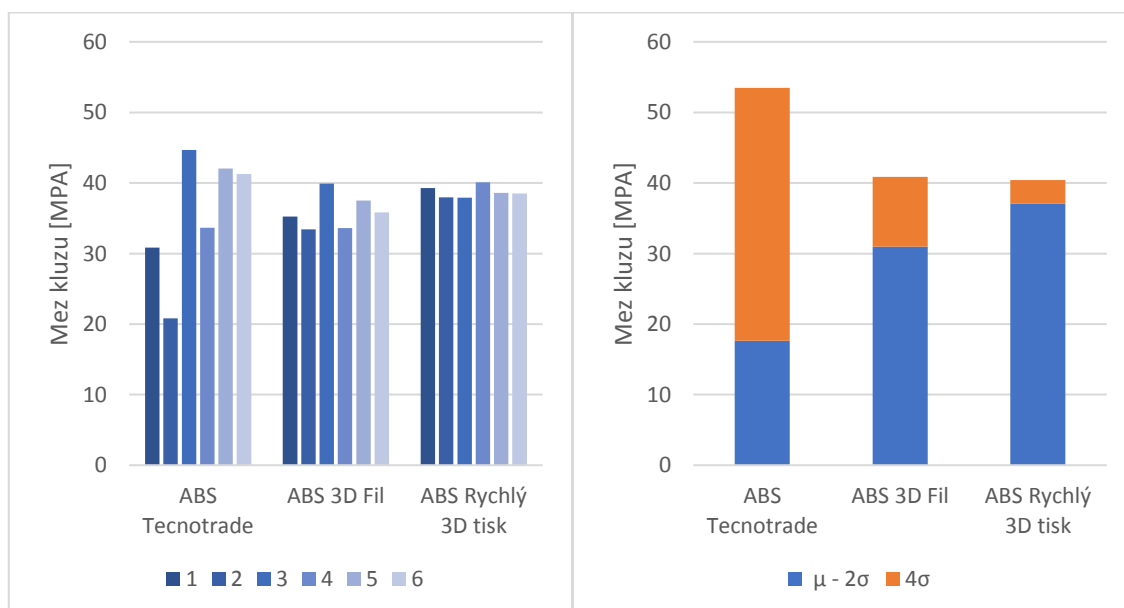
Pro typ c odpovídá hodnota meze kluzu maximální naměřené hodnotě napětí na křivce, pro typ a je totožný s mezí pevnosti.

Pro oba typy křivek tedy mez kluzu odpovídá maximálnímu naměřenému napětí na křivce.

Tabulka 4 – Numerické výsledky tahové zkoušky pro materiály ABS těles tištěných na šířku

		1	2	3	4	5	6	Průměr	s
ABS-M30 Tecnotrade	F_y [N]	647,0	436,9	937,7	706,5	882,2	866,5	746,18	188,0
	σ_y [MPa]	2	1	9	7	6	7	35,56	8,96
	ΔL_{tb} [mm]	30,83	20,82	44,69	33,67	42,05	41,30	2,542	0,343
	ϵ_{tb} [-]	2,225	2,675	2,342	2,175	2,833	3,002	0,033	0,005
ABS 3DFil	F_y [N]	729,9	692,2	826,5	695,5	776,8	742,0	743,84	51,22
	σ_y [MPa]	3	2	0	0	3	9	35,92	2,47
	ΔL_{tb} [mm]	35,25	33,43	39,91	33,59	37,51	35,83	3,570	0,390
	ϵ_{tb} [-]	3,658	3,233	4,258	3,675	3,333	3,258	0,047	0,005
ABS Rychlý 3D tisk	F_y [N]	810,2	783,2	782,4	826,9	796,1	794,0	798,86	17,12
	σ_y [MPa]	9	4	3	7	5	6	38,73	0,83
	ΔL_{tb} [mm]	39,29	37,97	37,93	40,09	38,60	38,50	2,569	0,119
	ϵ_{tb} [-]	2,425	2,467	2,558	2,758	2,633	2,575	0,034	0,002

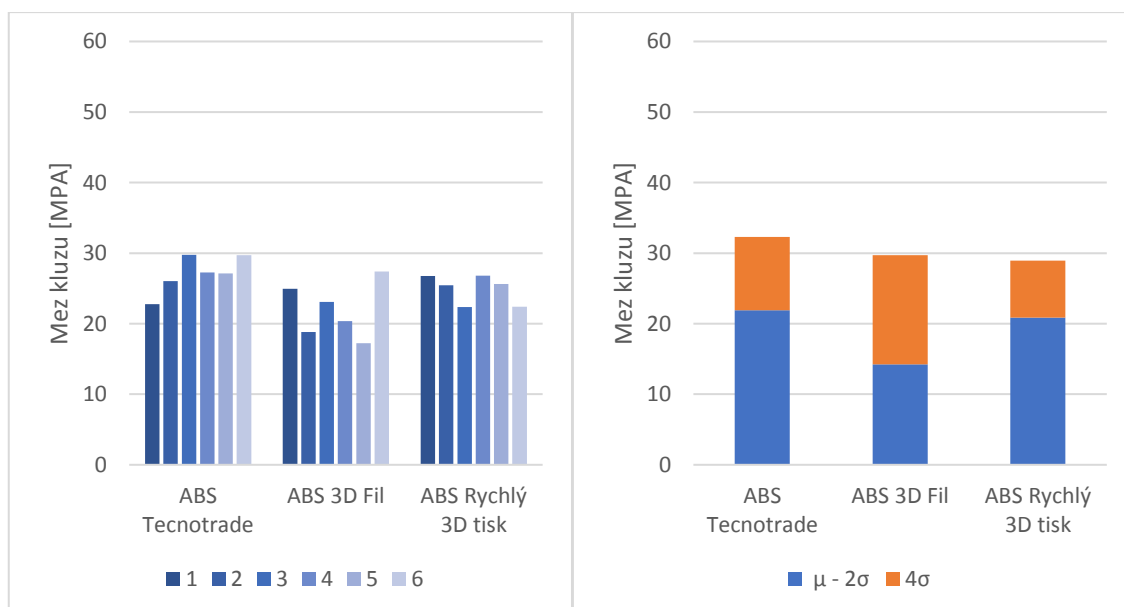
Graf 7 a Graf 8 – Mez pevnosti jednotlivých zkušebních těles (vlevo) a znázornění statistické pravděpodobnosti rozmezí meze pevnosti 95 % těles dle teorie 6 sigma (vpravo): Tahová zkouška ABS těles na šířku



Tabulka 5 – Numerické výsledky tahové zkoušky pro materiály ABS těles tištěných na výšku

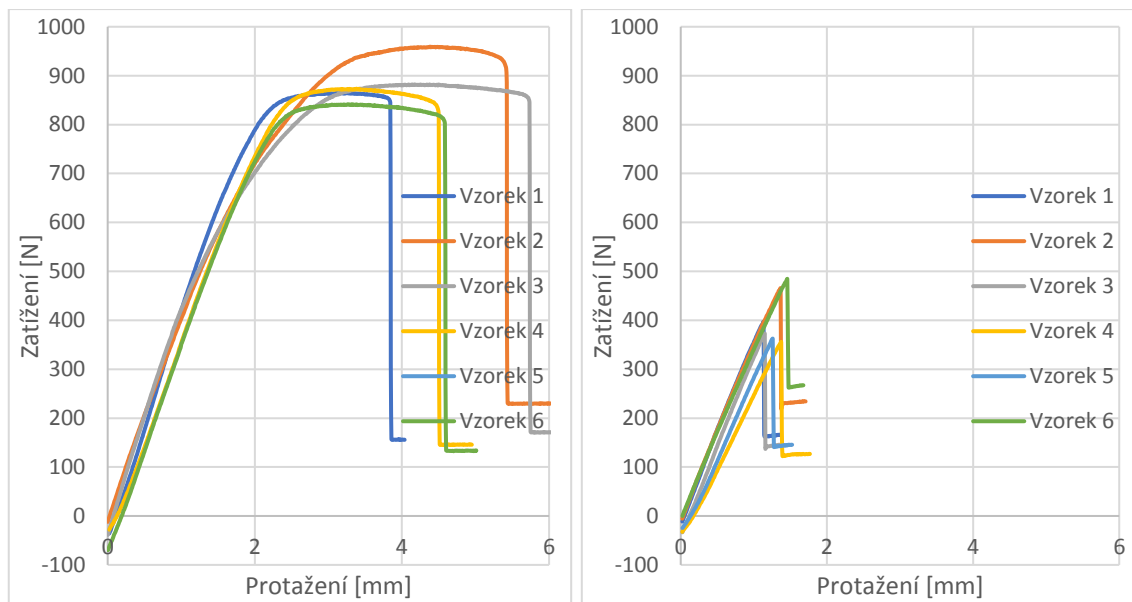
		1	2	3	4	5	6	Průměr	s
ABS-M30 Tecnotrade	F_y [N]	457,47	522,38	597,27	547,46	545,11	596,28	544,33	52,03
	σ_y [MPa]	22,78	26,01	29,74	27,26	27,15	29,70	27,11	2,59
	ΔL_{tb} [mm]	1,300	1,750	1,683	1,717	1,700	1,675	1,638	0,167
	ϵ_{tb} [-]	0,017	0,023	0,022	0,023	0,022	0,022	0,022	0,002
ABS 3DFil	F_y [N]	500,09	376,97	462,48	407,84	345,15	549,13	440,28	77,50
	σ_y [MPa]	24,95	18,81	23,08	20,35	17,22	27,40	21,97	3,87
	ΔL_{tb} [mm]	1,842	1,008	1,567	1,400	0,992	1,558	1,394	0,337
	ϵ_{tb} [-]	0,024	0,013	0,021	0,018	0,013	0,021	0,018	0,004
ABS Rychlý 3D tisk	F_y [N]	524,52	498,24	437,67	524,79	502,47	439,32	487,84	39,76
	σ_y [MPa]	26,77	25,43	22,34	26,79	25,65	22,42	24,90	2,03
	ΔL_{tb} [mm]	1,650	1,583	1,450	1,575	1,608	1,467	1,556	0,080
	ϵ_{tb} [-]	0,022	0,021	0,019	0,021	0,021	0,019	0,020	0,001

Graf 9 a Graf 10 – Mez pevnosti jednotlivých zkušebních těles (vlevo) a znázornění statistické pravděpodobnosti rozmezí meze pevnosti 95 % těles dle teorie 6 sigma (vpravo): Tahová zkouška ABS těles na výšku



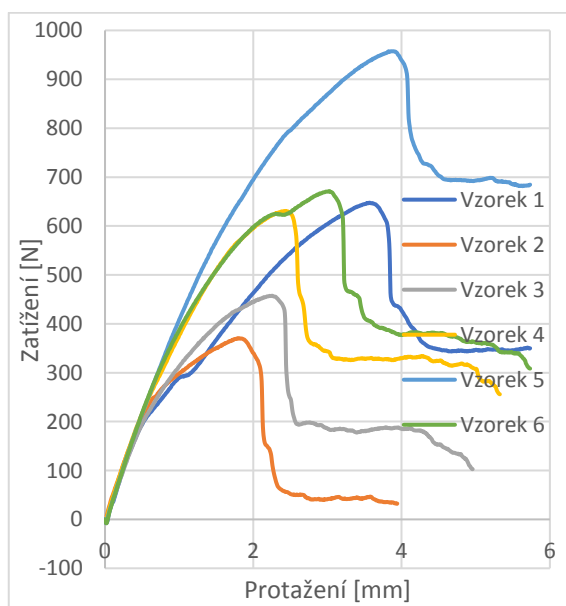
PC-ABS Tecnotrade

Graf 11 a Graf 12 – Průběh tahové zkoušky materiálu PC-ABS Tecnotrade u těles tištěných na šířku (vlevo) a na výšku (vpravo)



PC-ABS Rychlý 3D tisk

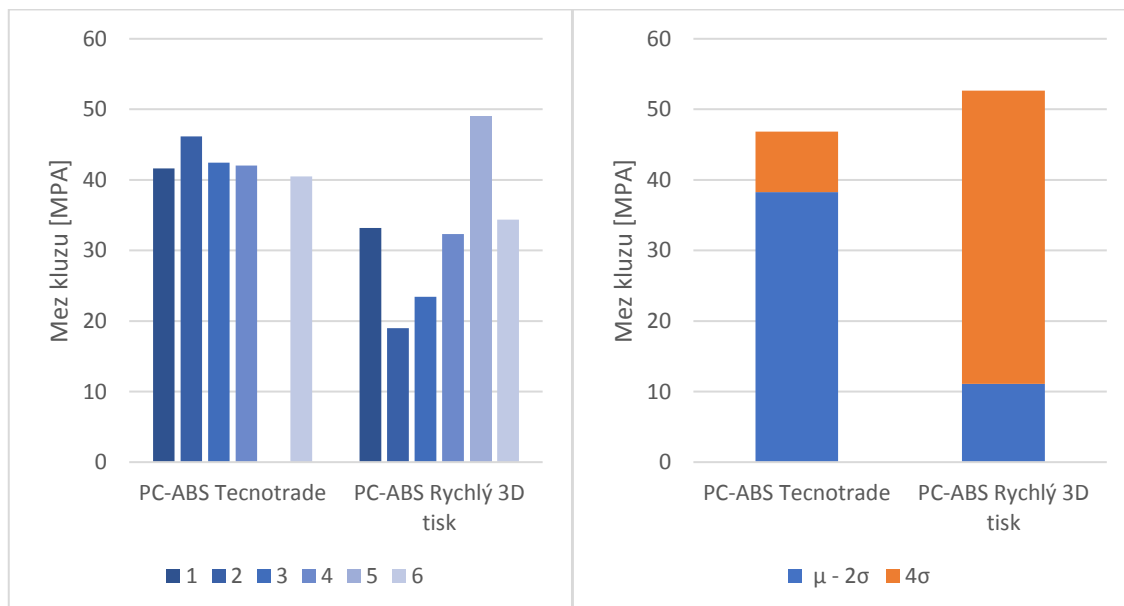
Graf 13 – Průběh tahové zkoušky materiálu PC-ABS Tecnotrade u těles tištěných na šířku



Tabulka 6 – Numerické výsledky tahové zkoušky pro materiály PC-ABS těles tištěných na šířku

		1	2	3	4	5	6	Průměr	s
PC-ABS Tecnotrade	F_y [N]	864,51	959,31	882,12	873,44	X	841,59	884,19	44,62
	σ_y [MPa]	41,62	46,18	42,46	42,05	x	40,51	42,56	2,15
	ΔL_{tb} [mm]	3,258	4,383	4,175	3,383	X	3,267	3,693	0,542
	ϵ_{tb} [-]	0,043	0,058	0,055	0,045	X	0,043	0,049	0,007
PC-ABS Rychlý 3D tisk	F_y [N]	647,76	370,79	457,29	630,84	957,34	671,58	622,60	202,9
	σ_y [MPa]	33,17	18,99	23,42	32,30	49,02	34,39	31,88	10,39
	ΔL_{tb} [mm]	3,550	1,800	2,258	2,425	3,867	3,008	2,818	0,797
	ϵ_{tb} [-]	0,047	0,024	0,030	0,032	0,051	0,040	0,037	0,010

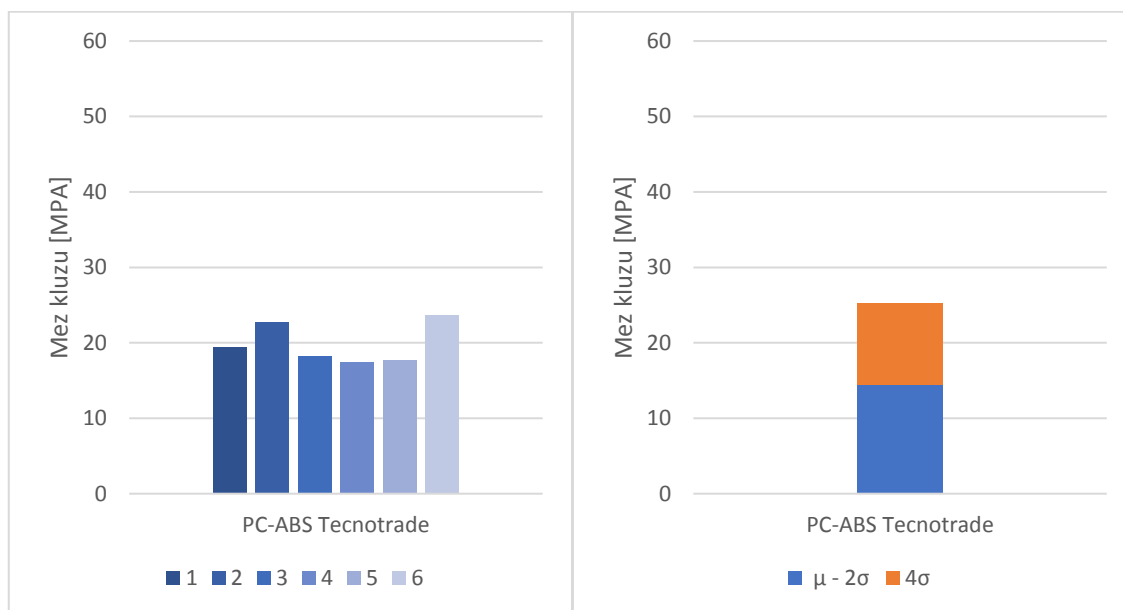
Graf 14 a Graf 15 – Mez pevnosti jednotlivých zkušebních těles (vlevo) a znázornění statistické pravděpodobnosti rozmezí meze pevnosti 95 % těles dle teorie 6 sigma (vpravo): Tahová zkouška PC-ABS těles na šířku



Tabulka 7 – Numerické výsledky tahové zkoušky pro materiál PC-ABS Tecnotrade těles tištěných na šířku

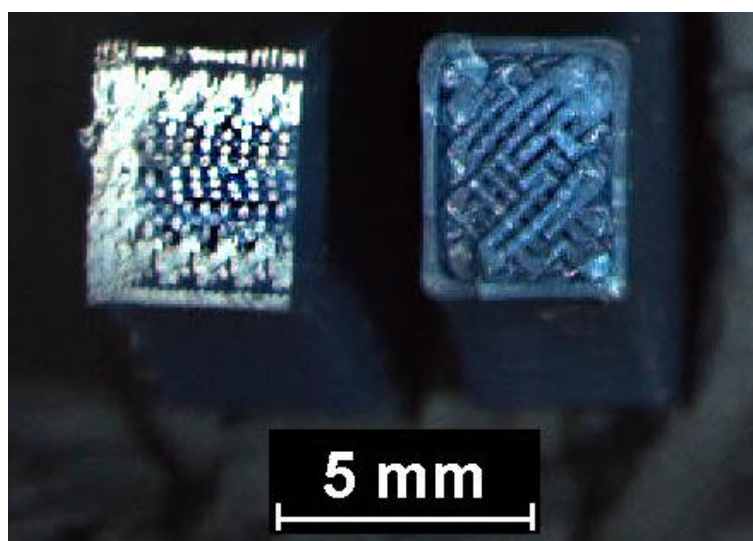
		1	2	3	4	5	6	Průměr	s
PC-ABS Tecnotrade	F_y [N]	397,27	465,99	373,06	355,92	362,71	484,78	406,62	55,40
	σ_y [MPa]	19,40	22,76	18,22	17,39	17,72	23,68	19,86	2,71
	ΔL_{tb} [mm]	1,133	1,367	1,150	1,375	1,258	1,458	1,290	0,132
	ϵ_{tb} [-]	0,015	0,018	0,015	0,018	0,017	0,019	0,017	0,002

Graf 16 a Graf 17 – Mez pevnosti jednotlivých zkušebních těles (vlevo) a znázornění statistické pravděpodobnosti rozmezí meze pevnosti 95 % těles dle teorie 6 sigma (vpravo): Tahová zkouška PC-ABS těles na výšku



5.3.2. Vyhodnocení

Vliv anizotropie v tisku se potvrdil, na lomu těles je vidět, že k přerušení dochází vždy na hranici, kde došlo ke spojování materiálu při tisku. U těles tištěných na výšku na hranici mezi dvěma vrstvami, u těles tištěných na šířku je znatelný úhel lomu 45° popřípadě 135° , jak dochází k lomu v lichých, popřípadě sudých vrstvách (viz Obr. 6, popřípadě obrazová příloha kapitola 13.2)



Obr. 6 – Lom tělesa tištěného na šířku (vlevo) a na výšku (vpravo)

ABS-M30 Tecnotrade tištěný na šířku se ukázal jako velmi nespolehlivý, v některých instancích dosahoval velmi dobrých výsledků, v některých velmi podprůměrných. V průměru mez kluzu dosahovala hodnot **35,56 MPa**, což je více než oficiálně uváděná hodnota 31 MPa, avšak se směrodatnou odchylkou **8,96 MPa** je třeba k této hodnotě přistupovat s rezervou. Navíc je to nejméně ze tří testovaných materiálů. U tělesa tištěného na výšku dosáhl nejlepších výsledků – **27,11 MPa**, a také nejlepšího poměru mezi tiskem na výšku a na šířku – **76,24%**. Směrodatná odchylka **2,59 MPa** je srovnatelná s ostatními testovanými materiály.

ABS 3DFil tištěný na šířku dosahuje srovnatelných hodnot meze kluzu v tahu jako ABS-M30 Tecnotrade, **35,92 MPa**, ale směrodatná odchylka dosahuje jen **2,47 MPa**, je tedy mnohem spolehlivější. U tělesa tištěného na výšku dosahuje výsledků nejhorsích – **21,97 MPa**, což je pouhých **61,16 %** hodnoty tisku na šířku, navíc s nejvyšší směrodatnou odchylkou **3,87 MPa**. To ukazuje na nejslabší vazbu mezi vrstvami z testovaných materiálů a nejvyšší anizotropii.

ABS Rychlý 3D tisk tištěný na šířku dosahuje hodnot meze kluzu v tahu **38,73 MPa** se směrodatnou odchylkou **0,83 MPa**. Tyto hodnoty jsou obě nejlepší ze všech testovaných ABS. U tělesa tištěného na výšku dosahuje **24,9 MPa**, což je průměrná hodnota, avšak směrodatná odchylka je opět nejlepší – **2,03 MPa**.

Tento materiál je tedy velmi spolehlivý, chová se v tahu velmi předvídatelně. Poměr mezi hodnotami tisku na výšku a na šířku je **64,29 %**.

PC-ABS Tecnotrade tištěný na šířku má hodnotu meze kluzu **42,56 MPa**, což je více než tabulkových 41 MPa, se stabilní směrodatnou odchylkou **2,15 MPa**. Na výšku má však jen **19,86 MPa** (se směrodatnou odchylkou **2,71 MPa**), což činí poměr mezi tisky na výšku a na šířku pouhých **46,66 %**. Tento materiál je tedy velmi anizotropní.

PC-ABS Rychlý 3D tisk tištěný na šířku má hodnotu meze kluzu jen **31,88 MPa**, s výraznou nekonzistentností výsledků – směrodatná odchylka dosahuje **10,39 MPa**. Tělesa tisknutá na výšku z materiálu nebylo možné ani vytisknout (viz kapitola 7.3 Problematiky tisku PC-ABS od Rychlý 3D tisk). Oproti materiálu Tecnotrade je tedy v oblasti tahových zkoušek ze všech směrů značně horší.

Byla použita jiná zkušební tělesa než 1A z důvodu uvedeného v kapitole 7.2. Tahová zkouška 1A, porovnání s oficiálně uváděnými hodnotami je tedy spíše orientačního charakteru.

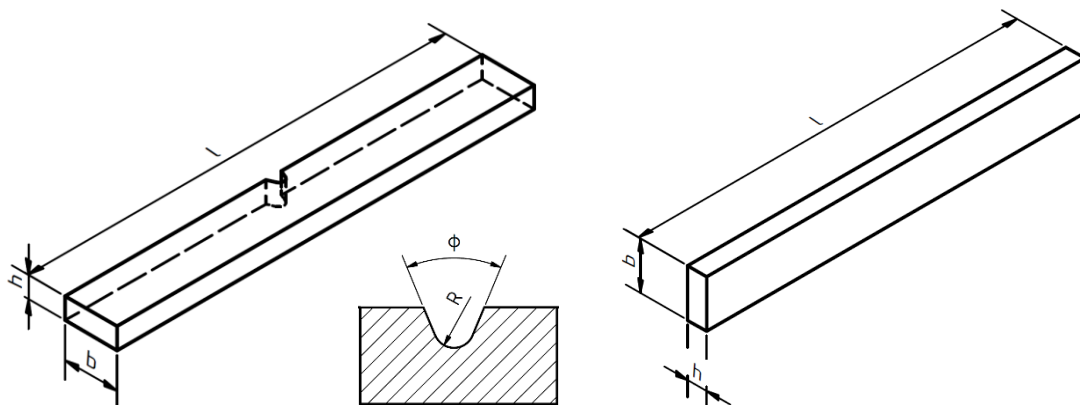
5.4. Zkouška rázové houževnatosti Charpy

Podstatou zkoušky je přeražení zkušebního tělesa jedním rázem kyvadlového kladiva ve středu tělesa. Vzorek opatřený vrubem je přeražený kladivem z protilehlé strany vrubu.

Vyhodnocuje se energie absorbovaná při rázové zkoušce.

Byla použita zkušební tělesa dle normy [24]:

- na užší stranu (edgewise) opatřené jedním vrubem typu B
- na užší stranu (flatwise)



Obr. 8 – Zkušební těleso pro zkoušku rázové houževnatosti Charpy na užší stranu (edgewise) opatřené jedním vrubem typu B

Obr. 7 – Zkušební těleso pro zkoušku rázové houževnatosti Charpy na užší stranu (flatwise)

Tabulka 8 – Rozměry těles pro zkoušku rázové houževnatosti

	Parametr	Těleso 1
L [mm]	Celková délka	80 ± 2
b [mm]	Šířka	$10,0 \pm 0,2$
h [mm]	Tloušťka	≥ 30
L [mm]	Rozpětí mezi podpěrami	62^{+2}_0
R [mm]	Poloměr kořene vrubu	$1,0 \pm 0,05$
ϕ [°]	Úhel vrubu	$45^\circ \pm 1^\circ$

Rozměry v milimetrech

5.4.1. Průběh zkoušky

Ke zkoušce bylo použito zkušební kladivo CEAST 6545/000. Hmotnost kladiva 1,096 kg, výška 0,7 m, úhel náprahu 150°, rychlost srážky 3,7 m/s, energie 7,5 J.

Rázová houževnatost Charpy zkušebních těles bez vrubu, a_{cU} , se vypočítá ze vzorce

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h * b} * 10^3 \text{ [kJ/m}^2\text{]} \quad (4)$$

kde:

E_c je korigovaná energie v joulech spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa

h je tloušťka zkušebního tělesa v milimetrech

b je šířka zkušebního tělesa v milimetrech

Rázová houževnatost Charpy zkušebních těles opatřených vrubem, a_{cN} , se vypočítá ze vzorce

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h * b_N} * 10^3 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right] \quad (5)$$

kde:

E_c je korigovaná energie v joulech spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa

h je tloušťka zkušebního tělesa v milimetrech

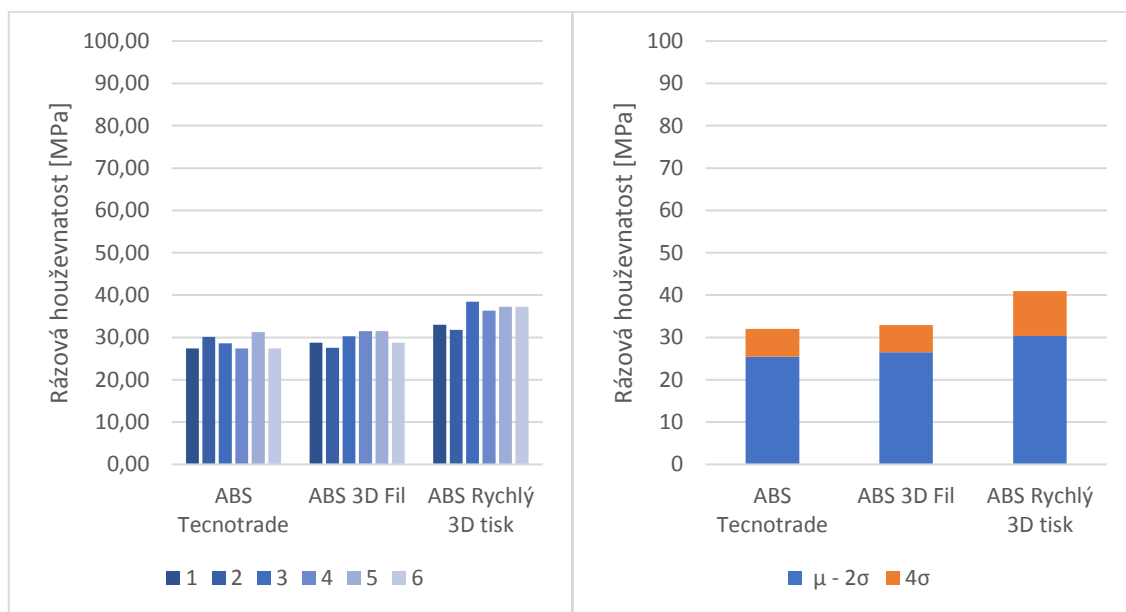
b_N je šířka zkušebního tělesa pod vrubem v milimetrech

ABS s vrubem na užší stranu

Tabulka 9 – Numerické výsledky zkoušky rázové houževnatosti s vrubem na užší stranu pro materiály ABS

		1	2	3	4	5	6	Průměr	s
ABS-M30 Tecnotrade	E_c [J]	0,92	1,01	0,96	0,92	1,05	0,92	0,96	0,06
	a_{cN} [kJ/m ²]	27,41	30,09	28,60	27,41	31,29	27,41	28,70	1,65
ABS 3DFil	E_c [J]	0,96	0,92	1,01	1,05	1,05	0,96	0,99	0,05
	a_{cN} [kJ/m ²]	28,74	27,55	30,24	31,44	31,44	28,74	29,69	1,60
ABS Rychlý 3D tisk	E_c [J]	1,09	1,05	1,27	1,20	1,23	1,23	1,18	0,09
	a_{cN} [kJ/m ²]	32,96	31,75	38,40	36,28	37,19	37,19	35,63	2,65

Graf 18 a Graf 19 – Rázová houževnatost jednotlivých zkušebních těles (vlevo)
 a znázornění statistické pravděpodobnosti rozmezí meze pevnosti 95 % těles dle teorie
 6 sigma (vpravo): Rázová zkouška ABS s vrubem

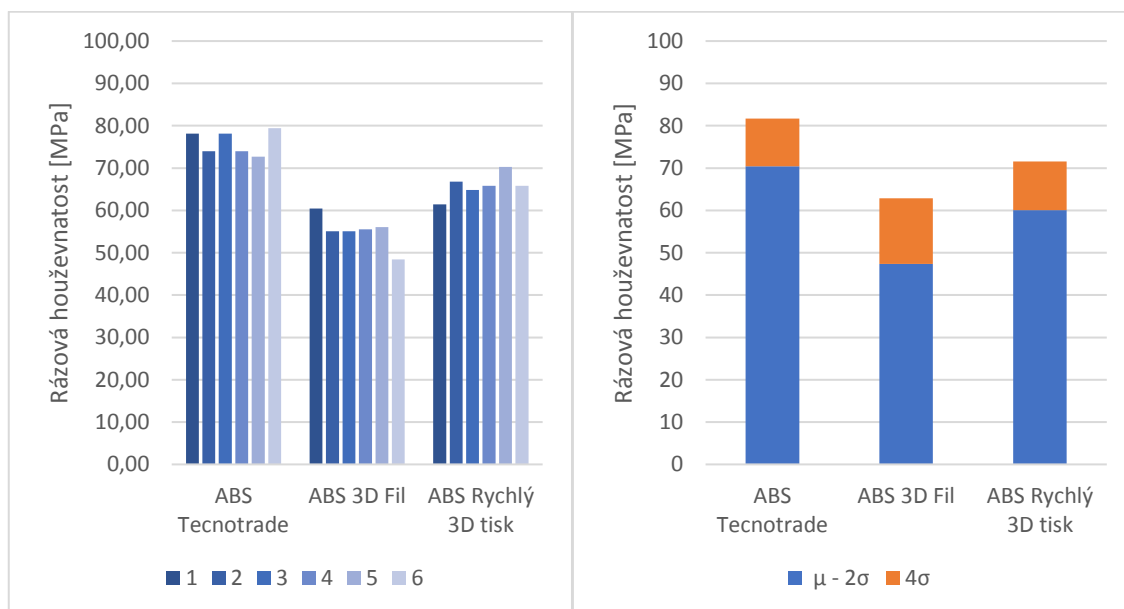


ABS bez vrubu na širší stranu

Tabulka 10 – Numerické výsledky zkoušky rázové houževnatosti bez vrubu na širší stranu pro materiály ABS

		1	2	3	4	5	6	Průměr	s
ABS-M30 Tecnotrade	E_c [J]	3,16	2,99	3,16	2,99	2,94	3,21	3,08	0,11
	a_{cU} [kJ/m ²]	78,15	73,94	78,15	73,94	72,71	79,38	76,04	2,83
ABS 3DFil	E_c [J]	2,46	2,24	2,24	2,26	2,28	1,97	2,24	0,16
	a_{cU} [kJ/m ²]	60,47	55,06	55,06	55,56	56,05	48,43	55,10	3,86
ABS Rychlý 3D tisk	E_c [J]	2,50	2,72	2,64	2,68	2,86	2,68	2,68	0,12
	a_{cU} [kJ/m ²]	61,39	66,80	64,83	65,82	70,24	65,82	65,82	2,86

Graf 20 a Graf 21 – Rázová houževnatost jednotlivých zkušebních těles (vlevo)
 a znázornění statistické pravděpodobnosti rozmezí meze pevnosti 95 % těles dle teorie
 6 sigma (vpravo): Rázová zkouška ABS bez vrubu

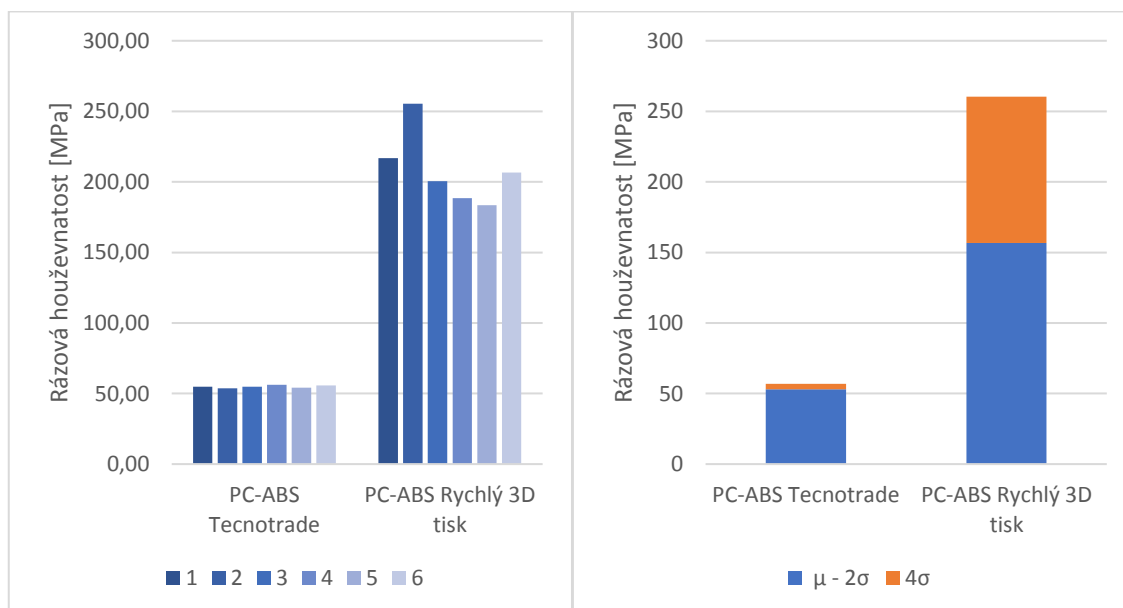


PC-ABS s vrubem na užší stranu

Tabulka 11 – Numerické výsledky zkoušky rázové houževnatosti s vrubem na užší stranu pro materiály PC-ABS

		1	2	3	4	5	6	Průměr	s
PC-ABS Tecnotrade	E_c [J]	1,84	1,80	1,84	1,89	1,82	1,87	1,84	0,03
	a_{cN} [kJ/m ²]	54,82	53,63	54,82	56,31	54,22	55,71	54,92	0,97
PC-ABS Rychlý 3D tisk	E_c [J]	7,43	8,75	6,87	6,46	6,29	7,08	7,15	0,89
	a_{cN} [kJ/m ²]	216,85	255,38	200,51	188,54	183,58	206,64	208,58	25,90

Graf 22 a Graf 23 – Rázová houževnatost jednotlivých zkušebních těles (vlevo)
 a znázornění statistické pravděpodobnosti rozmezí meze pevnosti 95 % těles dle teorie
 6 sigma (vpravo): Rázová zkouška PC-ABS s vrubem

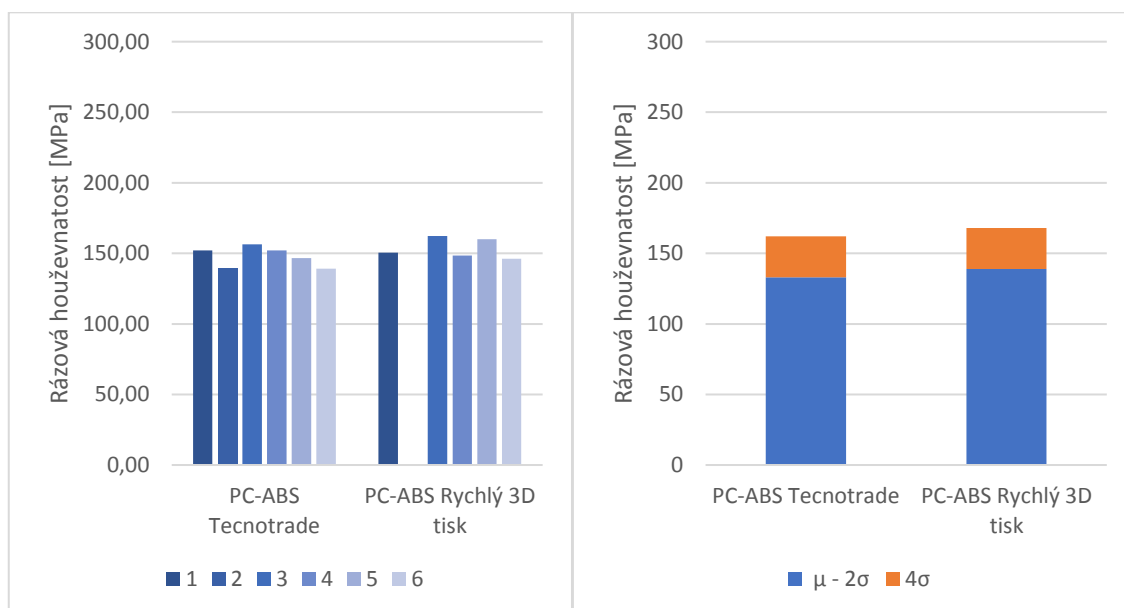


PC-ABS bez vrubu na širší stranu

Tabulka 12 – Numerické výsledky zkoušky rázové houževnatosti bez vrubu na širší stranu pro materiály PC-ABS

		1	2	3	4	5	6	Průměr	s
PC-ABS Tecnotrade	E_c [J]	6,20	5,67	6,38	6,20	5,98	5,67	6,02	0,30
	a_{cu} [kJ/m ²]	152,03	139,03	156,44	152,03	146,63	139,0	147,53	7,28
PC-ABS Rychlý 3D tisk	E_c [J]	6,16	x	6,64	6,07	6,55	5,98	6,28	0,30
	a_{cu} [kJ/m ²]	150,54	x	162,27	148,34	160,07	146,1	153,47	7,24

Graf 24 a Graf 25 – Rázová houževnatost jednotlivých zkušebních těles (vlevo)
 a znázornění statistické pravděpodobnosti rozmezí meze pevnosti 95 % těles dle teorie
 6 sigma (vpravo): Rázová zkouška PC-ABS bez vrubu



5.4.2. Vyhodnocení

Materiál **ABS-M30 Tecnotrade** má nejhorší rázovou houževnatost při zkoušce na užší stranu opatřené vrubem ze všech testovaných materiálů – **28,70 kJ/m²**, což je značně méně než tabulková hodnota **34,75 kJ/m²**. Směrodatná odchylka je **1,65 kJ/m²**. Naopak v rázové houževnatosti na výšku má materiál nejlepší vlastnosti z testovaných ABS, dosahuje hodnoty **76,04 kJ/m²** se směrodatnou odchylkou **2,83 kJ/m²**. Stratasys výsledky této zkoušky neuvádí, takže je nelze porovnat.

ABS 3DFil má velmi podobné, lehce vyšší hodnoty rázové houževnatosti při zkoušce na užší stranu opatřené vrubem než ABS-M30, **29,69 kJ/m²**, se směrodatnou odchylkou **1,6 kJ/m²**. Hodnoty rázové houževnatosti na výšku má nejhorší ze všech testovaných materiálů: **55,10 kJ/m²**, s největším variačním rozptylem – směrodatná odchylka **3,86 kJ/m²**.

ABS Rychlý 3D tisk má nejlepší hodnoty rázové houževnatosti na užší stranu opatřené vrubem – **35,63 kJ/m²**, se stále tolerovatelnou směrodatnou odchylkou **2,65 kJ/m²**. Touto hodnotou překonal tabulkovou hodnotu materiálu, u zkoušky na výšku dosahuje středních hodnot **65,82 kJ/m²** se směrodatnou odchylkou **2,86 kJ/m²**.

PC-ABS Tecnotrade je materiál inzerovaný jako vhodný k vystavení rázovému zatížení (viz kapitola 4.2.3 PC-ABS). Skutečně má lepší rázovou houževnatost než ABS – **54,92 kJ/m²**, s mnohem lepší spolehlivostí – směrodatná odchylka **0,97 kJ/m²**, i když výrazně horší, než je uváděná tabulková hodnota **82,5 kJ/m²**. U zkoušky na výšku dosahuje násobně vyšších hodnot oproti ABS, **147,53 kJ/m²**, i když se směrodatnou odchylkou **7,28 kJ/m²**.

PC-ABS Rychlý 3D tisk má bezkonkurenčně největší odolnost proti rázovému zatížení na výšku s vrubem **208,58 kJ/m²** se směrodatnou odchylkou **25,90 kJ/m²**. U vzorků PC-ABS Rychlý 3D tisk nedošlo vlivem jejich velké rázové houževnatosti k plnému přeražení, je tedy možné, že skutečné hodnoty jsou ještě

větší. Jejich vysokou rázovou houževnatost lze vysvětlit pohledem na jejich lom na mikroskopu (viz kapitola 13.2.7 Detail na lom – zkouška rázové houževnatosti s vrubem). Oproti ostatním materiálům vytváří viditelná samostatná vlákna – tento jev je běžně v FDM tisku nežádoucí, jelikož zapříčiňuje špatnou soudržnost vrstev a je způsobený špatným vzájemným protavením tištěných vrstev, v této aplikaci však dává materiálu výrazně lepší vlastnosti. Při zkoušce na širší stranu jsou hodnoty podobné **153,47 kJ/m²** se směrodatnou odchylkou **7,24 kJ/m²**, což je srovnatelné s PC-ABS od Tecnotrade, avšak opět nedošlo k plnému přeražení vzorku, je tedy možné, že je hodnota ještě vyšší.

Značné rozdíly mezi materiály ABS a PC-ABS vedly ke zvolení jiného měřítka osy rázové houževnatosti pro grafy obou materiálů.

5.5. Ohybová zkouška

Ohybová zkouška slouží k vyhodnocení vlastností materiálů zkušebních těles při namáhání ohybem. Zjišťuje modul pružnosti v ohybu, pevnost v ohybu a dalších závislostí mezi napětím a deformací.

Zkušební těleso zapřené dvěma podporami, je vprostřed zatěžováno silou F , dokud deformace tělesa nedosáhne 5 %, nebo dokud se nezlomí na svém vnějším povrchu.

Zaznamenává se závislost mezi průhybem tělesa s a působící silou F . [20]

Byla použita zkušební tělesa dle normy ČSN EN ISO 178. Plasty – Stanovení ohybových vlastností. [25]

Těleso má stejné rozměry jako těleso pro zkoušku rázové houževnatosti Charpy na užší stranu (viz obr XYZ). Tělesa byla tisknuta stejným způsobem.

5.5.1. Ohybová zkouška

Zkouška probíhala na univerzálním trhacím stroji Instron 5582 (rozsah zatížení až 10 tun). Normovaná rychlost příčnicku byla zvolena 2 mm/min, rozpětí podpor 66 mm.

Byla vyhodnocována mez pevnosti v ohybu z důvodu testování maximálního možného zatížení projektovaných součástí.

Mez pevnosti v ohybu σ_b [MPa] se vypočítá vztahem:

$$\sigma_b = \frac{3 * P_R * l_v}{2 * b * h^2} \quad (6)$$

kde

P_R je velikost působícího zatížení v okamžiku poruchy [N]

b je šířka [mm]

h je tloušťka [mm]

l_v je rozpětí podpor [mm]

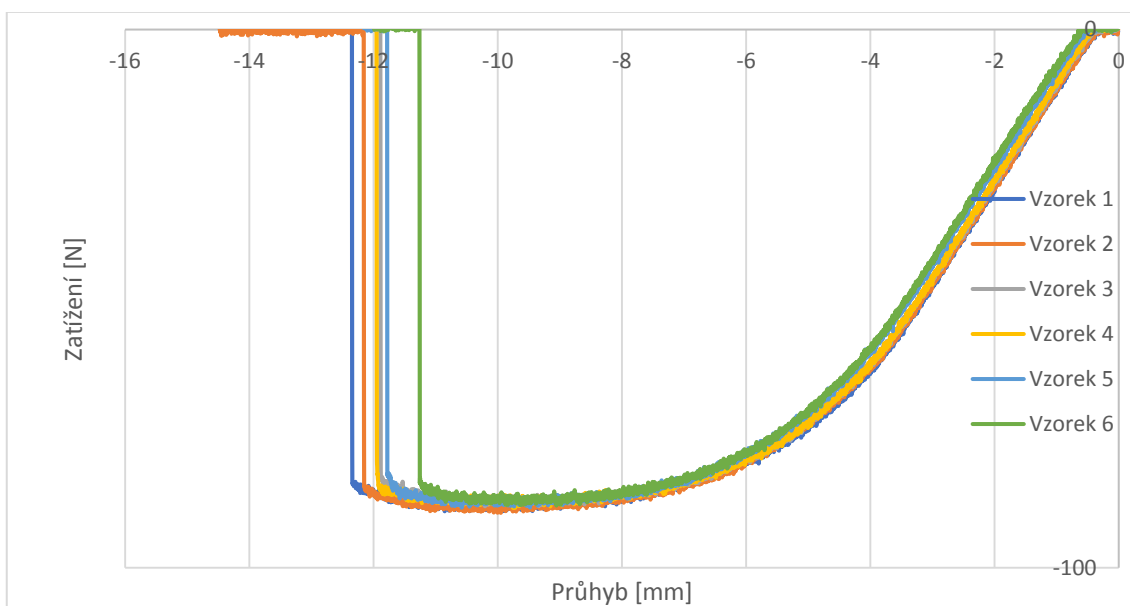
f je průhyb při narušení [mm]

[25]

5.5.2. Průběh zkoušky

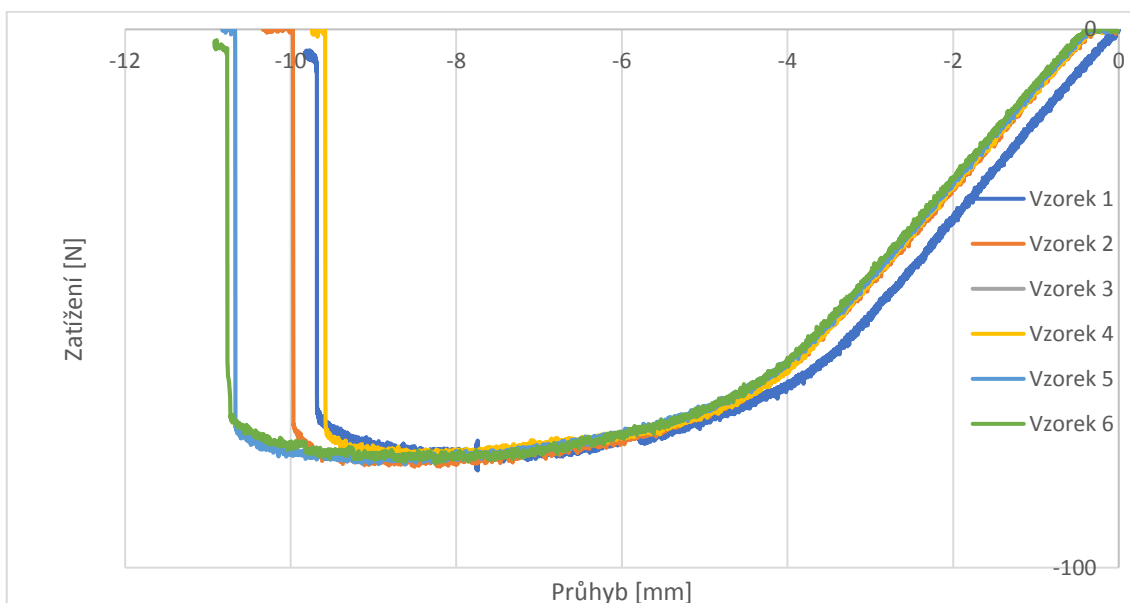
ABS-M30 Tecnotrade

Graf 26 – Průběh ohybové zkoušky materiálu ABS-M30 Tecnotrade



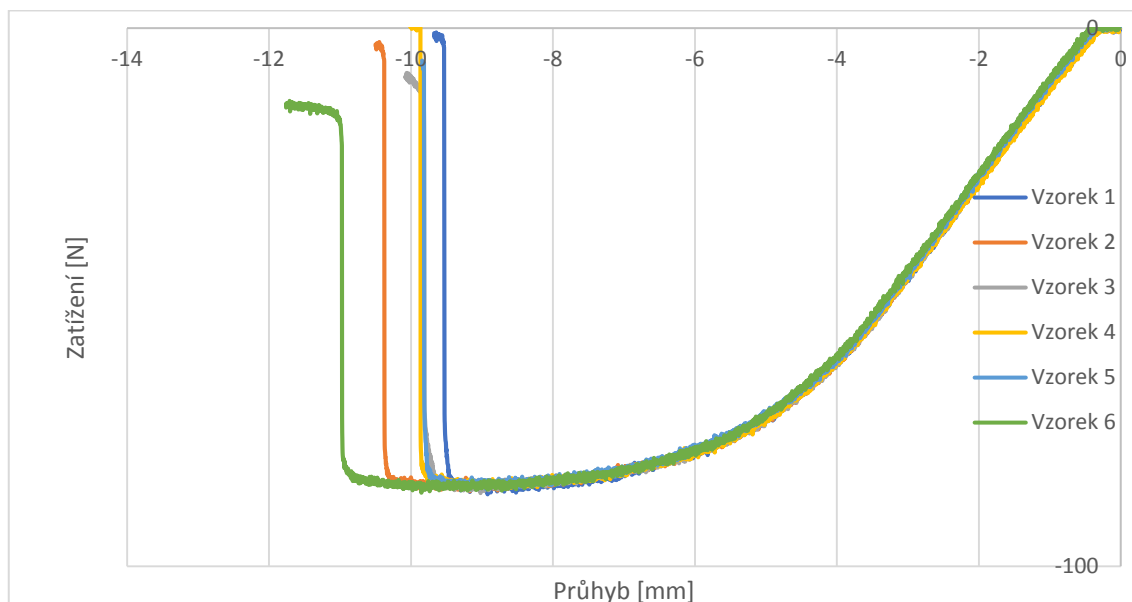
ABS 3DFil

Graf 27 – Průběh ohybové zkoušky materiálu ABS 3DFil



ABS Rychlý 3D tisk

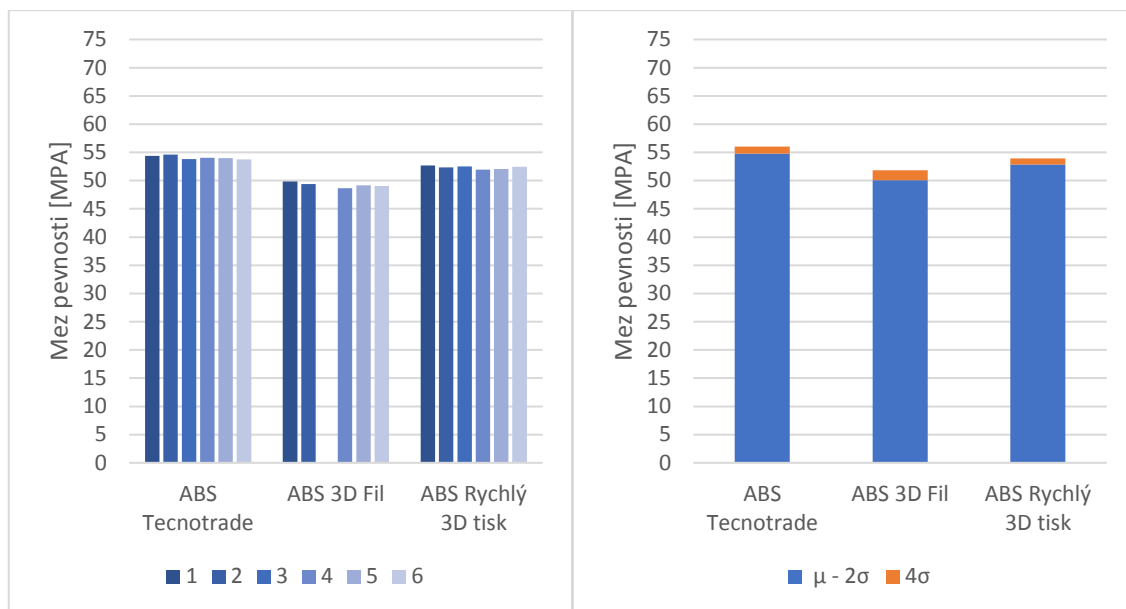
Graf 28 – Průběh ohybové zkoušky materiálu ABS Rychlý 3D tisk



Tabulka 13 – Numerické výsledky ohybové zkoušky pro materiály ABS

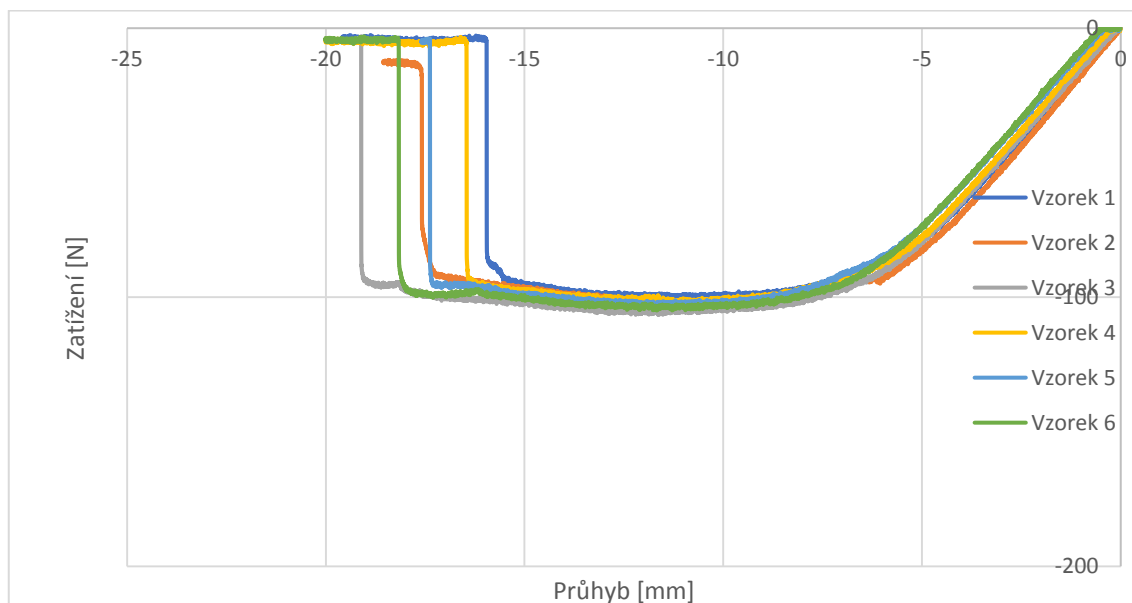
		1	2	3	4	5	6	Průměr	s
ABS-M30 Tecnotrade	F_y [N]	89,51	89,80	88,58	88,89	88,84	88,44	89,01	0,53
	σ_y [MPa]	54,41	54,58	53,84	54,03	54,00	53,75	54,10	0,32
	f [mm]	10,853	9,950	10,203	9,720	10,580	9,053	10,060	0,642
ABS 3DFil	F_y [N]	81,96	81,27	x	80,03	80,88	80,70	80,97	0,71
	σ_y [MPa]	49,82	49,40	x	48,64	49,16	49,05	49,21	0,433
	f [mm]	7,741	8,503	x	8,567	8,620	8,257	8,337	0,361
ABS Rychlý 3D tisk	F_y [N]	86,63	86,07	86,40	85,48	85,69	86,33	86,10	0,44
	σ_y [MPa]	52,65	52,31	52,51	51,96	52,08	52,47	52,33	0,27
	f [mm]	8,920	9,170	9,020	9,187	8,940	9,853	9,182	0,348

Graf 29 a Graf 30 – Mez pevnosti jednotlivých zkušebních těles (vlevo) a znázornění statistické pravděpodobnosti rozmezí meze pevnosti 95 % těles dle teorie 6 sigma (vpravo): Ohybová zkouška ABS



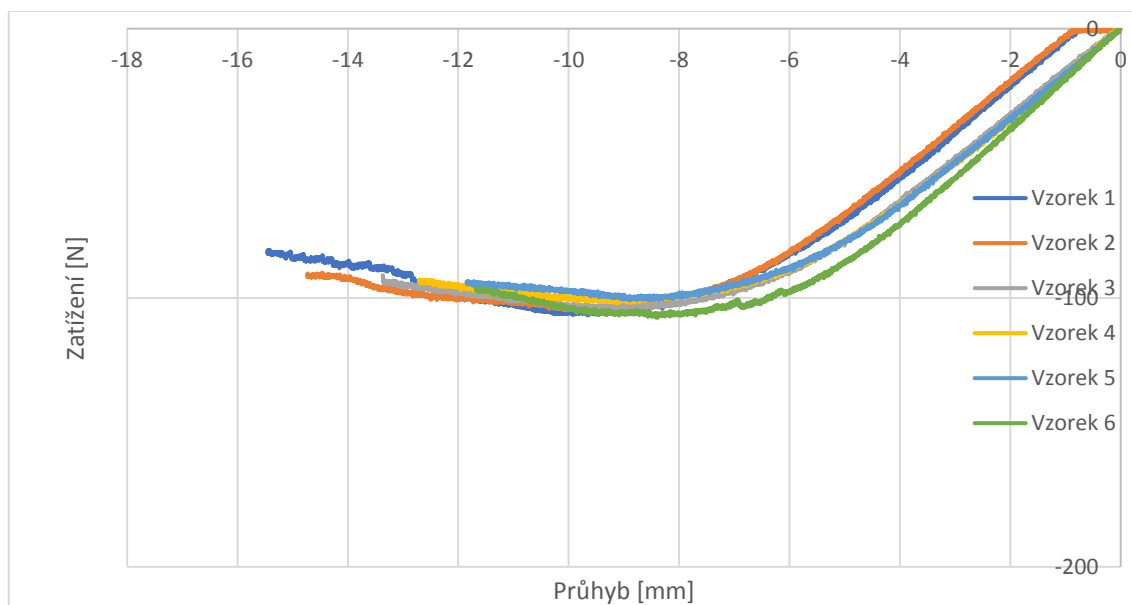
PC-ABS Tecnotrade

Graf 31 – Průběh ohybové zkoušky materiálu PC-ABS Tecnotrade



PC-ABS Rychlý 3D tisk

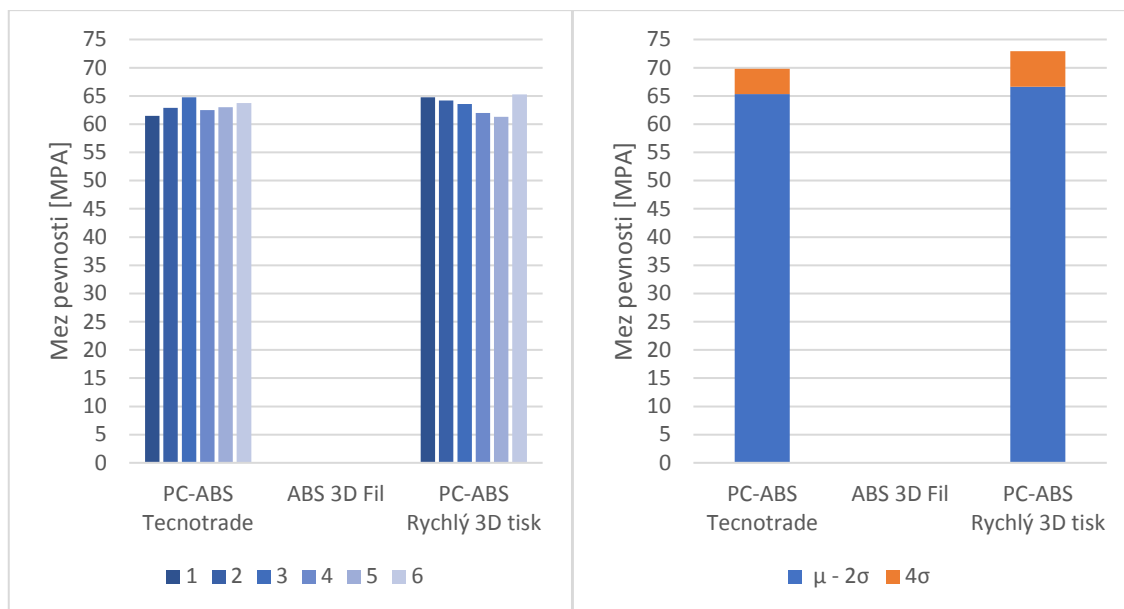
Graf 32 – Průběh ohybové zkoušky materiálu PC-ABS Rychlý 3D tisk



Tabulka 14 – Numerické výsledky ohybové zkoušky pro materiály PC-ABS

		1	2	3	4	5	6	Průměr	s
PC-ABS Tecnotrade	F_y [N]	101,15	103,47	106,57	102,84	103,69	104,90	103,77	1,84
	σ_y [MPa]	61,48	62,89	64,77	62,51	63,02	63,76	63,07	1,119
	f [mm]	8,920	9,170	9,020	9,187	8,940	9,853	9,182	0,348
PC-ABS Rychlý 3D tisk	F_y [N]	106,57	105,59	104,56	101,95	100,88	107,40	104,49	2,59
	σ_y [MPa]	64,77	64,18	63,55	61,97	61,32	65,28	63,51	1,573
	f [mm]	8,920	9,170	9,020	9,187	8,940	9,853	9,182	0,348

Graf 33 a Graf 34 – Mez pevnosti jednotlivých zkušebních těles (vlevo) a znázornění statistické pravděpodobnosti rozmezí meze pevnosti 95 % těles dle teorie 6 sigma (vpravo): Ohybová zkouška PC-ABS



5.5.3. Vyhodnocení

Materiál **ABS-M30 Tecnotrade** z testovaných ABS materiálů dosahuje nejlepších hodnot v ohybu - **54,10 MPa** s velmi spolehlivou směrodatnou odchylkou **0,32 MPa**. Přesto je stále hodnota menší než tabulkových **61 MPa**.

ABS 3DFil dosahuje v ohybu nejhorších vlastností ze všech testovaných materiálů - **49,21 MPa** se směrodatnou odchylkou **0,43 MPa**.

ABS Rychlý 3D Tisk dosahuje podobných hodnot jako ABS-M30, **52,33 MPa** a směrodatná odchylka **0,27 MPa**.

PC-ABS Tecnotrade dosahuje vyšších hodnot než materiály ABS, **63,07 MPa** se směrodatnou odchylkou **1,12 MPa**, což je přesto značně méně, než tabulková **68 MPa**.

