



Analýza vlivu materiálu obrobku na přesnost optické 3D digitalizace

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T049 – Výrobní systémy a procesy

Autor práce: **Bc. Ondřej Langer**
Vedoucí práce: Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Langer**
Osobní číslo: **S16000307**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní systémy a procesy**
Název tématu: **Analýza vlivu materiálu obrobku na přesnost optické 3D digitalizace**
Zadávající katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Hlavním cílem práce je posouzení vlivu různých materiálů obrobku na kvalitu a přesnost optické 3D digitalizace.

Dílčí cíle, kterých má být dosaženo:

1. Seznámení s vybavením a zařízením laboratoře potřebným k realizaci praktické části práce (3D bezkontaktní skener Atos II 400, SW GOM Inspect apod.) a s principy optické digitalizace.
2. Rešerše prací na podobné téma - přehled současného stavu poznání (bude součástí teoretické části DP).
3. Formulace řešeného problému a jeho analýza, návrh metodického přístupu k řešení.
4. Návrh vhodných materiálů a etalonů pro měření (materiál, povrchová úprava, barva, podrobněji se zaměřit na materiály používané při technologii RP), praktická realizace experimentů (určení nominálních rozměrů, digitalizace).
5. Zpracování a vyhodnocení naměřených dat. Analýza, interpretace výsledků. Diskuze, závěr.
6. Součástí DP bude příprava odborného článku na řešené téma.

Rozsah grafických prací dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] HLAVÁČ, V. a M. ČONKA. Počítačové vidění. Praha: Grada, 1992. ISBN 8085424-67-3.
[2] ZHANG, S. Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN: 978-1-4398-7219-2.
[3] GOM MbH. Inspection: V8 Manual Basic. Braunschweig (Germany): GOM MbH, 2014.
[4] GOM MbH. Atos V7 - Hardware: User manual. Braunschweig (Germany): GOM MbH, 2010.
[5] HOFMAN, J. Analýza přesnosti 3D digitalizace s využitím optických skenerů. Liberec, 2013. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů.
[6] LEVÍNSKÁ, B. Vliv zmatňujících nástřiků na přesnost optické 3D digitalizace. Liberec, 2017. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů a automatizace.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání diplomové práce: **15. listopadu 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 20. 5. 2018

Podpis: 

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Radomíru Mendřickému, Ph.D. za projevenou ochotu, cenné rady a pomoc při vypracování celé práce.

Dále děkuji všem, především rodině a blízkým, kteří mi byli nápomocni a podporovali mě v průběhu dosavadního studia.

TÉMA: ANALÝZA VLIVU MATERIÁLU OBROBKU NA PŘESNOST OPTICKÉ 3D DIGITALIZACE

ABSTRAKT: Cílem této diplomové práce bylo posoudit vliv materiálu na přesnost a kvalitu 3D digitalizace. K porovnání bylo vytvořeno téměř tři desítky vzorků z různých materiálů nejrůznějších barev a povrchů. Skenování bylo prováděno pomocí optických skenerů Atos II a Atos III. Takto získaná data byla následně porovnáována s daty, která vzešla z měření na souřadnicovém měřicím přístroji, čímž nám vznikla odchylka od nominální hodnoty, jež byla dále porovnáována s odchylkou naskenovaných dat vzorků s antireflexním nástřikem. Vzorky byly porovnávány na základě procentuálního naskenování povrchu a přesnosti naskenovaných dat. Přesnost dat byla ověřována na pěti různých rozměrech.

KLÍČOVÁ SLOVA: optická digitalizace, 3D digitalizace, bezkontaktní skenery, vliv materiálu, přesnost digitalizace, přesnost optické 3D digitalizace

THEME: ANALYSIS OF THE IMPACT OF WORKPIECE MATERIAL ON THE ACCURACY OF OPTICAL 3D DIGITIZATION
(Effect of workpiece material on the precision of 3D digitization)

ABSTRACT: Target of this diploma thesis was judge impact of material on the accuracy and quality of 3D digitization. About thirty pieces of samples from different colors and surface were created for comparison. Scanning was completed with two optical scanners Atos II and Atos III. This data was compared with dates from measuring on coordinate-measuring machine. We got deviation from nominal value. This deviation was compared with deviation of scanning samples with anti-reflex application. Samples were compared on base scanning capacity and accuracy of scanning data. Data accuracy was verified on five different dimensions.

KEYWORDS: optical digitization, 3D digitization, contactless scanners, material impact, digitization accuracy

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů a automatizace
Dokončeno: 2018

Počet stran:	84
Počet příloh:	5
Počet tabulek:	17
Počet grafů:	10
Počet obrázků:	36
Počet modelů nebo jiných příloh:	0

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek.....	10
Seznam grafů.....	11
Seznam symbolů a zkratk	12
Úvod.....	13
Cíl práce	13
1 Rešerše současného stavu poznání	14
1.1 Skenování 3D skenery obecně.....	15
1.2 Rozdělení 3D skenerů	15
1.2.1 Destruktivní skenery.....	16
1.2.2 Nedestruktivní skenery.....	16
1.2.3 Dotykové skenery	16
1.2.4 Bezdotykové skenery.....	17
1.2.5 Stacionární zařízení	17
1.2.6 Mobilní zařízení.....	17
1.2.7 Laserové skenery	17
1.2.8 Rentgenové skenery.....	17
1.2.9 Ultrazvukové skenery	18
1.2.10 Optické skenery	18
1.3 Triangulace.....	19
1.3.1 Aktivní triangulace	19
1.3.2 Pasivní triangulace.....	20
1.4 Principy pořízení obrazu.....	20
1.4.1 Elektromagnetické záření	20
1.4.2 Záření částic	20
1.4.3 Akustické vlny.....	20
1.5 Koeficient odrazivosti	21

1.5.1	Lambertovský povrch	21
1.5.2	Ideální zrcadlový povrch	22
1.6	Fotogrammetrie	22
1.7	Vhodnost materiálů ke skenování	22
1.7.1	Rozptyl světla	22
1.7.2	Vliv barvy na skenování	22
1.8	Moiré topografie	23
1.9	Skenery Atos	24
1.10	STL formát	26
2	Praktická část	27
2.1	Konvenční metoda	27
2.1.1	AMPCO 22	28
2.1.2	Ocel 11 523	29
2.1.3	Mosaz	29
2.1.4	Hliník	29
2.1.5	Teflon	29
2.1.6	Polyamid PA6	29
2.2	Aditivní metoda	29
2.2.1	Technologie PolyJet	30
2.2.2	Technologie FDM	32
2.2.3	Technologie SLA	33
2.2.4	Technologie SLS	34
2.3	Skenování vzorků	35
2.3.1	Kalibrace skeneru Atos II (resp. Atos III)	37
2.3.2	Příprava vzorků	37
2.4	Výsledky měření	42
2.4.1	Materiály bez nástřiku neskenovatelné (do 50%)	42
2.4.2	Materiály částečně skenovatelné (naskenování 50 – 80%)	44
2.4.3	Materiály dobře skenovatelné (naskenování 80 a více %)	46

2.4.4	Materiály skenovatelné se špatnými rozměry	50
2.5	Vyhodnocení výsledků	57
3	Závěr.....	63
	Použitá literatura.....	64
	Přílohy	67
A	Obsah přiloženého CD	67
B	Ukázkový protokol ze softwaru GOM Inspect	68
C	Kalibrační list Souřadnicového měřicího stroje.....	76
D	Data náměrů ze SMS	77
E	Kompletní data ze skenerů Atos II a Atos III	82

Seznam obrázků

Obrázek 1	Kontrola kvality v automobilovém průmyslu [1]	14
Obrázek 2	Obecné rozdělení skenerů [6]	15
Obrázek 3	Skenování termiště [6].....	16
Obrázek 4	Dotykové skenování [8].....	17
Obrázek 5	Skenovaný objekt s nalepenými referenčními body [13].....	18
Obrázek 6	Triangulační trojúhelník [19].....	19
Obrázek 7	Popis směrových vektorů ke světelnému zdroji a pozorovateli [42]	21
Obrázek 8	Rozsah vlnových délek [16].....	23
Obrázek 9	Tři základní barvy světla [15]	23
Obrázek 10	Parametry skeneru Atos II [24].....	24
Obrázek 11	Parametry skeneru Atos III	25
Obrázek 12	Skener Atos II 400 [27].....	25
Obrázek 13	Přehled modelů - tištěné (vrchní řada + 27., 28.) a obráběné (spodní řada 21. – 26.)	27
Obrázek 14	Modely - pro 3D tisk (vlevo), pro obrábění (vpravo)	27
Obrázek 15	Obráběcí stroj KAFO KFO-620-5AX [30].....	28
Obrázek 16	Obráběné modely	28
Obrázek 17	Princip technologie PolyJet [32].....	31
Obrázek 18	Vzorky - technologie PolyJet.....	31
Obrázek 19	Princip FDM technologie [31]	32
Obrázek 20	Vzorky - technologie FDM.....	33

Obrázek 21 Vzorek - technologie SLA	34
Obrázek 22 Vzorky - technologie SLS.....	34
Obrázek 23 Výkres součásti pro 3D skenování.....	35
Obrázek 24 Přesnost stroje DEA, Global 07.10.05	35
Obrázek 25 MPE_E , MPE_P [44]	36
Obrázek 26 Osvětlování vzorků Atos II a Atos III.....	36
Obrázek 27 Ustavení vzorku na rotační stůl skeneru	38
Obrázek 28 Nastavení času expozice (červená místa upozorňují na přeexponovaná místa).....	38
Obrázek 29 Vizualizace pozic skeneru.....	39
Obrázek 30 Kontrola přesnosti transformace ref. bodů.....	39
Obrázek 31 Polygonální síť a její detail	39
Obrázek 32 Mesh.....	40
Obrázek 33 Barevná mapa odchylek.....	40
Obrázek 34 Překrytí meshe s 3D modelem	41
Obrázek 35 Naměřené hodnoty meshe.....	41
Obrázek 36 Legenda k tabulkám 9 - 13.....	51

Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehled tištěných vzorků	30
Tabulka 2 Atos II - Neskenovatelné materiály bez nástřiku (3D tisk)	43
Tabulka 3 Atos III – Materiály neskenovatelné	44
Tabulka 4 Atos II - Materiály částečně skenovatelné.....	45
Tabulka 5 Atos III - Materiály částečně skenovatelné	46
Tabulka 6 Atos II - Dobře skenovatelné (část I)	47
Tabulka 7 Atos II - Dobře skenovatelné (část II)	48
Tabulka 8 Atos III - Dobře skenovatelné (část I)	49
Tabulka 9 Atos III - Dobře skenovatelné (část II).....	50
Tabulka 10 Nejpřesnější a nejméně přesné vzorky (D1).....	52
Tabulka 11 Nejpřesnější a nejméně přesné vzorky (D2).....	53
Tabulka 12 Nejpřesnější a nejméně přesné vzorky (délka X)	54
Tabulka 13 Nejpřesnější a nejméně přesné vzorky (šířka Y).....	55
Tabulka 14 Nejpřesnější a nejméně přesné vzorky (průměr koule)	56
Tabulka 15 Vyhodnocení nejpřesnějších vzorků	57
Tabulka 16 Atos II - Odchylky jednotlivých vzorků.....	60
Tabulka 17 Atos III – Odchylky jednotlivých vzorků.....	61

