

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Evidenčné číslo: MTF-16692-91750

Vplyv reverzného geometrického modelovania na rozmery a tvar 3D modelu

Diplomová práca

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Evidenčné číslo: MTF-16692-91750

**Vplyv reverzného geometrického
modelovania na rozmery a tvar 3D modelu**

Diplomová práca

Študijný program: počítačová podpora návrhu a výroby
Študijný odbor: strojárstvo
Školiace pracovisko: Ústav výrobných technológií
Vedúci záverečnej práce: doc. Ing. Ivan Buranský, PhD.

Trnava 2023

Bc. Marek Špányi



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. Marek Špányi**
ID študenta: 91750
Študijný program: počítačová podpora návrhu a výroby
Študijný odbor: strojárstvo
Vedúci práce: doc. Ing. Ivan Buranský, PhD.
Vedúci pracoviska: doc. Ing. Ivan Buranský, PhD.
Miesto vypracovania: MTF STU so sídlom v Trnave

Názov práce: **Vplyv reverzného geometrického modelovania na rozmery a tvar 3D modelu**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

- 1 Reverzné inžinierstvo a reverzné geometrické modelovanie
- 2 Návrh a výroba vzorovej súčiastky
- 3 Získavanie 3D modelu vzorovej súčiastky
- 4 Reverzné geometrické modelovanie

Termín odovzdania diplomovej práce: 23. 04. 2023
Dátum schválenia zadania diplomovej práce: 10. 02. 2023
Zadanie diplomovej práce schválil: prof. Dr. Ing. Jozef Peterka – garant študijného programu

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som sa chcel poďakovať vedúcemu práce doc. Ing Ivanovi Buranskému, PhD. za jeho odborné vedenie, cenné rady a usmernenia ktoré mi slúžili ako podklady pre vyhotovenie mojej diplomovej práce.

Diplomová práca vznikla v rámci projektu "Implementácia inovatívnych foriem učenia a praktického tréningu do vzdelávania v oblasti výrobných technológií a výrobného manažmentu s cieľom zvýšiť atraktivnosť štúdia a podporiť rozvoj prierezových kompetencií absolventov" (026STU-4/2023), s podporou agentúry KEGA MŠVVaŠ SR.

SÚHRN

ŠPÁNYI, Marek: Vplyv reverzného geometrického modelovania na kvalitu modelu. [Diplomová Práca] – Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. Vedúci práce: doc. Ing. Ivan Buranský, PhD. Trnava: MTF STU, 2023. 70 strán.

V práci sú skúmané vplyvy rôznych prístupov k reverznému modelovaniu počítačových 3D modelov. Venuje sa k popisovaniu základných procesov reverzného inžinierstva z použitej literatúry ktoré sú neoddeliteľnou súčasťou reverzného geometrického modelovania. Opisuje rôzne spôsoby zberu 3D dát o súčiastkach. V práci je takisto riešený návrh vzorovej súčiastky ktorá je tvorená jednoduchými geometrickými prvkami slúžiacich pre skúmanie vplyvu reverzného modelovania na zmeny parametrov. Následne boli z modelu zhotovené dve vzorky aditívnou výrobou FDM a SLA na zariadeniach Stratasys F370 (FDM) a Form 3 (SLA). Z vyhotovených vzoriek bol zberom 3D dát na priemyselnom CT zariadení Metrotom 1500 získaný mrak bodov ktorý sa polygonizoval rôznymi spôsobmi v CAQ softvéri GOM Inspect a CARE softvéri VG Studio MAX. V práci je skúmaný vplyv spôsobov polygonizácie na počet bodov a veľkosť súboru. Ďalej bol skúmaný vplyv redukcie bodov na rozmery jednoduchých geometrických prvkov. Vyhodnocovanie ako aj proces reverzného modelovania bol vykonávaný v programe Autodesk Powershape.

Kľúčové slová: 3D digitalizácia, aditívna výroba, polygonizácia, reverzné inžinierstvo, reverzné geometrické modelovanie

ABSTRACT

ŠPÁNYI, Marek: Influence of reverse geometric modeling on the 3D model dimensions and shape. [Master Thesis] – Slovak University of Technology in Bratislava. Faculty of Materials Science and Technology in Trnava; Institute of production technologies. Supervisor: doc. Ing. Ivan Buranský, PhD. Trnava: MTF STU, 2021, 70 pages.

In this thesis, the effects of different approaches to reverse modelling of 3D CAD models are investigated. It is devoted to describe the basic reverse engineering processes which are an important part of reverse geometric modelling. Various methods of collecting the 3D data of components are covered in the first chapter. The thesis also addresses the design of a sample part which is made up of simple geometric features. They are used to investigate the effect of reverse modelling on parameter deviations. Two samples were fabricated based on the designed model by two additive manufacturing methods - FDM on Stratasys F370 machine and for the SLA method, Form 3 machine was used. From the fabricated samples, a cloud point was obtained by 3D data acquisition on a Metrotom 1500 industrial CT machine. The cloud point was polygonized by various methods in the CAQ software GOM Inspect and CARE software VG Studio MAX. In this work, the effect of the polygonization methods on the number of points and the file size was investigated. Furthermore, the influence of point reduction on the dimensions of simple geometric features was investigated. The evaluation as well as the reverse modelling process was carried out in Autodesk Powershape CAD software.

Key words: 3D digitization, additive manufacturing, polygonization, reverse engineering, reverse geometric modelling

OBSAH

ZOZNAM SYMBOLOV, SKRATIEK A ZNAČIEK	9
ZOZNAM ILUSTRÁCIÍ	10
ZOZNAM TABULIEK	12
ÚVOD	13
1 REVERZNÉ INŽINIERSTVO A REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE	14
1.1 Definícia reverzného inžinierstva	14
1.2 História a vývoj reverzného inžinierstva	15
1.3 Procesy reverzného inžinierstva	16
1.4 3D digitalizácia	17
1.4.1 Polygonizácia	18
1.5 Kontaktné metódy zberu dát	19
1.5.1 Spínacie dotykové sondy	20
1.5.2 Meracie ramená	21
1.5.3 Deštruktívne metódy zberu dát	22
1.6 Bezkontaktné metódy zberu dát	23
1.6.1 Optické meranie	23
1.6.2 Transmisné metódy zberu dát	26
1.7 Reverzné geometrické modelovanie	27
2 NÁVRH A VÝROBA VZOROVEJ SÚČIASTKY	28
2.1 Návrh CAD modelu	28
2.2 Technológia aditívnej výroby	33
2.3 Fused Deposition Modelling (FDM)	34
2.3.1 Materiály využívané pri FDM	36
2.4 Stereolitografia (SLA)	36
2.4.1 Materiály využívané pri SLA	38
2.5 Porovnanie technológií FDM a SLA	38
2.6 Výroba vzoriek FDM	39
3 ZÍSKAVANIE 3D MODELU VZOROVEJ SÚČIASTKY	44
3.1 Zariadenie Metrotom 1500	44
3.2 Skenovanie vzoriek	45
3.3 Polygonizácia mraku bodov a jej vplyv na počet bodov	46
4 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE	50

4.1 Príprava modelu pred RGM.....	50
4.2 Skúmanie vplyvu redukcie siete	51
4.2.1 Vplyv redukcie siete na Horizontálny valec D20.....	51
4.2.2 Vplyv redukcie siete na Guľu D30.....	56
4.2.3 Vplyv redukcie siete na Kužel' D20	61
ZÁVER	65
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	66

PRÍLOHY:

Príloha A – Mapa geometrických elementov

Príloha B - Vplyv redukcie na počet bodov, priemer a pozíciu Horizontálneho valca D30

Príloha C - Vplyv redukcie na počet bodov, priemer a pozíciu Gule D20

Príloha D - Vplyv redukcie na počet bodov, uhol a pozíciu Kužela D30

Príloha E - Vplyv redukcie na počet bodov, polomer a pozíciu Polgule R15

Príloha F - Vplyv redukcie na počet bodov, polomer a pozíciu Polgule R30

Príloha G - Vplyv redukcie na počet bodov, priemer a pozíciu Valca D30

Príloha H - Vplyv redukcie na počet bodov, priemer a pozíciu Valca D20

ZOZNAM SYMBOLOV, SKRATIEK A ZNAČIEK

3D	Trojrozmerný	
AM	Additive manufacturing	Aditívna výroba
CAD	Computer Aided Design	Počítačová podpora návrhu
CAM	Computer Aided Manufacturing	Počítačová podpora výroby
CARE	Computer Aided Reverse Engineering	Počítačová podpora reverzného inžinierstva
CNC	Computer Numerical Control	Počítačové číslicové riadenie
CT	Computer Tomography	Počítačová tomografia
FDM	Fused Deposition Modelling	
NURBS	Non-uniform rational B-spline	
RE	Reverzné inžinierstvo	
RGM	Reverzné geometrické modelovanie	
SLA	Stereolitografia	
SMS	Súradnicový merací systém	
SS	Súradnicový systém	
SW	Software	Softvér
STL	Standard Triangle Language	Štandardný triangulačný jazyk
VGL	Volume Graphics GmbH	

ZOZNAM ILUSTRÁCIÍ

Obr.1 Proces reverzného inžinierstva (Katsuhiro 2021)	14
Obr.2 Americký bombardér B29 (Messler, 2013).....	15
Obr. 3 Klasifikácia metód zberu 3D dát (Peng, 2011)	17
Obr.4 Mračno bodov získané 3D skenerom (Caddcam, 2020)	18
Obr. 5 Proces polygonizácie (Buranský, 2020).....	19
Obr.6 Princíp merania na SMS (Baručija, 2020).....	20
Obr. 7 Schéma funkcie kinematickej meracej sondy (Renishaw, 2017)	21
Obr. 8 Meracie rameno so 7 rotačnými osami (Trimos, 2021)	22
Obr. 9 Schéma funkcie 3D skenovania štruktúrovaným svetlom (Mendřický, 2015)	24
Obr. 10 Základný princíp laserového skenovania (Medricky, 2018).....	25
Obr. 11 Princíp fotogrametrie (Aboali, 2017)	25
Obr. 12 Princíp priemyselnej počítačovej tomografie (Welkenhuyzen, 2009)	26
Obr. 13 Vytvorenie podstavy	28
Obr. 14 Vytvorenie valca D30mm	29
Obr. 15 Vytvorenie valca D20mm	29
Obr. 16 Vytvorenie Kužela D30	30
Obr. 17 Vytvorenie Kužela D20	30
Obr. 18 Vytvorenie Gule D30	30
Obr. 19 Vytvorenie Gule D20	31
Obr. 20 Vytvorenie Polgule R15	31
Obr. 21 Vytvorenie Polgule R10	31
Obr. 22 Namodelovanie nosných stien.....	32
Obr. 23 Vytvorenie Horizontálneho valca D20.....	32
Obr. 24 Vytvorenie Horizontálneho valca D30.....	32
Obr. 25 Vytvorenie zaoblení na rohoch štvorcovej základne.....	33
Obr. 26 Grafické zobrazenie procesu AM (Quan, 2015)	33
Obr. 27 Princíp FDM (Hubs, 2022).....	35
Obr. 28 SLA zariadenie (manufactur3d, 2018)	37
Obr. 29 Zariadenie Stratasys F370 nachádzajúce sa na pôde fakulty	39
Obr. 30 Príprava pred FDM tlačou v softvéri GrabCAD	40
Obr. 31 Voľba parametrov pre FDM tlač	41
Obr. 32 Vyrobená a očistená vzorka zhotovená metódou FDM	41
Obr. 33 Ustavenie modelu v programe PreForm a parametre tlače	43
Obr. 34 Zhotovená SLA vzorka	43

Obr. 35 CT skener Metrotom 1500 nachádzajúci sa na pôde fakulty	44
Obr. 36 Získaný mrak bodov FDM vzorky v softvéri MetrotomOS.....	46
Obr. 37 Získaný mrak bodov SLA vzorky v softvéri MetrotomOS.....	46
Obr. 38 Grafická závislosť veľkosti súborov od typu polygonizácie v GOM Inspect.....	47
Obr. 39 Grafická závislosť počtu bodov od typu polygonizácie v GOM Inspect.....	48
Obr. 40 Grafická závislosť veľkosti súborov od typu polygonizácie vo VG Studio MAX	48
Obr. 41 Grafická závislosť počtu bodov od typu polygonizácie vo VG Studio MAX	49
Obr. 42 Definovanie súradnicového systému v GOM Inspect.....	50
Obr. 43 Proces výberu elementu v prostredí GOM Inspect	51
Obr. 44 Výber, extrakcia a import Horizontálneho valca D20.....	51
Obr. 45 Redukcia siete cez zadanú percentuálnu hodnotu	52
Obr. 46 Výber bodov a výber vytvorenia valcovej plochy.....	52
Obr. 47 Vytvorenie valcovej plochy a zaznamenanie rozmerov	53
Obr. 48 Funkcia zistenia informácie o výbere	53
Obr. 49 Grafická závislosť priemeru valcovej plochy D20 od redukcie siete	54
Obr. 50 Grafická závislosť pozície Horizontálneho valca D20 od redukcie.....	55
Obr. 51 Detail grafickej závislosti pozície Horizontálneho valca D20 od redukcie	55
Obr. 52 Farebná mapa odchýlok Horizontálneho valca D20 pri FDM modeli	56
Obr. 53 Farebná mapa odchýlok Horizontálneho valca D20 pri SLA modeli	56
Obr. 54 Výber, extrakcia a import Gule D30	56
Obr. 55 Výber bodov a vytvorenie guľovej plochy D30.....	57
Obr. 56 Grafická závislosť priemeru guľovej plochy D30 od redukcie siete.....	58
Obr. 57 Grafická závislosť pozície Gule D30 od redukcie	59
Obr. 58 Grafická závislosť pozície guľovej plochy D30 v hladine Z od redukcie.....	60
Obr. 59 Farebná mapa odchýlok guľovej plochy D30 FDM modelu.....	60
Obr. 60 Farebná mapa odchýlok guľovej plochy D30 SLA modelu.....	60
Obr. 61 Proces extrakcie a importu Kužela D20 do CAD programu	61
Obr. 62 Odčítanie uhla kuželovej plochy.....	61
Obr. 63 Grafická závislosť uhla kuželovej plochy D20 od redukcie siete.....	62
Obr. 64 Grafická závislosť pozície kužela D20 od redukcie	63
Obr. 65 Detail grafickej závislosti pozície kužela D20 od redukcie.....	63
Obr. 66 Farebná mapa odchýlok kuželovej plochy D20 FDM modelu	64
Obr. 67 Farebná mapa odchýlok kuželovej plochy D20 SLA modelu	64

ZOZNAM TABULIEK

Tab.1 Porovnanie vybraných vlastností FDM a SLA (Makerbot, 2020)	38
Tab. 2 Vybrané parametre zariadenia F370 (Stratasys, 2021)	39
Tab. 3 Vlastnosti materiálu ABS-M30 (Materialise, 2023)	40
Tab. 4 Parametre SLA zariadenia Form 3 (Formlabs, 2023)	42
Tab. 5 Vlastnosti Grey Pro	42
Tab. 6 Parametre zariadenia Metrotom 1500	45
Tab.7 Parametre snímania	45
Tab. 8 Vplyv polygonizácie v GOM Inspect na veľkosť súboru a počet bodov	47
Tab. 9 Vplyv polygonizácie vo VG Studio MAX na veľkosť súboru a počet bodov	48
Tab. 10 Vplyv redukcie na počet bodov a priemer prichytenej valcovej D20 plochy	53
Tab. 11 Vplyv redukcie na pozíciu valcovej plochy D20 pri SLA modeli	54
Tab. 12 Vplyv redukcie na pozíciu valcovej plochy D20 pri FDM modeli	54
Tab. 13 Vplyv redukcie na počet bodov a priemer prichytenej guľovej plochy D30	57
Tab.14 Vplyv redukcie na pozíciu guľovej plochy D30 SLA modelu.....	58
Tab.15 Vplyv redukcie na pozíciu guľovej plochy D30 FDM modelu.....	58
Tab. 16 Vplyv redukcie na pozíciu guľovej plochy Gule D30 v hladine Z	59
Tab. 17 Vplyv redukcie na počet bodov a uhol kužeľovej plochy Kužeľa D20	61
Tab.18 Vplyv redukcie na pozíciu kužeľovej plochy D20 SLA modelu	62
Tab.19 Vplyv redukcie na pozíciu kužeľovej plochy D20 FDM modelu	62

ÚVOD

Požiadavky na výrobný priemysel v súčasnom roku sú relatívne náročné, vyznačujú sa predovšetkým širokým spektrom technologických postupov s čo najmenším nárokom na čas. S bohatou škálou výrobkov a skracujúcou sa životnosťou je potreba skrátiť výrobný čas pre zachovanie konkurencie-schopnosti firmy na trhu. Skrátenie času výroby si však v niektorých prípadoch vyžaduje až revolučné vylepšenia než len malé zmeny parametrov v procese výroby. Reverzné inžinierstvo v kombinácii s aditívnou výrobou je moderná technológia, ktorá môžu zohrávať sľubnú úlohu pri skracovaní času vývoja výrobku. Reverzné inžinierstvo sa vzťahuje na proces vytvárania technických konštrukčných údajov z existujúcich dielov. Znovu vytvára alebo klonuje existujúci diel získaním počítačového CAD modelu existujúceho dielu. Táto technológia je veľmi nápomocná aj pri obnove modelu CAD súčiastky ak je nedostupná výkresová dokumentácia alebo keď model prešiel mnohými konštrukčnými zmenami.

Súčasťou reverzného inžinierstva je reverzné geometrické modelovanie ktoré sa vyznačuje rôznymi technikami pri tvorbe CAD modelov. Vychádza z existencie nasnímaného modelu vo forme mraku bodov vyznačujúci sa svojou topológiou, geometriu a hustotou materiálu. Pri jeho rekonštrukcii je dôležité zohľadniť tieto vlastnosti čo má za následok využitie viacerých techník reverzného modelovania ktoré vplývajú na rozmery výsledného, zrekonštruovaného modelu. Cieľom práce je preskúmať ich vplyv na rozmery jednoduchých geometrických prvkov. V práci je venovaný postup návrhu vzorovej súčiastky a jej výroby dvomi aditívnymi technológiami FDM a SLA a ich následným skenovaním na priemyselnom CT zariadení ktorého výstup bol mrak bodov ktorý je možné polygonizovať viacerými spôsobmi. Pomocou získaných údajov o vzorkách je následne skúmaný vplyv redukcie polygonálnej siete na rozmery geometrických prvkov. Výsledky zo skúmania sú zaznamenané v poslednej kapitole práce vo forme tabuliek a grafov.

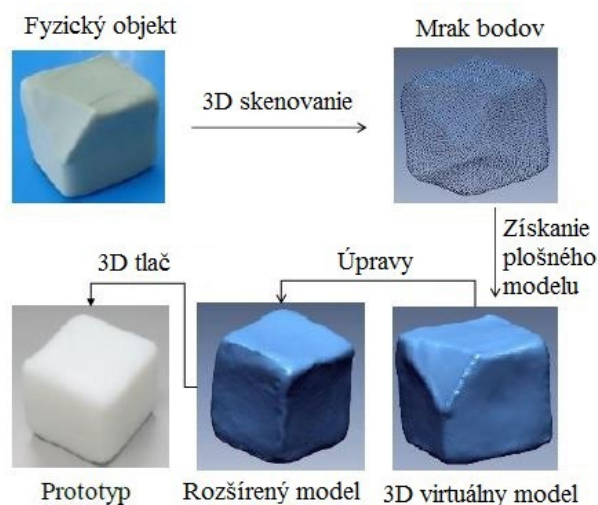
1 REVERZNÉ INŽINIERSTVO A REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE

Úvodná kapitola práce sa zaoberá definíciami reverzného inžinierstva najmä v strojárskom odbore, jeho princípmi fungovania, objasňuje vzájomné prepojenie existujúceho fyzického objektu s počítačovým 3D modelovaním a opisuje možné metódy zberu dát o fyzických 3D objektoch.

1.1 Definícia reverzného inžinierstva

Reverzné inžinierstvo (RE) je proces pri ktorom na základe existujúceho fyzického modelu získavame 3D počítačový model. Základnou podmienkou je existencia reálnej súčiastky či už sa jedná o prototyp alebo vybranú súčiastku z výrobnéj série ktorú je potrebné transformovať do CAD systému (Vasky, 2003).

Pri „klasickom“ inžinierstve sa najprv vytvorí viacero konceptov produktu na základe potrieb zákazníka a stratégie príslušnej organizácie. Koncepty sa potom premenia na modely výrobkov vo forme virtuálnych 3D CAD modelov. Následne sa optimálne virtuálne modely prevedú substraktívnou alebo aditívnou výrobou na fyzické modely - prototypy a až potom sa začnú sériovo vyrábať. V konvenčnom inžinierstve sa teda hovorí o ceste "koncept-model-objekt". Na podporu tejto cesty sa používa mnoho systémov. Ako naznačuje pomenovanie, reverzné inžinierstvo sa vzťahuje na cestu "objekt-model-koncept". Pri reverznom inžinierstve sa teda potrebné informácie získané už z existujúceho objektu využívajú na vytvorenie digitálneho modelu. Pomocou RE získavame dôležité geometrické vlastnosti existujúceho objektu, vytvára jeho presné alebo rozšírené virtuálne-fyzické modely a generuje digitálne tvary objektu. Vo väčšine prípadov ako vstupné informácie do procesu RE slúžia naskenované mračná bodov, ako je vidieť na Obr.1 (Katsuhiro 2021).



Obr.1 Proces reverzného inžinierstva (Katsuhiro 2021)

1.2 História a vývoj reverzného inžinierstva

Princíp RE existuje už od starovekých čias, keď ľudstvo poznalo základné technické prvky ako sú kolesá, vozy a architektonické štruktúry. Rozmery predmetu sa získavali jednoduchými meradlami celku objektu alebo jednotlivých súčastí. Rímska armáda, ktorá nemala až do prvej púnskej vojny stabilné námorníctvo, dokázala v roku 264 pred n. l. primitívnym reverzným inžinierstvom vytvoriť Kartágonskú bojovú loď. Vďaka tejto vynaliezavosti boli Rimania schopní vytvoriť bojaschopnú flotilu o 300 lodiach za 3 mesiace (Wevolver, 2021).

RE sa často používalo počas druhej svetovej vojny a studenej vojny. Často ho využívala armáda s cieľom skopírovať informácie o technických zariadeniach nepriateľa, alebo ich súčastiek, ktoré sa dostali do rúk poľným jednotkám v teréne alebo rôznym špiónážnym frakciám. Joseph Stalin v roku 1945 spustil program na vytvorenie duplikátu amerického bombardéru B29 (Obr. 2). Sovietski inžinieri dokázali kompletne rozobrať stroj na najmenšie časti čím získali vyše 100 000 súčiastok (Messler, 2013).



Obr.2 Americký bombardér B29 (Messler, 2013)

Techniky RE sa od tých čias výrazne vyvinuli. Hoci sa možno spočiatku využívali len pri vojenských konfliktoch, v súčasnosti sú užitočné v mnohých oblastiach vrátane medicíny, architektúry, energetickom priemysle ale najmä v strojárskom priemysle. V priebehu posledných desiatkach rokov, výrobcovia používali mnoho rôznych metód na meranie fyzického objektu a príprav na prácu v CAD softvéroch (Wevolver, 2021).

Súradnicové meracie stroje (SMS), sondové systémy a meracie ramená sa široko využívajú v reverznom inžinierstve od 60. rokov 20. storočia a odstraňujú problémy spojené s ručným meraním. Voľba použitia meracej techniky závisí od požadovaných úrovní tolerancie, hustoty a rýchlosti získavania údajov.

V súčasnosti výrobcovia čoraz častejšie používajú mobilné 3D skenery. Generujú presné, spoľahlivé výsledky, rovnako ako meranie na SMS avšak takéto meranie prebieha oveľa rýchlejšie. Nemajú problém ich obsluhovať aj operátori s nízkou úrovňou zručností a s 3D údajmi o súčiastke môžu pracovať už priamo na danom pracovisku (Wevolver, 2013).

V posledných rokoch sa zvýšil výpočtový výkon počítačov, zvýšila sa operačná pamäť, vyvinuli sa vysokorýchlostné kontaktné aj bezkontaktné skenovacie zariadenia, počítačové modelovanie nadobudlo čoraz väčší význam pri navrhovaní, výrobe a zabezpečovaní kvality modelov. V poslednom období sa ohlas o RE vo výrobnom priemysle každým dňom zvyšuje a zohráva významnú úlohu aj pri podpore priemyselného vývoja. Na trhu je neustále dopyt po nových výrobkoch ktorý však trvá relatívne krátko. Na prispôsobenie sa tomuto rýchlemu tempu vynájdenia moderných technológií slúžiace k výrobe neustále nových výrobkov, poskytuje reverzné inžinierstvo high-tech pomôcku na urýchlenie procesu tohto vynájdenia pre priemyselný vývoj (Kumar, 2013).

1.3 Procesy reverzného inžinierstva

V minulosti sa merania vykonávali pomocou fyzických meradiel, ako sú pravítka, posuvné meradlá, rádiusomery, aby sa získali informácie o rozmeroch súčiastky. Používanie týchto nástrojov si vyžaduje vysokú mieru zručnosti a môže byť veľmi zdĺhavým procesom. Navyše pri zakrivených tvarovo zložitých povrchoch by bolo zmeranie ručnými meradlami takmer nemožné. Proces RE možno nesmierne urýchliť a zlepšiť pomocou 3D skenerov. V priebehu niekoľkých minút možno vykonať tisíceky meraní a vytvoriť tvarovo zložitú sieť v reálnom čase. S touto sieťou je následne možné pracovať v CAD programoch. Z geometrie siete možno vytvoriť reverzným modelovaním geometrické a tvarové entity, ako sú roviny, valce a profily prierezov z ktorých je možné vytvoriť objemový model (Fears, 2019).

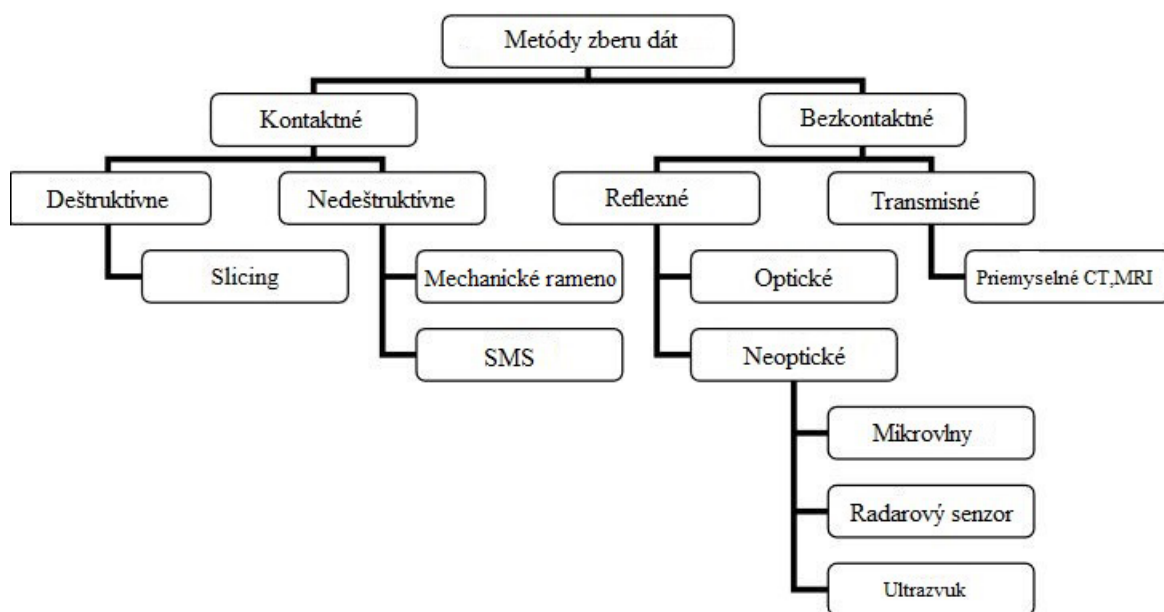
V strojárskom priemysle je možné proces RE fyzického objektu, v tomto prípade súčiastky ktorá spĺňa špecifické technologické funkcie rozdeliť do troch hlavných etáp ktoré sú časovo usporiadané nasledovne:

- 1) 3D digitalizácia,
- 2) reverzné geometrické modelovanie (RGM),
- 3) výroba.

(Buranský, 2020)

1.4 3D digitalizácia

3D digitalizácia je proces zhromažďovania údajov o geometrie fyzického objektu a prevod získaných informácií do digitálnej podoby. Predstavuje vstupné dáta pre RGM. Keďže digitalizácia je prvotným krokom v procese RE, presnosť získavania údajov má veľký vplyv na ďalšie kroky. Metódy zberu údajov sa delia na dve skupiny: kontaktné a bezkontaktné (Obr. 3). Na zber a vizualizáciu týchto údajov slúžia najmä CARE a CAD SW ktoré spracúvajú tieto dáta do polygonizovaného modelu. Výber SW má vplyv na jeho parametrické vlastnosti (López, 2021).



Obr. 3 Klasifikácia metód zberu 3D dát (Peng, 2011)

Výstupom 3D digitalizácie je mrak bodov ktorý je súborom získaných dátových bodov. Tieto body sú definované v súradnicovom formáte XYZ a predstavujú súbor viacero 3D meraní. Tvar tohto mraku je ovplyvnený množstvom meraných bodov.

Jeden geometrický údaj môže byť meraný niekoľkokrát z rôznych uhlov. Mračná bodov môžu byť vytvorené 3D skenermi, ktoré snímajú veľký počet bodov povrchu za jednotku času alebo kontaktnými meracími zariadeniami. Ako výsledok procesu 3D digitalizácie sa mračná bodov používajú na niektoré účely metrológie, kontrolu kvality a na niektoré vizualizácie a animácie pre aplikácie hromadného prispôbenia. Hoci sa mračná bodov vykresľujú okamžite najmä pri skenovaní pomocou optických zariadení, vo všeobecnosti nie sú použiteľné vo väčšine inžinierskych aplikácií (Creaform, 2014).

Prevádzajú sa na trojuholníkové sieťové modely do formátu .stl. polygonizáciou bodov alebo prebieha rekonštrukcia plôch pomocou NURBS techniky (Creaform, 2014). Na Obrázku 4 sa nachádza detailný pohľad na mrak bodov zdigitalizovaného objektu.



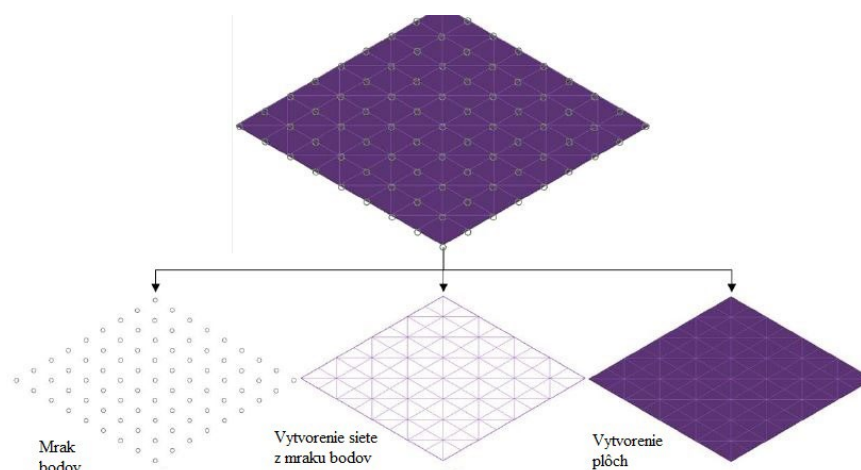
Obr.4 Mracho bodov získané 3D skenerom (Cadcaml, 2020)

Proces polygonizácie prebieha pomocou nainštalovanej softvérovej časti snímacieho prístroja. Nasleduje fáza upravovania, ako je segmentácia na oddelenie a zoskupenie súboru bodov. Metódy segmentácie sa líšia od automatických prístupov až po techniky, ktoré sa vo veľkej miere spoliehajú na používateľa. Medzi súvisiace manuálne techniky patria napr. automatické prispôsobenie povrchu (surface fitting) a čiastočné prispôsobenie povrchov. Tieto techniky sa používajú aj na spresňovanie počítačových modelov (Eyericioglu, 2022).

1.4.1 Polygonizácia

Základné technológie na transformáciu získaných údajov skenovaním sú založené buď na vytvorení trojuholníkovej siete (triangulácia), ktorá zachytáva topologické vlastnosti objektu z mraku bodov alebo vytvorení segmentov ktoré tvoria jeden model. Triangulácia je aproximačná prezentácia povrchov a iných geometrických prvkov modelu.

Zvýšenie počtu trojuholníkov docieľi lepšiu prezentáciu povrchu, ale zároveň sa zvýši veľkosť súboru. Softvérový súbor pre trianguláciu je zvyčajne napísaný v Štandardnom Triangulačnom Jazyku (.stl). Jeho zápis je buď v binárnej forme alebo ASCII. Binárny súbor je dátovo menší a častejšie sa v praxi využíva pre jeho rýchlejší import do CAD SW, ASCII súbory sú jednoduchšie na čítanie a úpravy údajov. Súbory .stl je možné taktiež uložiť v jednotkách metrického alebo imperiálneho systému (Eyericioglu, 2022).