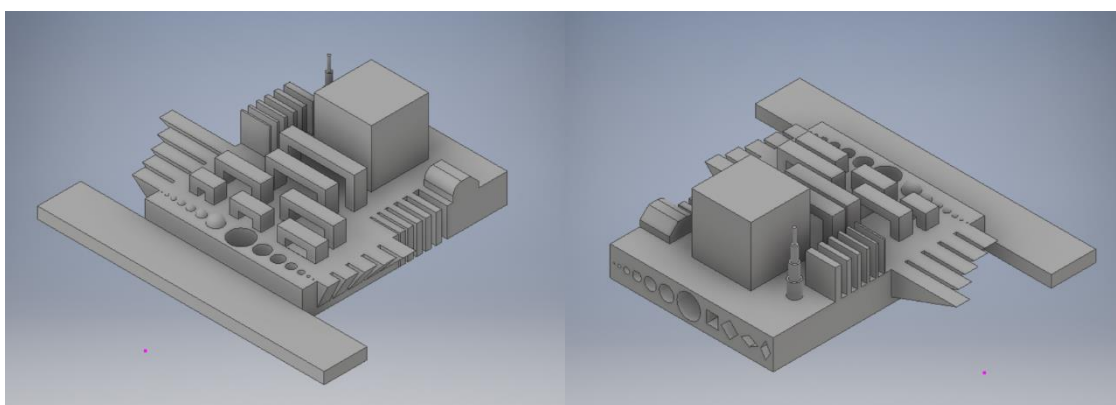
PC-ABS Rychlý 3D tisk dosahuje velmi podobných hodnot jako materiál od Tecnotrade, mírně vyšších **63,51 MPa**, ovšem s větší směrodatnou odchylkou - **1,57MPa**.

6. Kombinovaná zkouška rozměrových přesností materiálů

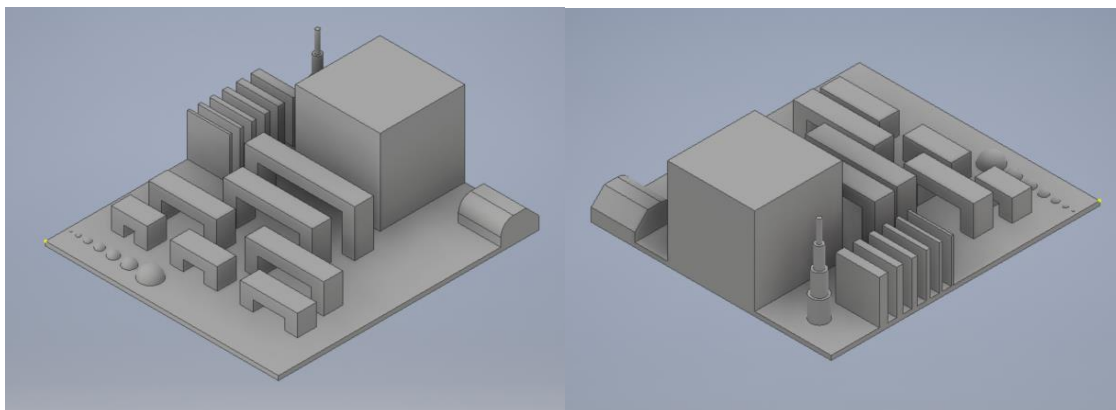
V této části se práce zaměřuje na schopnosti přesného tisku materiálu, jeho schopnosti tisku bez podpor a klíčové problémy rozebrané v kapitole 3. Problematiky v FDM tisku. Pro tyto účely bylo navrženo komplexní zkušební těleso, které jednotlivé vlastnosti materiálu prověří. Detailní informace ke každému segmentu na tělesu s odůvodněním geometrie daných segmentů jsou v kapitole 6.1. Vyhodnocení jednotlivých zkoušek.

Ve Stratasys Insight byl úmyslně nastaven tisk bez podpor kromě nastavení Base (viz kapitola 5.1.). Jsou tedy sledovány vlastnosti pouze samotného stavebního materiálu. Ostatní nastavení tisku byla použita stejná, jako v kapitole 5.1.

Z důvodů uvedených v kapitole 7.3. byla tištěna tělesa z PC-ABS od Rychlý 3D tisk dvě, první tištěné klasicky bylo přerušeno v 7,6 mm výšky, druhé, upravené, obsahovalo zkoušené segmenty, které se nevytiskly na prvním tělese (viz Obr. 10).



Obr. 9 – Komplexní zkušební těleso pro kombinovanou zkoušku rozměrových přesností materiálů – model Autodesk Inventor



Obr. 10 – Modifikované zkušební těleso pro PC-ABS od Rychlý 3D tisk – model Autodesk Inventor

Všechna tělesa byla z důvodu eliminace vlivu chyby konstrukce tiskárny tištěna na stejném místě – pravém dolním rohu zmenšeného pracovního prostoru (viz obrazová příloha kapitola 13.1.5 Umístění v Control Center).

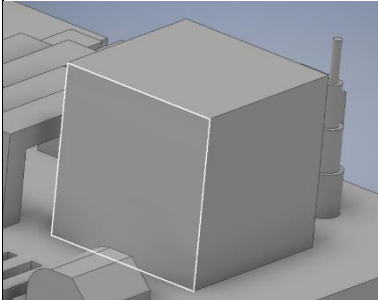
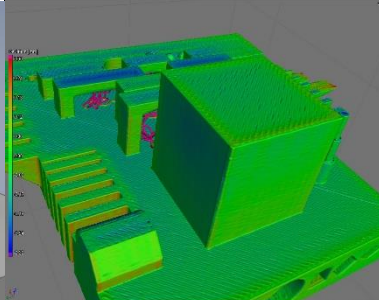
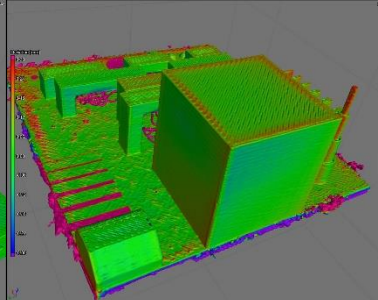
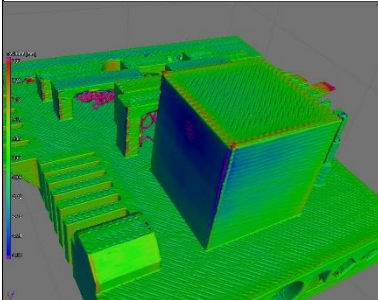
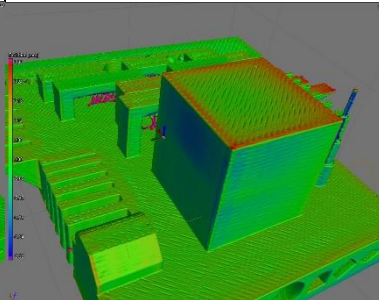
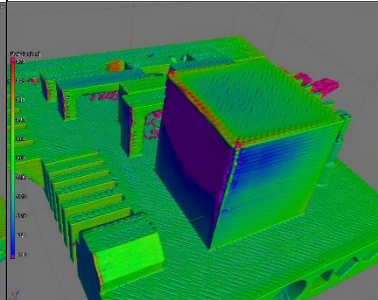
6.1. Vyhodnocení jednotlivých zkoušek

Tělesa byla zkoumána v tomografu, kde byla porovnána s původním modelem tělesa a vzájemně mezi sebou. Zaměření bylo na deformace, rozměrové přesnosti a vnitřní dutiny.

Tělesa byla skenována na tomografu Zeiss Metrotom 1500 (225 kV, 500 W).

K vyhodnocení byl použit software VGSTUDIO MAX.

Větší a další obrázky jsou pro možnou lepší vizuální analýzu umístěny v obrazové příloze v kapitole 13.2., kde je k nim vysvětlena i barevná legenda.

Jméno zkoušky:	Jednotité těleso	
Popis zkoušky:	Je zkoumána rozměrová přesnost a zkroucení při tisku jednoduchého jednotitého tělesa – krychle o délce strany 20 mm	
Počítačový model	PC-ABS Tecnotrade	PC-ABS Rychlý 3D tisk
		
ABS 3D Fil	ABS-M30 Tecnotrade	ABS Rychlý 3D tisk
		

Pomocí metody nejmenších čtverců byly definovány roviny krychle a změřeny jejich vzdálenosti, ty jsou zobrazeny v Tabulka 15.

Tabulka 15 – Rozměry jednotitého tělesa a potřebný koeficient zvětšení

	Rozměry [mm]			Koeficient zvětšení [-]		
	Osa X	Osa Y	Osa Z	Osa X	Osa Y	Osa Z
ABS-M30 Tecnotrade	19,82	19,81	20,08	1,0091	1,0096	0,9960
ABS 3DFil	19,73	19,74	20,05	1,0137	1,0132	0,9975
ABS Rychlý 3D tisk	19,60	19,60	20,02	1,0204	1,0204	0,9990
PC-ABS Tecnotrade	19,86	19,87	20,05	1,0070	1,0065	0,9975
PC-ABS Rychlý 3D tisk	19,85	19,86	20,02	1,0076	1,0070	0,9990

Z tabulky je vidět, že hodnoty v osách X a Y se liší maximálně o 0,01 mm, a jsou vždy menší, než modelová hodnota 20 mm. Hodnota v ose Z je vždy vyšší oproti modelové hodnotě.

V softwaru Stratasys Insight lze změnit parametry zvětšení tisku oproti počítačovému modelu v jednotlivých osách změnou tzv. koeficientu zvětšení.

$$K_z = \frac{a_m}{a_s} \quad (7)$$

kde

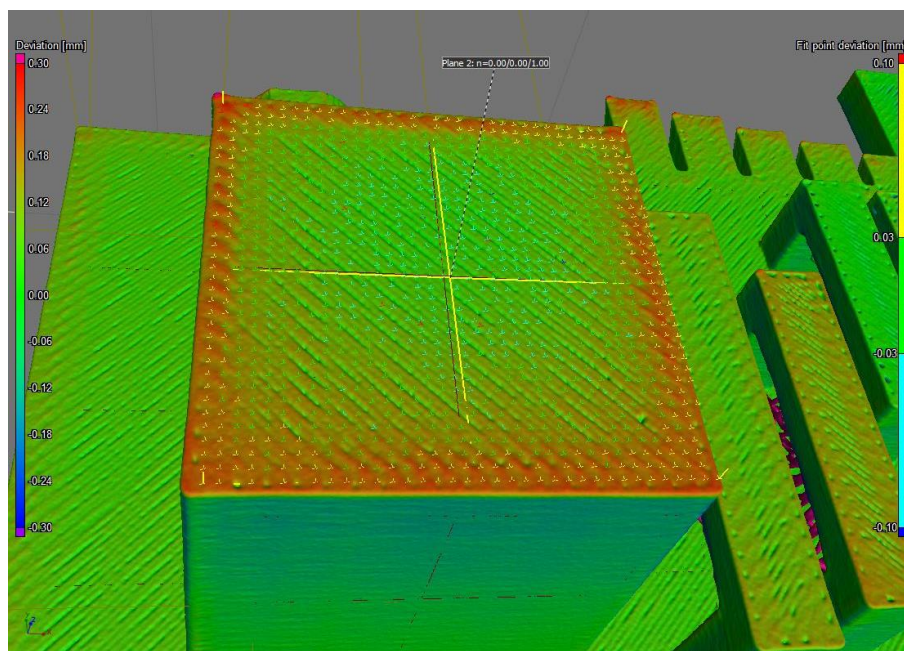
K_z je koeficient zvětšení

a_m je délka strany modelu

a_s je skutečná délka strany

Koeficient zvětšení udává hodnotu, kterou je třeba do softwaru zadat, aby byl vytištěn správný rozměr - 20 mm. Je daný různou smrštivostí pro různé materiály.

Dalším poznatkem této zkoušky je nerovnoměrná deformace vrchní plochy tělesa:

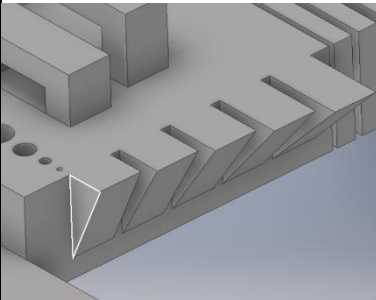
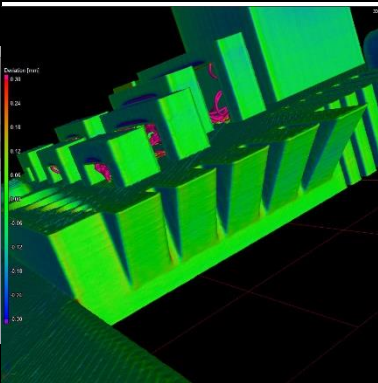
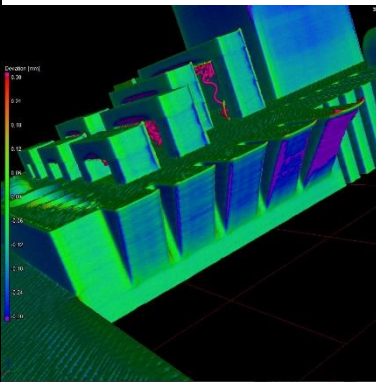
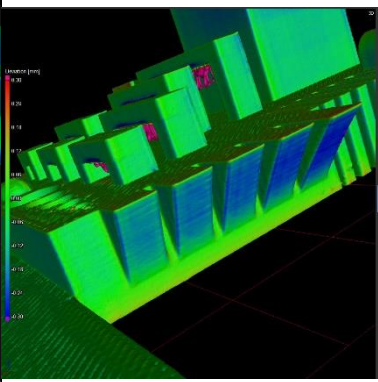
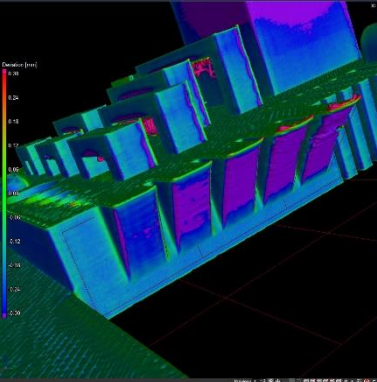
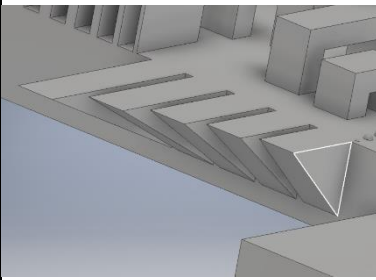
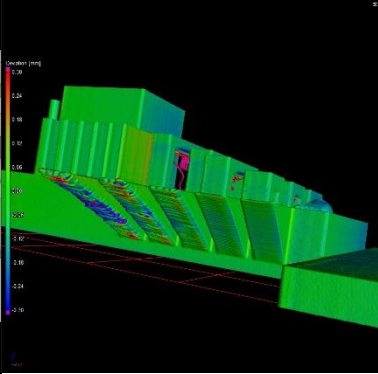


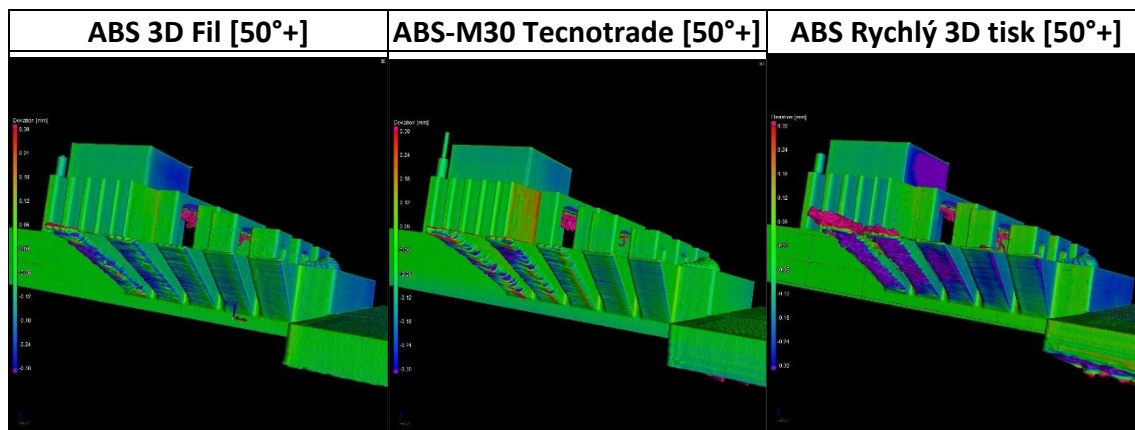
*Obr. 11 – Detail na propadlý střed
 jednodílného tělesa – rozdíl mezi výškami
 středu a okraje je až 0,2 mm
 (příklad – ABS-M30 Tecnotrade)*

Všechna tělesa jsou nejvyšší na okrajích a směrem ke středu se propadají, přičemž rozdíly mohou být u některých materiálů až 0,2 mm (viz legenda barevných bodů umístěná vpravo na Obr. 11 a dále v obrazové příloze 13.3.2).

Jev je s nejvyšší pravděpodobností způsobený strategií stavby tělesa – nejdříve dojde k obtáhnutí čtvercového obrysu a poté spojitému vyplnění pod úhlem 45° (viz kapitola 5.1) a následnému tuhnutí celku.

Jako jedno z možných řešení problematiky by mohla být změna strategie plnění, snížení procenta překrytí nanášených vrstev nebo snížení procenta výplně tělesa plastem. To je vhodným tématem pro další bádání.

Jméno zkoušky:		Samonosné úhly	
Popis zkoušky:			
Stratasys doporučuje tisk samonosných úhlů bez podpor do 43° [21]. Obecně se pro tisk FDM uvádí bezpečné tisknout bez podpor do úhlu 45° [2]. V tomto testu samonosné úhly 25°, 30°, 35°, 40° a 45° z pravé strany tělesa 50°, 55°, 60°, 65° a 70° z levé strany			
Počítačový model [25°+]	PC-ABS Tecnotrade [25°+]	PC-ABS Rychlý 3D tisk [25°+]	
		Zkouška neprovedena z důvodu použití omezeného tělesa	
ABS 3D Fil [25°+]	ABS-M30 Tecnotrade [25°+]	ABS Rychlý 3D tisk [25°+]	
			
Počítačový model [50°+]	PC-ABS Tecnotrade [50°+]	PC-ABS Rychlý 3D tisk [50°+]	
		Zkouška neprovedena z důvodu použití omezeného tělesa	

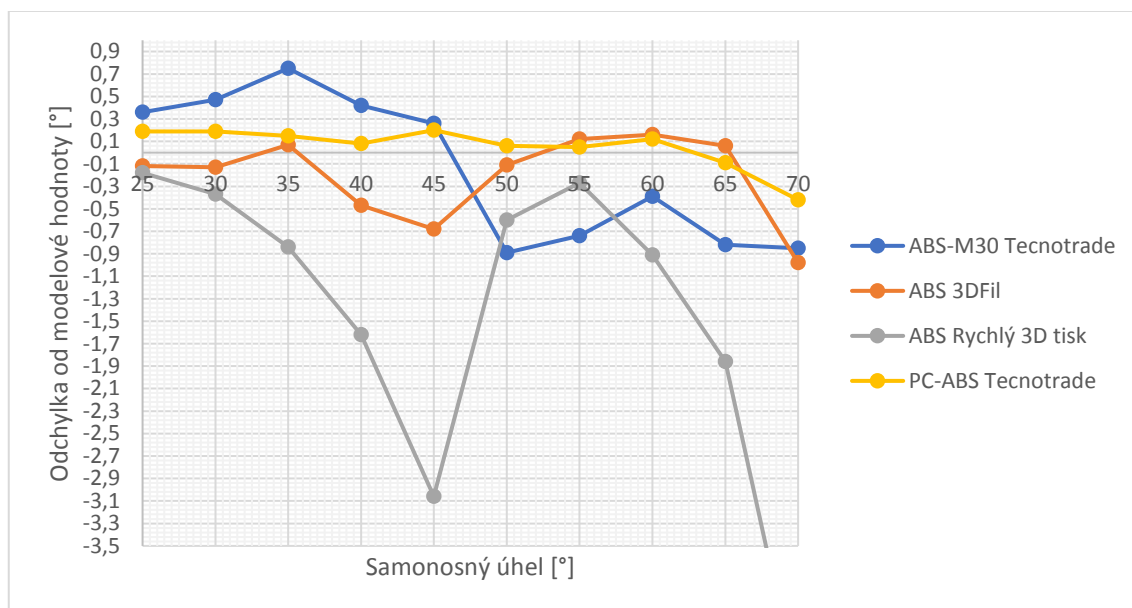


Pomocí metody nejmenších čtverců byly vytvořeny aproximované plochy na jednotlivých zkosených plochách tělesa a byl pozorován úhel, který svírají s obdobně aproximovanou plochou horní základny tělesa (viz Obr. 12 a obrazová příloha 13.3.3). Tyto hodnoty a jejich odchylka od zkosení původního modelu jsou zobrazeny v Tabulka 16 a Graf 35.

Tabulka 16 – Zkosení rovin a odchylky od zkosení modelu

Hodnoty [°]	25	30	35	40	45
ABS-M30 Tecnotrade	25,36	30,47	35,75	40,42	45,26
ABS 3DFil	24,88	29,87	35,07	39,53	44,32
ABS Rychlý 3D tisk	24,82	29,63	34,16	38,38	41,94
PC-ABS Tecnotrade	25,19	30,19	35,15	40,08	45,2
Odchylky [°]	25	30	35	40	45
ABS-M30 Tecnotrade	0,36	0,47	0,75	0,42	0,26
ABS 3DFil	-0,12	-0,13	0,07	-0,47	-0,68
ABS Rychlý 3D tisk	-0,18	-0,37	-0,84	-1,62	-3,06
PC-ABS Tecnotrade	0,19	0,19	0,15	0,08	0,2
Hodnoty [°]	50	55	60	65	70
ABS-M30 Tecnotrade	49,11	54,26	59,61	64,18	69,15
ABS 3DFil	49,89	55,12	60,16	65,06	69,02
ABS Rychlý 3D tisk	49,4	54,73	59,09	63,14	65,2
PC-ABS Tecnotrade	50,06	55,05	60,12	64,91	69,58
Odchylky [°]	50	55	60	65	70
ABS-M30 Tecnotrade	-0,89	-0,74	-0,39	-0,82	-0,85
ABS 3DFil	-0,11	0,12	0,16	0,06	-0,98
ABS Rychlý 3D tisk	-0,6	-0,27	-0,91	-1,86	-4,8
PC-ABS Tecnotrade	0,06	0,05	0,12	-0,09	-0,42

Graf 35 – Odchylka samonosných úhlů od modelové hodnoty



U všech materiálů je z grafu vidět znatelný zlom v přechodu mezi 45° a 50°. Toto místo značí přechod mezi pravou a levou stranou tisku a ukazuje na měnící se kvalitu tisku s jejím pohybem v záporném směru osy Y.

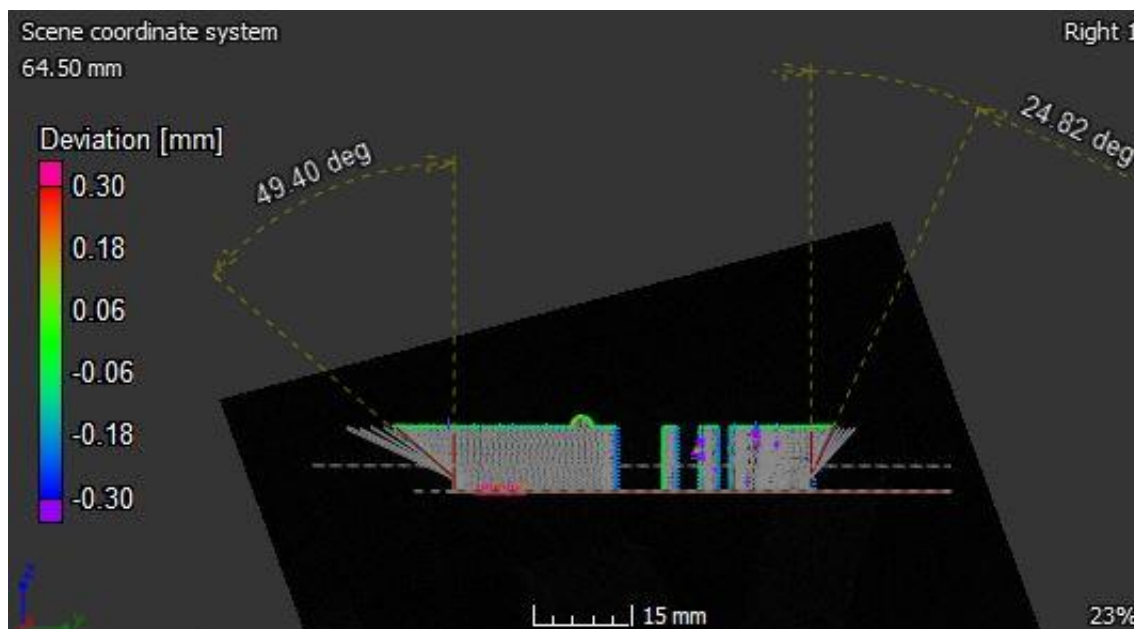
Zhoršující se přesnost se zvyšujícím se úhlem k podložce je očekávaný jev. Nejvyšší rozměrovou stabilitu si udržuje PC-ABS Tecnotrade. Ten do hodnoty 65° nikde nepřesahuje odchylku 0,2°.

Následuje ABS 3DFil. Ten je schopen udržet přesnost do 0,16° i v hodnotách sklonu do 65°, avšak je více ovlivněn výše zmíněným jevem zhoršení kvality tisku v pohybu po ose Y.

ABS-M30 Tecnotrade má stabilní odchylku do 0,89° od modelové hodnoty v celém průběhu. Znatelný je opět přechod mezi 45° a 50°, kde hodnoty přechází z plusových do minusových.

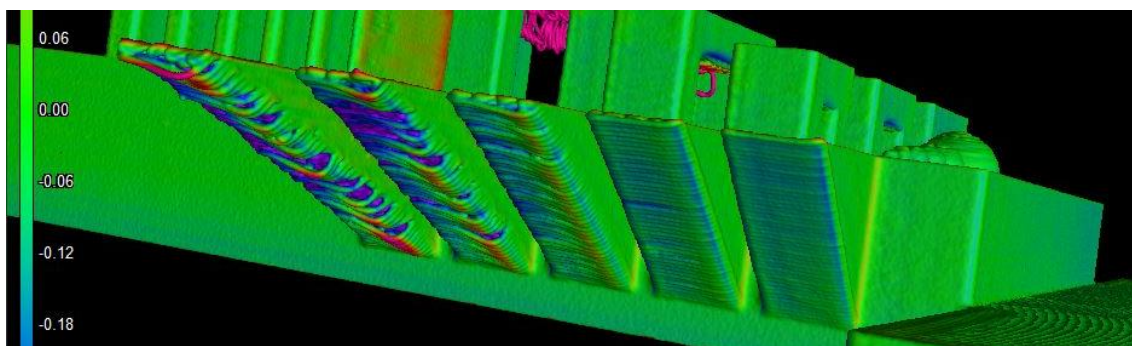
ABS Rychlý tisk je tolik ovlivněn vlivem umístění v ose Y, že poměrování dle sklonu úhlu je naprosto neprůkazné. Na hodnotě 50°, která je nejbližší nulovému bodu osy Y je odchylka 0,6° a na 55° je odchylka 0,27°, což předčí i hodnoty ABS-M30 Tecnotrade.

Obecně kvalita sklonu bez podpor tedy závisí ještě na tomto jevu, jehož vyhodnocení a zjištění příčiny je vhodným předmětem pro další zkoumání.

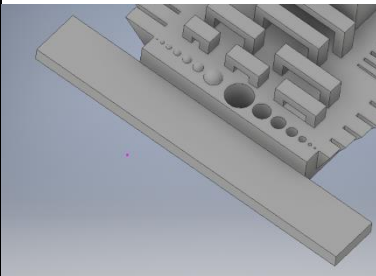
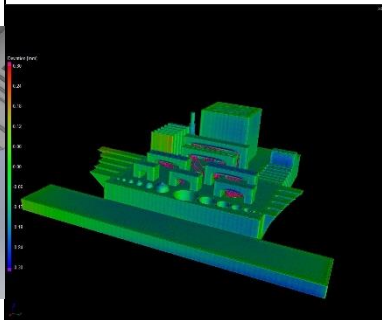
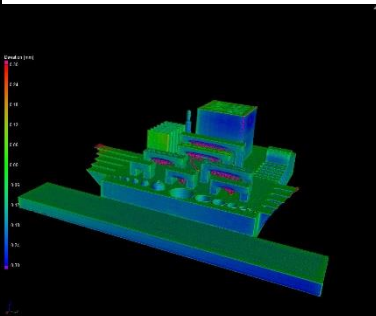
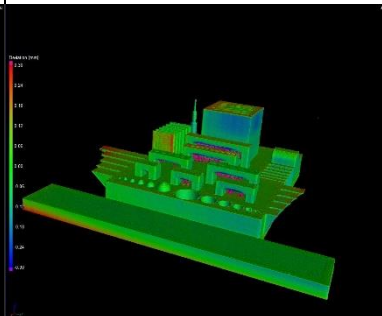
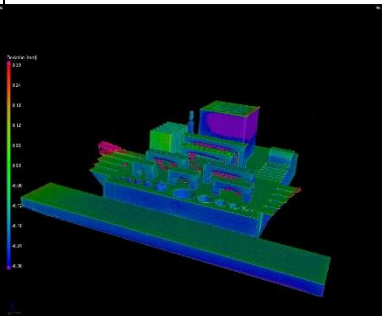


*Obr. 12 – Řez rovinou YZ v polovině
 samonosných úhlů 25° a 50°
 (příklad - ABS Rychlý 3D tisk)*

Na Obr. 13 a v obrazové příloze 13.3.3 je dále vidět u vyšších sklonů objevující se zvyšující se drsnost a vizuálně snižující se kvalitu povrchu. Zdali je hodnota dostatečná, závisí na individuálním použití součásti, avšak k velkému zlomu dochází nejčastěji mezi 60° a 65°.



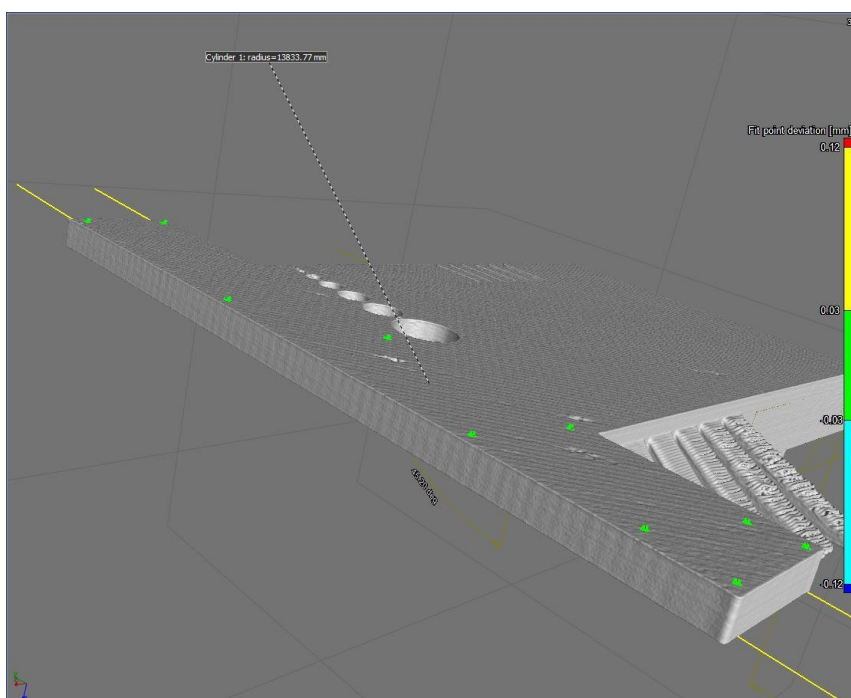
*Obr. 13 – Detail na progresivně se
 zhoršující kvalitu povrchu u
 samosvorných úhlů
 (příklad - ABS-M30 Tecnotrade)*

Jméno zkoušky:		Zkroucení desky
Popis zkoušky:		
Je zkoumáno, jak se zkroucí úzká základová deska a jestli nedochází ke zvedání okrajových hran. Deska má rozměry 100x15x4 mm		
Počítačový model	PC-ABS Tecnotrade	PC-ABS Rychlý 3D tisk
		Zkouška neprovedena z důvodu použití omezeného tělesa
ABS 3D Fil	ABS-M30 Tecnotrade	ABS Rychlý 3D tisk
		

K vyhodnocení zakřivení byla pomocí metody nejmenších čtverců na zkroucenou rovinu vytvořena válcová plocha – její poloměr je uvažován jako parametr zkoumaného zvedání okrajových hran. Jelikož materiál ABS-M30 Tecnotrade je ověřený v úspěšném tisku velkých těles v tiskárně, s hodnotou jeho zkroucení jsou všechny ostatní materiály poměřovány.

Tabulka 17 – Rádus válcové plochy zkroucené roviny a porovnání s hodnotou ABS-M30 Tecnotrade

	Rádus [mm]	Poměrné zkroucení k ABS Tecnotrade [-]
ABS-M30 Tecnotrade	7844	1,00
ABS 3DFil	37631	0,21
ABS Rychlý 3D tisk	1487	5,28
PC-ABS Tecnotrade	13834	0,57

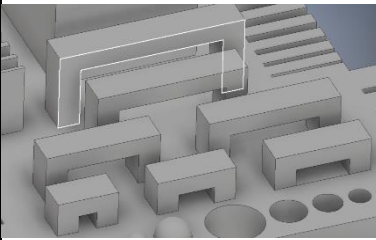
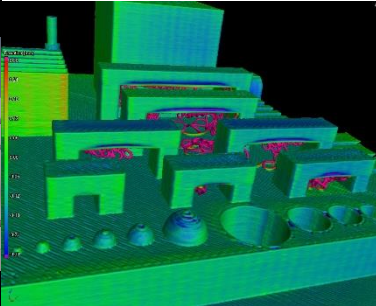
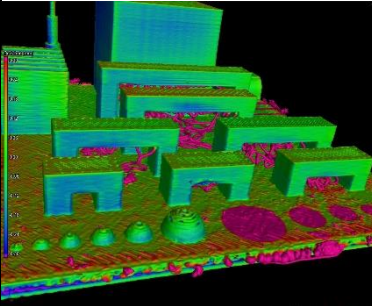
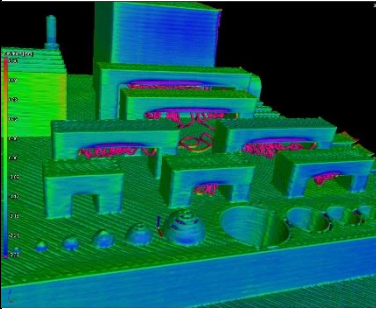
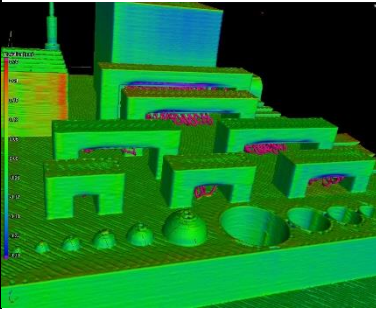
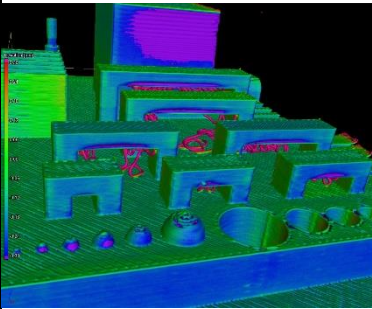


Obr. 14 – Detail na metodu výpočtu válcové plochy ze zkroucené roviny (příklad – PC-ABS Tecnotrade)

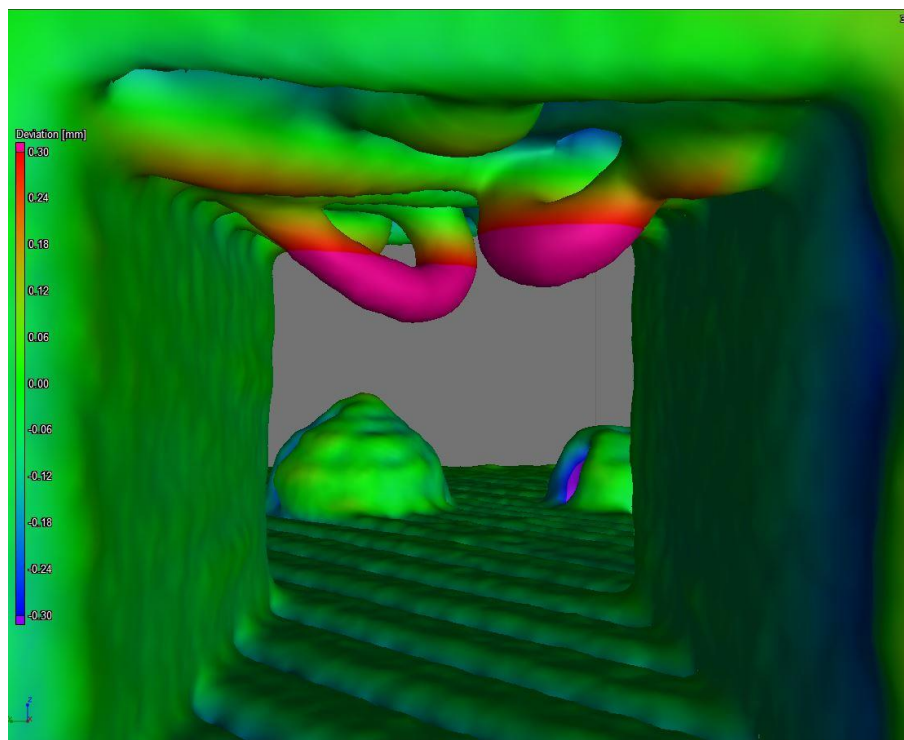
ABS Rychlý 3D tisk vykazuje značné prohnutí a je tu pravděpodobnost, že při tisku větších dílů dojde k odtržení od podložky. Oproti autorizovanému materiálu je 5,28x více zkroucený. Jeho schopnost tisknout větší tělesa je proto dále zkoušena a je shrnuta v závěru.

Naopak ABS 3DFil vykazuje výrazně lepší výsledky oproti autorizovanému materiálu. Je zkroucený pouze z 21 % hodnoty zkroucení ABS-M30 Tecnotrade.

Autorizovaný PC-ABS vykazuje 1,8x lepší vlastnosti oproti autorizovanému ABS-M30.

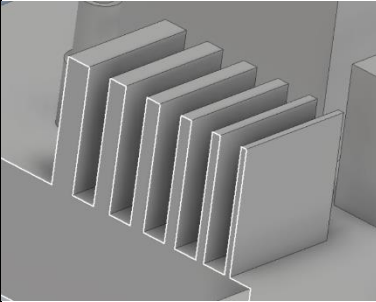
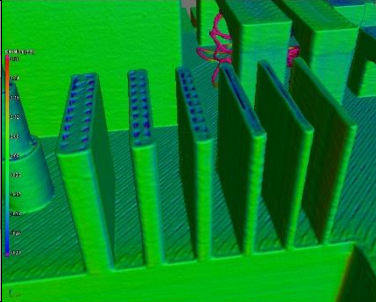
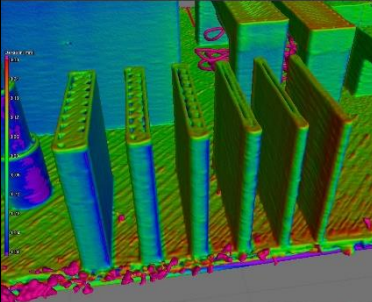
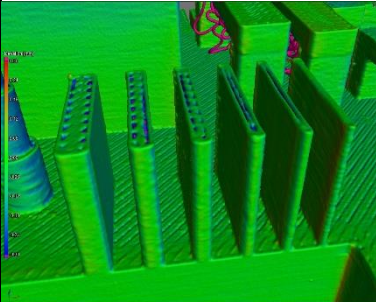
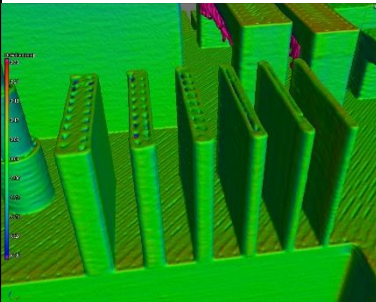
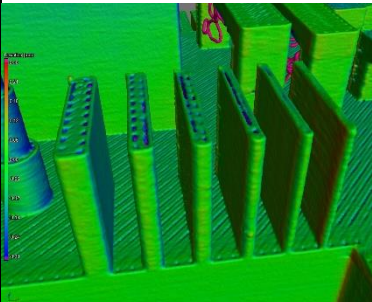
Jméno zkoušky:	Přemostování	
Popis zkoušky:	Zkoumám vzdálenost, jakou dokáže materiál dobře přemostit bez použití podpor. Samonosný úhel je 90° , délky mostů jsou 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15 a 20 mm	
Počítačový model	PC-ABS Tecnotrade	PC-ABS Rychlý 3D tisk
		
ABS 3D Fil	ABS-M30 Tecnotrade	ABS Rychlý 3D tisk
		

Navzdory informacím z literatury [2] uvedeným v kapitole 3.4 se ukázal tisk libovolných **užitných** převislých ploch bez podpor na této tiskárně jako nevhodný (viz obrázky v úvodu zkoušky, podrobněji v obrazové příloze 13.3.5). Hraněčně použitelný se jeví převis 2,5 mm, pokud se počítá s horším povrchem na spodní straně převisu a případným postprocessingem (viz Obr. 15).



*Obr. 15 – Pohled na plochu převisu u
 přemostění 2,5 mm
 (příklad – ABS 3DFil)*

Na druhou stranu všechny materiály byly schopny po několika vrstvách přemostění vytvořit i u délky mostů 20 mm. Proto je pro všechny materiály vhodné takováto přemostění vytvářet tam, kde plocha pod převisem není užitková, popřípadě je uvnitř modelu (možnost využití například pro tisk tlustostěnného modelu bez výplně).

Jméno zkoušky:	Úzké profily	
Popis zkoušky:	Je zkoumáno, jestli lze z materiálu vytisknout velmi úzký, vysoký profil, popřípadě v jaké kvalitě. Výška a šířka jsou 10x10 mm , tloušťky 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 2 mm	
Počítačový model	PC-ABS Tecnotrade	PC-ABS Rychlý 3D tisk
		
ABS 3D Fil	ABS-M30 Tecnotrade	ABS Rychlý 3D tisk
		

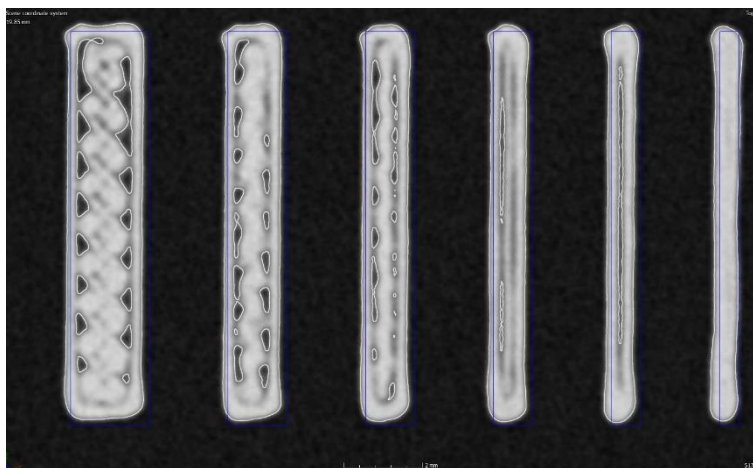
Tato zkouška dává vhled do tvorby pórovitosti v FDM tisku. Při pohledu na řezy materiálu PC-ABS Rychlý 3D tisk, který vytváří více vláknité struktury jinými teplotami tání (jak bylo uvedeno v kapitole 5.4.2) (viz Obr. 16 a Obr. 17), jsou zřetelně vidět dráhy nástroje, který kvůli vysokým požadovaným detailům a nízké zabíhavosti materiálu vytváří viditelné vakance ve výtisku. Tento jev je možné sledovat i u ostatních materiálů, ačkoliv v menší míře (viz obrazová příloha 13.3.6).

Vzhledem ke zvolené metodě plnění – změna směru dráhy nástroje o 90° po každé vrstvě – jsou tvořeny malé vzduchové kapsy. U užších profilů, kde dráha

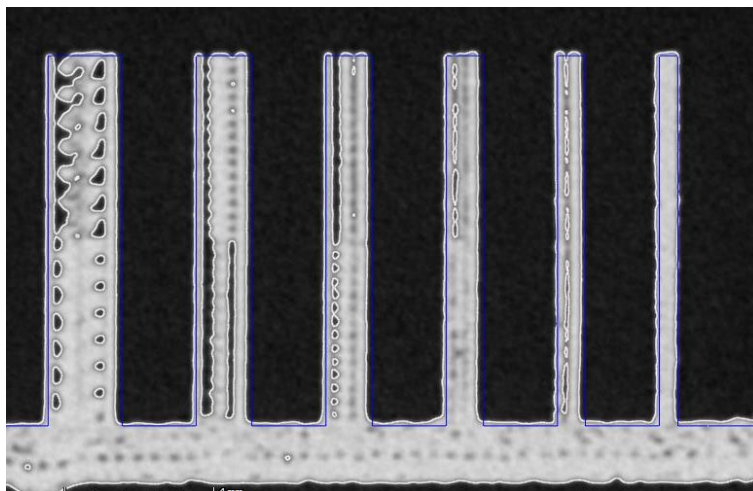
nástroje byla pouze čára rovnoběžná s čarou obrysovou (šířka 1 mm a méně) a nedochází k 90° natočení, vznikají kapsy mnohem větší (viz Obr. 17).

Při analýze řezů v příloze je viditelné, že problémem trpí všechny zkoumané materiály, nejméně ABS-M30 Tecnotrade a ABS Rychlý 3D tisk.

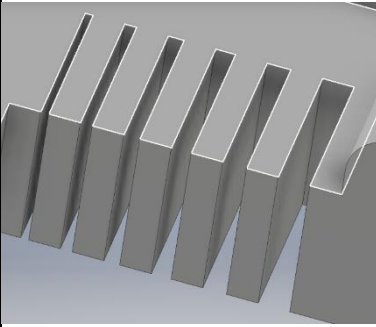
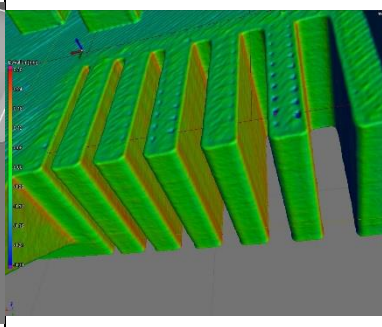
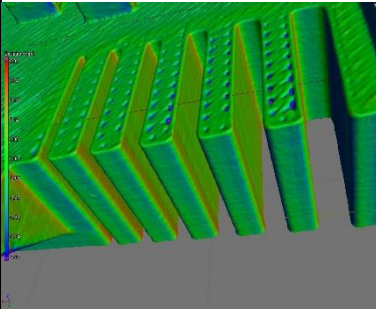
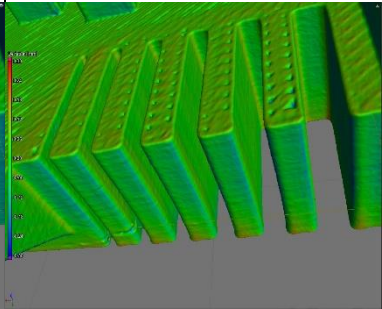
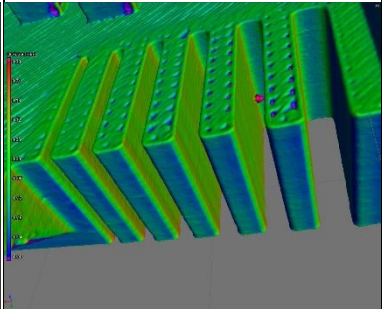
Pro funkční použití nelze doporučit žádnou součástku s tloušťkou stěny menší než 1 mm, větší tloušťky jen s přihlédnutím na výše analyzovaný jev a případnou úpravu trasy trysky ve sliceru.



Obr. 16 – Řez profilů v půdorysu ve výšce 9,85 mm z 10 mm (v předposlední vrstvě) – viditelná dráha pokládané vrstvy. Širší profily plněné pod úhlem 45°, užší jednou rovnou čarou, nejužší úplně bez výplně (příklad – PC-ABS Rychlý 3D tisk)



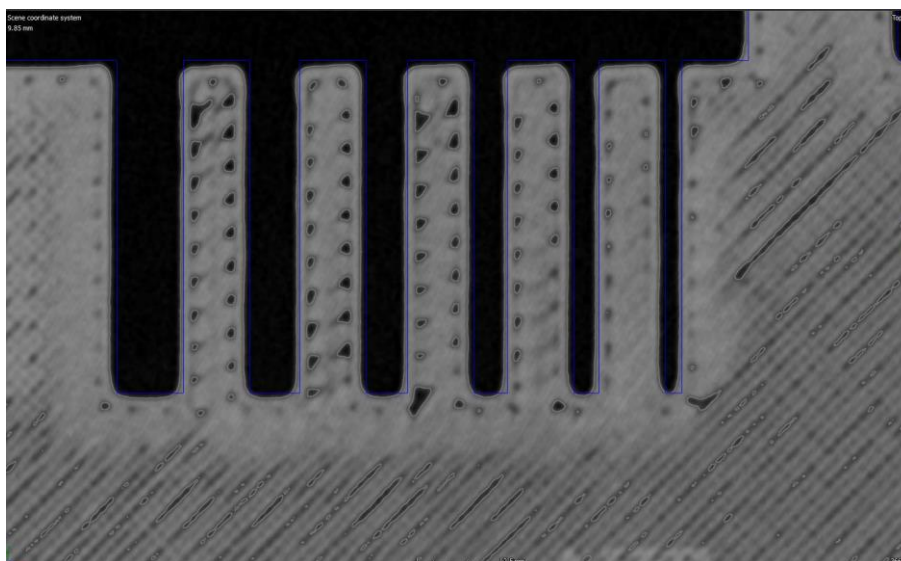
Obr. 17 – Řez profilů v rovině XZ v hloubce 8,75 mm – detail na prostorové chyby výplně, které můžou vznikat v úzkých profilech kvůli špatnému vyplňování rozteklým materiálem (příklad – PC-ABS Rychlý 3D tisk)

Jméno zkoušky:	Úzké drážky	
Popis zkoušky:	Je zkoumáno, jestli lze z materiálu vytisknout velmi úzké, hluboké drážky, popřípadě v jaké kvalitě. Výška a šířka jsou 10x10 mm , tloušťky 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 2 mm	
Počítačový model	PC-ABS Tecnotrade	PC-ABS Rychlý 3D tisk
		Zkouška neprovedena z důvodu použití omezeného tělesa
ABS 3D Fil	ABS-M30 Tecnotrade	ABS Rychlý 3D tisk
		

Drážky samotné vznikají při prvním obtažení tvaru tryskou, jejich přesnost je proto velmi konzistentní napříč materiály. Při pohledu na Obr. 18 a na obrazovou přílohu 13.3.7 je viditelná největší překážka při tvorbě přesných drážek – schopnost kulaté struny materiálu tvořit ostré rohy. V Tabulka 18 je zobrazený rádius v levém rohu drážky o šířce 1 mm od každého materiálu, měřený tvorbou válcové plochy metodou nejmenších čtverců.

Tabulka 18 – Rádus válcové plochy v rozích drážky o šířce 1 mm

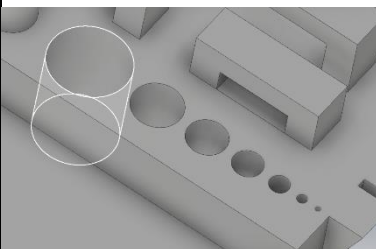
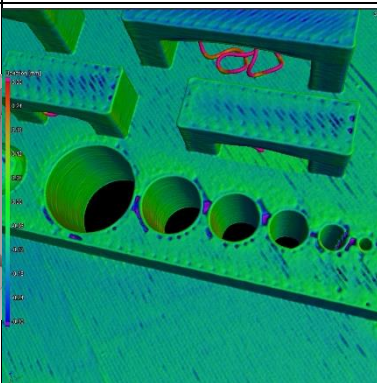
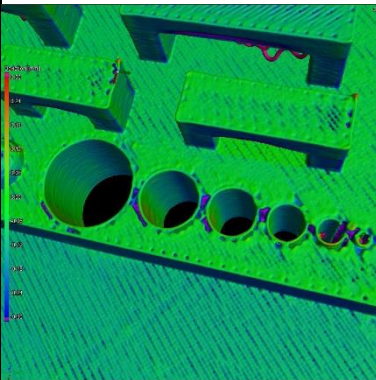
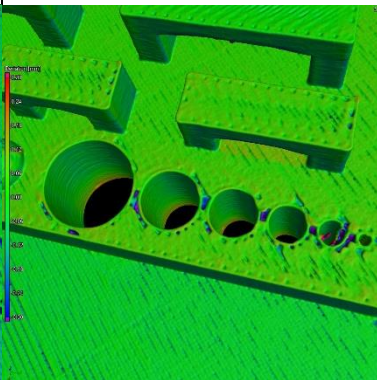
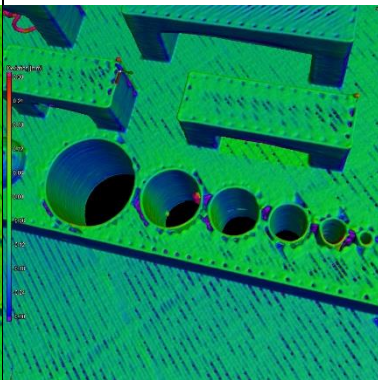
	Poloměr zaoblení [mm]
ABS-M30 Tecnotrade	0,23
ABS 3DFil	0,25
ABS Rychlý 3D tisk	0,22
PC-ABS Tecnotrade	0,21



Obr. 18 – Řez profilů v půdorysu ve výšce 9,85 mm z 10 mm (v předposlední vrstvě) -detail na rádusy vzniklé v rozích úzkých drážek a rovinnost stěn (příklad – ABS Rychlý 3D tisk)

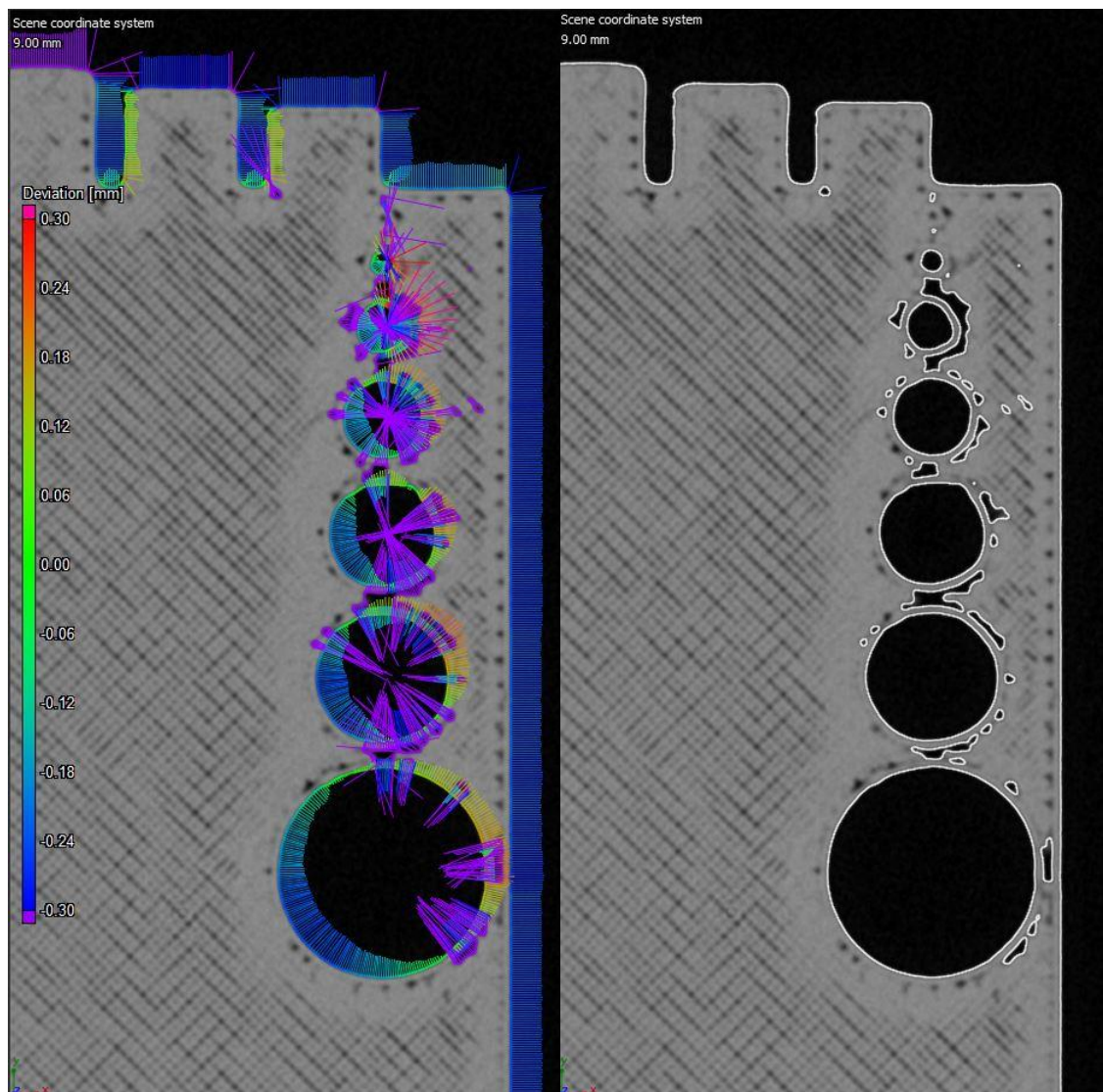
Z tabulky je vidět schopnost všech materiálů tvořit rohy do rádiusu 0,25 mm poloměru. V závislosti na zamýšleném použití je vhodné zvážit případný postprocessing pro tvorbu ostřejších úhlů.

Jiné problémy se při tvorbě drážek nevyskytly.

Jméno zkoušky:	Díry kruhového profilu vertikální	
Popis zkoušky:	Je zkoumána schopnost materiálu vytisknout velmi malé díry, dále jsou porovnávány profily se zkouškou Díry kruhového profilu horizontální (viz níže). Hloubka děr je 10 mm , průměry jsou 0,5; 1; 2; 3; 4; 5 a 8 mm	
Počítačový model	PC-ABS Tecnotrade	PC-ABS Rychlý 3D tisk
		Zkouška neprovedena z důvodu použití omezeného tělesa
ABS 3D Fil	ABS-M30 Tecnotrade	ABS Rychlý 3D tisk
		

V porovnání s následující zkouškou (viz Obr. 19 a Obr. 20 a obrazové přílohy 13.3.8 a 13.3.9) je u této vidět schopnost tvořit výrazně lepší kruhovitost a kvalitu povrchu samotných děr, což odpovídá větší přesnosti tisku v ose tisku jedné vrstvy XY, oproti měnění profilu ve směru osy Z.

Na druhou stranu se vyskytl jiný problém, a to tvorba značných dutin v okolí profilů této zkoušky. Ta je způsobena úzkou stěnou mezi jednotlivými profily (v nejužším místě 1 mm), ale zároveň nerovným tvarem ploch. Zde se nabízí srovnání se zkouškou Úzké profily (viz Obr. 16 a Obr. 17), kde u stejných i menších profilů dochází k menší pórovitosti.

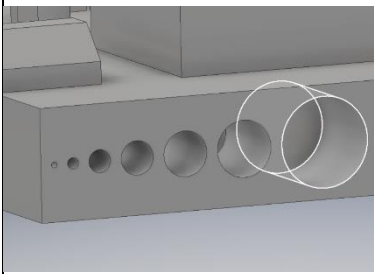
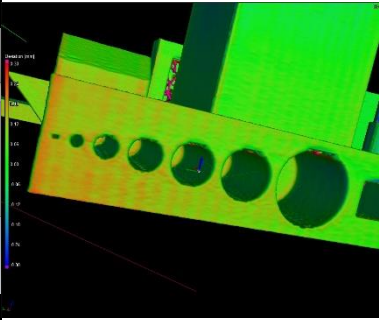
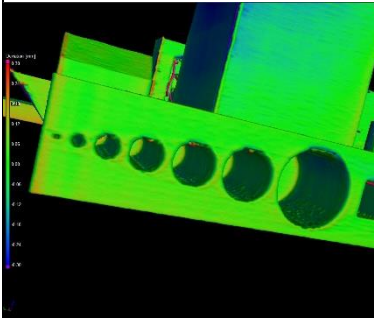
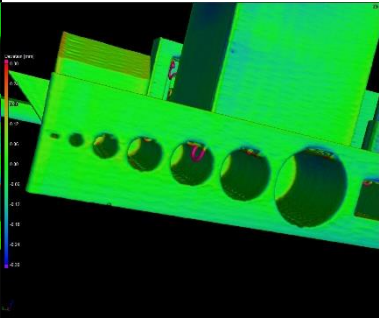
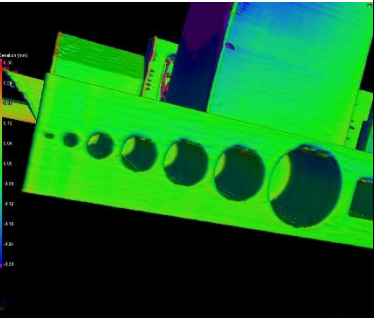


Obr. 19 – Řez profilů v půdorysu ve výšce 9,85 mm z 10 mm – detail na zvýšenou tvorbu pórovitosti v tenkých stěnách v okolí malých profilů (příklad – ABS Rychlý 3D tisk)

Tato výrazná pórovitost je tedy způsobena neschopností sliceru vygenerovat správnou dráhu trysky v okolí takto komplikovaných tvarů.

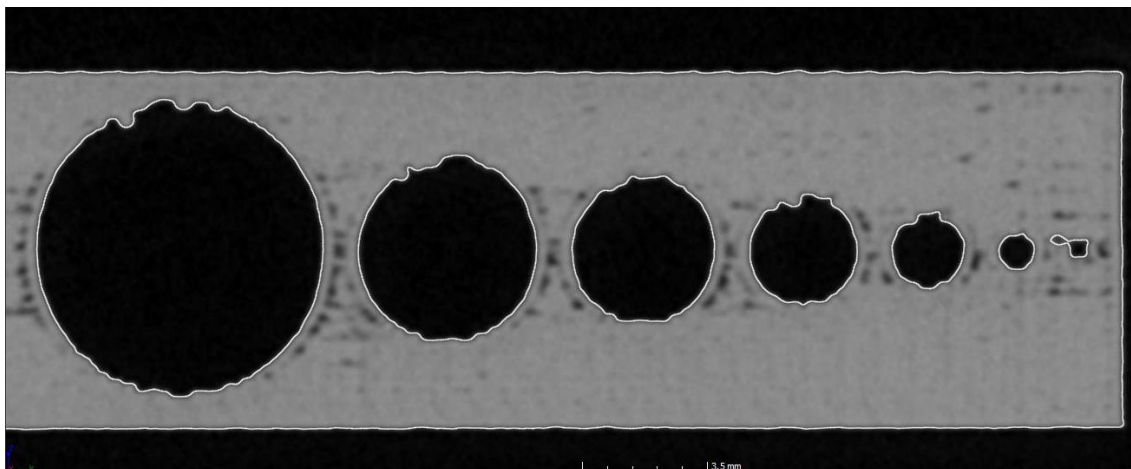
Je proto důležité při plánování takto úzkých, nerovných stěn, zkontrolovat dráhu nástroje, kterou slicer vygeneroval, a případně jí upravit.

Tímto jevem trpí všechny materiály, jelikož je to způsobeno chybou generování drah, nikoliv materiálu.