Seznam grafů

Graf 1 Skenovatelnost vzorků	42
Graf 2 Porovnání přesnosti skenovaných dat (D1).....	52
Graf 3 Porovnání přesnosti skenovaných dat (D2).....	53
Graf 4 Porovnání přesnosti skenovaných dat (délka X)	54
Graf 5 Porovnání přesnosti skenovaných dat (šířka Y).....	55
Graf 6 Porovnání přesnosti skenovaných dat (průměr koule)	56
Graf 7 Atos II - porovnání nekřídovaných a křídovaných vzorků (D1)	58
Graf 8 Atos II - porovnání nekřídovaných a křídovaných vzorků	58
Graf 9 Atos III - porovnání nekřídovaných a křídovaných vzorků (D1).....	59
Graf 10 Atos III - porovnání nekřídovaných a křídovaných vzorků	59

Seznam symbolů a zkratk

2D	Dvoudimenzionální, dvourozměrný
3D	Trojdimenzionální, třírozměrný
CAD	Computer Aided Design (Drafting), počítačem podporované projektování (kreslení)
CCD	Charge-Coupled Device, elektronická součástka pro snímání obrazu
FDM	Fused Deposition Modeling, modelování nataveným materiálem
MPE _E	Maximum Permissible Error for length measurement, maximální přípustná chyby pro měření délky
MPE _P	Maximum permissible Error for probing, maximální přípustná chyby pro snímání
PMMA	polymethylmethakrylát, jinak též plexisklo
PRFE	polytetrafluoretylen, jinak též teflon
SLA	Stereolithography apparatus, jedna z technologií 3D tisku
SLS	Selective Laser Sintering, selektivní laserové slinování
SMS	Souřadnicový měřicí stroj
STL	Standard Triangle Language, formát souboru stereolitografie

Úvod

Skenování bez zásahu do materiálu, co víc, bez dotyku skenovaného předmětu. To již dávno není pouhou fantazií filmových scénáristů a technických nadšenců. 3D digitalizace je již nějakou dobu běžnou součástí nejen průmyslu, ale najdeme její využití v nejrůznějších oborech.

Jelikož možnosti využití nejen v průmyslu jsou nepřehledné, tak i požadavky na přesnost získaných dat jsou stále vyšší. Proto si tato práce bere za cíl posoudit vliv různých povrchů materiálu na přesnost digitalizace. Nyní je běžnou praxí předměty před skenováním ošetřit antireflexním nástřikem, aby byla zajištěna rozměrově odpovídající 3D data. Tato práce zkoumala přesnost různých materiálů a jejich povrchů z hlediska skenovatelnosti a přesnosti bez použití výše zmíněné povrchové úpravy.

K posouzení bylo využito dvou skenerů od firmy Atos, které jsou součástí laboratoří KSA, konkrétně se jednalo o modely Atos II a o generaci novější Atos III. Veškeré vzorky byly naskenovány oběma stroji, abychom mohli posoudit vliv stroje na skenovaný předmět. Data byla porovnávána s výstupem ze souřadnicového měřicího stroje a dále zpracována do formy, která je výsledkem této práce.

Cíl práce

Hlavním cílem této práce je posouzení vlivu různých materiálů obrobku na kvalitu a přesnost optické 3D digitalizace.

1 Rešerše současného stavu poznání

Optické 3D skenování, digitalizace a technologie s tím související se využívá v případech, kdy použití klasického dotykového skenování je neefektivní nebo dokonce nemožné. Své velké uplatnění nachází v oboru tzv. reverzního inženýrství (Reverse engineering) čili zpětné inženýrství, kdy je tvarově složitá součást oskenována bez fyzického doteku snímače (skeneru) a snímaného objektu. Ten je následně zdigitalizován a jako model je možné jej použít například pro 3D tiskárnu pro tvorbu prototypů. Dnes má 3D skenování širokou oblast použití v celém spektru odvětví jako je průmysl, lékařství, design, grafika a film, archeologie, módní návrhářství a další obory, kde je potřeba rychle získaného trojrozměrného objektu. [1]

V průmyslu má 3D skenování široké zastoupení ať už ve výrobě prototypů a reverzního inženýrství zmiňovaného výše, tak dále je využíváno pro kontrolu kvality a rozměrovou kontrolu.



Obrázek 1 Kontrola kvality v automobilovém průmyslu [1]

Za zmínku stojí i uplatnění 3D digitalizace v kriminalistice pro podrobnou studii místa činu či v pojišťovnictví k digitalizaci obrazů poškozených vozidel. K hojnému využívání bezkontaktního skenování přispívá řada výhod, mezi které patří rychlé měření složitých modelů a získávání reálného trojrozměrného modelu, dále vysoké množství dat (až v řádu stovek bodů na 1 mm čtvereční, miliony bodů na jeden záběr), velký rozsah měřitelných objektů (jedním zařízením lze měřit objekty od několika mm do několika metrů), nezávislost výsledku na hmotnosti a teplotě součásti, možnost měřit cenné či křehké předměty bez nutnosti doteku. Ale samozřejmě jako vše i bezkontaktní digitalizace má dvě strany mince a tedy i nevýhody jako je například obtížné zmapování hlubokých dutin či děr a opticky špatně přístupných míst, citlivost k okolnímu osvětlení a problematické měření některých povrchů, kdy je mnohdy potřeba povrch upravit použitím zmatňujících (antireflexních) nástřiků. [1][2]

C. Bernal se svým týmem zkoumali přesnost systému na měření Comet L3D pomocí lepicí pásky, kterou použili místo antireflexního nástřiku. Naměřenou bílou neprůhlednou páskou o tloušťce 0,060

mm chtěli porovnat s náměry s objektem ošetřeným bílým práškem, k čemuž nakonec nedošlo, protože bylo nemožné kontrolovat tloušťku nanesené vrstvy. D. Paloušek a jeho kolegové ve svém článku popisují problémy, které se mohou vyskytnout při skenování bez použití zmatňujících nástřiků a zároveň vysvětlují, kdy je vhodné nástřik použít. Jelikož výrobce nástřiků udává velmi přesné podmínky pro měření (teplota, osvětlení a zkušený personál), tak podmínky nemusí být vždy ideální a výsledek měření může být tímto způsobem ovlivněn. B. Levínská se ve své diplomové práci zabývá právě vlivem antireflexních nástřiků na rozměrovou a geometrickou přesnost 3D skenování. Ve své práci porovnává sedm druhů zmatňujících nástřiků, mezi nimi i sprej 3D Helling, který byl využit i v rámci této diplomové práce. K získání přesných dat využívá několik typů přesných kalibrů a opakovaného měření. Jako vzorek, který nejméně ovlivnil měření, byl vyhodnocen titanový prášek s tloušťkou vrstvy 0,012 mm. Zmíněný sprej 3D Helling se umístil, co do přesnosti, na druhém místě s tloušťkou vrstvy 0,015 mm. [3][4][20]

1.1 Skenování 3D skenery obecně

Jak již bylo poznamenáno výše, 3D optické skenování má celou řadu využití, pokud se zaměříme na využití v průmyslu, tak Reverse Engineering dobře poslouží např. při získání ztracených 3D dat. Velkého využití se 3D digitalizaci dostává při kontrole kvality, kdy je fyzický výrobek naskenován a porovnán s 3D modelem a během pár minut jsou k dispozici rozdíly mezi návrhem a produktem. [2][4][5]

1.2 Rozdělení 3D skenerů



Obrázek 2 Obecné rozdělení skenerů [6]

Přístrojů pro digitalizaci objektů ať již 3D nebo 2D existuje celá řada a jejich rozdělení je možné pojmut tak jako na obrázku 2. Každý skener má své využití a záleží na druhu práce, skenovaném objektu a na požadovaných výstupních datech. Za důležitou vlastnost se dá považovat mobilita zařízení, zvláště u předmětů, které nelze, například z rozměrových důvodů, přenášet. Dalším parametrem pro výběr skeneru bude jeho přesnost, která je dána technologií, kterou daný skener používá, velikostí součásti a její složitosti (členitosti).

1.2.1 Destruktivní skenery

Při skenování součásti pomocí destruktivních skenerů dojde ke zničení původního skenovaného objektu z důvodu získání dat kompletní vnější i vnitřní struktury. Jednotlivé vrstvy jsou postupně odfrézovány a oskenovány, čímž vzniká digitální obraz vnitřních dutin a záhybů. Skenování tohoto typu je velmi přesné (v řádech setin milimetru) a doba skenování se odvíjí od velikosti skenovaného objektu a může se vyšplhat až na několik hodin.



Obrázek 3 Skenování termitišť [6]

1.2.2 Nedestruktivní skenery

Opakem destruktivních skenerů, které jsou využívány například pro skenování termitišť, jsou skenery nedestruktivní, které bývají užívány častěji, jelikož ve většině případů nechceme digitalizovaný objekt zničit. Princip snímání těchto přístrojů můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin a to skenery kontaktní (dotykové) a nekontaktní (bezdotykové). [6]

1.2.3 Dotykové skenery

Při dotykovém snímání dochází k dotyku se skenovaným předmětem. Tato metoda byla vyvinuta v 80.tých letech minulého století, když byla vynalezena dotyková sonda. Hrotem sondy se obtáhnou křivky snímaného předmětu a těmito křivkami se definuje tvar objektu, křivky se spojí a vznikne plocha povrchu, který byl skenován. Touto metodou lze docílit velmi přesných digitálních obrazů, ale v porovnání s ostatními technikami se jedná o relativně pomalý způsob získávání dat. [6][7][10]



Obrázek 4 Dotykové skenování [8]

1.2.4 Bezdotykové skenery

Hlavní výhoda bezdotykových skenerů je obsažena již v jejich názvu, tedy že se nedotýkají snímaného objektu. To znamená, že jsou schopny zaznamenávat data i z měkkých povrchů, dále se dostanou do míst pro dotykovou sondu těžko přístupných, snímaný předmět může být od skeneru vzdálen několik metrů, snímání je oproti dotykové metodě rychlejší a skener je většinou přenosný. [4][6][7]

1.2.5 Stacionární zařízení

Jedná se o skenery, které mají limitovaný snímací prostor, nelze je přepravovat, je na nich tedy možné skenovat pouze objekty do určité velikosti – skenovacího prostoru. Většinou se jedná o velké skenery, nejčastěji obsahující rameno.