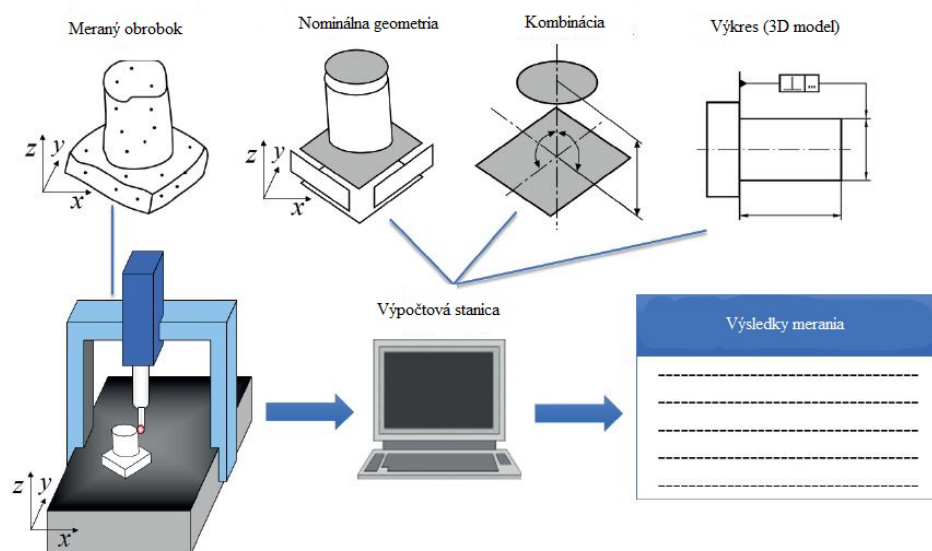
Obr. 5 Proces polygonizácie (Buranský, 2020)

Na Obr. 5 je graficky znázornený proces polygonizácie. Množstvo trojuholníkov je určené buď automaticky softvérom alebo manuálne projektantom. Je dôležité aby existovala určitá rovnováha medzi presnosťou súčiastky a veľkosťou dátového súboru. Trojuholníková sieť sa následne upravuje znížením spojovacích entít medzi vrcholmi trojuholníkov, vyhladením kriviek povrchu tak, aby spĺňali požiadavky návrhu. Pri počiatočnom zbere údajov sa často vyskytujú v nadbytočnom množstve nasnímané body ktoré sa navzájom prekrývajú. Preto je vhodné editovanie týchto prvotných údajov prostredníctvom zmeny orientácie, zarovnania alebo pridaním záplaty. Pri segmentácii sa počiatočné mračno bodov rozdeľuje do plôch s definovanými hranami a vrcholmi. Tieto sa následne vyhladia matematickým modelovaním, ako je napríklad parametrické modelovanie, kvadratické funkcie alebo NURBS. Každá takto upravená plocha sa potom presunie na plochu povrchu súčiastky (Eyericioglu, 2022).

1.5 Kontaktné metódy zberu dát

Najčastejšie používanými zariadeniami na kontaktnú alebo dotykovú metódu zberu dát sú súradnicové meracie stroje (SMS). Tieto stroje sú známe už dlhé desaťročia ale ich rozvoj bol urýchlenný v posledných desaťročiach, čo by mohlo súvisieť s rozvojom informačných technológií, ktoré sú základom meracieho a vyhodnocovacieho systému SMS. Integráciou SMS do výrobného prostredia možno optimalizovať prepojenie súradnicovej metrológie s oblasťami predbežného vývoja výrobku a plánovania práce.

Najčastejšiu úlohou súradnicovej metrológie je určenie odchýlky skutočného tvaru od navrhutej geometrie obrobku (Baručija, 2020). Obrázok 6 znázorňuje základný princíp činnosti SMS.



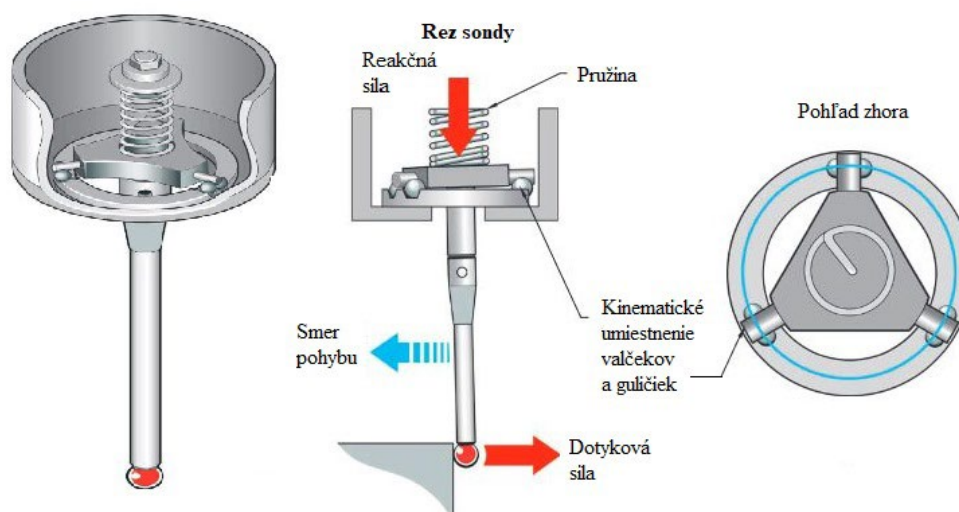
Obr.6 Princíp merania na SMS (Baručija, 2020)

Pri reverznom inžinierstve sa však úloha dopĺňa o meranie neznámych, nových rozmerov objektu. Skutočný tvar sa získava pomocou merania jednotlivých bodov na povrchu objektu. Súradnicový merací stroj používa dotykovú spínaciu sondu na lokalizáciu bodov na obrobku. Každý meraný bod je vyjadrený v súradnicovom tvare. Model zvyčajne pozostáva z ideálnej, tzv. nominálnej geometrie (roviny, valce atď.). Takéto prvky sú identifikované použitím vhodných najlepšie vyhovujúcich algoritmov na súbor nameraných bodov. Súradnicový merací stroj obsahuje hardvérovú aj softvérovú časť. Hardvér zahŕňa sondážny systém, otočný stôl a rôzne príslušenstvo. SW pozostáva zo základného interného systému a prepojenia so systémami CAD/CAM (Baručija, 2020).

1.5.1 Spínacie dotykové sondy

V súčasnosti je aplikácia meracej sondy zavedenou a osvedčenou metódou na zvýšenie produktivity, kvality, schopnosti a presnosti merania na SMS. Takisto aj niektoré CNC obrábacie centrá sú pripravené na pripojenie meracích sond, čo zjednodušuje integráciu meracích cyklov do procesu obrábania a kontroly nástrojov. V spolupráci so systémami CAD sa dá simulácia merania pozorovať aj na obrazovke počítača. Mechanizmus sondy spína vtedy ak príde do kontaktu s povrchom meranej súčiastky. Spínanie je vysoko opakovateľné. Pri zopnutí vyšle signál do riadiaceho systému stroja, ktorý zaznamená polohu v každej osi stroja.

Po zosnímaní bodu z povrchu meranej časti sa sonda presunie na snímanie ďalšieho bodu. Z viacerých získaných bodov tak možno vyhodnotiť reálny tvar a veľkosť meraného prvku (Renishaw, 2017).



Obr. 7 Schéma funkcie kinematickej meracej sondy (Renishaw, 2017)

V praxi je najosvedčenejšou metódou používanie kinematických sond. Na Obrázku 7 je schematicky znázornená funkcia takejto sondy. Rovnomerne rozmiestnené valčeky uložené na guľôčkach z karbidu volfrámu zabezpečujú šesťbodový kontakt v kinematickom uložení. Tieto kontakty uzatvárajú elektrický obvod. Mechanizmus je zatlačený do kinematického uloženia pomocou pružiny ktorá umožňuje vychýlenie mechanizmu pri kontakte sondy s obrobkom. Po oddialení od obrobku sa vráti do svojej pôvodnej polohy s toleranciou 1 μm . Pri kontakte s obrobkom sa výsledná tlaková sila na mechanizmu meria ako zmena elektrického odporu na kontaktnej doske (Renishaw, 2017).

1.5.2 Meracie ramená

Tieto ramená sú v podstate prenosné SMS so zostrojenými kĺbmi slúžiace na 3D meranie, boli vyvinuté kvôli rastúcej potrebe flexibilnejšieho merania ako je tomu pri fixných SMS. Prenosné meracie ramená určujú a zaznamenávajú polohu sondy v 3D priestore a výsledky zaznamenávajú do softvéru. Rameno vypočíta presnú polohu sondy v každom bode prostredníctvom snímačov na každej osi ramena (Faro, 2021)

Zariadenie je skonštruované podobne ako ľudská ruka s ramenom, laktom, predlaktím a zápästím. Má uplatnenie najmä pri meraní predmetov s ktorými je náročné manipulovať. V takýchto prípadoch sa meracie rameno jednoducho premiestni k obrobku vďaka jeho nízkej váhe a prenosnosti vďaka jeho karbónovým dielom z ktorých je zostavené (Trimos, 2021).



Obr. 8 Meracie rameno so 7 rotačnými osami (Trimos, 2021)

Ramená sú charakterizované určitým počtom rotačných osí, zvyčajne sa používajú typy so 6 alebo 7 osami, pričom ramená so 6 osami sa využívajú v aplikáciách s vysokou presnosťou a modely so 7 osami (Obr.8) sa používajú ak je potrebná dodatočná flexibilita pri meraní tvarovo zložitých súčiastok. Okrem merania dotykovými sondami umožňujú dnešné ramená aj pripojenie laserových a optických skenovacích modulov čo robí danú technológiu bezkontaktným zberom dát a posúva tak možnosti aplikácii v priemyselnej metrológii (Faro, 2021).

1.5.3 Deštruktívne metódy zberu dát

Jedná sa o zriedkavo používanú technológiu ktorej princíp spočíva v digitalizovaní vonkajšej a vnútornej geometrie súčiastky jej zničením. Uplatnenie nájde ak sa súčiastka vyznačuje zložitou vnútornou geometriou. Snímaný objekt sa umiestni na nastaviteľnú dosku a pokryje sa reflexným materiálom, ktorý pri spracovaní naskenovaných snímok zabezpečí vysoký kontrast medzi dielom a reflexným materiálom. V priestore sa vytvorí vákuum, ktoré spôsobí, že sa tento špeciálny materiál dostane do dutín snímanej súčiastky. Takto pripravený objekt sa prenesie do skenovacieho stroja, kde sa pripevní na obrábací stôl. Skenovanie prebieha keď sa zo súčiastky odfrézuje veľmi tenká vrstva materiálu. Každý novo vytvorený povrch sa naskenuje pomocou optického skenera a údaje sa odošlú na ďalšie SW spracovanie (Šimoník, 2004)

1.6 Bezkontaktné metódy zberu dát

Pri bezkontaktnom zbere dát nedochádza k priamemu dotyku medzi meracím zariadením a meraným objektom. Tieto zariadenia sa nazývajú aj 3D skenery. Zber dát môže byť založený na rôznych fyzikálnych princípoch, najčastejšie sa však využívajú optické, laserové a röntgenové 3D skenery. Z ďalších metód je možné vymenovať neoptické princípy na báze ultrazvuku, radaru alebo sonaru. Tieto metódy ponúkajú oveľa vyššiu rýchlosť snímania ako kontaktné metódy avšak na úkor presnosti merania. V závislosti od vlastností snímaného objektu ako sú rozmerové alebo materiálové vlastnosti je vhodné zvážiť technológiu sa bude digitalizovať (Trebuňa, 2021).

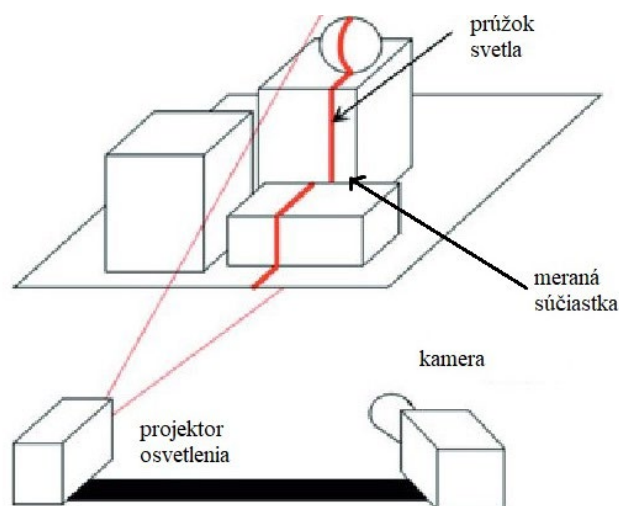
3D skenery je možné z hľadiska zberu dát rozdeliť na zber pomocou aktívnej alebo pasívnej triangulácie. Pasívne skenery neemitujú žiadne žiarenie, detegujú len žiarenie odrazené z okolitého prostredia. žiarenia. Poskytujú nízku presnosť merania. Skenery aktívne vyžarujú určitý druh žiarenia a detegujú buď odraz alebo presvietenie skrz objekt.. Svetlo alebo žiarenie emitované skenerom sa odráža od skenovaného objektu a zaznamenáva tak vzdialenosť povrchu. Pri tomto type skenerov je problematické meranie lesklých a priehľadných povrch (Creaform, 2014).

1.6.1 Optické meranie

Optické zariadenia spracovávajú údaje do digitálnej formy pomocou odrazu elektromagnetického žiarenia (svetelných lúčov) od povrchov. Na zaznamenanie odrazeného obrazu sú využívané kamerové objektívy s pevnou alebo premenlivou ohniskovou vzdialenosťou (Trebuňa, 2021).

Štruktúrované svetlo

Jedná sa o aktívno-triangulačný princíp zberu dát ktorý je založený na premietaní svetelného rastra na snímaný objekt. Obraz rastra je zachytený objektívom a spracovaný počítačom. Premietaným svetelným rastrom je súbor pruhov svetla. Rozmery súčiastky sú vypočítané zo spracovaného obrazu v mieste prechádzajúceho svetelného pruhu (Obr. 9). Hlavné súčasti skenerov pracujúcich na tejto technológii sú: projektor pruhovaného svetla, minimálne jedna kamera a počítač pre spracovanie dát (Mendřický, 2015).



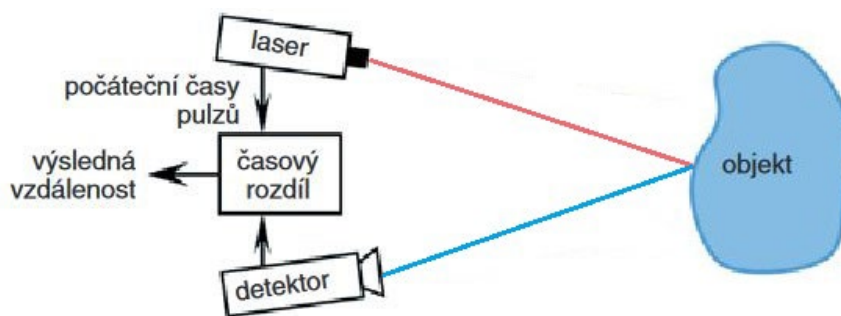
Obr. 9 Schéma funkcie 3D skenovania štruktúrovaným svetlom (Mendřický, 2015)

Hoci zber dát prebieha vo veľkých objemoch za krátky čas, tieto optické skenery sú náchylné na nepresnosť. (Mendricky, 2018) odporúča podniknúť nasledovné kroky na jej minimalizáciu:

- správne ustavenie a kalibrácia skeneru,
- zohriatie zariadenia na prevádzkovú teplotu,
- používanie referenčných bodov a ich vhodné umiestnenie na povrchu meraného objektu,
- zabezpečenie vhodných svetelných podmienok,
- použitie antireflexného povlaku pri matných povrchoch,
- výber správnej stratégie merania ako určenie počtu snímok, nastavenia uhla kamery, stabilné upevnenie meraného objektu.

Laserové skenovanie

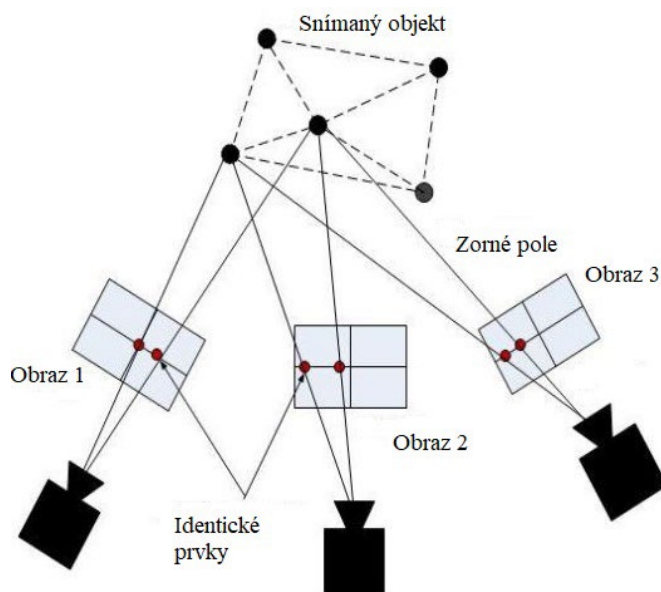
Laserové skenery využívajú monochromatické spojité svetlo na detekciu vzdialenosti povrchu snímaného objektu meraním časového oneskorenia lúču (time-of-flight). Vzdialenosť je meraná v smere kam dopadá lúč od skeneru. Preto je dôležité pre určenie 3D súradníc poznať polohu skeneru a uhol vyžarovania laserového lúču. Presnosť vypočítaných bodov objektu býva ovplyvnená chybami spôsobenými geometriou systému zberu, odrazivosťou premietaného lúča spolu so zmenami okolitého osvetlenia, ostré rohy a hrany, zložité tvary vzhľadom na osvetlenie (tieňovanie) a nepresná poloha premietaného lúču (Mendricky, 2018). Na obrázku 10 je znázornený princíp snímania za pomoci laseru.



Obr. 10 Základný princíp laserového skenovania (Medricky, 2018)

Fotogrametria

Jedná sa o zber 3D dát cez pasívnu trianguláciu - snímacie zariadenia neemitujú vlastný zdroj žiarenia. Technológia spočíva v získavaní rozmerových údajov o objektoch na základe zostavenia série fotografií. Tieto sú zhotovované z viacerých miest tj. pod viacerými uhl'ami pohľadu na snímaný predmet. Vzájomné vyfotografovanie zo skupín pohľadov je možné triangulovať a získať tak 3D súradnice (Obr. 11). Vysokorychlostné snímanie môže byť použité aj v rámci zaznamenávania pohybu (Aboali, 2017).



Obr. 11 Princíp fotogrametrie (Aboali, 2017)

Vo všeobecnosti existujú dva druhy fotogrametrie: letecká fotogrametria a fotogrametria na nízke vzdialenosti (close range). Letecká fotogrametria sa často zaoberá tvorbou topografických máp, kde sa snímky zhromažďujú na podporu mapovania a kamery sú nastavené na dosiahnutie maximálnej presnosti. Close range fotogrametria je často využívaná na vytváranie 3D modelov.

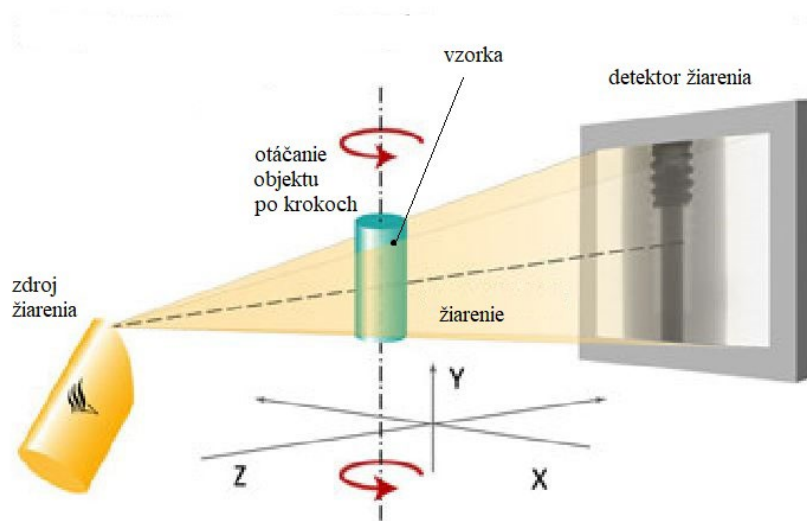
Uplatnenie tejto techniky sa nájde v rôznorodých aplikáciách vrátane snímania kultúrnych pamiatok, modelovanie miest v architektúre, v medicínskej oblasti, bezpečnosť, rozpoznávanie tvári a ďalšie (Aboali, 2017).

1.6.2 Transmisné metódy zberu dát

Zariadenia pracujúce na tejto technológii získavajú údaje o snímaných objektoch prostredníctvom vysielania neviditeľného elektromagnetického žiarenia a jeho odrazu od meranej súčiastky. Je možné ňou získať vysokokvalitné údaje o vnútornej štruktúre súčiastky bez jej poškodenia.

Počítačová tomografia

Počítačová tomografia (CT) je známa technika v lekárskom odbore ako aj v metrológii. CT umožňuje nedeštruktívnym spôsobom snímať vonkajšiu a vnútornú štruktúru predmetov. Schopnosť snímať vnútro súčiastky robí priemyselnú počítačovú tomografiu atraktívnou a jedinečnou v odbore rozmerovej metrológie. Röntgenová trubica produkuje röntgenové žiarenie vrhaním elektrónov na snímaný predmet. Absorpciou elektrónov predmetom intenzita röntgenového žiarenia klesá. Veľkosť zoslabenia je určená materiálom ako aj množstvom pohlteneho žiarenia objektu. Po preniknutí do obrobku dopadnú zoslabené röntgenové lúče na detektor, čím vznikne 2D obrazový záznam. Dvojrozmerné obrazy sa zhotovujú pri jednotlivých krokoch počas otáčania objektu. Rekonštrukcia založená na týchto premietaných obrazoch vedie k vzniku voxelového modelu kde jas jednotlivých voxelov predstavuje mieru hustoty materiálu (Welkenhuyzen, 2009). Princíp zariadenia je ilustrovaný na Obrázku 12.



Obr. 12 Princíp priemyselnej počítačovej tomografie (Welkenhuyzen, 2009)

1.7 Reverzné geometrické modelovanie

Automatická konverzia mraku bodov alebo polygonizovaného modelu do objemového v rámci CAD softvéru je zložitý proces a často vedie k vytvoreniu veľkých geometrických odchýlok a iných chýb. Pre čo najpresnejšie vytvorenie objemového modelu je nutné poznať prístupy k reverznému modelovaniu a ich techník. Jedným z prístupov je geometrické modelovanie ktoré vychádza zo zohľadnenia opisu geometrie zväčša primitívnych prvkov. Opis je tvorený fyzickou, matematickou a digitálnou reprezentáciou povrchu. Kľúčom k rekonštrukcie tvaru je určenie povrchu ktorý aproximuje neznámy tvar. Mrak bodov sa vyznačuje premenlivou hustotou a odľahlými tvarmi ktoré vznikajú zberom dát. Zložitou úlohou pri reverzom modelovaní je zachovanie topológie objektu (Anwer, 2016).

Prístupy k reverznému modelovaniu je možné rozdeliť na základe týchto funkcií:

- vytvorenia primitív - zahŕňa vytvorenie objemového 3D modelu pomocou základných geometrických tvarov, ako sú kocky, gule, valce a kužele. Tieto tvary sa dajú kombinovať a upravovať tak aby bol vytvorený model, ktorý sa presne približuje fyzickému objektu. Využíva sa pri tvorbe modelov s jednoduchými tvarmi alebo pri vytváraní približného výsledku,
- segmentácia – rozdelenie objektu na jednotlivé oblasti na základe jeho geometrických vlastností, využíva sa pri modeloch so zložitými a nepravidelnými tvarmi,
- tvorbe segmentov – automatický prístup – rozpoznávanie a oddelenie geometrických objektov softvérom, manuálny prístup – oddelenie prvkov ručným výberom trojuholníkov vzhľadom na ich farbu, tvar,
- prichytenia plôch – jedná sa o prichytenie k povrchu modelu, je možné ho rozdeliť na vonkajšie, stredné a vnútorné prichytenie, zaručuje vysokú úroveň presnosti,
- vytvorením krivky – na základe obrysu modelu, využitie tam, kde prístup tvorby pomocou primitív alebo segmentácie je nedostatočný na opis modelu.

(Buranský, 2020)

Voľba prístupu celkovo závisí od špecifických vlastností polygonálnej súčiastky a jej aplikáciách. Pre vytvorenie čo najpresnejšieho a najpodrobnejšieho objemového CAD 3D modelu sa využíva kombinácia prístupov.

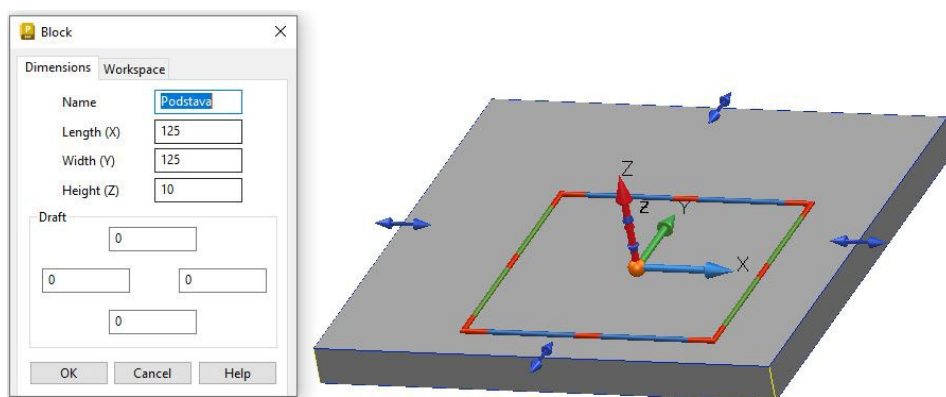
2 NÁVRH A VÝROBA VZOROVEJ SÚČIASTKY

Táto kapitola pojednáva o návrhu 3D CAD modelu na ktorej sa bude skúmať vplyv vybraných funkcií RGM. Vzorová súčiastka je prezentovaná tvarovo jednoduchým modelom pozostávajúceho z geometrických prvkov ako sú: gule, kužele a valce. Idea o geometrie súčiastky bola vytvorená vedúcim práce doc. Ing Ivanom Buranským, PhD. Počítačové modelovanie sa uskutočnilo v CAD SW Autodesk Powershape 2023 Ultimate. Po vytvorení CAD modelu sa vyrobili dve vzorky aditívnou metódou Stereolitografie (SLA) na zariadení Form 3 od firmy Formlabs, a metódou Fused Deposition Modelling (FDM) na zariadení F370 od spoločnosti Stratasys. Vstupné parametre pre výrobu FDM boli zadane v SW GrabCAD Print a parametre výroby SLA v programe PreForm.

2.1 Návrh CAD modelu

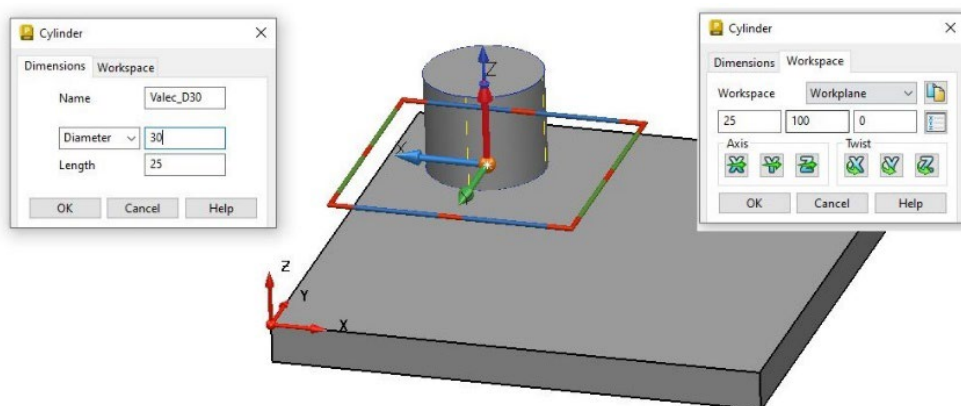
Ako bolo spomenuté, návrh prebiehal v CAD SW Powershape 2023 od firmy Autodesk ktorý je z hľadiska počítačovej podpory charakterizovaný ako veľký CAD SW ktorý ponúka asociativitu medzi CA modulmi, tvorbu modelov 3D parametrizáciou a mnoho ďalších funkcionalít. Existuje viacero prístupov návrhu 3D modelov: geometrický prístup - tvorba 2D geometrie pomocou oblúkov, úsečiek, kružníc, alebo prístup prvkového modelovania vyznačujúce sa tvorbou primitívnych 3D útvarov ako valec, guľa, zaoblenie, tvorba dier, drážok atď. (Peterka, 2002).

Pri návrhu súčiastky bolo využité najmä prvkové modelovanie kde parametre jednotlivých geometrických elementov boli definované na základe jedného príkazu. Prvý krok spočíval vo vytvorení podstavy štvorcového tvaru s rozmermi 125x125x10mm (Obr. 13).



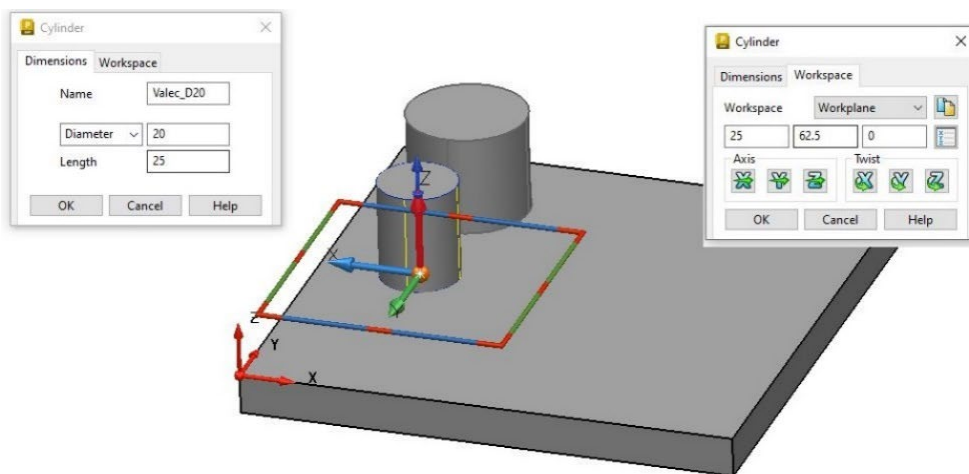
Obr. 13 Vytvorenie podstavy

Nasledovalo umiestnenie súradnicového systému (SS) do jedného z rohov štvorcovej podstavy. Pokračovalo sa s vytvorením geometrického elementu – valcom s rozmerom 30x25mm a umiestnením v smere osi $X = 25$ mm a v smere osi $Y = 100$ mm vzhľadom na definovaný SS (Obr. 14).



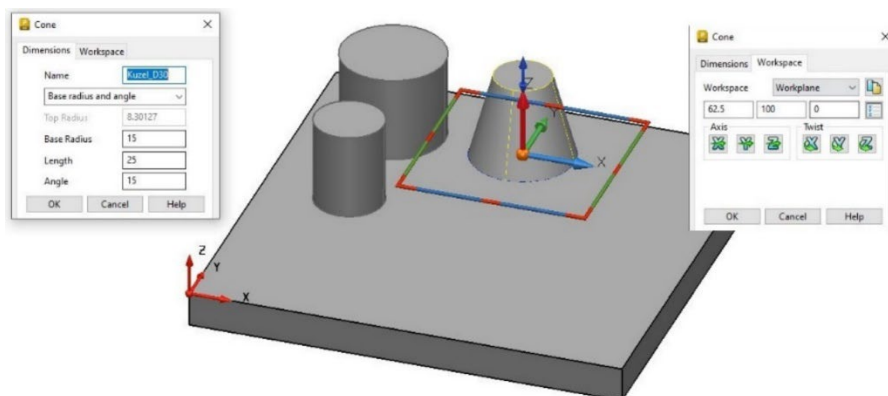
Obr. 14 Vytvorenie valca D30mm

Podobným spôsobom bol vytvorený ďalší valec s totožnou výškou 25 mm s priemerom 20mm ktorý je posunutý od predošlého valca v smere osi Y o 37,5 mm záporne (Obr. 15).



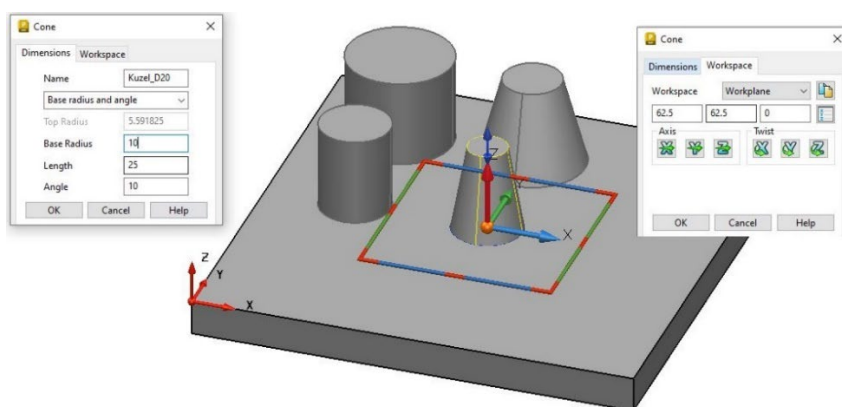
Obr. 15 Vytvorenie valca D20mm

V ďalšom kroku prebiehalo vytvorenie ďalšieho geometrického elementu – *Kužela D30* s definovaným uhlom $= 15^\circ$, výškou 25mm a priemerom spodnej základne 30 mm. Pozícia stredu kužela je posunutá o 37,5 mm v smere osi X kladne od stredu *Valca D30* (Obr. 16).