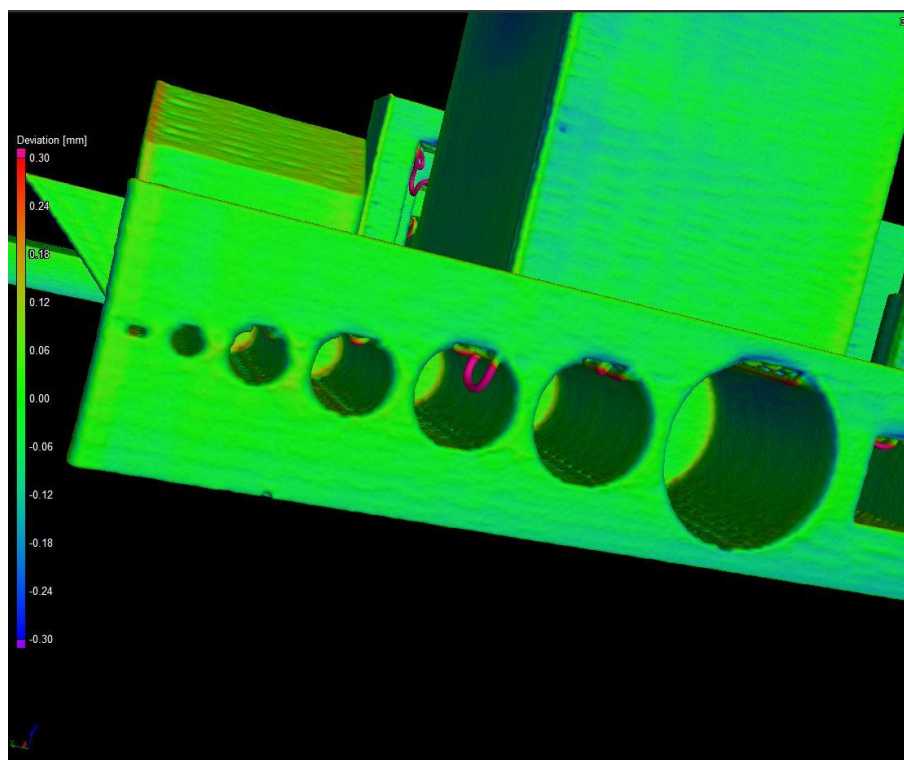
Jméno zkoušky:	Díry kruhového profilu horizontální	
Popis zkoušky:	Je zkoumána schopnost tiskárny tvořit horizontální díry oproti dírám vertikálním ze zkoušky Díry kruhového profilu horizontální (viz výše). Hloubka děr je 10 mm , průměry jsou 0,5; 1; 2; 3; 4; 5 a 8 mm	
Počítačový model	PC-ABS Tecnotrade	PC-ABS Rychlý 3D tisk
		Zkouška neprovedena z důvodu použití omezeného tělesa
ABS 3D Fil	ABS-M30 Tecnotrade	ABS Rychlý 3D tisk
		

V návaznosti na předešlou zkoušku – Kruhové profily horizontální – vykazují tato tělesa mnohem lepší pórovitost v okolí profilů, jelikož tryska vykonává rovné pohyby a software negeneruje složité trasy.

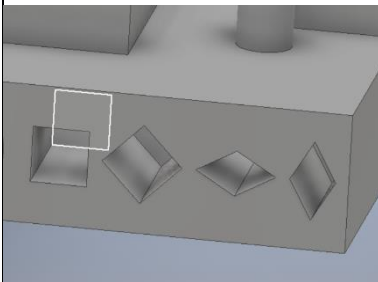
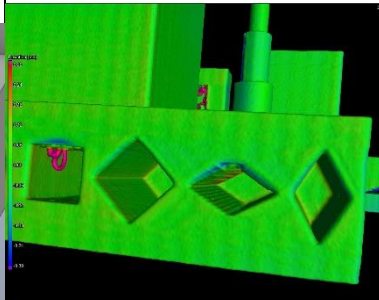
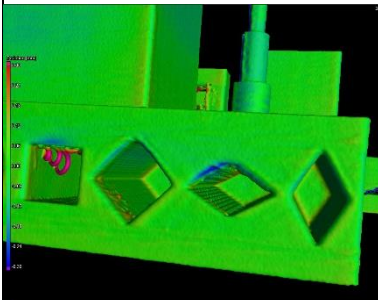
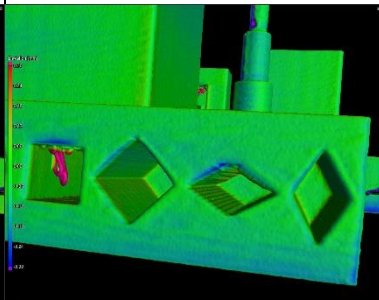
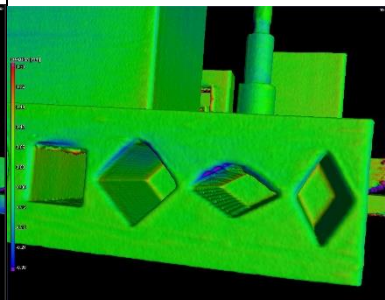
Na druhou stranu je zde viditelný problém s udržení správného tvaru kruhovitosti (viz Obr. 20, Obr. 21 a obrazová příloha 13.3.9). Tato problematika je obdobná s tou u zkoušky Přemostění, a je zde vidět, že u žádného materiálu nelze doporučit tvorbu ani kruhových profilů bez podpor.



Obr. 20 – Řez profilů v rovině YZ
v hloubce 1 mm – detail na nepravidelný
průřez profilů děr
(příklad – ABS Rychlý 3D tisk)

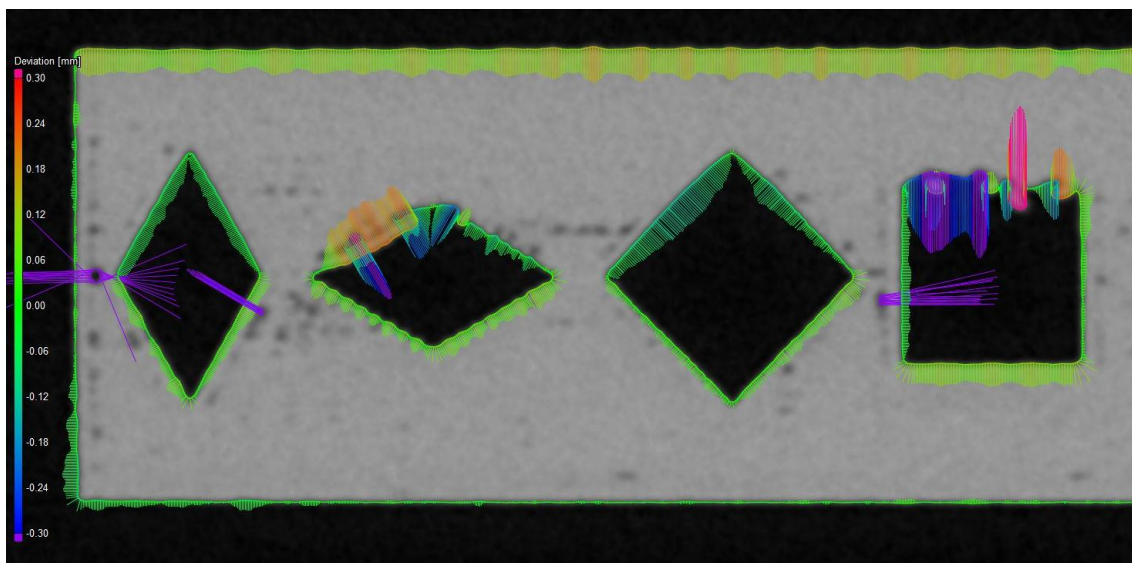


Obr. 21 – Pohled na nerovný povrch
horizontálně tištěných děr
(příklad – ABS-M30 Tecnotrade)

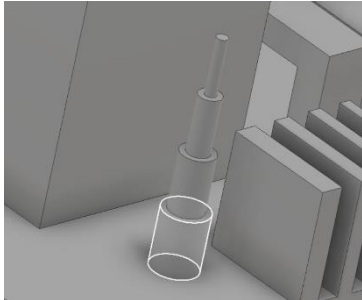
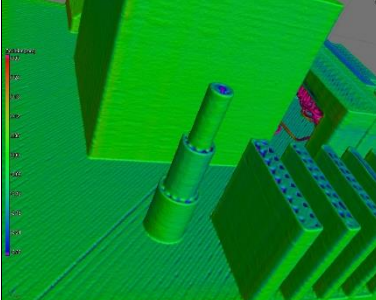
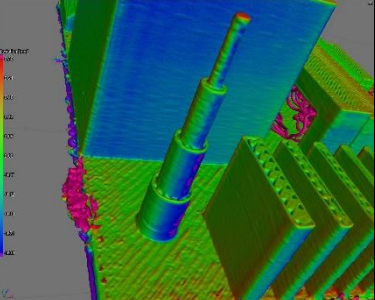
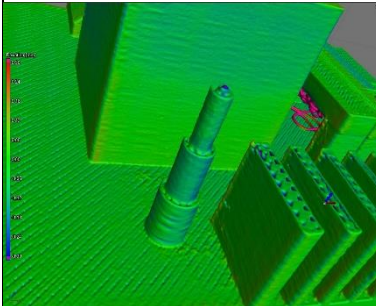
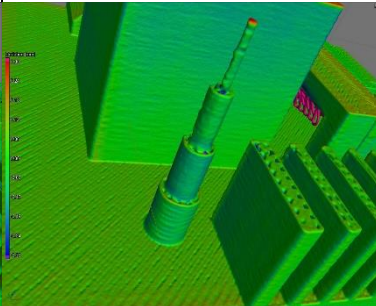
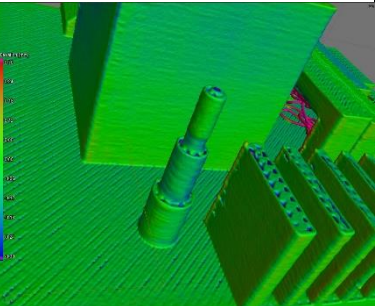
Jméno zkoušky:	Díry nekruhových profilů horizontální	
Popis zkoušky:	Je zkoumána schopnost materiálu tvořit díry různých nekruhových profilů. Všechny díry mají hloubku 10 mm , čtverce mají délku strany 4 mm , kosočtverce svírají ostrý úhel 60° a mají délku strany 3,266 mm	
Počítačový model	PC-ABS Tecnotrade	PC-ABS Rychlý 3D tisk
		Zkouška neprovedena z důvodu použití omezeného tělesa
ABS 3D Fil	ABS-M30 Tecnotrade	ABS Rychlý 3D tisk
		

Při studiu profilů v řezu na Obr. 22 a v obrazové příloze 13.3.10 je obdobně se zkouškou Díry kruhového profilu horizontální a Přemostění zde vidět nevhodnost tisku horizontálních profilů nad 45° bez podpor, avšak jako ze zkoušky Samonosné úhly je zde vidět, že profily svírající úhly do 45° lze stavět i bez podpor. Díky legendě barevných deviací je vidět, že ostrý kosočtverec se drží více modelového tvaru než čtverec, proto je vidět, že i u úhlů do 45° , pokud je žádána vysoká přesnost, je vhodné použití podpor.

Toto chování je vidět srovnatelně u všech použitých materiálů.



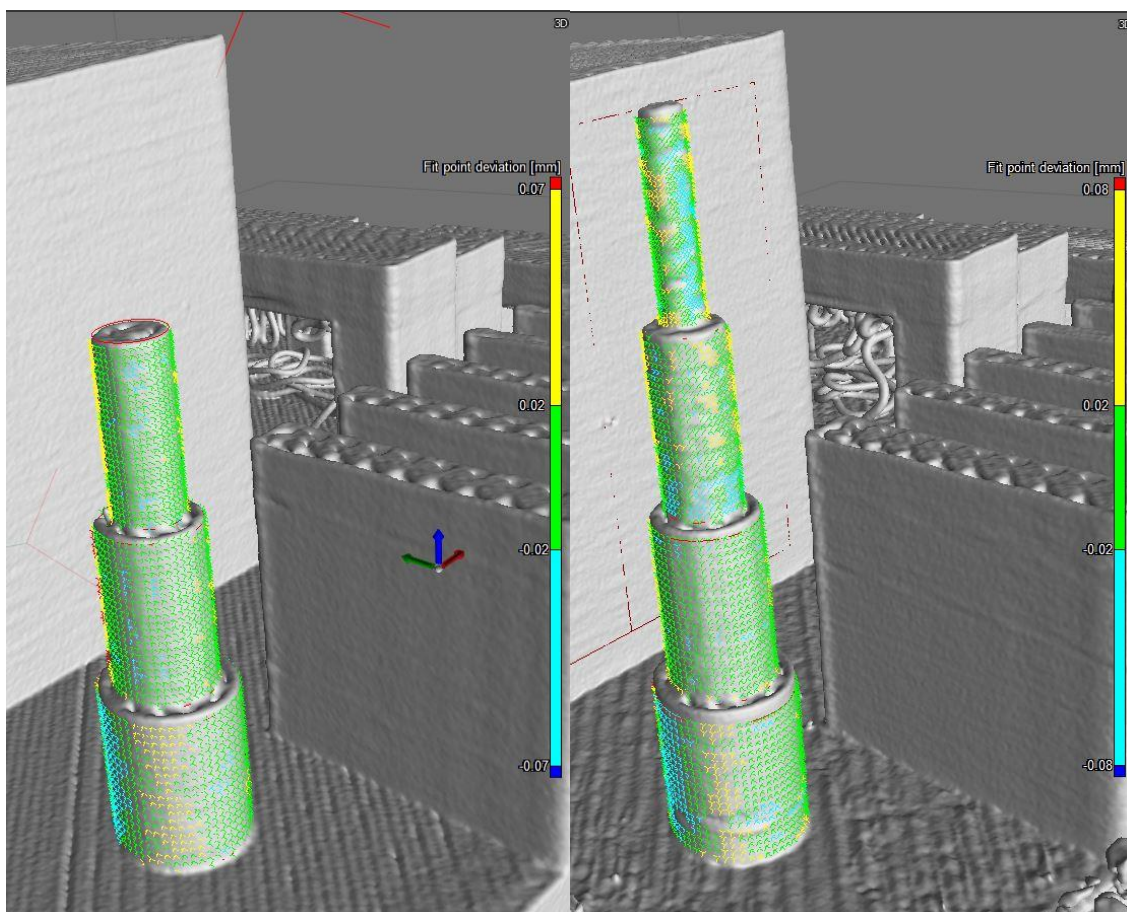
Obr. 22 – Řez profilů v rovině YZ
v hloubce 1 mm – detail na nepravidelný
průřez profilů nekruhových děr
(příklad – ABS-M30 Tecnotrade)

Jméno zkoušky:	Stavba kruhových profilů	
Popis zkoušky:	Je zkoumána schopnost materiálu tvořit úzké kruhové profily, a profily s velmi malým průřezem obecně. Profily jsou stavěny na sebe, každý má výšku 5 mm a průměry odspoda 4, 3, 2 a 1 mm	
Počítačový model	PC-ABS Tecnotrade	PC-ABS Rychlý 3D tisk
		
ABS 3D Fil	ABS-M30 Tecnotrade	ABS Rychlý 3D tisk
		

K měření přesnosti tisku byla použita metoda nejmenších čtverců k vytvoření aproximovaných válcových ploch – na Obr. 23 a v obrazové příloze Stavba kruhových profilů je vidět, že skutečné hodnoty se někdy liší i o $\pm 0,08$ mm, tato problematika se v největší míře vyskytuje u průměrů válců 2 a 1 mm, to odpovídá větší obtížnosti opakovat přesnost tisku v menších rozměrech.

Rozměr o průměru 1 mm byl úspěšně vytištěn na všech dílech kromě ABS 3DFil, avšak při běžné, opatrné manipulaci došlo k okamžitému přerušení. Proto tento rozměr rozhodně není vhodný pro libovolné použití s minimální zátěží. Válce

průměru 2 mm jsou rozměrově nestabilní, proto jejich tisk není možné doporučit pro stabilní produkci.



Obr. 23 – Pohled na tvorbu aproximovaných válcových profilů na skutečných plochách metodou nejmenších čtverců. Od ideálních se reálné body liší až o $\pm 0,08$ mm (příklad – PC-ABS Tecnotrade, PC-ABS Rychlý 3D tisk)

V Tabulka 19 a v

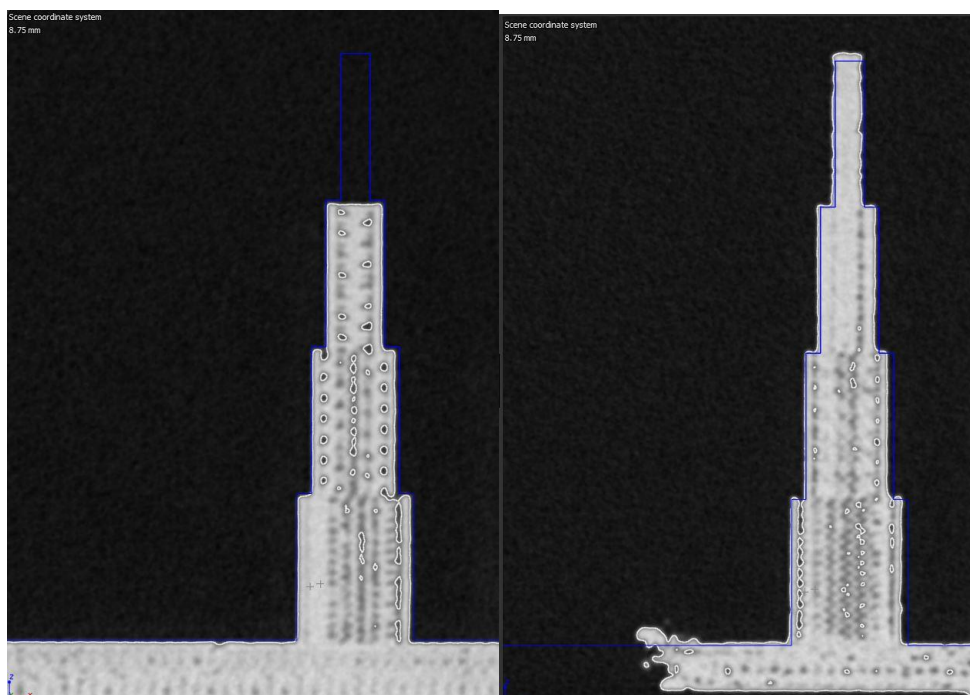
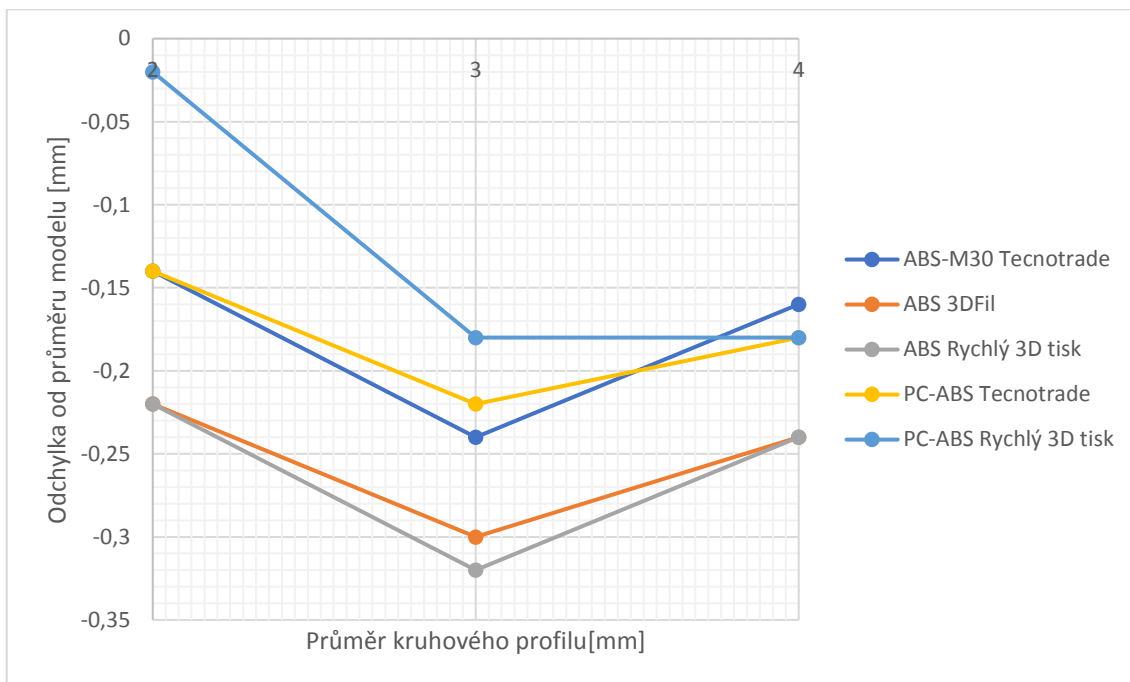
Graf 36 je vidět rozměrový rozdíl průměrů skutečných válců oproti průměrům modelu. Všechny hodnoty jsou menší než modelová hodnota, což odpovídá větším hodnotám smrštivosti v ploše XY pozorovaných ve zkoušce Jednotlivé

těleso. Z grafu je viditelné, že největší přesnosti se drží PC-ABS Rychlý 3D tisk, poté následují oba materiály od Tecnotrade, Největší odchyly mají materiály ABS od 3DFil a Rychlý 3D tisk. Tyto hodnoty je možné odladit změnou výše uvedeného koeficientu zvětšení v budoucím výzkumu.

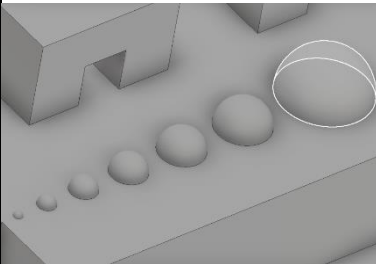
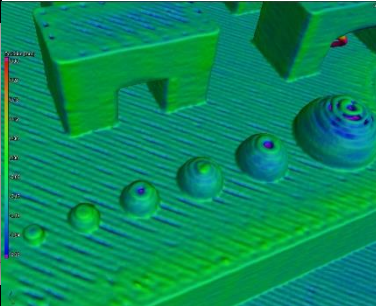
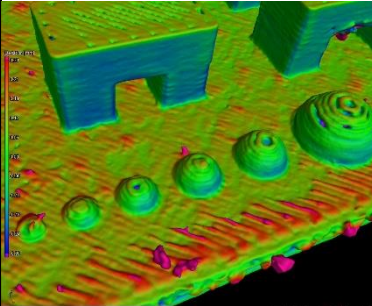
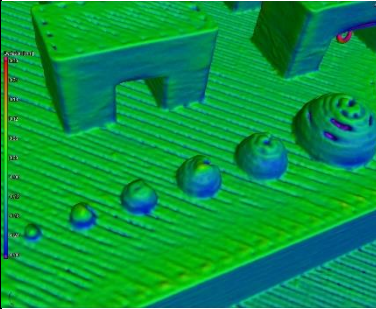
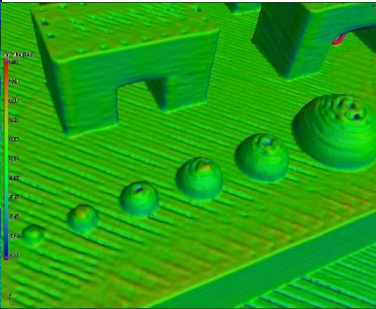
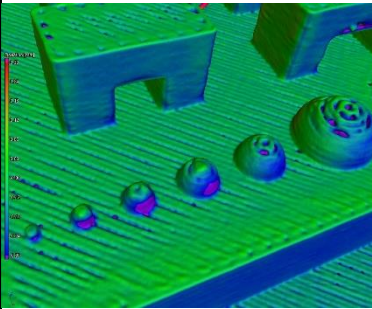
Tabulka 19 – Rozměry vytištěných válců a odchylna od průměrů modelu

Průměr [mm]	4	3	2	1
ABS-M30 Tecnotrade	3,84	2,76	1,86	0,84
ABS 3DFil	3,76	2,7	1,78	x
ABS Rychlý 3D tisk	3,76	2,68	1,78	x
PC-ABS Tecnotrade	3,82	2,78	1,86	x
PC-ABS Rychlý 3D tisk	3,82	2,82	1,98	1,02
Odchylna [mm]	4	3	2	1
ABS-M30 Tecnotrade	-0,16	-0,24	-0,14	-0,16
ABS 3DFil	-0,24	-0,3	-0,22	x
ABS Rychlý 3D tisk	-0,24	-0,32	-0,22	x
PC-ABS Tecnotrade	-0,18	-0,22	-0,14	x
PC-ABS Rychlý 3D tisk	-0,18	-0,18	-0,02	0,02

Graf 36 – Odchylna průměrů kruhových profilů od průměrů modelu



Obr. 24 – Řez válců v rovině XZ
 v hloubce 8,75 mm a jejich srovnání se
 skutečným modelem
 (příklad – PC-ABS Tecnotrade, PC-ABS
 Rychlý 3D tisk)

Jméno zkoušky:	Polokoule	
Popis zkoušky:	Je zkoumána schopnost materiálu stavět polokoule – skládat na sebe průběžně s každou vrstvou menší kruhové profily. Kupole mají průměr 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 a 5 mm	
Počítačový model	PC-ABS Tecnotrade	PC-ABS Rychlý 3D tisk
		
ABS 3D Fil	ABS-M30 Tecnotrade	ABS Rychlý 3D tisk
		

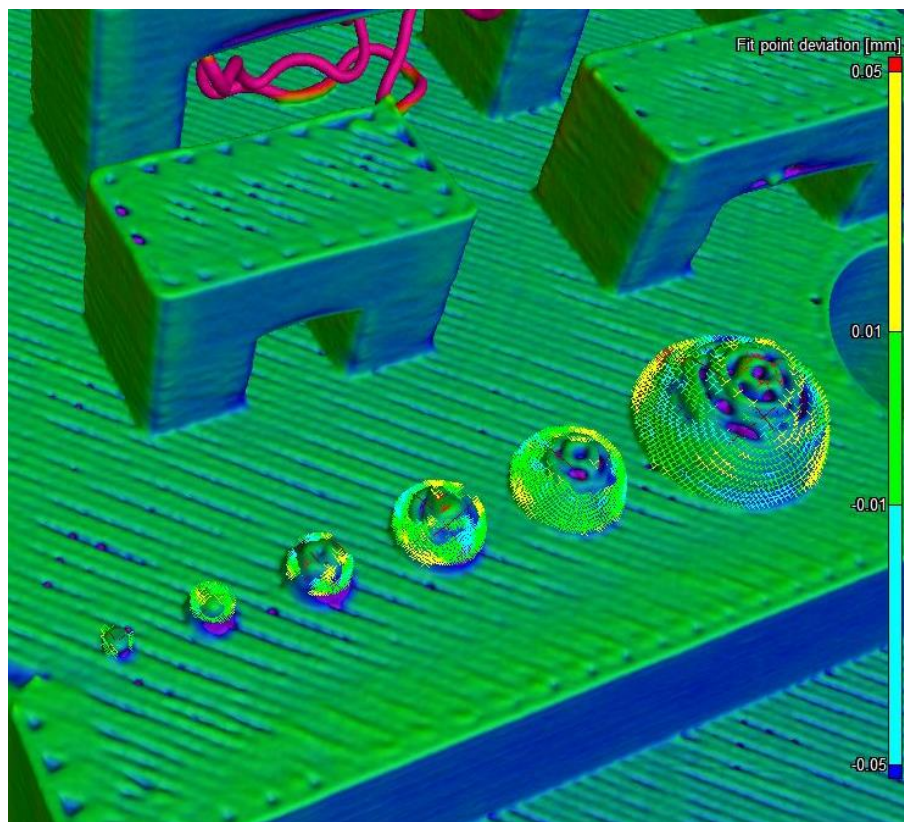
Polokoule o průměru 0,5 mm se vůbec nevytiskla v žádné z variant materiálů.

Ostatní polokoule byly metodou nejmenších čtverců aproximovány a jejich průměry změřeny a porovnány s modelovými hodnotami v Tabulka 20 a v

Graf 37. Od ideálních se reálné body liší až o $\pm 0,05$ mm.

Kromě porovnání těchto hodnot je zřetelně viditelná vznikající pórovitost na vršcích polokoulí způsobená limitovanou výškou vrstvy a zjednodušenou trasou generovanou ve sliceru pro menší, komplikované tvary.

Tento jev se projevuje nejméně u ABS-M30 Tecnotrade a PC-ABS Rychlý 3D tisk, které zde mají nejvyšší zabíhavost materiálu. Jedná se o jev běžným okem nepostřehnutelný, ale může mít vliv na drsnost povrchu a mechanické vlastnosti.

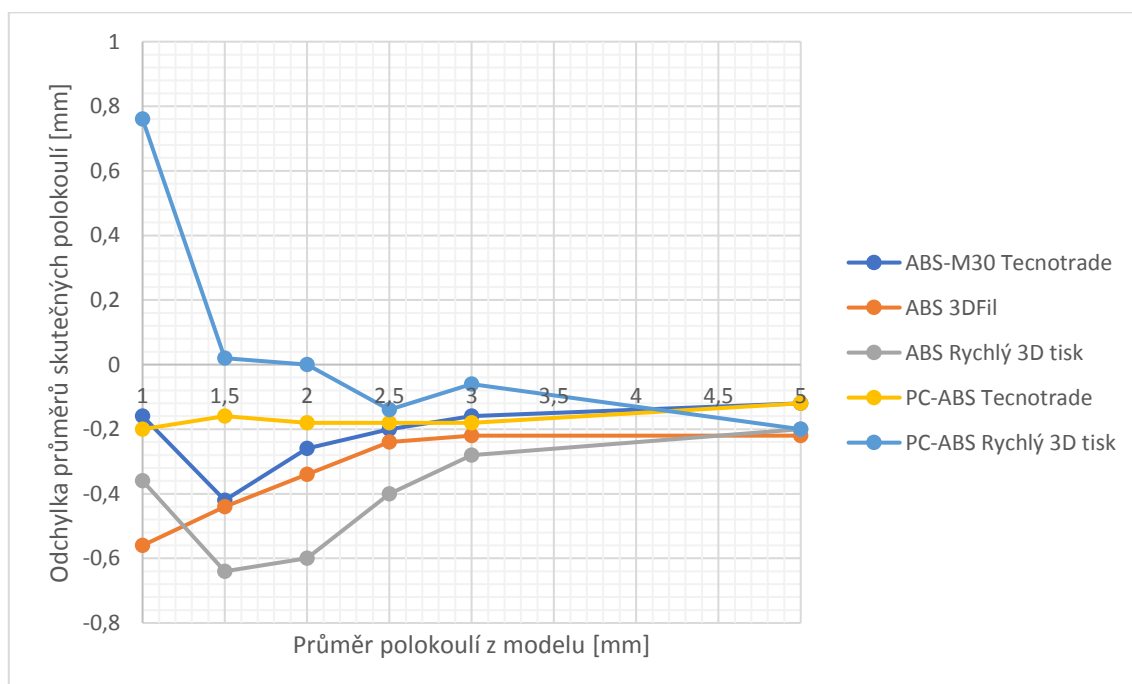


Obr. 25 – Pohled na tvorbu aproximovaných sférických profilů na skutečných plochách metodou nejmenších čtverců.
(příklad – ABS Rychlý 3D tisk)

Tabulka 20 – Rozměry vytištěných polokoulí a odchylka od průměrů modelu

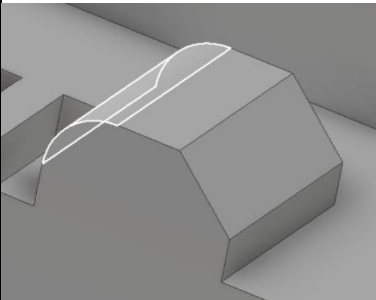
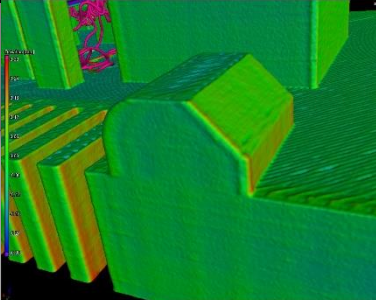
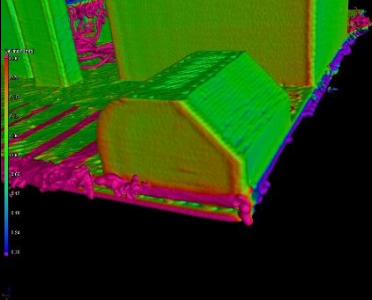
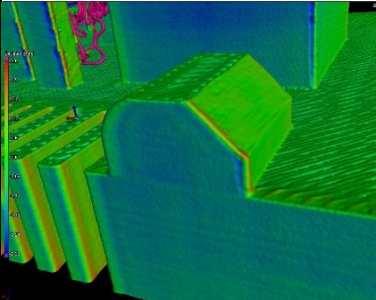
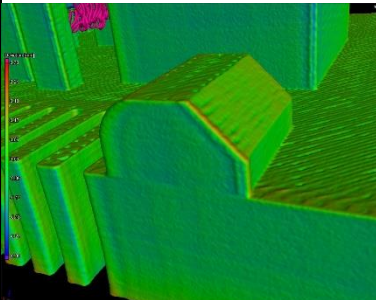
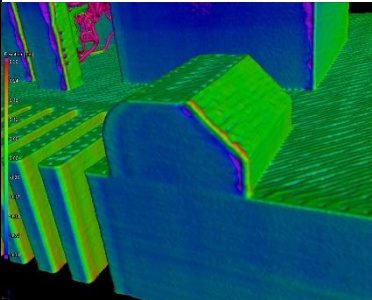
Průměr [mm]	5	3	2,5	2	1,5	1	0,5
ABS-M30 Tecnotrade	4,88	2,84	2,3	1,74	1,08	0,84	x
ABS 3DFil	4,78	2,78	2,26	1,66	1,06	0,44	x
ABS Rychlý 3D tisk	4,8	2,72	2,1	1,4	0,86	0,64	x
PC-ABS Tecnotrade	4,88	2,82	2,32	1,82	1,34	0,8	x
PC-ABS Rychlý 3D tisk	4,8	2,94	2,36	2	1,52	1,76	x
Odchyly [mm]	5	3	2,5	2	1,5	1	0,5
ABS-M30 Tecnotrade	-0,12	-0,16	-0,2	-0,26	-0,42	-0,16	x
ABS 3DFil	-0,22	-0,22	-0,24	-0,34	-0,44	-0,56	x
ABS Rychlý 3D tisk	-0,2	-0,28	-0,4	-0,6	-0,64	-0,36	x
PC-ABS Tecnotrade	-0,12	-0,18	-0,18	-0,18	-0,16	-0,2	x
PC-ABS Rychlý 3D tisk	-0,2	-0,06	-0,14	0	0,02	0,76	x

Graf 37 – Odchylka průměrů polokoulí od průměrů modelu



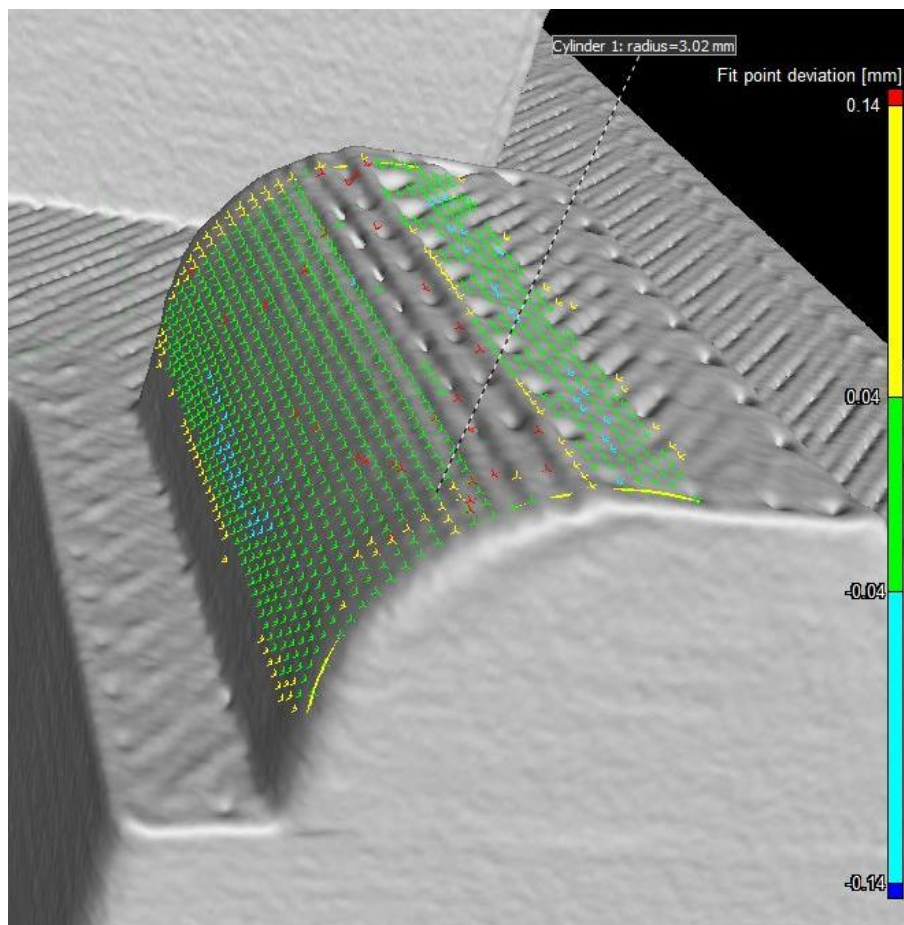
Oba materiály Tecnotrade konvergují k -0,12 mm. Všechny ostatní hodnoty konvergují k odchylce -0,2 mm. Kromě PC-ABS Rychlý tisk jsou všechny materiály stabilně použitelné od průměru 2,5 mm s odchylkou 0,28 mm či méně. PC-ABS Tecnotrade má stabilní výsledky i u průměru 1 mm.

K dalšímu zkoumání by byly vhodné rozměry po upravení hodnot koeficientu zvětšení ve sliceru.

Jméno zkoušky:	Zaoblení a zkosení	
Popis zkoušky:	Je zkoumána funkce materiálu vytvářet zaoblení a zkosení. Hrana je dlouhá 10 mm , zaoblení má poloměr 3 mm a zkosení má délku odvěsen 3 mm	
Počítačový model	PC-ABS Tecnotrade	PC-ABS Rychlý 3D tisk
		
ABS 3D Fil	ABS-M30 Tecnotrade	ABS Rychlý 3D tisk
		

Zaoblení byla aproximována metodou nejmenších čtverců a jejich průměry změřeny a porovnány s modelovými hodnotami v Tabulka 21 a v Graf 38. Od ideálních se reálné body liší až o $\pm 0,14$ mm.

V Obr. 26 a obrazové příloze 13.3.13 je vidět obdobný jev jako ve zkoušce Polokoule – kvůli omezující minimální výšce vrstvy jsou nejvyšší vrstvy zaoblení schodovité. Opět je nejmenší vliv jevu u ABS-M30 Tecnotrade a PC-ABS Rychlý 3D tisk.

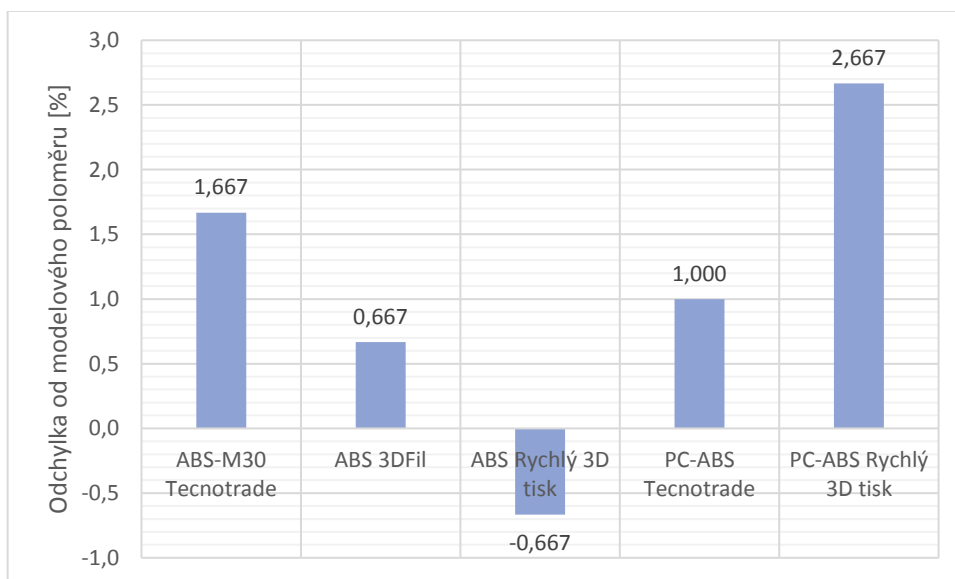


Obr. 26 – Pohled na tvorbu
 aproximovaného válcového profilu
 na skutečné ploše metodou nejmenších
 čtverců. Od ideálních se reálné body liší
 až o $\pm 0,14$ mm
 (příklad – ABS 3DFil)

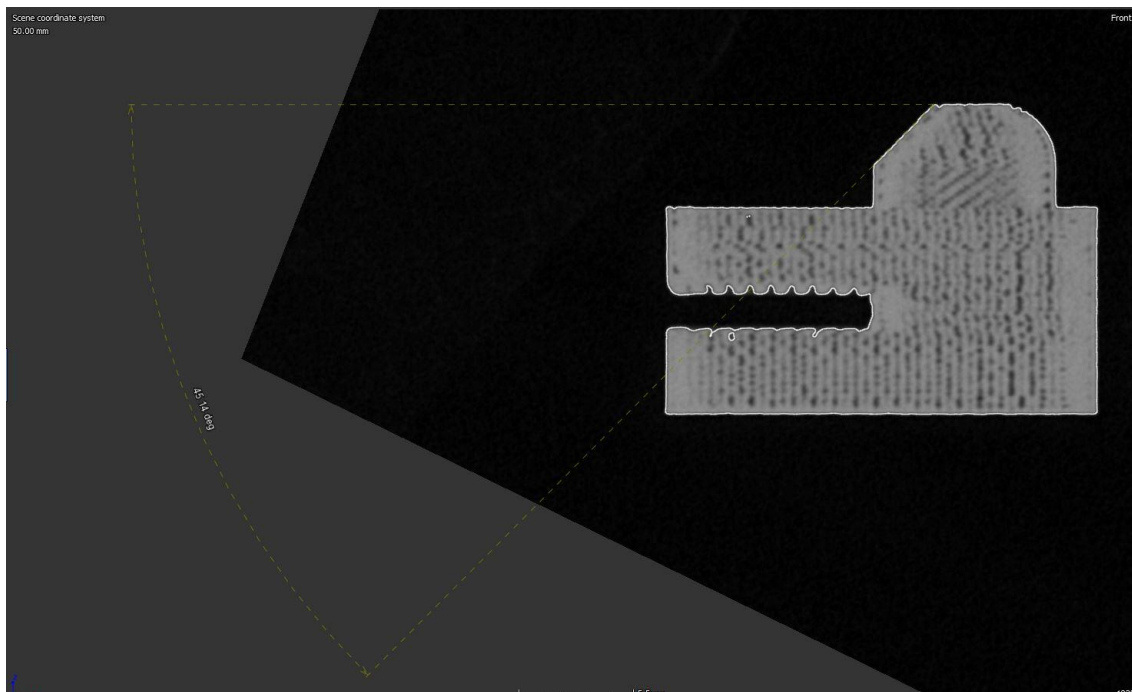
Tabulka 21 – Hodnoty a procentuální odchylka poloměru zaoblení od modelové
 hodnoty

	Poloměr zaoblení [mm]	Odchylka [%]
ABS-M30 Tecnotrade	3,05	1,667
ABS 3DFil	3,02	0,667
ABS Rychlý 3D tisk	2,98	-0,667
PC-ABS Tecnotrade	3,03	1,000
PC-ABS Rychlý 3D tisk	3,08	2,667

Graf 38 – Procentuální odchylka poloměru zaoblení od modelové hodnoty



Zde je jiný průběh než u ostatních rozměrových zkoušek, který je daný tiskem v ose Z. Ta podle zkoušky Jednolitě těleso naopak tiskne nadměrné díly a je třeba koeficient smrštivosti snížit.



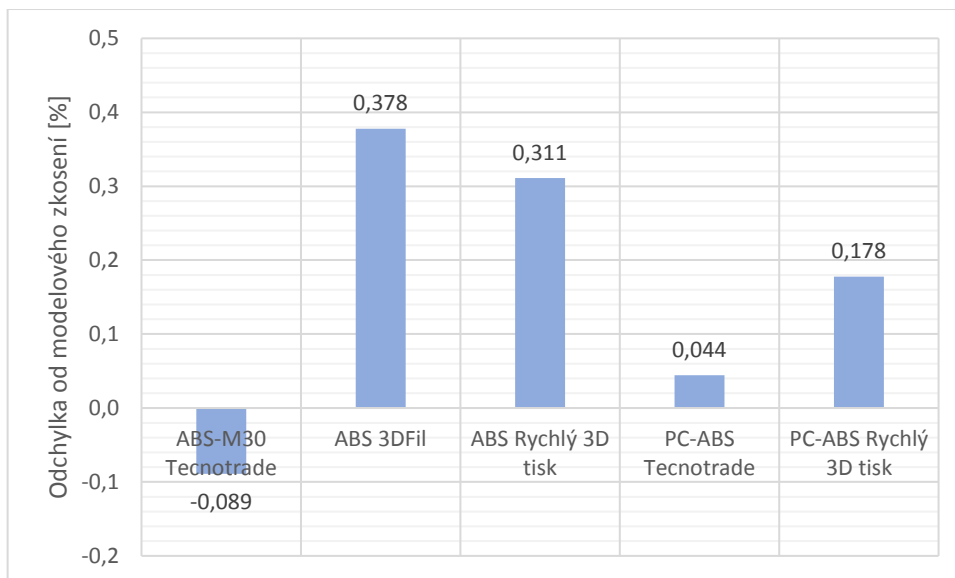
Obr. 27 – Řez v polovině tloušťky tělesa (5 mm). Detail na měřený úhel zkosení (příklad ABS Rychlý 3D tisk)

Úhel je měřený mezi vrchní rovinou tělesa a zkosenou rovinou v rovině XZ. Obě porovnávané roviny byly aproximovány metodou nejmenších čtverců. V Tabulka 22 a Graf 39 je vidět, že nejlepší hodnoty zkosení udržují materiály od Tecnotrade, následuje PC-ABS Rychlý 3D Tisk. Násobně vyšších odchylek dosahují materiály ABS Rychlý 3D tisk a ABS 3DFil.

Tabulka 22 – Hodnoty a procentuální odchylka úhlu zkosení od modelové hodnoty

	Úhel zkosení [°]	Odchylka [%]
ABS-M30 Tecnotrade	44,96	-0,089
ABS 3DFil	45,17	0,378
ABS Rychlý 3D tisk	45,14	0,311
PC-ABS Tecnotrade	45,02	0,044
PC-ABS Rychlý 3D tisk	45,08	0,178

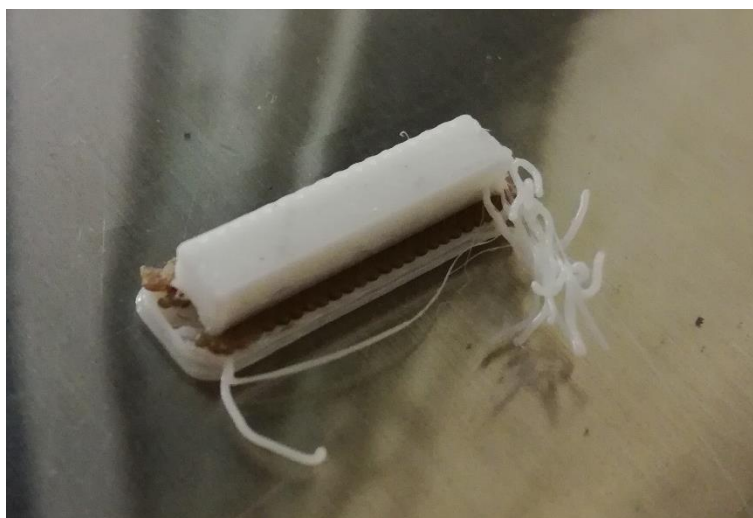
Graf 39 – Procentuální odchylka úhlu zkosení od modelové hodnoty



7. Problematické a defektní tisky

7.1. Materiál PC od 3DFil

Při tisku z neautorizovaného polykarbonátu se okamžitě ukázaly problémy. Materiál příliš tekl, výtisky byly velmi nepřesné a struktury jakkoliv větších rozměrů se okamžitě hroutily. Nebylo možné vytisknout libovolné zkušební těleso. Důvodem tohoto chování je nižší teplota tavení neautorizovaného materiálu oproti autorizovanému polykarbonátu, což je parametr, do kterého nelze u tiskáren Stratasys zasahovat. Proto byl tedy materiál již při tisku prvních zkušebních těles uznán za nevyhovující a **vyločen z jakéhokoliv dalšího testování**.



Obr. 28 – Vzhled tělesa tisknutého neautorizovaným PC

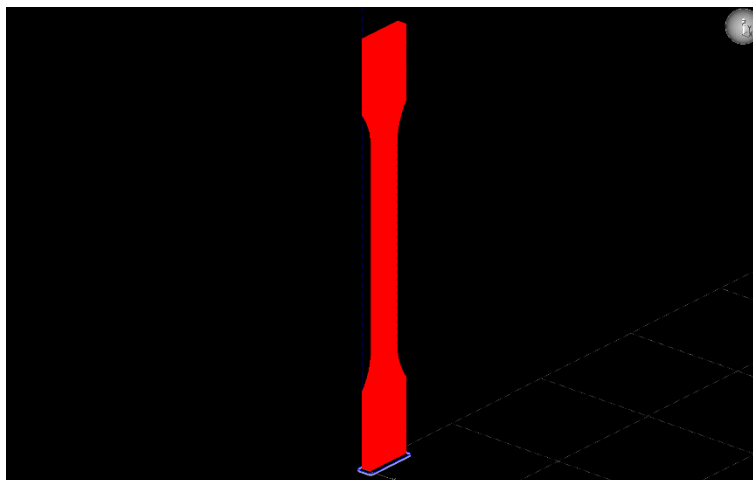


Obr. 29 – Stopy roztaveného PC na folii, nad kterou přejížděla tryska

7.2. Tahová zkouška 1A

Tahová zkouška vycházela z norem ČSN EN ISO 527-1. a ČSN EN ISO 527-2. Plasty – Stanovení tahových vlastností [22,23]. Při měření tahových vlastností u FDM 3D tisku je velmi důležité zvážit anizotropii materiálu (viz kapitola 3.3 Anizotropie výše). Proto byla zvolena varianta tisknout zkušební vzorky nejen naležato na podložce, jak je u FDM tisku často nejvýhodnější z hlediska přesnosti i rychlosti tisku, ale také nastojato.

Při zvolení nejběžnějšího typu vzorku 1A však začaly nastávat s tiskem nastojato problémy. Při tisku dochází vlivem pohybů v osách X, Y a Z k vibracím, které však u většiny tištěných těles mají malý vliv. Kvůli výšce vzorku (170 mm) spojené s jeho malou tloušťkou (4 mm) se vibrace umocňovaly a vzorek se v určité výšce rozkmital do té míry, že se tisk překazil (viz Obr. 31).



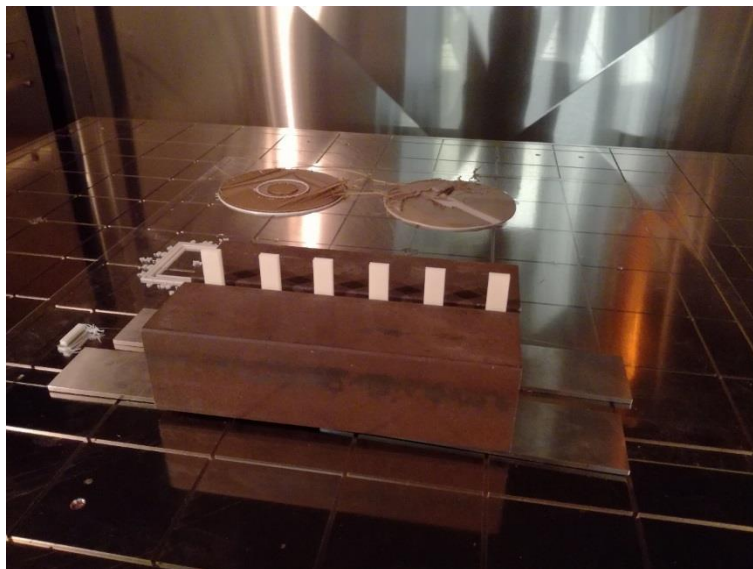
Obr. 30 – Pohled na natočení tištěného tělesa 1A na výšku v Stratasys Insight 10.4



Obr. 31 – Výsledek tištění těles 1A na výšku po odstranění z vakuové fólie. Ve výšce 116,4 mm se tisk překazil a zbytek plastu se vytisknul do viditelného „chomáče“

Po tomto tisku byla použita strategie s podepřením zkušebních těles – přerušit tisk uprostřed, podepřít z části vytištěná tělesa ocelovým profilem, a poté tisk znovu spustit. Ukázalo se však, že přerušení tisku a otevření pracovního prostoru (narušení teplotních podmínek), a zároveň drobné vychýlení při podepření

profily, vyústily ve velmi slabou vazbu mezi tělesem před a po přerušení, absolutně nevhodnou pro tahovou zkoušku (viz Obr. 33).

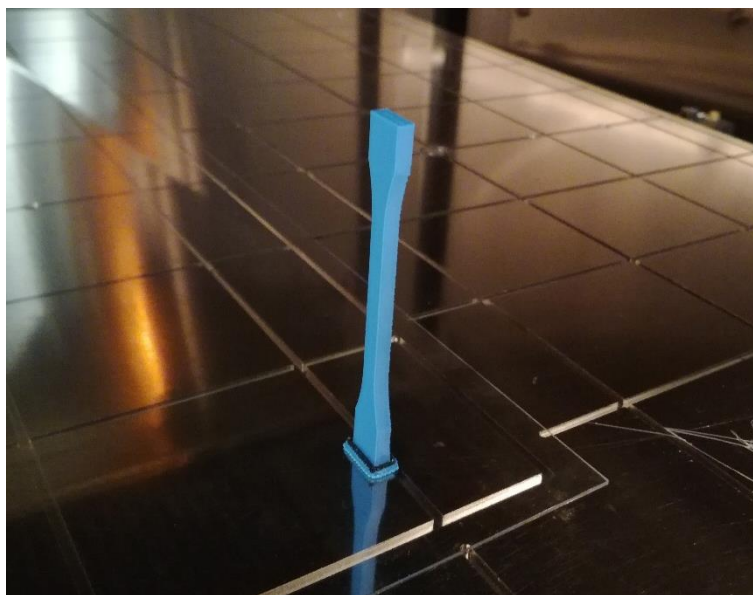


Obr. 32 – Zajištění ocelovými profily



Obr. 33 – Výsledek tisku s ocelovými profily

Proto nakonec bylo zvoleno menší normované těleso 1BA. Toto těleso má výšku 76 mm a šířku 4 mm. Takto zvolené těleso nebyl problém vytisknout.



Obr. 34 – Úspěšný tisk tělesa 1BA na výšku

7.3. Problematiky tisku PC-ABS od Rychlý 3D tisk

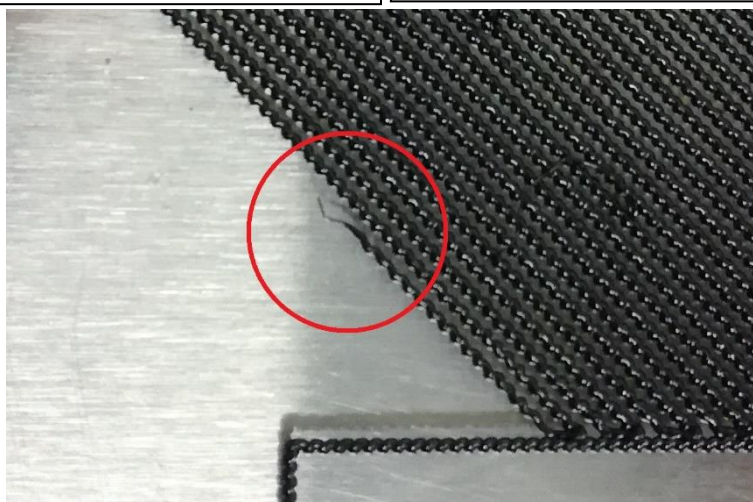
V jednom případě tisku všech těles pro mechanické zkoušky a tělesa pro kombinovanou zkoušku rozměrových přesností materiálu z PC-ABS od dodavatele Rychlý 3D tisk se tisk zmařil a tělesa se nepřichytila na stavební folii (viz Obr. 36).

Při detailním pohledu bylo vidět, jak se dráha plastu měnila, s místy, kde se tvořila rovně, a s místy, kde se ve větší i menší míře „klikatila“. Z toho bylo možné vyvodit průběžně proměnlivou tlakovou nestabilitu tisku.



Obr. 36 – Nepodařený tisk z PC-ABS, tělesa nepřichycená k folii

Obr. 35– Detail na nepravidelný vzor tisku těles



Obr. 37 – V tomto místě došlo k chybě, od tohoto okamžiku dál byl tisk nestabilní

Po zvážení jednotlivých parametrů chyby byl problém objeven – jednalo se o průtok materiálu na rozhraní kov-plast trysky T12. Po výměně trysky tisk pracoval správně.



Obr. 38 – Materiál PC-ABS, proteklý mezi rozhraním kov-plast trysky T12

Vadnou tryskou za dobu jejího provozu proteklo dohromady 1140 cm^3 materiálu PC-ABS. Garantovaná životnost trysky je pro PC-ABS 9010 cm^3 , tedy tryska byla ve 12,7 % své životnosti.

Událost je statisticky neprokazatelná, mohlo se jednat o vadnou trysku, ale kdyby se v budoucnosti opakovala se stejným materiálem, dalo by se vyvodit, že je vada způsobena nižší viskozitou materiálu při stejné teplotě u PC-ABS od Rychlý 3D tisk, tím způsobí nižší viskozitu materiálu v době tisku a vzhledem k tlakům, které v extruderu probíhají, vyšší pravděpodobnost průniku do rozhraní kov-plast trysky.

V další instanci tisku (jen samotných zkušebních těles) – po vyměnění trysky – se projevil problém se zkroucením všech těles ve směru osy tisku Z, některá tělesa byla dokončená s velkými otřepy a tisk těles pro tahovou zkoušku na výšku selhal úplně.



Obr. 40 – Rozdíl mezi tělesem od základny neodtrženým (nahore) a odtrženým (dole)

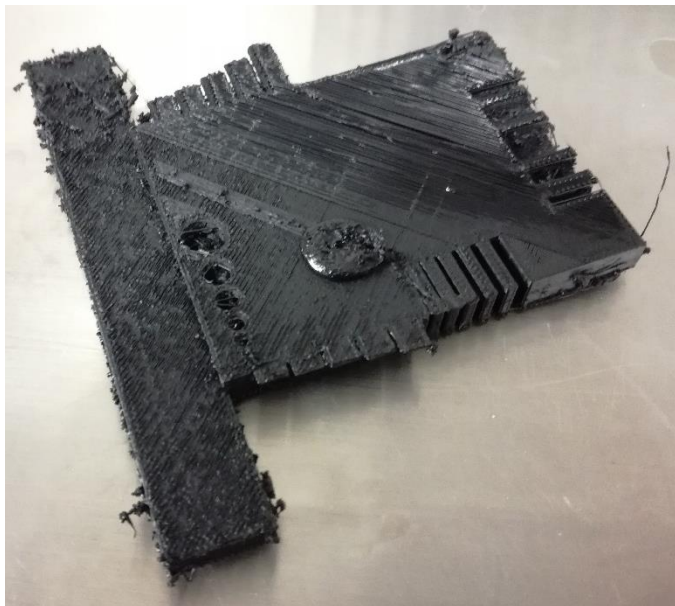
Obr. 39– Všechny vzorky vykazují výrazné zkroucení v místě kontaktu s podložkou

Při přezkoumání byl identifikován jako důvod kombinace špatné přilnavosti těles k základně z podpůrného materiálu a velké tepelné smrštitivosti materiálu – tělesa se částečně či úplně odtrhla od podložky vlivem smršťovacích sil.

Zkroucená tělesa byla použita v mechanických zkouškách – s přihlédnutím k jejich geometrickým iregularitám, výsledky jejich měření jsou pouze orientační.

Třetí tisk byl prováděn bez nastavení Base – základny. Snahou bylo zabránit odtržení od podložky ve slabé vazbě podpůrný materiál-stavební materiál.

Bylo tisknuto těleso pro kombinovanou zkoušku rozměrových přesností materiálů. Tisk tohoto komplexního tělesa se zmařil v 7,6 mm jeho výšky – opět odtržením od podložky, tentokrát výrazně výše než v předchozích případech.



Obr. 41 – Částečně vytištěné těleso pro kombinovanou zkoušku

Z důvodu nevytištěných zkoušek na horní straně zkušebního tělesa byla poté tištěna a dále použita omezená verze tělesa obsahující pouze některé zkoušky (viz kapitola 6. Kombinovaná zkouška rozměrových přesností materiálů).

8. Ekonomické vyhodnocení

Každý dodavatel dodává cívky s jiným objemem materiálu. Navíc Tecnotrade vypisuje ceny v eurech, ostatní dodavatelé v Kč. Proto byly ceny převedeny jednotně na Kč (použitý kurz k datu 3.5.2018 1€ = 25,60 Kč [26]) a byla porovnávána hodnota ceny 1 cm³ v Kč. Převod je vidět v Tabulka 23.

Tabulka 23 – Porovnání cen testovaných materiálů

	Objem cívky [cm ³]	Bez DPH			s DPH	% cena vůči Tecnotrade
		Cena za cívku [€]	Cena za cívku [Kč]	Cena za 1 cm ³ [Kč/cm ³]	Cena za 1 cm ³ [Kč/cm ³]	
ABS-M30 Tecnotrade	1510	302	7731,2	5,1200	6,1952	100,00
ABS 3DFil	952,5	x	329,75	0,3462	0,4189	6,76
ABS Rychlý 3D tisk	1600	x	4850	3,0313	3,6678	59,20
PC-ABS Tecnotrade	1510	339	8678,4	5,7473	6,9542	100
PC-ABS Rychlý 3D tisk	1600	x	5387	3,3669	4,0739	58,58

Cenově nejlépe vychází ABS od dodavatele 3DFil, jeho cena na cm³ odpovídá pouze 6,76 % ABS-M30 od Tecnotrade. Tisk z ABS od dodavatele 3DFil nabízí úsporu 93,24 %, od Rychlý 3D tisk 40,80 %. Tisk z PC-ABS od Rychlý 3D tisk uspoří 34,24 %.

V průběhu všeho tisku se stala jen jedna porucha nesouvisející se stavbou modelu v komoře (viz kapitola 7.3. Problematiky tisku PC-ABS od Rychlý 3D tisk). Z toho nelze vyvodit statistický závěr pro možné poruchy při používání neautorizovaného materiálu, ale je to možný podnět pro budoucí pozorování.

9. Závěr

Práce ověřila, že každý z testovaných materiálů má svá specifika a že ne každý je vhodný pro tisk omezený předdefinovaným nastavením tiskárny, ale zároveň také, že je možné najít značné využití i u neautorizovaných materiálů.

ABS-M30 Tecnotrade se projevil jako dostatečně kvalitní pro většinu běžných použití, ačkoliv rozhodně nemá o uváděných 25-70 % lepší mechanické vlastnosti než běžné ABS [10]. Hodnoty jsou často horší než ty inzerované v oficiálních prospektech o materiálu a poměrně srovnatelné s vlastnostmi ostatních testovaných ABS. Nicméně v průřezu většiny zkoušek má z nich stabilně nejlepší, nebo alespoň srovnatelné vlastnosti, především díky nízké anizotropii. Výjimkou jsou špatné výsledky u dvou zkoušek. Jednak dosáhl velmi špatných výsledků v tahové zkoušce těles tištěných na šířku, kde se projevil jako velmi nespolehlivý, jednotlivé naměřené hodnoty se extrémně lišily, a jednak prokázal horší vlastnosti u rázové zkoušky s vrubem, což ukazuje na vyšší křehkost materiálu.