1.2.6 Mobilní zařízení

Opak stacionárního zařízení, malý přenosný skener, který se využívá na snímání velkorozměrových objektů, které není možné přemísťovat a tím tedy donést „pod skener“. Mobilita zařízení bývá v dnešní době brána jako jeden z rozhodujících parametrů při nákupu skeneru. [6][7]

1.2.7 Laserové skenery

Laserový skener patří mezi bezkontaktní skenery a pracuje na bázi vysílání paprsků, které se odráží od snímaného objektu a vrátí se zpět. Podle doby návratu a úhlu dopadu skener vyhodnotí tvar povrchu měřené součásti. Na rozdíl od optických skenerů má laserový tu výhodu, že rozpozná neprůchozí díry, ale nevýhodou je jejich vysoká pořizovací cena.

1.2.8 Rentgenové skenery

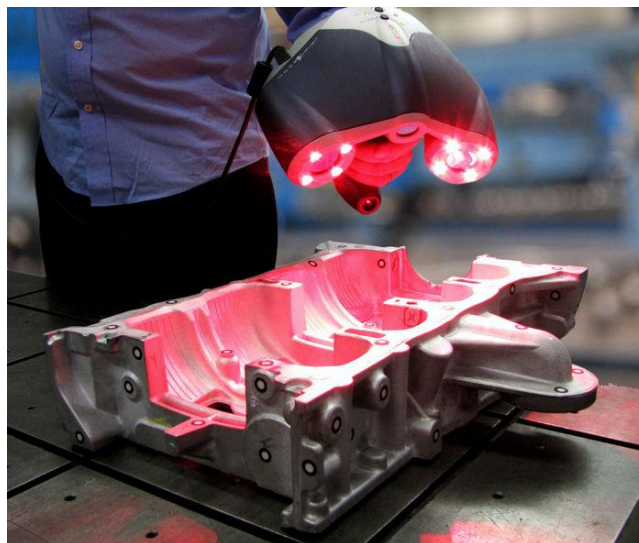
Rentgenové skenery mají oproti laserovým tu výhodu, že proniknou celým objemem a jsou tedy schopny digitalizovat i vnitřní tvary tělesa bez nutnosti zničit snímaný objekt jako tomu je u destruktivních skenerů. [6][7]

1.2.9 Ultrazvukové skenery

Další bezdotykový způsob skenování, kdy je k objektu přikládána ultrazvuková sonda ve tvaru pistole a objekt je snímán ultrazvukovým signálem, který skener vyšle po stisku spouště. Tato metoda je jednou z nejlevnějších, co se skenování týče, není totiž tolik přesná jako ostatní způsoby (přesnost v rozmezí 0,3 – 0,5 mm). Uplatnění nachází v oblasti reklamy, filmu a animací, zkrátka tam, kde takováto přesnost bohatě postačuje. [7][8][9]

1.2.10 Optické skenery

Poslední skupinou jsou optické skenery, které patří do skupiny bezdotykových. Optický 3D skener sestává ze senzoru, který se skládá z řídicí jednotky, minimálně jednoho objektivu s kamerou a jednoho projektoru. Zde je snímána poloha jednotlivých bodů pomocí objektivu a zároveň projektor osvětluje bílým či modrým světlem, záleží na konkrétním skeneru. Pro účely této práce bylo využito jak skeneru s bílým, tak skeneru s modrým světlem. Další součástí je stojan, který je propojen s projektorem. Spojení je řešeno aretačním upnutím, čímž je zaručena možnost pohybovat skenerem ve všech třech osách. Nezbytným prvkem je výkonný počítač s velkými nároky na grafickou kartu a operační paměť. Dále může skener obsahovat otočný stůl ovládaný automaticky či manuálně. Skenovaný objekt je snímán z několika úhlů pomocí optického zařízení. Přístroj vlastně objekt „vyfotí“ a celek je poskládán z jednotlivých obrazů. Aby bylo dosaženo celistvosti objemu, je potřeba na tělese vyznačit několik orientačních bodů (v případě objemných modelů i tisíce bodů). Tyto body, někdy také nazývané centrovací terčíky, slouží právě k sestavení celkového obrazu snímaného modelu. Pro získání přesného modelu je vhodné v každém dalším snímku naskenovat tři body ze snímku předešlého. [7][9][11][12]



Obrázek 5 Skenovaný objekt s nalepenými referenčními body [13]

Výstupem zpracovaných snímků je mrak bodů, který je potřeba převést na plochu či těleso. Jako jeden z vhodných formátů pro výstup je formát STL.

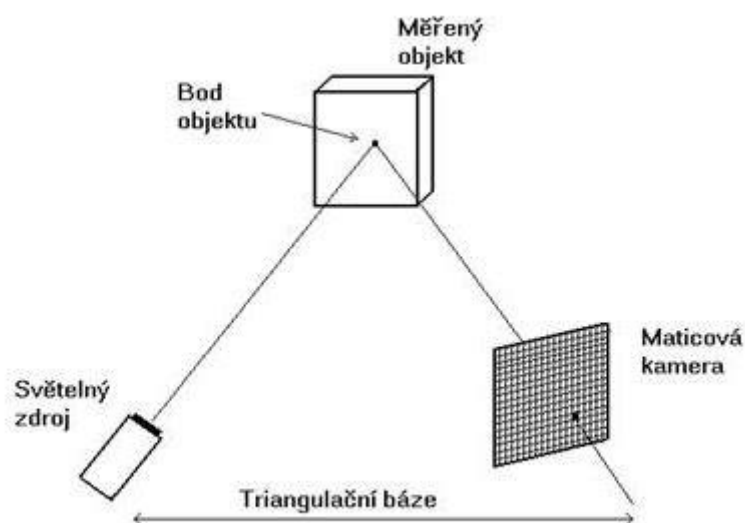
Popsaná metoda platí pro snímání pomocí kamery, optické skenování však zná ještě jeden způsob snímání a to pomocí fotoaparátu, kdy u snímaného předmětu je položena kalibrační měrka, díky které systém spočítá vzdálenost jednotlivých bodů. S měrkou nesmí být během celého procesu pohnuto, aby byly výsledky relevantní. [7][9][11]

1.3 Triangulace

Optické skenery používají pro zachycení třetího rozměru objektu takzvanou triangulaci. Princip triangulace je založen na situaci, kdy se paprsek odráží od skenovaného předmětu pod konstantním úhlem, tak vzdálenost dopadu odraženého paprsku na čelo senzoru je úměrná vzdálenosti snímaného předmětu od čela senzoru. To znamená, že se vlastně nevyhodnocuje intenzita dopadajícího paprsku ani doba jeho letu, ale místo, na které odražený paprsek dopadl. Z tohoto důvodu je skenování výrazně spolehlivější a odolnější proti rušení, protože podmínkou skenovatelnosti je pouze schopnost optického přijímače senzoru zaznamenat dopad odraženého paprsku s jakoukoliv intenzitou, která bude větší než minimální detekovatelná. Tuto metodu se rozdělujeme na aktivní a pasivní triangulaci. [17]

1.3.1 Aktivní triangulace

Technika aktivní triangulace se zakládá na fotogrammetrické rekonstrukci skenovaného předmětu nasvícením jeho povrchu světelným paprskem (zdrojem) a současným snímáním pomocí CCD snímače. Zdroj světla, snímač a bod na objektu nám vytvoří tzv. triangulační trojúhelník. [18][19]



Obrázek 6 Triangulační trojúhelník [19]

Spojnicí mezi světelným zdrojem a snímačem nazýváme triangulační báze. Úhel mezi zdrojem a bází je neměnný, mění se úhel na straně snímače a to na základě proměnné pozice vysvíceného bodu CCD snímače. Z velikosti tohoto úhlu a díky znalosti triangulační báze a parametrů kamery lze určit z-ovou souřadnici předmětu. Mezi úskalí této metody se řadí konkavita (vydutost) objektu, plochy kolmé na obrazovou rovinu, plochy rovnoběžné ke zdroji světla a povrch, jeho materiál a barva. [18][19]

1.3.2 Pasivní triangulace

Pasivní v názvu této triangulace znamená, že zde není uvažováno geometrické uspořádání osvětlení. Základem této metody je pořízení minimálně dvou snímků z různého pohledu. Používají se tyto základní techniky – více kamer (se známou orientací nebo se samokalibrací), jedna kamera (v různých polohách se samokalibrací) nebo jedna kamera a pohybující se objekt (technika „tvar z pohybu“). Pro dynamické systémy se většinou využívá více kamer a aplikuje se znalost relativních poloh nebo samokalibrujících se metod nebo je využito pohybu objektu pro získání více pohledů i jednou kamerou. Pro statické scény lze využít jedné kamery, z které získáme snímky dvou a více pohledů. [18][19]

1.4 Principy pořízení obrazu

Objekt je možné snímat, když jsme schopni přijmout jím vyzařované vlnění, ať již to, které vyzařuje samotný snímaný předmět nebo vlnění, které objekt odráží. Objekty je možné zobrazovat pomocí tří druhů energie.

1.4.1 Elektromagnetické záření

To zahrnuje gama záření, rentgenové a ultrafialové záření, dále viditelné záření, infračervené záření, mikrovlny až po rádiové vlny. Část záření se od pozorovaného objektu odráží a část jím projde a část je vstřebána samotným předmětem. Záleží na vlastnostech zkoumaného objektu jako například povrchové vlastnosti, materiálové vlastnosti a teplota předmětu a na vlastnostech elektromagnetického záření, zejména na vlnové délce, která je s objektem v kontaktu. [41]

1.4.2 Záření částic

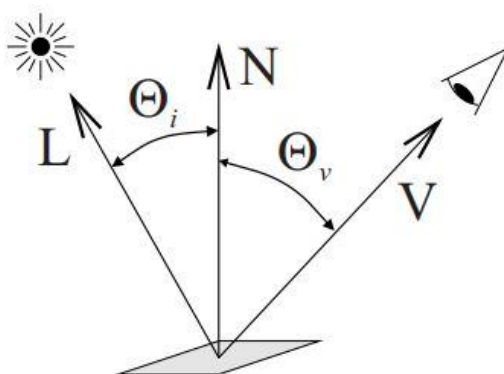
Tam spadá například záření elektronů, které se využívá u elektronového mikroskopu a záření neutronů. [41]

1.4.3 Akustické vlny

Zde je rychlost šíření akustických vln přímo úměrná elastickým vlastnostem látky, kterou prostupuje. Na tomto principu pracuje sonar, který používá ultrazvuk nebo lékařská sonografie, která je založena na registraci ultrazvuku odraženého od tkání. [41]

1.5 Koeficient odrazivosti

Koeficient odrazivosti nebo také albedo udává, jak velký podíl dopadající energie je odražen zpět do prostoru $\rho(\lambda) = \frac{E_r(\lambda)}{E_i(\lambda)}$, kde $E_i(\lambda)$ je intenzita záření dopadajícího na plošku povrchu objektu a $E_r(\lambda)$ je intenzita vyzářená zpět po odrazu. λ odpovídá vlnové délce elektromagnetického záření. Koeficient odrazivosti závisí na vlnové délce dopadajícího záření, vlastnostech povrchu místa dopadu (schopnost pohlcovat záření) a na třech úhlech, které popisují vzájemný vztah mezi směrem ke zdroji světla L , k pozorovateli V a lokální orientací danou normálou n . Kosiny těchto úhlů můžeme zapsat jako skalární součin vektorů a proto je funkce odrazivosti R popsána třemi součinu skalárních vektorů: $R = R(N * L, N * V, V * L)$. [41]



Obrázek 7 Popis směrových vektorů ke světelnému zdroji a pozorovateli [42]

Odráživost povrchu materiálu se nachází vždy někde mezi dvěma extrémy. Lambertovský a ideální zrcadlový povrch.