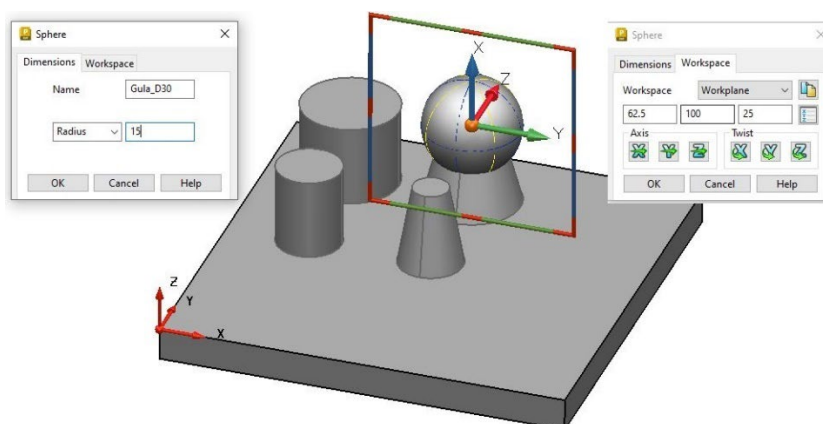
Obr. 16 Vytvorenie Kužela D30

Ďalej sa pokračovalo s vytvorením ďalšieho kužela s rovnakou výškou 25 mm, tentokrát s definovaným uhlom 10° a priemerom spodnej základne 20 mm. Jeho stred bol umiestnený od stredu Kužela D30 v smere osi Y záporne o 37,5 mm (Obr. 17).

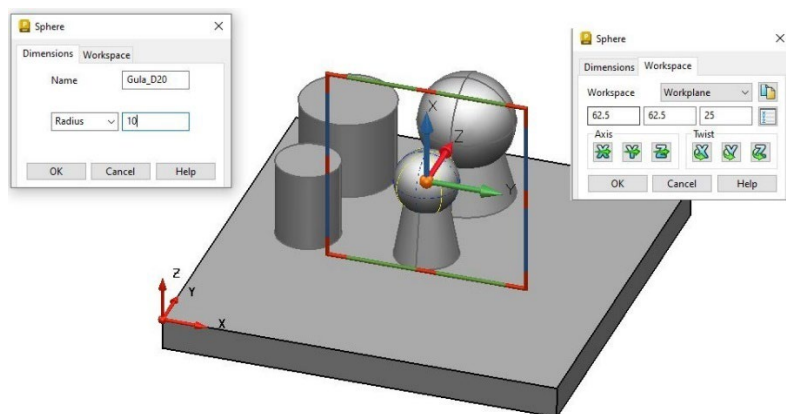


Obr. 17 Vytvorenie Kužela D20

Na vrchnú časť do stredu kuželov boli vytvorené cez prvkové modelovanie guľové solidy, guľa s priemerom 30 mm bola vytvorená na Kuželi D30 (Obr. 18) a guľa o priemere 20 mm na Kuželi D20 (Obr.19).

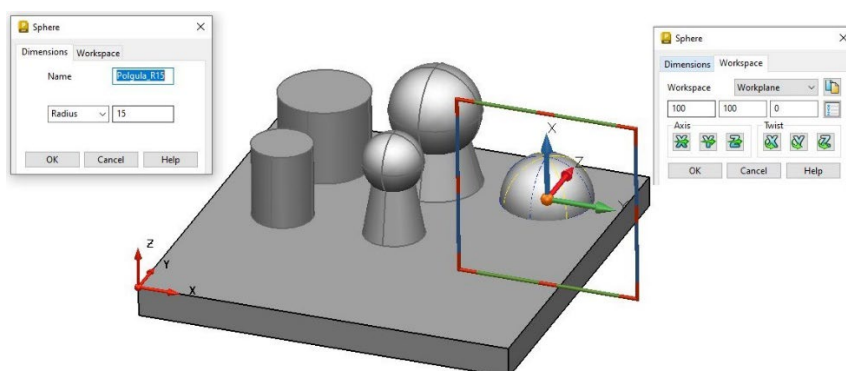


Obr. 18 Vytvorenie Gule D30



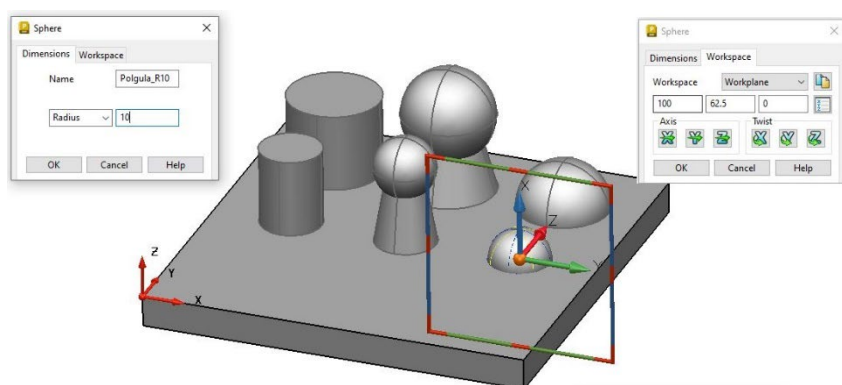
Obr. 19 Vytvorenie Gule D20

V nasledujúcom kroku sa vytvoril pol-guľový element s polomerom $R = 15$ mm ktorého pozícia bola definovaná v smere osi $X = 100$ mm a v smere osi $Y = 100$ mm vzhľadom na SS. Stred polgule sa nachádza v jednej rovine s povrchom podstavy (Obr. 20).



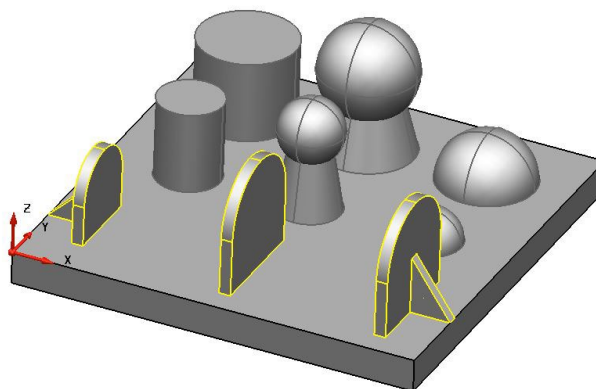
Obr. 20 Vytvorenie Polgule R15

Takisto podobným spôsobom bola namodelovaná polguľa s polomerom $R = 10$ mm nachádzajúca sa 32,5 záporne v smere osi Y od polgule R15 (Obr. 21).



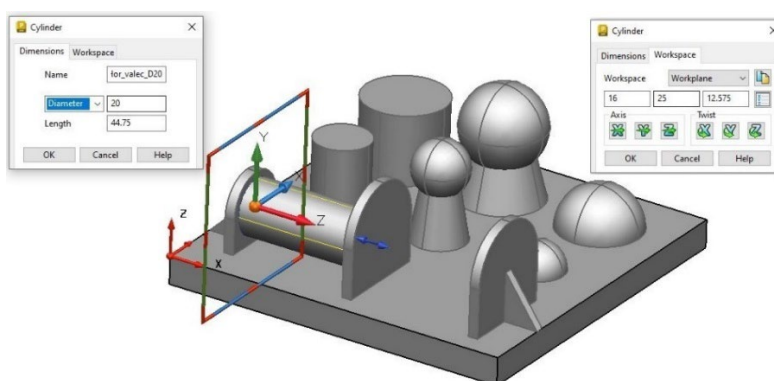
Obr. 21 Vytvorenie Polgule R10

V nadchádzajúcej časti návrhu boli vytvorené nosné steny s hrúbkou 3,5 mm slúžiace k namodelovaniu horizontálnych valcov nachádzajúce sa nad povrchom podstavy. Aby nedošlo k veľkým deformáciám týchto valcov počas aditívnej výroby, boli po stranách stien namodelované podporné telieska trojuholníkového tvaru (Obr. 22).



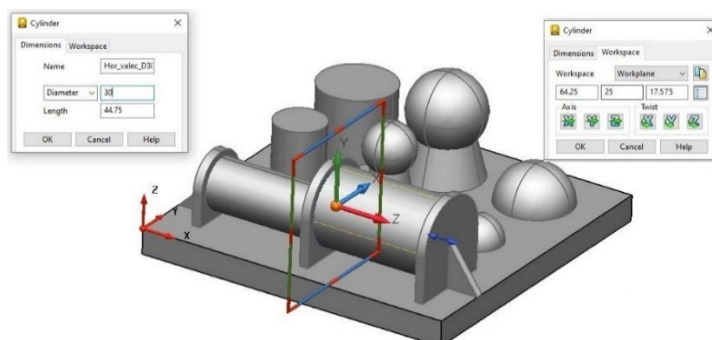
Obr. 22 Namodelovanie nosných stien

Po namodelovaní stien bol vymodelovaný Horizontálny valec s priemerom $D = 20$ mm ktorého dĺžka je definovaná pozdĺž osi X . Valec sa nachádza medzi (ľavou) menšou a stredovou nosnou stenou a jeho dĺžka činí 44,75 mm. Os valca sa nachádza vo výške 12,575 mm (v smere osi Z), počiatočný bod je v smere osí $X = 16$ mm a $Y = 25$ mm vzhľadom na nulový bod. Takto vytvorený valec je znázornený na Obr. 23.



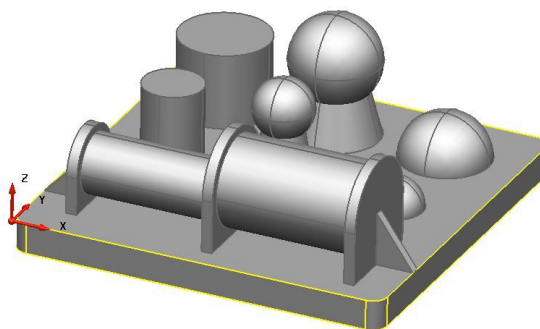
Obr. 23 Vytvorenie Horizontálneho valca D20

Obdobne bol vytvorený ďalší horizontálny valec s priemerom 30 mm s rovnakou dĺžkou 44,75 mm nachádzajúci sa medzi stredovou a pravou nosnou stenou ktorého os je vo výške 17,575 mm (v osi Z), počiatočný bod je vzdialený v smere osi $X = 64,25$ mm, $Y = 25$ od SS vid'. Obr.24.



Obr. 24 Vytvorenie Horizontálneho valca D30

Záverečným krokom pri návrhu vzorky bolo vytvorenie zaoblení $R = 5 \text{ mm}$ po rohoch štvorcovej základne slúžiace na odstránenie ostrých hrán (Obr. 25) a následne booleovskou funkciou sčítania boli zostavené všetky geometrické elementy do jedného celku.



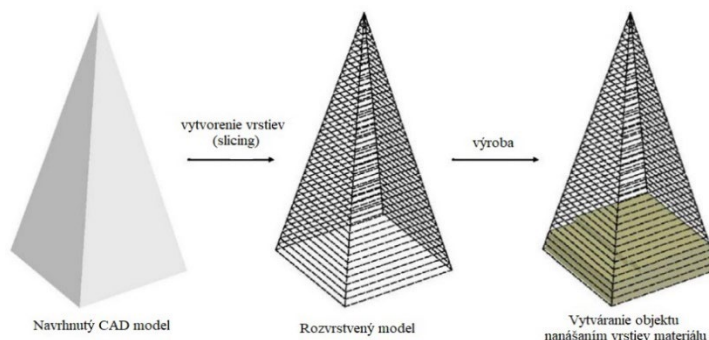
Obr. 25 Vytvorenie zaoblení na rohoch štvorcovej základne

Mapa vytvorených elementov sa nachádza v prílohe A.

2.2 Technológia aditívnej výroby

Aditívna výroba, angl. additive manufacturing (AM), ľudovo známa ako aj 3D tlač, sa zásadne líši od tradičnej substraktívnej výroby v tom že štruktúra a tvar výrobku vzniká nanášaním vrstiev materiálu s minimálnym vznikom odpadu. AM je všestranná, flexibilná, vysoko prispôsobiteľná výrobná metóda vyhovujúca väčšine odvetví priemyselnej výroby. Materiály na výrobu týchto objektov môžu byť veľmi rôznorodé. Patria medzi kovové, keramické a polymérne materiály spolu s kombináciami vo forme kompozitov. Výzvou však zostáva vyrobiť také diely s tvarmi a štruktúrou od ktorých je vyžadovaná v praxi určitá funkčnosť. Základný proces AM znázorňuje Obr. 26. K realizácii AM je podľa (Tofail, 2018) nevyhnutná existencia štyroch esenciálnych prvkov:

- Počítačový 3D model objektu
- Výrobný materiál (vytvrdzovateľný prášok, živica alebo termoplastické vlákno)
- Nástroj zhotovujúci štruktúrne vrstvy (dýza, laser)
- Digitálny riadiaci systém pre nástroj



Obr. 26 Grafické zobrazenie procesu AM (Quan, 2015)

Východiskovým bodom pre výrobný proces je kompletný 3D opis súčiastky vytvorený v CAD SW. Konečným výsledkom návrhu je súbor 3D údajov. Softvérovo sa model súčiastky „nakrája“ v smere nanášania vrstiev (z) na rovnomerné hladiny z ktorých je postupne skladaný konečný diel. Hrúbka vrstvy sa určuje najmä podľa požadovanej presnosti súčiastky, celkového rozmeru a množstvo materiálu na výrobu. Zvyčajne sa hrúbka vrstvy pohybuje rádovo v desatinách milimetra. Odchýlky medzi počítačovým a skutočne vyrobeným objektom sú menšie ak je zvolená menšia hrúbka vrstvy. Avšak voľba hrúbky vrstvy býva obmedzená vlastnosťami materiálu, ako je napr. povrchové napätie pri materiáloch tekutého skupenstva (vytvrdzovateľných živíc) alebo veľkosťou zŕn pri selektívnom vytvrdzovaní prášku. Obrys každej vrstvy, resp. tvar celého dielu v smere osí X a Y je definovaný .stl modelom. Výsledkom je, že na povrchu súčiastky vznikajú schodovité stupienky v smere osi Z a jej obrys v rovine X a Y (Heinrich, 2021).

AM umožňuje výrobu súčiastky v podstate len z jedného digitálneho súboru ktorým je 3D CAD model, toto značne skracuje výrobný čas čím sa urýchľuje aj výroba a demonštrácia prototypov. Pri AM je materiál okamžite umiestňovaný na potrebné miesta a zvyšný materiál môže byť opätovne recyklovaný alebo použitý čím sa znižuje celkový odpad (Quan, 2015). Niektoré z predností AM je možno zhrnúť v nasledujúcich bodoch:

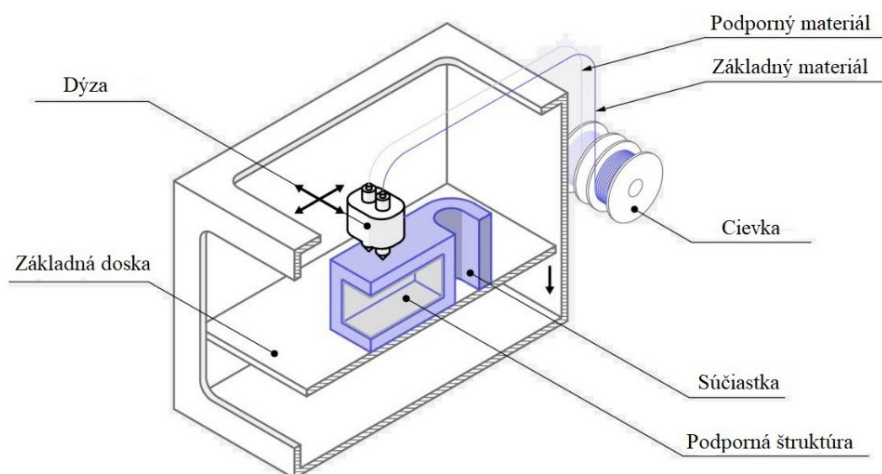
- jeden krok od návrhu CAD súčiastky po samotnú výrobu,
- vytváranie súčiastok s vysokou úrovňou editácie bez prítomnosti návrhu nástrojov,
- podpora vysoko funkčného dizajnu – výroba zložitých vnútorných prvkov,
- výroba komponentov s nízkou hmotnosťou,
- možnosť výroby finálnej podoby komponentov – minimálne povýrobné procesy,
- potenciál bezodpadovej výroby s maximalizáciou využitia materiálu,
- skrátenie vývoja a výroby výrobku umožňujúci jeho rýchly presun na trh,
- nízke operačné náklady na výrobu veľkej škály výrobkov,
- dobrá rozšíriteľnosť.

(Tofail, 2018)

2.3 Fused Deposition Modelling (FDM)

FDM je technológia AM vyvinutá spoločnosťou Stratasys vyrábajúca súčiastky z termoplastických materiálov ako je ABS (akrylonitrilbutadiénstyrén), PC (polykarbonát) a PLA (kyselina polymliečna).

Materiál vo forme struny navinutej na cievke je dodávaný do vyhriatej dýzy, kde dôjde k jeho skvapalneniu zahriatím na určitú teplotu. Skvapalnený materiál je vytlačaný cez dýzu počiatočným (tuhým) vláknom ktorý je takto jednotlivo pokladaný po vrstvách. Pri FDM je potreba aplikácie podporného materiálu na prevísajúce prvky vyrábaného dielu. Podporný materiál musí byť ľahko odstrániteľný. Po ukončení procesu tlače sa diel opatrne odstráni zo základnej dosky a v závislosti od použitého podporného materiálu sa odstráni podporná štruktúra ručne - odlomením, alebo automaticky rozpúšťaním v roztokoch, pričom je dôležité aby rozpúšťadlo alebo voda nereagovala so základným materiálom. Riadiaci systém ovláda celú pracovnú sústavu a jej parametre, ako je rýchlosť navíjania struny, rýchlosť kladenia vrstiev, šírka vytlačania a výška vrstvy. Kombinácia týchto parametrov vplýva na rýchlosť a kvalitu výroby (Kumar M, 2021). Princíp AM metódou FDM popisuje Obr. 27.



Obr. 27 Princíp FDM (Hubs, 2022)

Teplota materiálu zohráva veľmi dôležitú úlohu z hľadiska viskozity. Tá nesmie byť príliš vysoká aby bol umožnený ľahký prietok cez otvor dýzy, ale zároveň by nemala byť príliš nízka, inak by nanosený filament neposkytoval dostatočnú štruktúrnú podporu pre vytvárajúce sa vrstvy. Najväčší problém predstavujú mechanické vlastnosti konečných výrobkov. Tie sú totiž objektívne horšie v porovnaní s vlastnosťami súčiastok vyrábaných inými aditívnymi výrobami a to v dôsledku prítomnosti dutín. Okrem toho sú mechanické vlastnosti tlačenej súčiastky FDM anizotropné a veľmi závislé od parametrov tlače (Mazzanti, 2019).

2.3.1 Materiály využívané pri FDM

Uprednostňujú sa amorfné termoplasty vďaka ich pozitívnym vlastnostiam pri tavení. Tieto polymérne materiály, vrátane najčastejšie používaných ako ABS alebo PC mäkknú v širokom rozsahu teplôt až po teplotu sklovitého prechodu kedy ich viskozita splňa dobré podmienky na pretlačenie materiálu cez dýzu s priemerom 0,2 - 0,5 mm (Bourell, 2017).

Plast **ABS** je vysoko pevný, relatívne odolný materiál, je možné leštiť, brúsiť alebo inak upravovať povrch súčiastky po tlači bez toho aby došlo k razantnému zníženiu jeho pevnosti. Jeho odolnosť voči korozívnym chemikáliám a teplu tiež umožňuje používať v podmienkach, kde by mnohé iné materiály mohli výrazne degradovať. ABS sa takisto dodáva v rôznych farbách takže je možné vyhovieť rôznym estetickým požiadavkám.

PC je bežný priemyselný plast, ktorý sa široko používa v automobilovom, leteckom a zdravotníckom priemysle. PC zaručuje presnosť, trvanlivosť a stabilitu čím je možné vytvoriť pevné diely, ktoré vydržia funkčné testovania. Je vhodný na výrobu koncepčných modelov, funkčných prototypov a výrobných nástrojov (Masood, 2014).

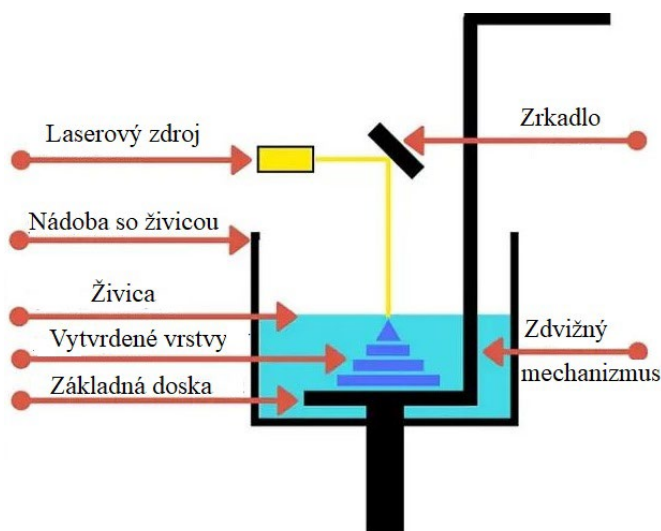
2.4 Stereolitografia (SLA)

SLA patrí medzi prvé patentované aditívne technológie. Podobne ako pri všetkých ostatných metódach AM, aj pri SLA je fyzický diel vytváraný vrstvou po vrstve. Východiskovým materiálom je vytvrdzovateľná tekutá živica ktorá sa spevňuje fyzikálnou reakciou - fotopolymerizáciou. Táto reakcia je dosiahnutá vystavením materiálu UV žiareniu. Zdroj žiarenia môže byť buď koncentrovaný bod vo forme zaostreného laserového lúča alebo ako projekcia svetelného obrazu. Typické SLA zariadenie je tvorené nasledujúcimi komponentami:

- nádoba obsahujúca tekutý fotocitlivý polymér,
- pohybujúca sa základná doska vo vertikálnom smere riadená systémom na ktorej je súčiastka vytváraná,
- zariadenie snímajúce stav hladiny tekutého materiálu v nádobe,
- stierací nôž pohybujúci sa horizontálne slúžiaci na rovnomerné rozotieranie tekutého fotopolyméru,
- zdroj UV svetla spolu s potrebnou optikou.

(Salonitis, 2014)

Zdroj laseru býva zväčša umiestnený nad alebo pod základnou doskou v závislosti od konštrukcie zariadenia. Laser je odrazený zrkadlom smerujúce laser v osiach X a Y podľa obrysu vrstvy súčiastky. Základná doska sa pohybuje v smere osi Z. Hneď ako laserový lúč prenikne na povrch živice, dochádza k okamžitému stuhnutiu fyzikálnou reakciou. V závislosti od reaktivity a priehľadnosti živice možno hrúbku vrstvy nastaviť pomocou laserového výkonu a rýchlosti dopadu laserového žiarenia. Po vytvrdnutí sa základná doska posunie o veľkosť hrúbky jednej vrstvy. Následne sa stieracím nožom naniesie ďalšia vrstva tekutého fotopolyméru. Treba poznamenať, že stavebná platforma je spolu s nádobou materiálu uzavretá v komore aby sa zabránilo úniku pár do vonkajšieho prostredia. Proces sa opakuje až kým nie je súčiastka dokončená. Následne sa diel očistí izopropylalkoholom a môže sa ešte dodatočne vytvrdzovať v tzv. UV peci - post-processing. Týmto sa zabráni povýrobnému zmrašteniu ku ktorému dochádza pár hodín/dní po výrobe. Parametre dodatočného vytvrdzovania v peci ako čas vystaveniu sa vzorky UV svetlu a výkon žiarenia sa volia v závislosti od materiálu a objemu súčiastky (Heinrich, 2021). Princíp SLA zariadenia popisuje Obrázok 28.



Obr. 28 SLA zariadenie (manufactur3d, 2018)

Pri SLA poznáme dva druhy zmrštenia materiálu. K prvému typu dochádza počas výroby, vytvára sa tzv. polymérna väzba medzi tuhým materiálom a menej hustou kvapalinou. Druhým je exotermická reakcia počas výroby, v dôsledku ktorej dochádza k expanzii polymérov vplyvom zvýšenej teploty. Po ochladení dochádza k výraznému zmršteniu. Tieto dve formy zmrštenia vytvárajú v modeli vnútorné napätia spôsobujúce deformáciu. Problém môže často vyriešiť použitie kompozitov (Kumar M, 2021).

2.4.1 Materiály využívané pri SLA

Vo všeobecnosti sú všetky fotocitlivé živice patentované na báze epoxidov ktoré sa na dnešnom trhu ponúkajú so širokou škálou optických, mechanických a tepelných vlastností, ktoré sa vyrovnajú vlastnostiam štandardných, technických a priemyselných termoplastov:

Živice na báze **PC** nájdu najlepšie uplatnenie pri dieloch vyžadujúce si dostatočnú pevnosť a tuhosť v kombinácii s vysokou teplotnou odolnosťou, akými sú napr. automobilové alebo elektrické komponenty. Pomocou povýrobného vytvrdzovania možno tepelnú odolnosť dielu ešte viac zvýšiť avšak na úkor jeho trvanlivosti.

Živice na báze **ABS** sa rozdeľujú na čierne, transparentné alebo biele. Čierne si zachovávajú dobrú tvarovú stabilitu vo vlhkom prostredí, použitie v hračkárskom priemysle, spotrebiteľských obaloch. Transparentné sú vďaka priehľadnosti využívané pri výrobe optických šošoviek, sú odolné voči vlhkosti. Biele poskytujú vysokú pevnosť, vyznačujú sa najvyššou teplotnou odolnosťou spomedzi ostatných ABS živíc (Wevolver, 2022).

2.5 Porovnanie technológií FDM a SLA

Vzhľadom na rozdiel v princípe výroby FDM a SLA sa vlastnosti materiálov ako sú pevnosť v ťahu, tepelná deformácia a modul pružnosti v ohybe môžu razantne líšiť. Okrem toho pri výrobe SLA vznikajú anizotropné vlastnosti materiálu, pri ktorých sa hodnoty pre osi X, Y a Z líšia od FDM. Tabuľka 1 porovnáva vybrané vlastnosti technológií.

Tab.1 Porovnanie vybraných vlastností FDM a SLA (Makerbot, 2020)

	FDM	SLA
Materiál	Široká škála termoplastov a kompozitov, nízka cena materiálu (20 až 100 € / 1kg)	Obmedzenejší sortiment tekutých živíc, vyššie náklady na materiál (50 až 200 € / 1l)
Farba výtlačkov	Možnosť kombinovať širokú paletu farieb s materiálom	Obmedzenie na čiernu, bielu a transparentnú, zložitý proces pigmentácie
Povrch výtlačku	Drsný, viditeľné línie vrstiev	Jemný, málo viditeľné vrstvy
Výška vrstvy	50 – 450 um	20 – 50 um
Súčiastka	Vysoká pevnosť, dlhšia životnosť	Nižšia pevnosť, náchylnosť na zmraštenie a praskliny
Objem tlače	Najväčšie zariadenie až 2 475 l	Najväčšie zariadenie max. 618 l

2.6 Výroba vzoriek FDM

Ako je spomenuté v úvode tejto kapitoly, realizovala sa výroba dvoch navrhnutých vzoriek dvomi odlišnými aditívnymi technológiami. Pre prvú vzorku sa zvolila výroba metódou FDM na zariadení F370 (Obr.29) od firmy Stratasys spadajúce momentálne do ich výrobnnej série F123. Zariadenie ponúka všestrannosť vďaka prístupu k širokej škále materiálov, ako sú PC materiály, elastoméry a ABS. Zo série sa vyznačuje najväčším objemom tlače. Obsahuje štyri kazety pre vloženie cievok s navinutým materiálom vo forme struny – dve kazety pre vloženie podporného a dve pre vloženie základného materiálu. Použitie podpornej štruktúry umožňuje výrobu zložitých výtlačkov s vysokou presnosťou a detailnosťou. Dýza môže počas výroby dosiahnuť teplotu $\leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pracovná komora $\leq 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Wevolver, 2022). Tabuľka 2 udáva niektoré parametre zariadenia.



Obr. 29 Zariadenie Stratasys F370 nachádzajúce sa na pôde fakulty

Tab. 2 Vybrané parametre zariadenia F370 (Stratasys, 2021)

Rozmer zariadenia	163 x 86 x 71 cm
Objem tlače	355 x 254 x 355 mm
Hluk zariadenia	Max 46. dB, 35 dB počas nečinnosti
Výška vrstvy	0,12 – 0,33 mm, v závislosti od použitého materiálu
Systémové požiadavky	Windows 7 a vyššie (64bit), 4GB RAM
Prevádzková teplota	15 – 30 °C (vlhkosť 30 – 70%)
Softvér	GrabCAD Print, Insight™, ProtectAM™
Materiál	ABS, PC, PC-ABS, PLA

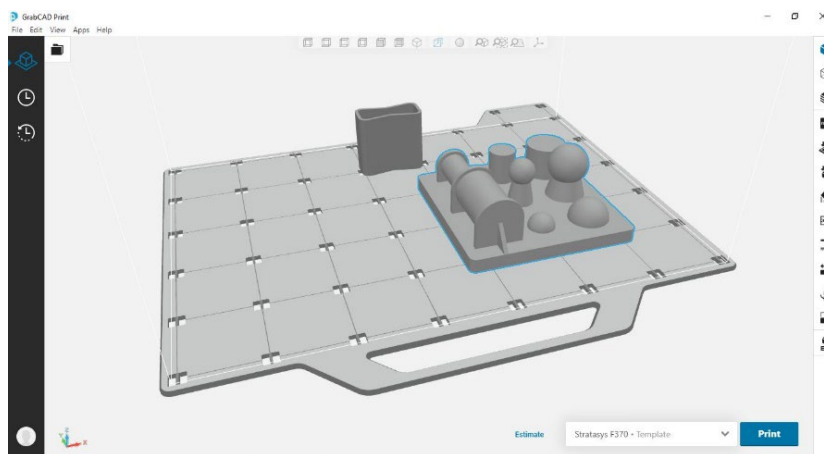
Zvolený materiál je na báze ABS pod komerčným názvom ABS-M30 White. Je to vhodný materiál na kontrolu tvaru dielcov, výrobu funkčných prototypov a iné aplikácie 3D tlače. ABS-M30 sa vyznačuje pevnosťou a húževnatosťou, pričom je ľahký a pružný, zaručuje hladký povrch a je dodávaný v niekoľkých farebných variantoch (Materialise, 2023). Tabuľka 3 udáva niektoré jeho mechanické a fyzikálne vlastnosti, ich vlastnosti sa líšia na základe výrobných parametrov a konštrukcie súčiastky.

Tab. 3 Vlastnosti materiálu ABS-M30 (Materialise, 2023)

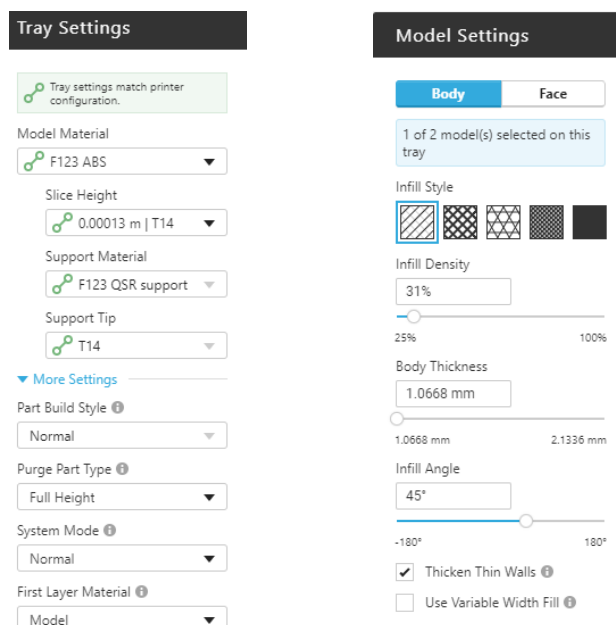
Vlastnosť	Hodnota	Norma
Hustota	1,04 g/cm ³	ASTM D792
Pevnosť v ťahu	36 MPa	ASTM D638
Modul pružnosti v ťahu	2 410 MPa	ASTM D638
Pevnosť v ohybe	61 MPa	ASTM D790
Modul pružnosti v ohybe	2 315 MPa	ASTM D790
Teplota sklovitého prechodu	105 °C	ASTM D7426

3D tlač FDM vzorky

Pred samotnou výrobou bol CAD model prekonvertovaný do neutrálneho formátu .stl a takto importovaný do programu GrabCAD Print. Ten skontroluje, či sa v súbore nenachádzajú nejaké chyby, napr. nespojitosť siete ktoré sa dajú jednoducho odstrániť. Je možné ďalej nastaviť najdôležitejšie parametre tlače: výšku vrstvy, štruktúru výplne a typ podpíer. Ostatné nastavenia automaticky upraví 3D tlačiareň po nahratí modelu do zariadenia. SW vypočíta aj množstvo spotrebovaného materiálu a čas výroby (3dprinting, 2018). Obr. 31 znázorňuje umiestnenie modelu v rámci pracovného priestoru a Obr. 30 nastavenie parametrov tlače.