Ačkoliv má ABS 3DFil stabilně o něco horší mechanické vlastnosti oproti autorizovanému materiálu, fakt, že stojí méně než 7 % ceny ABS-M30 a je schopný tvořit tvarově stabilní modely, z něj činí dobrou alternativu pro všechna použití, kde není třeba vysokých mechanických vlastností (zvláště zatížení ve směru kolmém na plochy jednotlivých vrstev) a velkých rozměrových přesností. Naopak jeho hodnoty v tahu rovnoběžně s vrstvami jsou číselně srovnatelné a výrazně méně proměnlivé oproti ABS-M30, pokud by se tedy jednalo o primární použití v tahu v jednom směru, lze tento materiál doporučit i pro větší zátěž.

ABS Rychlý 3D tisk vykazuje ve spoustě oblastí lepší mechanické vlastnosti než ostatní materiály ABS, popřípadě velmi srovnatelné s ABS-M30 od Tecnotrade, oproti kterému navíc vyniká dobrou opakovatelností. Problém ale nastal u zkoušky Zkroucení desky, kde se projevila jeho tendence prohýbat se ve směru

osy Z, a to o více než pětinasobek oproti autorizovanému materiálu. Tato zkouška indikovala tendenci materiálu u větších výtisků odtrhnout se od podložky a celý tisk zmařit. Toto podezření se poté v praxi skutečně potvrdilo. Pokud by se podařilo výrobcí problém se smrštivostí opravit, mohl by tento materiál v mnoha oblastech předčít materiál autorizovaný, avšak prozatím ho nelze pro další používání doporučit.

U materiálu PC-ABS Tecnotrade se potvrdily lepší vlastnosti v rázu a ohybu oproti ABS, ačkoliv rozdíl není tak markantní, jak výrobce tvrdí. Materiál je navíc velmi anizotropní, má špatnou adhezi vrstev, a tedy se nehodí do využití s namáháním ze všech stran. U zkoušek rozměrových přesností se projevoval jako nejstabilnější ze všech testovaných materiálů ve všech z tvarově náročných aplikací na testovacím tělese.

PC-ABS od dodavatele Rychlý 3D tisk má závažné problémy, nejde s ním tisknout větší tělesa bez nebezpečí, že se odtrhnou od podložky. Navíc se tělesa při chladnutí značně krouží a dosahují velmi špatných geometrických tolerancí. Při nanášení materiálu nedochází k plnému protavení s předešlou vrstvou, a tak vzniká velmi vláknitá struktura. Ta je kvůli špatné adhezi vrstev nežádoucí pro tahové zatížení. Na druhou stranu vykazuje velmi malé problémy v ohybu, a projevuje se dokonce jako velmi žádoucí v rázovém zatížení, kde materiál dosáhl bezkonkurenčně nejlepších výsledků. Celkově materiál PC-ABS od dodavatele Rychlý 3D tisk nelze doporučit k tisku, avšak náhled do vlivu vláknité struktury může být zdrojem dalšího výzkumu v oblasti FDM výtisků vysoce odolných proti rázovému zatížení.

Z materiálu PC od dodavatele 3DFil se kvůli omezení předdefinovanými nastaveními tiskárny nepodařilo vytisknout žádná tělesa vhodná k testování, proto bylo od testování tohoto materiálu i jeho autorizovaného protějšku od Tecnotrade upuštěno.

U všech materiálů se projevila větší celková smrštivost v osách X a Y a menší v ose Z, výtisky byly příliš vysoké a úzké. Tato práce poskytuje data pro úpravu koeficientu zvětšení v příslušném softwaru při používání daných materiálů pro zlepšení rozměrové přesnosti tisku.

Práce dále ukazuje na značné rozdíly ve výšce tisku na horní ploše výtisků, která je nejspíše způsobená tiskem se 100% výplní. Zkoumání vlivu změny strategie výplně je vhodné pro další bádání.

Vliv anizotropie v tisku se potvrdil, na lomu těles je vidět, že k přerušení dochází vždy na hranici, kde došlo ke spojování materiálu při tisku. U těles tištěných na výšku na hranici mezi dvěma vrstvami, u těles tištěných na šířku je znatelný úhel lomu 45° , popřípadě 135° , jak dochází k lomu v lichých, popřípadě sudých vrstvách (viz obrazová příloha 13.2 Mechanické zkoušky).

Dále zde byl objeven jev zhoršení kvality tisku s pohybem v záporném směru osy Y po stavební ploše tiskárny, zvláště u typu tisku závisějícího na velké přesnosti návaznosti na předešlé vrstvy, jako například testování samosvornosti úhlů, a je možné, že souvisí s vibracemi uvnitř stroje. Jestli souvisí s absolutní polohou v tiskárně, nebo relativní polohou k tištěnému tělesu, lze testovat umístěním více těles do všech rohů tiskárny. Přestože se jev projevil nejvýrazněji u ABS Rychlý 3D Tisk, postihuje všechny materiály a měl by být předmětem dalšího zkoumání.

Bylo ověřeno, že na tiskárně nelze tvořit bez podpor geometricky přesné převisy libovolných rozměrů, spodní strana trpí značnými otřepy. Na druhou stranu bylo zjištěno, že všechny z testovaných materiálů jsou schopné přemostit i vzdálenost 20 mm, s tloušťkou stěny 2,5 mm, bez rozměrových změn na vrchní ploše, což otevírá možnost pro zkoumání tisku dutých částí s nízkými nároky na mechanické vlastnosti za účelem úspory materiálu.

Dalším jevem, který byl objeven v této práci, je problematika tvorby hladkých kulových povrchů se změnou zakřivení v ose Z, pokud je výškový přechod menší

než minimální výška vrstvy, tvoří se viditelné „schody“. Tento jev je znatelný u všech materiálů a lze se mu vyhnout pouze jinou orientací výtisků v tiskárně.

V průběhu všech tisků se stala jen jedna porucha nesouvisející se stavbou modelu v komoře (viz kapitola 7.3. Problematiky tisku PC-ABS od Rychlý 3D tisk). Z toho nelze vyvodit statistický závěr pro možné poruchy při používání neautorizovaného materiálu, ale je to možný podnět pro budoucí pozorování.

Konečným výstupem této práce je doporučení používat levné a kvalitní ABS od firmy 3DFil na všechny výtisky s malými nároky na mechanické zatížení, což zahrnuje většinu prototypových dílů určených k vizualizaci, ke kontrole smontovatelnosti a k dalšímu využití ve vývojové dílně. Pro díly, u kterých se dá očekávat větší zatížení v tahu ze všech stran, lze doporučit materiál ABS-M30 Tecnotrade s nejlepší adhezí vrstev. Pro díly, u kterých se očekává velké zatížení v ohybu, ať plynulé či rázové, je nejvhodnější PC-ABS Tecnotrade. Pokud se úspěšnou spoluprací s firmou Rychlý 3D tisk podaří omezit zkroucení materiálu ABS, bylo by možné jím materiál ABS-M30 úplně nahradit. Pro alternativní materiály PC a PC-ABS lze doporučit hledání jiných dodavatelů.

10. Seznam použité literatury

- [1] Schöffner F, *How expiring patents are ushering in the next generation of 3D printing*. [Online] 16. květen 2016. [cit. 28. květen 2018.] <https://techcrunch.com/2016/05/15/how-expiring-patents-are-usher-ing-in-the-next-generation-of-3d-printing/>
- [2] Redwood B, Schöffner F, Garret B. *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. Amsterdam: Coers & Roest, 2017, ISBN 978-90-827485-0-5
- [3] Drašnar M. *Optimalizace modelu pro technologii 3D tisku*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015, Bakalářská práce
- [4] Kratochvílová, J. *3D tisk*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8
- [5] Knapil, J. *Stavba a aplikace 3D FDM tiskárny typu deltabot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015, Diplomová práce
- [6] Sung-Hoon A, Montero M, Odell D. a kol. *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. Rapid Prototyping Svazek 8 Číslo 4, 2002, ISSN 1355-2546
- [7] FDM Support Removal. *FDM BEST PRACTICE |Stratasys*. [Online] [cit. 4. duben 2018.] http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Best%20Practices_BP/BP_FDM_SupportRemoval.pdf?v=636008155408106896
- [8] O BOBCATU | BOBCAT DOOSAN. *Doosan, Bobcat, výroba, Dobříš, bagry, nakladače, LDR, MEX, práce*. [Online] [cit. 3. březen 2018.] <http://www.bobcatdobris.cz/bobcat>.
- [9] Stavební stroje. | BOBCAT.CZ. *BOBCAT.CZ*. [Online] [cit. 3. březen 2018.] <https://www.bobcat.cz/stroje>
- [10] ABS-M30. *3D Printing & Additive Manufacturing |Stratasys*. [Online] [cit. 8. březen 2018.] <http://www.stratasys.com/materials/search/abs-m30>
- [11] Průša J, Průša M. *Základy 3D tisku* [Online]. 1. vyd. 2014 [cit. 2. březen 2018] <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>

- [12] PC *3D Printing & Additive Manufacturing* |Stratasys. [Online] [cit. 8. březen 2018.] <http://www.stratasys.com/materials/search/pc>
- [13] PC-ABS. *3D Printing & Additive Manufacturing* |Stratasys. [Online] [cit. 8. březen 2018.] <http://www.stratasys.com/materials/search/pc-abs>
- [14] FortusABSM30MaterialSpecSheet-US-1013. *3D Printing & Additive Manufacturing* |Stratasys. [Online] [cit. 2. duben 2018.] http://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss_fdm_absm30_1117a.pdf
- [15] FortusPCMaterialSpecSheet-US-1013. *3D Printing & Additive Manufacturing* |Stratasys. [Online] [cit. 2. duben 2018.] http://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss_fdm_pc_1117a.pdf
- [16] FortusPCABSMaterialSpecSheet-US-1013. *3D Printing & Additive Manufacturing* |Stratasys. [Online] [cit. 2. duben 2018.] http://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mss_fdm_pcabs_1217a.pdf
- [17] Fortus 900mc. MCAE. [Online] [cit. 20. březen 2018.] https://www.mcae.cz/cs/produkty/fortus-900mc/?gclid=EAlaIQobChMI6qiC3aL72QIV3cmyCh2vzQhYEAAYASAAEgKG7fD_BwE
- [18] Toolpath Setup and Creation *Nápověda Stratasys Insight 10.4 Stratasys Inc.* Eden Prairie. 2001-2015.
- [19] Tip Selection. *FDM BEST PRACTICE* |Stratasys. [Online] [cit. 4. duben 2018.] http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Best%20Practices_BP/BP_FDM_TipSelection_1115.pdf?v=635966635216344038
- [20] Sobotová J, Čižmárová E, Horník J, Jeníková Z. *Nauka o materiálu I. a II. : cvičení*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014, ISBN 978-80-01-05550-2
- [21] Support Operation Overview *Nápověda Stratasys Insight 10.4 Stratasys Inc.* Eden Prairie. 2001-2015.

- [22] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2012
- [23] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2012
- [24] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Ústav pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2001
- [25] ČSN EN ISO 178. *Plasty – Stanovení ohybových vlastností* Praha: Ústav pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2011
- [26] Kurzy měn Online, Forex Euro/Dolar, Grafy. *Kurzy měn, akcie, komodity, zákony, zaměstnání - Kurzy.cz* [Online] [cit. 3. květen 2018.] <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/aktualni/>

11. Zdroje obrázků:

- [1] Introduction to FDM 3D printing. *3D Hubs: Browse online 3D printing services*. [Online] [cit. 3. duben 2018.] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>
- [2] Jäger A, Johannesmann S, Claes L a kol. Evaluating the influence of 3D-printing parameters on acoustic material properties. 2017. 10.1109/ULTSYM.2017.8092398.
- [3] Stratasys F900 3D Printer *3D Printing & Additive Manufacturing |Stratasys*. [Online] [cit. 28. únor 2018.] <http://www.stratasys.com/3d-printers/fortus-900mc>

Obrázky bez uvedeného zdroje byly vytvořeny autorem pro účely této práce.

12. Seznam zkratk

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PC	Polycarbonate (Polykarbonát)
FDM	Fused deposition modeling
CAD	Computer-aided design
CNC	Computer numeric control
CAM	Computer-aided manufacturing
3D	Trojdimenzionální
UV	Ultraviolet, ultrafialové
SLA	Stereolithography apparatus
STL	Stereolithography
T12	Tryska o průměru 0,178 mm
T16	Tryska o průměru 0,254 mm
T20	Tryska o průměru 0,330 mm
F [N]	Síla
v [mm/min]	rychlost
L ₀ [mm]	Počínající měřená délka

b [mm]	šířka vzorku
h [mm]	tloušťka vzorku
L [mm]	upínací vzdálenost mezi čelistmi
ΔL_{tb} [mm]	zvětšení upínací vzdálenosti při přetržení
F_y [N]	síla na mezi kluzu
A [mm ²]	počáteční průřez zkušebního tělesa
σ_y [MPa]	mez kluzu
ε_{tb} [-]	jmenovité poměrné prodloužení při přetržení
K_z [-]	koeficient zvětšení
a_m [mm]	délka strany modelu
a_s [mm]	skutečná délka strany
a_{cU} [kJ/m ²]	Rázová houževnatost Charpy zkušebních těles bez vrubu
a_{cN} [kJ/m ²]	Rázová houževnatost Charpy zkušebních těles opatřených vrubem

13. Obrazová příloha

13.1. Nastavení tisku těles v Stratasys Insight 10.4

U každého tělesa jsou nejdříve zobrazeny všechny vrstvy v ISO pohledu (zde je dobře vidět nastavení Base – první tři vrstvy z modelového materiálu a další tři z podpůrného za účelem vyrovnání plochy tisku).

Druhý obrázek ukazuje trasu nástroje v sedmé vrstvě tisku (první bez nastavení Base) – zde je viditelný úhel výplně 45° , ten se s každou vrstvou otáčí o 90° .

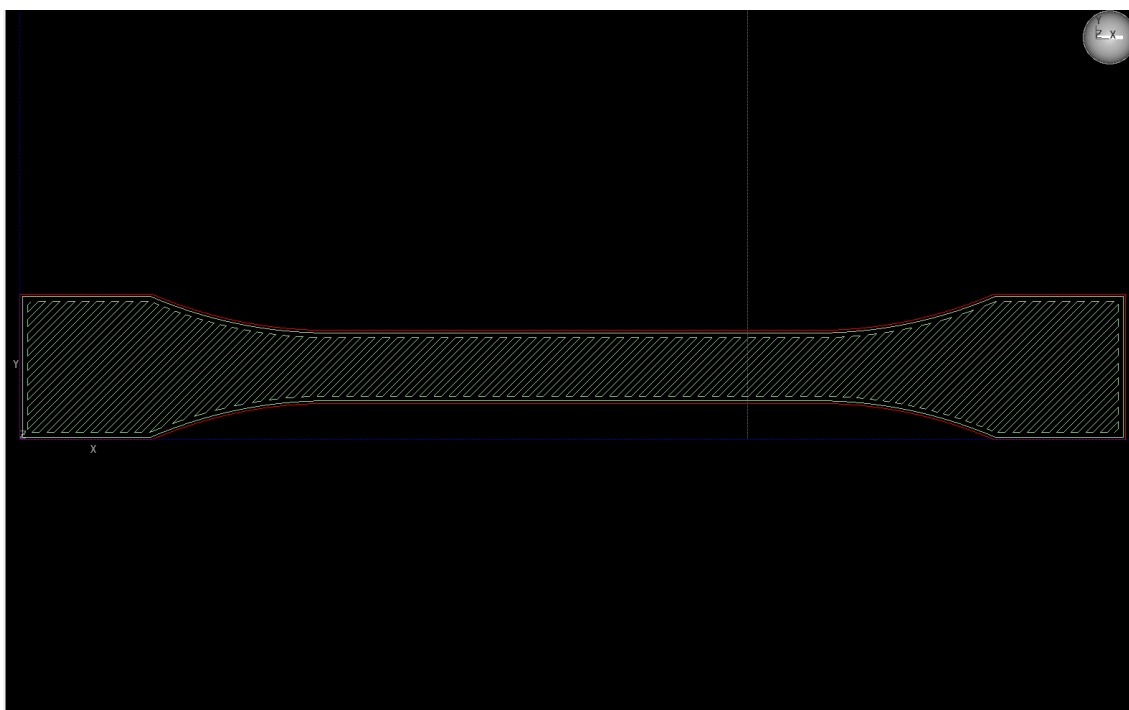
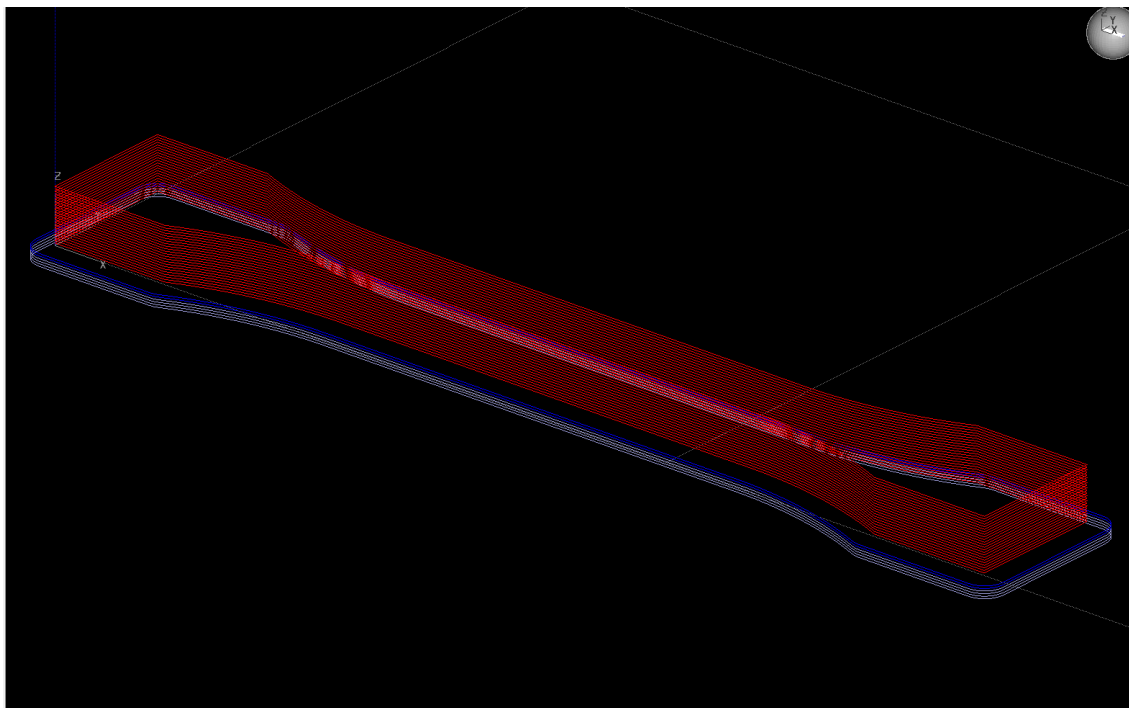
Vysvětlení barev v obrázcích ze sliceru Stratasys Insight 10.4:

Červená – Obrysová křivka – tuto křivku tiskárna vytiskne první v každé vrstvě, zajišťuje kvalitní vzhled a vlastnosti povrchu.

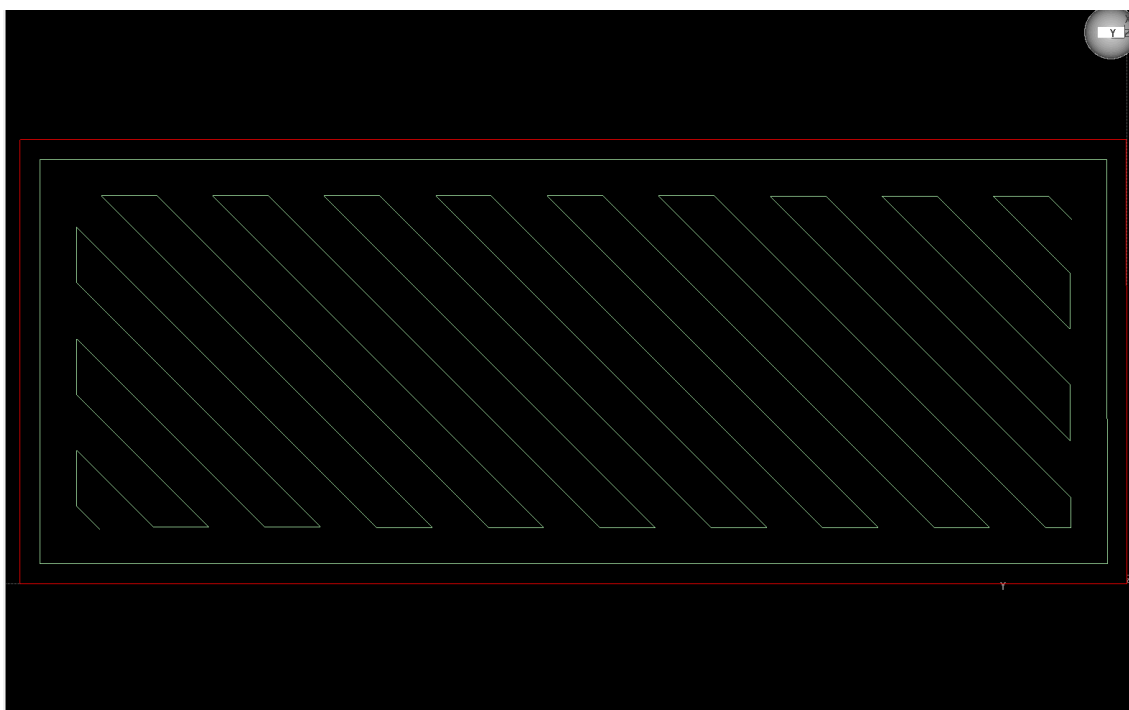
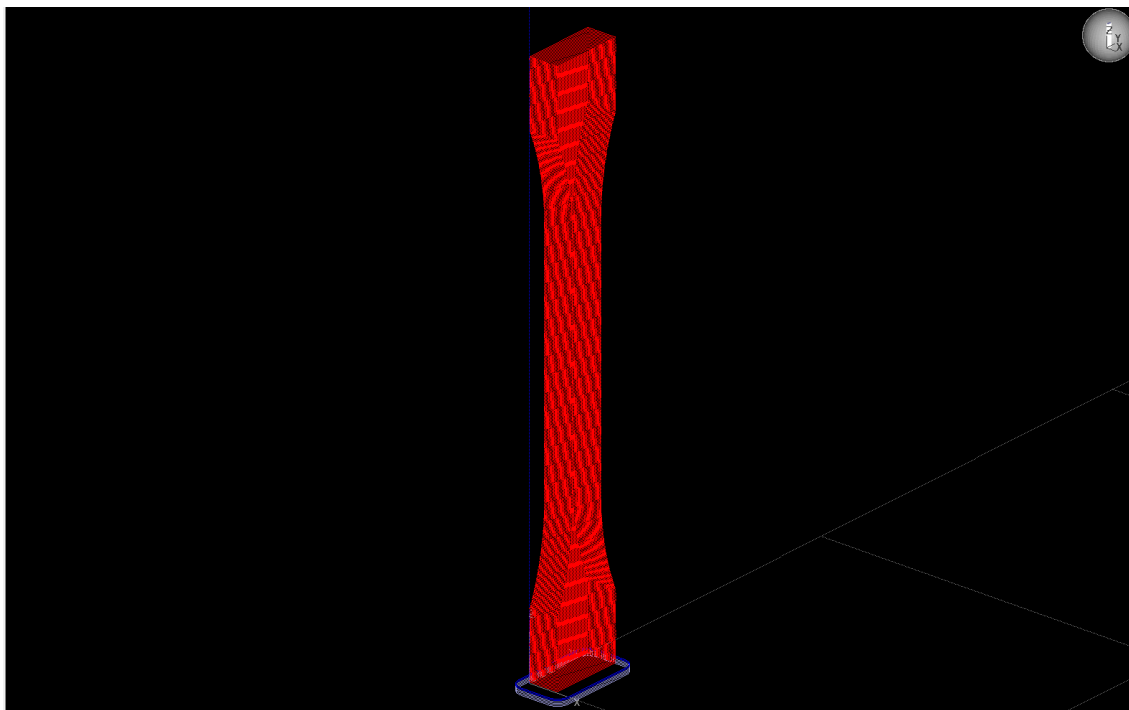
Zelená – Výplňová křivka – tuto křivku tiskárna vytiskne jako druhou. Dráhy jsou od sebe tak daleko, aby se díky tloušťce stopy extrudovaného materiálu vytvářela spojitá plocha.

Modrá – křivka podporového materiálu – v těchto tiscích je použita pouze pro vyrovnání plochy před samotným tiskem.

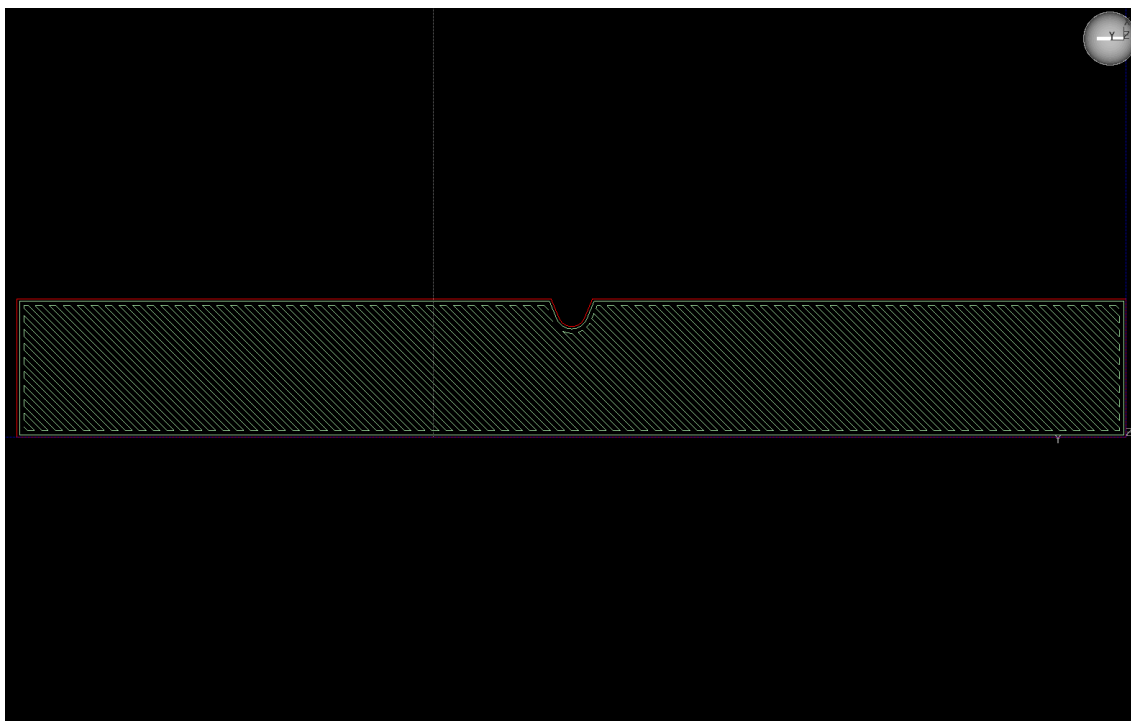
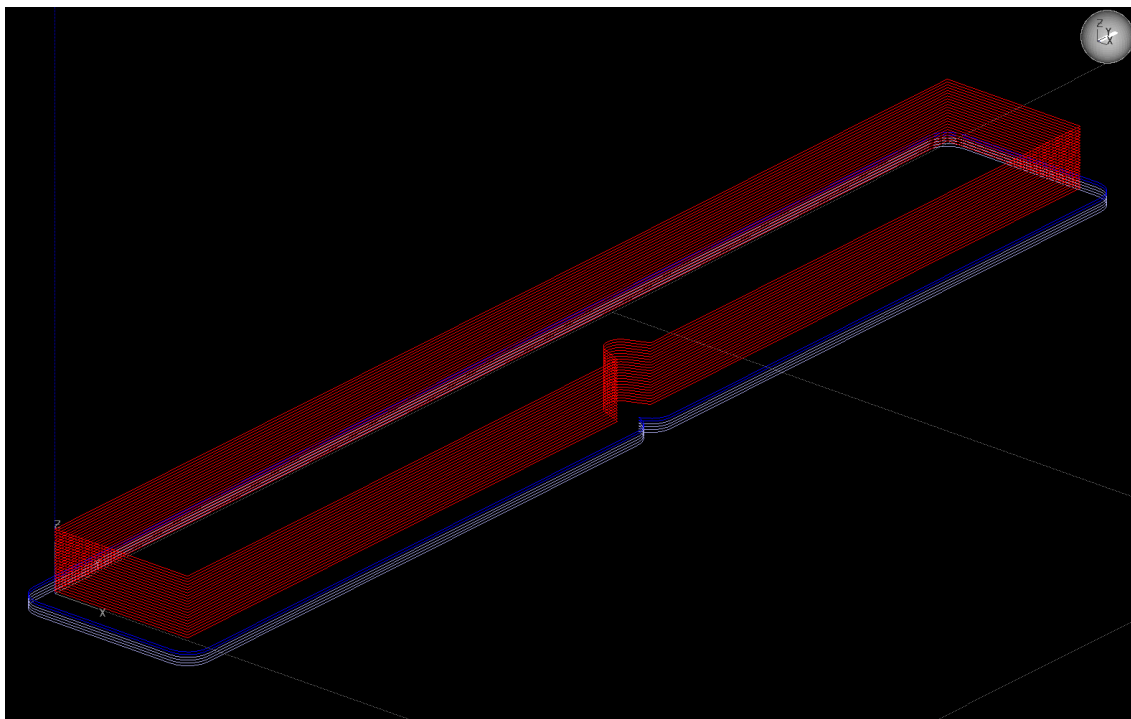
13.1.1. Tělesa pro tahovou zkoušku 1BA – tisk naležato



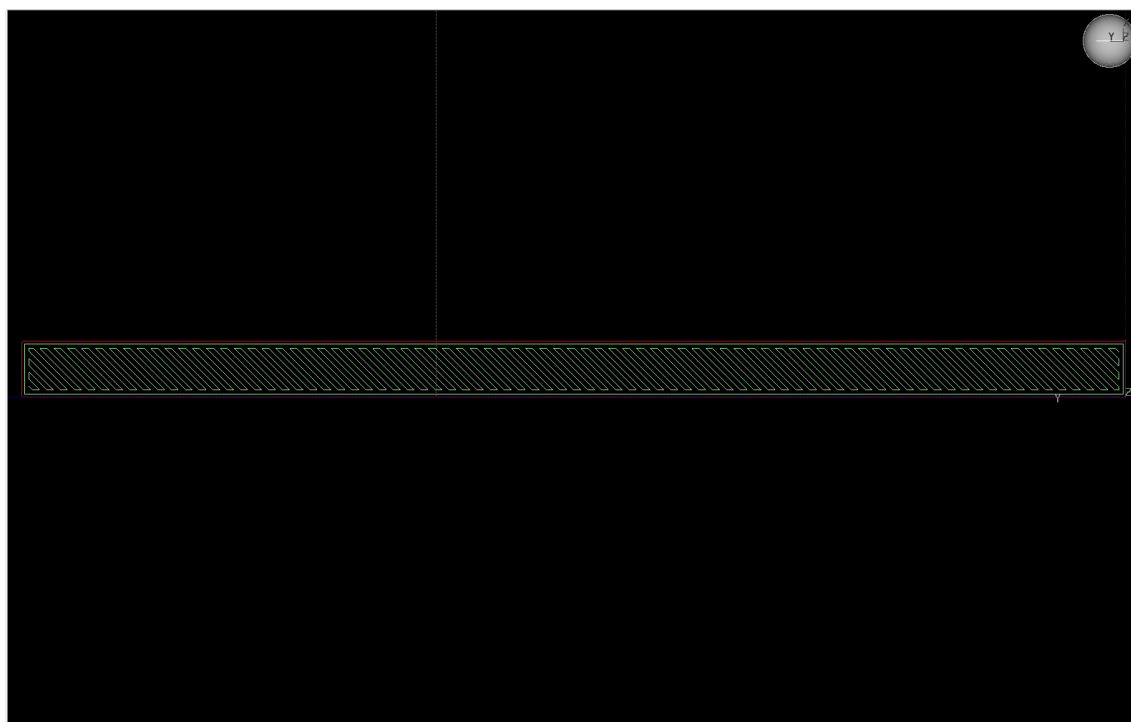
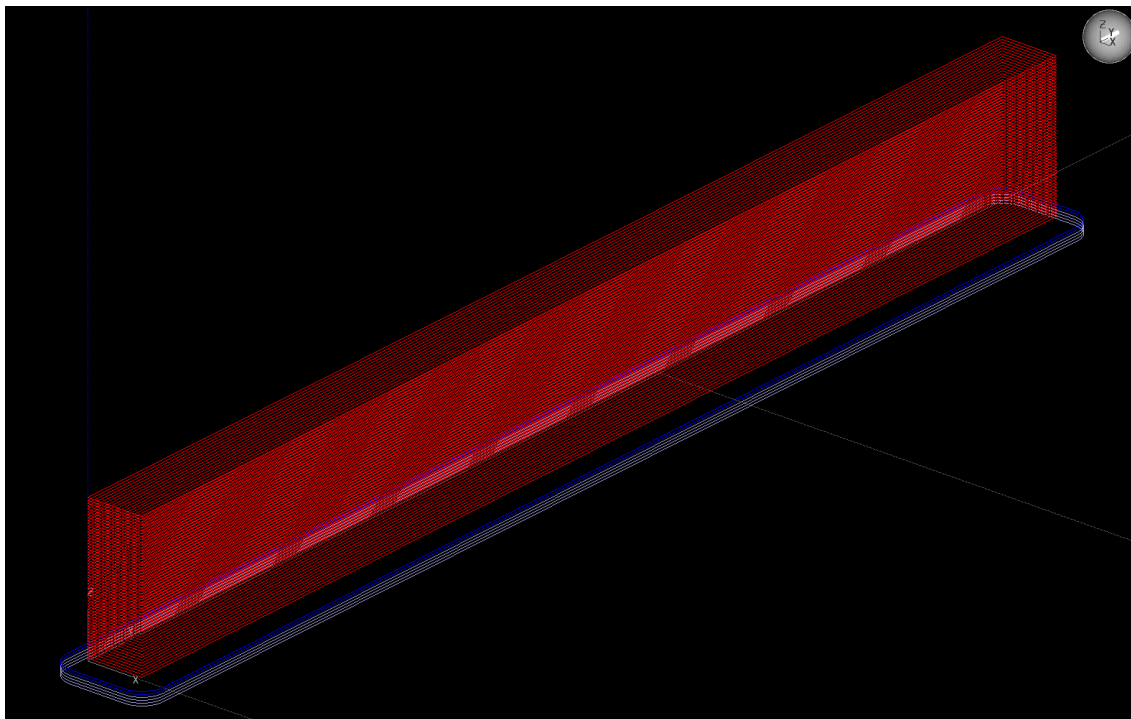
13.1.2. Tělesa pro tahovou zkoušku 1BA – tisk na výšku



13.1.3. Tělesa pro rázovou zkoušku opatřená vrubem



13.1.4. Tělesa pro rázovou zkoušku bez vrubu a tělesa pro zkoušku v ohybu

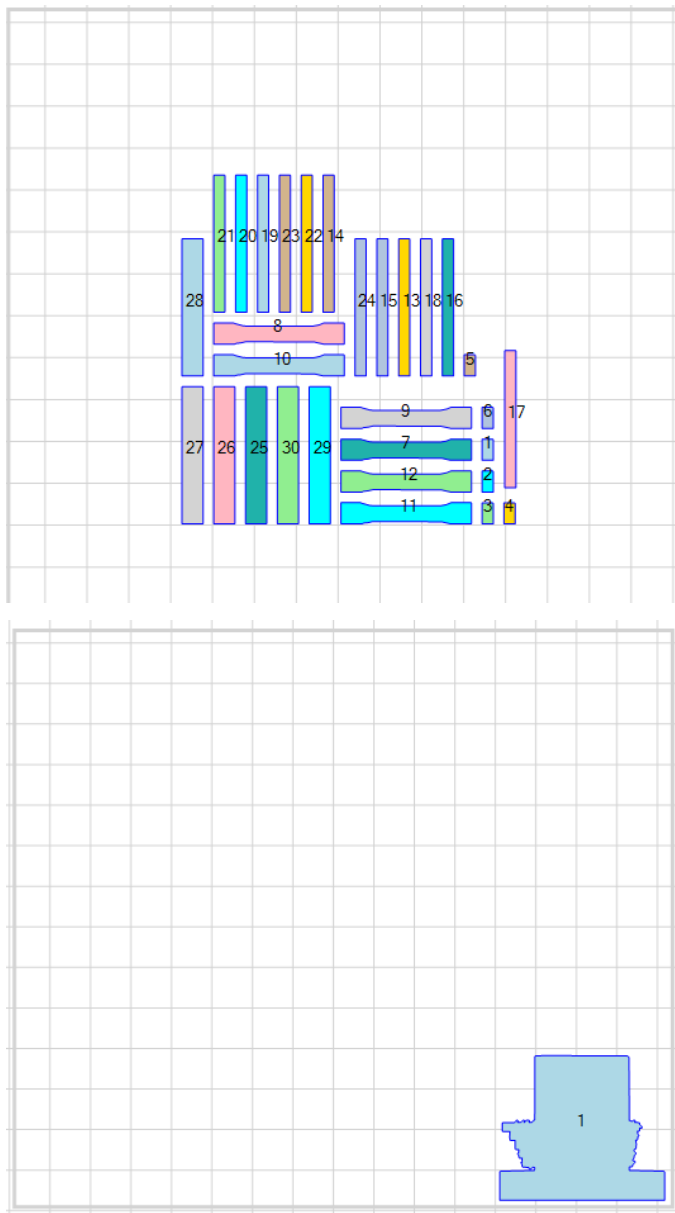


13.1.5. Umístění v Control Center

První obrázek ukazuje skládání těles pro mechanické zkoušky na fólii v Stratasys Control Center

- tělesa 1-6: Tahová zkouška na výšku
- tělesa 7-12: Tahová zkouška naležato
- tělesa 13-24: Rázová zkouška bez vrubu a ohybová zkouška
- tělesa 25-30: Rázová zkouška s vrubem

Druhý ukazuje komplexní těleso umístěné do pravého dolního rohu z důvodu eliminace vlivu chyby konstrukce tiskárny



13.2. Mechanické zkoušky

Obrázky jsou vždy v pořadí:

ABS-M30 Tecnotrade

ABS 3DFil

ABS Rychlý 3D tisk

PC-ABS Tecnotrade

PC-ABS Rychlý 3D tisk

Pokud chybí pátý snímek, jedná se o zkoušku, která nepoužívala tělesa z materiálu PC-ABS Rychlý 3D tisk.

Fotografie z mikroskopu byly pořízeny na zařízení Nikon SMZ1500.

13.2.1. Modelové vzorky vcelku



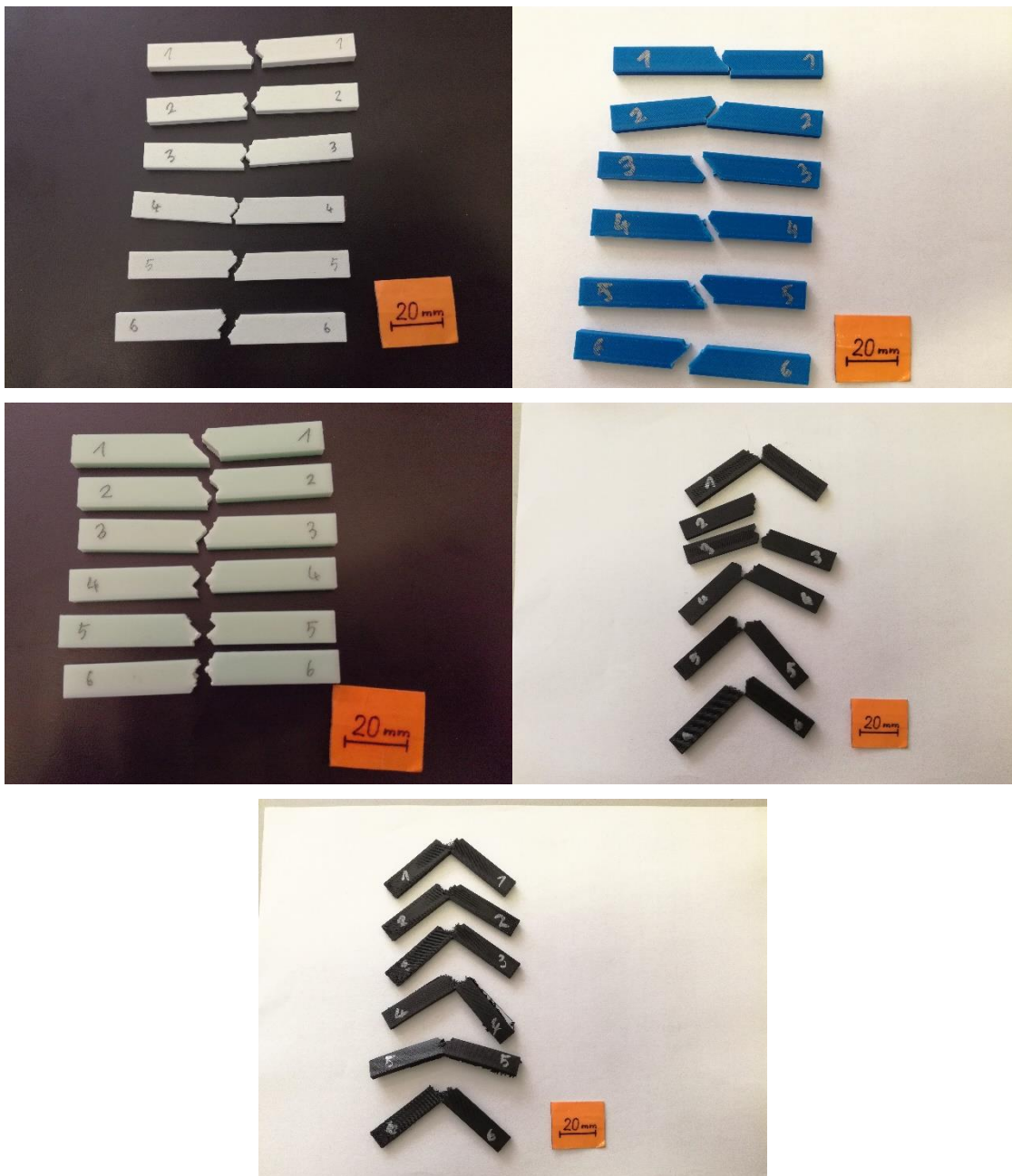
13.2.2. Vzorky tahová zkouška vzorků tištěných na šířku



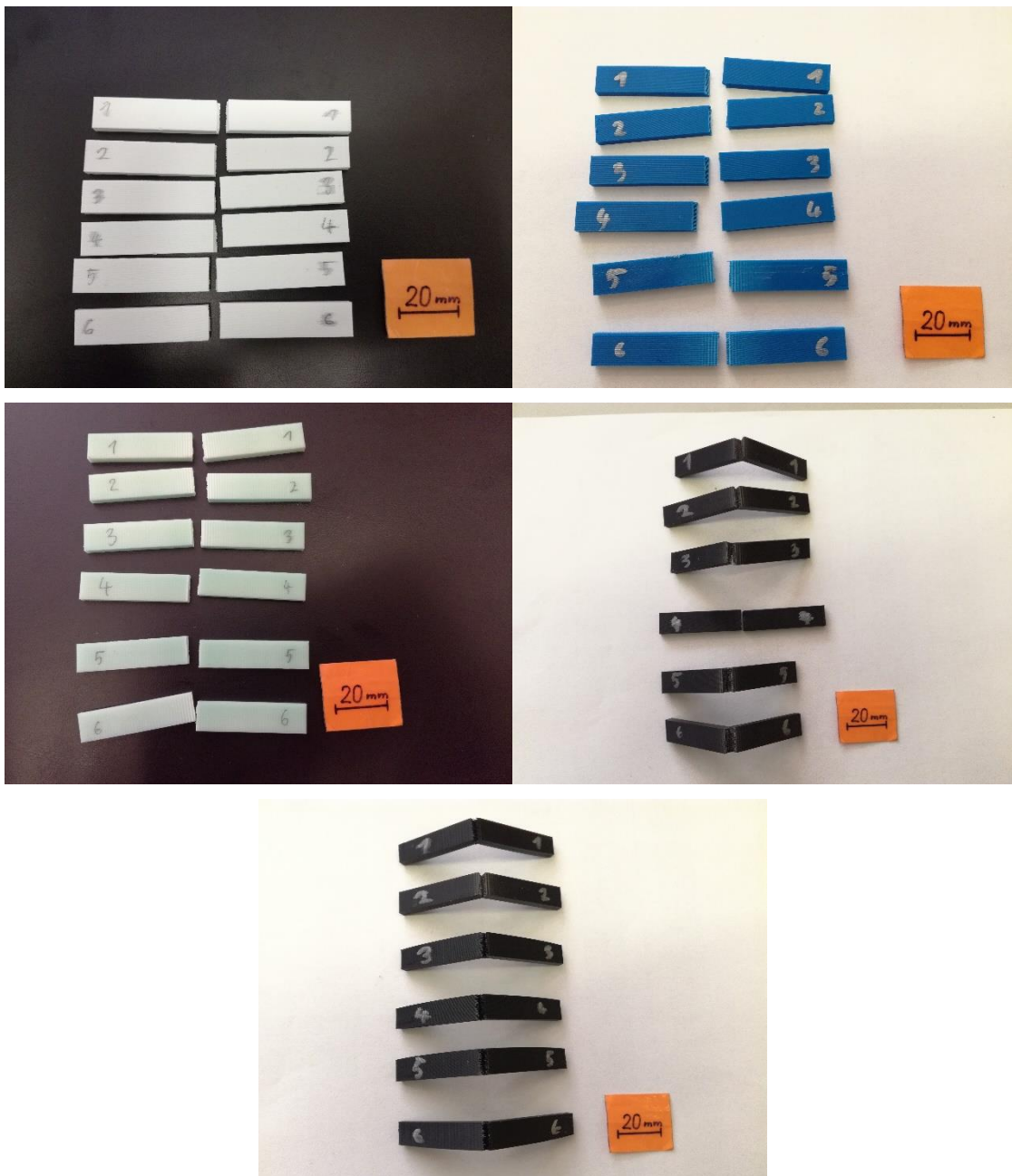
13.2.3. Vzorky tahová zkouška vzorků tištěných na výšku



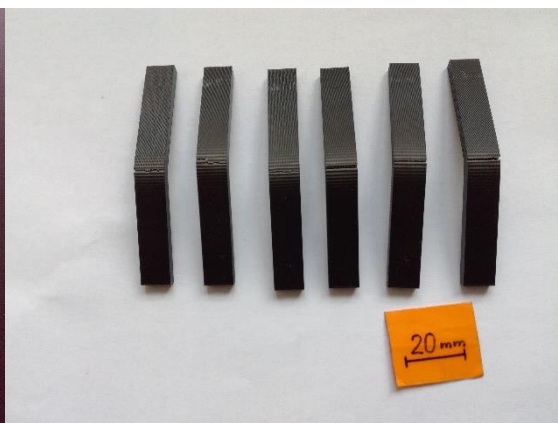
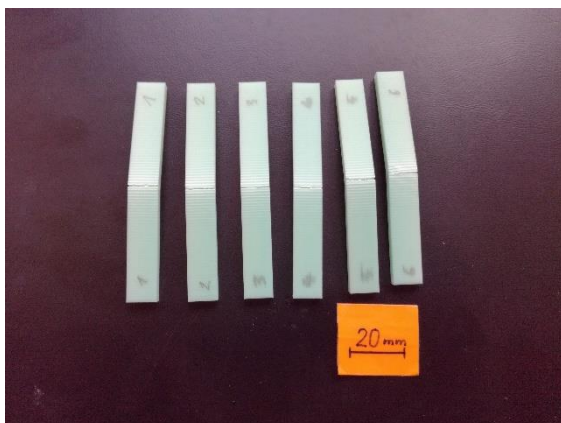
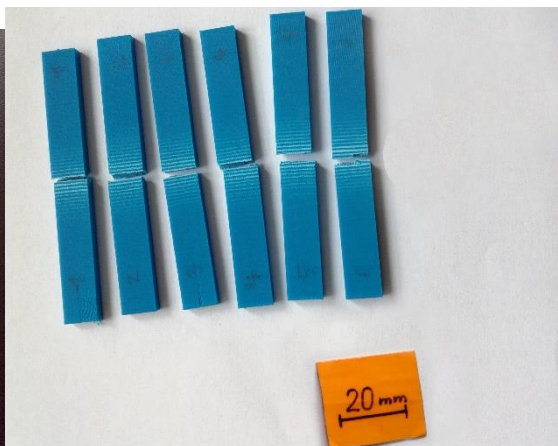
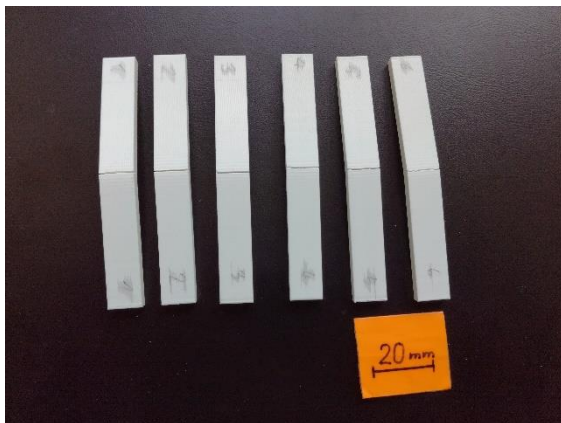
13.2.4. Vzorky zkouška rázové houževnatosti s vrubem



13.2.5. Vzorky zkouška rázové houževnatosti bez vrubu



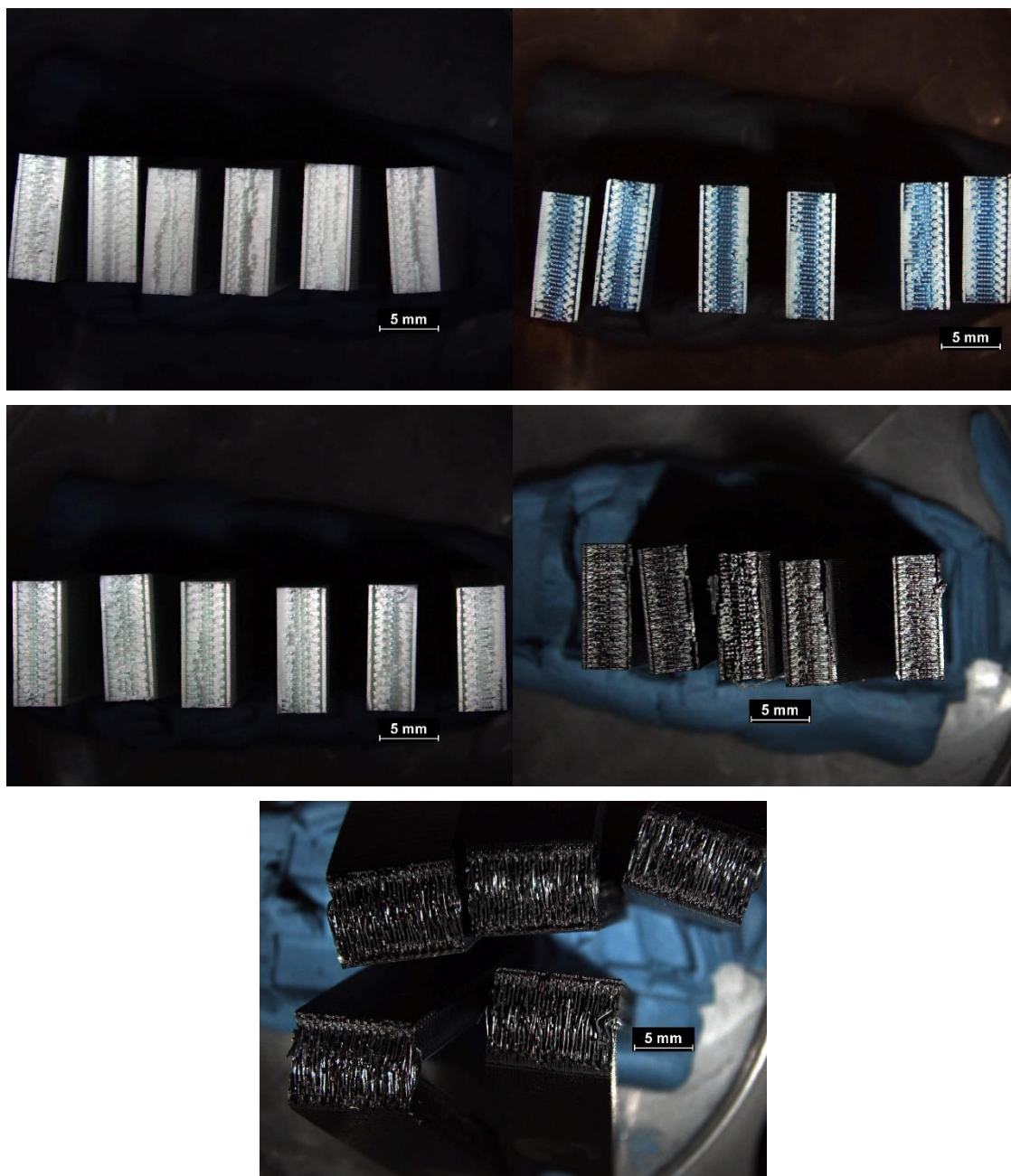
13.2.6. Vzorky ohybová zkouška



13.2.7. Detail na lom – zkouška rázové houževnatosti s vrubem



13.2.8. Detail na lom – zkouška rázové houževnatosti bez vrubu



13.3. Vyhodnocení z tomografu

Obrázky jsou vždy vkládány v pořadí:

ABS Rychlý 3D tisk

ABS-M30 Tecnotrade

ABS 3DFil

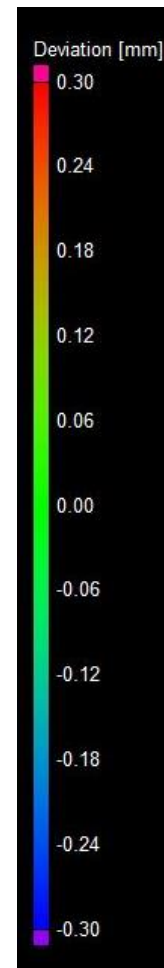
PC-ABS Tecnotrade

PC-ABS Rychlý 3D tisk

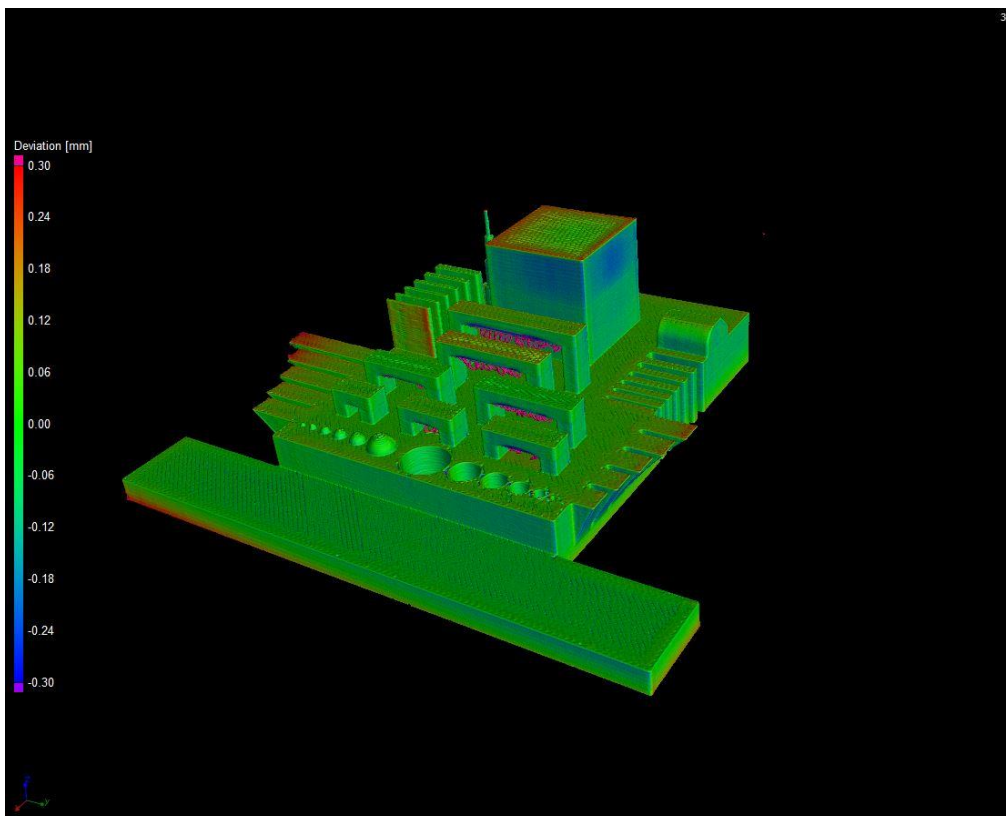
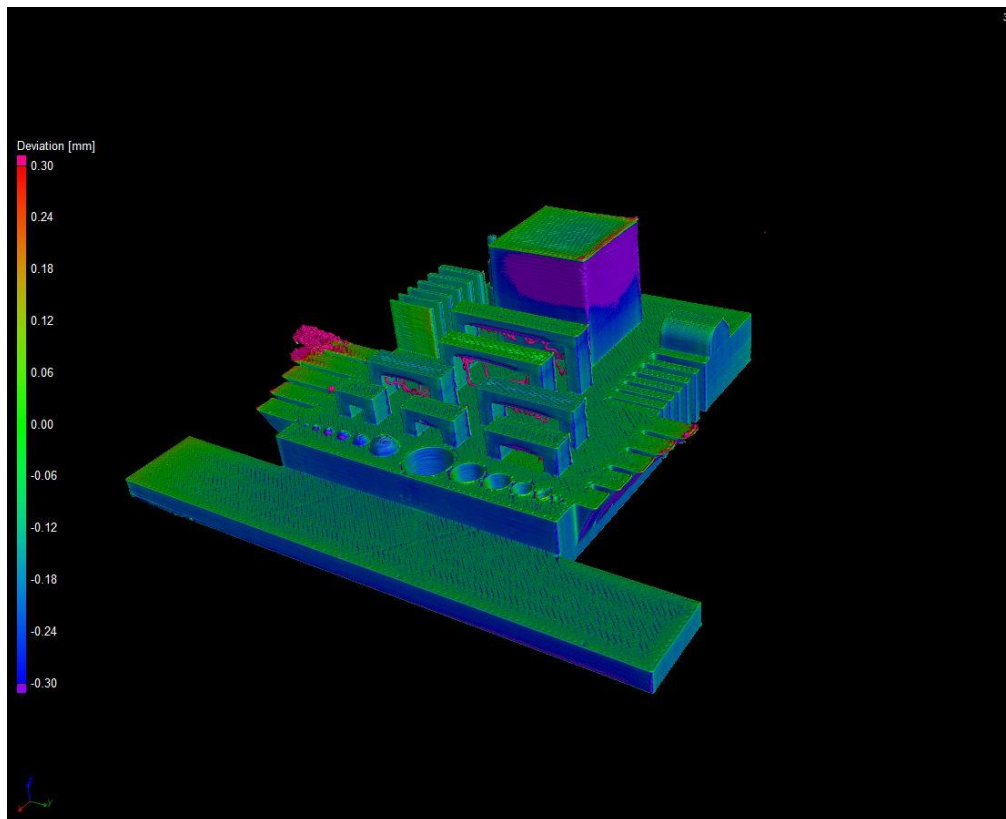
Pokud chybí pátý obrázek, znamená to, že v dané zkoušce nebylo použito těleso z PC-ABS Rychlý 3D tisk.

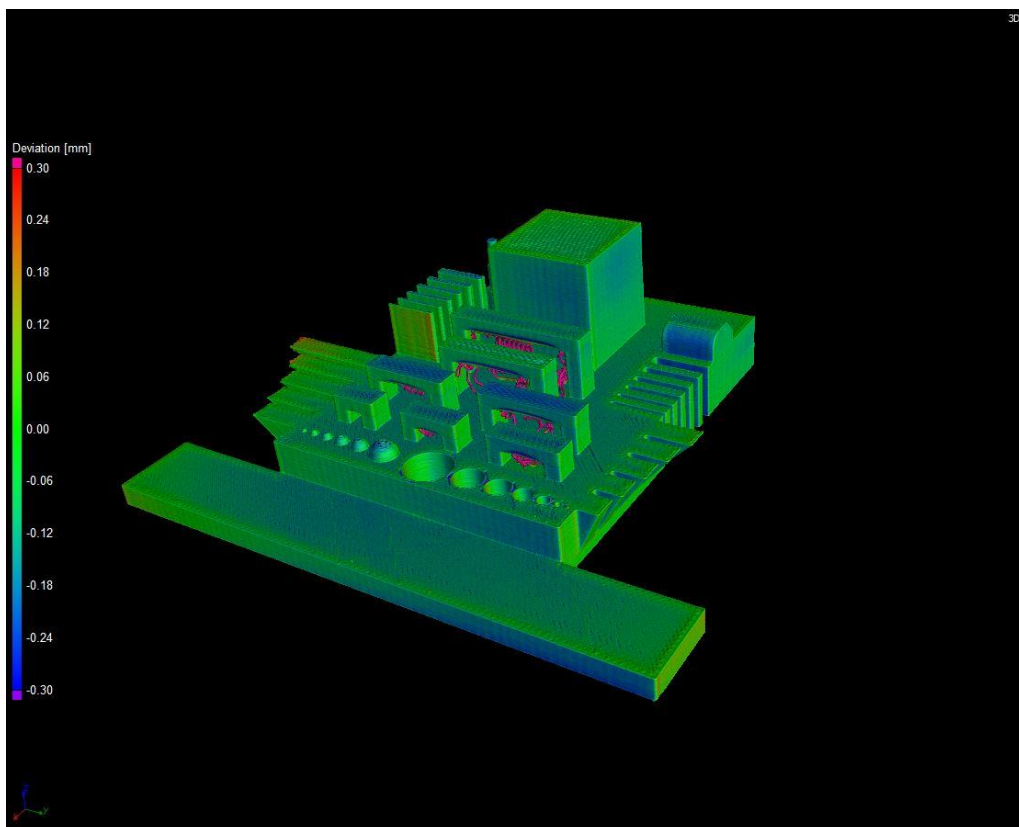
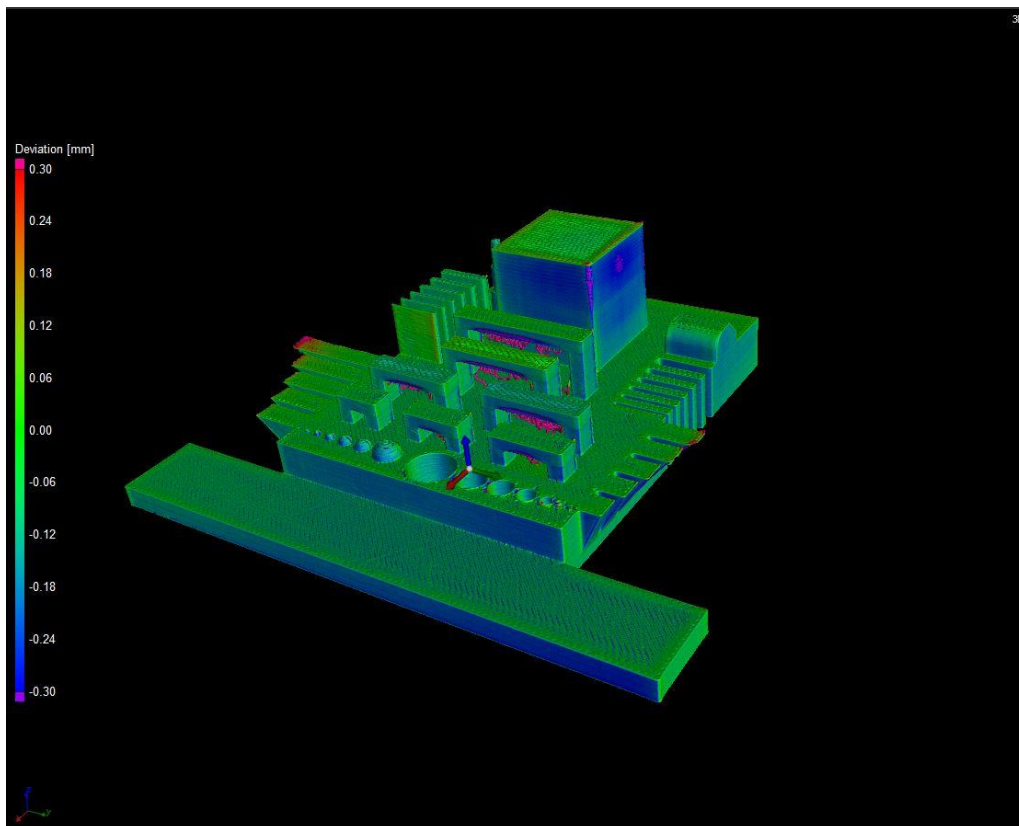
U některých zkoušek jsou tělesa vybarvena podle legendy – jak blízce odpovídá rozměr vytištěného tělesa rozměrům modelu, který byl k tisku použit. Srovnání souřadnic těles v programu pro analýzu dat z tomografu VGSTUDIO MAX bylo provedeno metodou 3-2-1 do levého dolního rohu tělesa. Hodnoty nad přesah 0,3 mm jsou značeny růžově, pod - 0,3 mm fialově (viz legenda vpravo).