1.5.1 Lambertovský povrch

Lambertovský nebo také ideálně matný, ideálně difúzní povrch, odráží světelnou energii rovnoměrně do všech směrů a proto je také záře (jas) ze všech směrů konstantní, tzn., nezávisí na směru pohledu. Název je odvozen od Johanna H. Lamberta a jeho knihy Photometria vydané v roce 1760, v které bylo zároveň poprvé použito slovo albedo. Dokonale matný tedy lambertovský povrch neexistuje, ale nejvíce se mu přibližují a lze tedy jejich odrazivost považovat za lambertovskou: bílý piják s koeficientem odrazivosti 0,8, bílý psací papír 0,68, bílý strop nebo žlutý papír 0,6. Tmavě hnědý papír 0,14 a tmavý samet 0,004. Tyto materiály odpovídají přibližně středu viditelného spektra. [41][42]

1.5.2 Ideální zrcadlový povrch

Ideální zrcadlový povrch odráží záření na základě zákona odrazu (úhel dopadu se rovná úhlu odrazu). Vlastní povrch tedy není vidět, ale ukazuje pouze zdánlivý zrcadlově převrácený obraz zdroje osvětlení. [41][42]

1.6 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je obor, jehož účelem je získat polohové informace o snímaném objektu za pomoci snímků daného objektu. Tato metoda se využívá zejména v zeměměřičství (geodézii), kdy se zemský povrch snímá pozemně, letecky či z družic. Z těchto snímků získáme informace o jednotlivých bodech v podobě polohy a z té jsme dále schopni určit tvar, velikost a umístění. Fotogrammetrie existuje dvojího druhu – jednosnímková a dvousnímková. Z jednosnímkové získáváme pouze rovinný obraz a navíc je tato metoda poměrně málo přesná. Zatímco dvousnímková využívá snímků z dvou různých poloh a vzdálenost mezi nimi se nazývá fotogrammetrická základna. Díky tomu nám vznikne 3D model a známe tedy polohu i výšku. Ve strojírenství je využíváno právě dvousnímkové metody, aby byl zachycen 3D model měřeného objektu. [4][21][22]

Označení fotogrammetrie (činnost zabývající se měřením světelných záznamů) vzniklo jako složenina tří řeckých slov photos (světlo), gramma (záznam – napsáno) a metron (měřit). Název pro tento obor se připisuje Albrechtu Meydenbauerovi, který byl průkopníkem dokumentace historických staveb v Německu v druhé polovině 19. století. [21][22]

1.7 Vhodnost materiálů ke skenování

Skenovat můžeme jakýkoliv materiál. Problém nastává v případě, že se jedná o materiály lesklé (například broušené povrchy), poloprůhledné či průhledné, zde je nutné tyto povrchy upravit pomocí nástříku.

1.7.1 Rozptyl světla

Jelikož optický skener využívá ke skenování světlo, tak je jasné, že rozptyl světla má na výsledný obraz vliv. Světlo rovnoběžných paprsků, které dopadnou na rovinné rozhraní, bude zase rovnoběžné. Pokud ovšem rozhraní není rovinné, tak se paprsky odrazí všemi směry a tím pádem dochází k rozptylu světla. Pokud by tedy k odrazu světla ať už na rovinném či nerovinném rozhraní nedocházelo, snímač by neměl co zachytit a vyhodnotit. Proto nelze skenovat průhledné či průsvitné materiály bez úpravy povrchu. [14]

1.7.2 Vliv barvy na skenování

S rozptylem světla a se skenováním samotným úzce souvisí barva skenovaného objektu. Každá barva má své specifické vlastnosti a v závislosti na vlnové délce je lépe či hůře skenovatelná. Světlo

definujeme jako viditelný paprsek elektromagnetické vlny s vlnovou délkou v rozmezí 380-780 nm. Viditelné světlo můžeme rozdělit do sedmi spektrálních barev od barvy s nejkratší vlnovou délkou: fialová, indigová modř, modrá, zelená, žlutá, oranžová a červená. Pokud všechny tyto barvy zkombinujeme, vznikne bezbarvé sluneční světlo. Lidské oko vnímá barvy objektu, jelikož odražené viditelné světlo nebo světlo procházející objektem, změní světlu vlnovou délku a intenzitu.

Barva	Rozsah vlnových délek	Rozsah frekvencí
červená	~ 625–800 nm	~ 480–375 THz
oranžová	~ 590–625 nm	~ 510–480 THz
žlutá	~ 565–590 nm	~ 530–510 THz
zelená	~ 520–565 nm	~ 580–530 THz
tyrkysová (azurová)	~ 500–520 nm	~ 600–580 THz
modrá	~ 430–500 nm	~ 700–600 THz
fialová (purpurová, nachová)	~ 400–430 nm	~ 750–700 THz

Obrázek 8 Rozsah vlnových délek [16]

Světlo dále dělíme na tři základní barvy, ze kterých jsme jejich kombinací schopni namíchat celou řadu dalších barev. Při tvorbě barev se různě směšují červené (R – red), zelené (G – green) a modré (B – blue) světlo. [15]



Obrázek 9 Tři základní barvy světla [15]

1.8 Moiré topografie

Skener Atos, který byl použit při vzniku této práce, využívá metodu projekční moiré topografie. Moiré metody se zakládají na principu projekce dvou pravidelných struktur na povrch měřeného objektu. Za pravidelnou strukturu můžeme označit lineární či radiální mřížky, matice bodů apod. Po kombinaci dvou struktur vznikne struktura třetí, která je pozorovatelná na povrchu zkoumaného předmětu. Pokud jsou promítány paralelně na sebe, další struktura nevznikne. Pokud však dojde k natočení jedné ze struktur, vznikne třetí struktura s periodou L . [23]

1.9 Skenery Atos

Pro tvorbu této práce bylo využito skeneru Atos II 400 a skeneru o řadu novějšího Atos III Triple Scan od firmy GOM. Tyto skenery, stejně jako ostatní od firmy Atos, jsou založeny na principu triangulace. Jedná se o optické 3D skenery, mezi jejichž součástí patří dvě kamery, projektor a řídicí jednotka. Jak již bylo zmíněno výše, tyto skenery využívají metody moiré topografie, kterou snímají dvě digitální kamery, které jsou osazené optickými čipy s vysokým rozlišením (1,4 milionu bodů pro Atos II a až 8 milionů bodů pro Atos III). Výstupem měření jsou 3D souřadnice bodů (tzv. mrak bodů), které lze přenést do STL dat. Mezi výhody tohoto měření zahrnujeme rychlost měření, vysoká hustota dat (pro Atos II až 28 bodů na milimetr čtvereční a až 1,4 milionu bodů na jeden záběr, pro Atos III až 160 bodů na milimetr čtvereční a až 8 milionů bodů na záběr), flexibilita systému, možnost měřit i lesklé a průhledné objekty (po úpravě povrchu) a měření měkkých objektů. Měření je relativně přesné, řádově se dostáváme až na 0,01 mm. Atos III je novější verzí, liší se optikou kamer a také použitým světlem ozařování. Skener Atos III používá modré světlo na rozdíl od svého mladšího bratra, který disponuje bílým světlem. [2][4][25][26]

Optický skener ATOS II 400	
Hmotnost	5 200 g
Rozměry	490 x 260 x 170 mm
Čas na 1 sken	1 sekunda
Měřený objem	700 x 560 x 560 mm 250 x 200 x 200 mm 55 x 40 x 33 mm
Počet bodů z jednoho skenu	až 1 400 000
Hustota bodů	0,04 - 0,18 - 0,5 mm
Přesnost měření	cca 30 μm

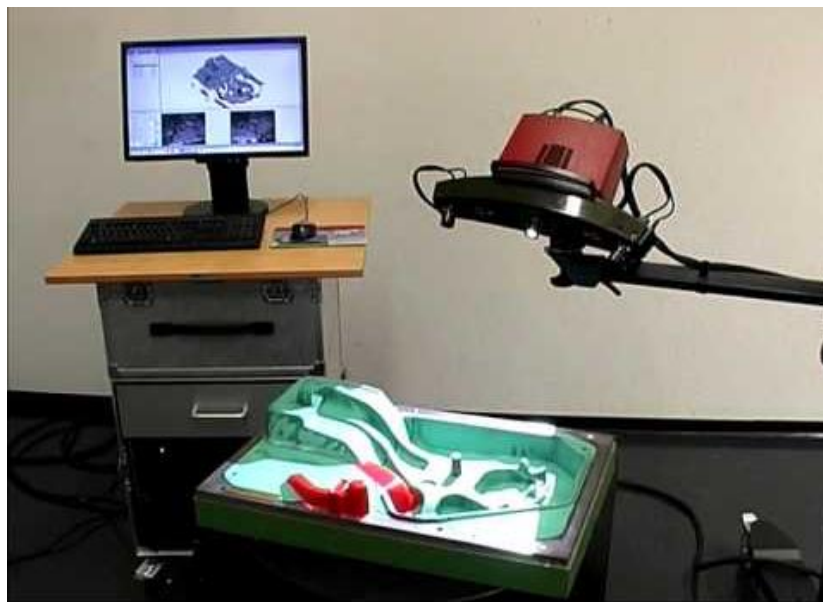
Obrázek 10 Parametry skeneru Atos II [24]

Firma GOM využívá vlastní software, který měří a vyhodnocuje naměřená data, a který si společnost vyvíjí sama. Program Atos Evaluation umožňuje převést mrak bodů do již zmiňovaného STL formátu. Další z Atos programů dokáže pracovat s původními CAD daty – porovnat je s naměřenými daty a vizualizovat odchylky. [26]

ATOS III Triple Scan	
Hmotnost	13 kg
Rozměry	570 x 340 x 240 mm
Čas na 1 sken	1 sekunda
Měřený objem	700 x 530 x 530 mm 320 x 240 x 240 mm 100 x 75 x 75 mm
Počet bodů z jednoho skenu	až 8 000 000
Hustota bodů	0.21 - 0.10 - 0.03 mm
Přesnost měření	lepší než 30 μm