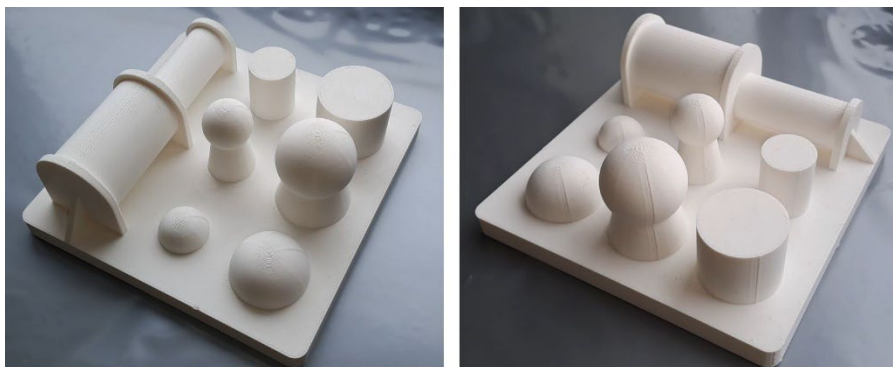


Obr. 30 Príprava pred FDM tlačou v softvéri GrabCAD



Obr. 31 Voľba parametrov pre FDM tlač

Na základe zadaných parametrov je vzorka vyrobená zo 408 súvisle nanesených vrstiev. Po vyrobení súčiastky nasledoval post-processing vo forme vyplavovania vo vode rozpustnej podpornej štruktúry v práčke SCA-1200HT. Zariadenie je zložené z trysky a čerpadla pomocou ktorého cirkuluje zahriaty roztok v okolí modelu, pričom rozpúšťa podporný materiál. Tento proces urýchľuje odstraňovanie podpier na všetkých typoch modelov z hľadiska geometrie bez časovo náročného ručného odstraňovania (AdvancedTek, 2017). Vyrobený a očistený FDM výtlačok je možno vidieť na Obr.32.



Obr. 32 Vyrobená a očistená vzorka zhotovená metódou FDM

Výroba pokračovala zhotoveným ďalšej vzorky na SLA zariadení Form 3 od spoločnosti Formlabs. Na zariadení je možné vyrábať diely s jemným povrchom a rôzne tvary s vysokým rozlíšením ako sú napr. sošky, busty ale aj makety ľudských orgánov vytvrdzovaním fotocitlivej živice pomocou UV laseru. Pracuje so živicami na báze akrylátu a so živicami s vlastnosťami podobnými ABS, PC alebo polypropylénu.

Zariadenie nie je vhodné využívať pri výrobe dielov kde sa vyžaduje extrémne prísna tolerancia (rádovo v tisícinách), ak sú súčasťou pohyblivého mechanizmu alebo diely so stenami tenšími ako 0,5 mm alebo väčšími ako 5 mm (DuderstadtCenter, 2022).

Stroj nedisponuje prídavným materiálom na tvorbu podpernej štruktúry ako je tomu pri FDM ale vytvára odstrániteľné podpory z rovnakého materiálu akým je tvorený model. Po 3D tlači sa podpory jednoducho ručne oddelia od súčiastky čo však na nej zanecháva nedokonalosti v podobe miniatúrnych výstupkov, táto chyba sa dá však odstrániť dodatočným brúsením a leštením (DuderstadtCenter, 2022). Tab.4 uvádza niektoré parametre zariadenia.

Tab. 4 Parametre SLA zariadenia Form 3 (Formlabs, 2023)

Rozmer zariadenia	40,5 x 37,5 x 53 cm
Objem tlače	145 x 145 x 185 mm
Zdroj svetla	UV (405nm) 250mW laser
Veľkosť laserového bodu	85 μ m
Výška vrstvy	25 – 300 μ m
Systémové požiadavky	Windows 7 a vyššie (64bit), 4GB RAM
Prevádzková teplota	18 – 28 °C
Softvér	PreForm
Materiál	Vytvrdzovateľné živice na báze ABS, PC, PP

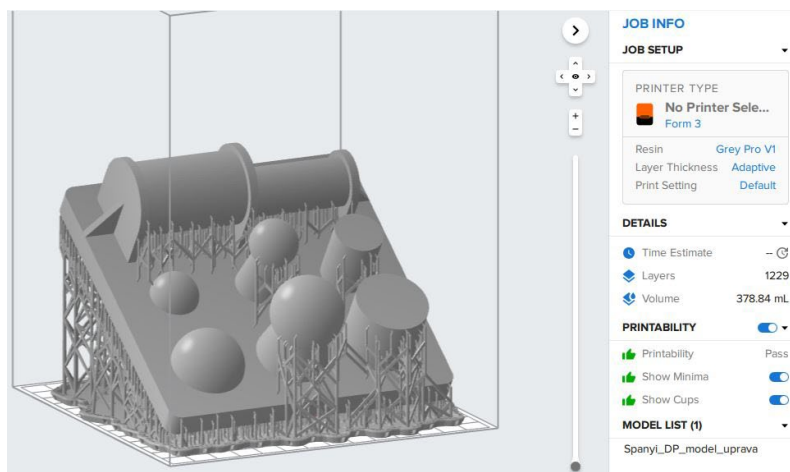
Ako výrobný materiál sa zvolila fotocitlivá živica Grey Pro. Vyznačuje sa vysokou tuhosťou, diel si zachováva presné rozmery v priebehu času. Mierna ťažnosť, vysoká presnosť a odolnosť voči deformácii v priebehu času z tejto živice robí univerzálny materiál pre rôzne strojárské aplikácie. Podporuje rozlíšenie tlače 100 a 50 μ m. Po 3D tlači je vhodné vykonať post-processing vo forme dodatočného vytvrdenia v UV peci (Formlabs, 2018). Tab.5 uvádza vlastnosti materiálu Grey Pro po dodatočnom vytvrdení v UV peci pri teplote 80°C po dobu 120 min.

Tab. 5 Vlastnosti Grey Pro

Vlastnosť	Hodnota	Norma
Pevnosť v ťahu	61MPa	ASTM D 638-14
Modul pružnosti v ťahu	2,6 GPa	ASTM D 638-14
Modul pružnosti v ohybe	2,2 GPa	ASTM D 790-15
Teplotná rozťažnosť -30 až 30°C	78,5 μ m/m/°C	ASTM E 831-13

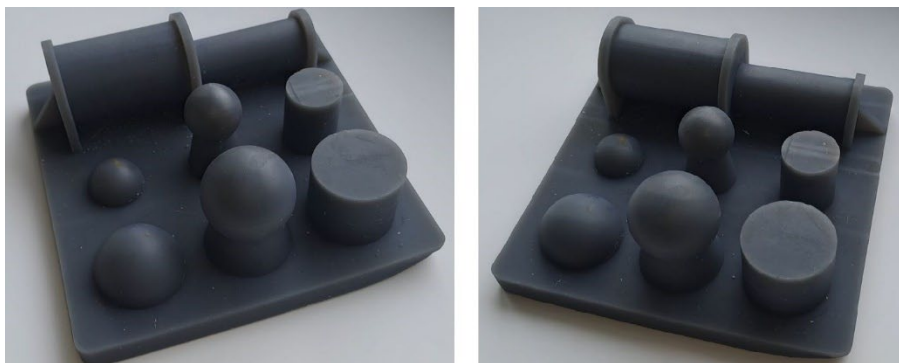
3D tlač SLA vzorky

CAD model vo formáte .stl bol importovaný do SW PreForm v ktorom sa nastavili základné parametre. Výška vrstvy sa zvolila ako Adaptive – program automaticky vypočíta výšku vrstvy na základe geometrie modelu. Pre zaujímavosť experimentu bol model vložený do pracovného priestoru pod uhlom 45°, na základe tejto skutočnosti program automaticky skonštruoval podpornú štruktúru zasahujúcu aj do geometrických elementov (Obr. 33) na ktorých bude v neskoršej kapitole vykonávaný experiment.



Obr. 33 Ustavenie modelu v programe PreForm a parametre tlače

Po úspešnom vytlačení sa manuálne odstránila podporná štruktúra. Následne sa vzorka vytvrdila v UV peci. Finálny výťaháč zachytáva Obr. 34.



Obr. 34 Zhotovená SLA vzorka

3 ZÍSKAVANIE 3D MODELU VZOROVEJ SÚČIASTKY

Kapitola práce sa bude zaoberať transmisnou metódou zberom 3D dát vyrobených vzoriek pomocou priemyselného počítačového tomografu Metrotom 1500 a spôsoboch polygonizácie získaných mračien bodov vzoriek vo vybraných CAX softvéroch.

3.1 Zariadenie Metrotom 1500

Je to bezkontaktné snímacie zariadenie využívané pri analýze súčiastok z hľadiska ich veľkosti alebo materiálovej hustoty. Dokáže spoľahlivo snímať a vyhodnocovať súčiastky najmä z plastu, keramiky, kompozitných materiálov ale aj hliníkové a horčíkové zliatiny a niektoré druhy ocele. Pre každý diel sa stanoví ideálne zväčšenie jeho plynulým polohovaním medzi detektor a zdroj röntgenového žiarenia. Pre presnejšie vyobrazenie jemných štruktúr je možné dodatočne nainštalovať detektor s vyšším rozlíšením. Zariadenie disponuje ochranným oceľovým krytom ktorý zabraňuje úniku žiarenia do okolia (Obr.35) (Zeiss, 2009). Hlavné parametre zariadenia udáva Tab. 6.



Obr. 35 CT skener Metrotom 1500 nachádzajúci sa na pôde fakulty

S meniacou sa vzdialenosťou skenovaného objektu ktorý je umiestnený medzi detektorom a zdrojom žiarenia sa môžu meniť parametre ako je veľkosť voxelu a výkon žiariča. Výkon sa zmení ak je vzdialenosť medzi dielom a žiaričom príliš krátka – dôjde k poklesu veľkosti voxelu čo má za následok zníženie výkonu a predĺženia času snímania jedného obrazu. Voxel obsahuje určitý počet získaných bodov, jeho veľkosť sa dá takisto ovplyvniť umiestnením meraného objektu od žiariča (Tóth, 2015).

Tab. 6 Parametre zariadenia Metrotom 1500

Výkon zdroju žiarenia	225 kW
Napätie zdroju žiarenia	225 kV
Rozlíšenie detektora	1024x1024/2048x2048 px
Objem merania	ø300x350 mm
Vzdialenosť detektoru od žiarenia	1 500 mm
Rozsah nastavenia pracovného stola	150 mm

3.2 Skenovanie vzoriek

Na komunikáciu medzi výpočtovou stanicou a skenovacím zariadením slúži používateľský SW Metrotom OS. Je možné ním zadávať vstupné parametre snímania, vyhodnocovať proces zberu dát a nahliadnuť na výsledok skenovania v podobe mračna bodov. Pre obe vzorky boli zadané rovnaké parametre skenovania ktoré uvádza Tab.7.

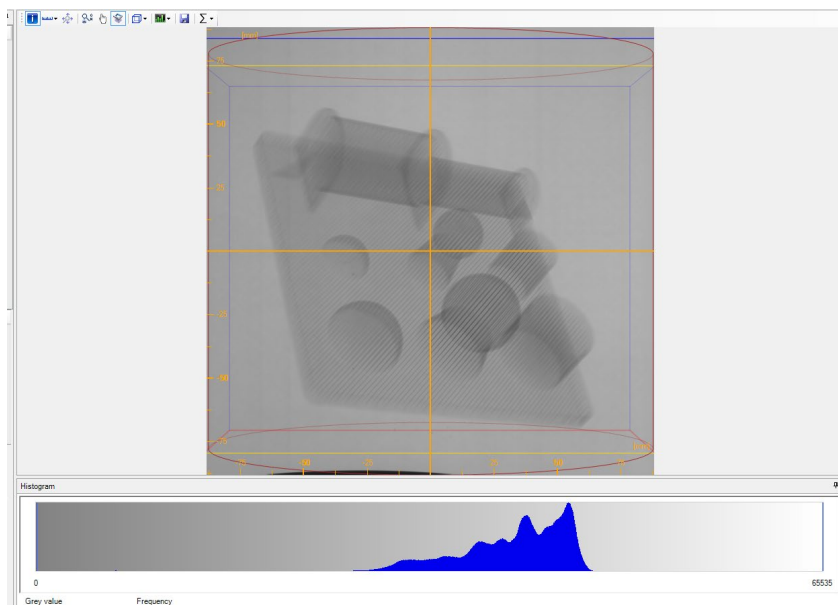
Tab.7 Parametre snímania

Prúd	650 μ A
Napätie	160 kV
Počet snímok	2050
Veľkosť voxelu	86.17 μ m
Rozlíšenie detektora	2048/2048 px
Integračný čas	1000 ms
Binning	1x1
Gain	8x
Umiestnenie vzorky (xyz)	650x0,15x80 mm
Čas skenovania	~90 min

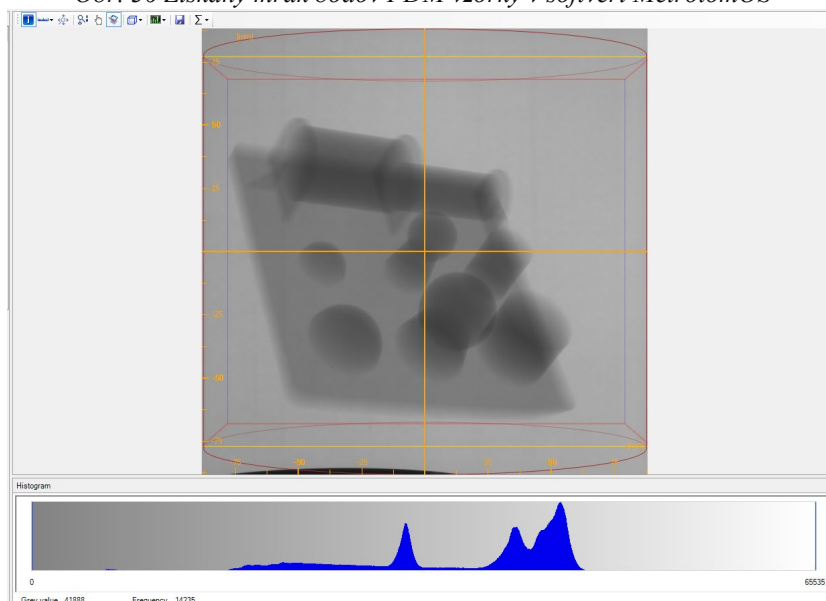
Parametrom binning je možné nastaviť redukciu množstva zberaných dát, pri nastavení 1x1 je aplikované rozlíšenie podľa nastaveného detektora, pri nastavení 2x2 sa štyri odlišné obrazové body skombinujú a vytvoria jeden pixel. Gain má vplyv na signál obrazu a jeho rozmazanie, čím vyššia je jeho hodnota tým proporcionálne rastie jas a šum obrazu, parameter neovplyvňuje čas snímania. Integračný čas zodpovedá expozičnému času zhotovenia snímky, čím vyššia jeho hodnota tým viac je jasnejší obraz.

Zadaný počet snímok je vyhotovených počas jedného merania, má vplyv na čas skenovania spolu s integračným časom.

Veľkosťou napätia sa ovplyvňuje veľkosť fokusovacieho bodu dopadajúceho na meraný objekt (Zeiss, 2020). Výsledky zberu dát sú zobrazené na Obr. 36 a Obr.37.



Obr. 36 Získaný mrak bodov FDM vzorky v softvéri MetrotomOS



Obr. 37 Získaný mrak bodov SLA vzorky v softvéri MetrotomOS

Na Obr. 36 je zreteľne vidieť izotropnú stavebnú štruktúru vzorky ktorá je charakteristická pre súčiastky vyrobené FDM metódou. Napriek tomu vzorka SLA sa na pohľad vyznačuje skôr homogénnou štruktúrou. Veľkosť skenu činila pri SLA vzorke 13,16 GB, pri FDM vzorke 13.88 GB. Takto získané mračná bodov boli konvertované do súboru .vgl

3.3 Polygonizácia mraku bodov a jej vplyv na počet bodov

Pred reverzným modelovaním je často potrebné získané mračno bodov polygonizovať.

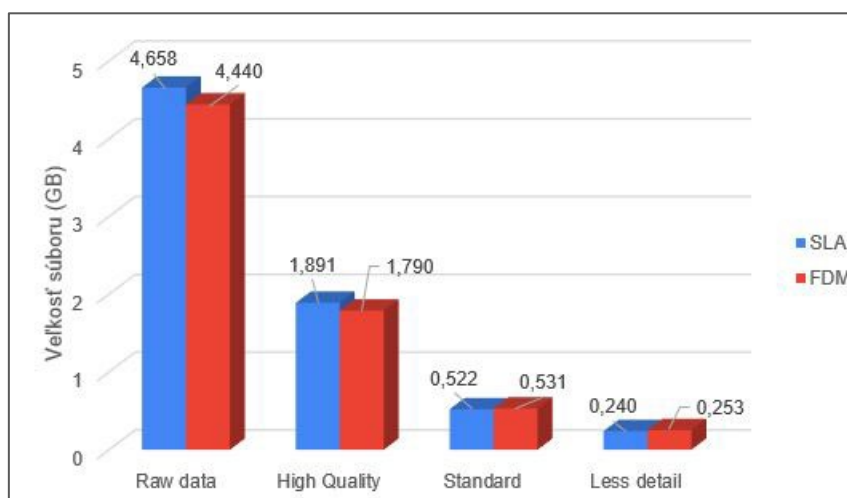
Výstupom polygonizácie ako je spomenuté v prvej kapitole, je model opísaný zvyčajne vo formáte stl, ktorý je importovateľný do CAD a CARE SW v ktorých je možné aplikovať techniky RGM. Existuje veľa CAx programov v ktorých je možné polygonizáciu uskutočniť rôznymi výpočtovými metódami. Podkapitola bude pojednávať o polygonizovaní mračna bodov CAQ softvéroch GOM Inspect 2018 a VG Studio MAX rôznymi spôsobmi, poukáže na ich vplyv na výsledný počet bodov a veľkosti súboru polygonizovaných modelov.

Systém GOM je voľne dostupný program na spracovanie a rozmerovú analýzu mračen bodov modelov získaných CT, optickým alebo laserovaním skenovaním. Umožňuje zdieľanie výsledkov medzi rôznymi oddeleniami vo výrobe alebo medzi zákazníkom a výrobcom. Okrem samotného polygonizovania mračna podporuje ďalej vyhladzovanie a vyplnenie dier v sieti (GOM, 2016).

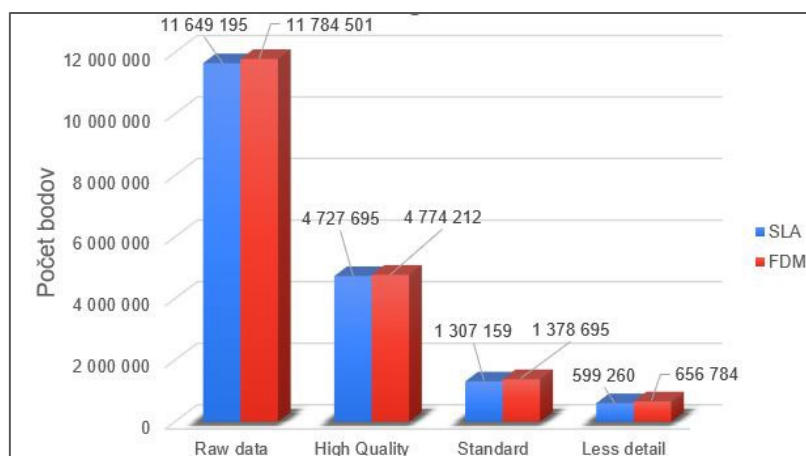
Systémom GOM Inspect je možné polygonizovať mračná body štyrmi variantmi: Less Detail, Standard, High Quality a Raw Data. Mračná bodov vo formáte .vgl boli vložené do GOM a následne polygonizované opísanými spôsobmi. Výstupom procesu sú zaznamenané parametre ako počet bodov siete a jej dátová veľkosť (Tab. 8, Obr. 38, Obr. 39).

Tab. 8 Vplyv polygonizácie v GOM Inspect na veľkosť súboru a počet bodov

Spôsob polygonizácie	Počet bodov SLA	Veľkosť súboru SLA	Počet bodov FDM	Veľkosť súboru FDM
Raw data	11 649 195	4,658 GB	11 784 501	4,44 GB
High Quality	4 727 695	1,891 GB	4 774 212	1,79 GB
Standard	1 307 159	0,522 GB	1 378 695	0,531 GB
Less Detail	599 260	0,240 GB	656 784	0,253 GB



Obr. 38 Grafická závislosť veľkosti súborov od typu polygonizácie v GOM Inspect

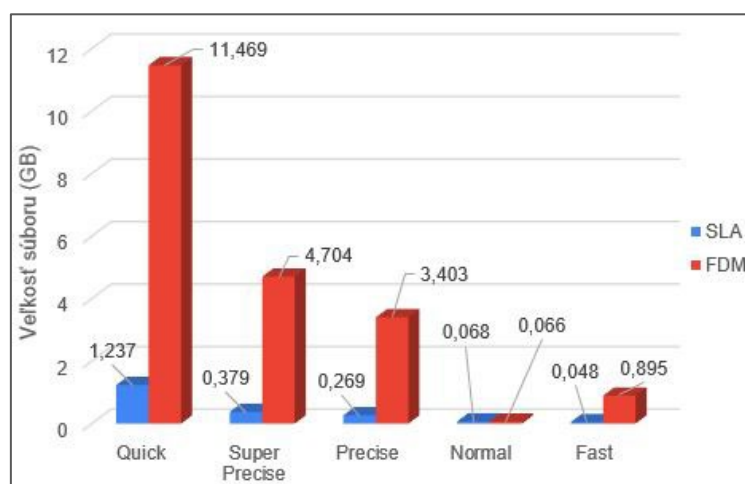


Obr. 39 Grafická závislosť počtu bodov od typu polygonizácie v GOM Inspect

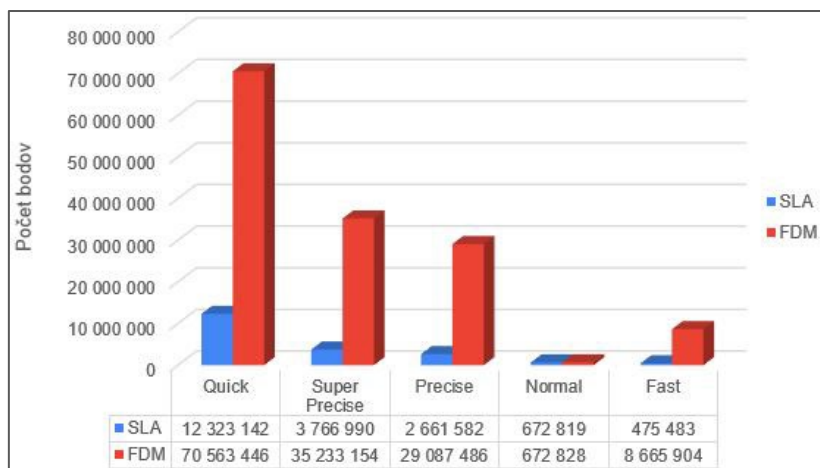
Z grafov na Obr. 38 a Obr. 39 vyplýva že najväčší vplyv na redukciu súboru a počtu bodov má spôsob polygonizácie Less Detail, redukcia dátovej veľkosti mračen bodov v tomto prípade činila 98,176% pre SLA a 98,177% pre FDM. V systéme VG Studio MAX bolo vybraných päť spôsobov polygonizácie: Quick, Fast, Normal, Precise a Superprecise. Postup bol obdobný ako pri systéme GOM. Výsledky z procesu sú zaznamenané v Tab.9, Obr.40 a Obr.41.

Tab. 9 Vplyv polygonizácie vo VG Studio MAX na veľkosť súboru a počet bodov

Spôsob polygonizácie	Počet bodov SLA	Veľkosť súboru SLA	Počet bodov FDM	Veľkosť súboru FDM
Quick	12 323 142	1,237 GB	70 563 446	11,469 GB
Super Precise	3 766 990	0,379 GB	35 233 154	4,704 GB
Precise	2 661 582	0,269 GB	29 087 486	3,403 GB
Normal	672 819	0,068 GB	672 828	0,066 GB
Fast	475 483	0,048 GB	8 665 904	0,895 GB



Obr. 40 Grafická závislosť veľkosti súborov od typu polygonizácie vo VG Studio MAX



Obr. 41 Grafická závislosť počtu bodov od typu polygonizácie vo VG Studio MAX

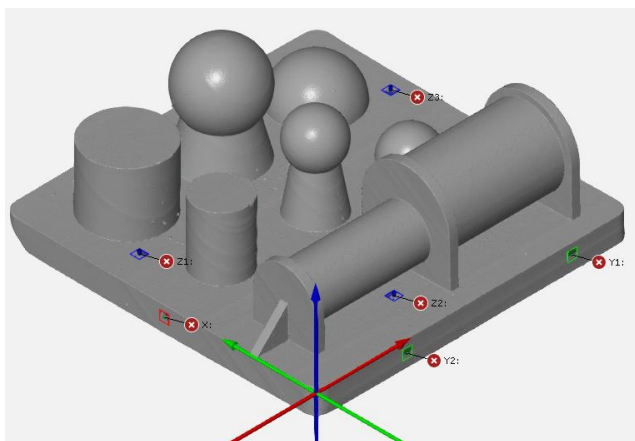
Na grafoch Obr. 40 a Obr.41 je vidno značný rozdiel v počte bodov ako aj dátovej veľkosti medzi modelom vzorky SLA a FDM pri všetkých spôsoboch okrem Normal. Toto je zapríčinené polygonizovaním detailnej vnútornej štruktúry vzorky FDM, zatiaľ čo pri spôsobe Normal program polygonizoval len vonkajšiu štruktúru modelu.

4 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE

V praxi je niekedy potrebné pri veľkom objeme získaných dát z 3D skenovania toto množstvo redukovať pre zníženie nárokov na výpočtovú techniku. Kapitola práce si udeľuje za cieľ poukázať na vplyv tejto redukcie na rozmery jednoduchých geometrických elementov. Skúmanie a vyhodnocovanie vplyvu bude realizované pomocou CAD softvéru Autodesk Powershape ktorý disponuje funkciami reverzného CAD modelovania ako aj modulom pre manipuláciu s polygonálnou sieťou. Skúmanie vplyvu redukcie sa bude vykonávať na polygonálnych modeloch Raw Data vytvorený softvérom GOM.

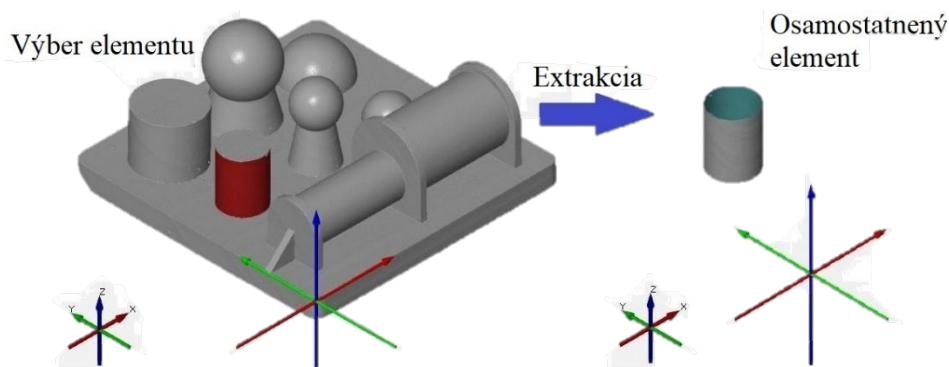
4.1 Príprava modelu pred RGM

Pred importovaním polygonálneho modelu do prostredia SW Powershape je potrebné zadať súradnicový systém, ktorý sa vytvoril v CAQ systéme GOM metódou ustavenia 3-2-1. Tá spočíva vo vytvorení SS na základe umiestnenia šiestich bodov na plochy modelu. Jednotlivé číslce reprezentujú počet bodov v konkrétnej rovine, v tomto prípade ZZZ-YY-X. Tri body boli umiestnené na vrchnú časť štvorcovej podstavy čím sa nastavil smer a počiatok osi Z, ktorá bude udávať výšku modelu. Dva body sa umiestnili na jednu bočnú stenu podstavy (vpravo) udávajúcu smer osi X a počiatok osi Y a posledný bod na druhú čím sa udal počiatok osi X (Obr.42). Takýmto postupom sa vykonalo ustavenie obidvoch polygonálnych modelov.



Obr. 42 Definovanie súradnicového systému v GOM Inspect

Kvôli svojmu veľkému objemu dát nebolo možné polygonálne modeli RawData importovať do programu Powershape. Preto sa pomocou GOM Inspect extrahovali samostatne geometrické elementy funkciou výberu na základe geometrického tvaru. Výhodou softvéru je že počas extrahovania uloží informácie o súradnicovom systéme, preto nebolo nutné pre každý geometrický element zvlášť definovať nový SS (Obr.43).



Obr. 43 Proces výberu elementu v prostredí GOM Inspect

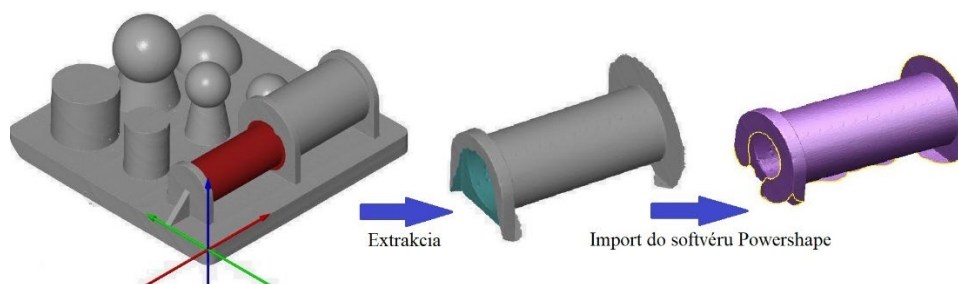
Podobným spôsobom sa vyextrahovali všetky ostatné prvky ako guľové, kužeľové a ostatné valcové elementy ktoré boli jednotlivo uložené do PC úložiska vo formáte .stl.

4.2 Skúmanie vplyvu redukcie siete

Redukciou siete sa prevažne rozumie zníženie počtu bodov – trojuholníkov čím sa významne zredukuje množstvo kódovaných informácií o sieťovom modeli tj. zníži sa veľkosť súboru. Redukovanie siete je v praxi častý postup keďže zníženie dát má rýchlejšiu odozvu pri manipulácii s modelom v CAD a CARE systémoch. Podkapitola sa zameria na to aký veľký vplyv má redukovanie bodov polygonálneho modelu na rozmery geometrických prvkov a na ich pozíciu v 3D priestore. Realizácia experimentu sa bude vykonávať cez RGM vo forme vytvárania plôch na základe výberu bodov daného geometrického prvku. Z takto vytvorených plôch bolo možné zistiť skúmané parametre.

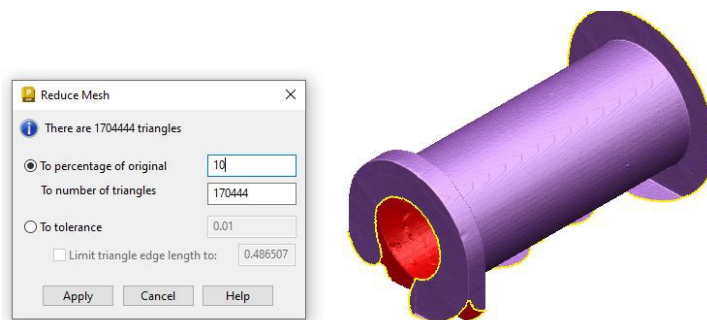
4.2.1 Vplyv redukcie siete na Horizontálny valec D20

SW Powershape disponuje modulom pre manipuláciu s polygonálnymi sieťami ako je jej oprava, rozdelenie, zjemnenie, redukcia, funkcie výberu trojuholníkov na základe ich farby, tvaru atď. Po importovaní prvku – Horizontálneho valca D20 (Obr. 44) sa výberom funkcie Redukovať pristúpilo ku redukcii bodov na základe percentuálneho zachovania originálu (z polygonizácie RawData).