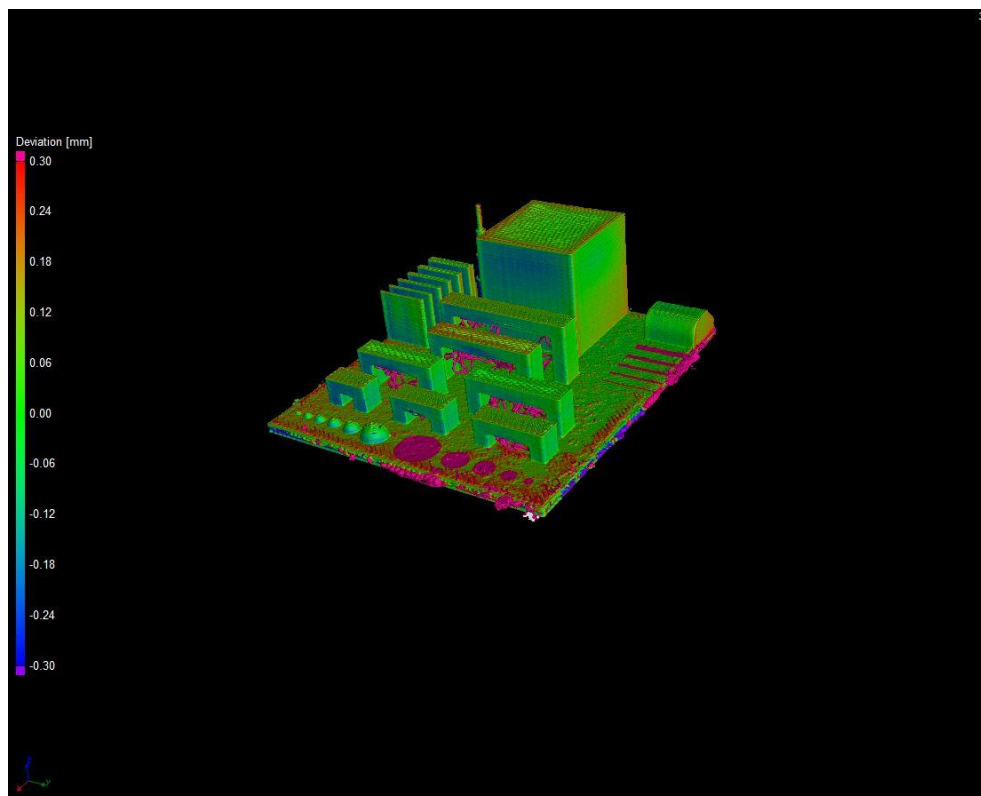
Kontext ke každému obrázku je zmíněn v odpovídající sekci kapitoly 6.1.



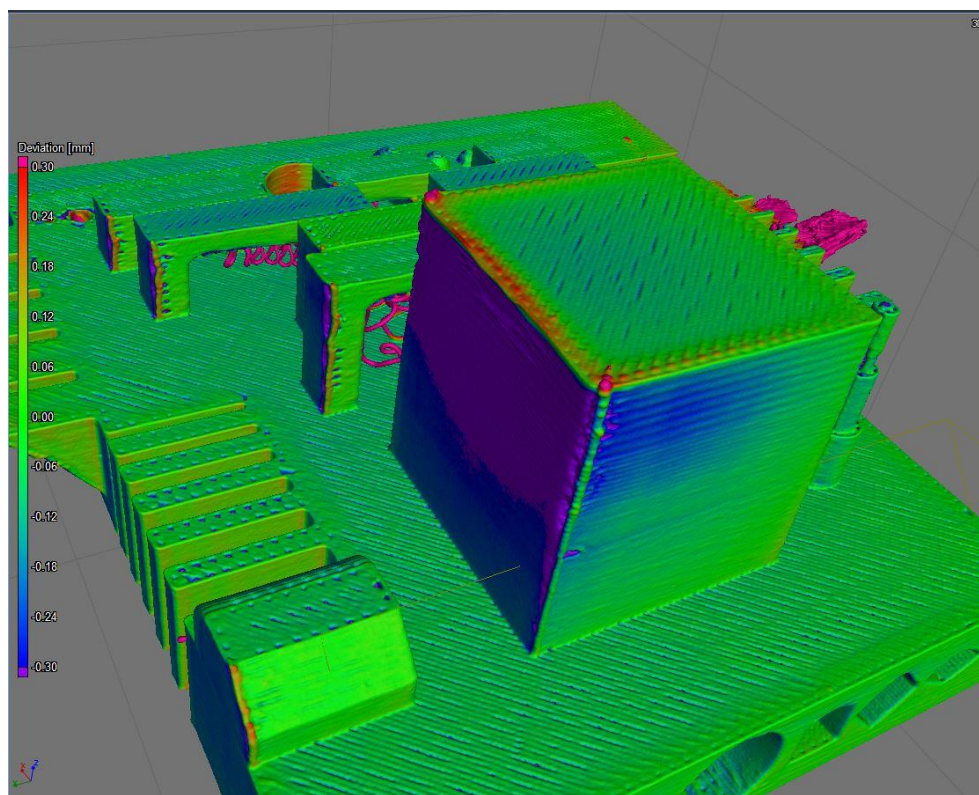
13.3.1. Celkový pohled na tělesa

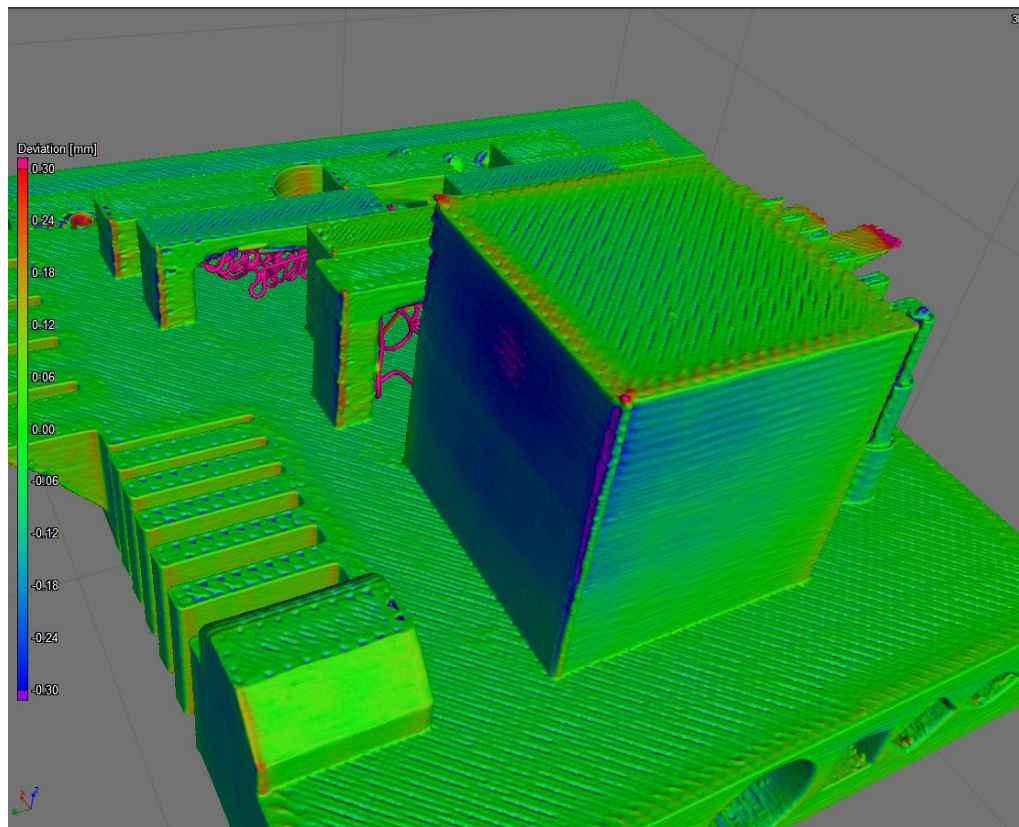
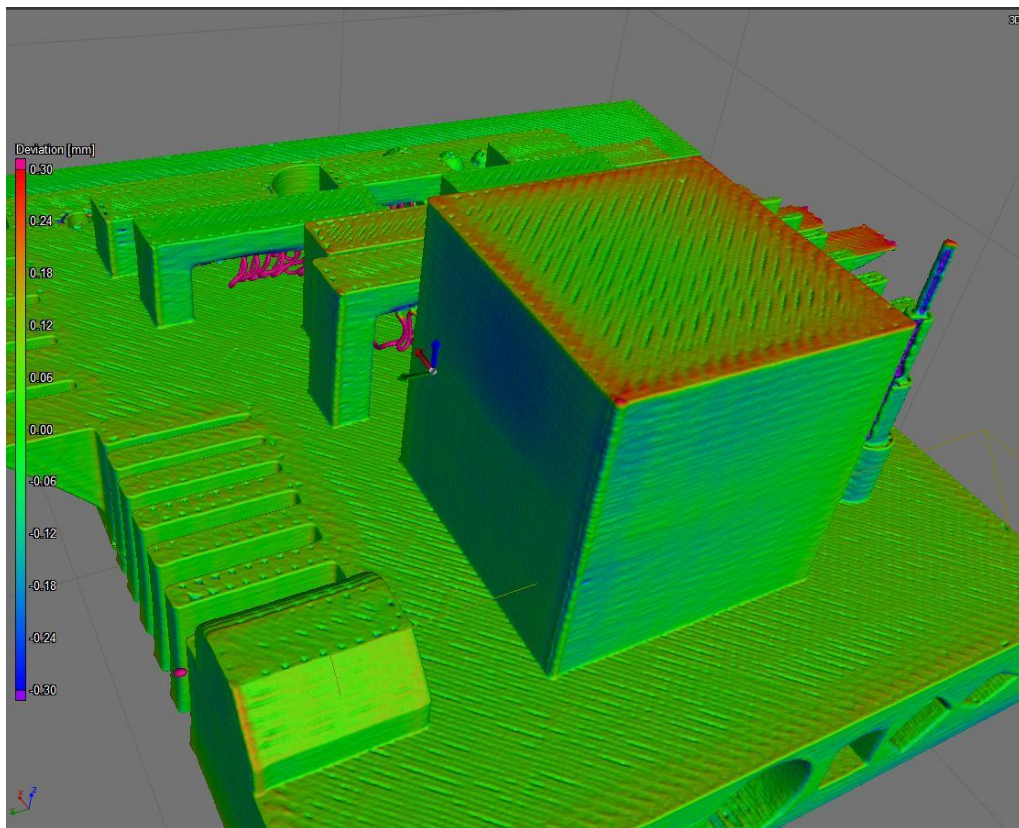


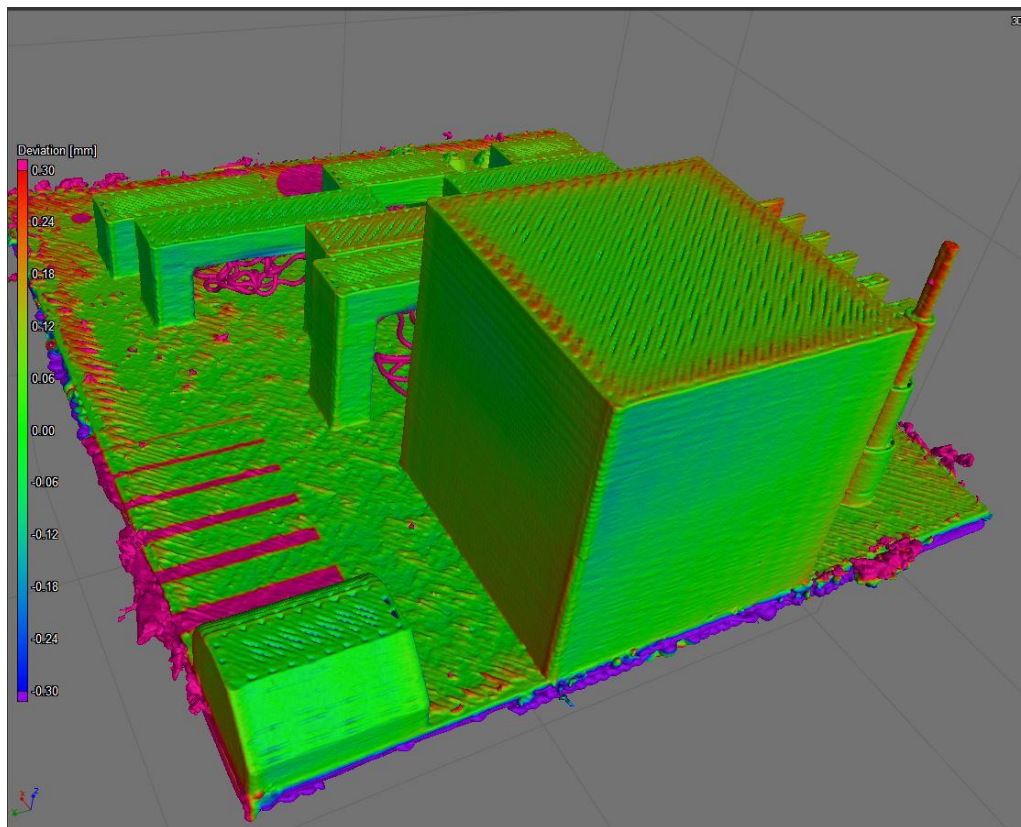
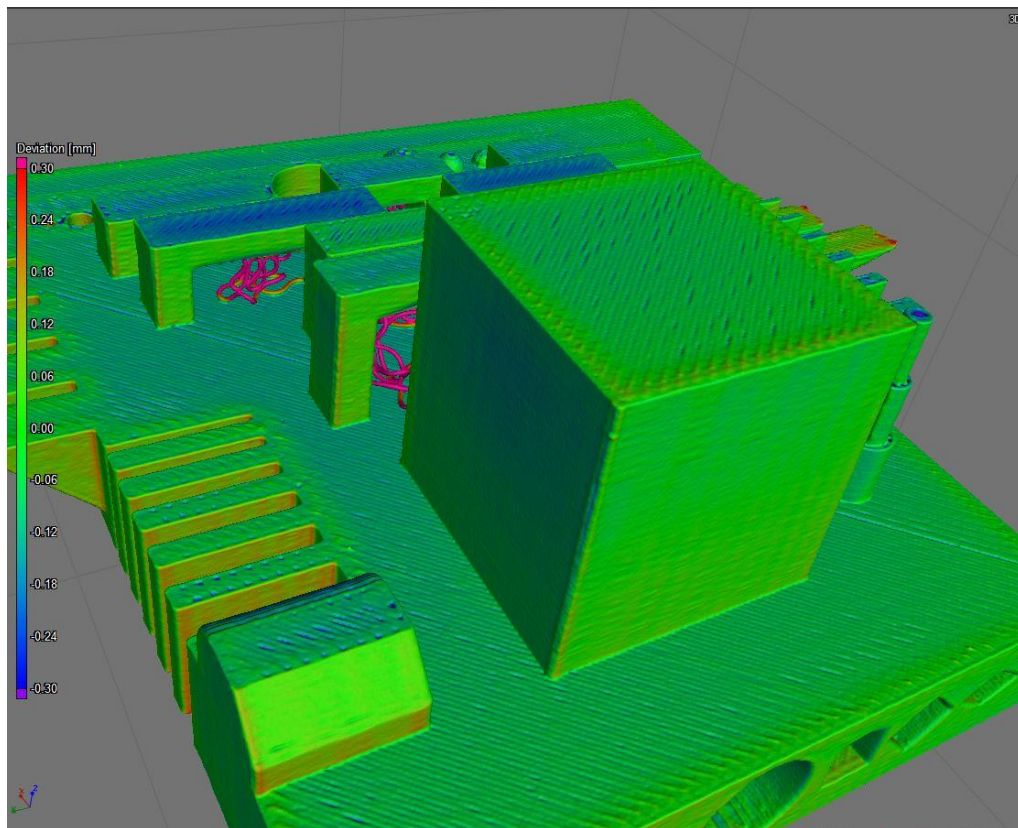


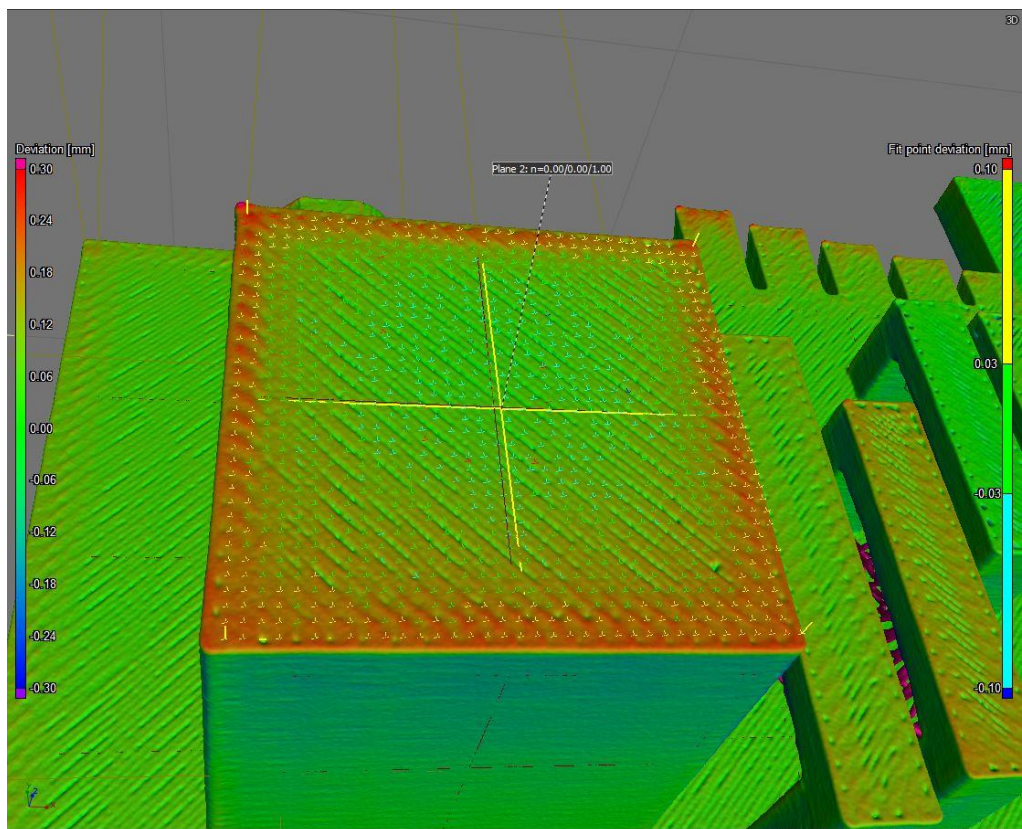
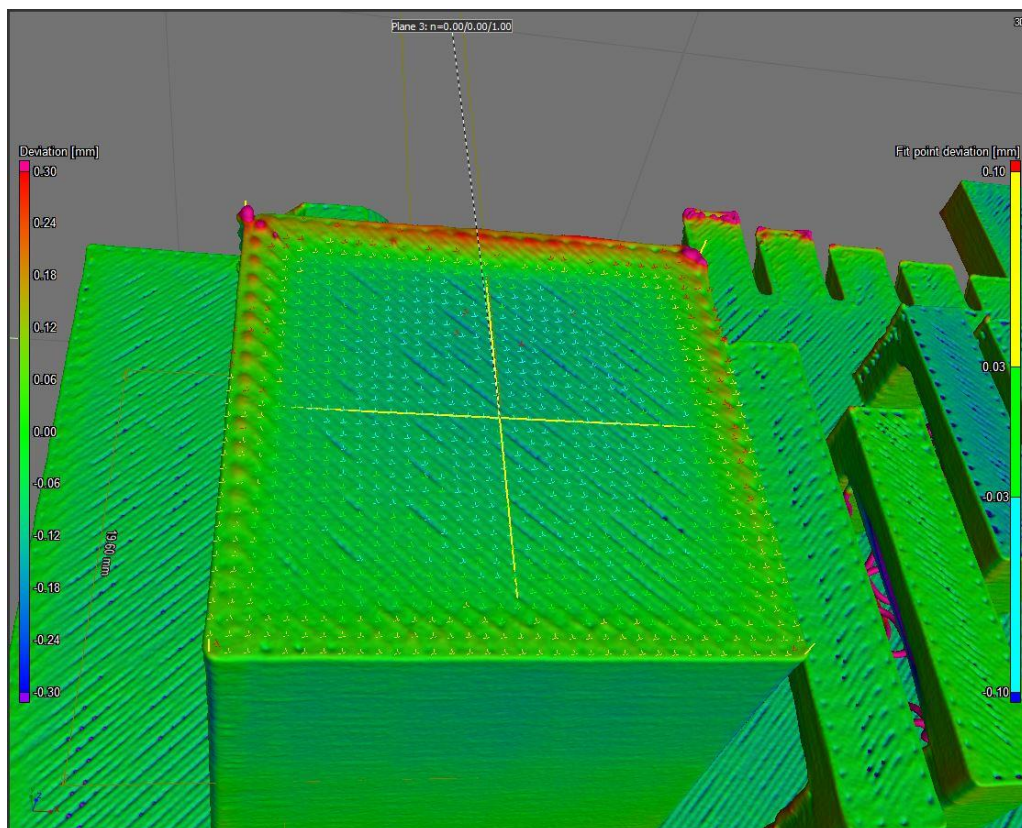


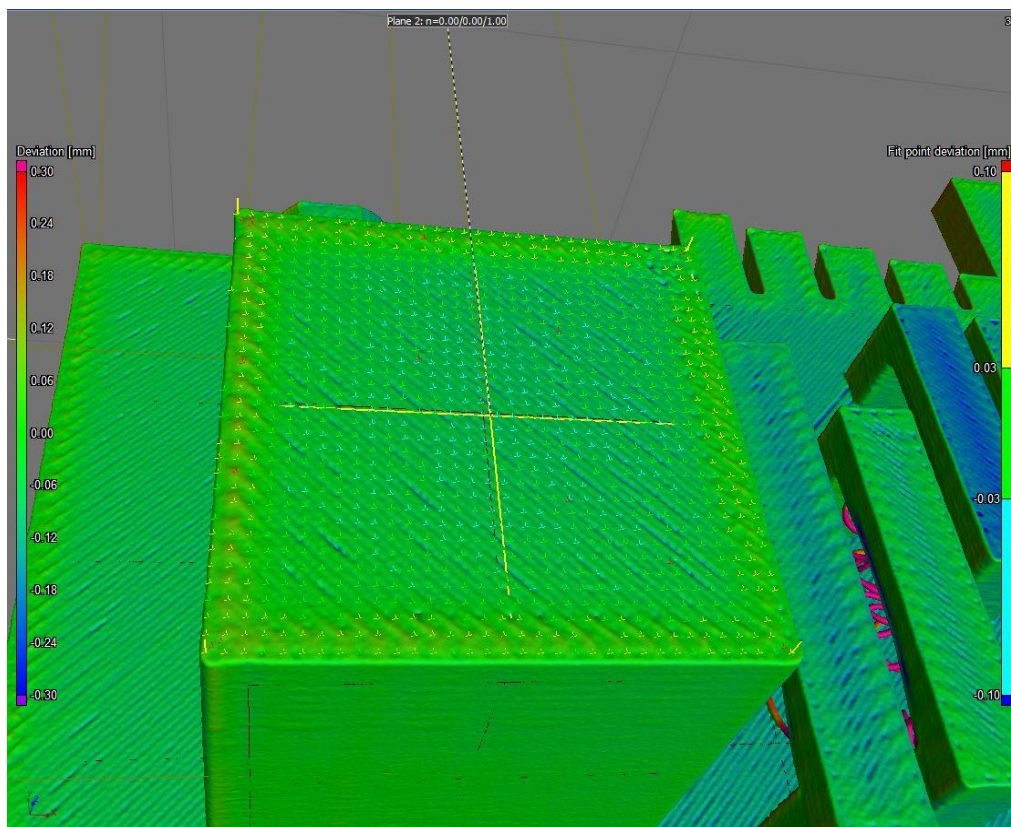
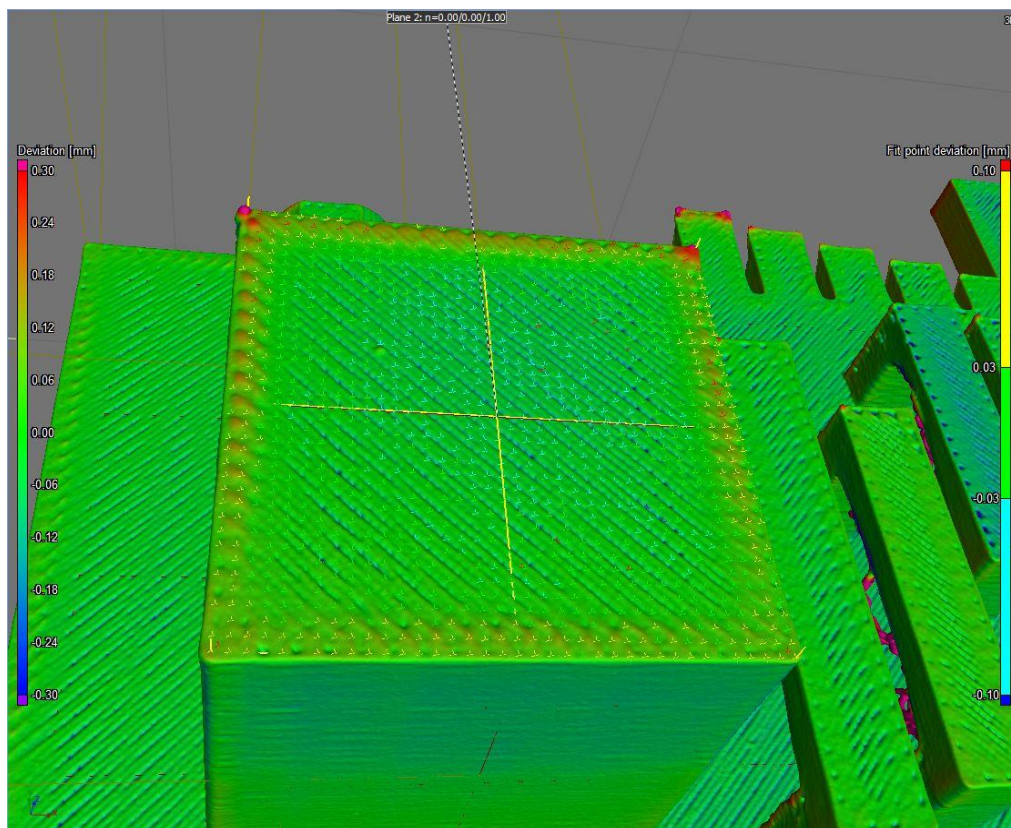
13.3.2. Jednotlivé těleso

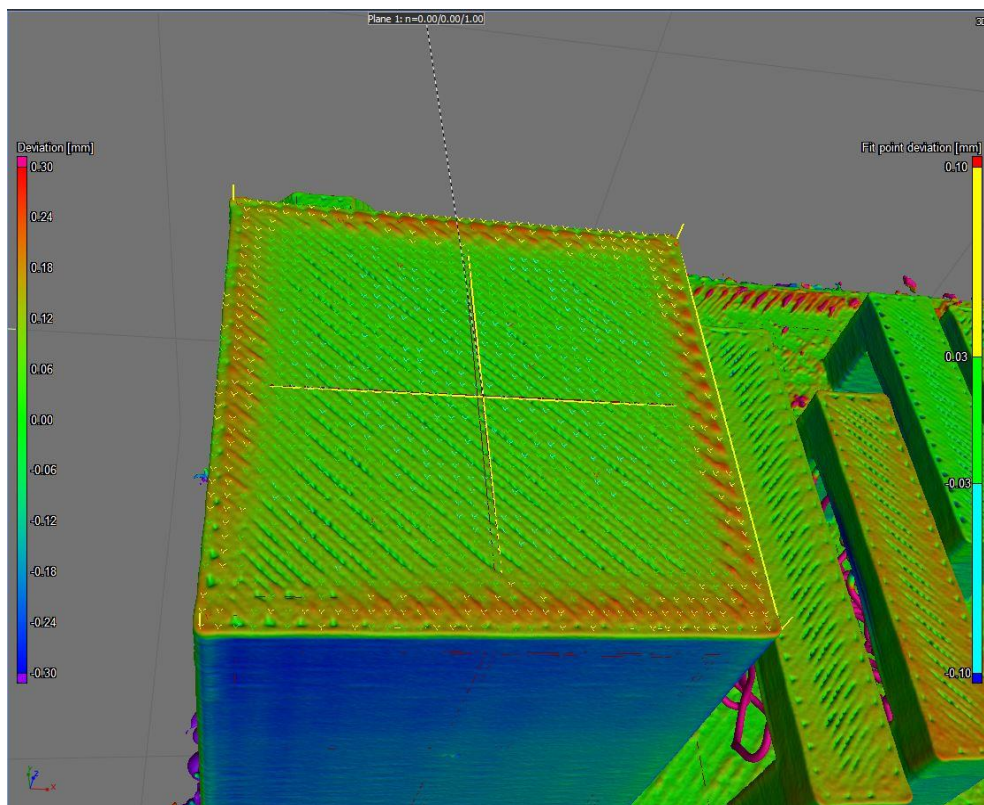




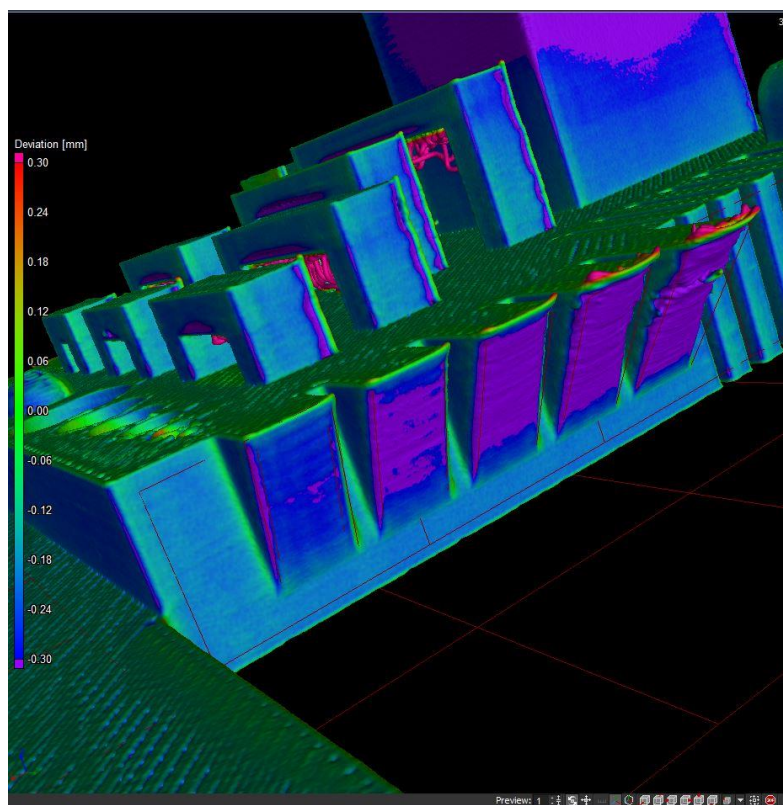


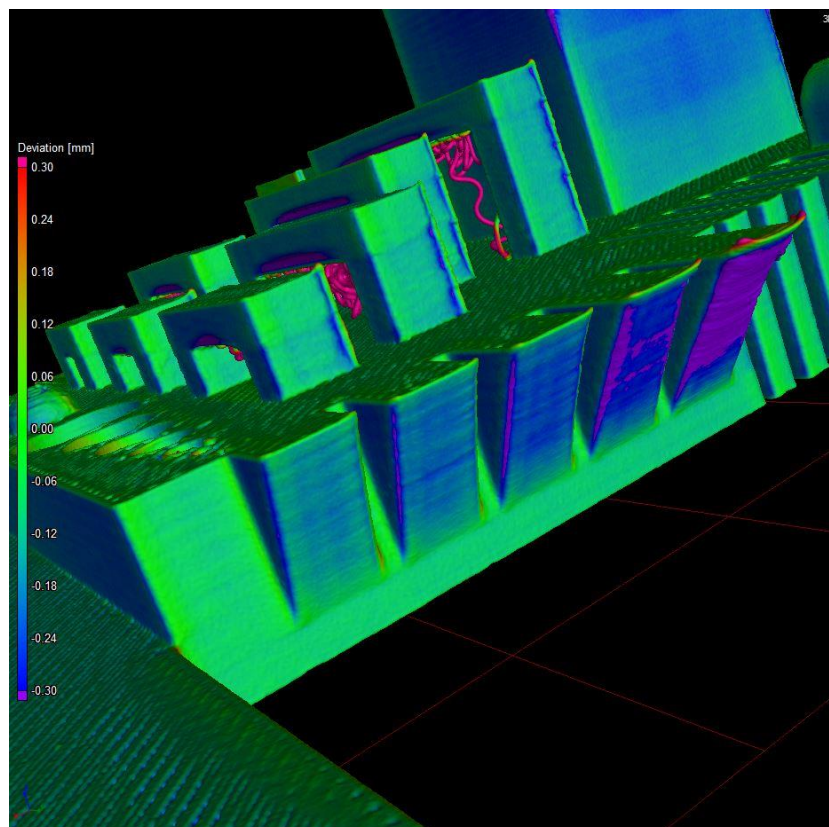
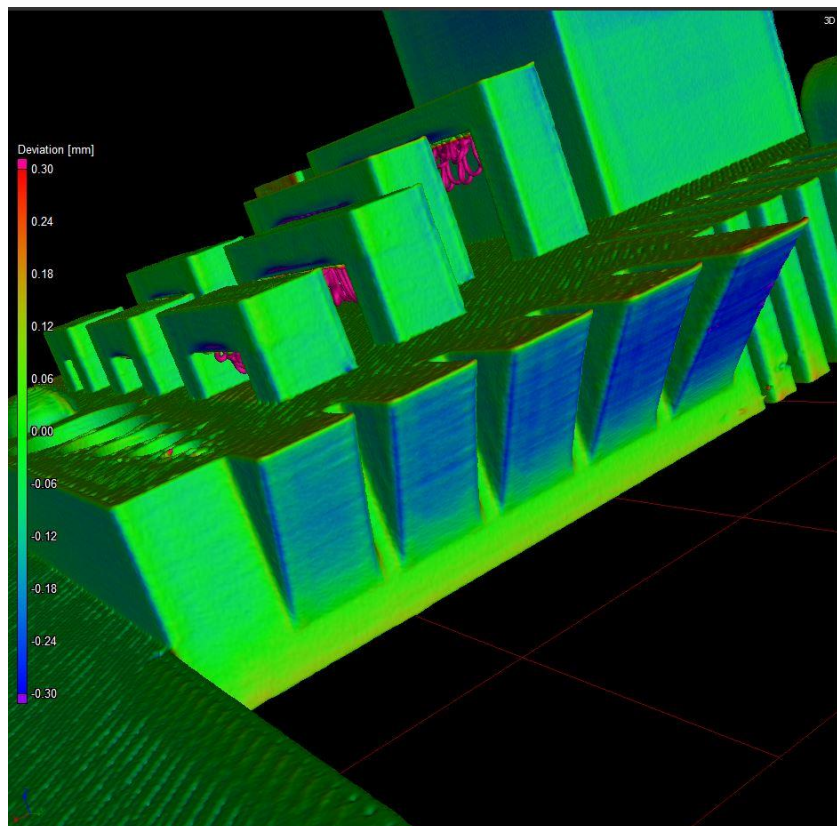


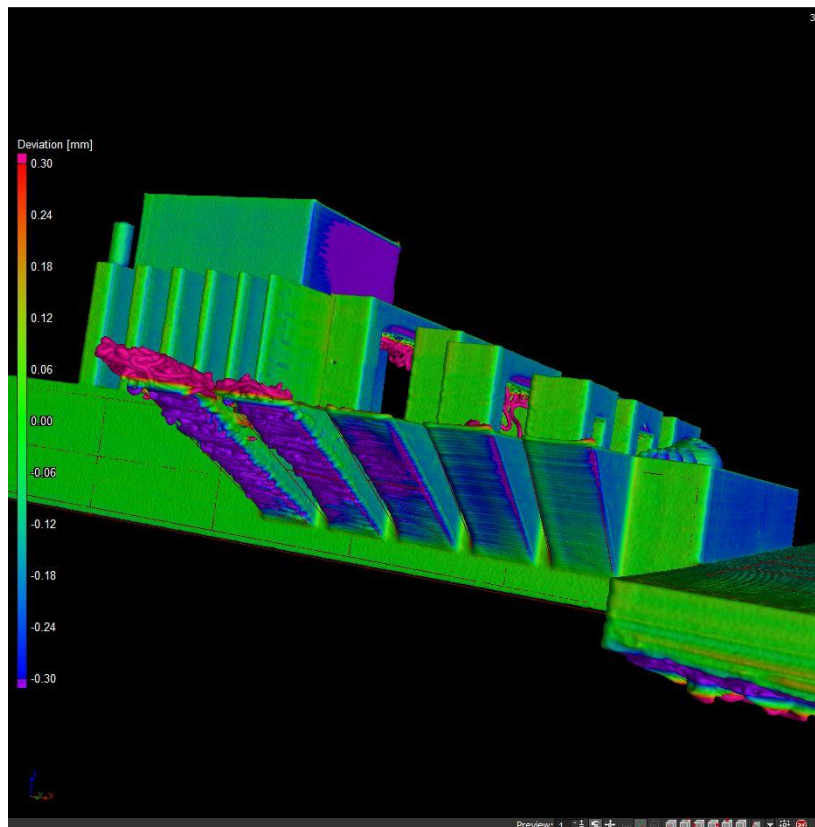
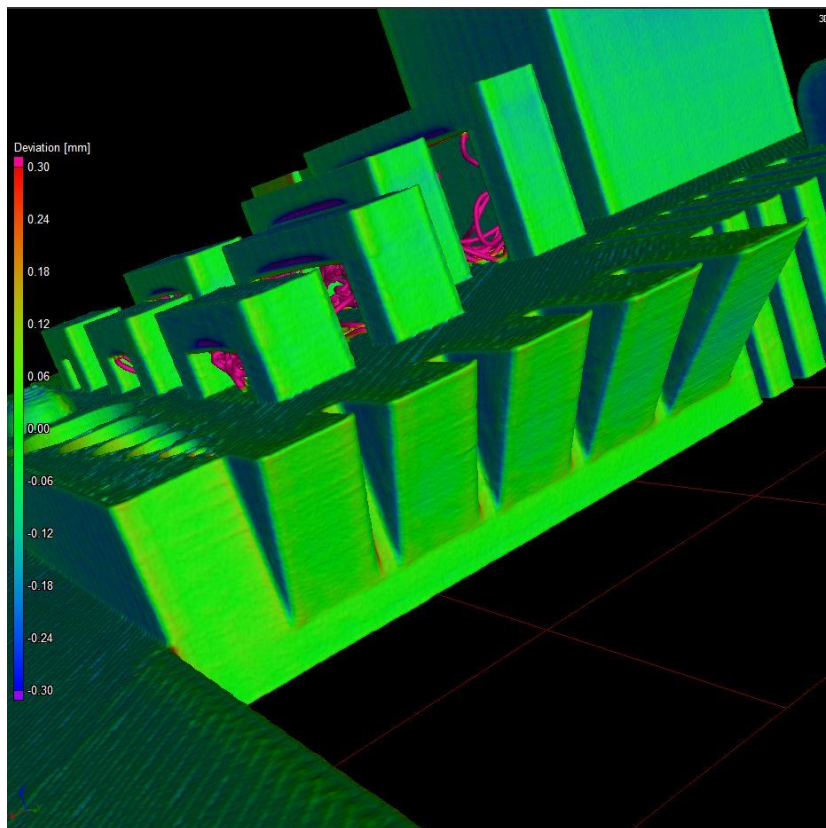


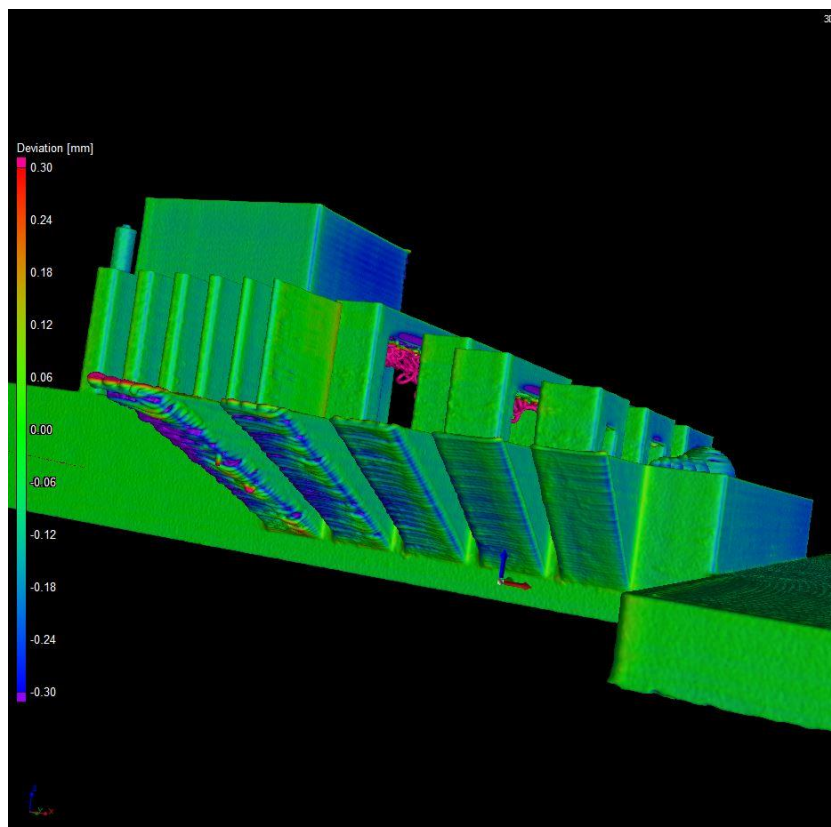
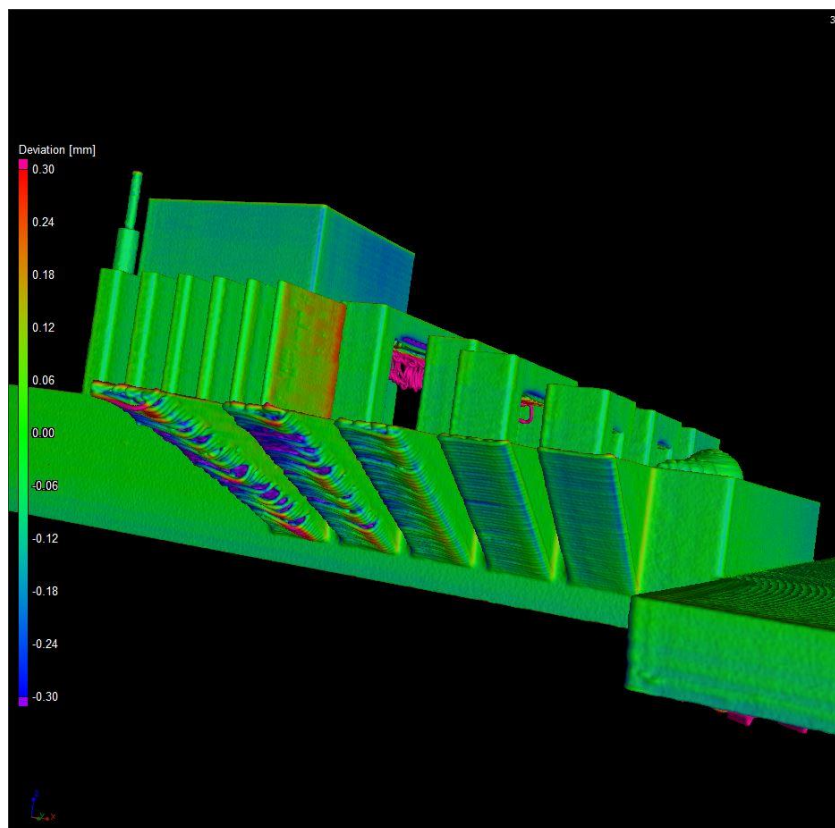


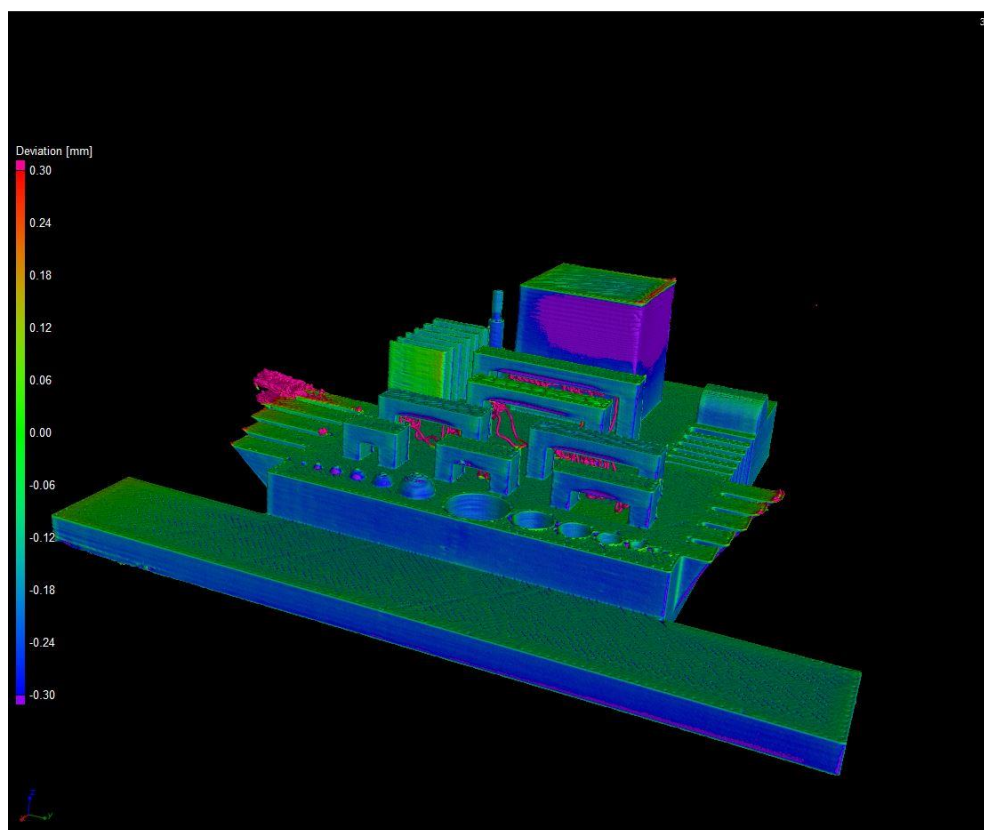
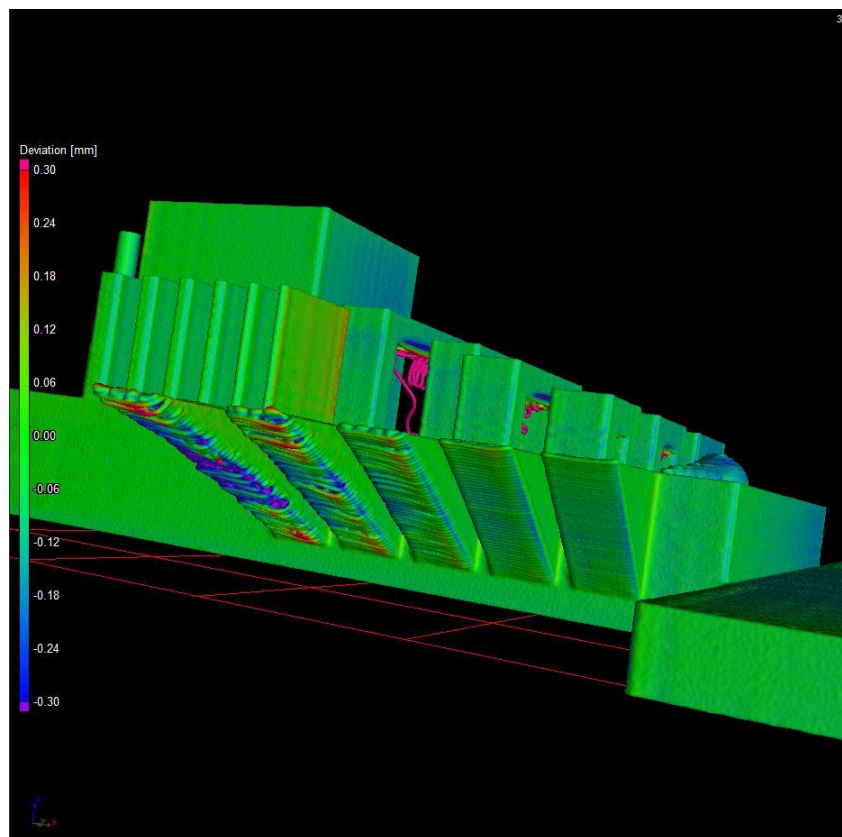
13.3.3. Samonosné úhly

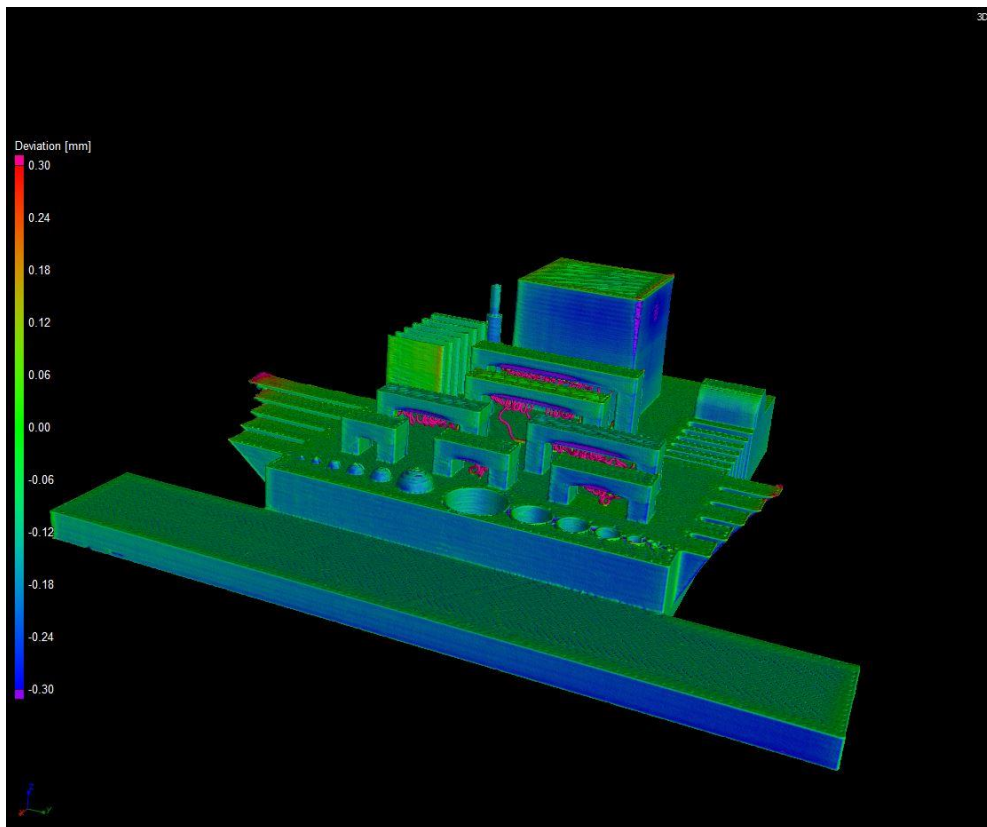
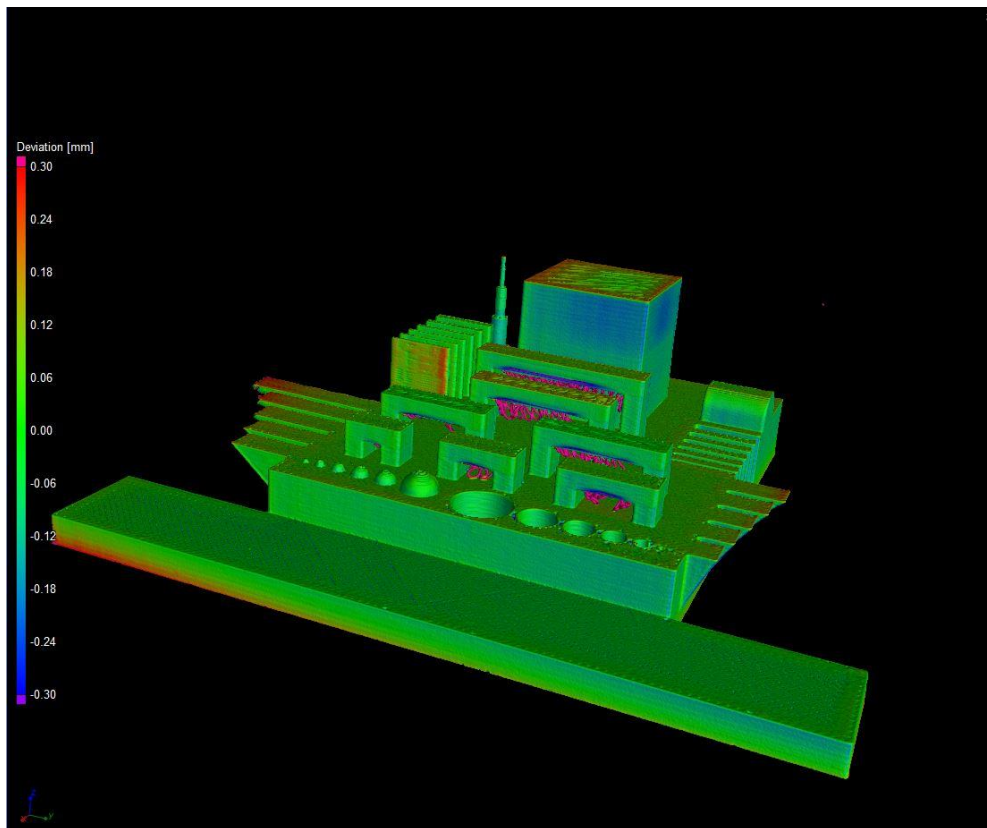


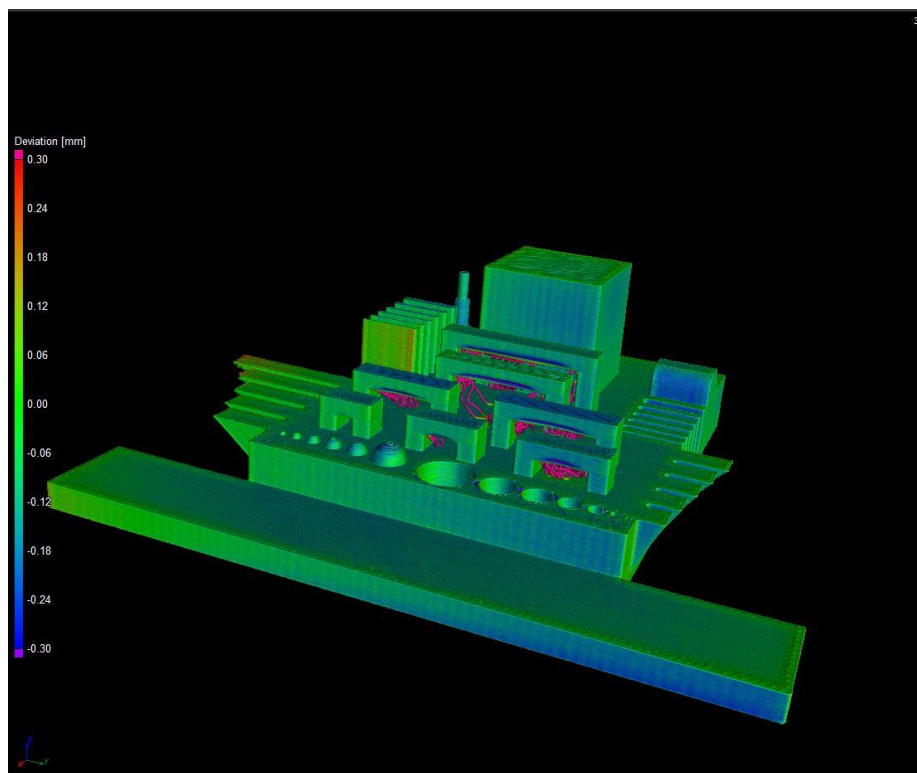




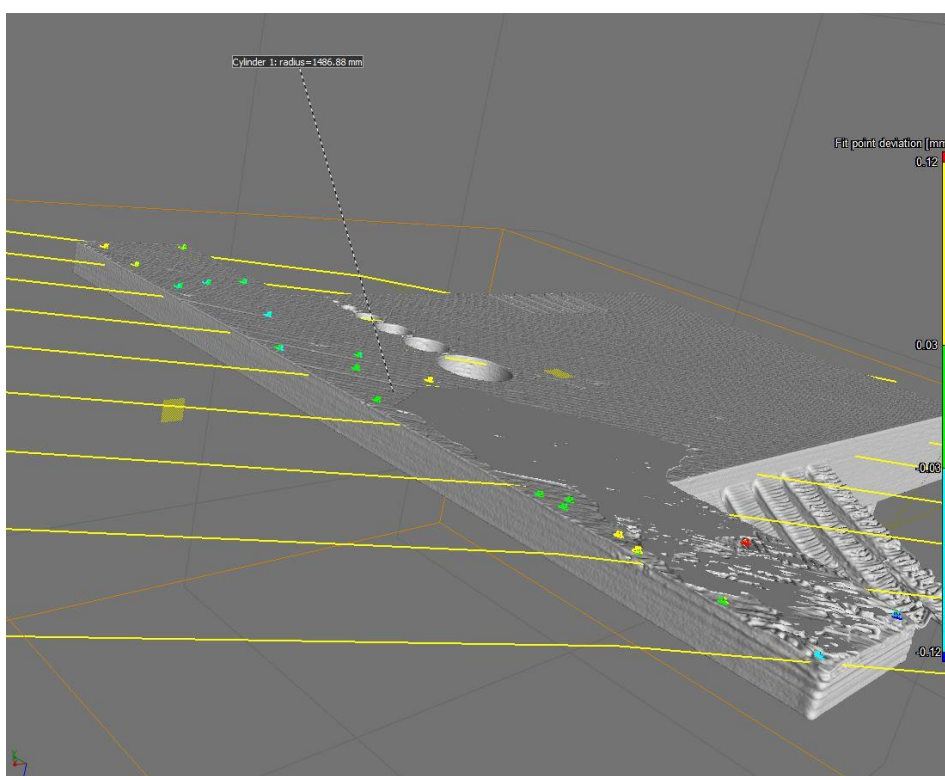


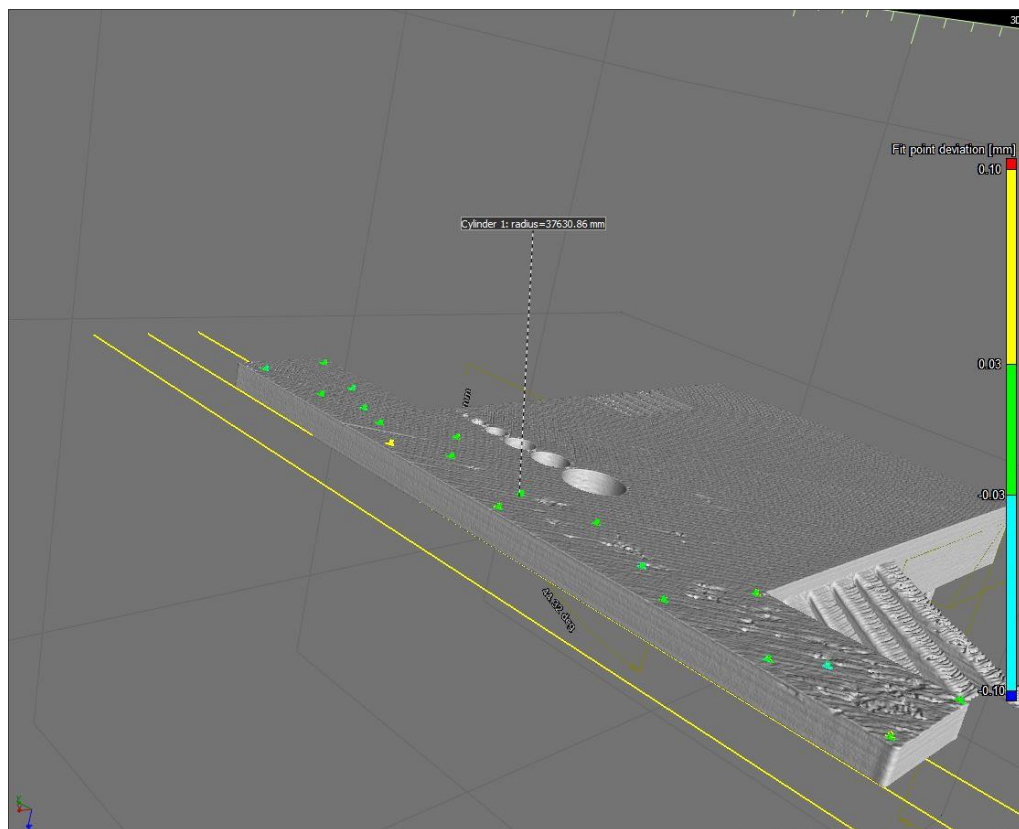
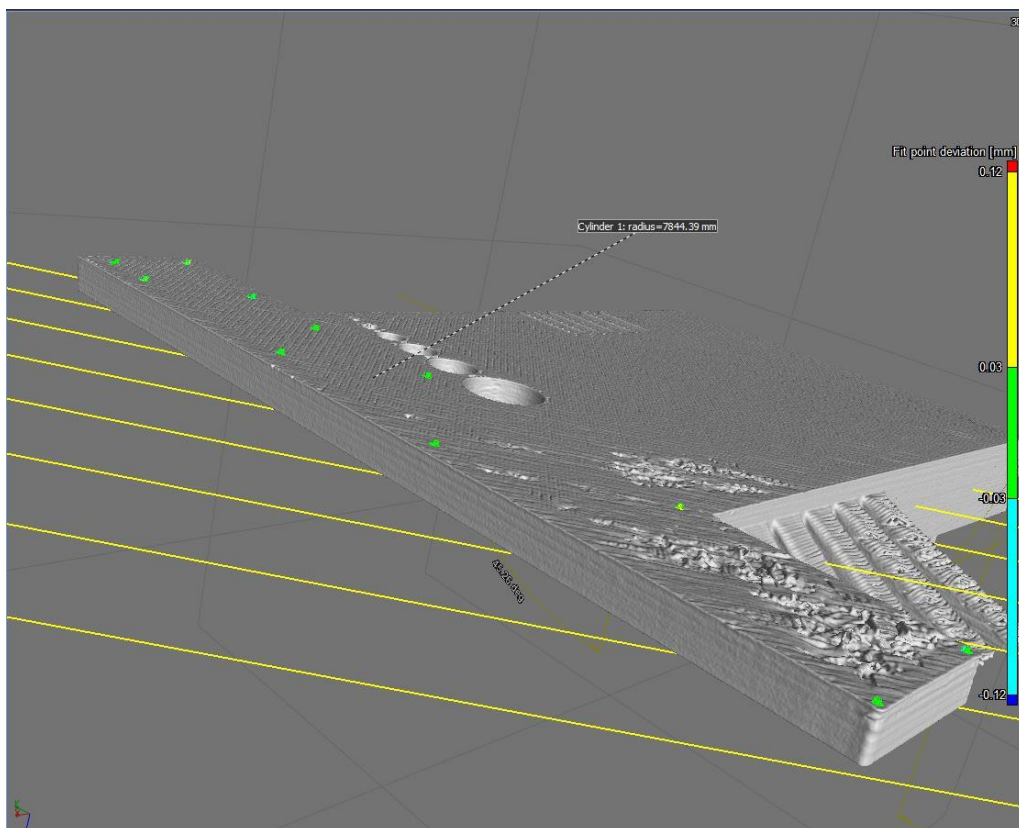