Obrázek 11 Parametry skeneru Atos III

Přesnost vs. rozlišení skenování – tyto dva pojmy bývají často zaměňovány, i když se jejich význam podstatně liší. Přesnost znamená rozdíl mezi skutečnou a naměřenou hodnotou, kdežto rozlišení skenování popisuje nejkratší možnou vzdálenost, kterou je daný přístroj schopný změřit. Čím je rozlišení skeneru vyšší, tím lépe je dané zařízení schopné zachytit jednotlivé detaily na měřeném předmětu. Pro možnost porovnání jednotlivých zařízení různých výrobců bylo zavedeno doporučení VDI/ VDE 2634. [2]



Obrázek 12 Skener Atos II 400 [27]

Dalšími pojmy jsou měřicí objem a oblast skenování. Pod pojmem měřicí objem se ukrývá aktivní prostor, který je digitalizován na jeden záběr. Velikost měřicího objemu se váže k optické soustavě

skeneru, ta je u některých systémů fixní, což není případ skeneru Atos, jelikož ten nabízí výměnu objektivů a tím roste variabilita měřeného objemu. [2][4]

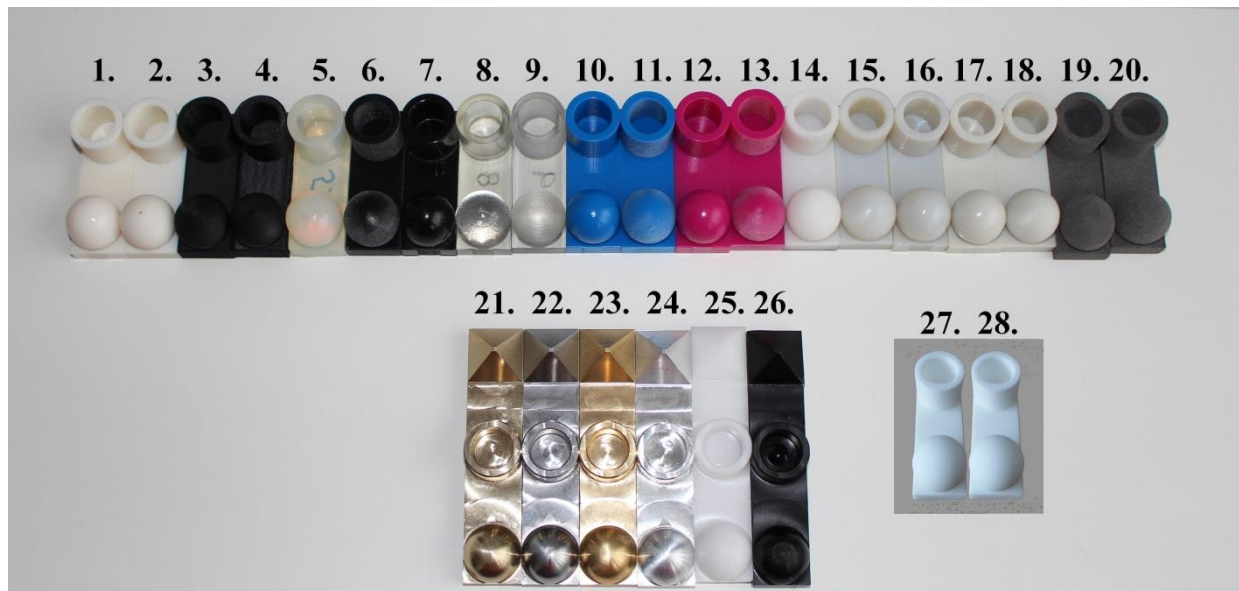
Rychlost skenování znamená počet sejmutých bodů za sekundu, což se občas zaměňuje za počet měření za sekundu, což je parametr, který někteří výrobci uvádějí ve svých materiálech. V takovém případě záleží na principu skenování – velký objem snímků neznámá velké množství změřených bodů. [2]

1.10 STL formát

Formát s koncovkou STL (*.stl) je formát využívaný k zápisu polygonové sítě, která vychází ze stereolitografických CAD programů, které byly vytvořeny firmou 3D Systems a ta jej vytvořila pro technologii 3D tisku. STL je běžně užíváno v reverzním inženýrství, kde soubor popisuje trojrozměrnou povrchovou geometrii tělesa modelu pomocí trojhranných aspektů, které jasně definují přechod mezi materiálem a volným prostorem. STL model je zcela uzavřený. Stejně tak je využíván pro kontrolu kvality při 3D skenování. [4][28][29]

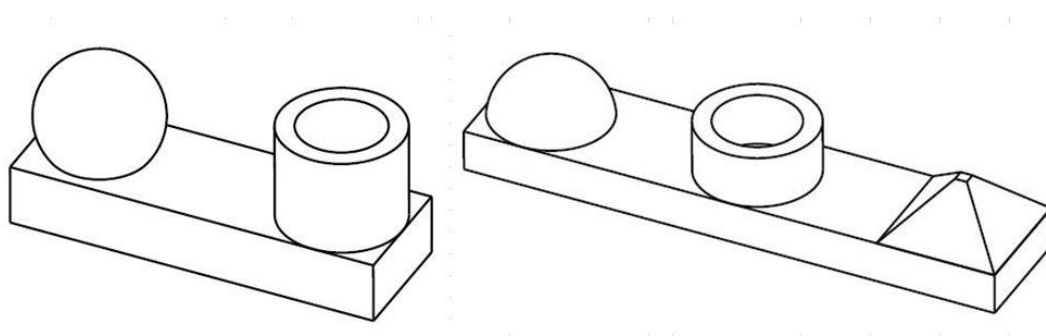
2 Praktická část

Vzorky vytvořené pro tuto diplomovou práci můžeme rozdělit dle výroby do dvou skupin – modely vyrobené konvenčně (tzn. obráběním) a modely vyrobené aditivní technologií (tzn. 3D tiskem).



Obrázek 13 Přehled modelů - tištěné (vrchní řada + 27., 28.) a obráběné (spodní řada 21. – 26.)

Rozdíly, které by mohly být patrné mezi daty získanými pomocí skenování a daty, která byla změřena na dotykovém měřicím přístroji, bylo nutné vytvořit takový model, který by obsahoval měřitelné rozměry. Těmito rozměry se rozumí délka a šířka, dále by mohlo být patrné zkreslení na poloměru koule, pokud by paprsek skeneru prošel pod povrch. Dále byly vytvořeny plochy pro změření vnějšího a vnitřního průměru válce.



Obrázek 14 Modely - pro 3D tisk (vlevo), pro obrábění (vpravo)

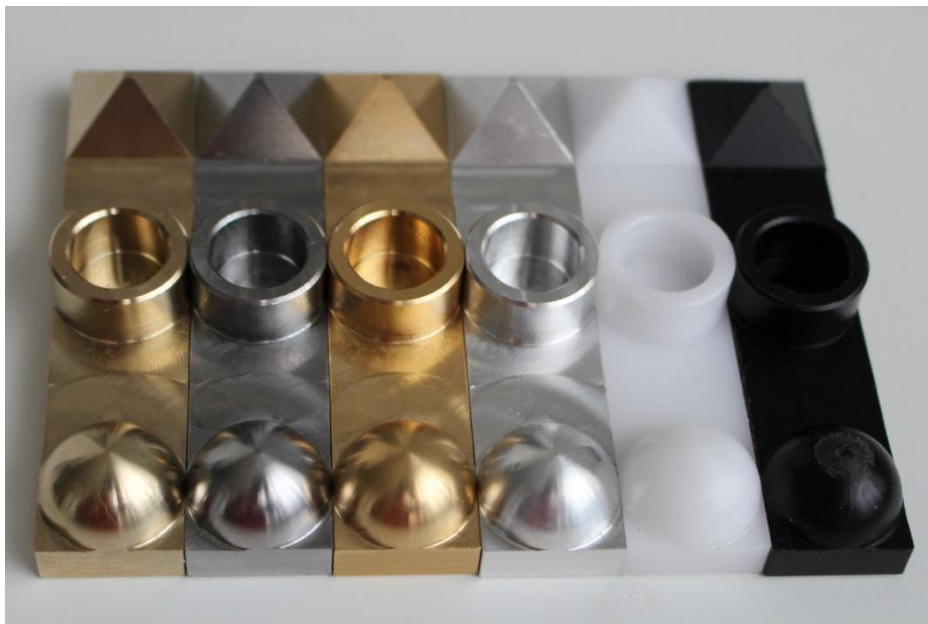
2.1 Konvenční metoda

Konvenční metodou vzniklo pro tuto práci šest vzorků, všechny byly vyráběné na pěti-osém vertikálním centru KAFO KFO-620-5AX. Tento stroj je osazen sklopně-otočným stolem a je určen k výrobě tvarově složitých obrobků při vysoké rychlosti. Díky vysoké tuhosti stroje a lineárním snímačům stolu je dosaženo vysoké přesnosti obrábění. [30]



Obrázek 15 Obráběcí stroj KAFO KFO-620-5AX [30]

Touto metodou vznikly modely z materiálů AMPCO 22, ocel 11 523, mosaz, hliník, teflon a polyamid PA6.



Obrázek 16 Obráběné modely

2.1.1 AMPCO 22

Jedná se o materiál, který vyvinula společnost AMPCO METAL jako jednu ze slitin na bázi mědi. Tyto materiály vynikají nenahraditelnou kombinací fyzikálních a mechanických vlastností. U skupiny AMPCO (ještě existuje druhá skupina AMPCOLOY) se jedná o hliníkové bronzy. Mezi zajímavé vlastnosti patří vysoká tepelná vodivost, velmi dobré kluzné vlastnosti a vysoká odolnost proti otěru. Využívá se na výrobu forem na plasty, pro tváření kovů a ve strojírenství všeobecně (lodní stavitelství, letecký průmysl, odporové svařování). [35]

2.1.2 Ocel 11 523

Jedná se o nelegovanou konstrukční jemnozrnnou ocel vhodnou ke svařování. Využívá se pro mostní a jiné svařované konstrukce i z dutých profilů, pro ohýbané profily a pro součásti strojů, automobilů, motocyklů a jízdních kol. Dále se používá jako součásti tepelných energetických zařízení a jako součásti tlakových nádob vyrobených z tyčí. [36]

2.1.3 Mosaz

Dalším materiálem použitým pro konvenční obrábění byla mosaz, což je slitina mědi a zinku, případně je zinek nahrazen jiným kovem. Mezi vlastnosti se řadí dobrá obrobiteľnosť, korozivzdornost a vodivost. Využívá se v jemné mechanice, elektrotechnice, pro výrobu dalšího kovového zboží a v modelářství. Povrchová úprava pro mosaz bývá leštění, lakování nebo kartáčování a lakování. Další možností povrchové úpravy je patinování, kdy je povrch chemicky zoxidován a ztmaven do požadovaného tónu. [37]