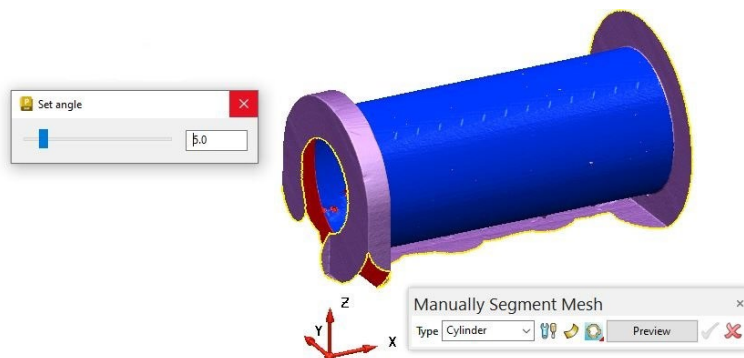
Obr. 44 Výber, extrakcia a import Horizontálneho valca D20

Funkciou je možné redukovat' počet bodov/trojuholníkov na základe želaného počtu užívateľom, zadať toleranciu a dĺžku hrán na trojuholníkov. Počas praktickej skúšky sa pracovalo iba so zadávaním percentuálnych hodnôt rádovo v desiatkach (Obr.45).



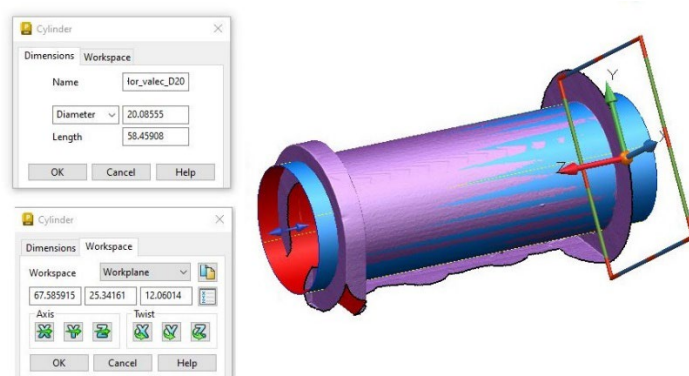
Obr. 45 Redukcia siete cez zadanú percentuálnu hodnotu

Na jednom pracovnom okne sa vytvorilo 9 kópií neredukovanej siete modelu na ktorých sa jednotlivito použila funkcia Redukovať na percento originálu. Pri zadanej hodnote 10 sa tak v skutočnosti vykoná 90% redukcia bodov. Po vytvorení série zredukovaných modelov sa na tieto po jednom funkciou Manuálny Segment prichytila plocha. Cez Manuálny Segment sú vypočítané parametre plochy na základe označených bodov/trojuholníkov cez funkciu Výber trojuholníkov, ďalej poskytuje voľbu prichytenia ako je stredné, vnútorné a vonkajšie. Funkcia Výber trojuholníkov umožňuje vybrať body/trojuholníky v závislosti od ich farby, zadaného uhla nespojitosti, horizontálneho uhla alebo dĺžky. V tomto prípade bol použitý výber uhlom nespojitosti so zadanou hodnotou 5 so strednou metódou prichytenia plochy ktorá je prednastavená softvérom (Obr. 46).



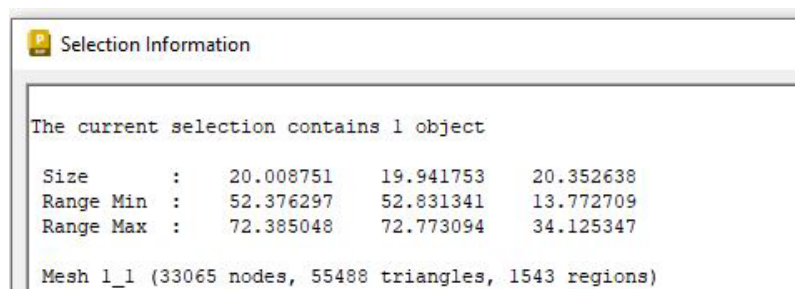
Obr. 46 Výber bodov a výber vytvorenia valcovej plochy

Po vytvorení valcovej plochy sa z tejto odčítali parametre ako priemer a jej pozícia v súradniciach Y a Z (Obr. 47). Súradnica X pojednáva o dĺžke valca ktorá nie je predmetom skúmania, preto ju ignorujeme.



Obr. 47 Vytvorenie valcovej plochy a zaznamenanie rozmerov

Pre zistenie počtu bodov Horizontálneho valca bola funkciou Rozdelenia oddelená jeho sieť od irelevantnej geometrie – bočnými stenami. Po rozdelení sa funkciou Informácia o výbere odčítali hodnoty „nodes“ – body. Ďalej ponúka informácie ako počet trojuholníkov, oblastí, veľkosť a rozsah rozmerov v troch súradniciach (Obr.48).

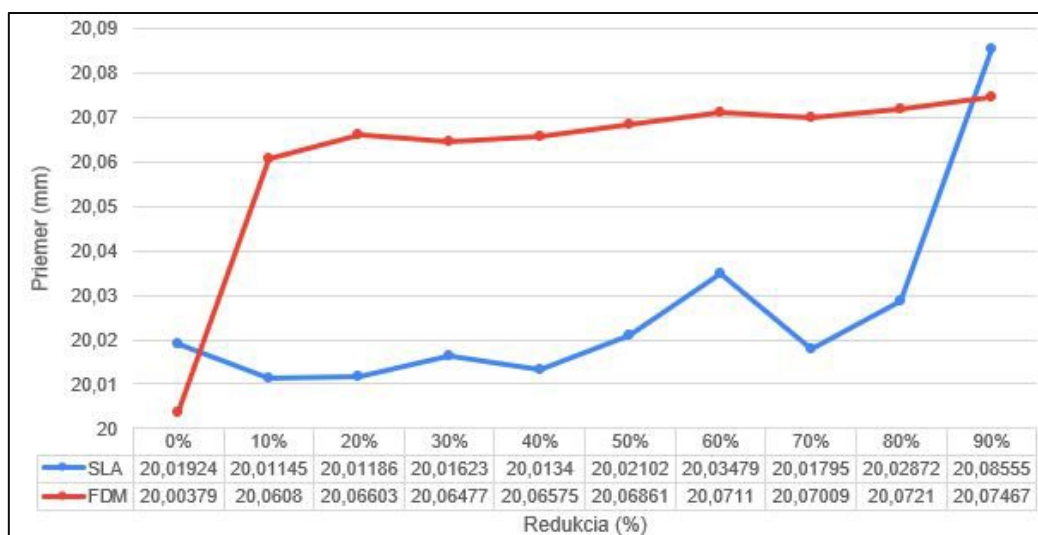


Obr. 48 Funkcia zistenia informácie o výbere

V Tab. 10 sú zaznamenané údaje o priemeroch vytvorenej plochy a počtu bodov valcového elementu pri jednotlivých redukciách siete a vzoriek. Obr.49 znázorňuje grafickú závislosť priemeru valca od percentuálnej redukcie.

Tab. 10 Vplyv redukcie na počet bodov a priemer prichytenej valcovej D20 plochy

Redukcia [%]	Počet bodov SLA	Priemer SLA [mm]	Počet bodov FDM	Priemer FDM [mm]
-	544 012	20,01924	550 431	20,00379
10	481 326	20,01145	488 838	20,06080
20	425 806	20,01186	429 656	20,06603
30	373 903	20,01623	362 189	20,06477
40	235 709	20,01340	319 632	20,06575
50	231 125	20,02102	205 007	20,06861
60	206 415	20,03479	199 603	20,07110
70	152 223	20,01795	151 830	20,07009
80	97 558	20,02872	95 494	20,07210
90	48 872	20,08555	47 395	20,07467



Obr. 49 Grafická závislosť priemeru valcovej plochy D20 od redukcie siete

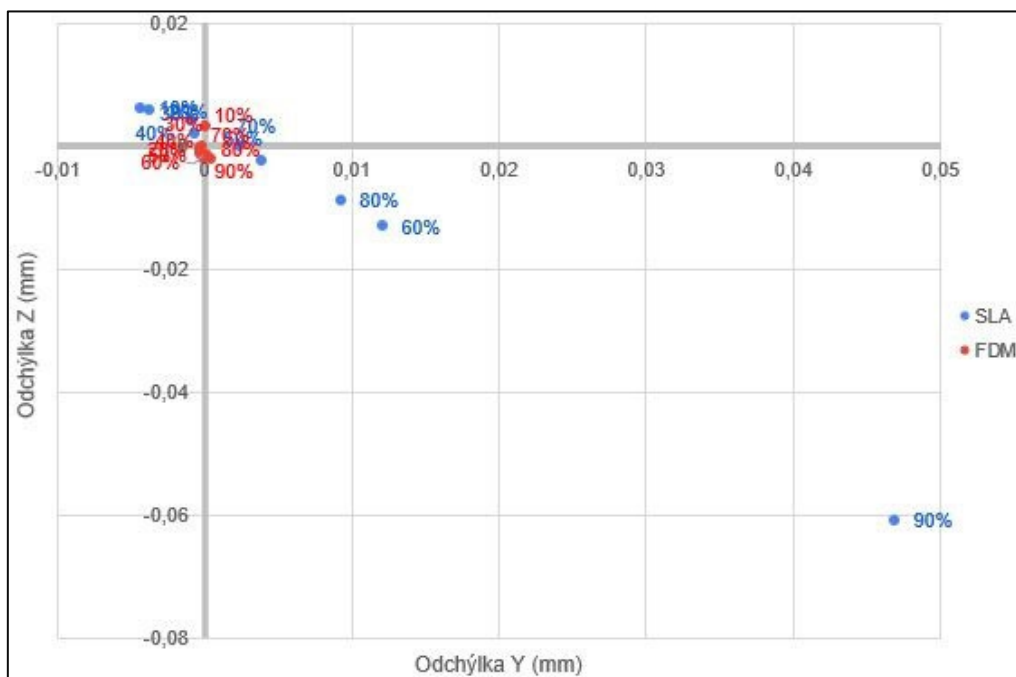
Tab. 11 Vplyv redukcie na pozíciu valcovej plochy D20 pri SLA modeli

Redukcia [%]	Pozícia Y [mm] SLA	Pozícia Z [mm] SLA	Odchýlka Y [mm] SLA	Odchýlka Z [mm] SLA
-	25,29470	12,12094	0	0
10	25,29034	12,12716	-0,00436	0,00623
20	25,29101	12,12666	-0,00369	0,00572
30	25,29408	12,12300	-0,00062	0,00206
40	25,29388	12,12490	-0,00082	0,00396
50	25,29857	12,11864	0,00387	-0,00229
60	25,30680	12,10780	0,01210	-0,01314
70	25,29710	12,12096	0,00240	0,00003
80	25,30396	12,11207	0,00926	-0,00886
90	25,34161	12,06014	0,04691	-0,06080

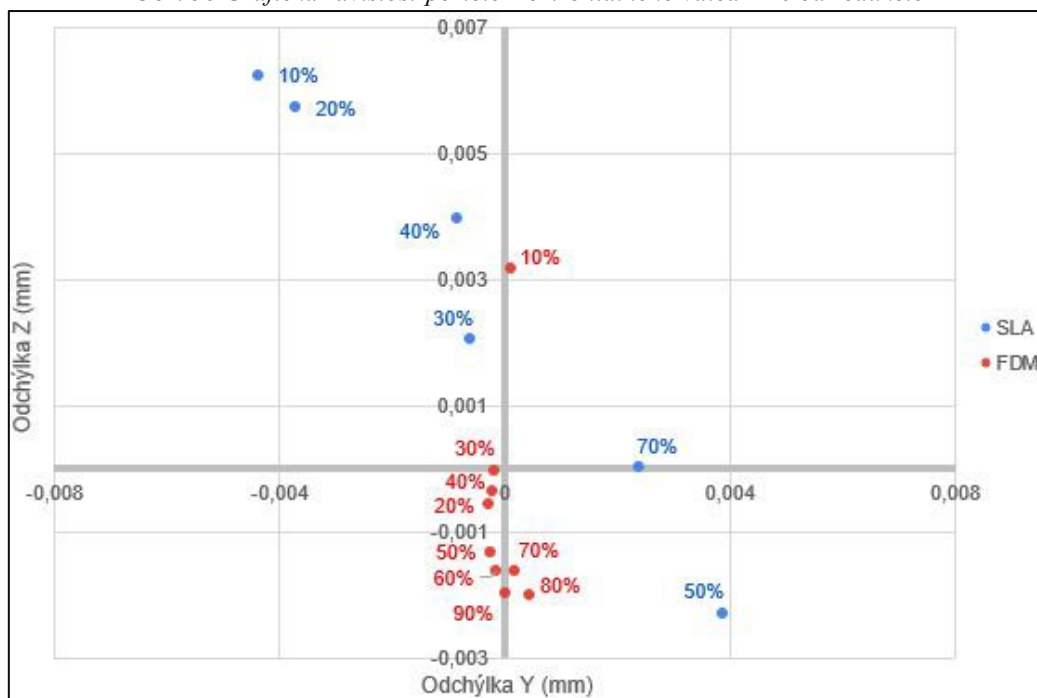
Tab. 12 Vplyv redukcie na pozíciu valcovej plochy D20 pri FDM modeli

Redukcia [%]	Pozícia Y [mm] FDM	Pozícia Z [mm] FDM	Odchýlka Y [mm] FDM	Odchýlka Z [mm] FDM
-	25,10845	12,53390	0,00000	0,00000
10	25,10858	12,53709	0,00013	0,00318
20	25,10817	12,53333	-0,00028	-0,00057
30	25,10826	12,53388	-0,00020	-0,00002
40	25,10825	12,53355	-0,00021	-0,00035
50	25,10820	12,53257	-0,00025	-0,00133
60	25,10831	12,53229	-0,00014	-0,00162
70	25,10864	12,53227	0,00019	-0,00163
80	25,10890	12,53191	0,00045	-0,00199
90	25,10847	12,53192	0,00001	-0,00198

Na grafe na Obr.49 je vidno že zmeny priemeru valca oscilujú viac pri SLA ako FDM modeli. Toto je zrejme zapríčinené naskenovaním dier a výstupkov ako stopa po odstránení podpornej štruktúry. Tab.11 obsahuje informácie o pozícii osi valcovej plochy v súradniciach Y a Z vzhľadom na SS modelu SLA, Tab.12 znázorňuje totožné informácie pre model FDM. Odchýlky sú vypočítané od pozície valca neredukovaného modelu.



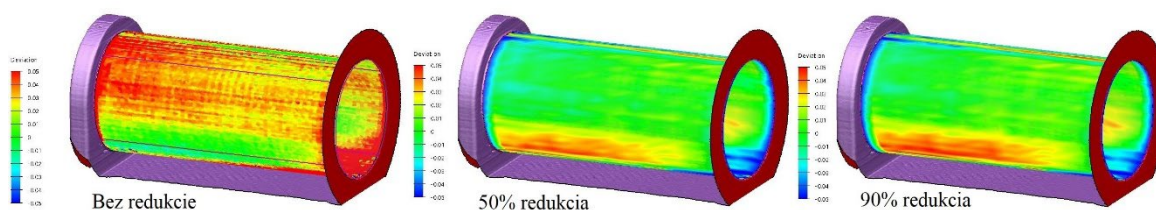
Obr. 50 Grafická závislosť pozície Horizontálneho valca D20 od redukcie



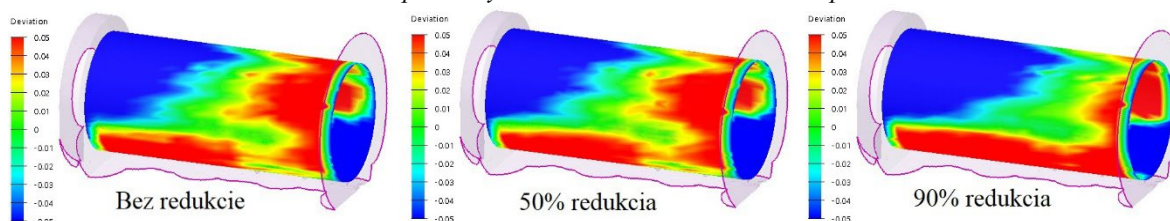
Obr. 51 Detail grafickej závislosti pozície Horizontálneho valca D20 od redukcie

Z grafu na Obr.50 a Obr.51 je možné vyčítať že najväčší vplyv na zmenu pozície valcovej plochy mala redukcia znova na SLA model. Pri FDM sa pozícia vychyluje oveľa menej čo je možné vysvetliť celistvejšou sieťou vďaka nasnímaniu hladkému povrchu valcového prvku na vzorke.

Pomocou funkcie Analýza sa vyhotovila farebná mapa odchýlok v tolerancii $\pm 0,05\text{mm}$ pre vybrané redukcie – 50% a 90% a pre neredukovaný model. Ako zdrojový prvok bola vybraná prichytená plocha a ako cieľový prvok polygonálny model. Z vytvorených máp na Obr. 52 a Obr. 53 možno konštatovať že redukcia vplýva na prichytenie plochy.



Obr. 52 Farebná mapa odchýlok Horizontálneho valca D20 pri FDM modeli

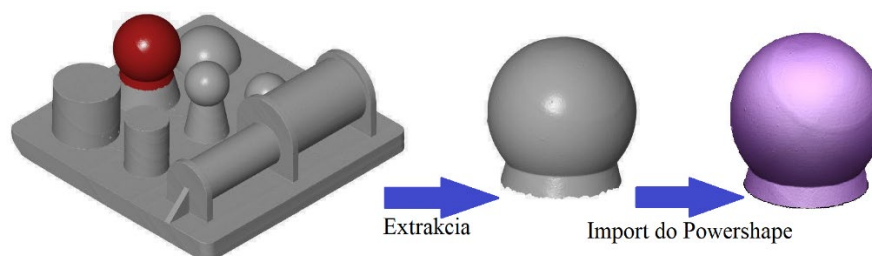


Obr. 53 Farebná mapa odchýlok Horizontálneho valca D20 pri SLA modeli

Podobne premenlivými vlastnosťami sa vyznačuje aj Horizontálny valec D30 ktorého závislosti parametrov od redukcie sa nachádzajú v prílohe B.

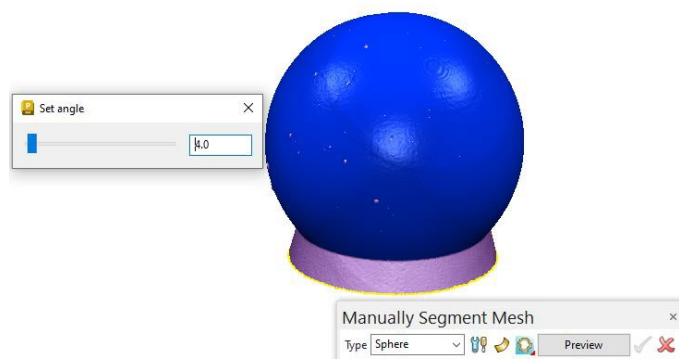
4.2.2 Vplyv redukcie siete na Guľu D30

Po extrakcii Gule D30 v GOM Inspect a importovaní do Powershape (Obr.54), podobne ako pri Horizontálnom valci D20 sa vykonala séria percentuálnych redukcí siete funkciou Redukovať.



Obr. 54 Výber, extrakcia a import Gule D30

V prípade manuálneho prichytenia plochy bol zvolený výber uhľom nespojitosti so zadanou hodnotou 4, so strednou metódou prichytenia (Obr. 55). Po jej vytvorení sa zaznamenal priemer a súradnicové umiestnenie X, Y a Z

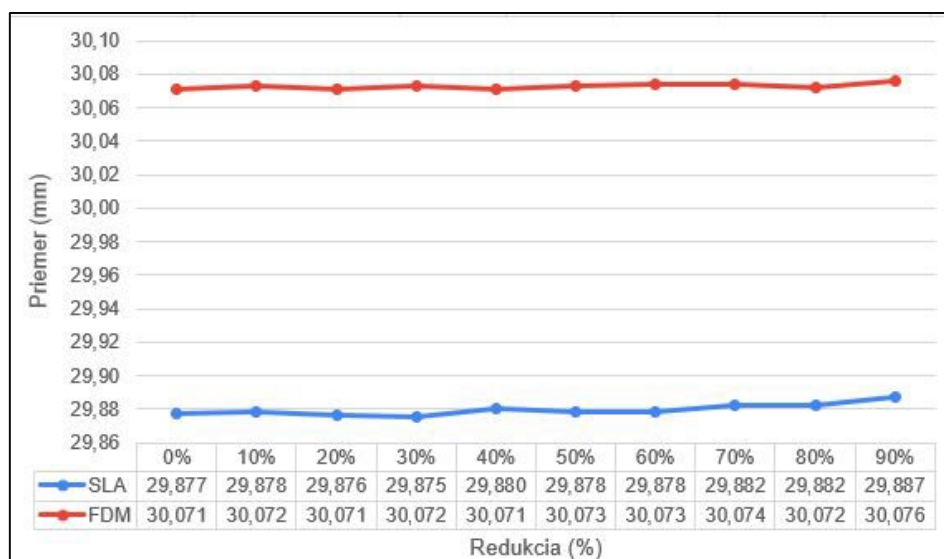


Obr. 55 Výber bodov a vytvorenie guľovej plochy D30

Tab. 13 obsahuje údaje o priemeroch guľovej plochy a počtu bodov ktorými je tvorená, Obr.56 znázorňuje grafickú závislosť priemeru gule od percentuálnej redukcie. Je možné vidieť ako hodnoty sa priemeru gule pri SLA aj FDM menia len rádovo v tisícinách. Toto je spôsobené presnou výrobou guľových elementov ktorá je charakteristická pre SLA tlač. Podobný charakter je možné vidieť pri Polguli R15 v prílohe E.

Tab. 13 Vplyv redukcie na počet bodov a priemer prichytenej guľovej plochy D30

Redukcia [%]	Počet bodov SLA	Priemer SLA [mm]	Počet bodov FDM	Priemer FDM [mm]
-	451 874	29,8776	462 430	30,0711
10	406 946	29,8786	414 706	30,0727
20	354 639	29,8764	361 312	30,0714
30	311 782	29,8758	320 385	30,0726
40	255 096	29,8803	265 444	30,0713
50	222 377	29,8780	218 349	30,0731
60	167 075	29,8788	178 098	30,0739
70	119 996	29,8820	132 103	30,0741
80	85 735	29,8821	89 558	30,0723
90	451 875	29,8871	40 551	30,0760



Obr. 56 Grafická závislosť priemeru guľovej plochy D30 od redukcie siete

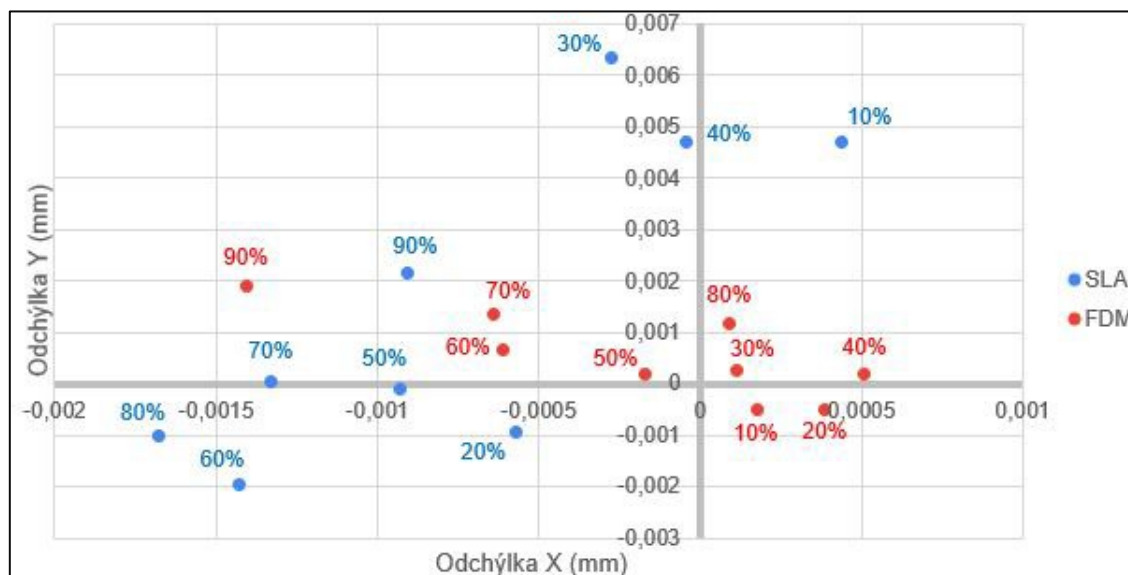
Tab.14 Vplyv redukcie na pozíciu guľovej plochy D30 SLA modelu

Redukcia [%]	Pozícia Y [mm] SLA	Pozícia Z [mm] SLA	Odchýlka Y [mm] SLA	Odchýlka Z [mm] SLA
-	25,29470	12,12094	0	0
10	25,29034	12,12716	-0,00436	0,00623
20	25,29101	12,12666	-0,00369	0,00572
30	25,29408	12,12300	-0,00062	0,00206
40	25,29388	12,12490	-0,00082	0,00396
50	25,29857	12,11864	0,00387	-0,00229
60	25,30680	12,10780	0,01210	-0,01314
70	25,29710	12,12096	0,00240	0,00003
80	25,30396	12,11207	0,00926	-0,00886
90	25,34161	12,06014	0,04691	-0,06080

Tab.15 Vplyv redukcie na pozíciu guľovej plochy D30 FDM modelu

Redukcia [%]	Pozícia Y [mm] FDM	Pozícia Z [mm] FDM	Odchýlka Y [mm] FDM	Odchýlka Z [mm] FDM
-	25,10845	12,53390	0,00000	0,00000
10	25,10858	12,53709	0,00013	0,00318
20	25,10817	12,53333	-0,00028	-0,00057
30	25,10826	12,53388	-0,00020	-0,00002
40	25,10825	12,53355	-0,00021	-0,00035
50	25,10820	12,53257	-0,00025	-0,00133
60	25,10831	12,53229	-0,00014	-0,00162
70	25,10864	12,53227	0,00019	-0,00163
80	25,10890	12,53191	0,00045	-0,00199
90	25,10847	12,53192	0,00001	-0,00198

V Tab.14 a Tab. 15 sú zapísané hodnoty pozície stredu guľovej plochy v súradniciach X a Y . Vypočítané odchýlky pozícií pri jednotlivých redukciách vychádzajú z neredukovaného modelu. Grafická závislosť pozície od redukcie sa nachádza na Obr. 57. Je možné z nej zistiť, že najviac ovplyvnila pozíciu gule 30% redukcia pri SLA vzorke, konkrétne v smere Y o 0,006 mm.

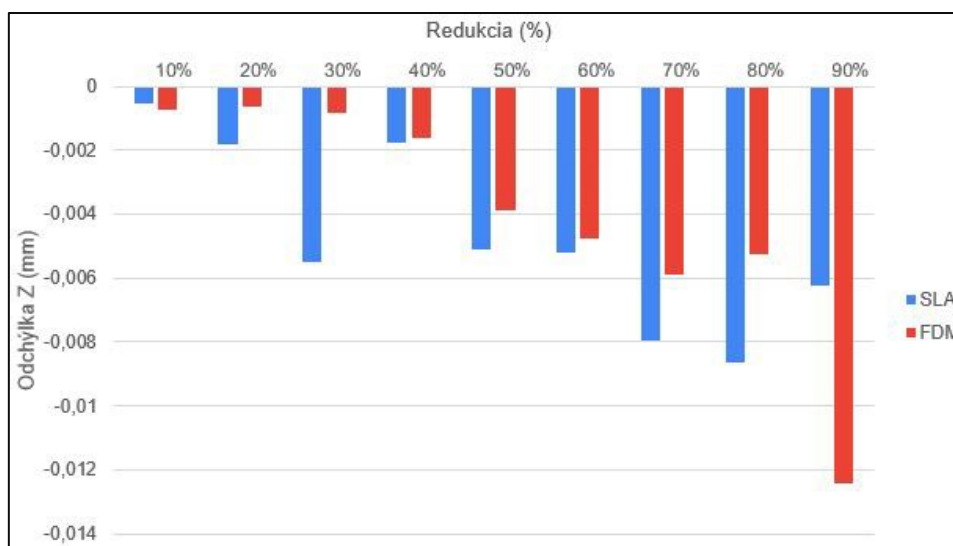


Obr. 57 Grafická závislosť pozície Gule D30 od redukcie

V tejto časti experimentu bol dodatočne skúmaný vplyv redukcie na umiestnenie stredu guľovej plochy v hladine Z . Podobne ako pri skúmaní pozícií v súradniciach X a Y , boli vypočítané odchýlky od neredukovanej časti o čom svedčí Tab. 16 a z nej vychádzajúci zostrojený graf na Obr.58.

Tab. 16 Vplyv redukcie na pozíciu guľovej plochy Gule D30 v hladine Z

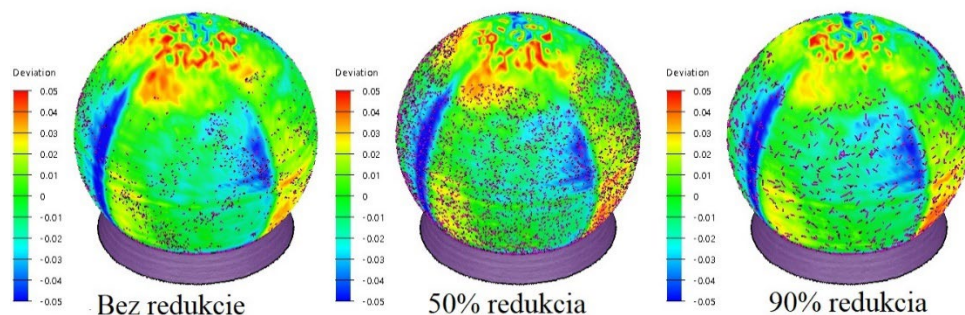
Redukcia [%]	Pozícia Z [mm] SLA	Odchýlka Z [mm] SLA	Pozícia Z [mm] FDM	Odchýlka Z [mm] FDM
-	24,27567	0	24,95865	0
10	24,27515	-0,000521	24,95791	-0,00074
20	24,27384	-0,001832	24,95801	-0,00065
30	24,27018	-0,005487	24,95782	-0,00084
40	24,27392	-0,001746	24,95703	-0,00163
50	24,27055	-0,005117	24,95477	-0,00388
60	24,27047	-0,005197	24,95389	-0,00476
70	24,26769	-0,007974	24,95278	-0,00587
80	24,26701	-0,008654	24,95341	-0,00524
90	24,26944	-0,006232	24,94622	-0,01243



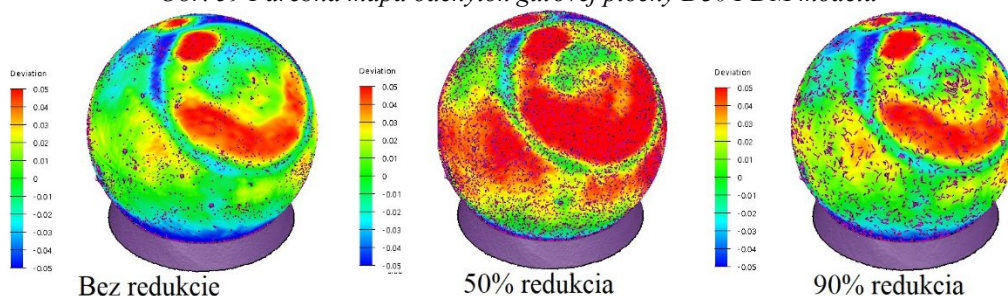
Obr. 58 Grafická závislosť pozície guľovej plochy D30 v hladine Z od redukcie

Na grafe na Obr. 58 je pozorovateľný najväčší zásah 90% redukcie na umiestnenie stredu gule FDM modelu v smere osi Z o 0,012 záporne vzhľadom na neredukovaný model.

Z farebných máp na Obr.59 a Obr.60 je pozorovateľná najväčšia odchýlka pri 50% redukcii siete SLA modelu.



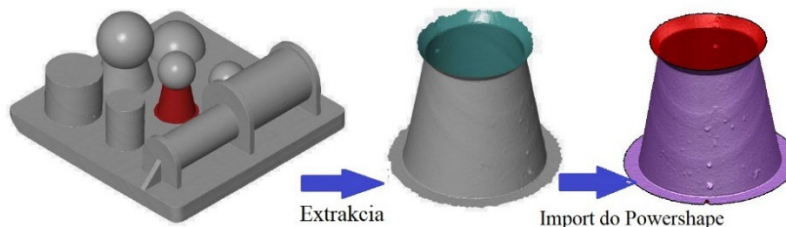
Obr. 59 Farebná mapa odchýlok guľovej plochy D30 FDM modelu



Obr. 60 Farebná mapa odchýlok guľovej plochy D30 SLA modelu

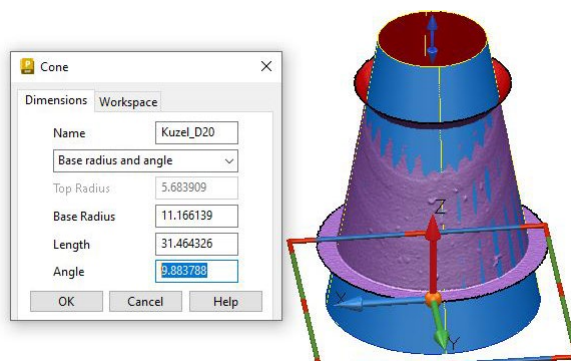
4.2.3 Vplyv redukcie siete na Kužel D20

Extrakcia kužeľa sa takisto uskutočnila v GOM Inspect a po úspešnom importovaní do CAD programu (Obr. 61) sa vytvorila séria percentuálnych redukcií jeho siete.