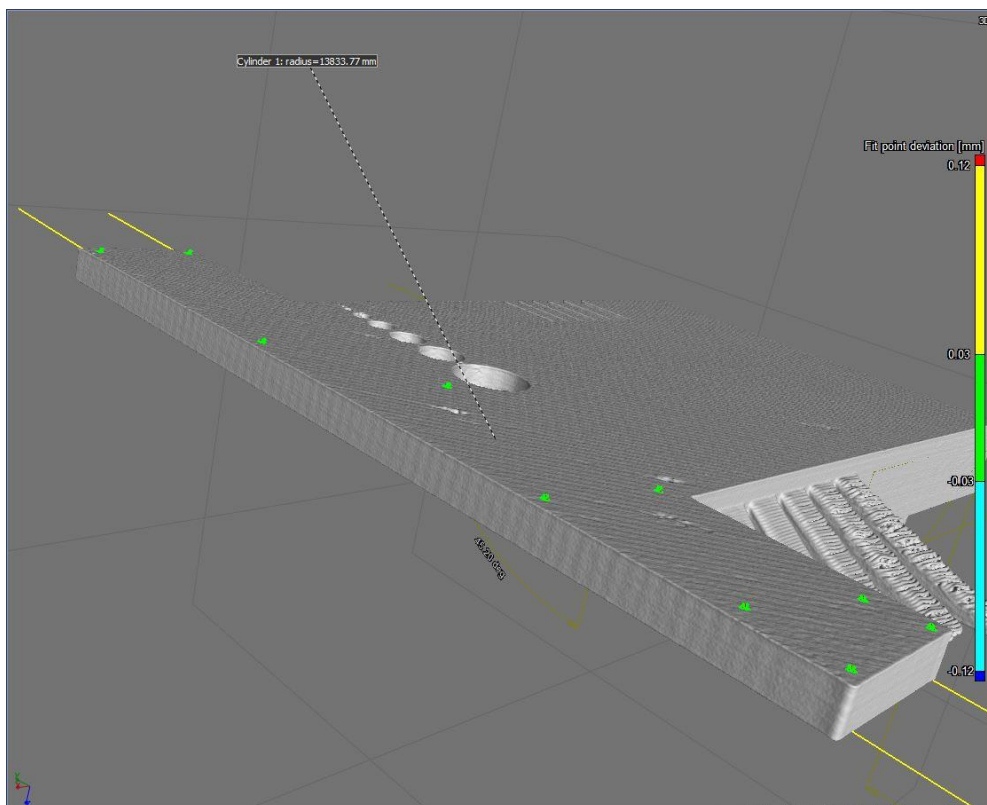




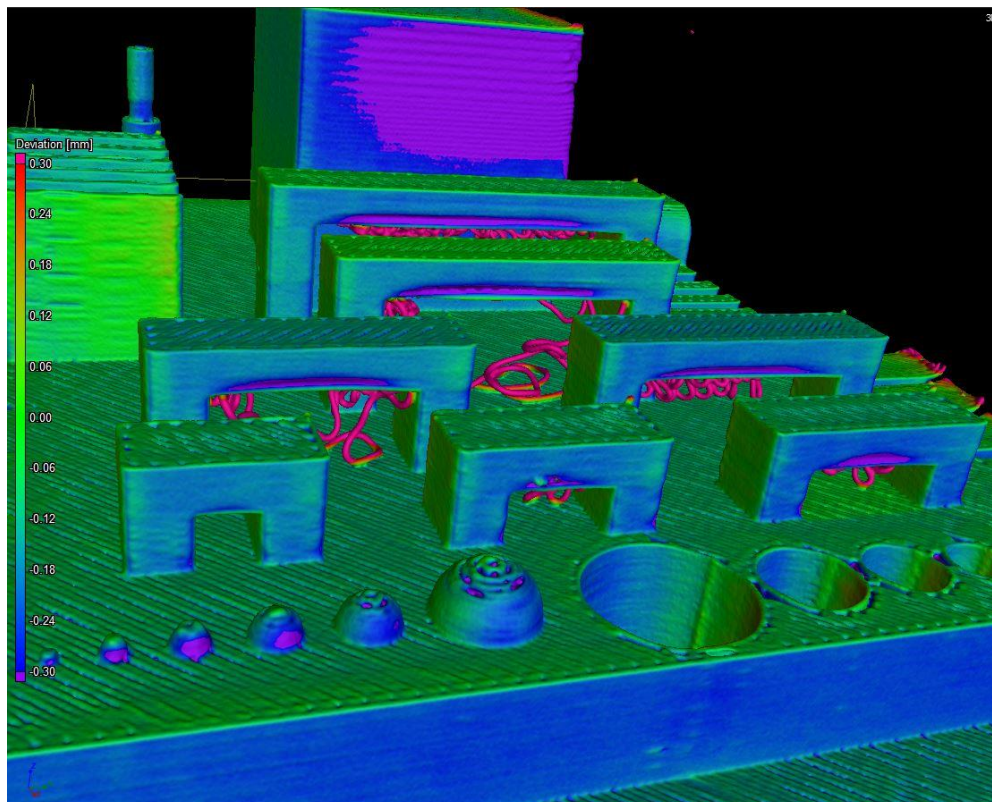
13.3.4. Zkroucení desky

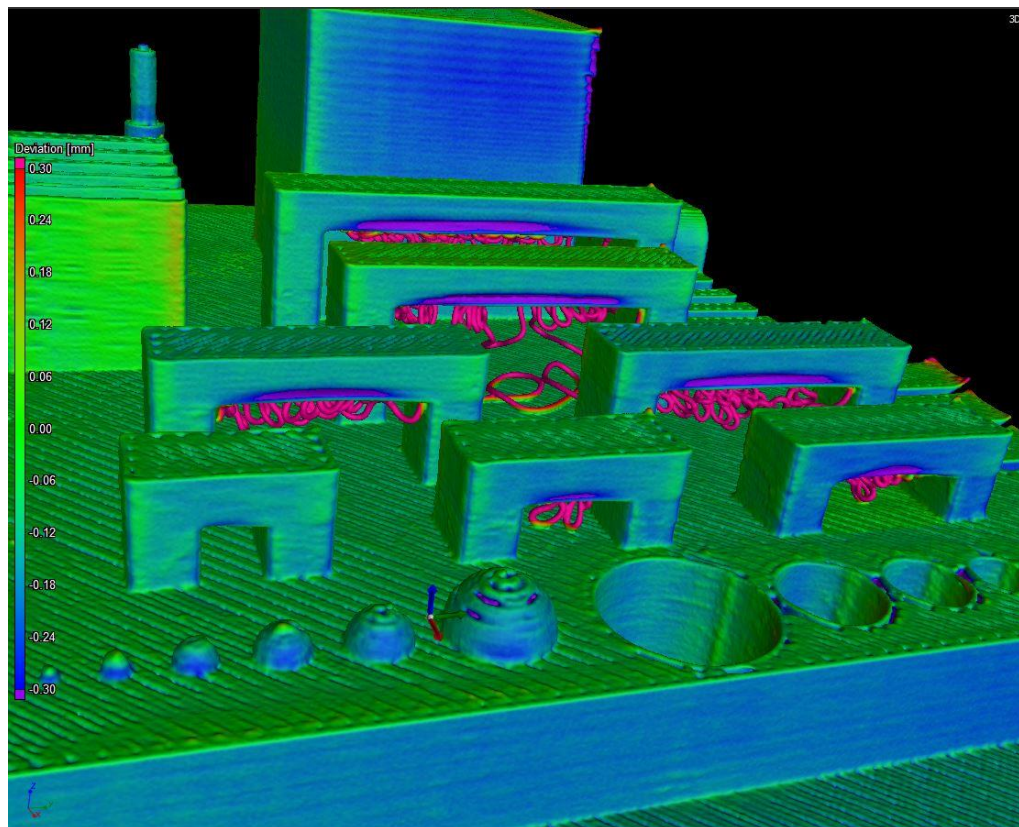
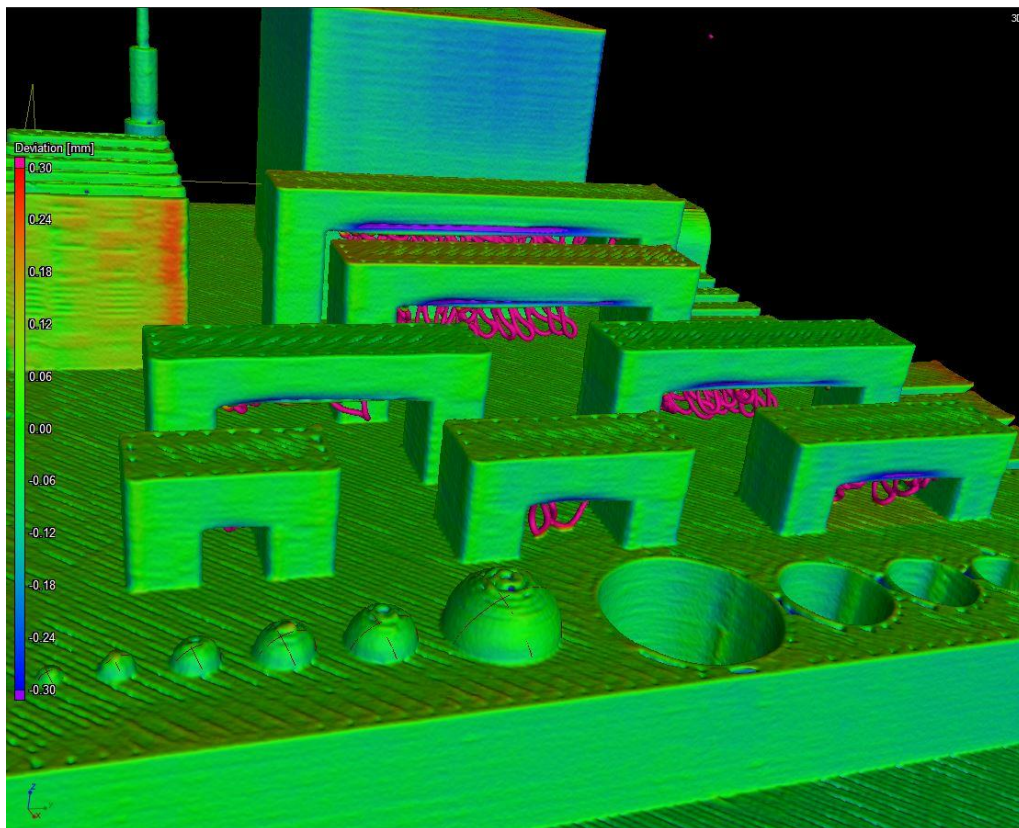


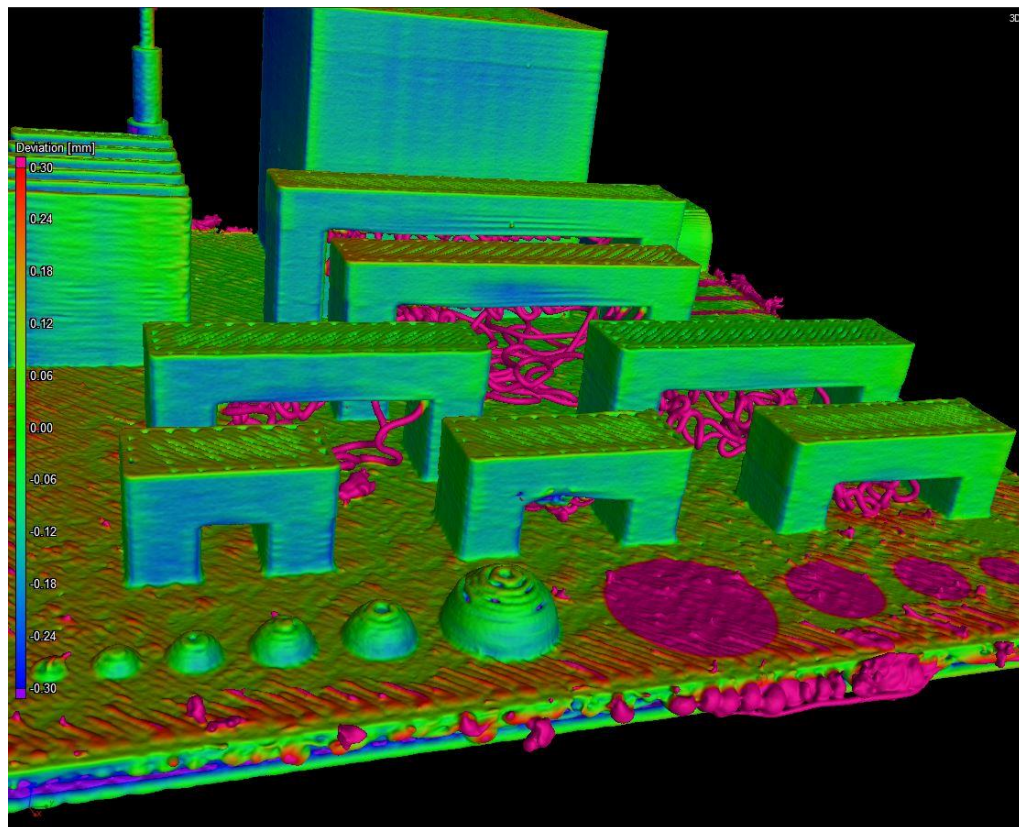
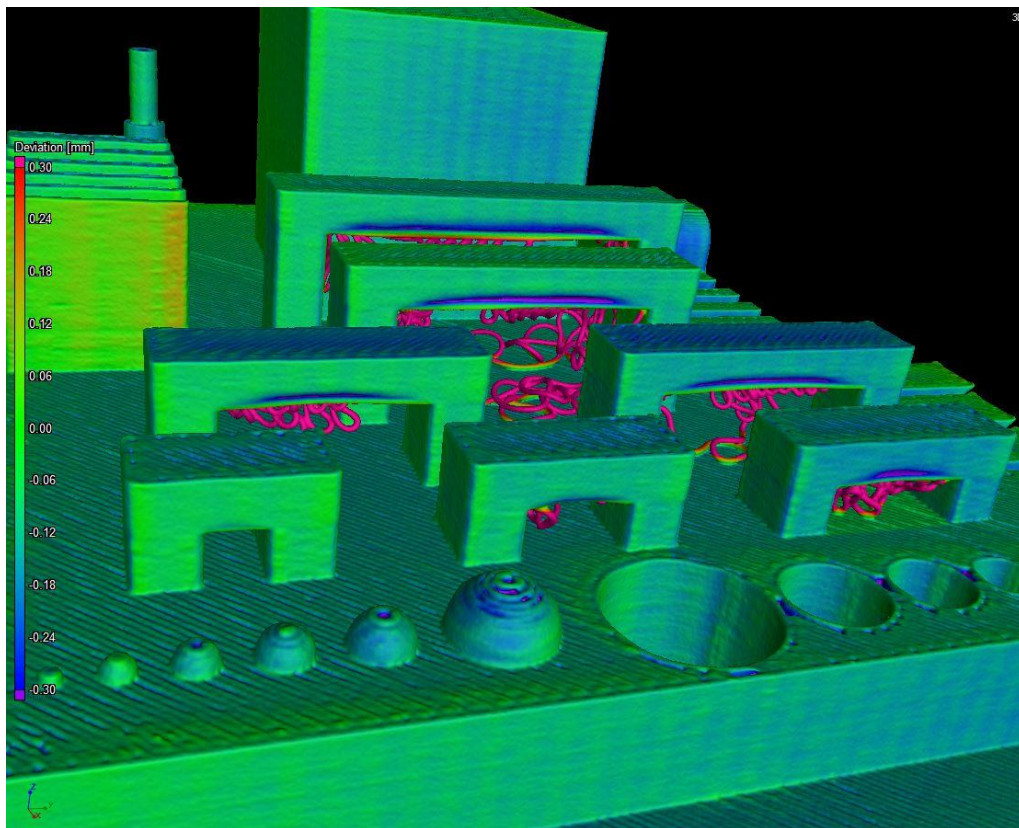


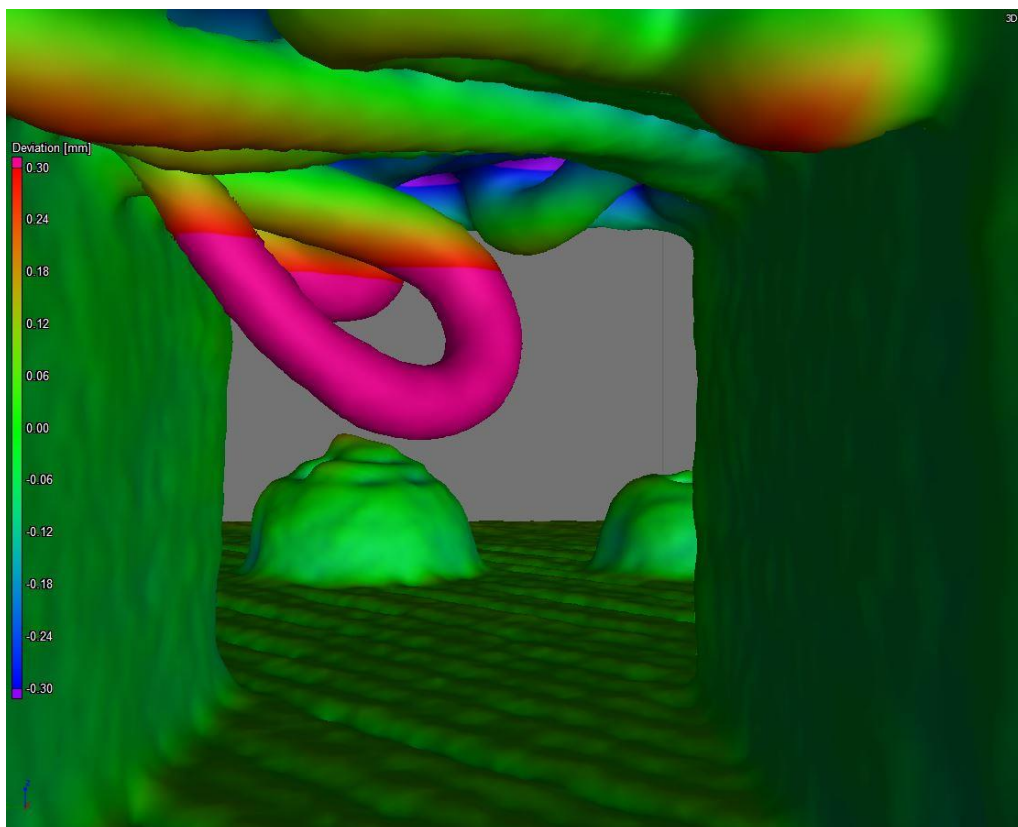
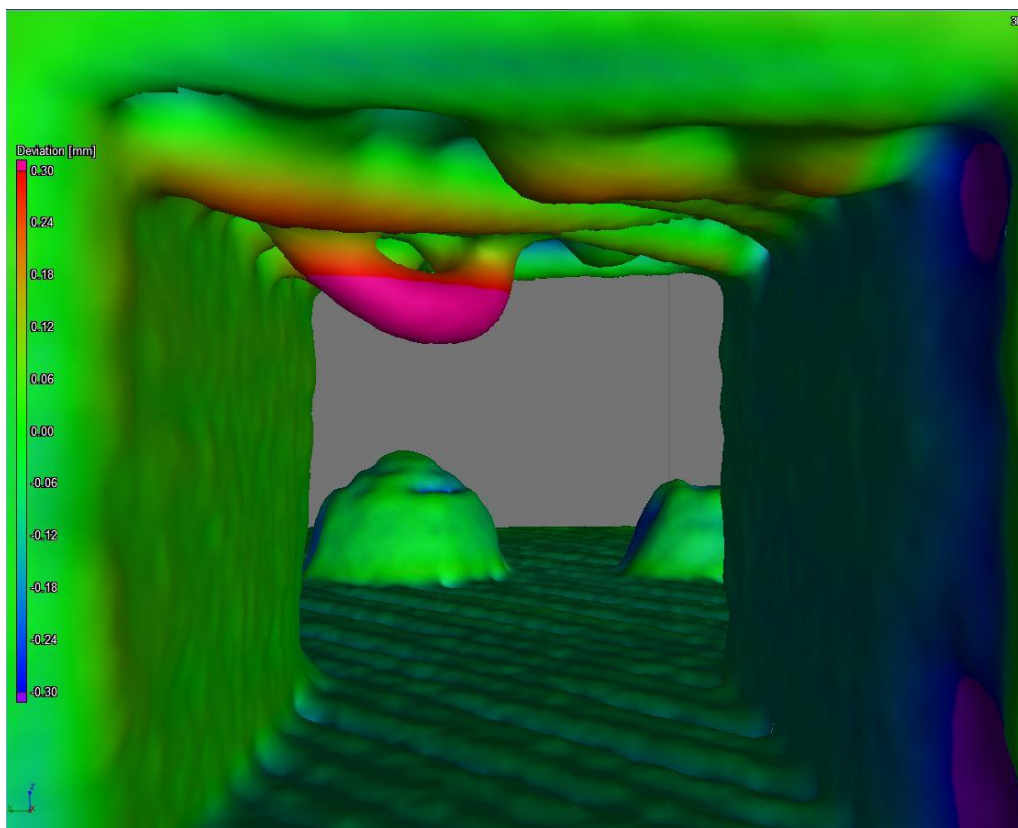


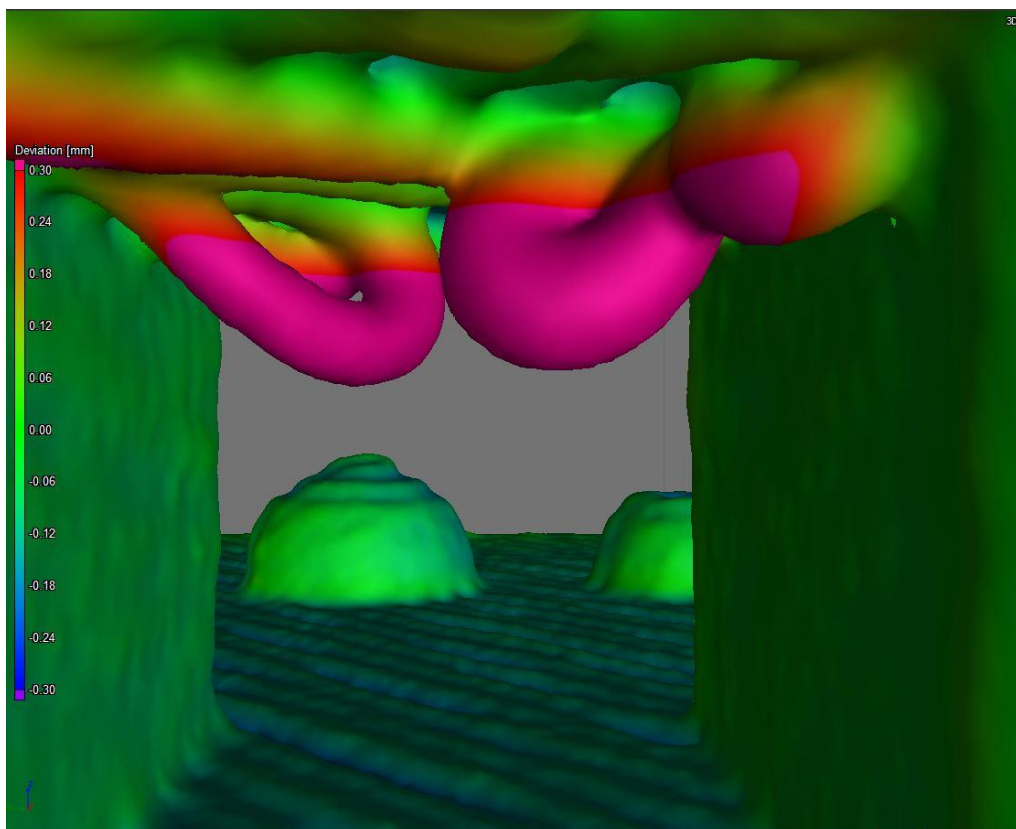
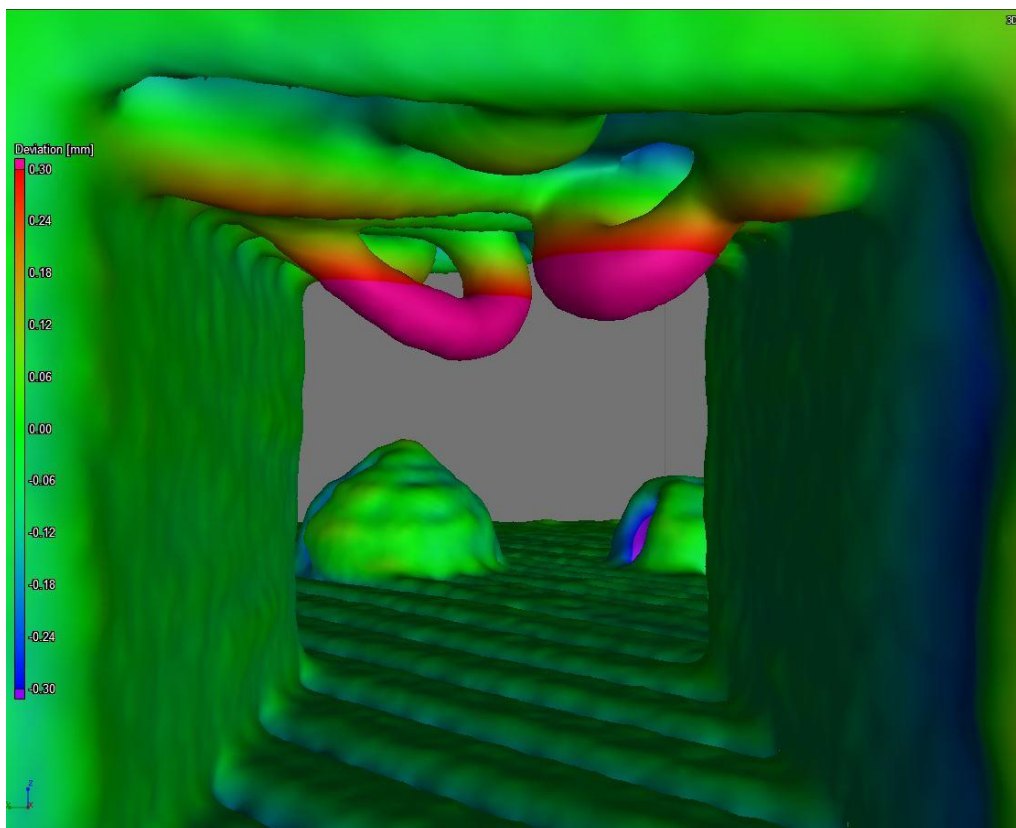
13.3.5. Přemostění

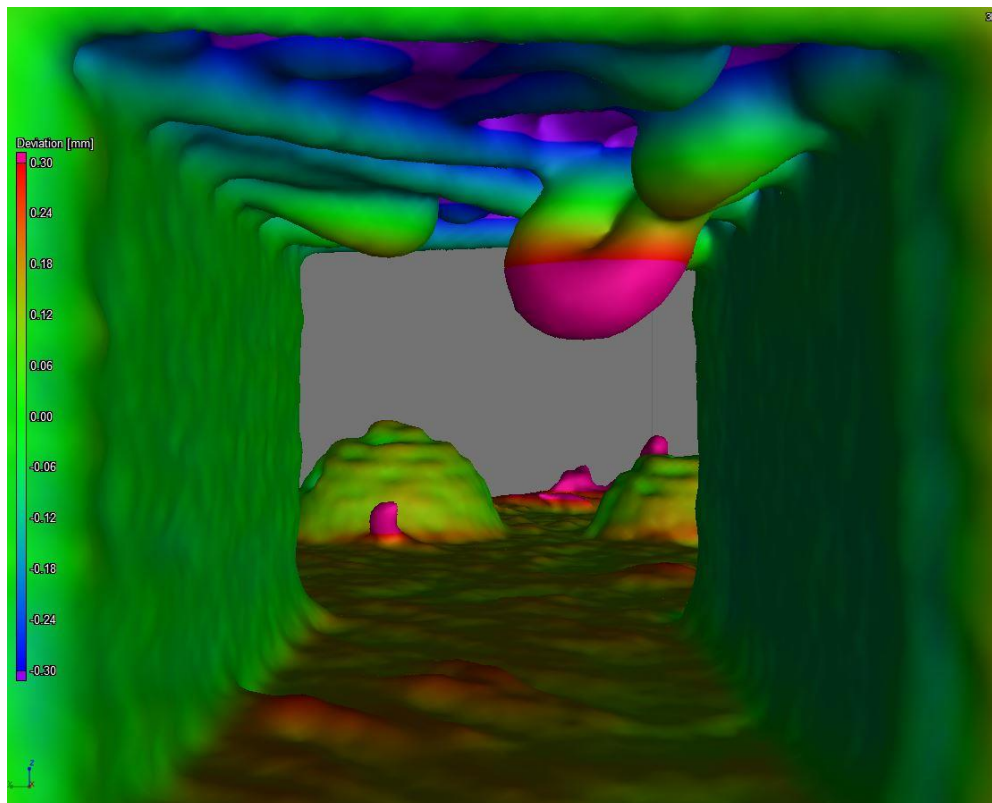




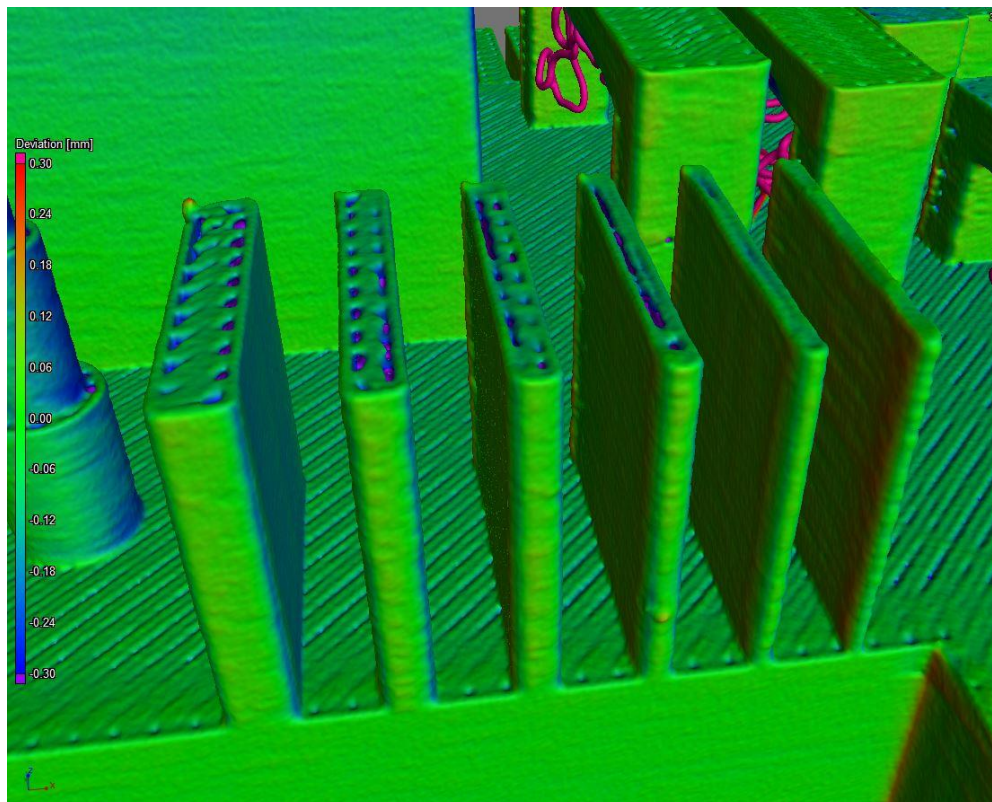


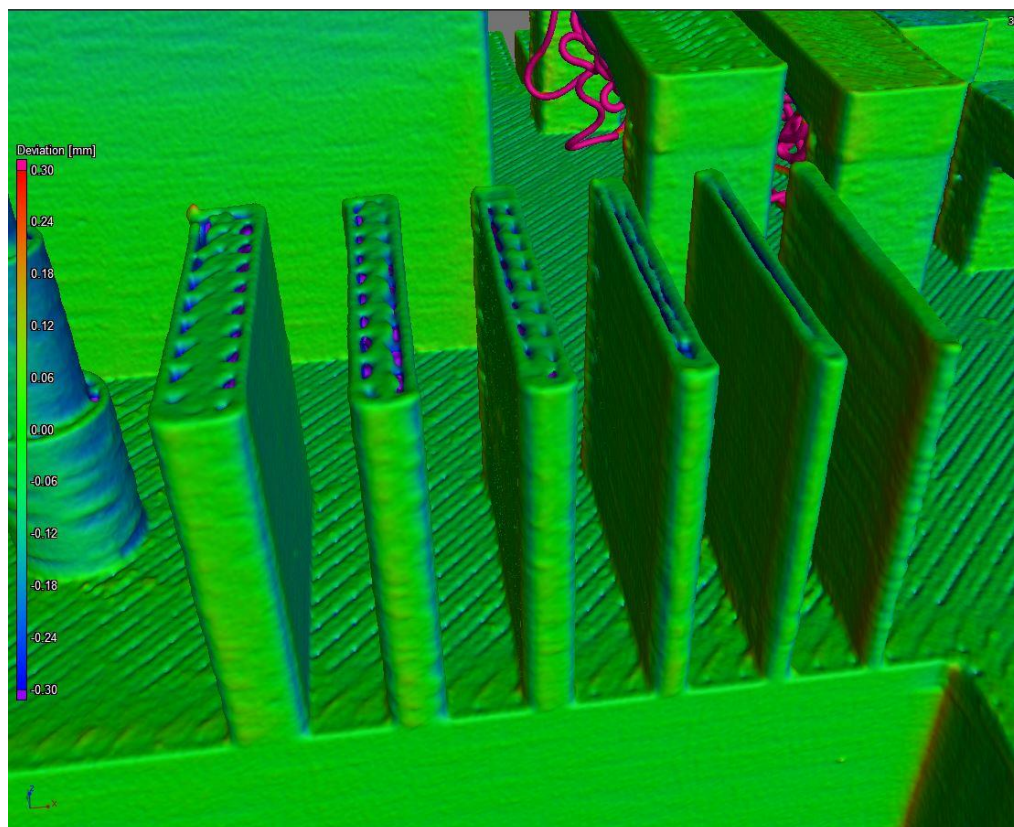
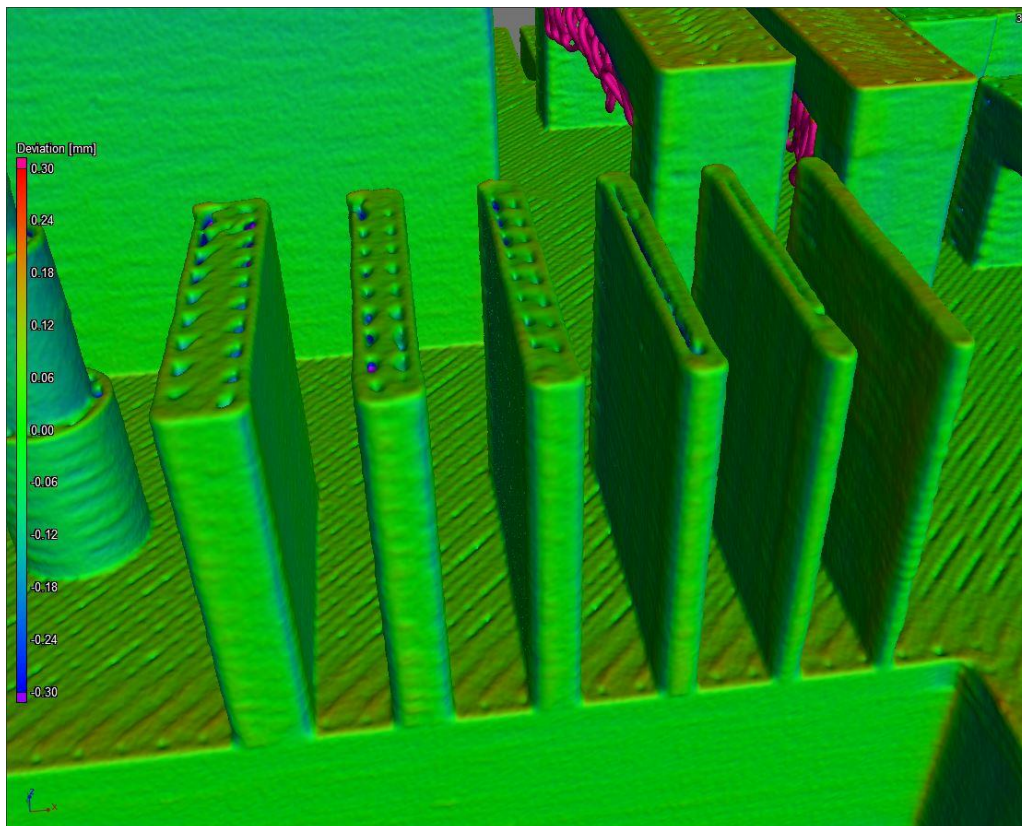


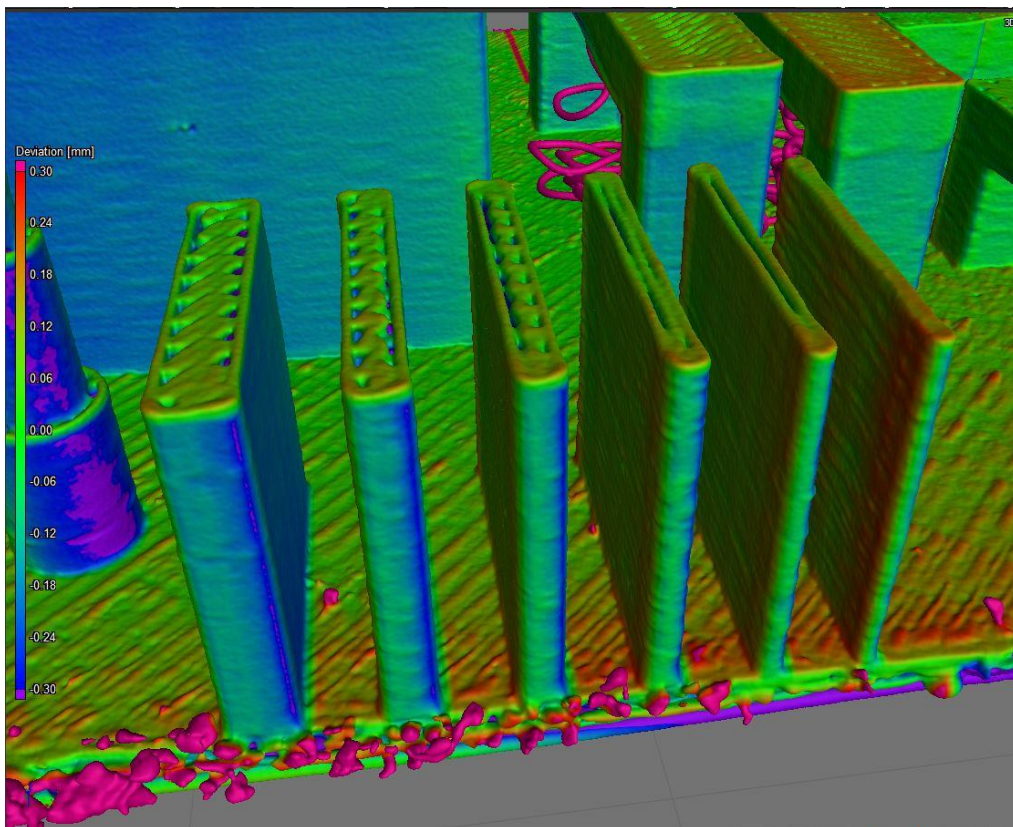
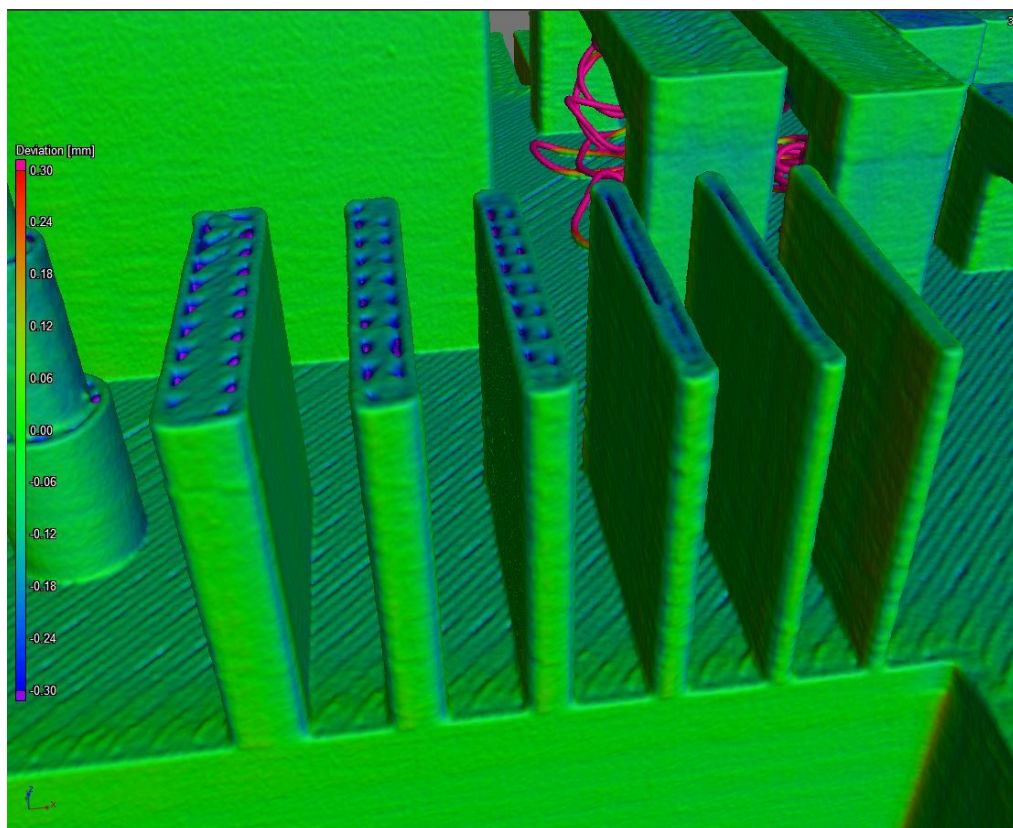


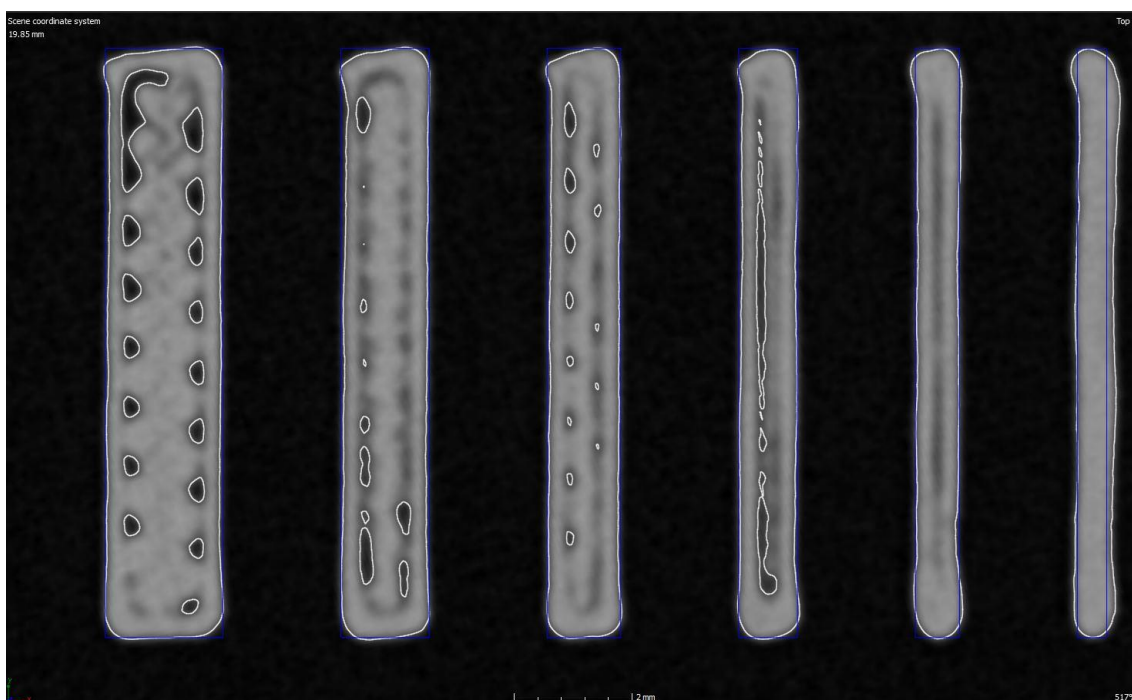
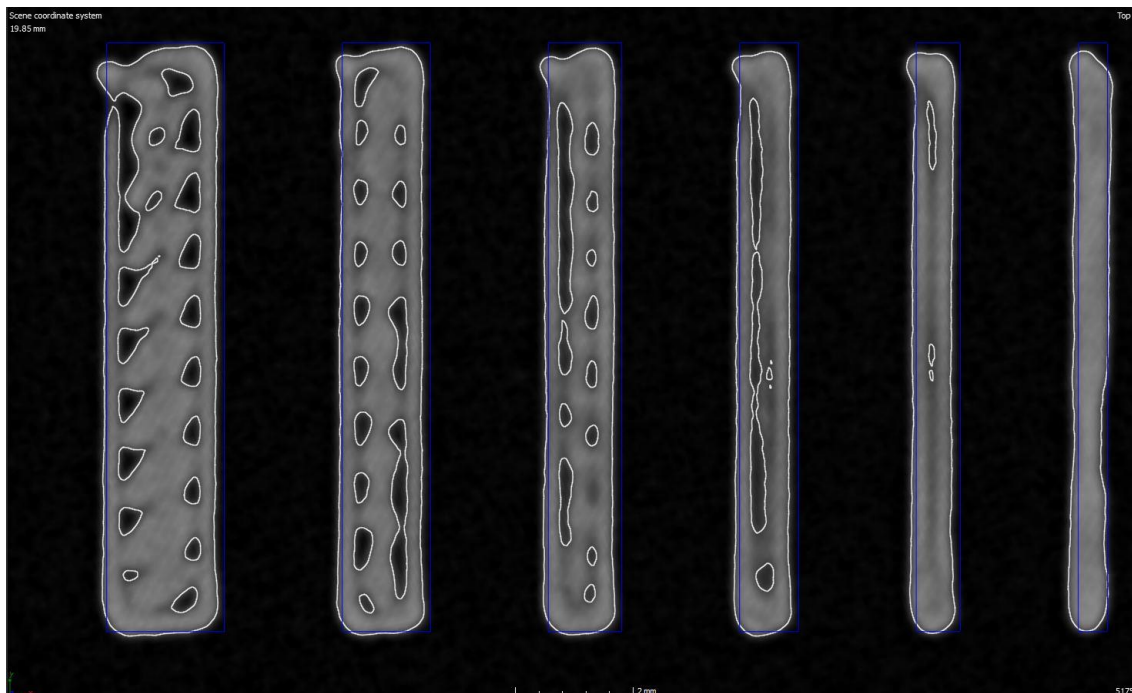


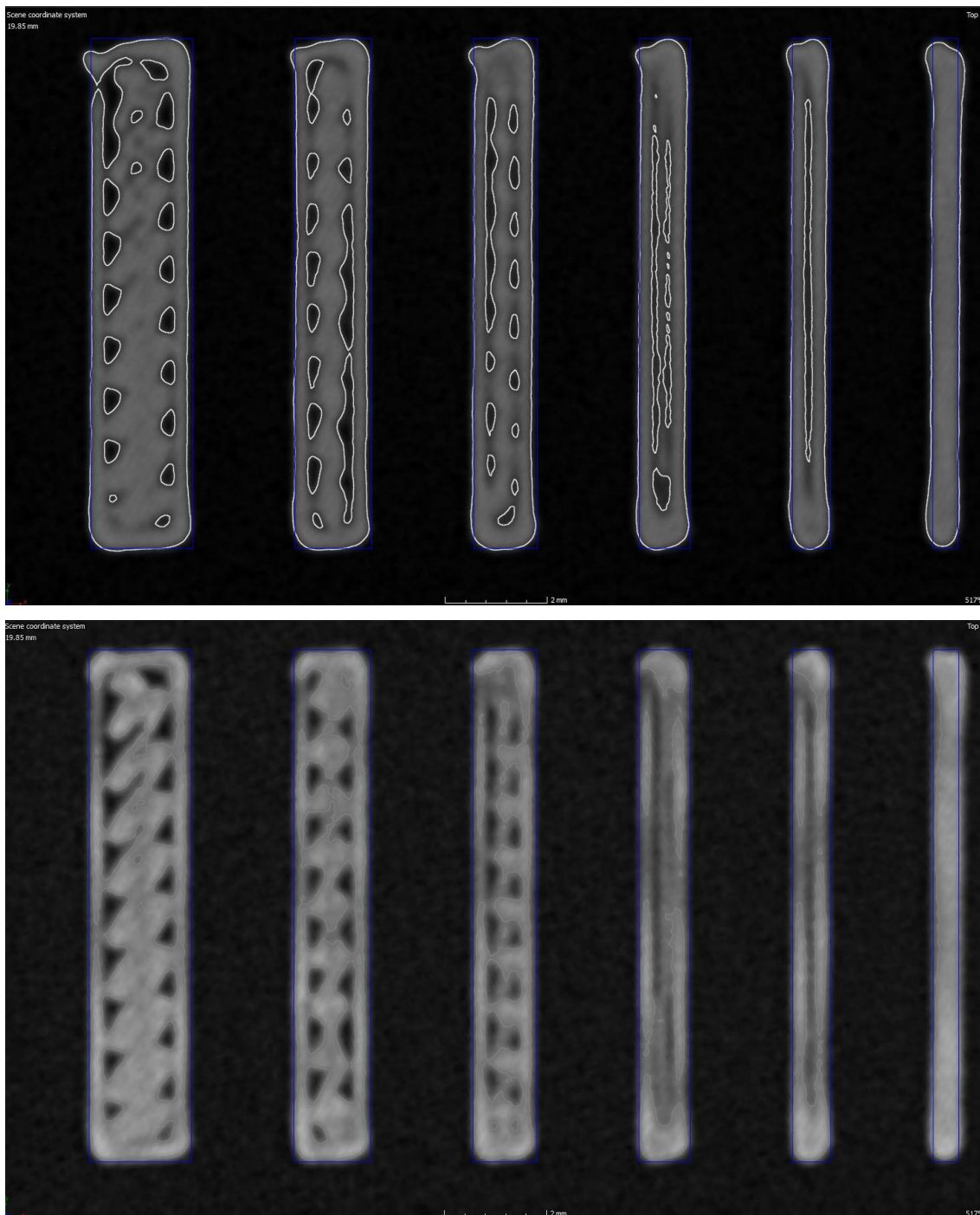
13.3.6. Úzké profily

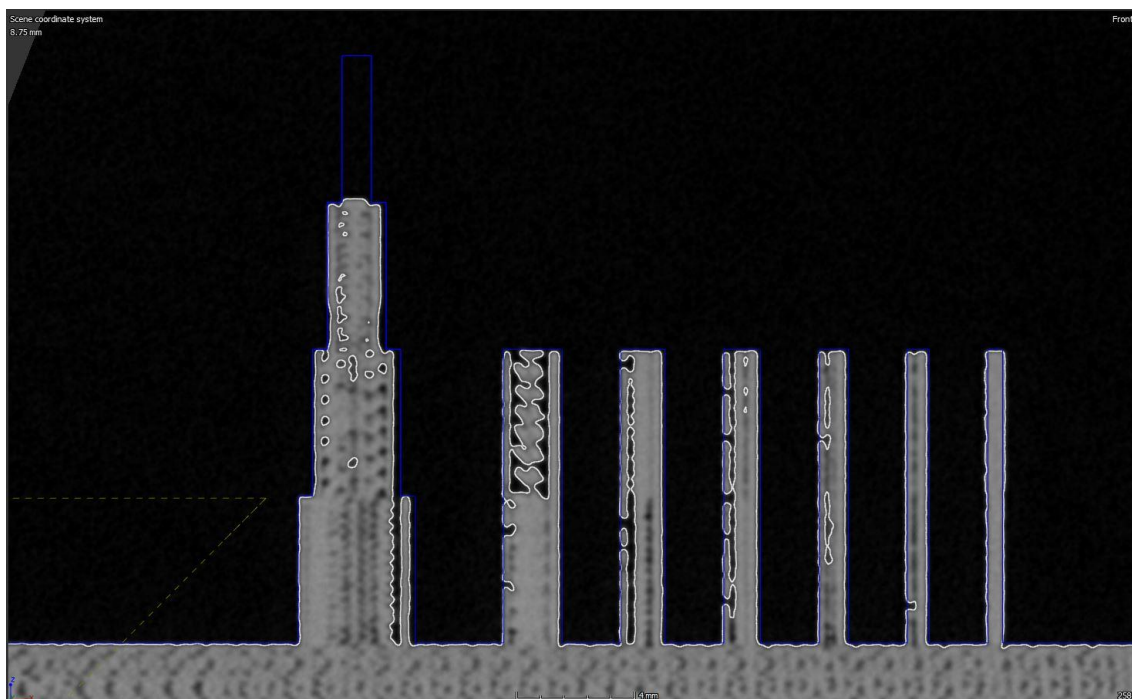
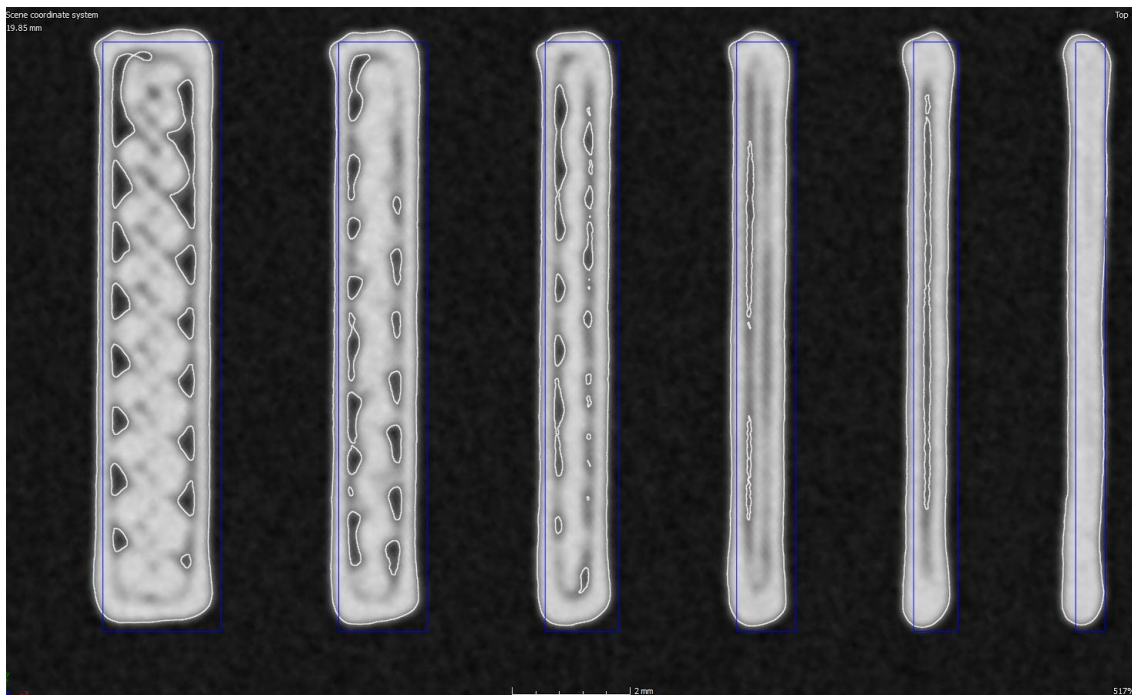


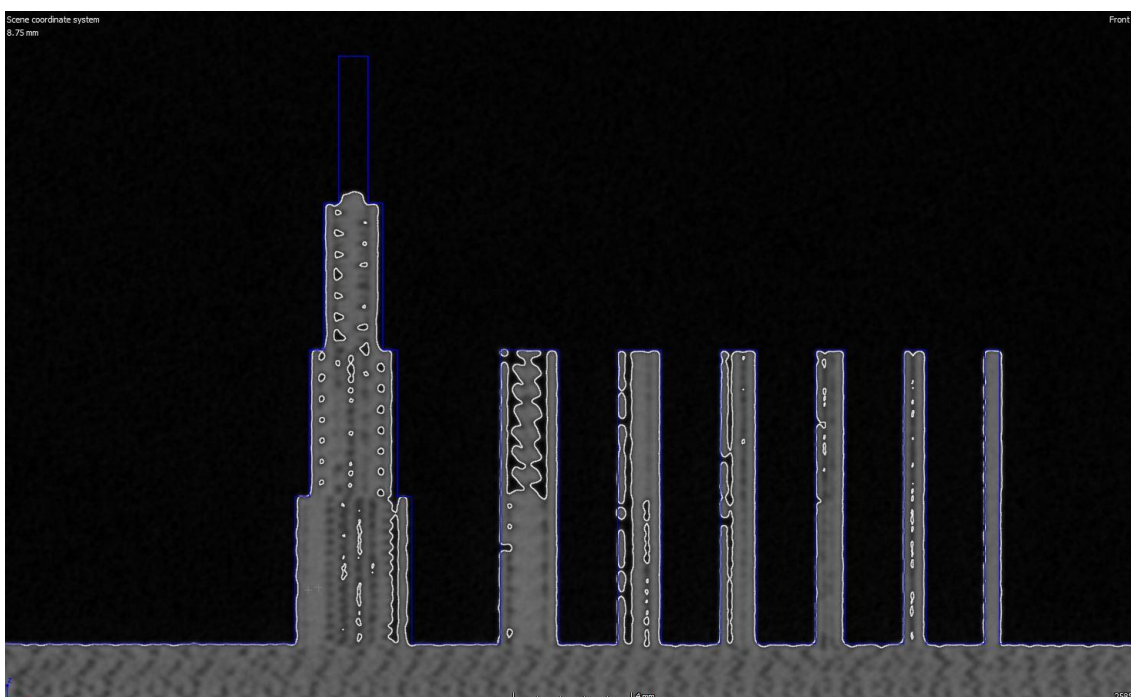
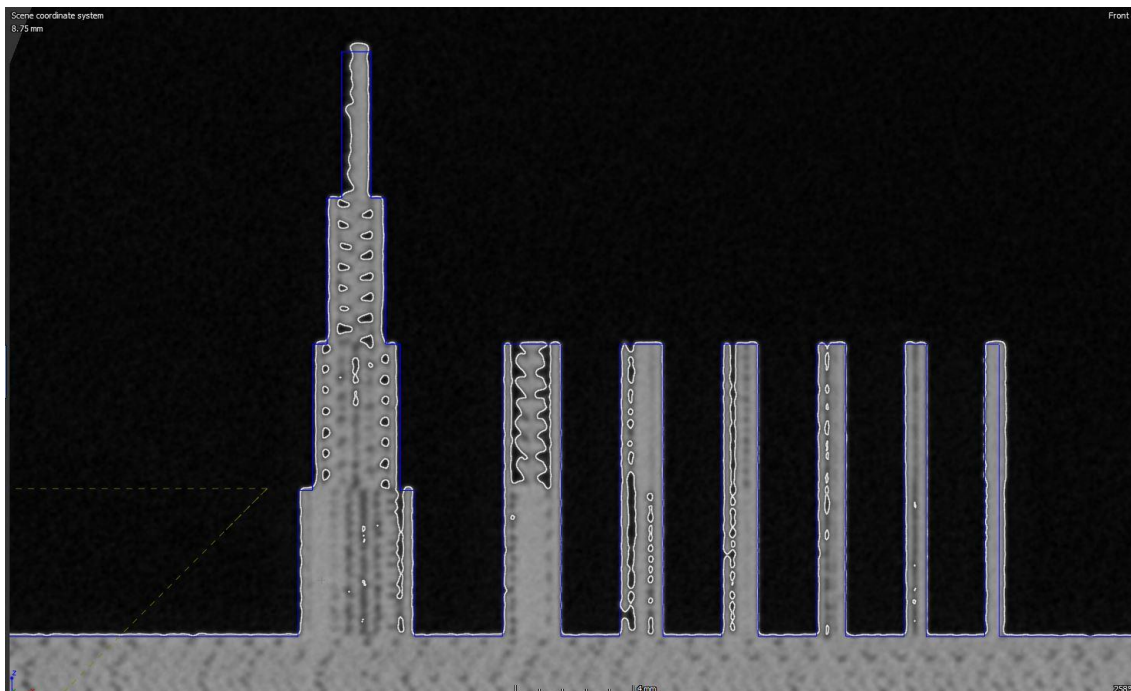


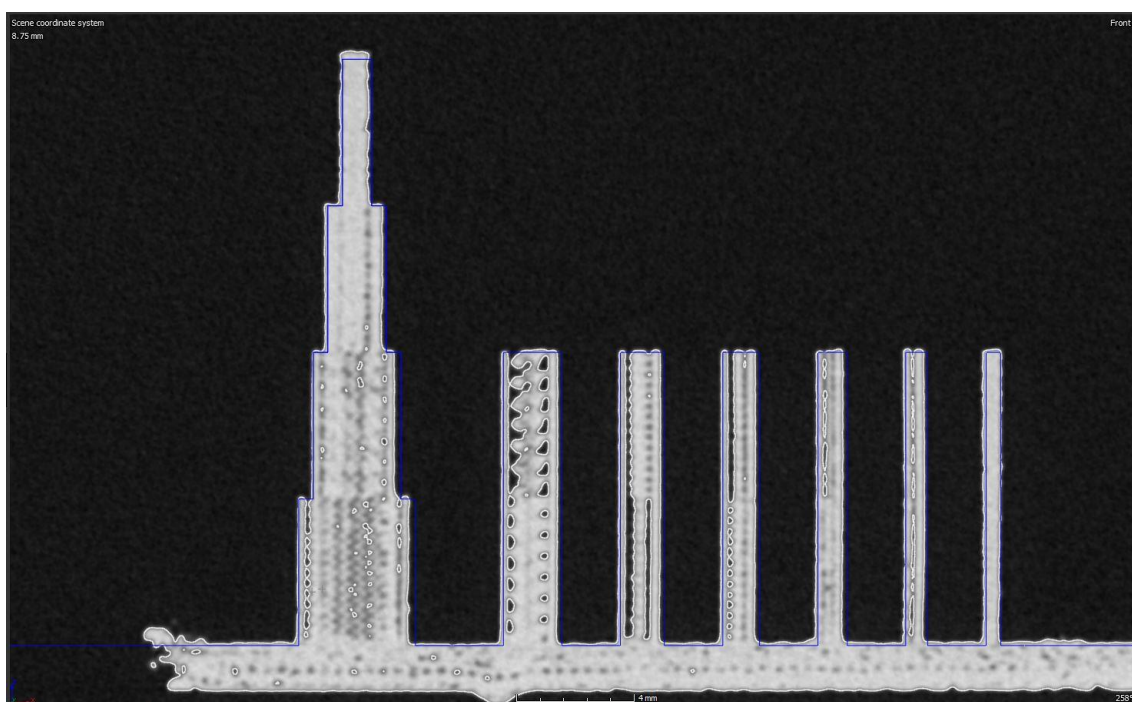
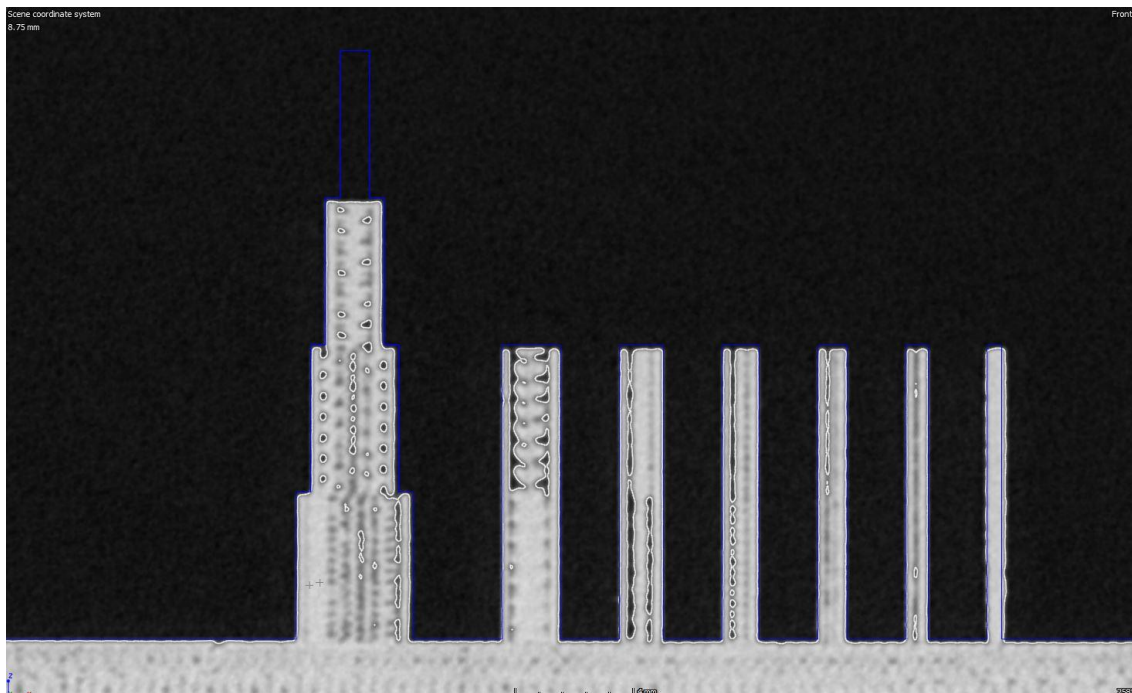