2.1.4 Hliník

Hliník je dalším z použitých materiálů na vzorek. Jedná se o velmi lehký kov, dobrý vodič elektrického proudu. Jeho slitiny patří po oceli mezi nejpoužívanější kovové konstrukční materiály. Dalšími vlastnostmi jsou pevnost při výborné tvárnosti, dobrá svařitelnost, vysoká odolnost vůči korozi, elektrická a tepelná vodivost. [38]

2.1.5 Teflon

Teflonem se označuje polytetrafluoretylen (PTFE), který patří do široké skupiny fluorových polymerů. Vyznačuje se bílou barvou a parafinickým vzhledem. Mezi vlastnosti patří vynikající chemická odolnost proti vysokým teplotám, výborné dielektrické vlastnosti, odolnost proti stárnutí a dobré kluzné vlastnosti. [39]

2.1.6 Polyamid PA6

Jedná se o nejběžnější konstrukční plast vhodný pro širokou škálu výrobků. Vyrábí se extrudováním. Vyznačuje se vysokou pevností a odolností v tlaku a krátkodobou odolností vůči vyšším teplotám, dobře obrobiteľný. Je vysoce nasákvavý. Vyrábí se ve dvou barevných provedeních, bílé a černé. Pro tuto práci byl použit polyamid v černém provedení. [40]

2.2 Aditivní metoda

Aditivní metoda je vlastně pravým opakem klasického obrábění. Při obrábění dochází k odeírání materiálu z polotovaru, jehož rozměry jsou větší než výsledný obrobek, zatímco u aditivní metody je materiál přidáván a spojován, takže se dá říct, že výrobek roste. Touto metodou bylo vyrobeno dvacet dva modelů, které se různě liší technologií výroby, použitým strojem a vlastnostmi materiálu, které

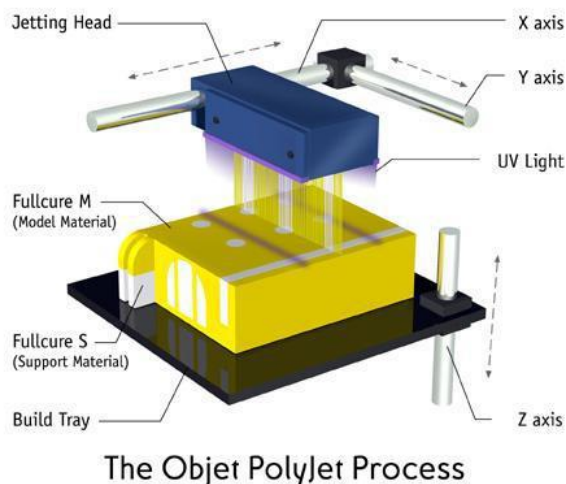
jsou rozpoznatelné na první pohled, tj. barva povrchu a vzhled povrchu, čímž je myšleno, zda je výsledný objekt lesklý či matný. Tvorba proběhla pomocí čtyř technologií – PolyJet, FDM, SLA a SLS.

Tabulka 1 Přehled tištěných vzorků

Technologie	Číslo vzorku	Stroj	Materiál	lesk/mat	kvalita	Doba tisku [h:m]	Spotřeba materiálu
PolyJet	1	J750	PureWhite	lesk	HQ - 14mikro	3:01	51/17g
PolyJet	2	J750	PureWhite	matt	HQ - 14mikro		
FDM	3	Dimension	ABS black	lesk	256mikro - sparse	0:50	8,12/1,28g
FDM	4	Fortus	PC-ABS	lesk	178mikro		
SLA	5	SLA	Durable	x	HQ -50mikro	6:15	19,10ml
PolyJet	6	Objet 500	VeroBlack	matt	HS - 30mikro	1:49	53+8/29g
PolyJet	7	Objet500	VeroBlack	lesk	HS - 30mikro		
PolyJet	8	J750	VeroClear	lesk	HQ - 14mikro	3:01	
PolyJet	9	J750	VeroClear	matt	HQ - 14mikro		
PolyJet	10	J750	VeroCyan	lesk	HQ - 14mikro	3:01	
PolyJet	11	J750	VeroCyan	matt	HQ - 14mikro		
PolyJet	12	J750	VeroMagenta	lesk	HQ - 14mikro	3:01	
PolyJet	13	J750	VeroMagenta	matt	HQ - 14mikro		
FDM	14	Dimension	ABSwhite	lesk	256mikro - sparse	0:50	8,12/1,28g
PolyJet	15	Objet 500	ABS_like	matt	DM - 30mikro	1:48	37+28/31g
PolyJet	16	Objet500	ABS_Like	lesk	DM - 30mikro		
PolyJet	17	J750	VeroGrey	lesk	HQ - 14mikro	3:01	
PolyJet	18	J750	VeroGrey	matt	HQ - 14mikro		
SLS	19	Sintratec Kit	Sintratec PA12	matt	100mikro		
SLS	20	Sintratec Kit	Powder	matt	100mikro		
SLS	27	Sintratec Kit	PA 2200	matt			
SLS	28	Sintratec Kit	PA 2200	matt			

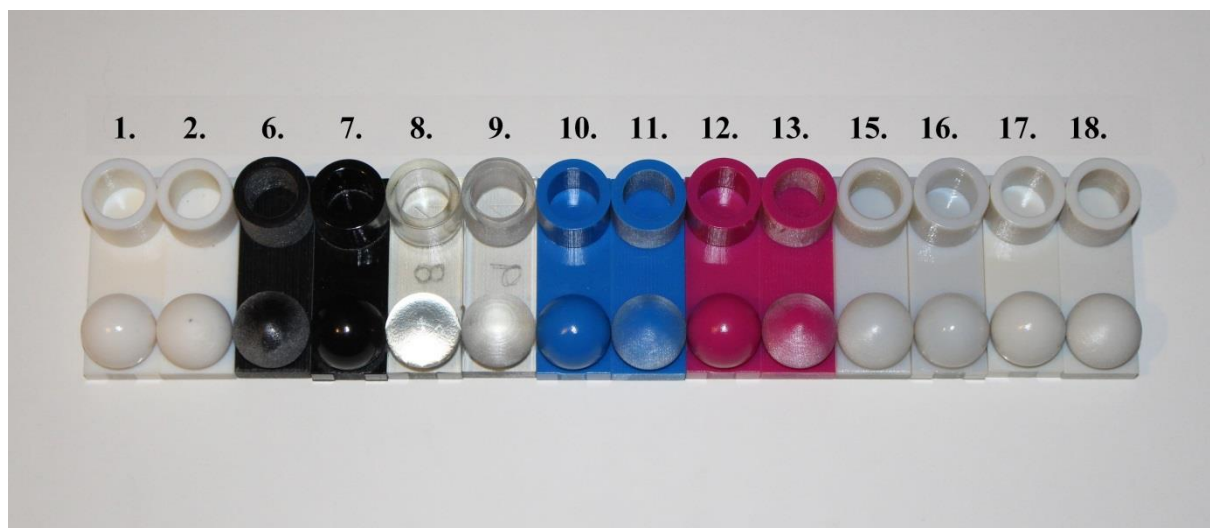
2.2.1 Technologie PolyJet

Tuto technologii si v roce 2000 patentovala a představila firma Objet. Tato technologie se zakládá na bázi tryskání nejrůznějších fotopolymerních materiálů v tenkých vrstvách o tloušťce 16 mikronů. Technologie PolyJet Matrix umožňuje tryskání více různých typů materiálů současně. Laboratoře Technické univerzity jsou vybaveny tiskárnou Objet Connex 500, která je určená pro výrobu rozměrných modelů o rozměrech až 490 x 390 x 200 mm, s přesností stavby 0,1 mm při tloušťce vrstvy 0,016 nebo 0,03 mm. A tiskárnou Stratasys J750, která je první plnobarevnou multi-materiálovou 3D tiskárnou na světě. Tento stroj umožňuje kombinovat pevné, pružné a i průhledné materiály a to až šest materiálů najednou, přičemž jejich kombinací vzniká až 360 tisíc barevných odstínů, které vznikají přímo v tiskárně. Velikost tisknutelných objemů a přesnost je stejná jako u tiskárny Objet. [31][32]



Obrázek 17 Princip technologie PolyJet [32]

Pro diplomovou práci bylo technologií PolyJet vytvořeno 14 vzorků celkem ze sedmi různých materiálů (PureWhite, VeroBlack, VeroClear, VeroCyan, VeroMagenta, ABS_Like a VeroGrey).



Obrázek 18 Vzorky - technologie PolyJet

PureWhite (vzorky č. 1. a 2.) – RGD837 – pevný, neprůhledný a rozměrově stabilní materiál s hladkou povrchovou úpravou. [43]

VeroBlack (vzorky č. 6. a 7.) - RGD850 – tento materiál vyniká kombinací rozměrové stálosti a detailů při simulaci neprůhledných a tuhých plastů. Dále poskytuje rychlé prototypování modelů. Tento fotopolymer se vyznačuje vysokou odolností a silou a je k dispozici ve čtyřech barevných provedeních: šedá, černá, bílá a modrá. Pro tuto práci byly vytvořeny černé (č. 6 a 7) a šedé vzorky (č. 17 a 18). Jejich využití čítá celou škálu oblastí od master-modelů pro silikonové formování, přes tisk pohyblivých sestav, přes hračky po architekturu, zkrátka nejrůznější obory, kde je požadován detail, funkčnost a povrchová úprava (např. chromování). [31]

VeroClear (vzorky č. 8. a 9.) – RGD810 tento materiál je transparentní, tuhý, téměř bezbarvý, s osvědčenou rozměrovou stabilitou, vhodný pro všeobecné použití. Jedná se o transparentní fotopolymer, který simuluje jemné detaily modelů, vizuálně i zmíněnou stabilitou průhledné termoplasty jako je PMMA. PMMA – polymethylmethakrylát, obecně známý pod názvem plexisklo. [31]

VeroCyan (vzorky č. 10. a 11.) - pevný, neprůhledný materiál, který kombinuje rozměrovou stálost a vhodnost vytvoření jemných detailů. Pro svoji barvu se používá pro prodejní a výstavní modely, dále se využívá pro silikonové lití. [43]

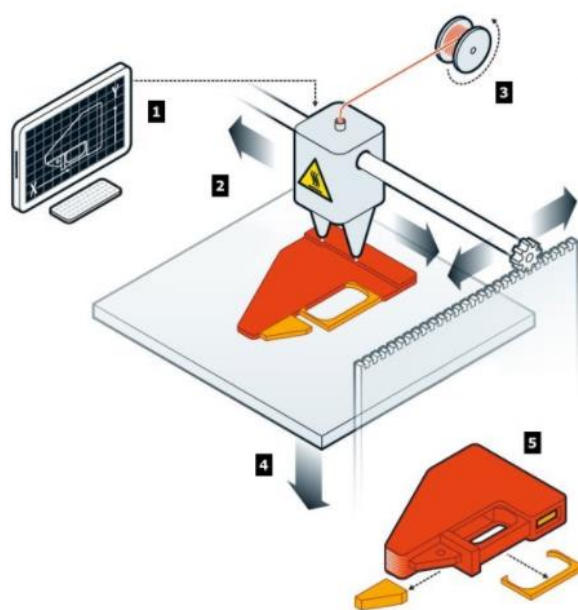
VeroMagenta (vzorky č. 12. a 13.) – stejný materiál jako VeroCyan, liší se pouze barvou.