Obr. 61 Proces extrakcie a importu Kužeľa D20 do CAD programu

Vytvorenie kužeľovej plochy sa uskutočnilo taktiež výberom funkcie Manuálny segment ako v predchádzajúcich prípadoch. Z plochy sa odčítali údaje o pozícií v X a Y smeroch a jej uhla (Obr. 62).

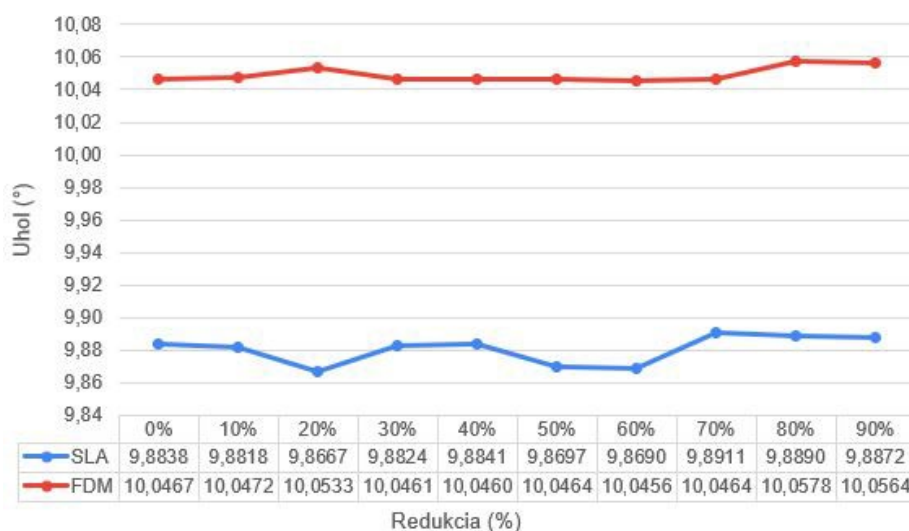


Obr. 62 Odčítanie uhla kužeľovej plochy

v Tab. 17 sú zaznamenané uhly kužeľových plôch vytvorených na redukovaných sieťach modelov a počet bodov ktorými sú tvorené. Grafická závislosť sa nachádza na Obr.63.

Tab. 17 Vplyv redukcie na počet bodov a uhol kužeľovej plochy Kužeľa D20

Redukcia [%]	Počet bodov SLA	Uhol SLA [°]	Počet bodov FDM	Uhol FDM [°]
-	185 862	9,88379	185 637	10,04675
10	167 656	9,88176	165 148	10,04722
20	146 738	9,86666	144 064	10,05333
30	127 375	9,88237	126 205	10,04614
40	106 472	9,88410	104 750	10,04598
50	82 891	9,86974	89 538	10,04643
60	67 929	9,86898	68 678	10,04562
70	50 738	9,89108	47 372	10,04645
80	32 338	9,88902	31 262	10,05778
90	14 192	9,88720	15 031	10,05637



Obr. 63 Grafická závislosť uhla kužeľovej plochy D20 od redukcie siete

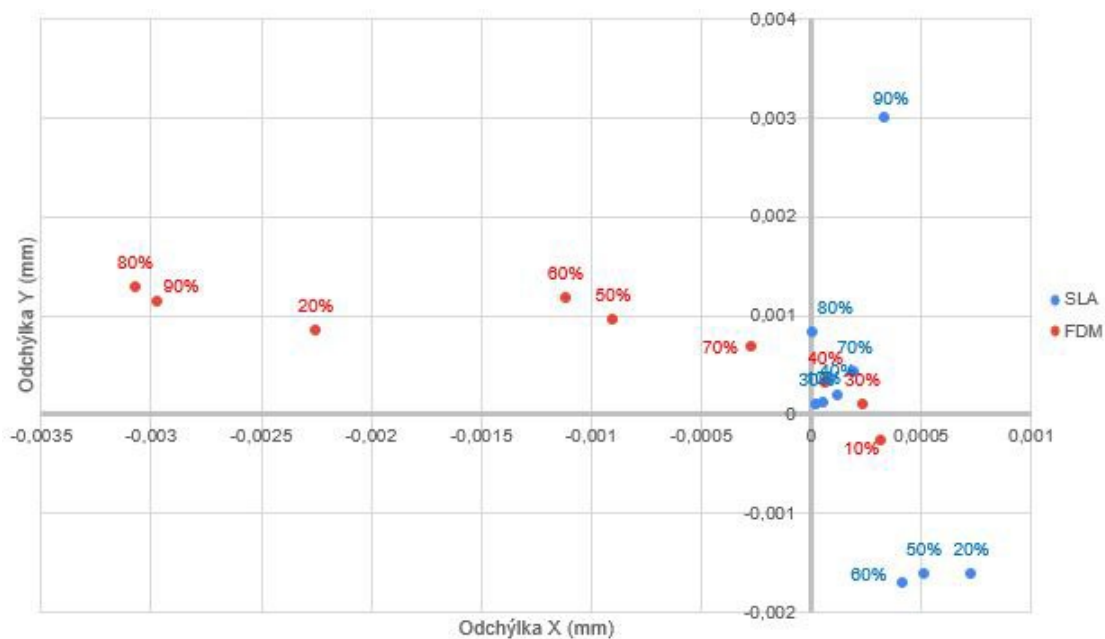
Tab.18 Vplyv redukcie na pozíciu kužeľovej plochy D20 SLA modelu

Redukcia [%]	Pozícia X [mm] SLA	Pozícia Y [mm] SLA	Odchýlka X [mm] SLA	Odchýlka Y [mm] SLA
-	62,34280	62,74836	0	0
10	62,34286	62,74849	0,00005	0,00012
20	62,34353	62,74675	0,00073	-0,00161
30	62,34283	62,74845	0,00003	0,00009
40	62,34292	62,74855	0,00012	0,00019
50	62,34332	62,74675	0,00051	-0,00161
60	62,34322	62,74665	0,00042	-0,00171
70	62,34300	62,74878	0,00020	0,00042
80	62,34281	62,74919	0,00001	0,00083
90	62,34314	62,75136	0,00034	0,00299

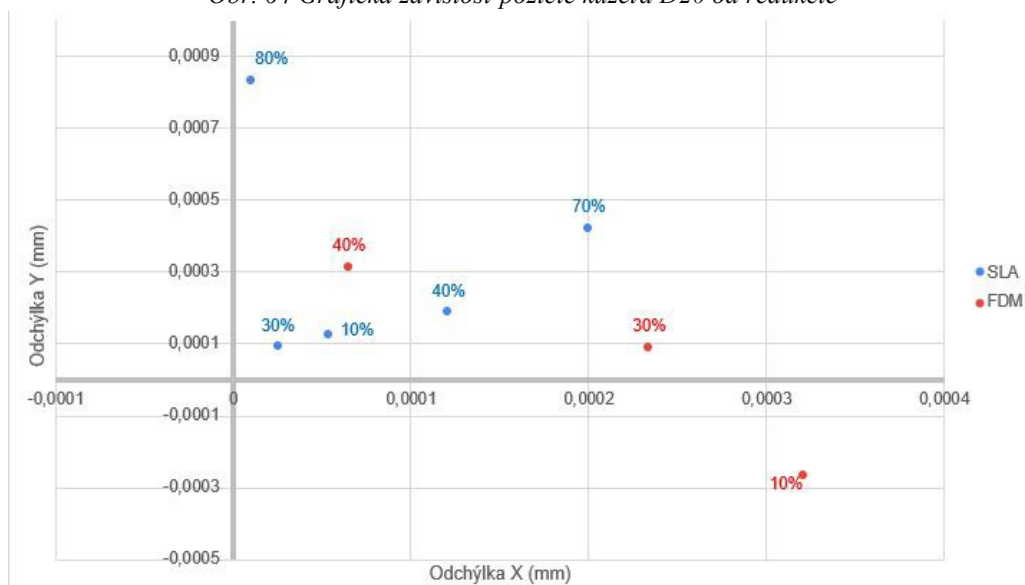
Tab.19 Vplyv redukcie na pozíciu kužeľovej plochy D20 FDM modelu

Redukcia [%]	Pozícia X [mm] FDM	Pozícia Y [mm] FDM	Odchýlka X [mm] FDM	Odchýlka Y [mm] FDM
-	62,64783	62,733367	0	0
10	62,648151	62,733101	0,00032	-0,00027
20	62,645579	62,734214	-0,00225	0,00085
30	62,648064	62,733458	0,00023	0,00009
40	62,647895	62,733682	0,00006	0,00032
50	62,646931	62,734324	-0,00090	0,00096
60	62,646715	62,734546	-0,00111	0,00118
70	62,647564	62,734053	-0,00027	0,00069
80	62,644758	62,734654	-0,00307	0,00129
90	62,644861	62,734497	-0,00297	0,00113

Na Obr. 63 je opätovne vidieť mierne kolísanie hodnôt uhla kužeľa SLA vzorky rádovo v stotínach. V tomto prípade 90% redukcia nemala zásadný vplyv na jeho zmenu.

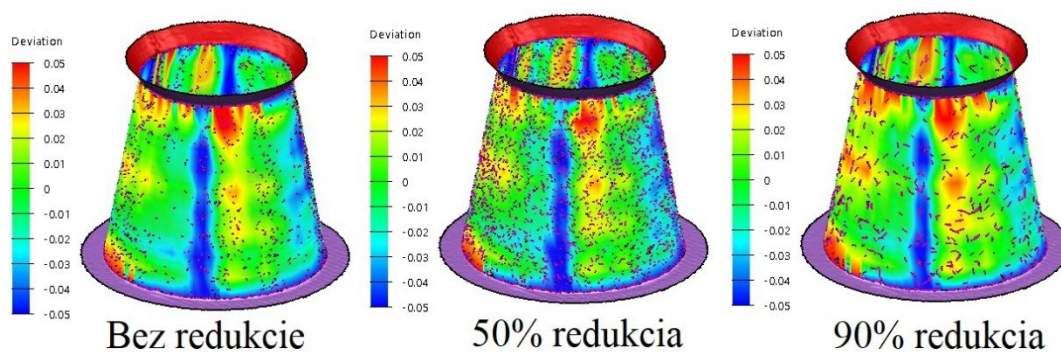


Obr. 64 Grafická závislosť pozície kužeľa D20 od redukcie

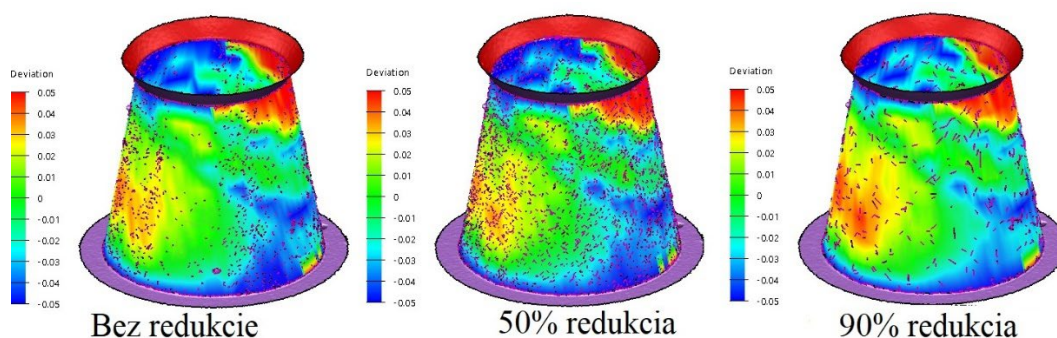


Obr. 65 Detail grafickej závislosti pozície kužeľa D20 od redukcie

Z grafov na Obr. 64 a Obr. 65 vyplýva, že redukcia siete mala väčší vplyv na zmenu pozície kužeľa FDM ako SLA, hodnoty odchýlok v tomto prípade predstavujú iba tisíciny milimetra.



Obr. 66 Farebná mapa odchýlok kužeľovej plochy D20 FDM modelu



Obr. 67 Farebná mapa odchýlok kužeľovej plochy D20 SLA modelu

Z farebných máp odchýlok na Obrázkoch 66 a 67 možno konštatovať že najväčší vplyv na presnosť prichytenia plochy mala 90% redukcia SLA modelu.

Výsledky zo skúmania ostatných elementov sa nachádzajú v Prílohe C, Prílohe D, Prílohe E, Prílohe F, Prílohe G a v Prílohe H.

ZÁVER

Pod reverzným inžinierstvom sa v strojárskom odvetí rozumie spätný proces získania objemových počítačových 3D modelov na základe existencie fyzických objektov. Jedným z predpokladov na vytvorenie objemových CAD modelov je existencia údajov o reálnej súčiastke v podobe jej geometrických vlastností. V dnešnej dobe vďaka moderným zariadeniam je možné tieto údaje získať relatívne rýchlo a presne aj pri tvarovo komplexných súčiastkach. Vývoj 3D optických a laserových skenerov, priemyselných počítačových tomografov zabezpečuje čoraz viac pohodlný a rýchly proces zberu 3D údajov, nazývaného aj ako proces 3D digitalizácie. Tieto získané údaje sú reprezentované mračnom bodov. Ďalším predpokladom je využitie počítačového reverzného modelovania. To zahŕňa úkony spojené so získavaním objemového modelu z mraku bodov alebo polygonálnych modelov tvorené polygonálnou sieťou. Existuje mnoho prístupov a techník ktorými sa dá reverzne dopracovať k objemovej forme modelu na základe rekonštrukcie polygonálneho modelu. Tieto techniky však rôzne vplývajú na presnosť vyhotoveného objemového modelu.

Ďalej bol skúmaný vplyv vybraných techník reverzného modelovania a spôsob polygonizácie na rozmery geometrických prvkov. Výsledky ukazujú, že rôzne spôsoby polygonizácie ovplyvňujú počet bodov polygonálnej siete a objem dát. Taktiež bolo zistené, že redukcia bodov ktorými je polygonálna sieť tvorená vedie k odchýlkam v rozmeroch geometrických prvkov.

Práca sa takisto zamerala na skúmanie vplyvu procesu výroby na rozmery 3D modelov. Boli použité dve rôzne aditívne technológie na výrobu fyzických vzoriek - SLA a FDM. Vzorky boli skenované na priemyselnom počítačovom tomografe Metrotom 1500. Tým sa získalo mračno bodov, ktoré bolo následne polygonizované. Výsledky z reverzného modelovania ukázali, že rozmery geometrických prvkov sú ovplyvnené princípom výroby jednotlivých aditívnych metód. Preto je vhodné pri reverznom modelovaní si uvedomiť, akou technológiou bola naskenovaná súčiastka vyrobená a tým počítať s rozmerovými odchýlkami ktoré sú pre každé technológie inak špecifické.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

ANWER, N. *From reverse engineering to shape engineering in mechanical design*. ©2016 str. 165-168, ISSN 0007-8506. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.052>

ABOALI, M: Review on Three Dimensional (3-D) Acquisition and Range Imaging Techniques, *International Journal of Applied Engineering Research* ©2017 [cit.2023-01-31]. Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/318046846>

AdvanvedTek: SCA-1200HT, ©2017 [cit. 2023-04-11]. Dostupné na internete: <https://www.advancedtek.com/wp-content/uploads/2017/10/Spec-Sheet-SCA-1200-EN.pdf>

BARUČIJA, A: *An Example of CMM and CAD Application in Reverse Engineering*, ©2020 [cit. 2023-01-27.] Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/343449098>

BOURELL, D. ©2017. Materials for additive manufacturing, str. 659-681, ISSN 0007-8506, Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>

BURANSKÝ, Ivan: Reverzné geometrické modelovanie. [Habilitačná práca] – Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. Trnava: MTF STU, 2020. 125 s.

Cadcam: Point Cloud Conversion to 3D Model, ©2020 [cit. 2023-02-08]. Dostupné na internete: <https://www.cadcam.org/3d-scanning/converting-point-clouds-into-cad/>

Creaform: Reverse engineering of physical objects – teaching manual, ©2014 [cit. 2023-01-26]. Dostupné na internete: https://www.creaform3d.com/sites/default/files/assets/technological-fundamentals/teaching_manual_reverse_engineering_en_18032014_0.pdf

DuderstadtCenter: Form 3 SLA 3D Printer, ©2022 [cit. 2023-04-11]. Dostupné na internete: <https://www.dc.umich.edu/partners-2/ground-connections-dmc/fabrication-studio/form-3/>

EYERCIOGLU, O: Reverse Engineering, Chapter 2 – Geometrical Form, ©2022 [cit. 2023-01-25]. Dostupné na internete: <https://akbis.gantep.edu.tr/yonetim/upload/files/7647-3776.pdf>

Faro: Understanding Portable Measurement Arms, ©2021 [cit. 2023-01-29]. Dostupné na internete: <https://www.faro.com/en/Resource-Library/Article/understanding-portable-measurement-arms>

FEARS, Nathan. ©2019. *3D Scanners Basics: Reverse engineering and inspection* [cit. 2023-01-25]. Dostupné na internete: <https://www.cati.com/blog/3d-scanner-basics-reverse-engineering-and-inspection/>

Formlabs: Stereolithography 3D Printers Tech Specs, ©2023 [cit. 2023-04-12]. Dostupné na internete: <https://formlabs.com/3d-printers/form-3/tech-specs/>

GOM: Mesh editing in GOM software, ©2016 [2023-04-15]. Dostupné na internet: <https://www.gom.com/en/products/zeiss-quality-suite/mesh-editing>

HEINRICH, A: *3D Printing of Optical Components*, ©2021, str. 14-16, ISBN 978-3-030-58960-8. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58960-8>

Hubs: What is FDM (fused deposition modelling) 3D printing, ©2022 [cit. 2023-04-05]. Dostupné na internete: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>

JAMES, D: An Innovative Photogrammetry Colour Segmentation Based Technique as an Alternative Approach to 3D Scanning for Reverse Engineering Design, ©2016 [cit. 2022-12-07]. Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/298307827>

KATSUHIRO, Saiga. 2021. A Sustainable Reverse Engineering Process. In: *Procedia CIRP*. s.517-522. ISSN 2212-8271 Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121001748>

KOVÁČIK, Norbert: Tvorba produktov s využitím nástrojov reverzného inžinierstva. [Dizertačná práca] – Slovenská technická univerzita v Bratislave. Strojárska fakulta; ÚSETM (SjF): 2013. 135 s.

KUMAR, A: Reverse Engineering in Product Manufacturing: An Overview, ©2013 [cit. 2022-11-16]. Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/327097892>

KUMAR, M. ©2021. *Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges*, vol.159, ISSN 0263-8231. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107228>

KWAN, H: Use of Reverse Engineering Method for Rapid Product Development, ©1998 [cit. 2022-11-16]. Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/223796513>

LÓPEZ, J: An approach to Reverse Engineering Methodology for Part Reconstruction with Additive Manufacturing, ©2021 [cit. 2023-01-22]. Dostupné na internete: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1193/1/012047/pdf>

Makerbot: Choosing the right 3D printer: FDM vs SLA, ©2020, [cit.2023-04-08]. Dostupné na internete: <https://www.makerbot.com/stories/engineering/choosing-the-right-3d-printer-fdm-vs-sla/>

Manufactur3d: How Stereolithography or SLA 3D printing works, ©2018 [cit. 2023-04-06]. Dostupné na internete: <https://manufactur3dmag.com/stereolithography-sla-3d-printing-works/>

MASOOD, S. H. ©2014. *Advances in Fused Deposition Modeling*, str. 69-91, ISBN 978-0-08-0965338. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01002-5>

Materialise: ABS-M30 for Fused Deposition Modelling, ©2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné na internete: <https://www.materialise.com/en/industrial/3d-printing-materials/abs-m30>

MAZZANTI, V.; FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties. *Polymers* 2019, 11, 1094. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/polym11071094>

- MENDŘICKÝ, R: 3D skenery pro použití v průmyslu, *AUTOMA*, ©2015 [cit. 2023-01-30]. Dostupné na internete: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/54325.pdf
- MENDRICKY, R: Aspects Affecting Accuracy of Optical 3D Digitization, *MM Science Journal*, ©2018 [cit. 2023-01-30]. Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/323614997>
- MESSLER, R. Jr, R.2013. Reverse Engineering: Mechanisms, Structures, Systems and Materials. McGraw Hill. ISBN 978-0071825160
- PENG, Q: 3D Digitizing technology in product reverse design, ©2011 [cit. 2023-01-26] Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/277163458>
- PETERKA, J., JANÁČ, I., R.2002. CAD/CAM Systémy. Bratislava:STU. ISBN 80-227-1685-5
- QUAN, Z., WU, A. ©2015. *Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: opportunities and challenges*. str. 503-512. ISSN 1369-7021. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.05.001>
- Renishaw: Snímací systémy pro CNC obráběcí stroje, ©2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné na internete: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/Technicke-parametry-Snimaci-systemy-pro-CNC-obrabeci-stroje--98018?lang=cs>
- SALONITIS, S. ©2014. *Stereolitography*, str. 19-67, ISBN 978-0-08-0965338. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.01001-3>
- Stratasys: F123 Series – FDM 3D Printer, ©2021 [cit. 2023-04-10.] Dostupné na internete: <https://www.stratasys.com/en/3d-printers/prINTER-catalog/fdm-printers/f123-series-printers/>
- ŠIMONÍK, M: Digitalizace – její princip a rozdělení, *MMspektrum*, ©2004 [cit. 2023-01-30]. Dostupné na internete: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni>
- TOFAIL, S., KOUMOLOUS, E. ©2018. *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities*. str. 22-37. ISSN 1369-7021. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- TÓTH, T: Design of Artefact for the Verification of the Carl Zeiss Metrotom Computed Tomograph, *XXI IMEKO World Congress „Measurement in Research and Industry*, ©2015 [cit. 2023-04-13]. Dostupné na internete: <https://www.imeko.org/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC10-244.pdf>
- TREBUŇA, P: Bezkontaktné meracie metódy v reverznom inžinierstve, ©2021 [cit. 2023-01-30]. Dostupné na internete: <https://www.engineering.sk/strojarstvo-extra/24450-bezkontaktné-meracie-metódy-v-reverznom-inžinierstve>
- Trimos: 3D Metrology Portable Measuring Arms What is a Measuring Arm, ©2021 [cit. 2022-01-30]. Dostupné na internete: <https://www.trimos.com/3d-metrology/portable-measuring-arms/what-is-a-measuring-arm>
- VASKÝ, J., NEMLAHA, E., R.2003. CAD/CAM Systémy. Bratislava: STU. ISBN 80-227-1882-3

WELKENHUYZEN, F: Industrial Computer Tomography for Dimensional Metrology: Overview of Influence Factors and Improvement Strategies, ©2009 [cit. 2023-02-04]. Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/230634153>

Wevolver: Selecting a Material for Stereolithography (SLA) 3D Printing, ©2022 [cit. 2023-04-07]. Dostupné na internete: <https://www.wevolver.com/article/selecting-a-material-for-stereolithography-sla-3d-printing>

Wevolver: Stratasys F370, Production specifications, ©2022 [cit. 2023-04-10.]. Dostupné na internete: <https://www.wevolver.com/specs/stratasys-f370>

Wevolver: What is Reverse Engineering, ©2021 [cit. 2022-11-19]. Dostupné na internete: <https://www.wevolver.com/article/what-is-reverse-engineering->

Zeiss: Metrotom. Visible Metrology, ©2009 [cit. 2023-04-12]. Dostupné na internete: http://web.tuke.sk/smetrologia/prospekty/met_new_en.pdf

Zeiss: MetrotomOS. User software for CT scanners – Operating Instructions, ©2020 [cit. 2023-04-13]. Dostupné na internete: https://metrology.me.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/674/2016/09/manual_metrotom_os_en.pdf

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

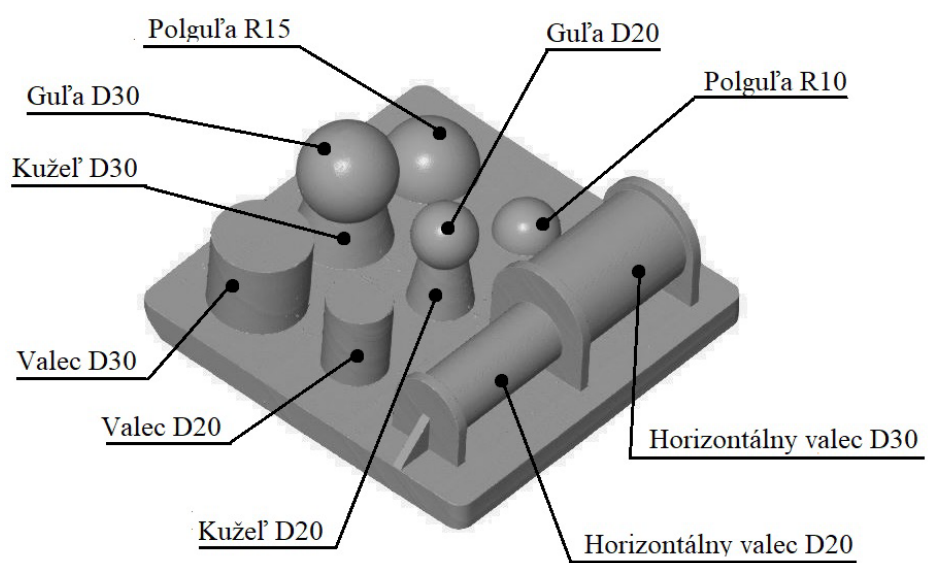
Týmto čestne vyhlasujem, že diplomovú prácu s názvom: „Vplyv reverzného geometrického modelovania na kvalitu 3D modelu“, som vypracoval samostatne na základe štúdia odbornej literatúry uvedenej v zozname bibliografických odkazov a konzultáciách s vedúcim práce doc. Ing. Ivanom Buranským, PhD.

V Trnave, dňa 7. mája 2023

.....
Bc. Marek Špányi

PRÍLOHY

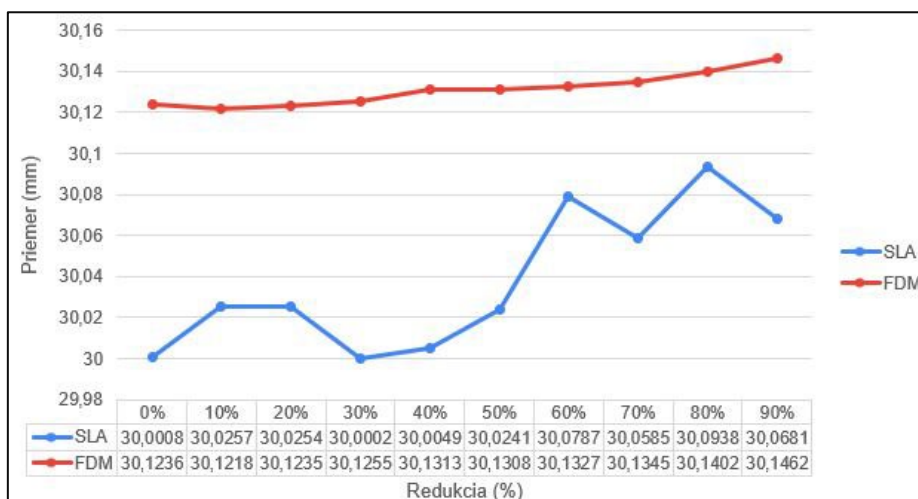
Príloha A: Mapa geometrických elementov



Príloha B: Vplyv redukcie na počet bodov, priemer a pozíciu Horizontálneho valca D30

Tab. 1 Vplyv redukcie na počet bodov a priemer valcovej plochy D30

Redukcia [%]	Počet bodov SLA	Priemer SLA [mm]	Počet bodov FDM	Priemer FDM [mm]
-	814 307	30,00081	823 583	30,12359
10	710 951	30,02573	735 939	30,12183
20	613 895	30,02538	653 084	30,12350
30	525 995	30,00018	556 476	30,12552
40	464 856	30,00489	360 718	30,13132
50	364 991	30,02409	345 256	30,13078
60	301 786	30,07870	308 891	30,13270
70	155 552	30,05847	248 874	30,13450
80	137 898	30,09376	230 467	30,14015
90	57 341	30,06810	155 097	30,14618



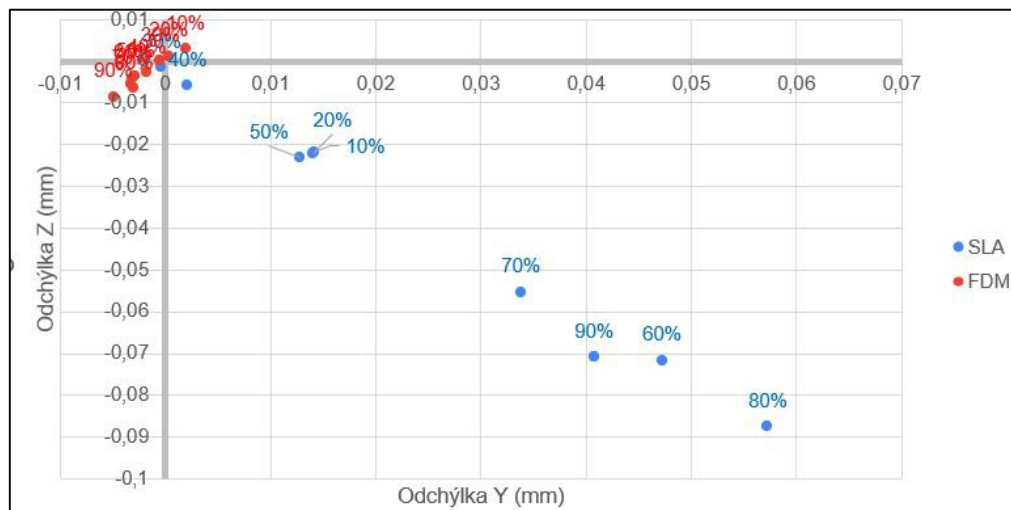
Obr. 1 Grafická závislosť priemeru valcovej plochy D30 od redukcie siete

Tab. 2 Vplyv redukcie na pozíciu valcovej plochy D30 pri SLA modeli

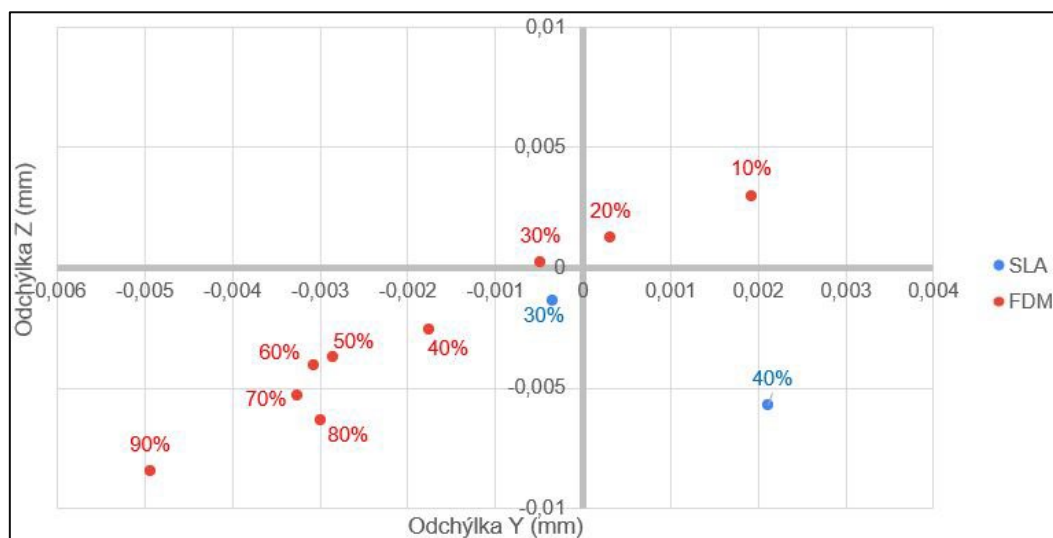
Redukcia [%]	Pozícia Y [mm] SLA	Pozícia Z [mm] SLA	Odchýlka Y [mm] SLA	Odchýlka Z [mm] SLA
-	25,44302	17,10490	0	0
10	25,45721	17,08321	0,01419	-0,02168
20	25,45706	17,08274	0,01404	-0,02215
30	25,44268	17,10352	-0,00034	-0,00138
40	25,44513	17,09919	0,00211	-0,00571
50	25,45576	17,08176	0,01274	-0,02314
60	25,49025	17,03334	0,04723	-0,07156
70	25,47683	17,04964	0,03381	-0,05526
80	25,50032	17,01741	0,05729	-0,08748
90	25,48379	17,03398	0,04077	-0,07092