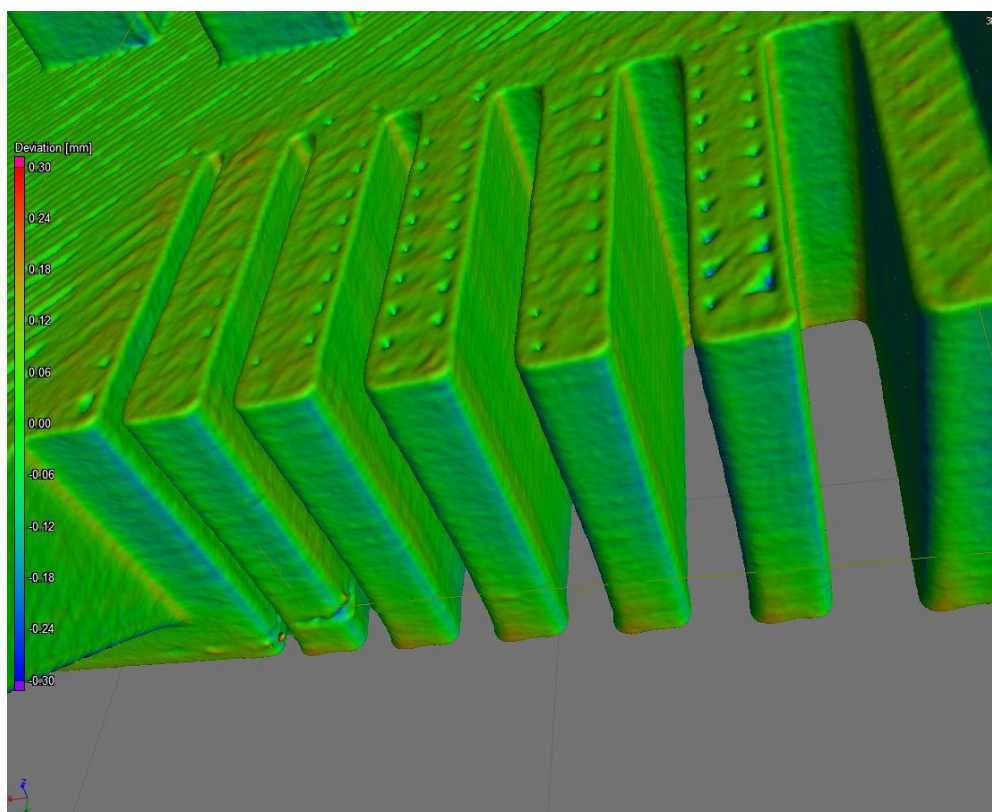
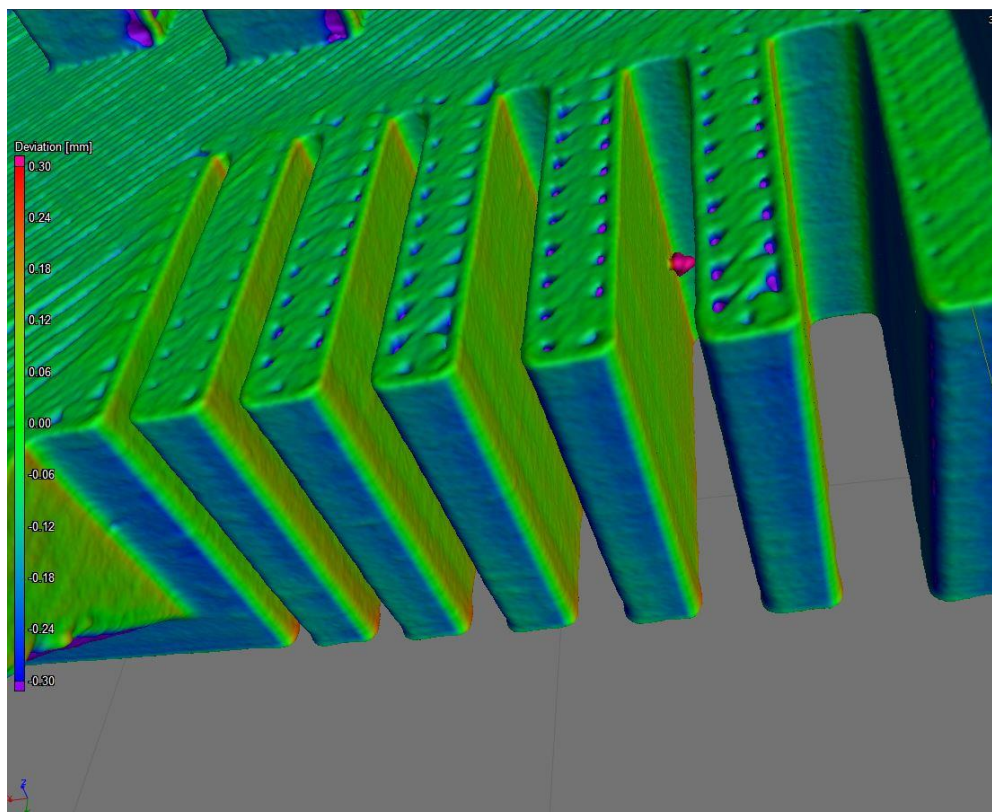


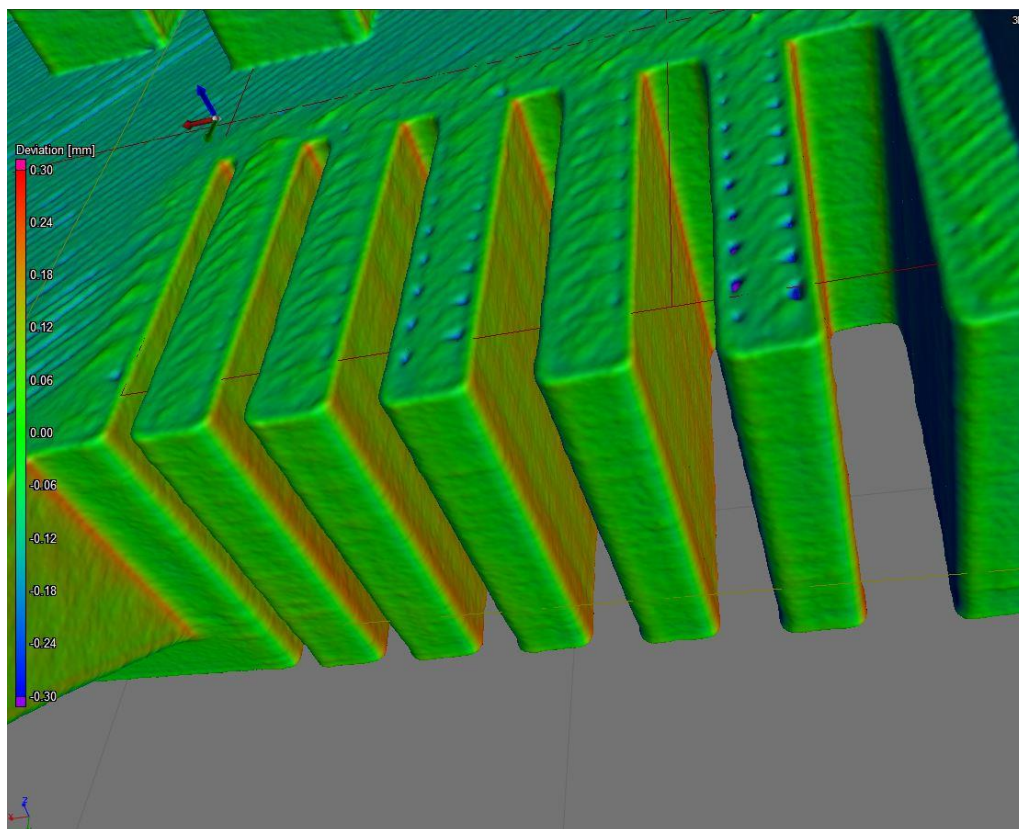
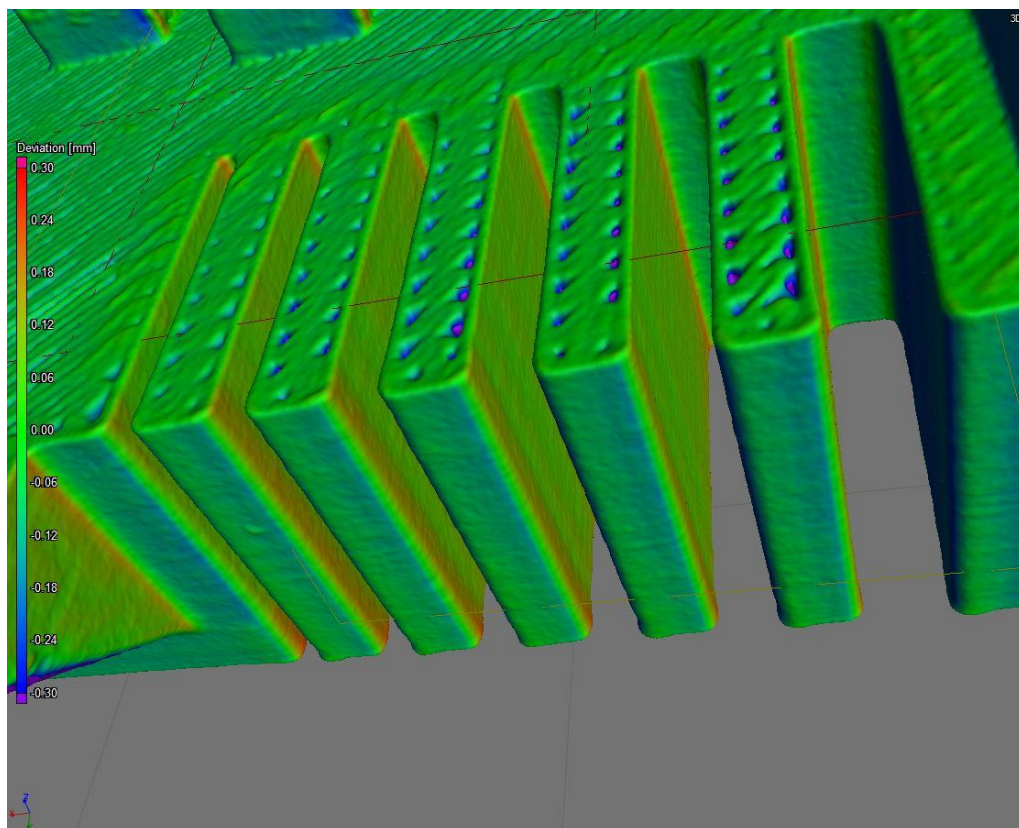


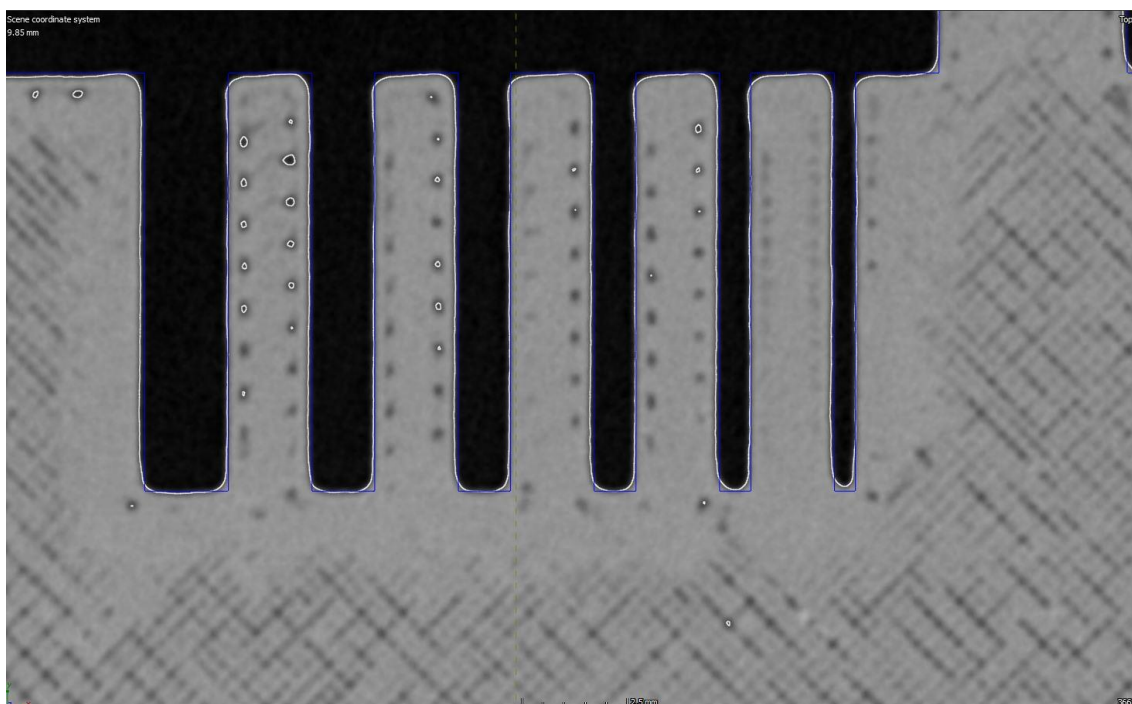
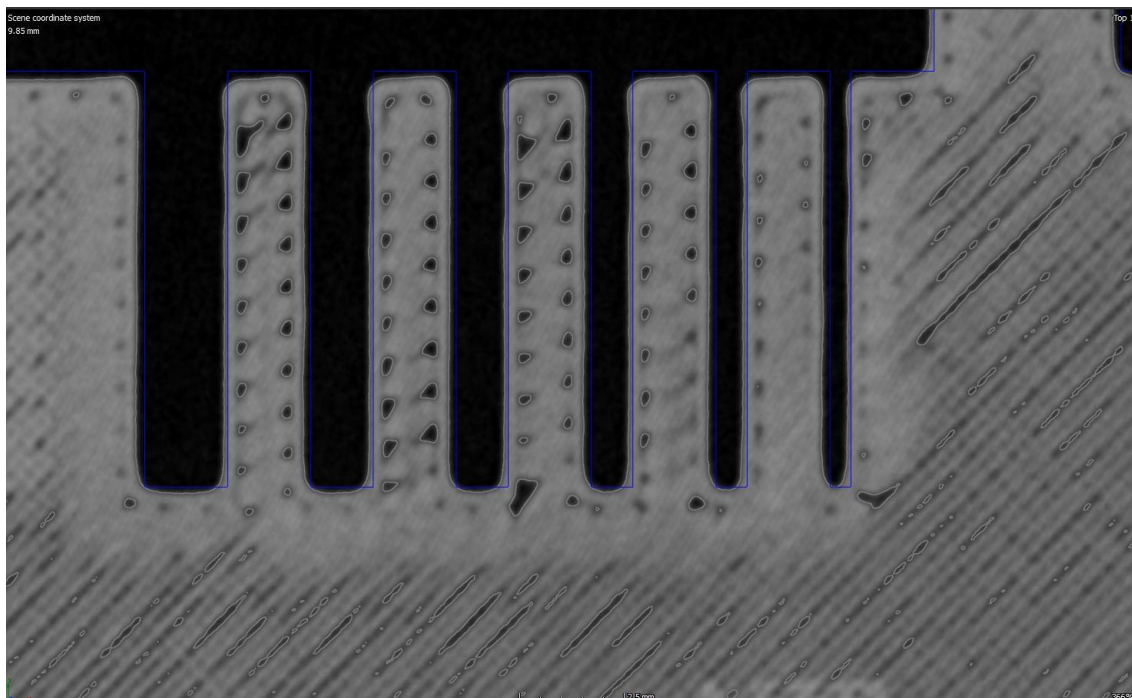


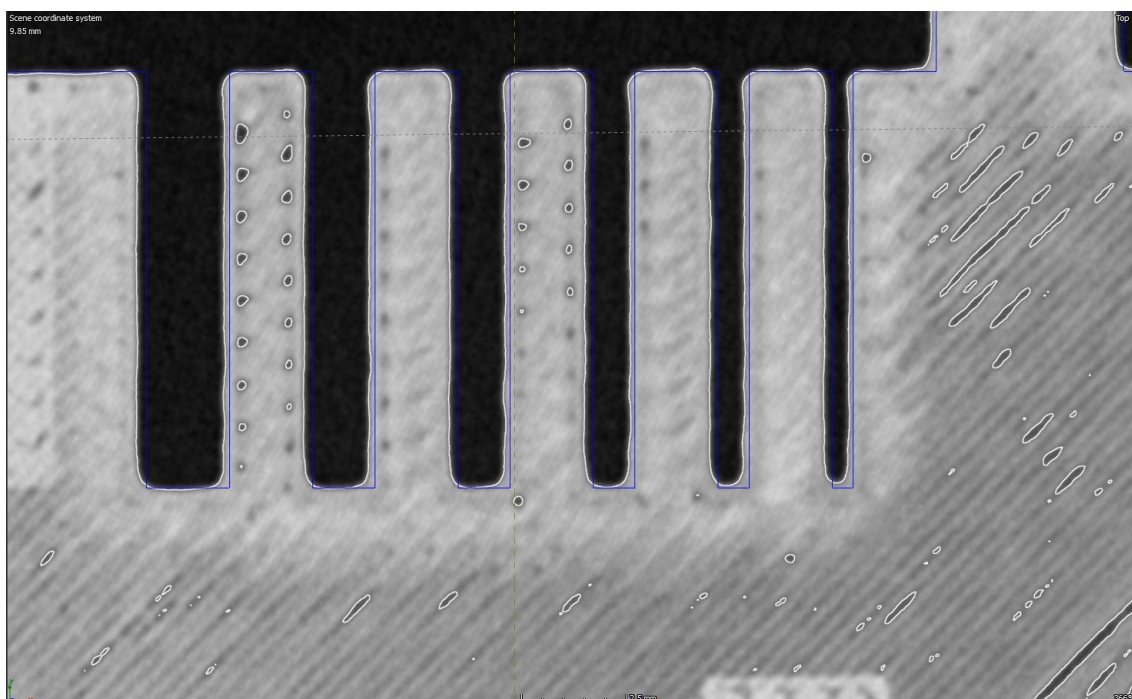
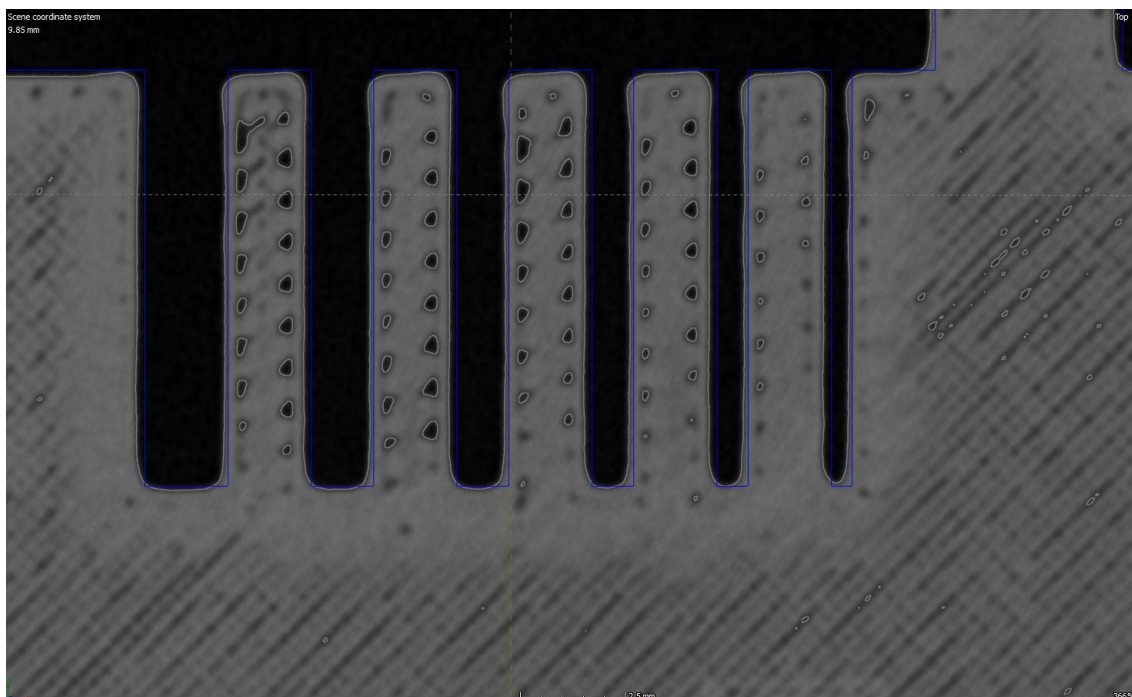


13.3.7. Úzké drážky

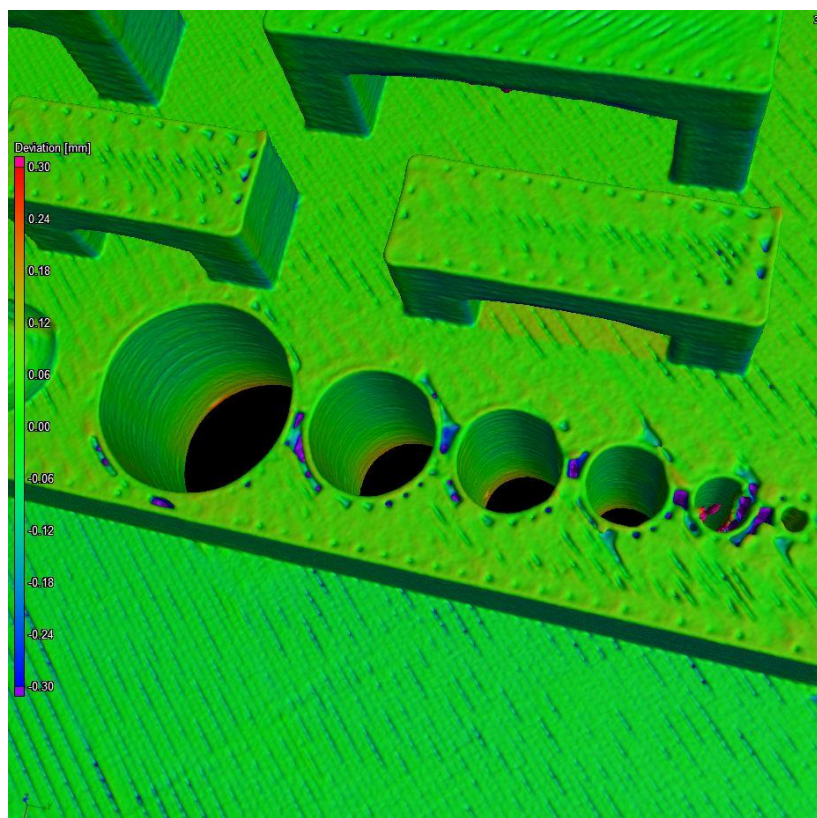
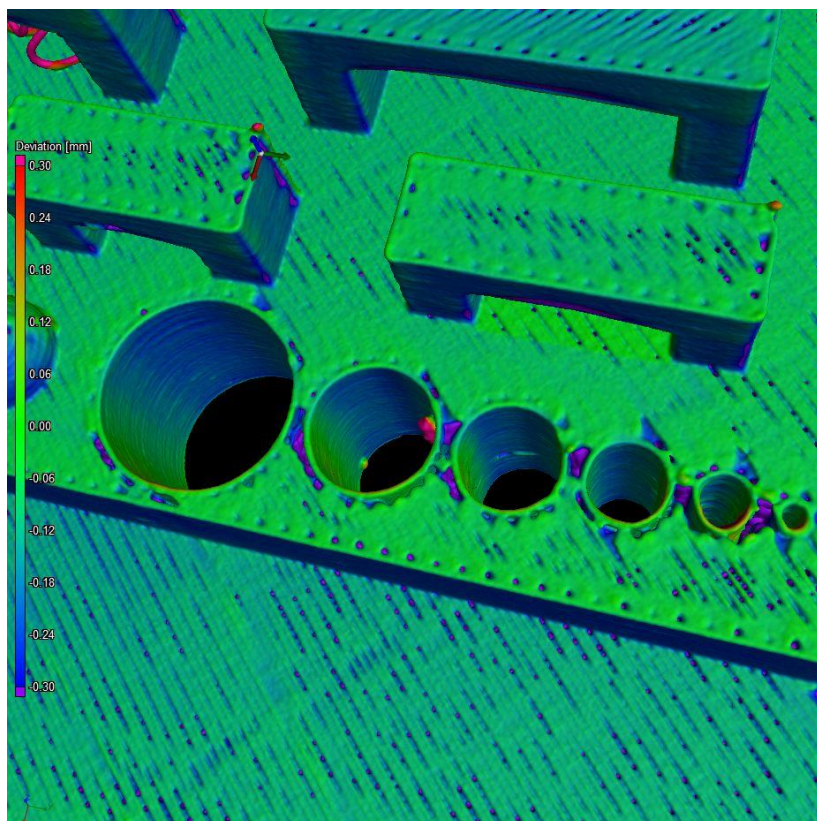


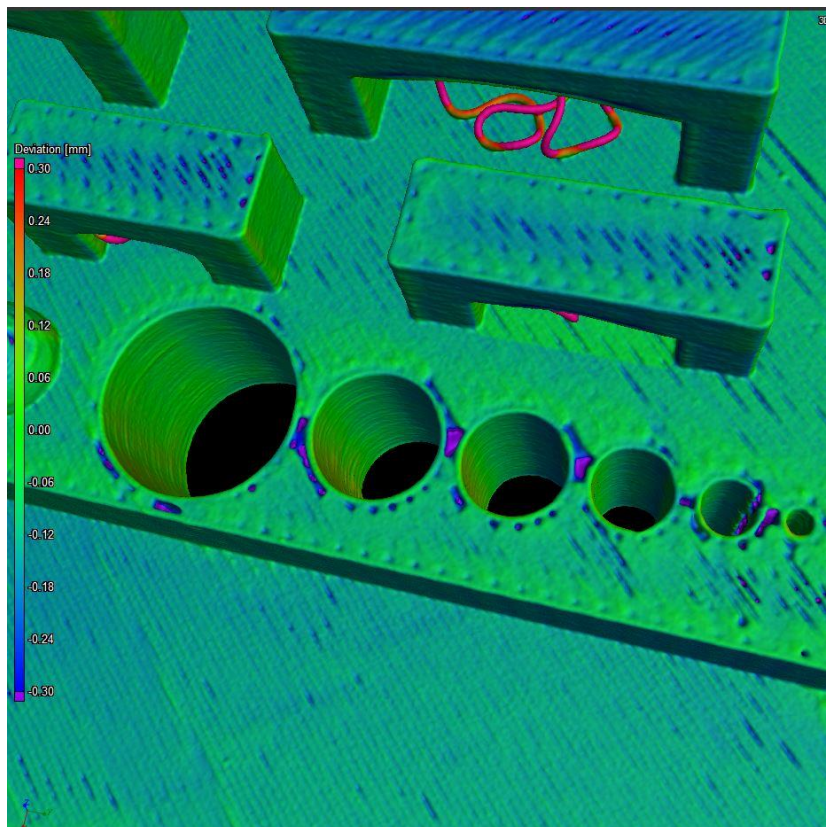
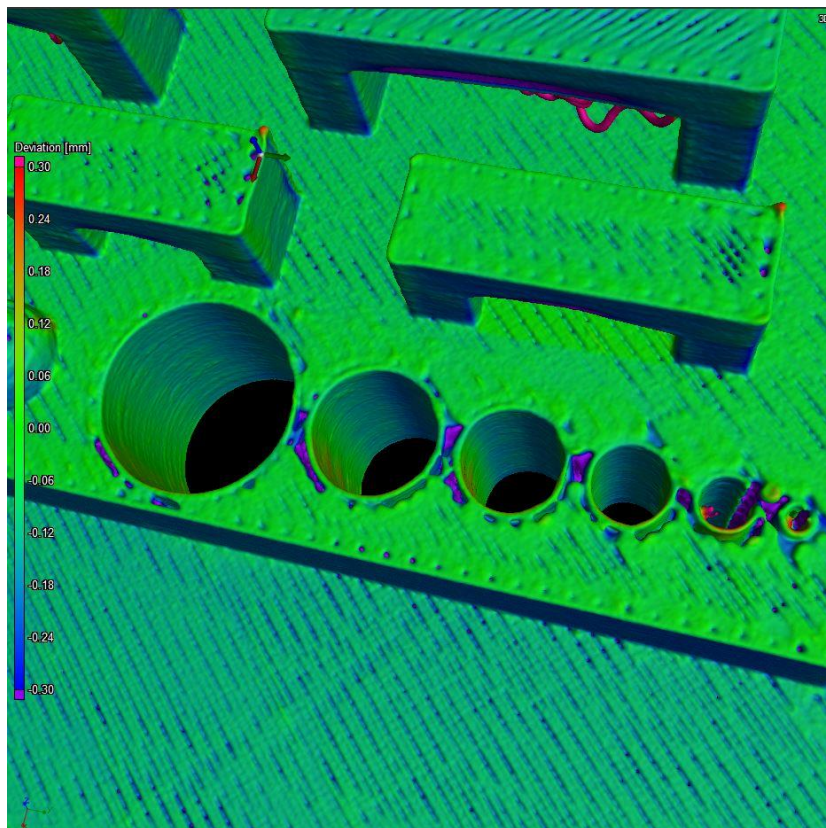


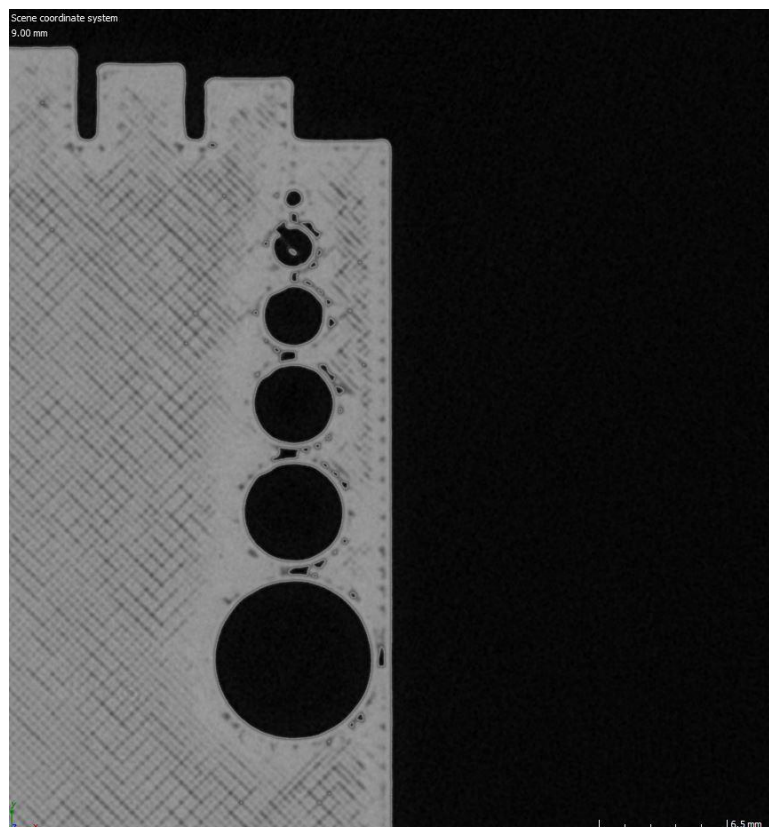
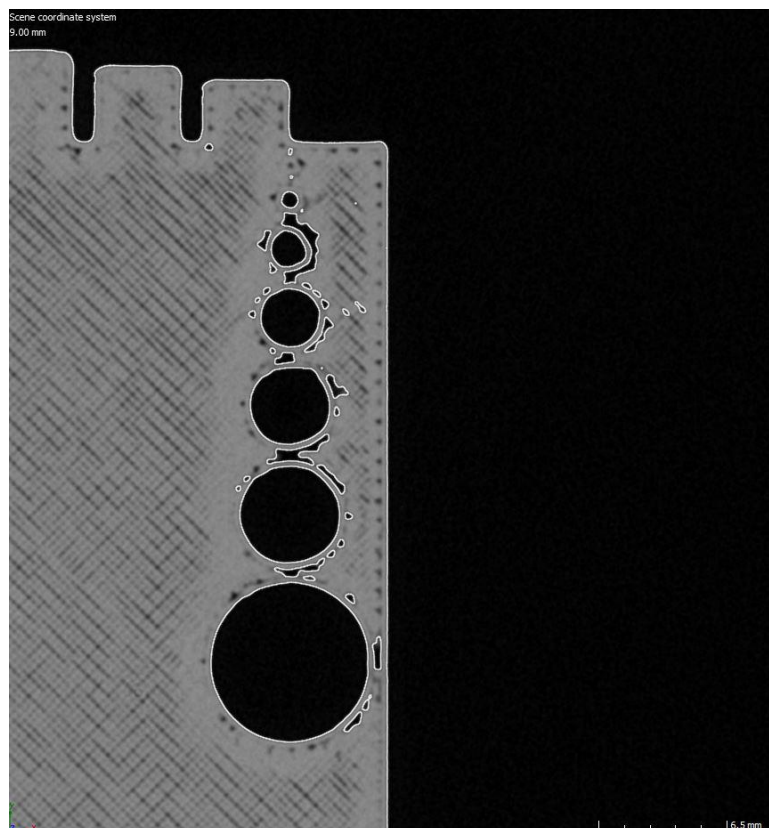


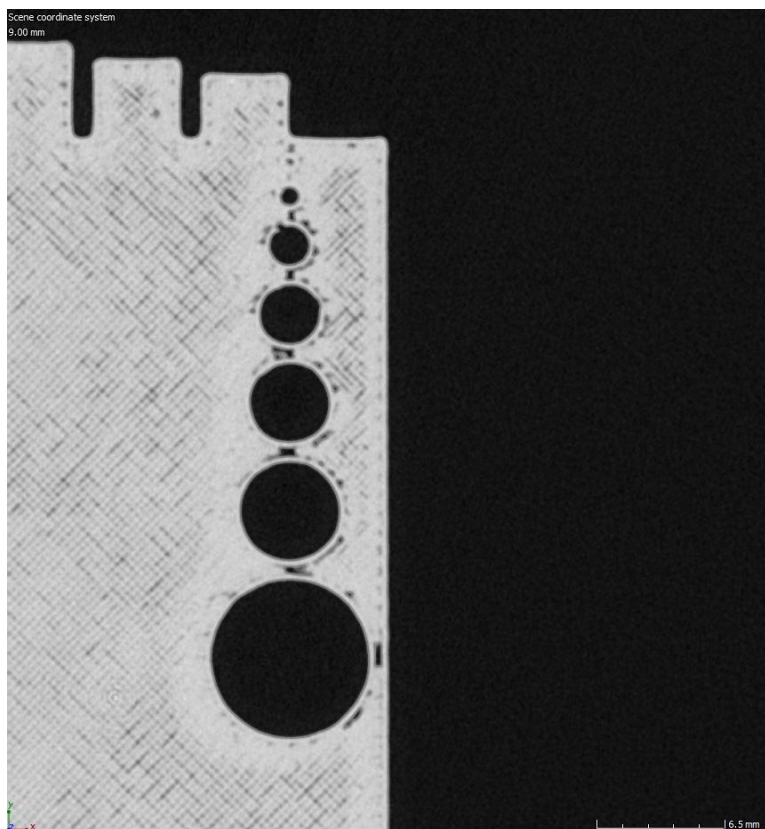
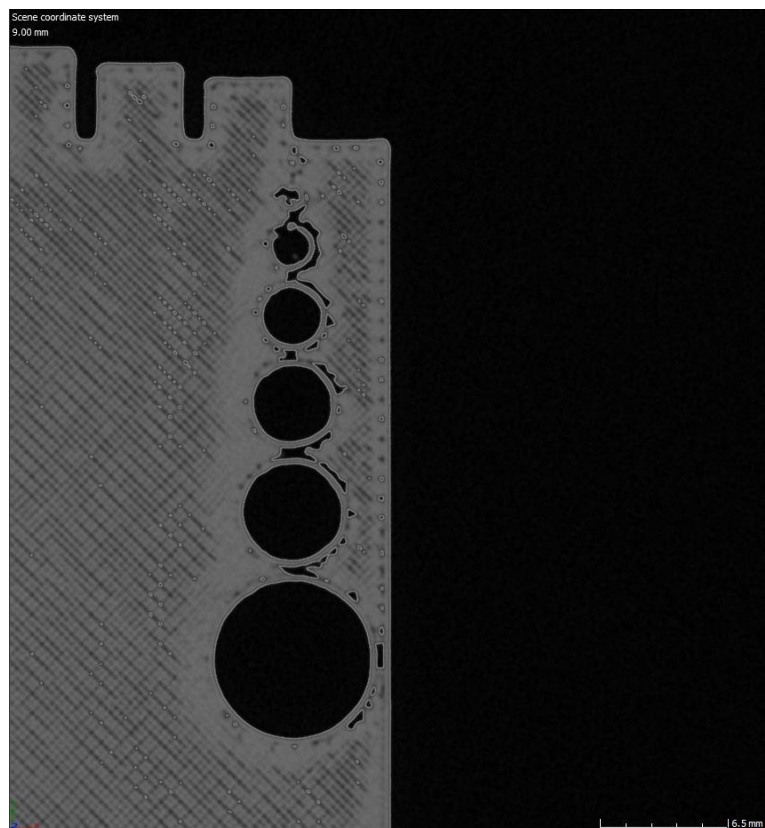


13.3.8. Díry kruhového profilu vertikální

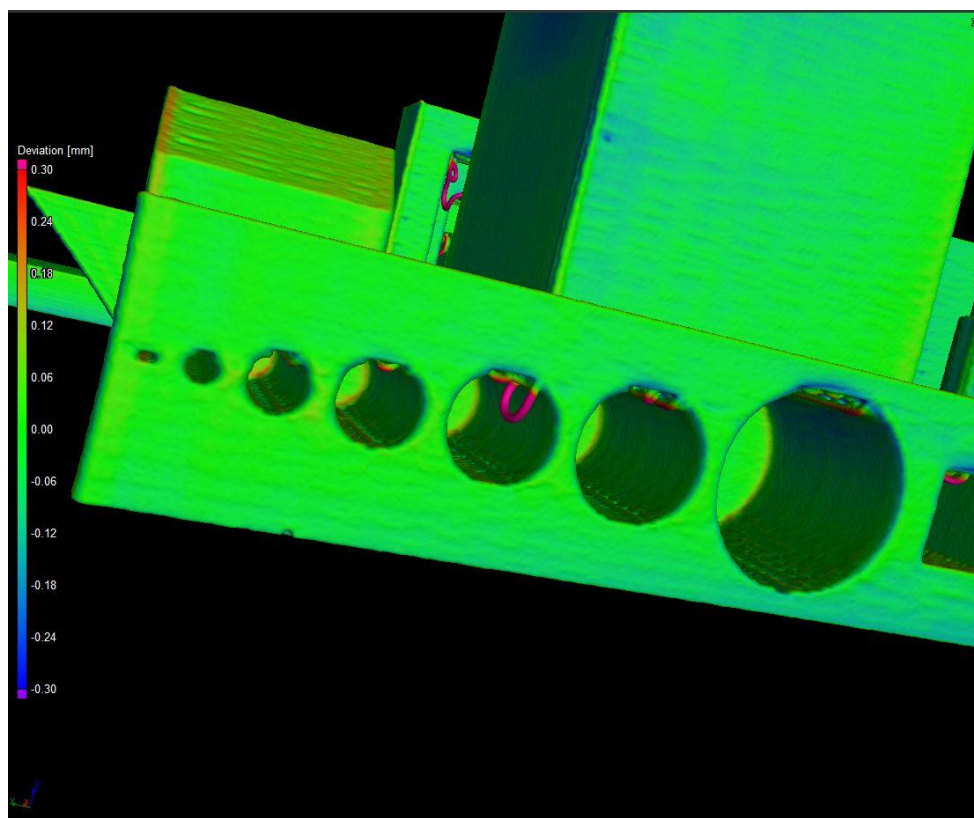
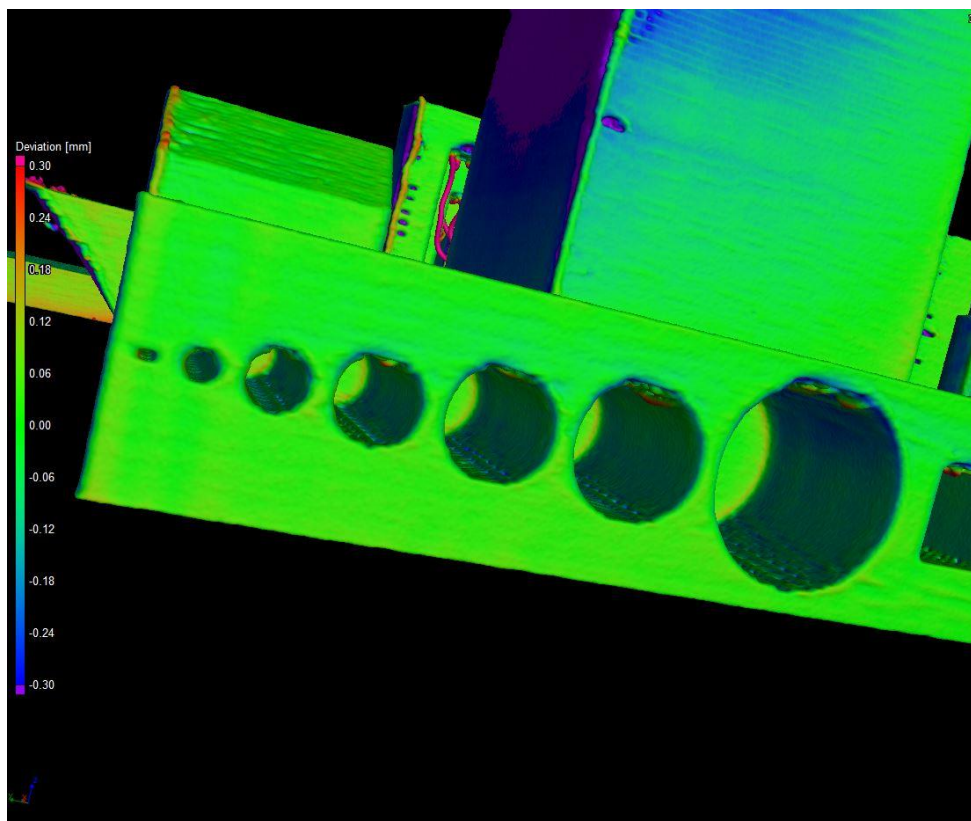


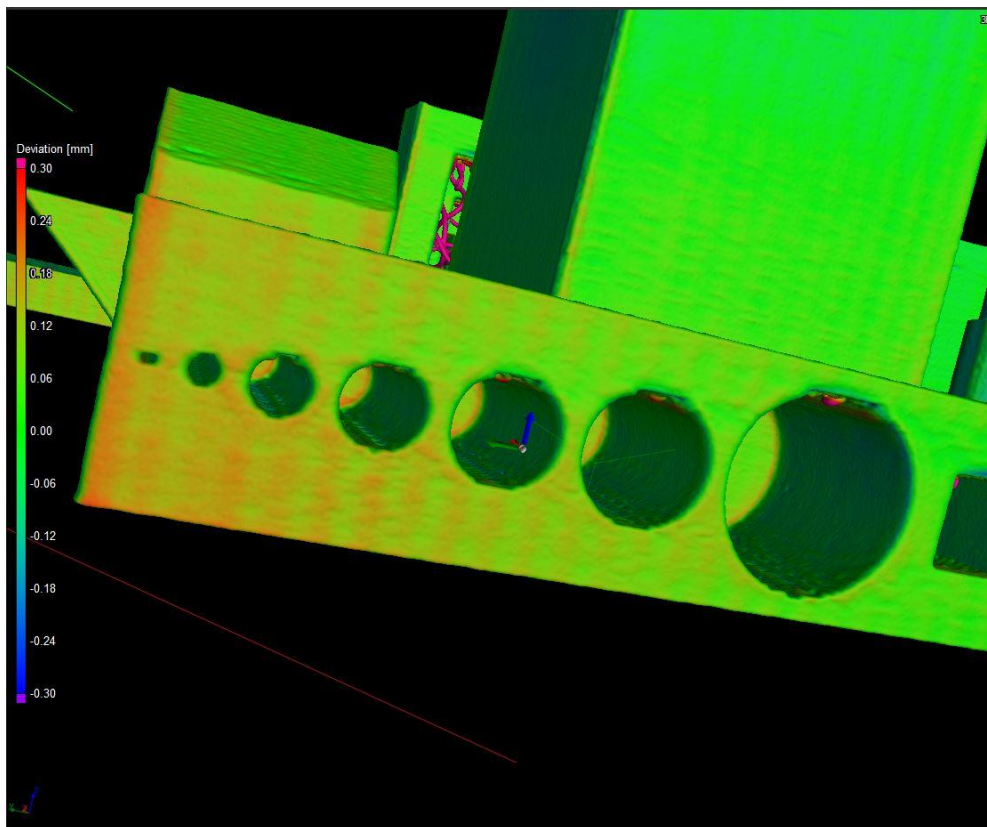
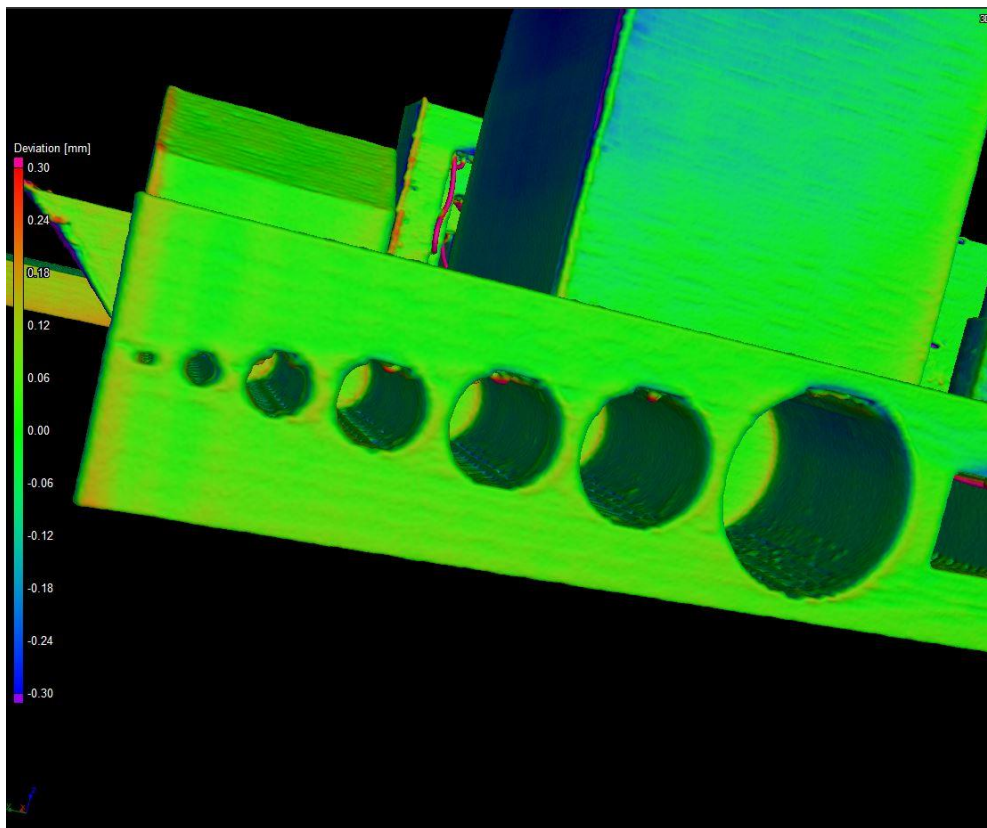


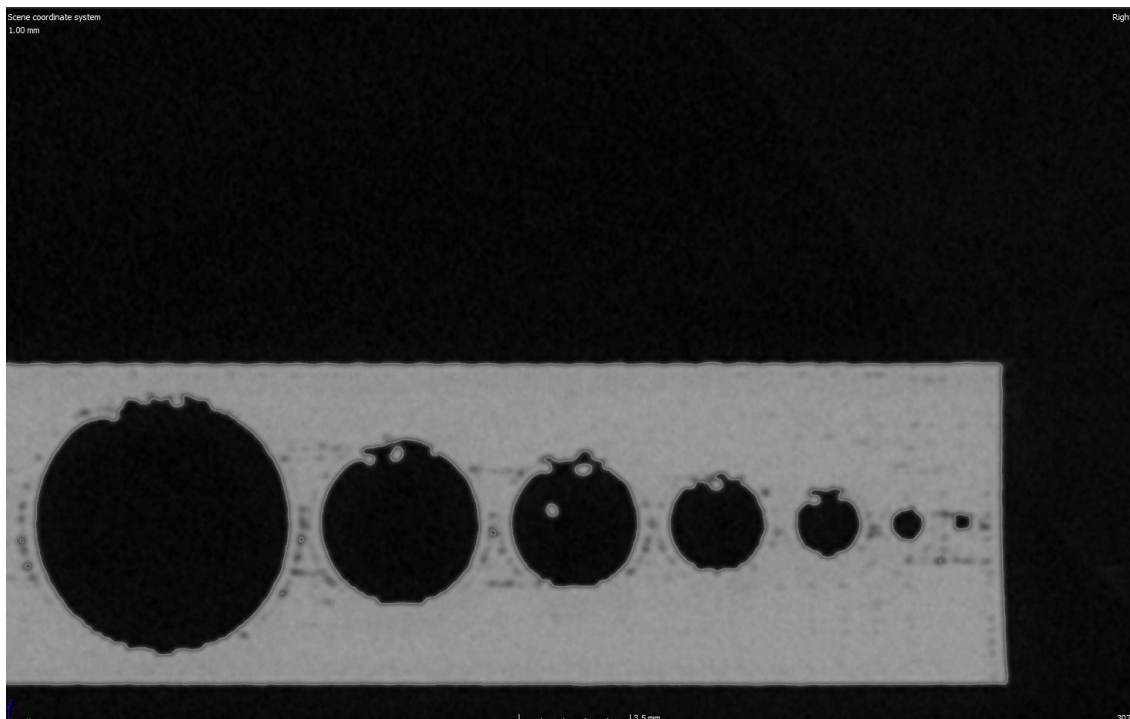
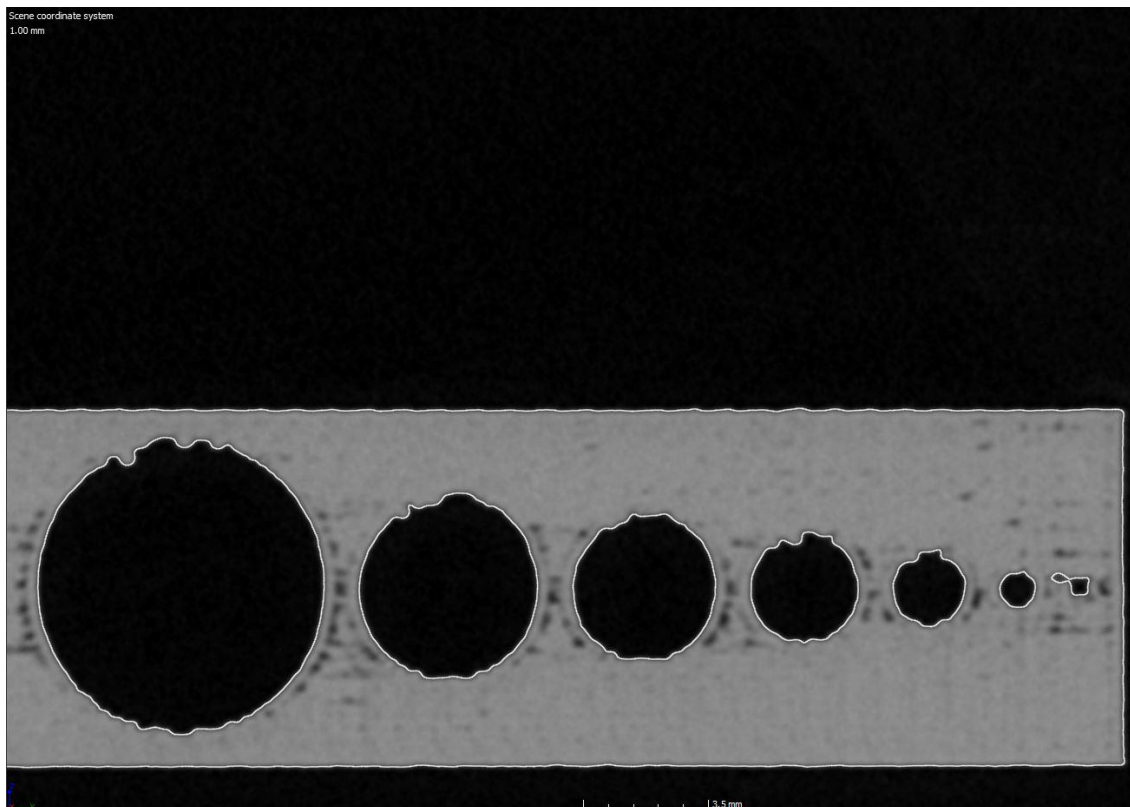


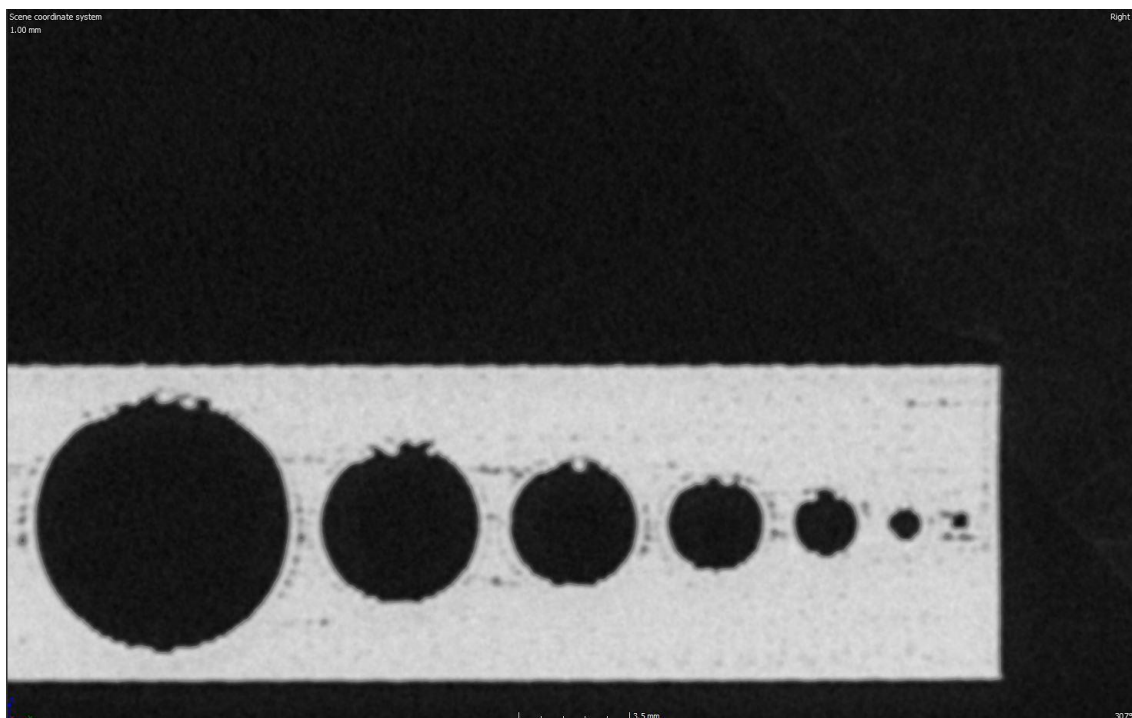
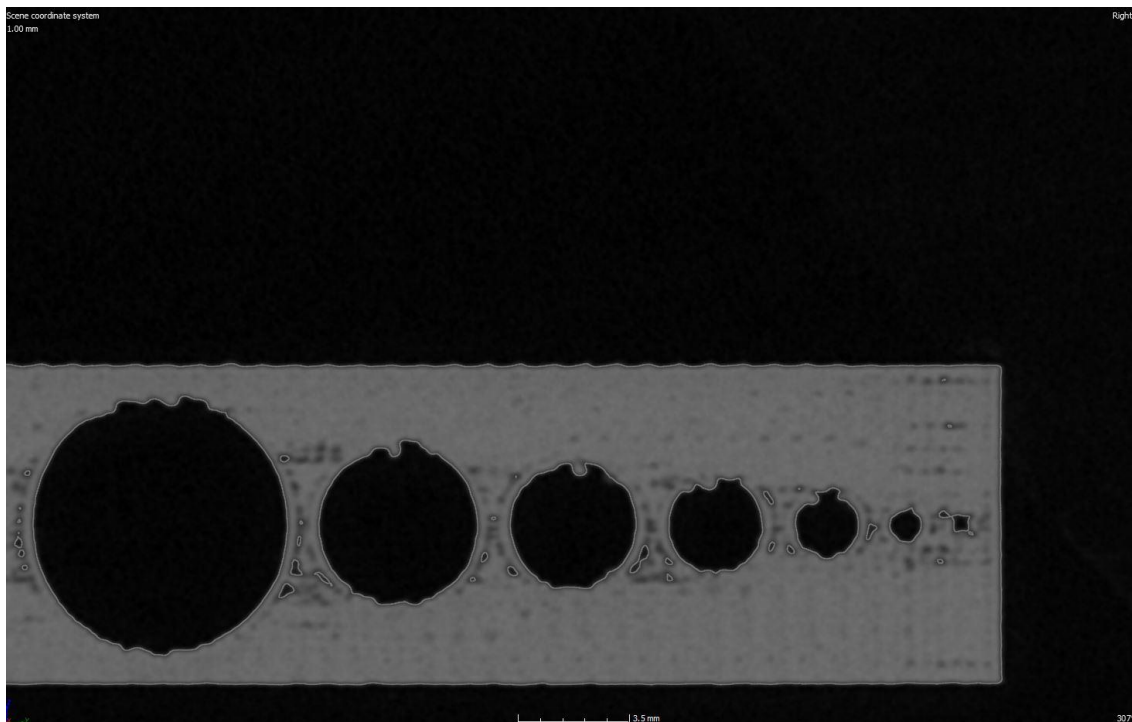


13.3.9. Díry kruhového profilu horizontální

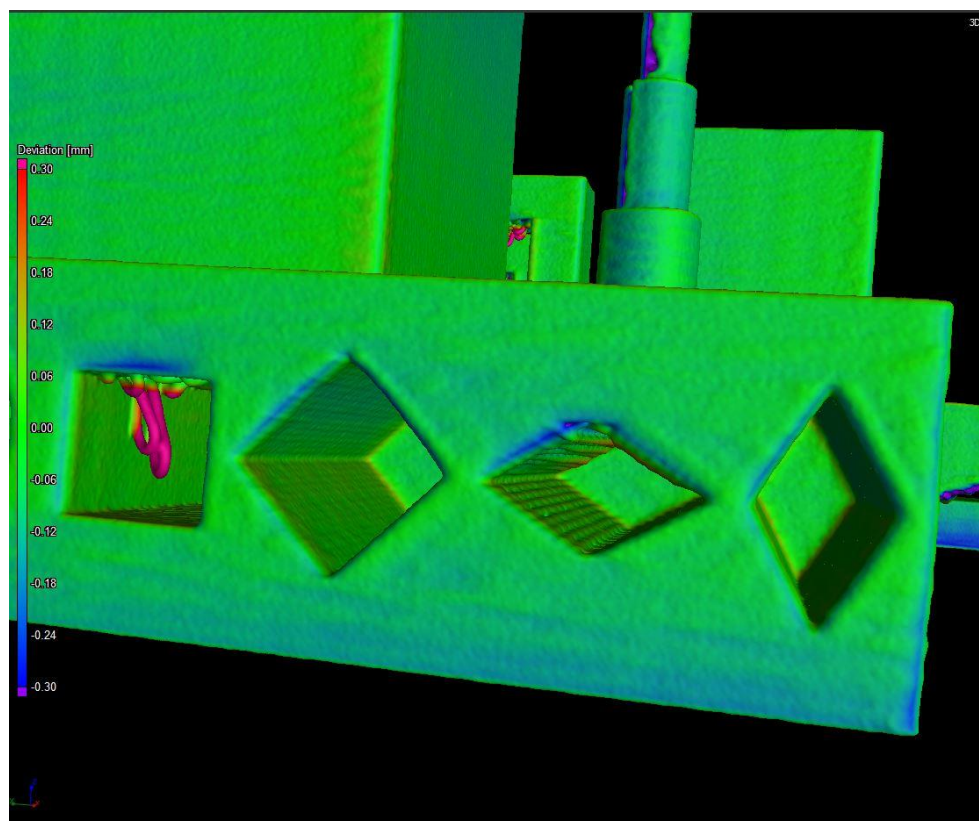
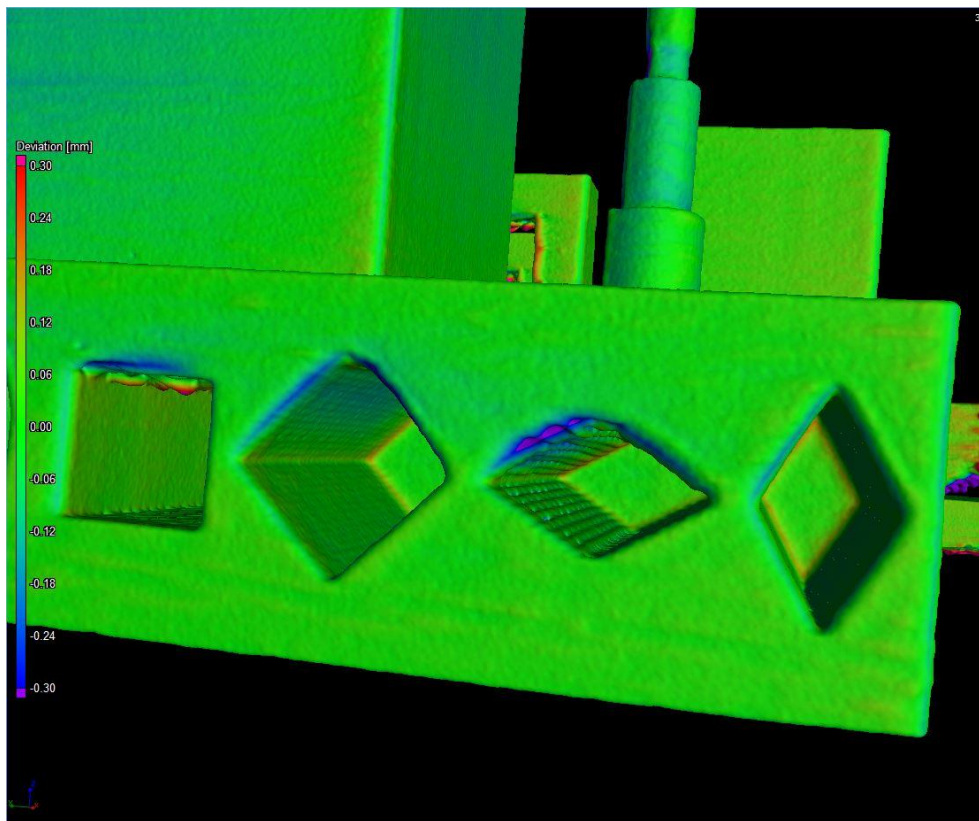