ABS_like (vzorky č. 15. a 16.) – těžký, pevný materiál v barvě slonoviny, tepelně a proti nárazu odolný. Jedná se o dvoukomponentní digitální materiál. Využívá se k výrobě funkčních prototypů, elektrických součástí, pouzder mobilních telefonů a částí motorů a jejich krytů. Dále se využívá pro výrobu vstříkovacích forem. Mezi jeho výhody se řadí výjimečná rozměrová stabilita, možnosti tvorby tenkých stěn a vhodnost pro jemné detaily. [43]

VeroGrey (vzorky č. 17. a 18.) – viz VeroBlack

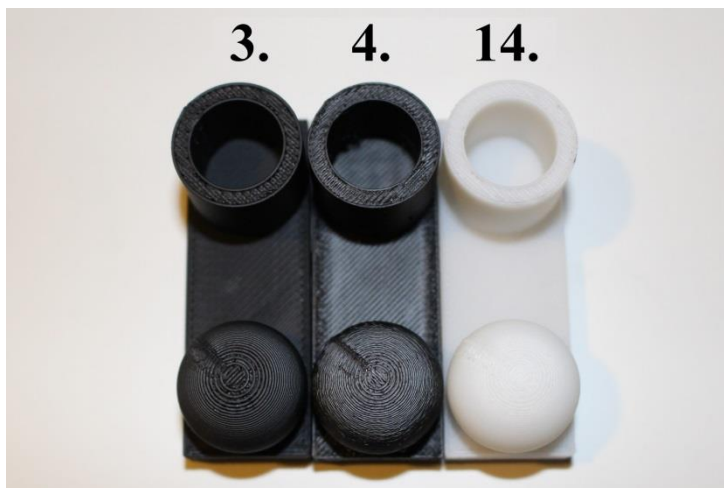
2.2.2 Technologie FDM

FDM neboli Fused Deposition Modeling v překladu modelování nataveným materiálem je technologie, jejíž princip výroby je znázorněn na následujícím obrázku.



Obrázek 19 Princip FDM technologie [31]

Nejprve je zpracován vstupní impulz v podobě 3D dat (ve formátu *.stl) v příslušném softwaru. Pohyb vykonávají tiskové trysky, které natavený termoplast „nalepují“ na vznikající model. Stavba probíhá ze dvou materiálů zároveň, podpůrného a stavěcího, kdy podpůrný materiál je po dokončení tisku odstraněn. FDM je čistá a jednoduchá technologie. Vytisknuté díly jsou odolné vlivu tepla, chemikálií, vlhkých a suchých prostředí a také na mechanické namáhání. [31]



Obrázek 20 Vzorky - technologie FDM

ABS black (vzorek 3.) – mechanicky pevný a stabilní materiál, jedná se o materiál nabízející v technologii FDM nejširší paletu barev (např. slonová kost, fluorescenční žlutá aj. po možnost volby vlastní barvy). [31]

PC-ABS (vzorek 4.) – tento materiál je kombinací dvou termoplastů PC a ABS. Z vlastností PC si bere pevnost a tepelnou odolnost a z ABS zase pružnost. Tato směs je běžně používaná v automobilovém průmyslu, pro elektrické a telekomunikační aplikace. Jedná se o jeden z nejvíce používaných termoplastů, je cenově dostupný a vhodný pro výrobky vyžadující pevnost a tuhost v kombinaci s mechanickou a teplotní odolností. K výrobě se používá podpůrného materiálu. [31]

ABS white (vzorek 14.) – viz ABS black.

2.2.3 Technologie SLA

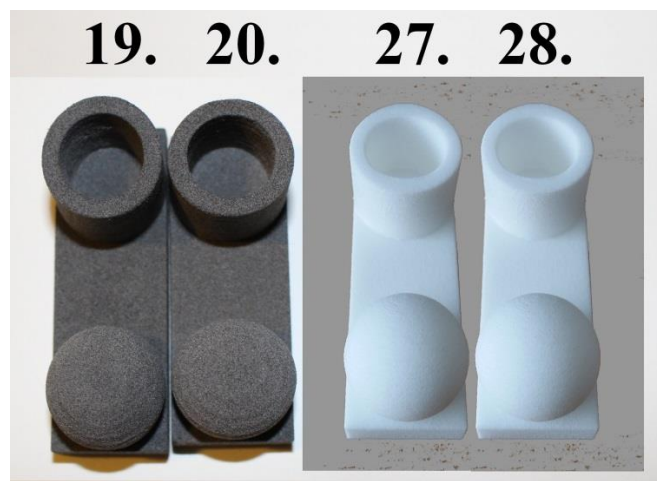
SLA neboli Stereolithography apparatus je technologie pracující na principu vytvrzování vrstvy naneseného polymeru pomocí paprsků UV záření. V místě ozáření vzniká částečně vytvrzený polymer, na který jsou nanášeny další vrstvy. Mezi výhody SLA technologie patří dobrá povrchová drsnost, velký stavební objem, masivní materiál, vysoká přesnost ($\pm 0,05\text{mm}$). Jedná se o nejlepší Rapid Prototyping proces pro nepřímou výrobu nástrojů. Mezi nevýhody patří tvorba pouze uzavřených objemů, viditelné krokování vrstev, horší povrch bočních ploch, křehkost dílů, vysoké náklady (velká vana s pryskyřicí), nutnost dalšího zpracování (vytvrzení) po výtisknutí dílu. [33][34]



Obrázek 21 Vzorek - technologie SLA

2.2.4 Technologie SLS

SLS neboli Selective Laser Sintering je technologie poměrně náročná na energii, při níž dochází k natavování směsi materiálů laserovým paprskem. Při této technologii je vrstven jemný prášek na pracovní desku vyhřívaného stolu, kterou skenuje CO₂ laser. Ten taví prášek a váže ho ke struktuře, která je kolem. Po vychladnutí se díl stabilizuje a je vyjmut z vany. Neroztavený prášek je zrecyklován a použit při dalším tisku. Touto technologií byly vytvořeny dvě dvojice vzorků z dvou odlišných materiálů. Na vzorky 19 a 20 byl použit materiál Sintratec PA 12 Powder a pro vzorky 27 a 28 materiál PA 2200. Vzorek číslo 27 a 28 se od sebe liší pouze orientací v prostoru tiskárny, jeden byl orientován do osy x, druhý do osy y. [33][34]



Obrázek 22 Vzorky - technologie SLS

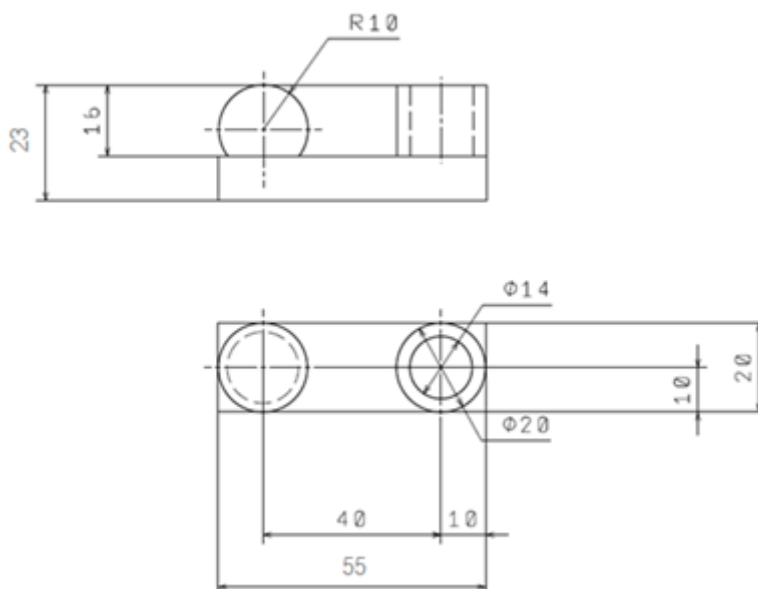
Sintratec PA12 Powder (vzorky č. 19 a 20) – jedná se o základní materiál používaný pro 3D tiskárny společnosti Sintratec, tento práškový polyamid (nylon) umožňuje tisk pevných, teplotně odolných,

přesných a trvanlivých výrobků, materiál zaručuje vysokou stabilitu a rozlišení a je vhodný pro tisk tvarově složitých součástí. [46]

PA 2200 (vzorky č. 27 a 28) – bílý prášek na bázi polyamidu 12 nabízí řadu předností, k nimž se řadí vysoká pevnost a tuhost, dobrá chemická odolnost, vynikající dlouhodobá stálost, přesnost detailů a možnosti následné povrchové úpravy, je vhodný pro širokou škálu aplikací. [47]

2.3 Skenování vzorků

Jak již bylo zmíněno dříve, pro ověření přesnosti měření, byly vytvořeny vzorky s pěti různými rozměry, které byly předmětem zkoumání. Těmi rozměry byla šířka a délka obdélníkové podstavy modelu, průměr koule a vnitřní a vnější průměr válce.



Obrázek 23 Výkres součásti pro 3D skenování

Nejprve bylo zapotřebí získat skutečné hodnoty jednotlivých vyrobených vzorků. Jelikož práce se zabývá skenovatelností povrchů, nešlo nám o porovnávání 3D dat modelu a naskenovaných hodnot, ale o rozdíl reálných náměrů s daty ze skeneru. Proto byly vzorky změřeny dotykovou metodou pomocí souřadnicového měřicího stroje (SMS). Konkrétně se jednalo o stroj značky DEA, model Global 07.10.05. Kde udávaná přesnost stroje dle specifikace výrobce je $MPE_E = 2.5 + L / 333 \mu\text{m}$, $MPE_P = 2.5 \mu\text{m}$. Tyto hodnoty potvrzuje i kalibrační list stroje.