Tab. 3 Vplyv redukcie na pozíciu valcovej plochy D30 pri FDM modeli

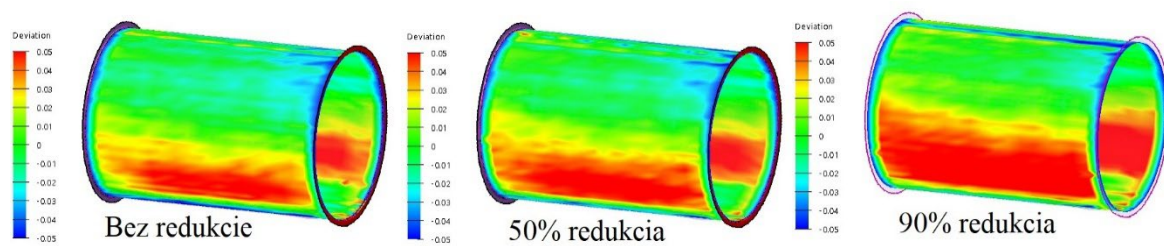
Redukcia [%]	Pozícia Y [mm] FDM	Pozícia Z [mm] FDM	Odchýlka Y [mm] FDM	Odchýlka Z [mm] FDM
-	25,10806	17,54551	0,00000	0,00000
10	25,10998	17,54850	0,00192	0,00299
20	25,10838	17,54678	0,00031	0,00127
30	25,10758	17,54572	-0,00049	0,00021
40	25,10631	17,54295	-0,00175	-0,00256
50	25,10521	17,54180	-0,00285	-0,00371
60	25,10499	17,54144	-0,00307	-0,00407
70	25,10481	17,54018	-0,00325	-0,00533
80	25,10507	17,53916	-0,00299	-0,00635
90	25,10312	17,53706	-0,00494	-0,00845



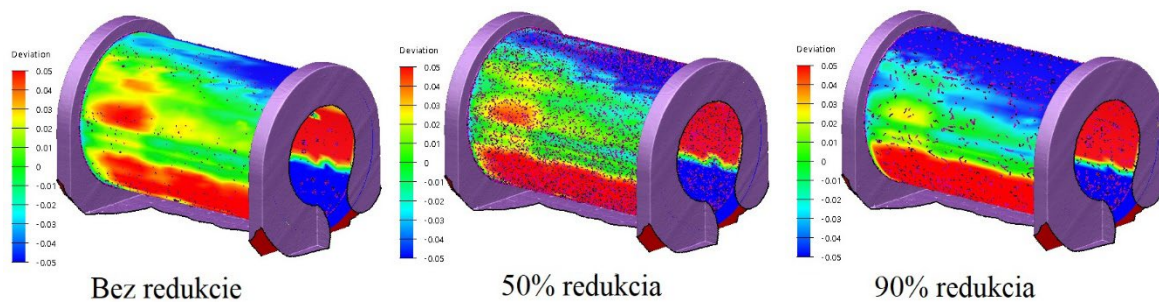
Obr. 2 Grafická závislosť pozície valca D30 od redukcie



Obr. 3 Detail grafickej závislosti pozície Horizontálneho valca D30 od redukcie



Obr. 4 Farebná mapa odchýlok Horizontálneho valca D30 pri FDM modeli

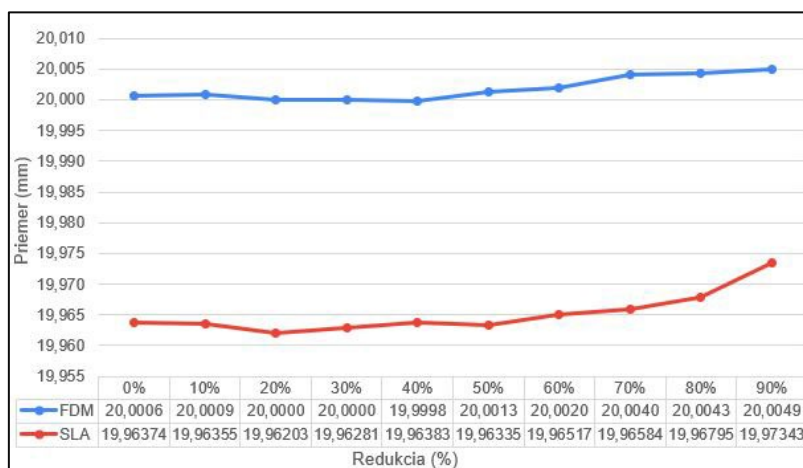


Obr. 5 Farebná mapa odchýlok Horizontálneho valca D30 pri SLA modeli

Príloha C: Vplyv redukcie siete na počet bodov, priemer a pozíciu Gule D20

Tab. 1 Vplyv redukcie na počet bodov a priemer prichytenej guľovej D20 plochy

Redukcia [%]	Počet bodov SLA	Priemer SLA [mm]	Počet bodov FDM	Priemer FDM [mm]
-	209 035	19,96374	210 033	20,00060
10	187 991	19,96355	186 733	20,00094
20	163 338	19,96204	165 602	20,00002
30	142 592	19,96281	141 894	20,00001
40	118 674	19,96384	125 726	19,99983
50	96 596	19,96335	100 102	20,00134
60	78 113	19,96517	80 012	20,00201
70	56 895	19,96585	61 290	20,00401
80	38 157	19,96796	41 532	20,00431
90	19 225	19,97344	20 323	20,00494



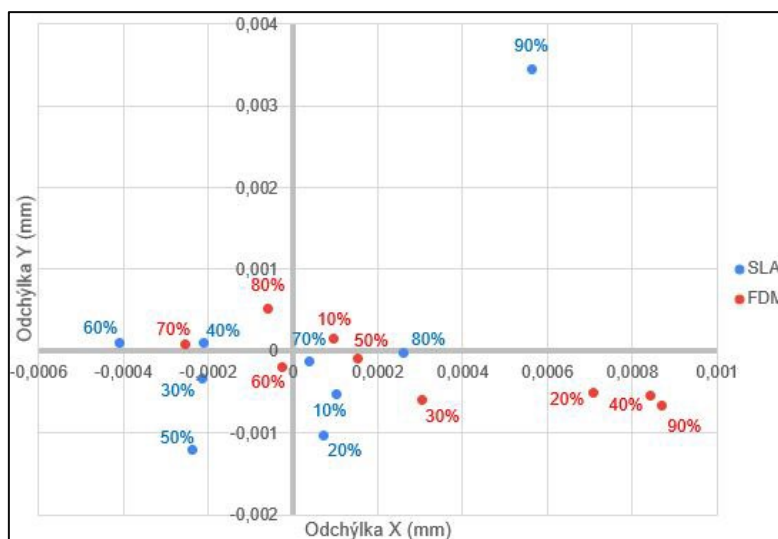
Obr. 1 Grafická závislosť priemeru guľovej plochy D20 od redukcie siete

Tab. 2 Vplyv redukcie na pozíciu guľovej plochy D20 pri SLA modeli

Redukcia [%]	Pozícia X [mm] SLA	Pozícia Y [mm] SLA	Odchýlka X [mm] SLA	Odchýlka Y [mm] SLA
-	62,38701	62,815786	0	0
10	62,387114	62,81527	0,00010	-0,00052
20	62,387083	62,814755	0,00007	-0,00103
30	62,386797	62,815445	-0,00021	-0,00034
40	62,3868	62,815891	-0,00021	0,00010
50	62,386773	62,814585	-0,00024	-0,00120
60	62,386601	62,815891	-0,00041	0,00010
70	62,387048	62,81566	0,00004	-0,00013
80	62,387271	62,815775	0,00026	-0,00001
90	62,387572	62,819232	0,00056	0,00345

Tab. 3 Vplyv redukcie na pozíciu guľovej plochy D20 pri FDM modeli

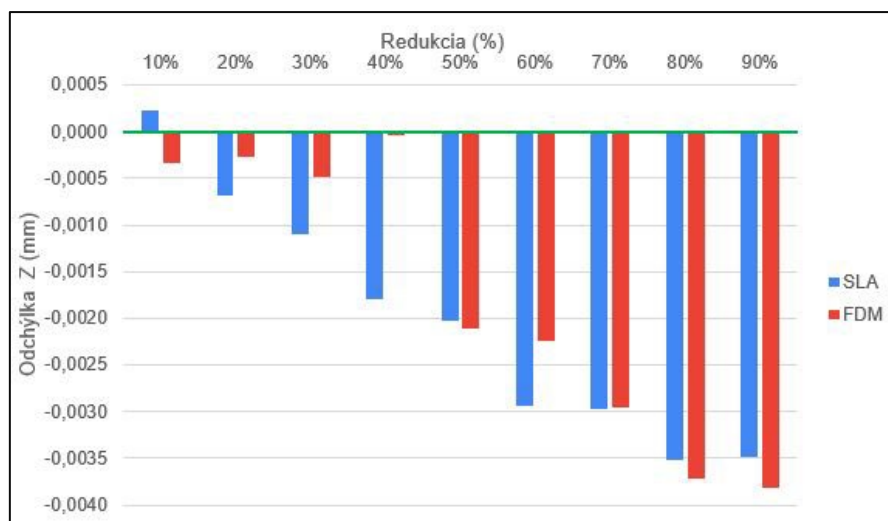
Redukcia [%]	Pozícia X [mm] FDM	Pozícia Y [mm] FDM	Odchýlka X [mm] FDM	Odchýlka Y [mm] FDM
-	62,640772	62,751029	0	0
10	62,640869	62,75118	0,00010	0,00015
20	62,641481	62,750516	0,00071	-0,00051
30	62,641075	62,750433	0,00030	-0,00060
40	62,641615	62,750482	0,00084	-0,00055
50	62,640925	62,750948	0,00015	-0,00008
60	62,640745	62,750838	-0,00003	-0,00019
70	62,640517	62,75111	-0,00025	0,00008
80	62,640713	62,751553	-0,00006	0,00052
90	62,641641	62,750372	0,00087	-0,00066



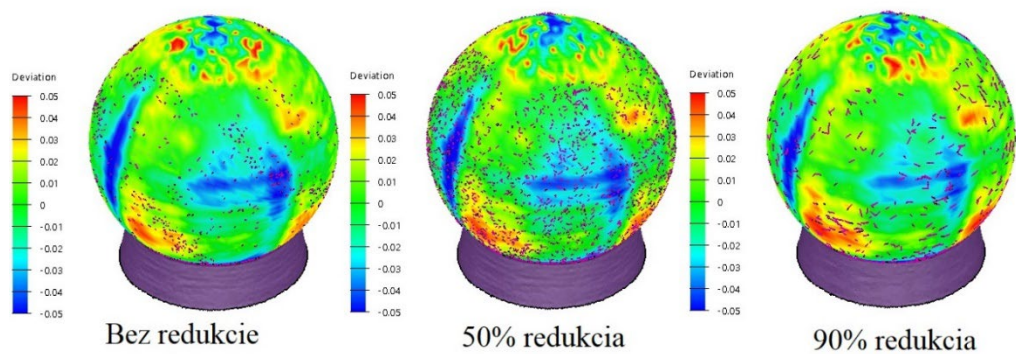
Obr. 2 Grafická závislosť pozície Gule D20 od redukcie

Tab. 2 Vplyv redukcie na pozíciu guľovej plochy D20 pri SLA modeli

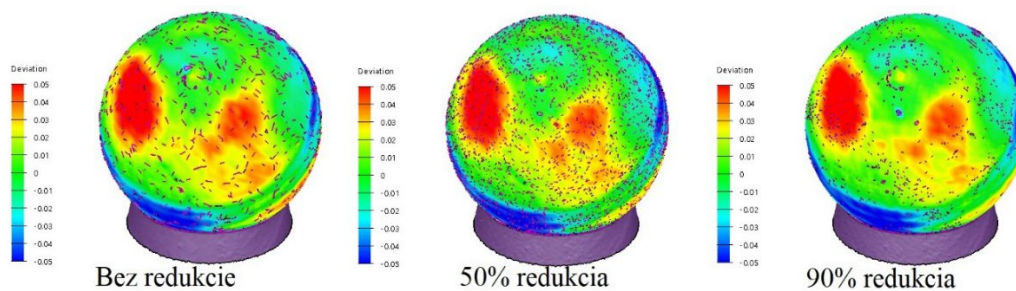
Redukcia [%]	Pozícia Z [mm] SLA	Odchýlka Z [mm] SLA	Pozícia Z [mm] FDM	Odchýlka Z [mm] FDM
-	24,15122	0	24,98610	0
10	24,151454	0,00023	24,98576	-0,00034
20	24,150542	-0,00068	24,98582	-0,00027
30	24,150121	-0,00110	24,98561	-0,00049
40	24,14943	-0,00179	24,98606	-0,00004
50	24,149188	-0,00203	24,98398	-0,00211
60	24,148281	-0,00294	24,98385	-0,00225
70	24,14825	-0,00297	24,98315	-0,00295
80	24,147698	-0,00352	24,98238	-0,00372
90	24,147729	-0,00349	24,98228	-0,00381



Obr. 3 Grafická závislosť pozície guľovej plochy D20 v hladine Z od redukcie



Obr. 4 Farebná mapa odchýlok gule D20 pri FDM modeli

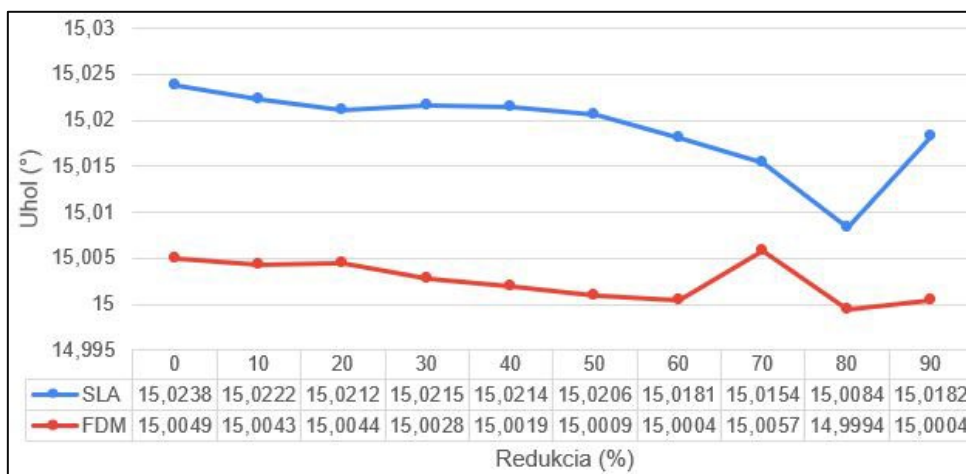


Obr. 5 Farebná mapa odchýlok gule D20 pri SLA modeli

Príloha D: Vplyv redukcie siete na počet bodov, uhol a pozíciu Kužel'a D30

Tab. 1 Vplyv redukcie na počet bodov a uhol kuželovej D30 plochy

Redukcia [%]	Počet bodov SLA	Uhol SLA [°]	Počet bodov FDM	Uhol FDM [°]
-	243 161	15,02376	243 505	15,00492
10	217 391	15,02223	216 903	15,00425
20	191 052	15,02116	192 135	15,00444
30	158 988	15,02154	163 059	15,00281
40	138 454	15,02137	141 415	15,00189
50	107 313	15,02065	110 169	15,00089
60	86 687	15,01814	86 557	15,00038
70	63 586	15,01544	62 534	15,00574
80	40 510	15,00836	40 092	14,99937
90	15 929	15,01819	20 256	15,00043



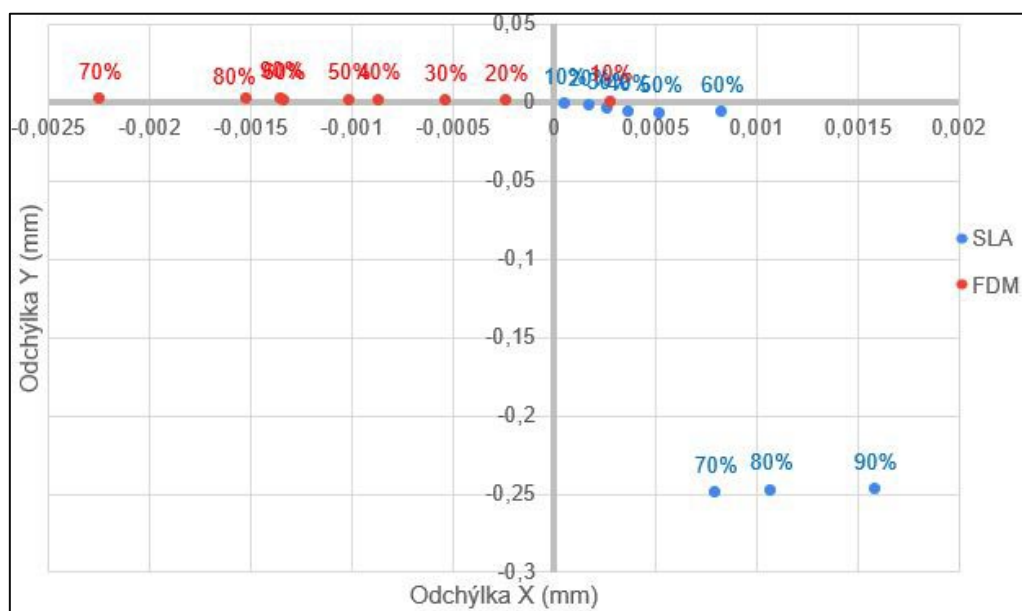
Obr. 1 Grafická závislosť uhla kuželovej plochy D30 od redukcie siete

Tab. 2 Vplyv redukcie na pozíciu kuželovej plochy D30 pri SLA modeli

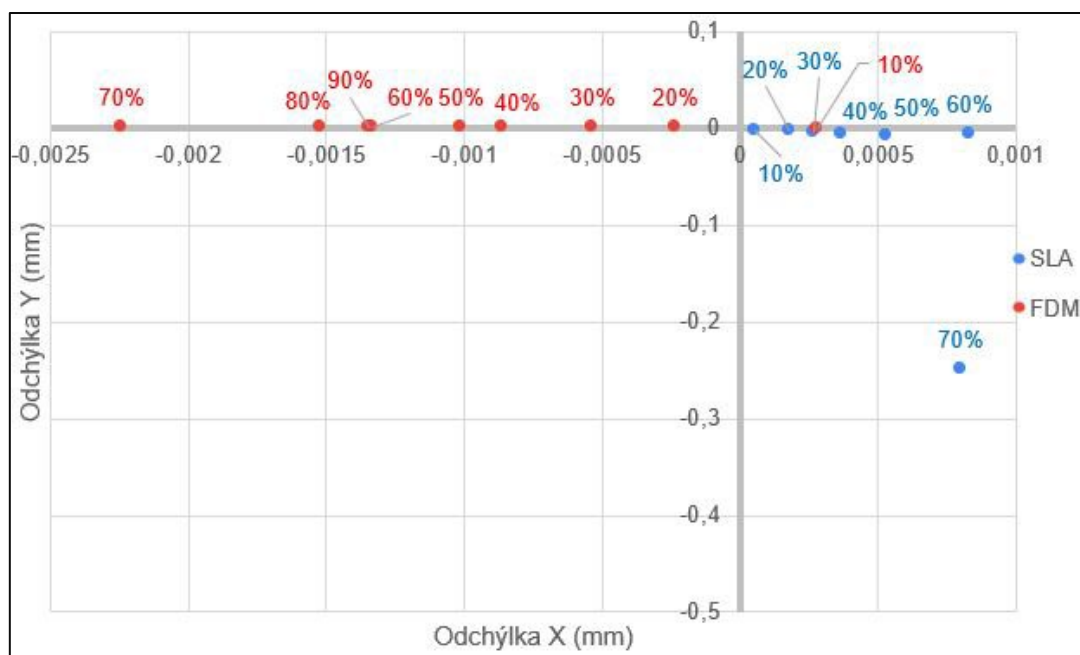
Redukcia [%]	Pozícia X [mm] SLA	Pozícia Y [mm] SLA	Odchýlka X [mm] SLA	Odchýlka Y [mm] SLA
-	62,28367	100,47085	0	0
10	62,28373	100,46933	0,00006	-0,00152
20	62,28385	100,46815	0,00018	-0,00270
30	62,28394	100,46621	0,00027	-0,00464
40	62,28404	100,46482	0,00037	-0,00603
50	62,28420	100,46378	0,00053	-0,00707
60	62,28451	100,46432	0,00083	-0,00653
70	62,28447	100,22118	0,00080	-0,24967
80	62,28475	100,22246	0,00108	-0,24839
90	62,28526	100,22292	0,00159	-0,24793

Tab. 3 Vplyv redukcie na pozíciu kužeľovej plochy D30 pri FDM modeli

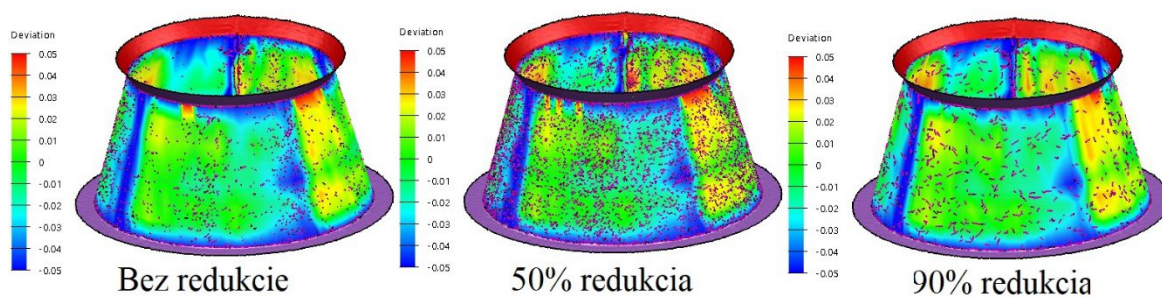
Redukcia [%]	Pozícia X [mm] FDM	Pozícia Y [mm] FDM	Odchýlka X [mm] FDM	Odchýlka Y [mm] FDM
-	62,653761	100,38992	0	0
10	62,654043	100,38977	0,00028	-0,00015
20	62,653527	100,3904	-0,00023	0,00048
30	62,653227	100,39066	-0,00053	0,00074
40	62,652897	100,39092	-0,00086	0,00100
50	62,65275	100,39105	-0,00101	0,00113
60	62,652427	100,39116	-0,00133	0,00124
70	62,651519	100,39127	-0,00224	0,00135
80	62,652242	100,39165	-0,00152	0,00173
90	62,652414	100,3918	-0,00135	0,00188



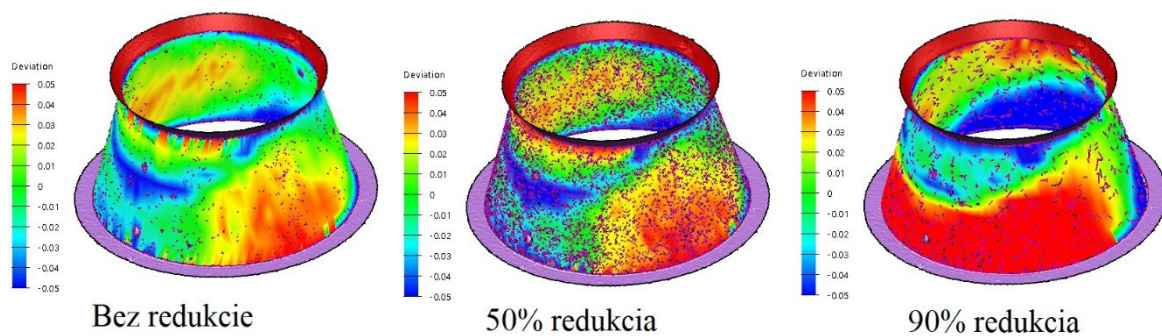
Obr. 2 Grafická závislosť pozície kužeľovej plochy D30 od redukcie



Obr. 3 Detail grafickej závislosti pozície kužeľovej plochy D30 od redukcie



Obr. 4 Farebná mapa odchýlok kužeľa D30 pri FDM modeli

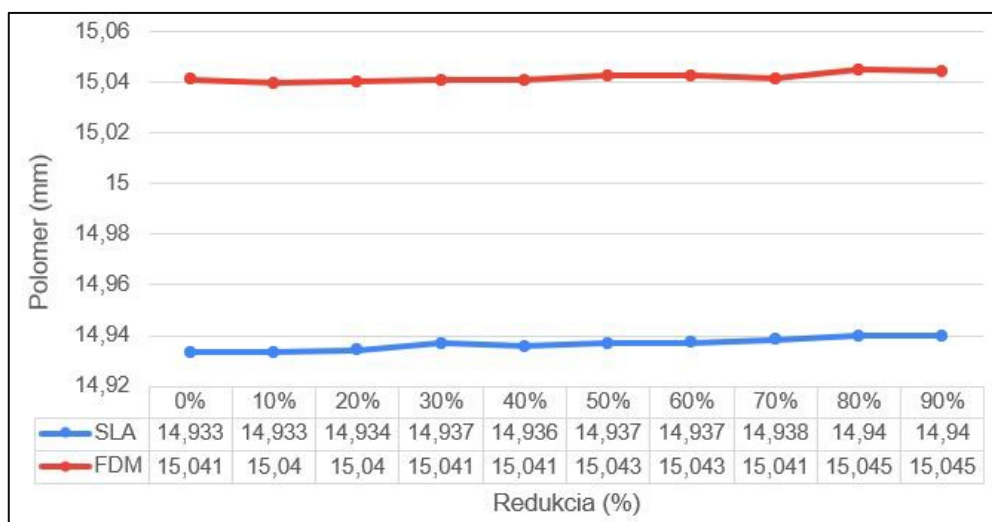


Obr. 5 Farebná mapa odchýlok kužeľa D30 pri SLA modeli

Príloha E: Vplyv redukcie siete na počet bodov, polomer a pozíciu Polgule R15

Tab. 1 Vplyv redukcie na počet bodov a polomer polgule R15

Redukcia [%]	Počet bodov SLA	Polomer SLA [mm]	Počet bodov FDM	Polomer FDM [mm]
-	271 933	14,93346	280 068	15,04126
10	244 061	14,93346	252 429	15,03989
20	214 867	14,93419	221 851	15,04024
30	179 339	14,93699	196 305	15,04105
40	158 603	14,93568	160 140	15,04082
50	123 500	14,93698	137 420	15,04256
60	95 020	14,93733	108 467	15,04276
70	75 290	14,93839	78 720	15,04141
80	45 367	14,93985	54 042	15,04499
90	20 785	14,93994	27 960	15,04455



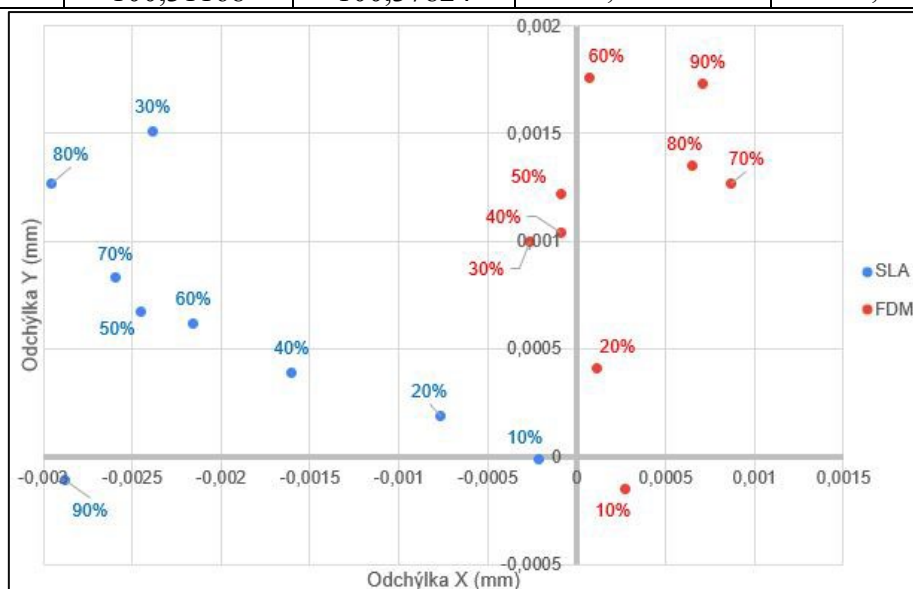
Obr. 1 Grafická závislosť polomeru polgule R15 od redukcie siete

Tab. 2 Vplyv redukcie na pozíciu polgule R15 pri SLA modeli

Redukcia [%]	Pozícia X [mm] SLA	Pozícia Y [mm] SLA	Odchýlka X [mm] SLA	Odchýlka Y [mm] SLA
-	99,70482	100,18636	0	0
10	99,70461	100,18635	-0,00021	-0,00001
20	99,70406	100,18655	-0,00076	0,00019
30	99,70244	100,18787	-0,00238	0,00151
40	99,70322	100,18675	-0,00160	0,00039
50	99,70237	100,18703	-0,00245	0,00067
60	99,70267	100,18698	-0,00216	0,00062
70	99,70223	100,18719	-0,00259	0,00083
80	99,70187	100,18763	-0,00295	0,00127
90	99,70194	100,18625	-0,00288	-0,00011

Tab. 3 Vplyv redukcie na pozíciu polgule R15 pri FDM modeli

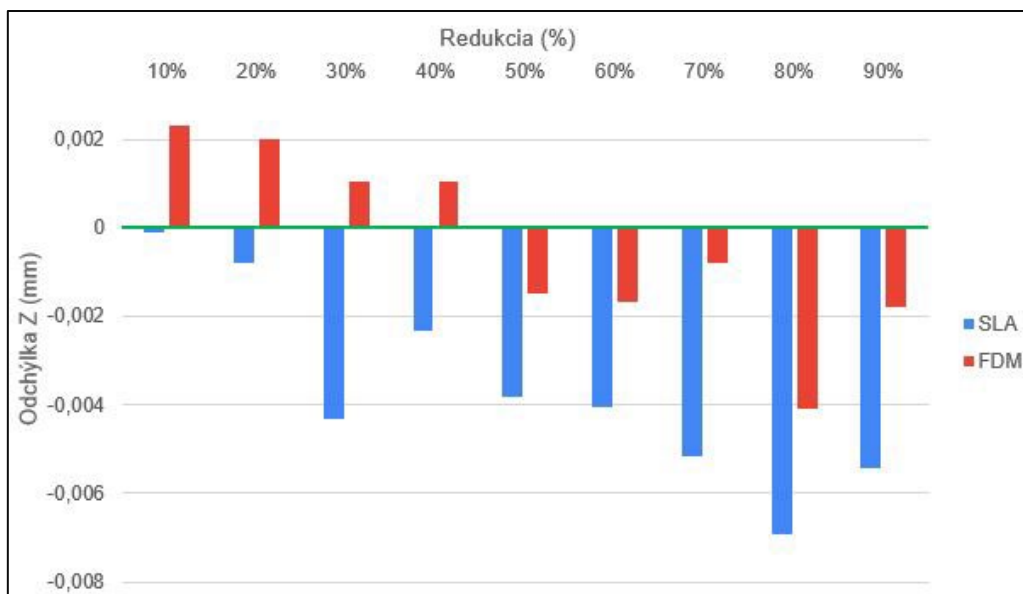
Redukcia [%]	Pozícia X [mm] FDM	Pozícia Y [mm] FDM	Odchýlka X [mm] FDM	Odchýlka Y [mm] FDM
-	100,31097	100,37651	0	0
10	100,31124	100,37636	0,00027	-0,00015
20	100,31108	100,37692	0,00011	0,00041
30	100,31071	100,37751	-0,00026	0,00100
40	100,31088	100,37755	-0,00009	0,00104
50	100,31088	100,37773	-0,00009	0,00122
60	100,31104	100,37827	0,00007	0,00176
70	100,31184	100,37778	0,00087	0,00127
80	100,31162	100,37786	0,00065	0,00135
90	100,31168	100,37824	0,00071	0,00173



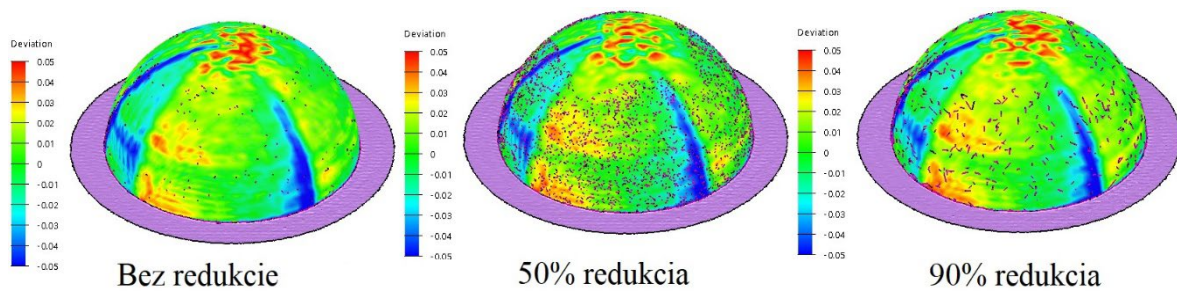
Obr. 2 Grafická závislosť pozície polgule R15 od redukcie

Tab. 4 Vplyv redukcie na pozíciu polgule R15 v hladine Z

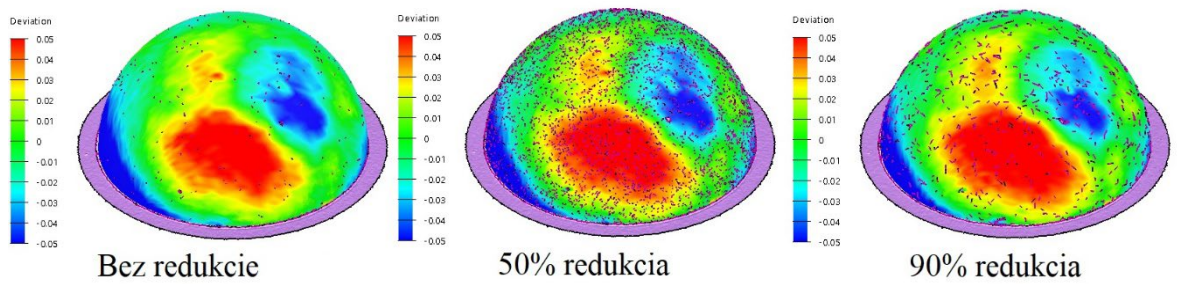
Redukcia [%]	Pozícia Z [mm] SLA	Odchýlka Z [mm] SLA	Pozícia Z [mm] FDM	Odchýlka Z [mm] FDM
-	-0,487737	0	-0,12687	0
10	-0,487842	-0,00011	-0,12454	0,00233
20	-0,488543	-0,00081	-0,12485	0,00202
30	-0,492065	-0,00433	-0,12583	0,00104
40	-0,490057	-0,00232	-0,12582	0,00106
50	-0,49155	-0,00381	-0,12837	-0,00149
60	-0,491801	-0,00406	-0,12855	-0,00168
70	-0,492884	-0,00515	-0,12766	-0,00079
80	-0,494674	-0,00694	-0,13097	-0,00409
90	-0,493153	-0,00542	-0,12867	-0,00179