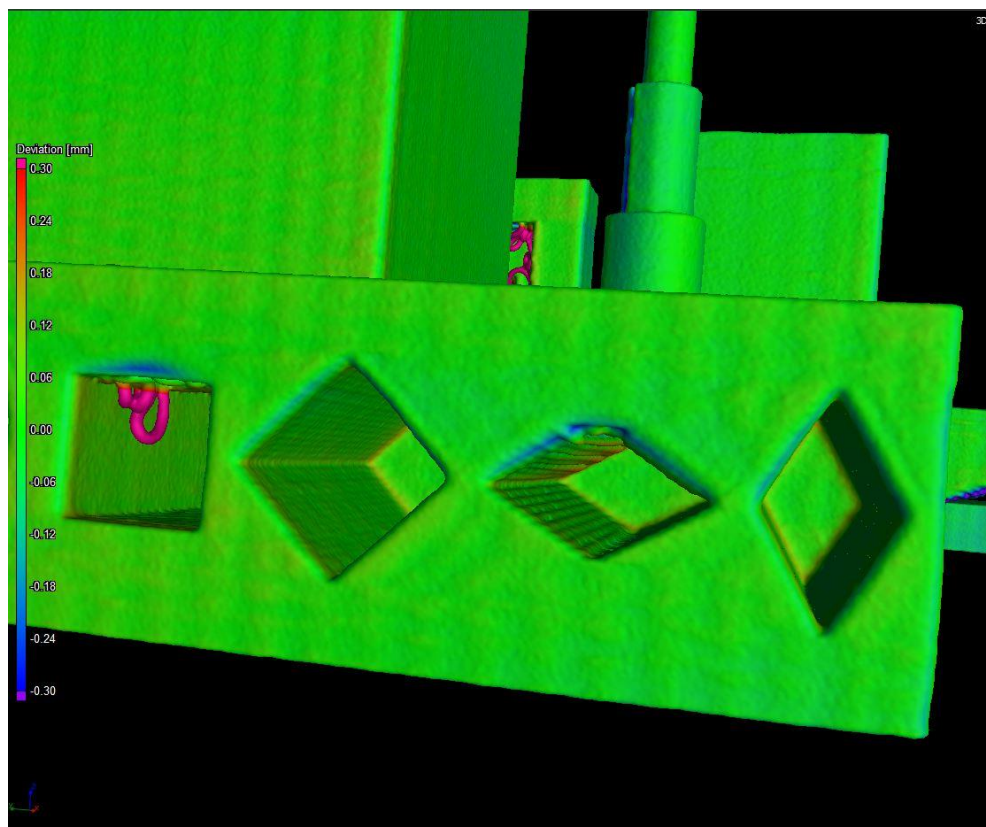
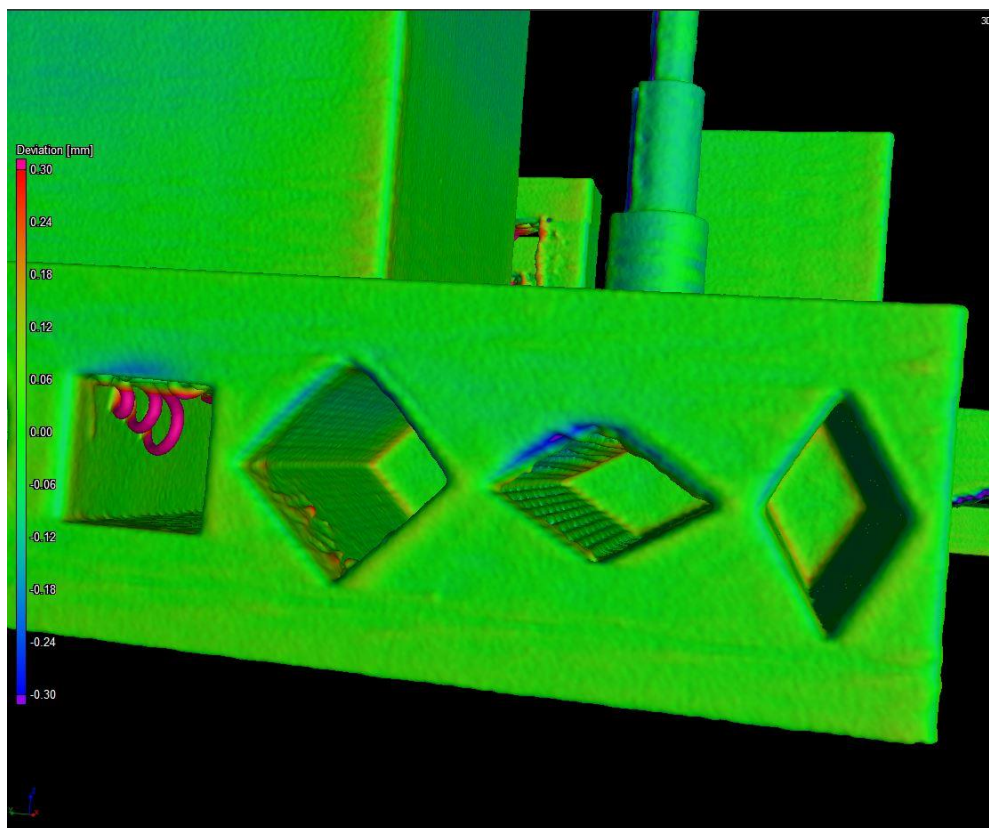


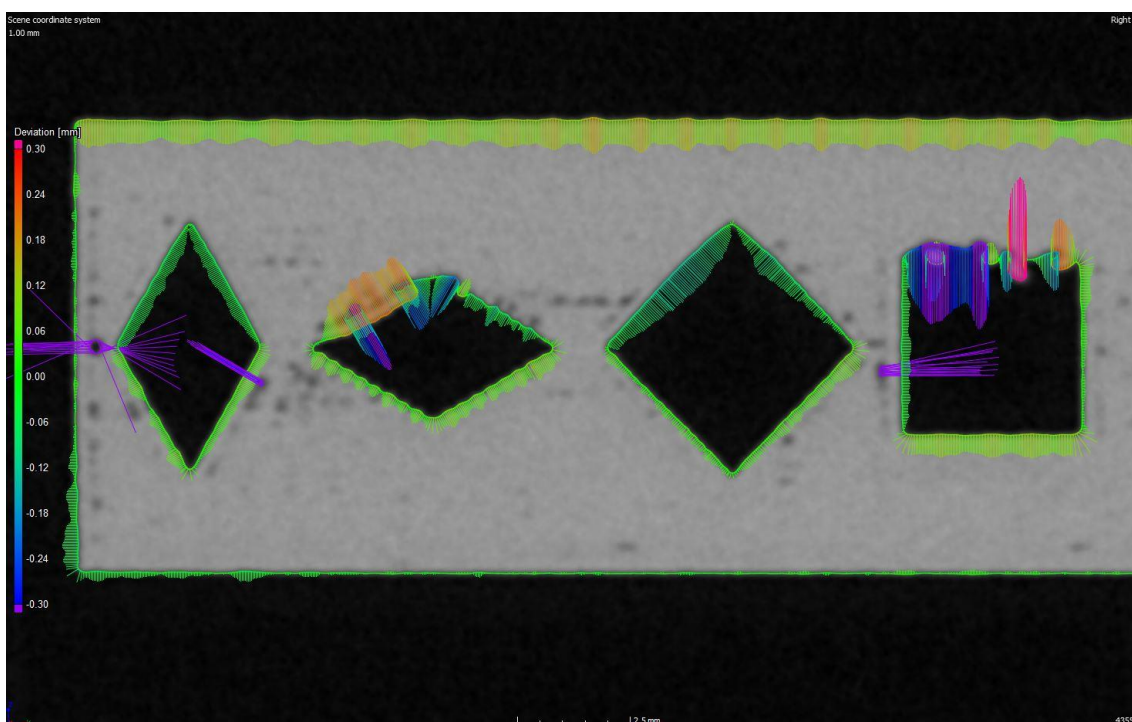
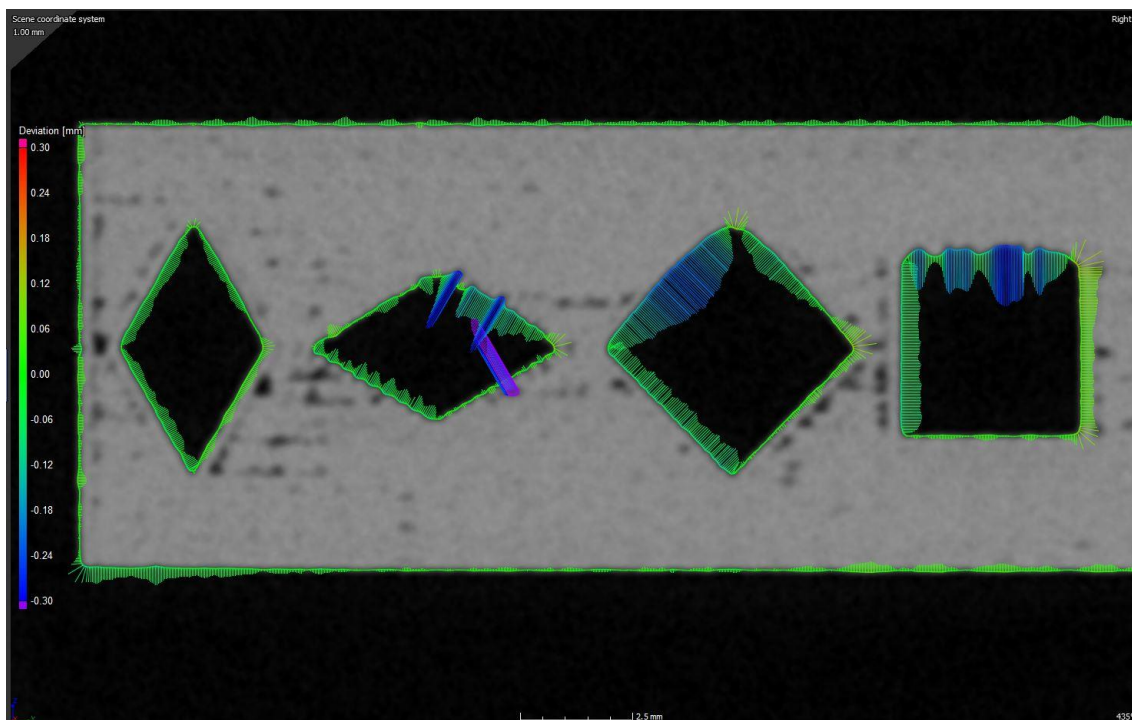


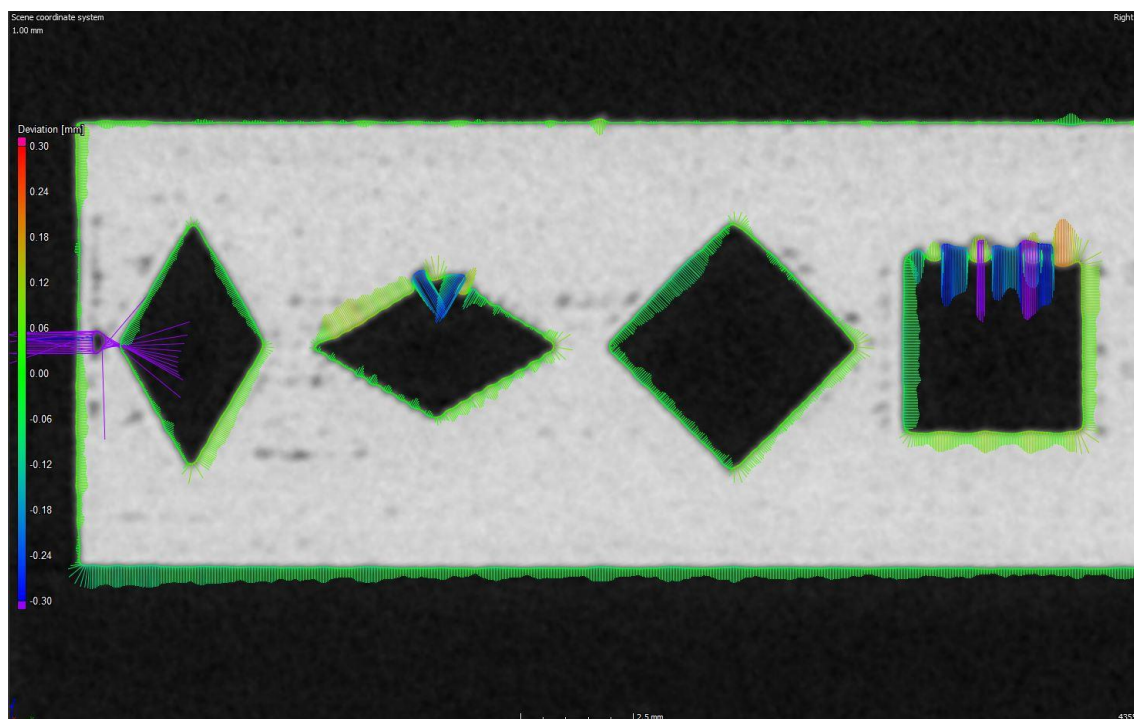
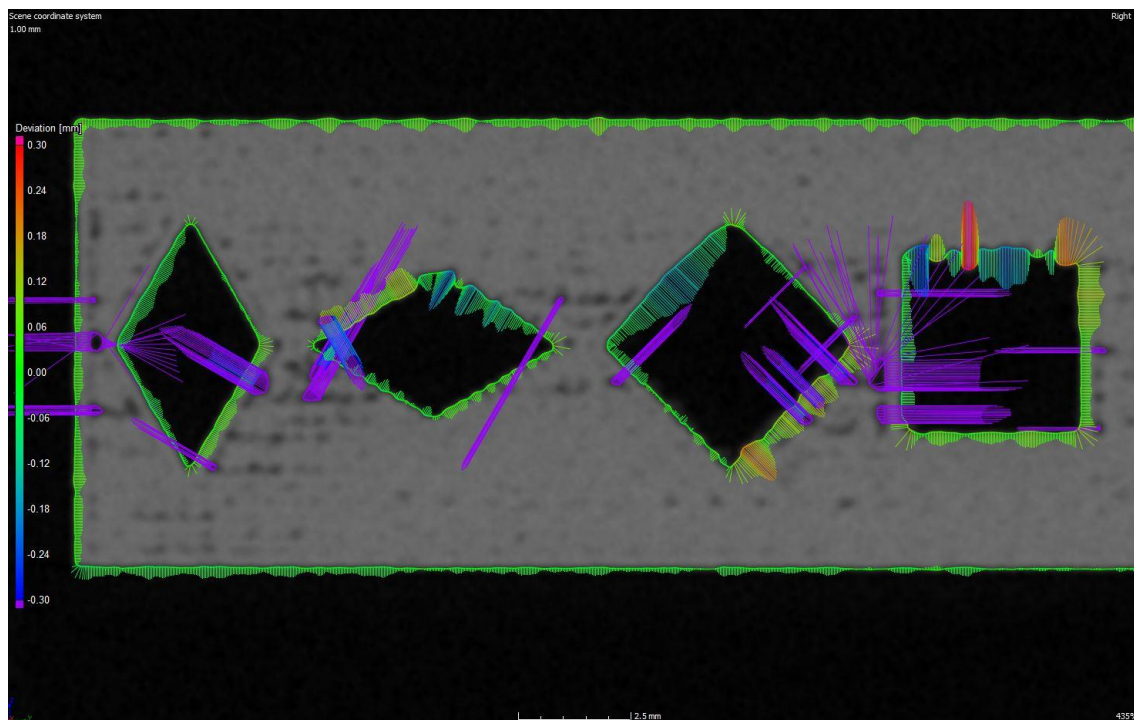


13.3.10. Díry nekruhových profilů horizontální

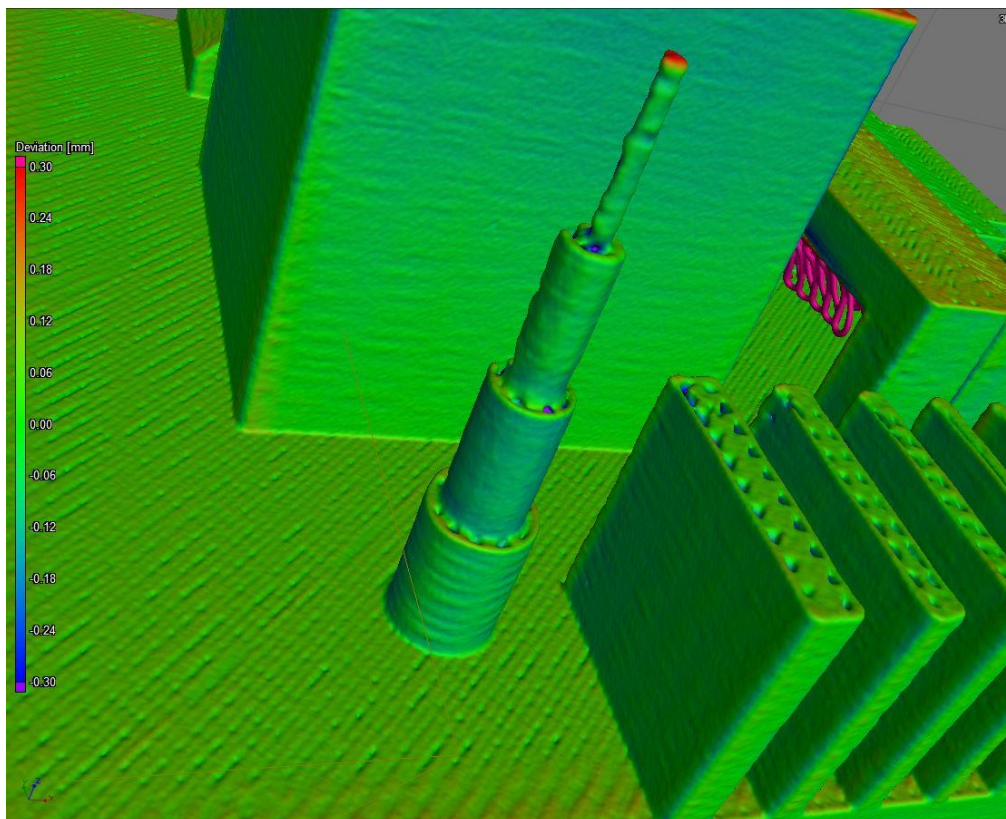
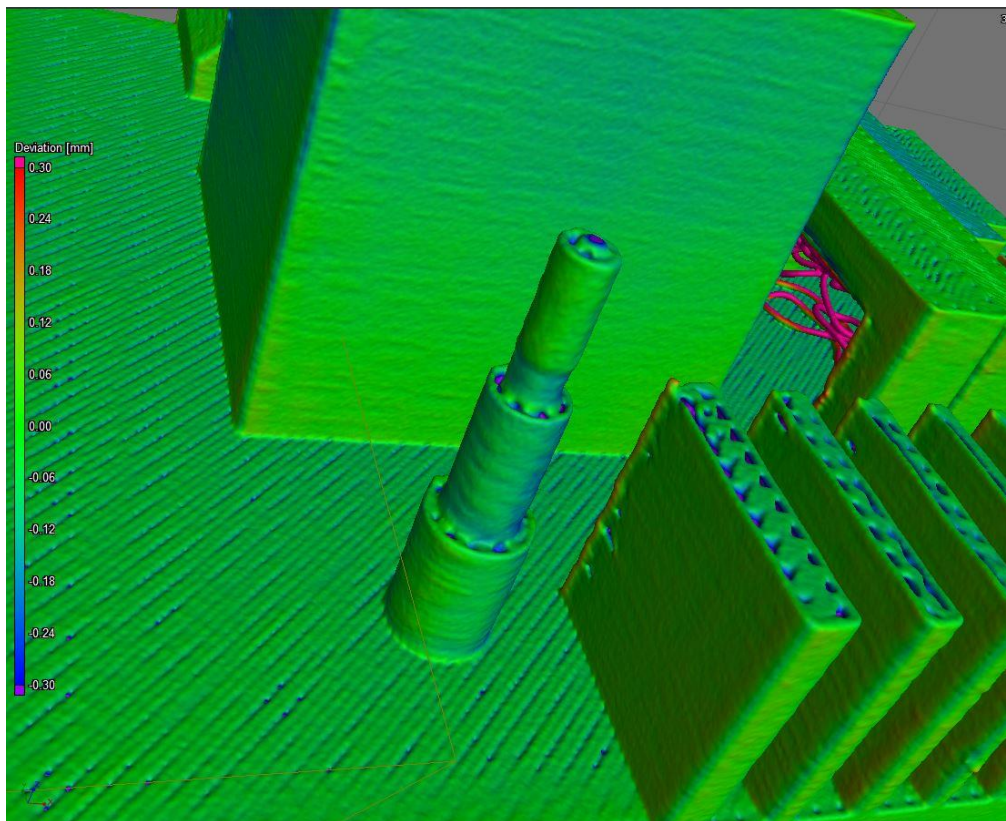


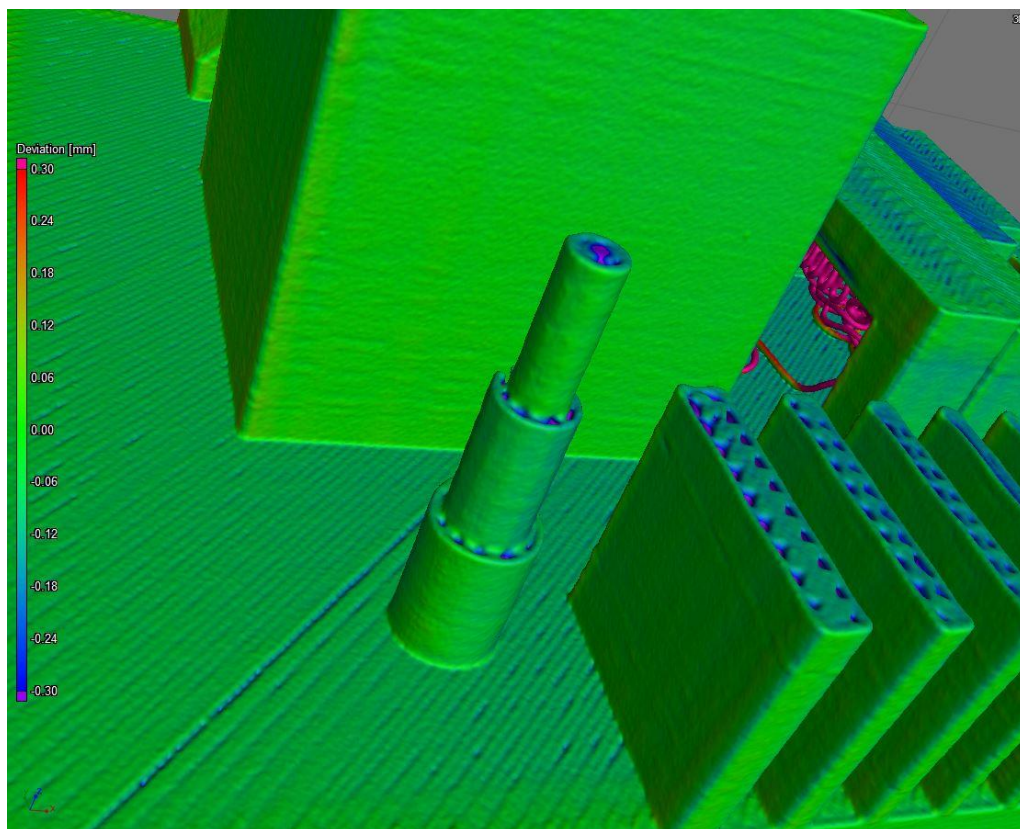
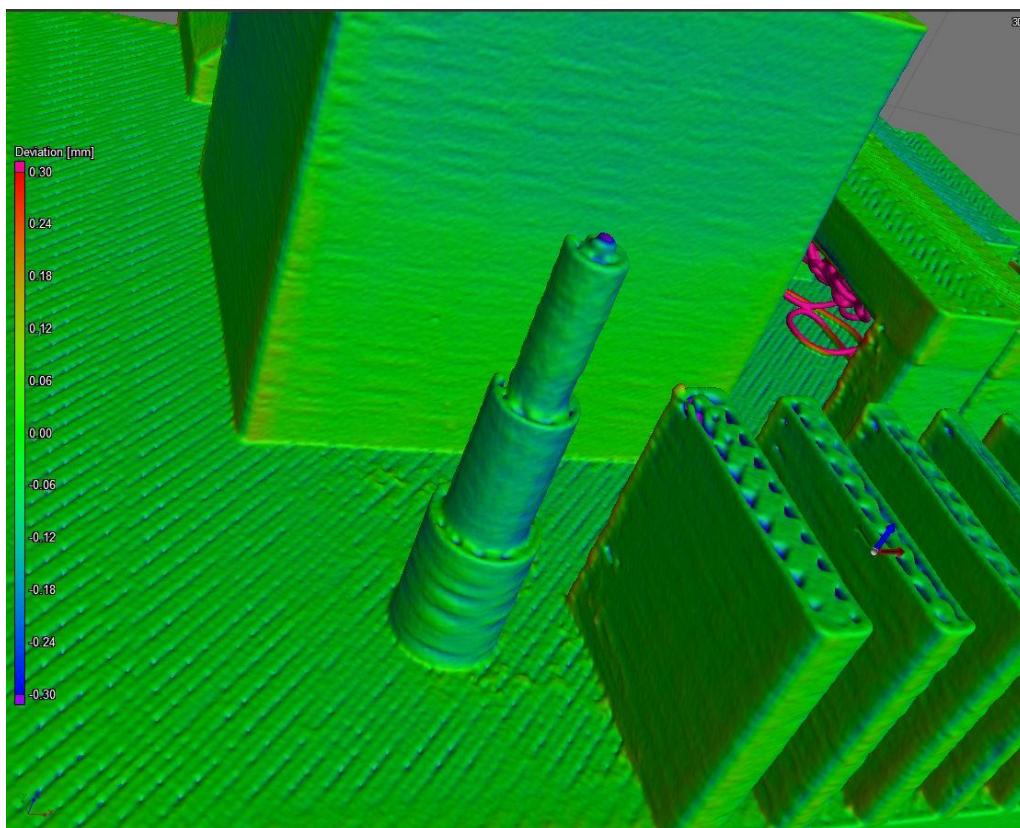


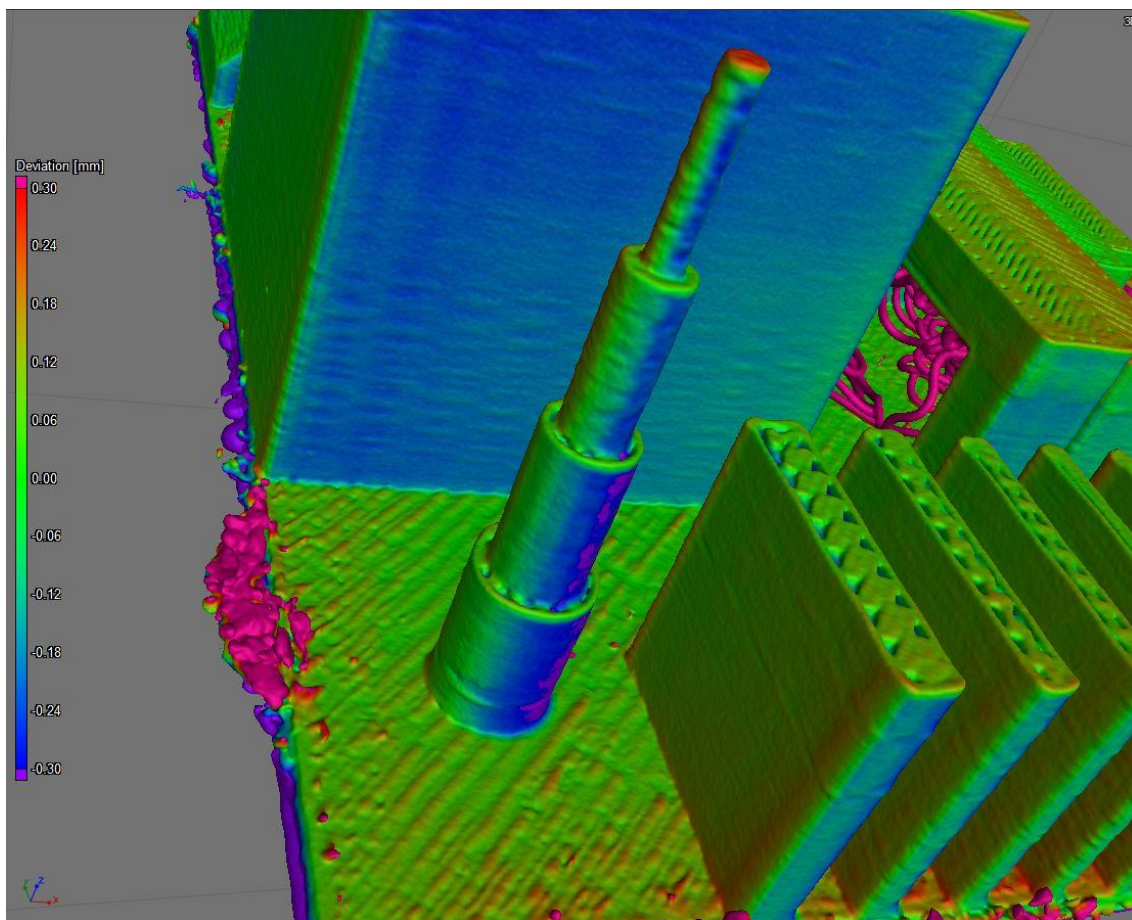


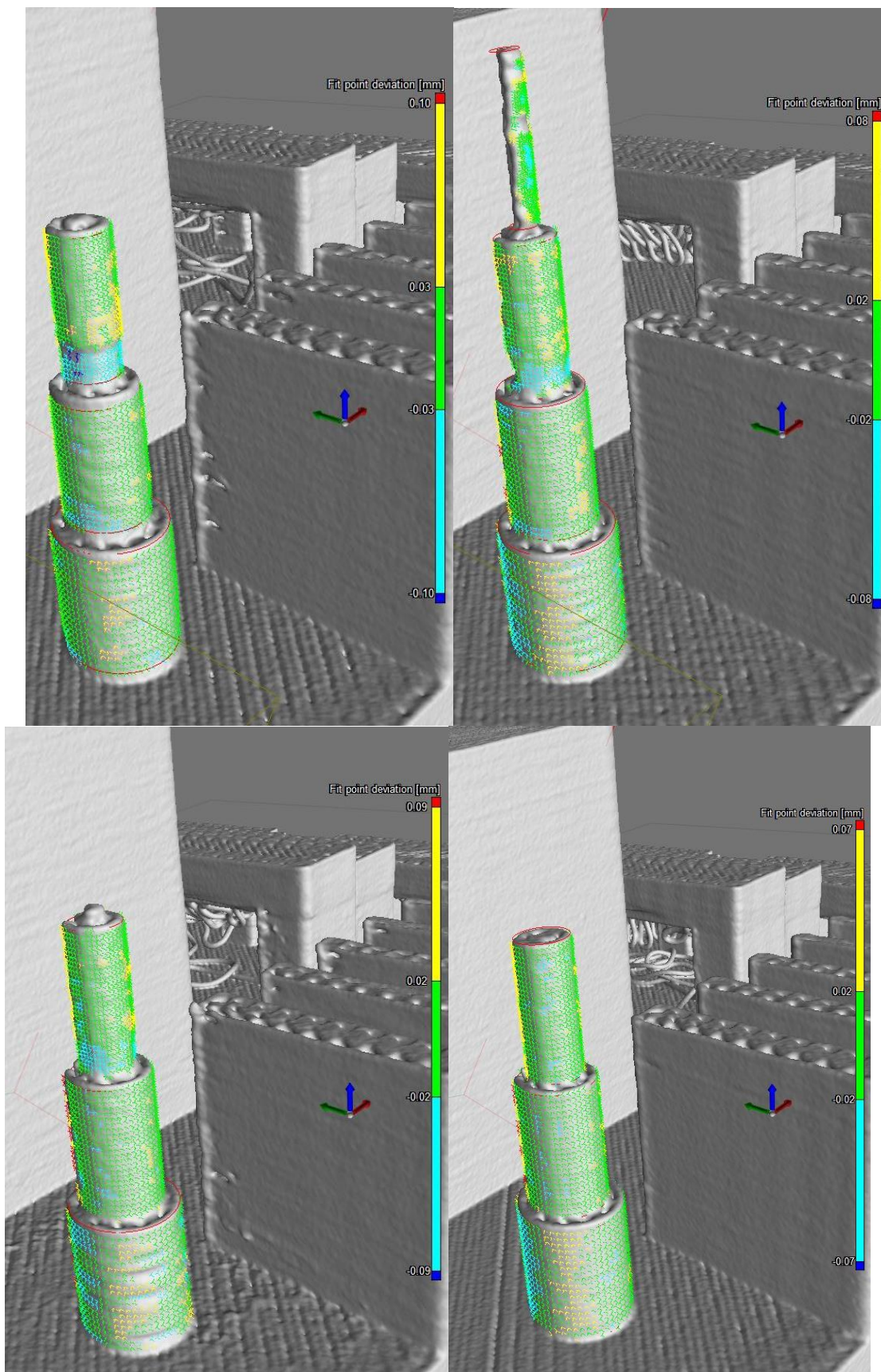


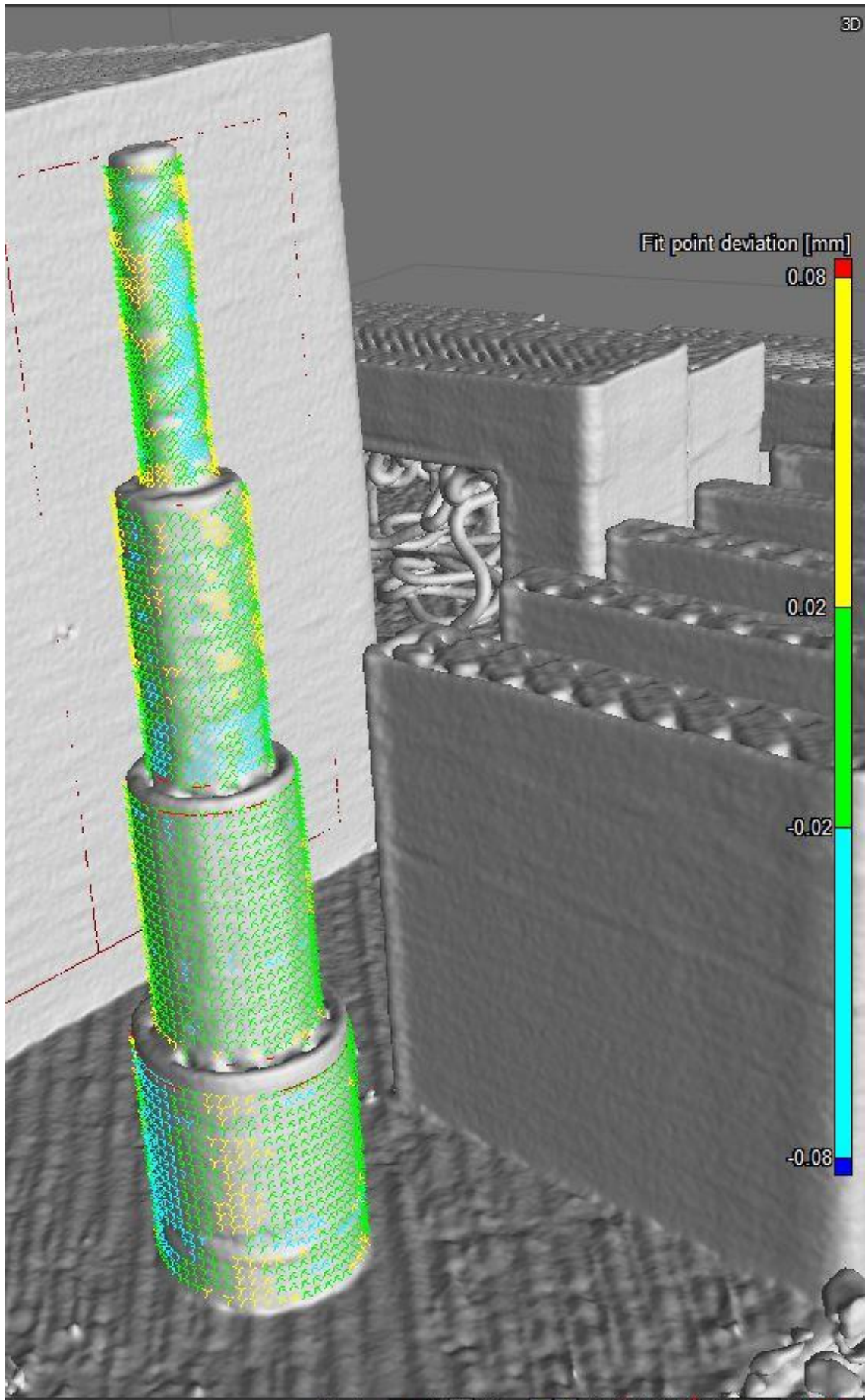
13.3.11. Stavba kruhových profilů



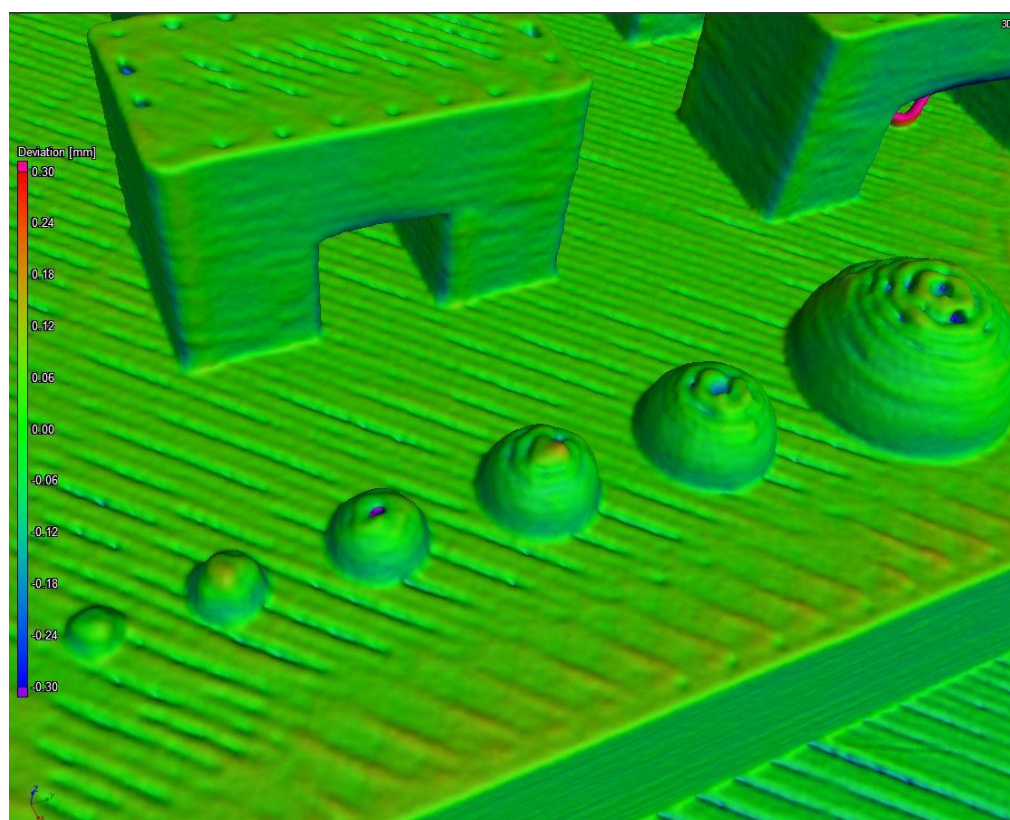
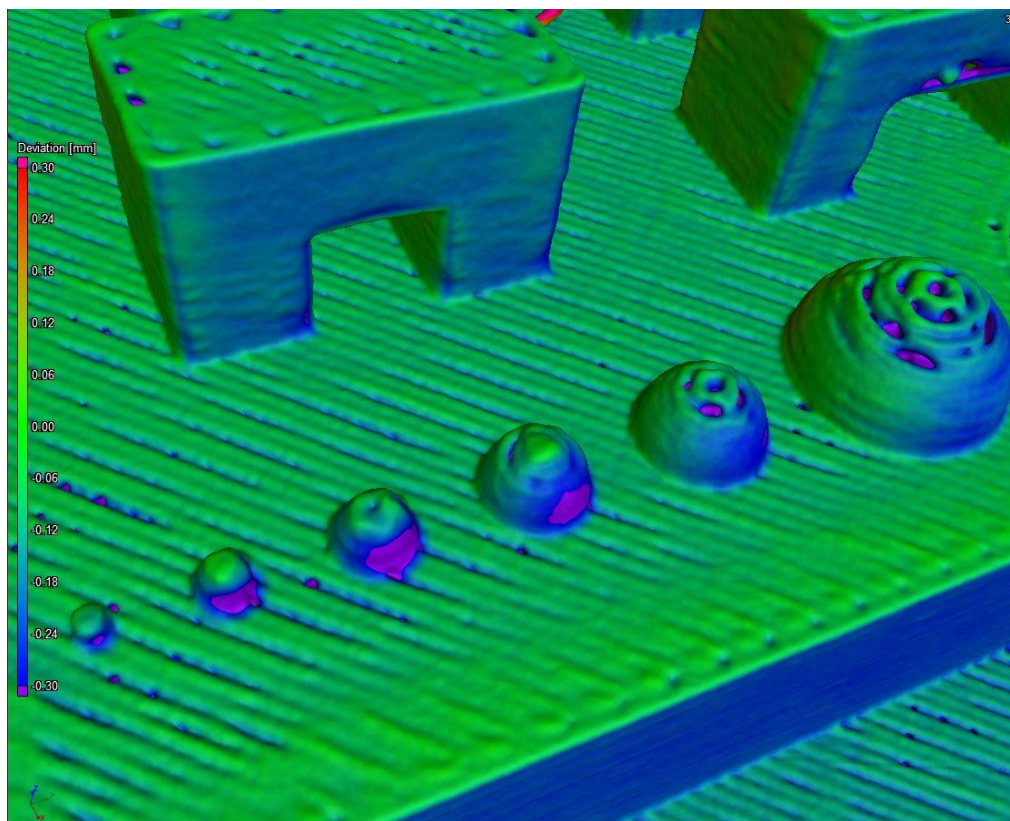


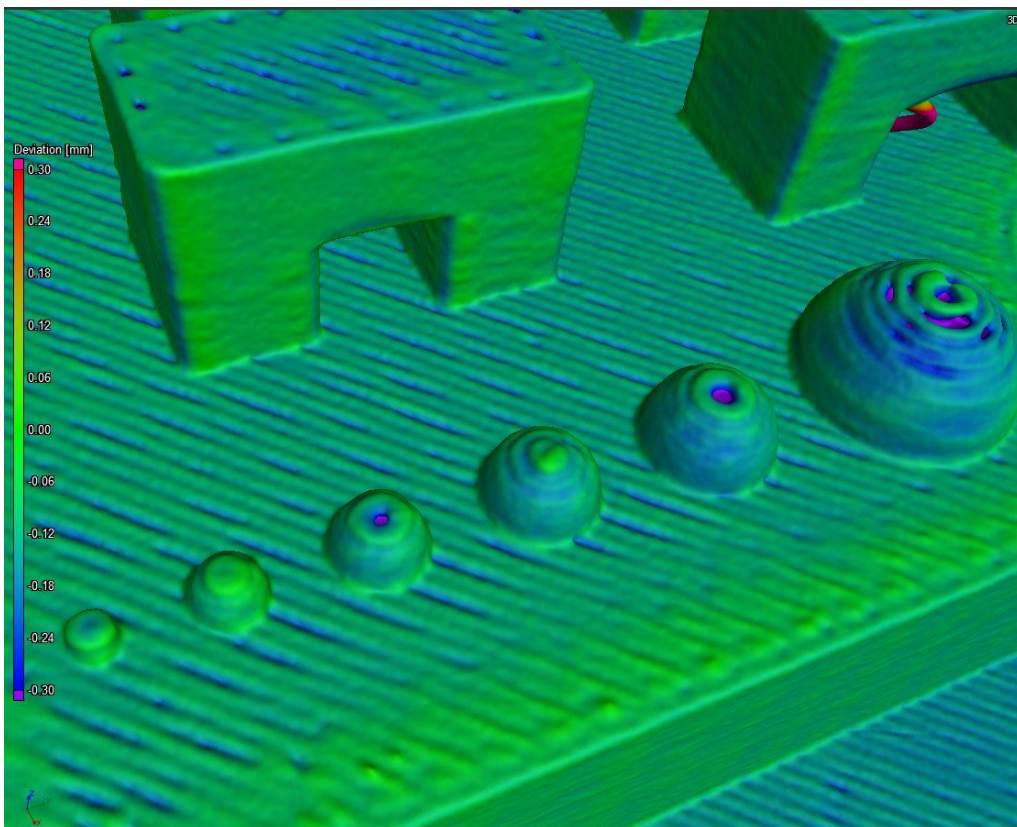
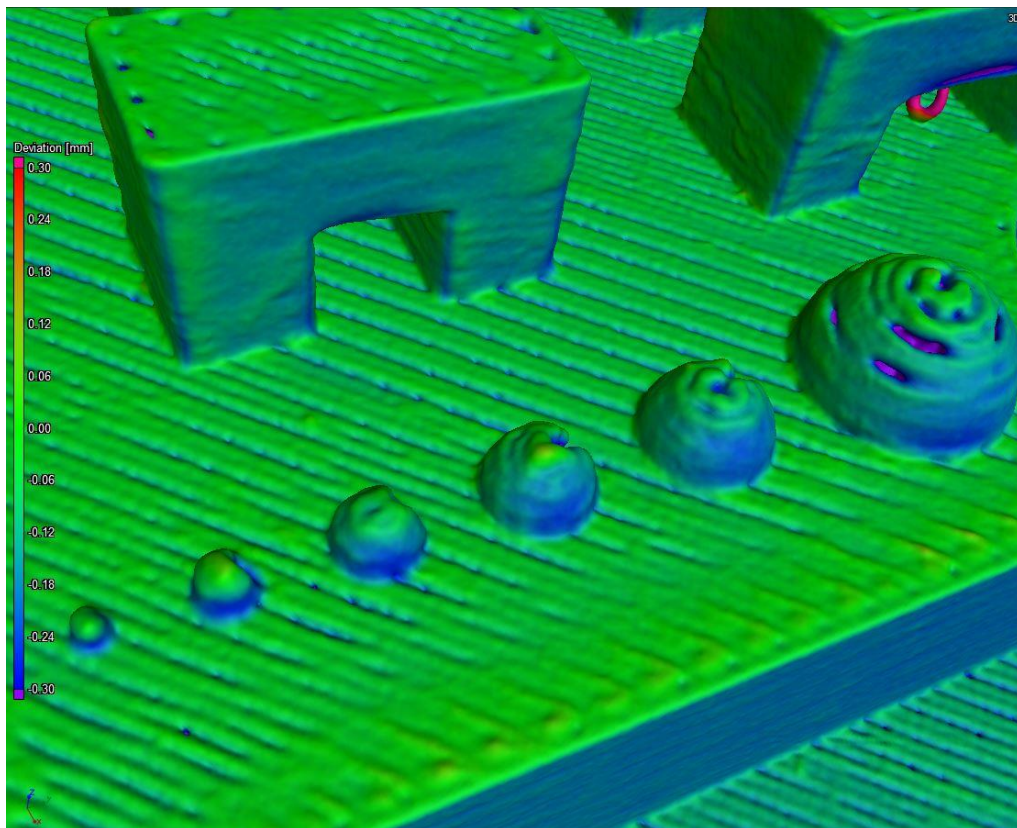


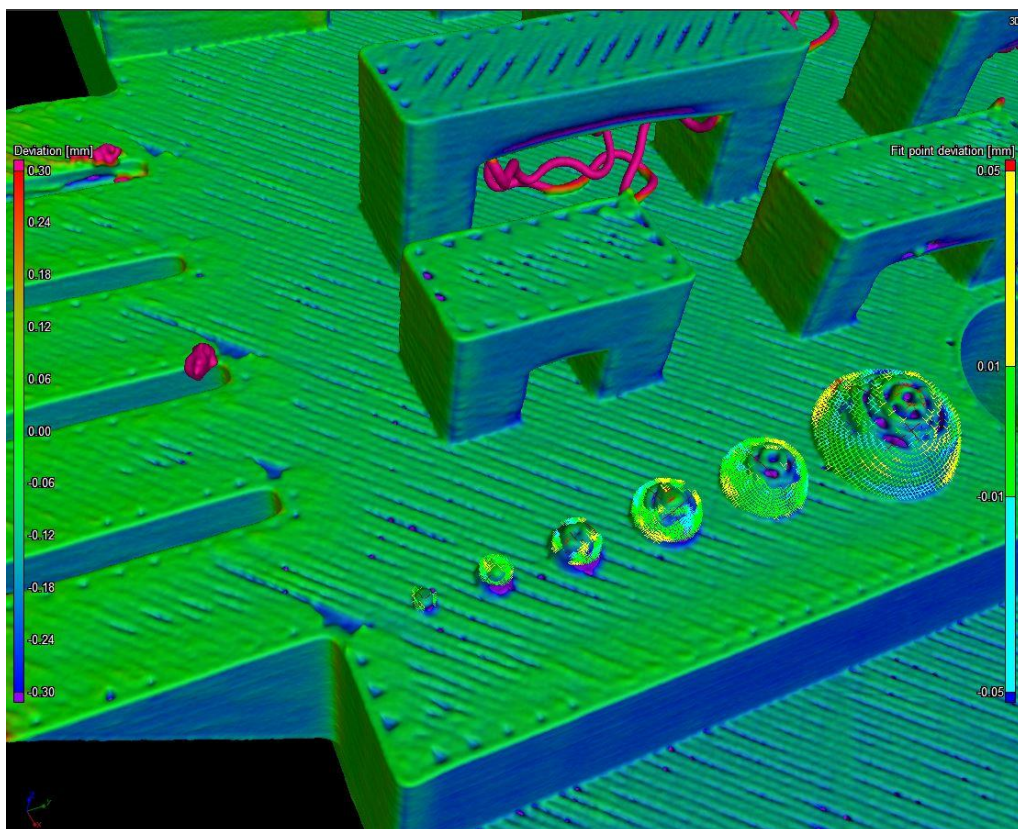
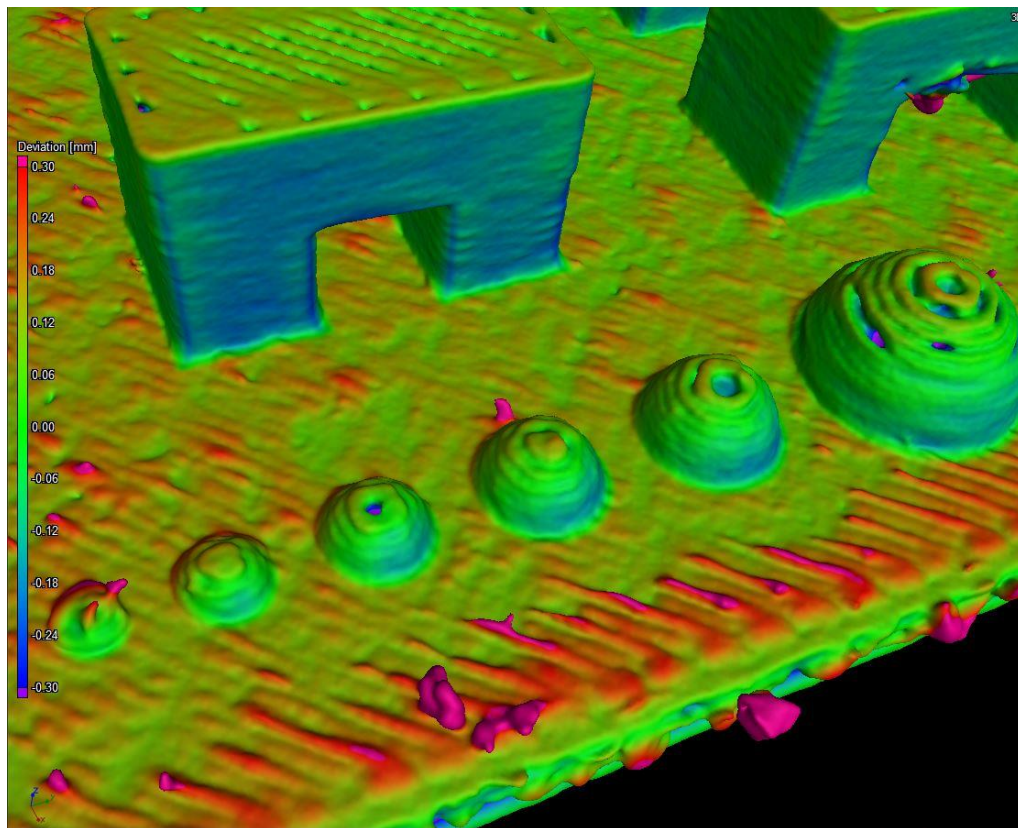


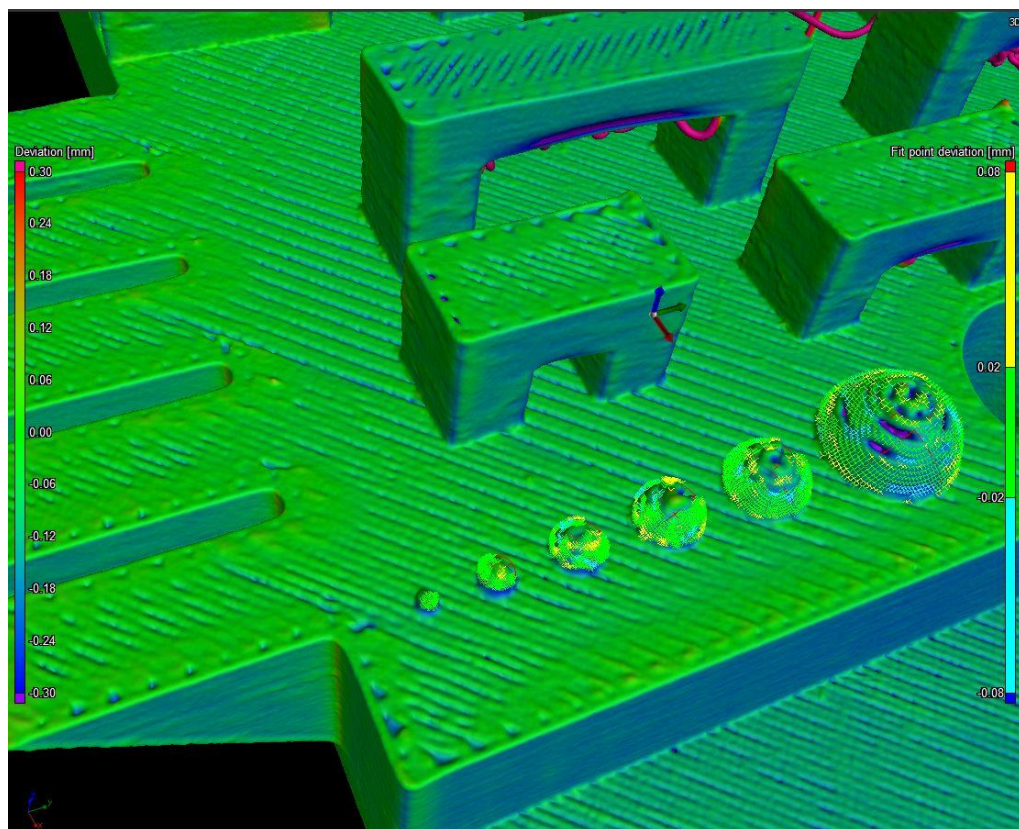
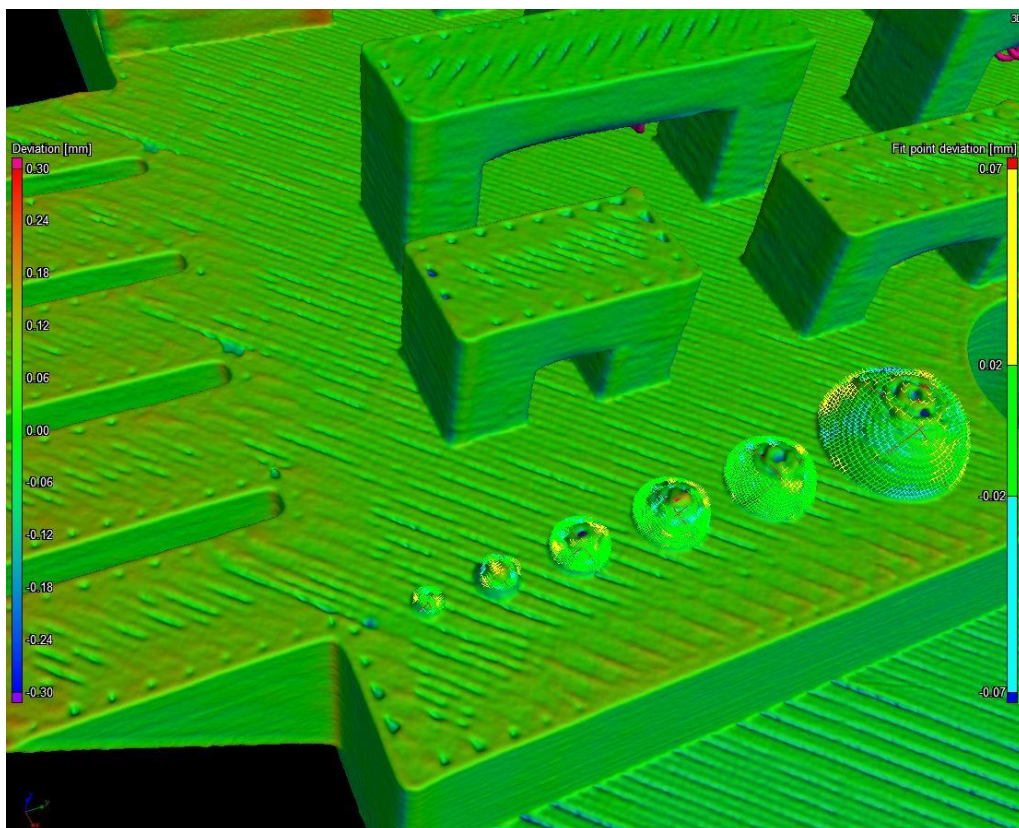


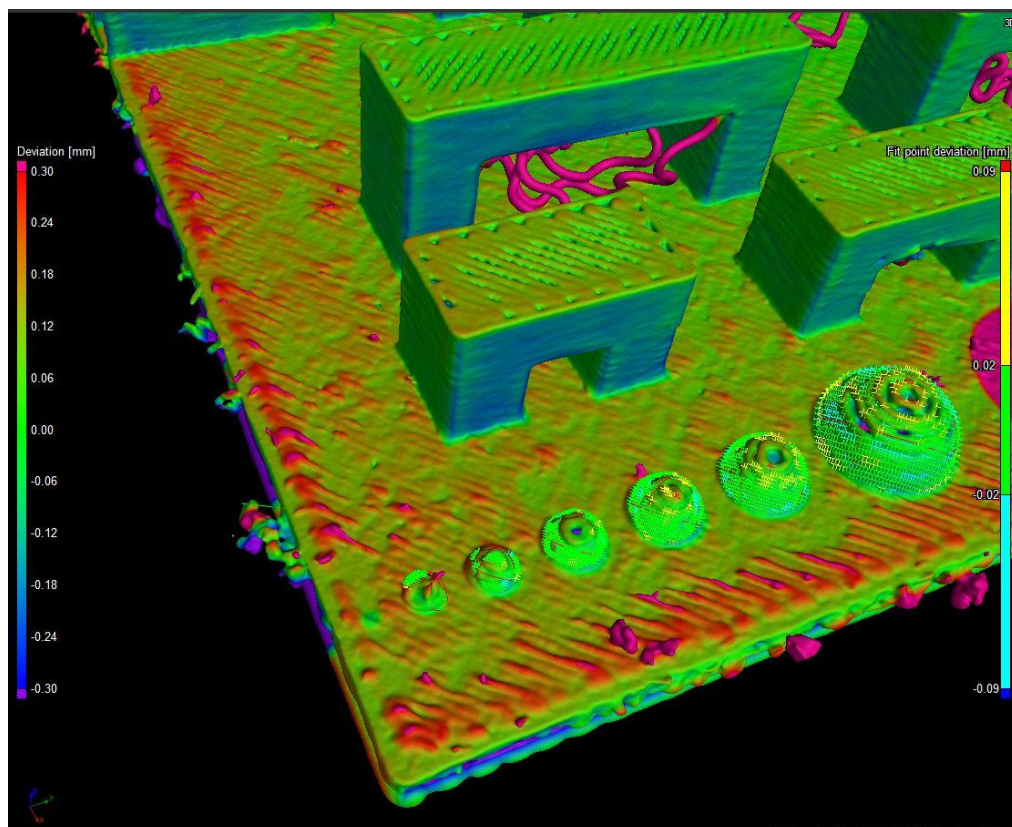
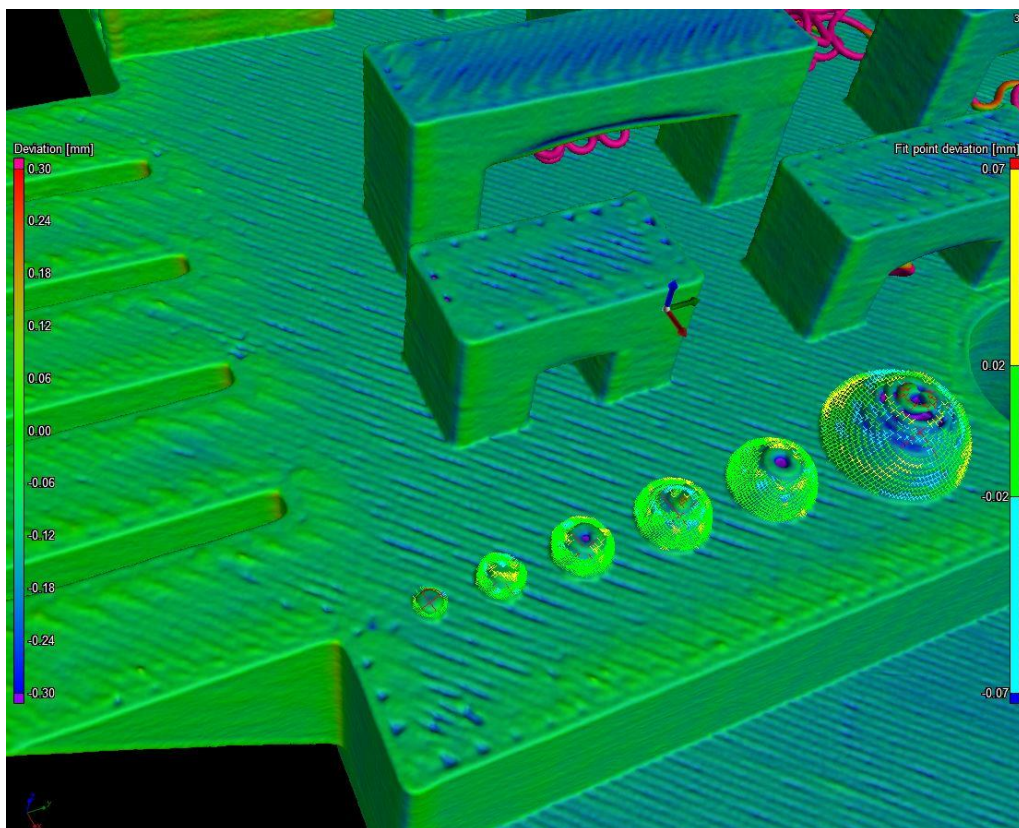
13.3.12. Polokoule











13.3.13. Zaoblení a zkosení