Obr. 3 Grafická závislosť pozície valca R15 od redukcie v hladine Z



Obr. 4 Farebná mapa odchýlok polgule R15 pri FDM modeli

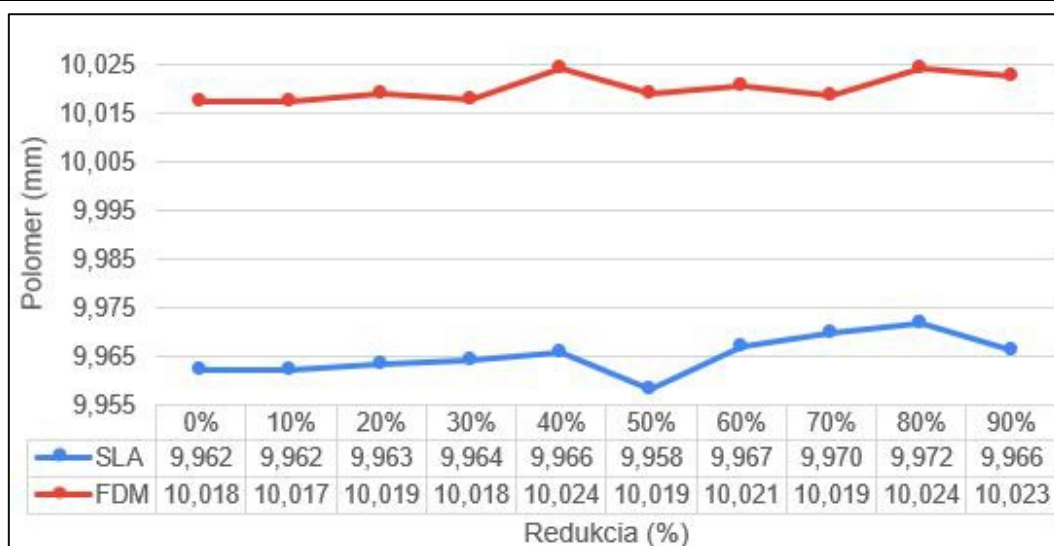


Obr. 5 Farebná mapa odchýlok polgule R15 pri SLA modeli

Príloha F: Vplyv redukcie siete na počet bodov, polomer a pozíciu Polgule R10

Tab. 1 Vplyv redukcie na počet bodov a polomer polgule R10

Redukcia [%]	Počet bodov SLA	Polomer SLA [mm]	Počet bodov FDM	Polomer FDM [mm]
-	120 057	9,96210	120 999	10,01759
10	107 452	9,96211	108 877	10,01748
20	91 953	9,96342	95 556	10,01921
30	79 169	9,96430	81 593	10,01784
40	65 658	9,96561	69 522	10,02410
50	54 894	9,95829	59 402	10,01898
60	40 878	9,96685	46 946	10,02053
70	30 335	9,96977	33 947	10,01851
80	19 304	9,97175	23 530	10,02424
90	9 288	9,96630	11 491	10,02276



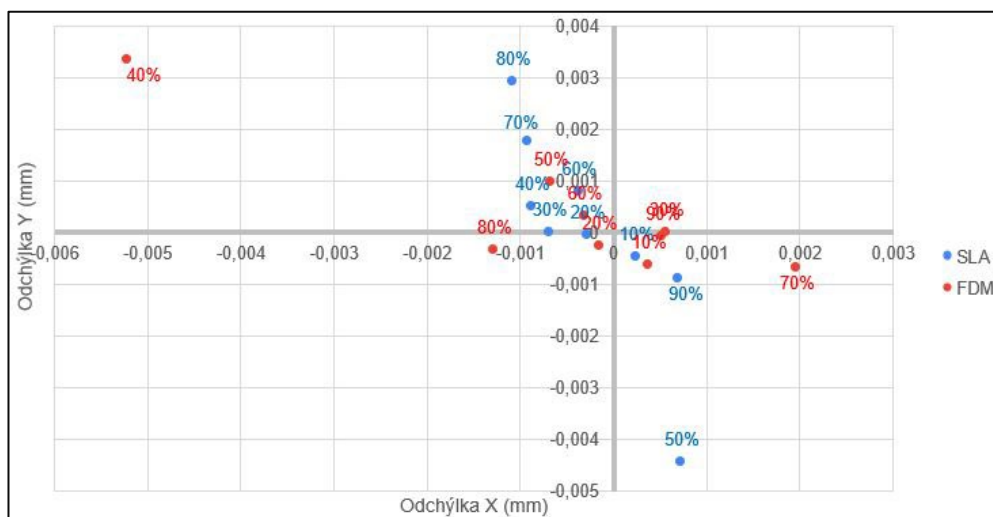
Obr. 1 Grafická závislosť polomeru polgule R10 od redukcie siete

Tab. 2 Vplyv redukcie na pozíciu polgule R10 pri SLA modeli

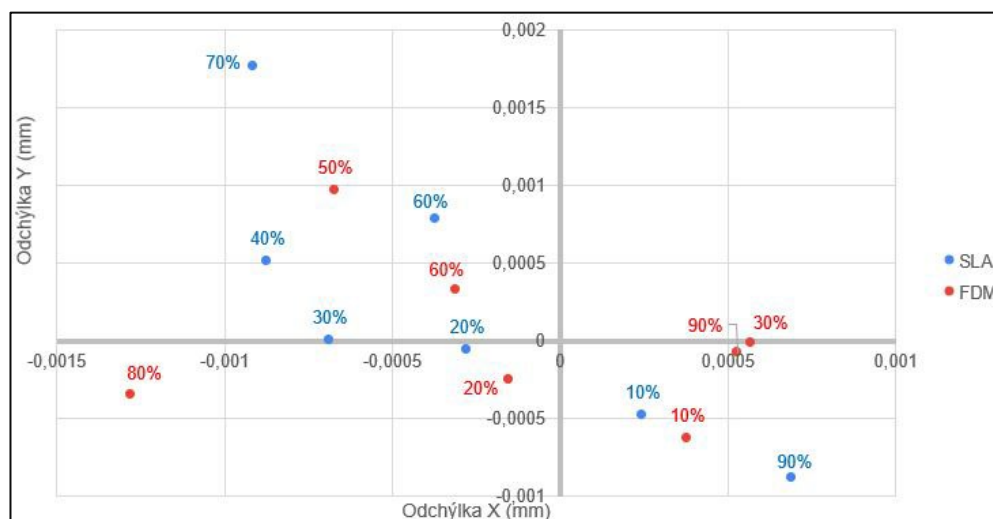
Redukcia [%]	Pozícia X [mm] SLA	Pozícia Y [mm] SLA	Odchýlka X [mm] SLA	Odchýlka Y [mm] SLA
-	99,73786	62,69591	0	0
10	99,73811	62,69543	0,00025	-0,00048
20	99,73758	62,69585	-0,00028	-0,00006
30	99,73717	62,69591	-0,00069	0,00000
40	99,73699	62,69641	-0,00087	0,00051
50	99,73859	62,69148	0,00073	-0,00443
60	99,73749	62,69669	-0,00037	0,00078
70	99,73695	62,69767	-0,00091	0,00176
80	99,73678	62,69883	-0,00108	0,00292
90	99,73855	62,69503	0,00069	-0,00088

Tab. 3 Vplyv redukcie na pozíciu polgule R10 pri FDM modeli

Redukcia [%]	Pozícia X [mm] FDM	Pozícia Y [mm] FDM	Odchýlka X [mm] FDM	Odchýlka Y [mm] FDM
-	100,30057	62,715165	0	0
10	100,30095	62,714536	0,00038	-0,00063
20	100,30042	62,71491	-0,00015	-0,00025
30	100,30114	62,715153	0,00057	-0,00001
40	100,29536	62,718504	-0,00521	0,00334
50	100,2999	62,716127	-0,00067	0,00096
60	100,30026	62,715486	-0,00031	0,00032
70	100,30254	62,714492	0,00197	-0,00067
80	100,29929	62,714816	-0,00128	-0,00035
90	100,3011	62,715092	0,00053	-0,00007



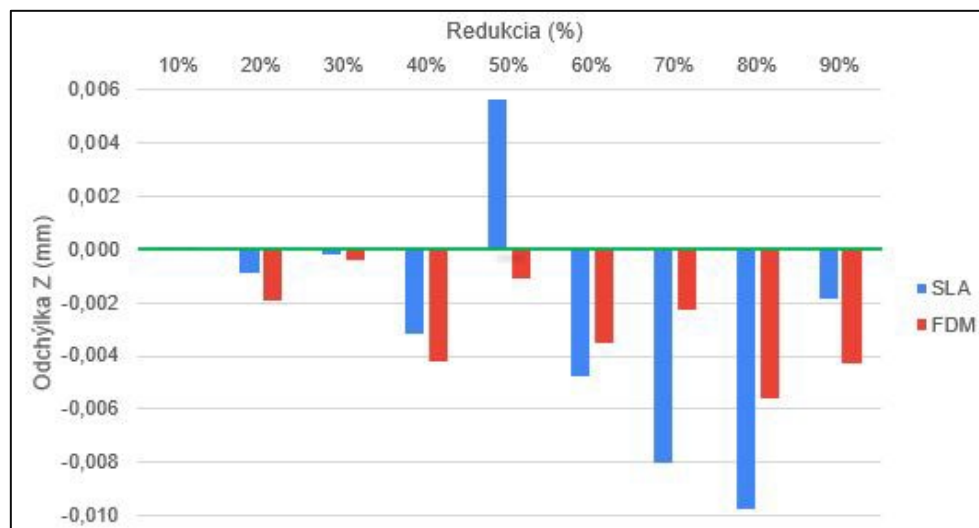
Obr. 2 Grafická závislosť pozície polgule R10 od redukcie



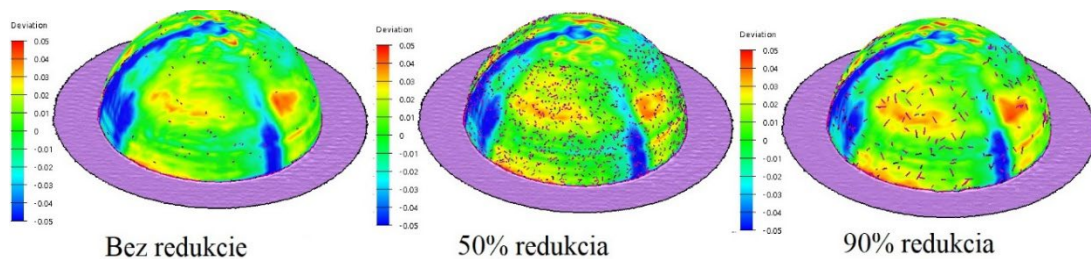
Obr. 3 Detail grafickej závislosti pozície polgule R10 od redukcie

Tab. 4 Vplyv redukcie na pozíciu polgule R10 v hladine Z

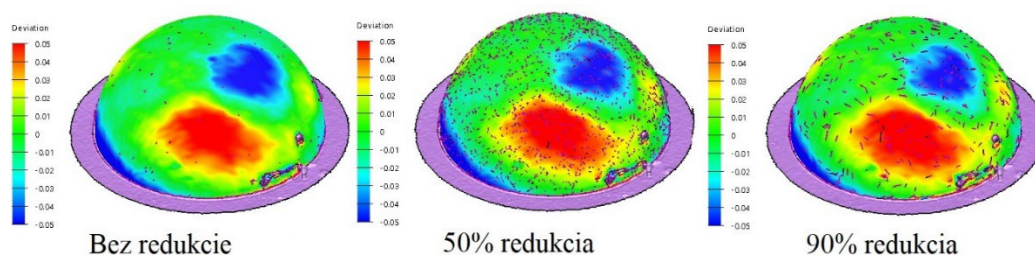
Redukcia [%]	Pozícia Z [mm] SLA	Odchýlka Z [mm] SLA	Pozícia Z [mm] FDM	Odchýlka Z [mm] FDM
-	-0,708806	0	-0,14401	0
10	-0,708705	0,00010	-0,14395	0,00006
20	-0,70969	-0,00088	-0,14595	-0,00194
30	-0,708981	-0,00017	-0,14442	-0,00041
40	-0,711991	-0,00318	-0,14822	-0,00421
50	-0,703184	0,00562	-0,14513	-0,00112
60	-0,713533	-0,00473	-0,14752	-0,00351
70	-0,716824	-0,00802	-0,14625	-0,00224
80	-0,718578	-0,00977	-0,14958	-0,00557
90	-0,710672	-0,00187	-0,14826	-0,00425



Obr. 4 Grafická závislosť pozície polgule R10 od redukcie v hladine Z



Obr. 5 Farebná mapa odchýlok polgule R10 pri FDM modeli

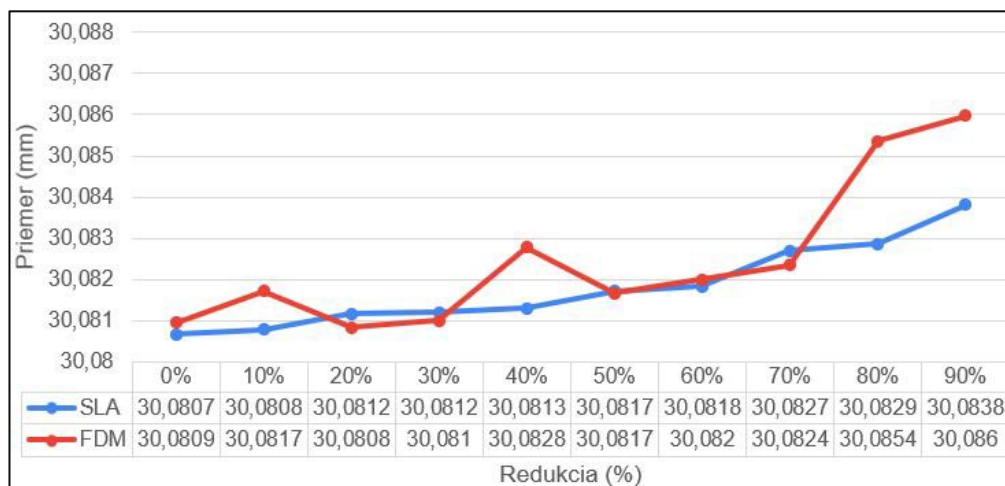


Obr. 6 Farebná mapa odchýlok polgule R10 pri SLA modeli

Príloha G: Vplyv redukcie siete na počet bodov, priemer a pozíciu valca D30

Tab. 1 Vplyv redukcie na počet bodov a priemer valcovej plochy D30

Redukcia [%]	Počet bodov SLA	Priemer SLA [mm]	Počet bodov FDM	Priemer FDM [mm]
-	469 821	30,08068	469 823	30,08095
10	420 120	30,08079	420 565	30,08172
20	364 731	30,08116	365 331	30,08085
30	315 413	30,08120	315 844	30,08101
40	263 263	30,08130	263 566	30,08278
50	222 877	30,08173	224 228	30,08167
60	163 932	30,08184	165 609	30,08201
70	117 628	30,08271	118 907	30,08235
80	75 621	30,08287	76 932	30,08536
90	35 535	30,08381	37 006	30,08597



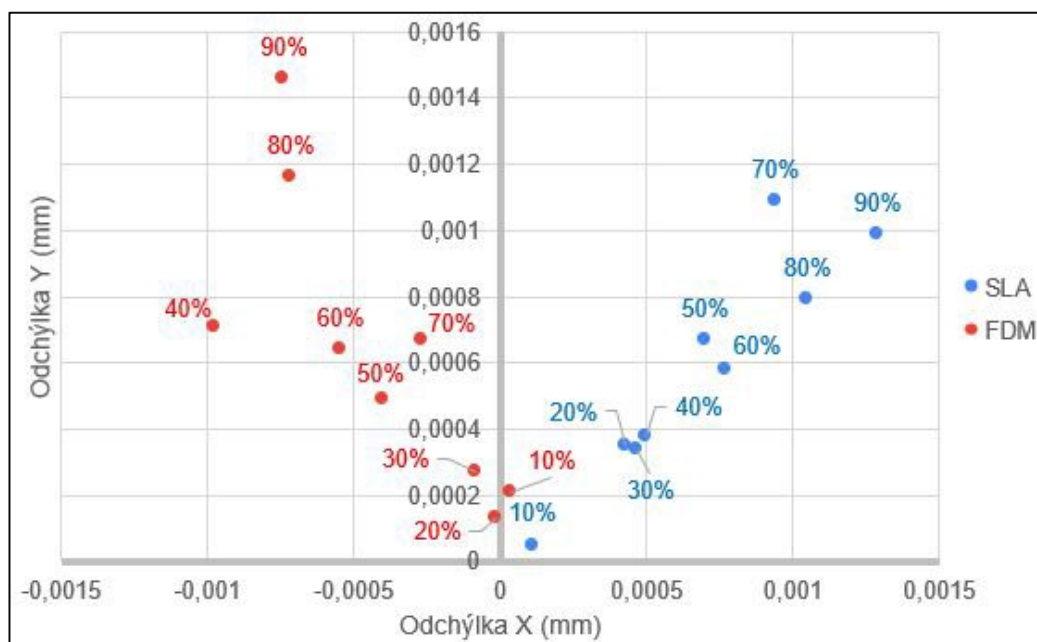
Obr. 1 Grafická závislosť priemeru valca D30 od redukcie siete

Tab. 2 Vplyv redukcie na pozíciu valcovej plochy D30 pri SLA modeli

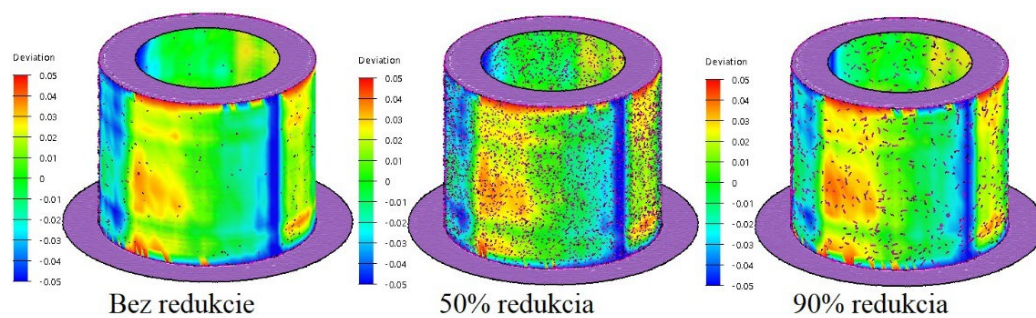
Redukcia [%]	Pozícia X [mm] SLA	Pozícia Y [mm] SLA	Odchýlka X [mm] SLA	Odchýlka Y [mm] SLA
-	100,35644	100,43228	0	0
10	100,35655	100,43233	0,00011	0,00005
20	100,35687	100,43263	0,00043	0,00035
30	100,35691	100,43262	0,00047	0,00034
40	100,35694	100,43266	0,00050	0,00038
50	100,35714	100,43295	0,00070	0,00067
60	100,35721	100,43286	0,00077	0,00058
70	100,35738	100,43337	0,00094	0,00109
80	100,35749	100,43307	0,00105	0,00079
90	100,35773	100,43327	0,00129	0,00099

Tab. 3 Vplyv redukcie na pozíciu valcovej plochy D30 pri FDM modeli

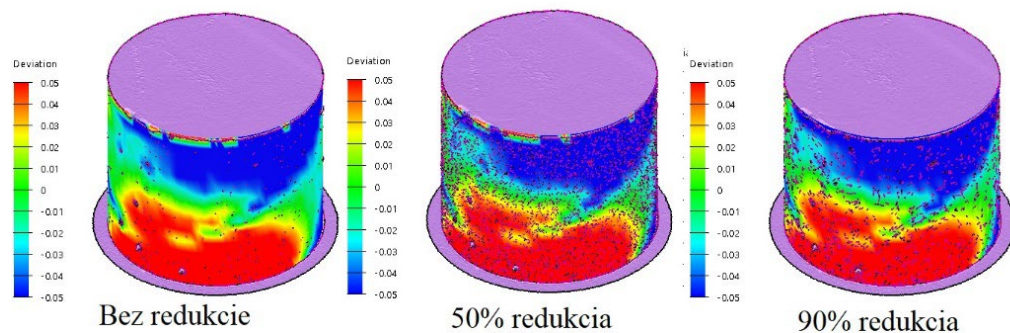
Redukcia [%]	Pozícia X [mm] FDM	Pozícia Y [mm] FDM	Odchýlka X [mm] FDM	Odchýlka Y [mm] FDM
-	24,989818	100,39199	0	0
10	24,989852	100,3922	0,00003	0,00021
20	24,989802	100,39212	-0,00002	0,00013
30	24,989737	100,39226	-0,00008	0,00027
40	24,988841	100,3927	-0,00098	0,00071
50	24,989418	100,39248	-0,00040	0,00049
60	24,989272	100,39263	-0,00055	0,00064
70	24,989554	100,39266	-0,00026	0,00067
80	24,989102	100,39315	-0,00072	0,00116
90	24,989079	100,39345	-0,00074	0,00146



Obr. 2 Grafická závislosť pozície valca D30 od redukcie



Obr. 3 Farebná mapa odchýlok valca D30 pri FDM modeli

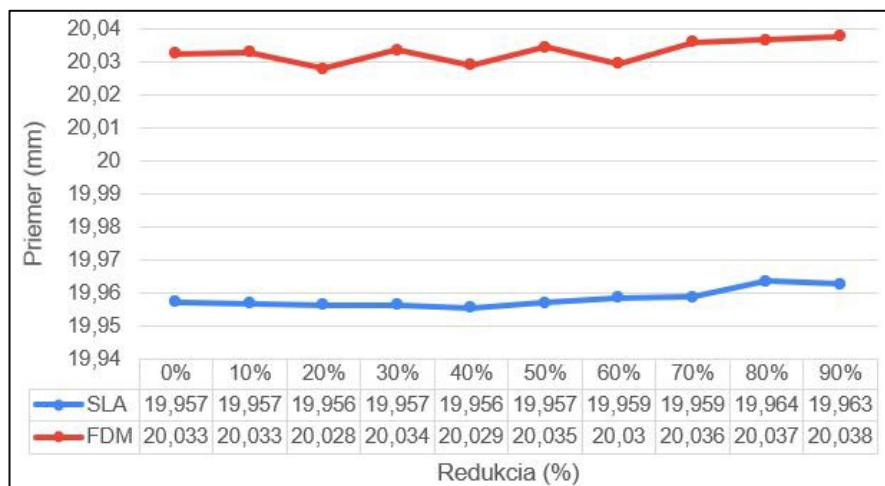


Obr. 3 Farebná mapa odchýlok valca D30 pri SLA modeli

Príloha H: Vplyv redukcie siete na počet bodov, priemer a pozíciu valca D20

Tab. 1 Vplyv redukcie na počet bodov a priemer prichytenej valcovej plochy D20

Redukcia [%]	Počet bodov SLA	Priemer SLA [mm]	Počet bodov FDM	Priemer FDM [mm]
-	311 987	19,95730	313 430	20,03264
10	279 320	19,95684	279 405	20,03304
20	243 957	19,95647	243 771	20,02795
30	211 634	19,95653	204 607	20,03369
40	178 354	19,95571	177 157	20,02918
50	141 603	19,95714	141 370	20,03459
60	113 603	19,95877	107 773	20,02961
70	82 155	19,95887	78 884	20,03615
80	52 398	19,96356	50 996	20,03682
90	26 082	19,96271	24 030	20,03772



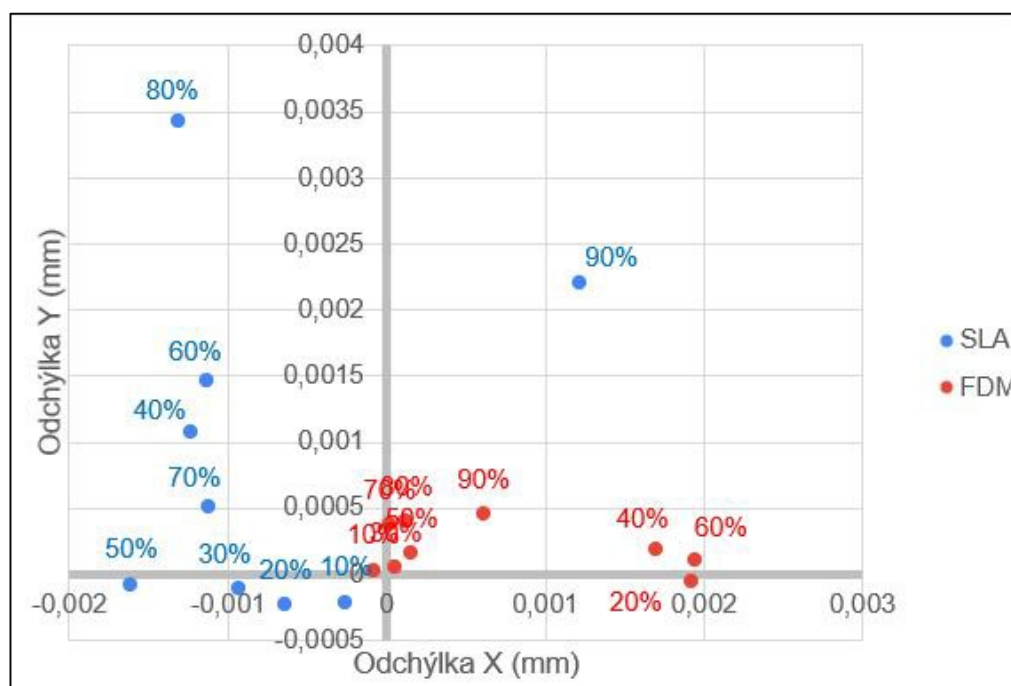
Obr. 1 Grafická závislosť priemeru valcovej plochy D20 od redukcie siete

Tab. 2 Vplyv redukcie na pozíciu valcovej plochy D20 pri SLA modeli

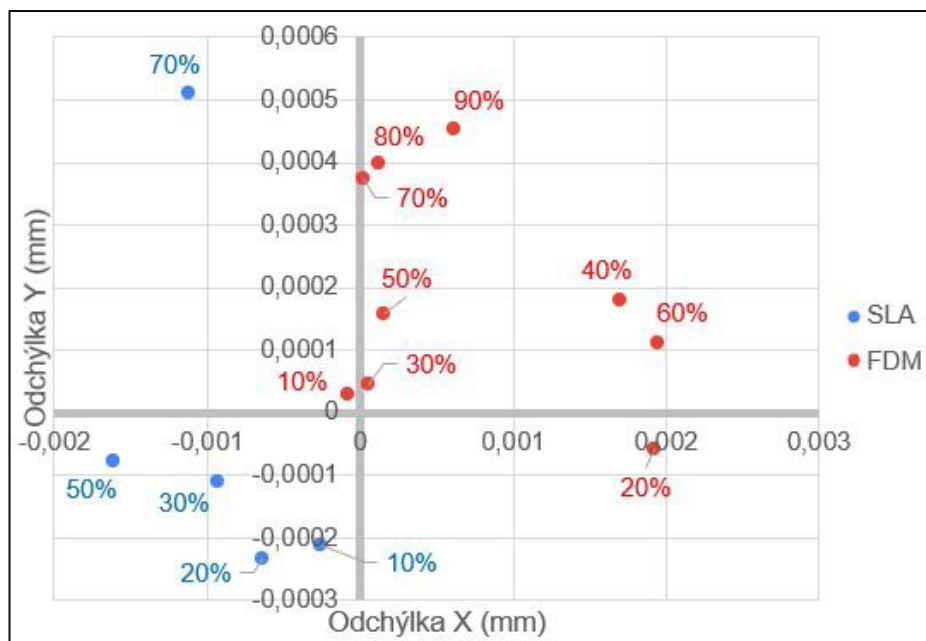
Redukcia [%]	Pozícia X [mm] SLA	Pozícia Y [mm] SLA	Odchýlka X [mm] SLA	Odchýlka Y [mm] SLA
-	25,02648	62,644773	0	0
10	25,02622	62,644561	-0,00026	-0,00021
20	25,02584	62,64454	-0,00064	-0,00023
30	25,02555	62,644662	-0,00093	-0,00011
40	25,02525	62,645844	-0,00123	0,00107
50	25,02487	62,644696	-0,00161	-0,00008
60	25,02535	62,64624	-0,00113	0,00147
70	25,02536	62,645284	-0,00112	0,00051
80	25,02516	62,648195	-0,00132	0,00342
90	25,02769	62,64697	0,00121	0,00220

Tab. 3 Vplyv redukcie na pozíciu valcovej plochy D20 pri FDM modeli

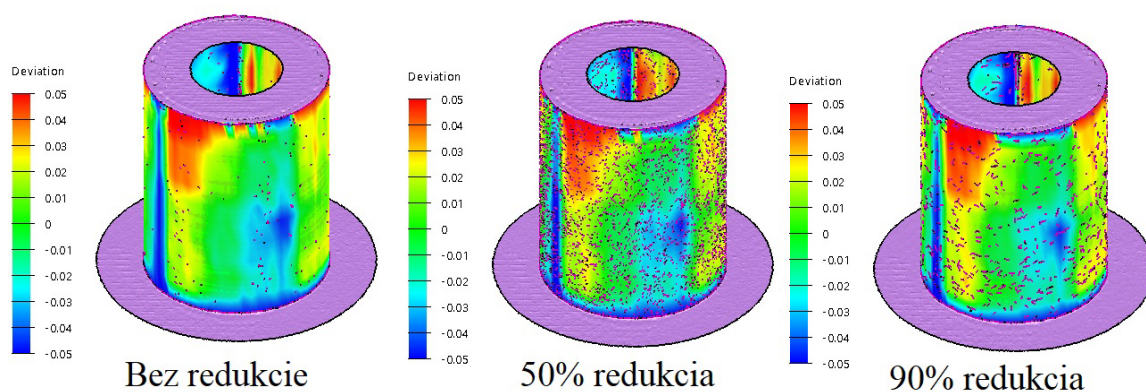
Redukcia [%]	Pozícia X [mm] FDM	Pozícia Y [mm] FDM	Odchýlka X [mm] FDM	Odchýlka Y [mm] FDM
-	24,98115	62,742653	0	0
10	24,98107	62,742682	-0,00008	0,00003
20	24,98307	62,742596	0,00192	-0,00006
30	24,98121	62,742698	0,00006	0,00005
40	24,98285	62,742832	0,00170	0,00018
50	24,98131	62,742812	0,00016	0,00016
60	24,98309	62,742764	0,00194	0,00011
70	24,98117	62,743028	0,00002	0,00038
80	24,98128	62,743053	0,00013	0,00040
90	24,98176	62,743107	0,00061	0,00045



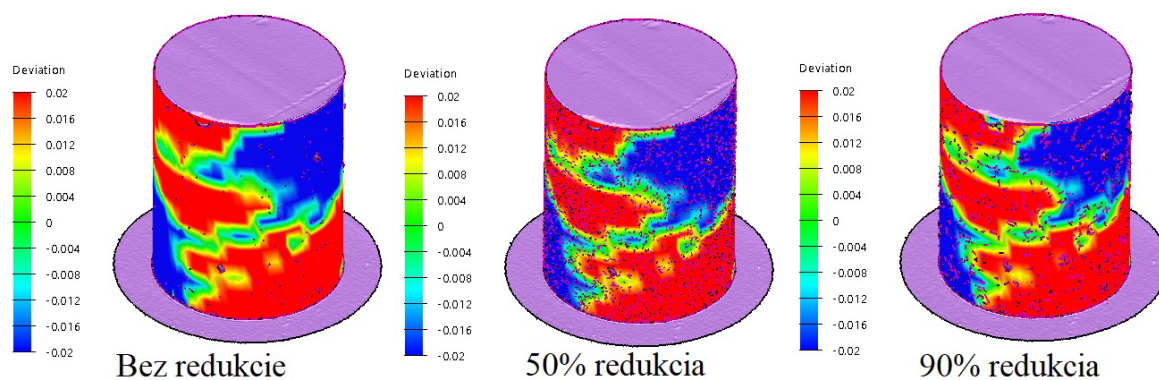
Obr. 2 Grafická závislosť pozície valca D20 od redukcie



Obr. 3 Detail grafickej závislosti pozície valca D20 od redukcie



Obr. 4 Farebná mapa odchýlok valca D20 pri FDM modeli



Obr. 5 Farebná mapa odchýlok valca D20 pri SLA modeli