Přesnost stroje:

Specifikace podle výrobce stroje

$MPE_E = 2.5 + L / 333 \mu\text{m}$

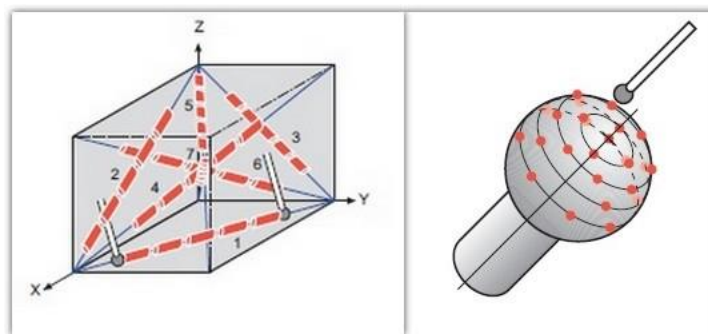
$MPE_P = 2.5 \mu\text{m}$

L ... měřená délka v mm

Obrázek 24 Přesnost stroje DEA, Global 07.10.05

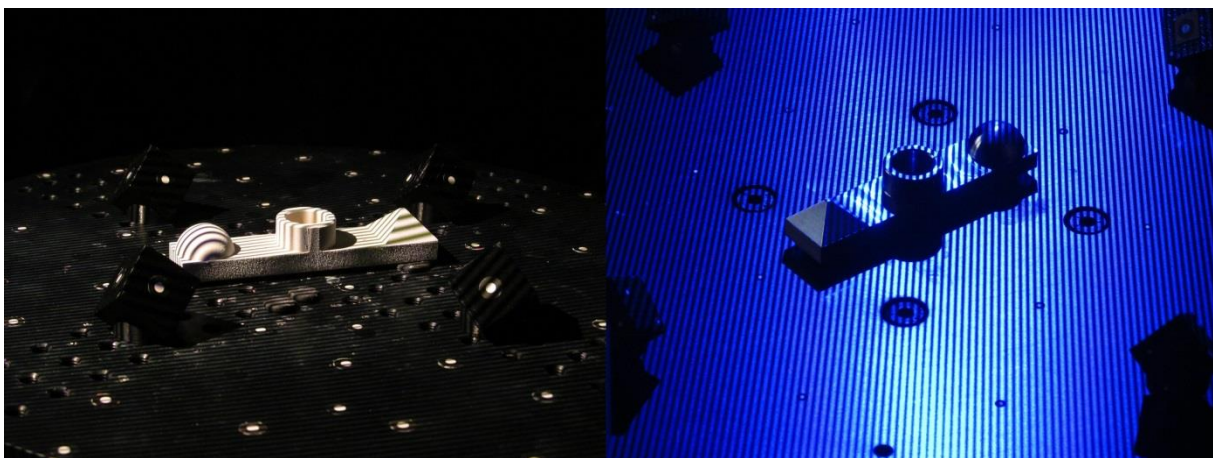
MPE_E = Maximum Permissible Error for length measurement, což znamená maximální přípustná chyba pro měření délky. K určení této chyby měření se měří kalibrované bloky měřicích stupňů nebo měřicí stupnice. V rámci měřicího rozsahu SMS je stanoveno pět různých délek v sedmi polohách dle ISO 10360-2. [44]

MPE_P = Maximum permissible Error for probing, maximální přípustná chyba pro snímání. Pro zjištění chyby snímání se na 25 doporučených pozicích dle ISO 10360-2 zkoumá koule se zanedbatelnou chybou tvaru. Z výsledků se vypočítá takzvaná Gaussova koule nejmenších čtverců, přičemž rozsah radiálních vzdáleností od sebe nesmí překročit specifikaci. MPE_P popisuje chybu SMS pro všechny kontroly tolerance volných tvarů, rovnost, rovinnost, kulatost a cylindricita v režimu jednoho bodu. [44]



Obrázek 25 MPE_E , MPE_P [44]

Vzorky byly měřeny za použití dvou skenerů Atos II a Atos III. Postup měření byl identický na obou přístrojích s jediným rozdílem a to barvou světla osvětlení při skenování vzorků. U skeneru Atos II jsou vzorky osvětlovány bílou barvou, u skeneru Atos III barvou modrou. Kromě toho, že skenovaný objekt je osvětlován, jsou na něj promítány různé vzory proužků, která následně snímají dvě kamery skeneru.



Obrázek 26 Osvětlování vzorků Atos II a Atos III

Před samotným měřením bylo nutné připravit vzorky a pracoviště. Před zahájením měření se zkalibroval skener.

2.3.1 Kalibrace skeneru Atos II (resp. Atos III)

Veškeré seřízení se provádí skrze software GOM Atos Professional a je třeba provést tato nastavení:

- 1) Vybrat vhodné objektivy pro kamery a projektor (zde vybrány objektivy pro měřený objem 250 x 200 x 200 mm)
- 2) Nastavit vhodnou měřicí vzdálenost, ta se pohybuje v rozmezí 300 mm – 730 mm – 1030 mm, pro daný objem je doporučena vzdálenost 730 mm (pro Atos III je to 830 mm)
- 3) Nastavit úhel kamer – přizpůsobení úhlu k nastavené měřicí vzdálenosti (27°)
- 4) Seřídít pomocné laserové ukazovátka, tak aby se protnul paprsky v místě podložky
- 5) Kalibrace přístroje pomocí kalibračního etalonu (postupuje se dle průvodce, kdy je postupně nasnímáno přibližně 20 snímků etalonu z předepsaných pozic [45])

2.3.2 Příprava vzorků

Příprava vzorků obnáší nalepení referenčních bodů na skenovanou oblast (ať již na model nebo stůl skeneru), nástřik antireflexní vrstvy na vzorky a stabilní ustavení vzorku na rotační stůl skeneru.

Nástřik byl použit při druhém skenování. Pro nanesení vrstvy byl použit sprej Helling 3D, laser scanning spray. Tento sprej vyvinula německá společnost Helling, která se výrobou přípravků pro povlakování objektů zabývá. Jedná se zřejmě o křídový prášek s hlavní složkou v podobě uhličitanu vápenatého. Průměrná velikost částice je 0,0028 mm. Jedná se o nejpoužívanější sprej pro zmatnění povrchu u 3D skenování. [4]

Pro stabilní ustavení vzorku na rotační stůl skeneru se využívá různých přípravků, upínek, případně svěráků. V našem případě stačilo vzorek „nalepit“ kouskem modelíny na stůl a tím zajistit jeho stabilitu pro měření a otáčení stolu.



Obrázek 27 Ustavení vzorku na rotační stůl skeneru

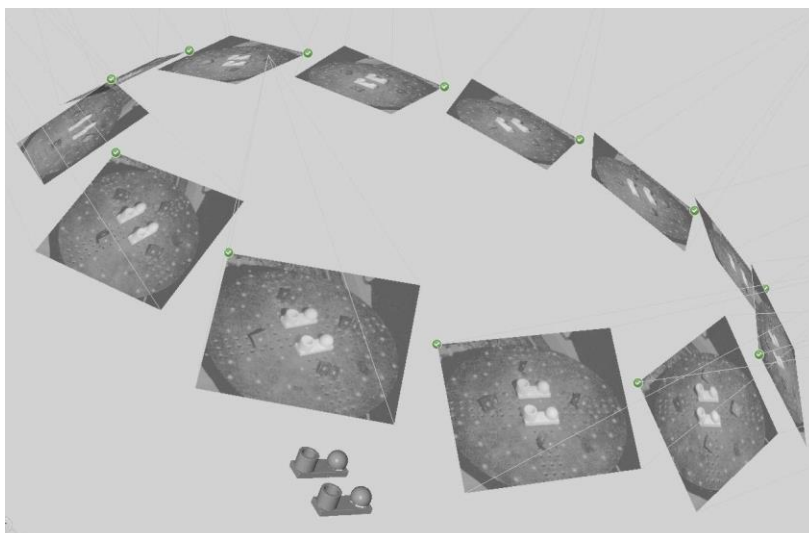
Vzorky byly po většinou skenovány po dvojicích, pokud daná technologie tisku umožňovala dva typy povrchu – lesklý a matný. Obráběné vzorky byly skenovány samostatně po jednom. Jakmile jsme vzorky ustavili na stůl, tak jako další krok následovalo nastavení optimálního expozičního času pro měření.



Obrázek 28 Nastavení času expozice (červená místa upozorňují na přexponovaná místa)

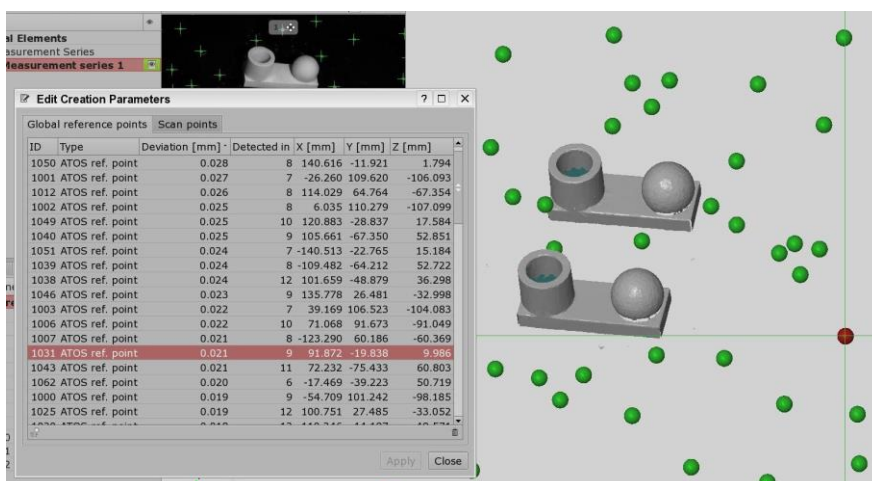
Doba expozice – určuje, jak dlouhou dobu je závěrka otevřena a snímač je tak vystaven působení světla přicházejícího ze scény. [41]

Následovalo samotné skenování objektu, to probíhá v přesně daném počtu kroků (v našem případě 12), kdy se rotační stůl otočí o úhel odpovídající jedné dvanáctině z 360° a v každé pozici vyfotí jeden snímek měřeného objemu. Snímky byly skenovány pod zvoleným úhlem 45° .



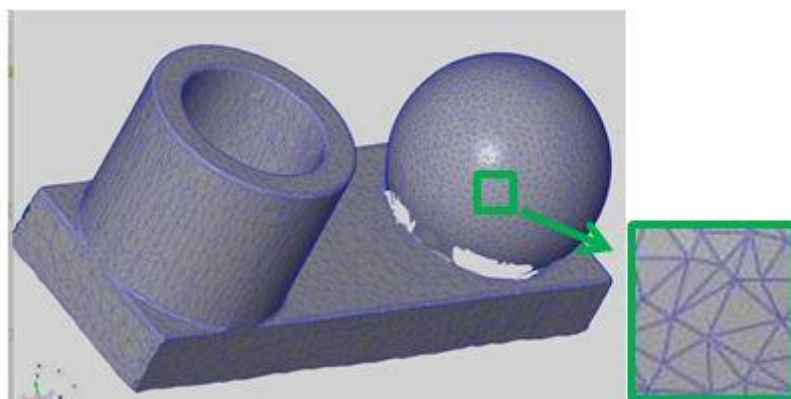
Obrázek 29 Vizualizace pozic skeneru

Po skončení skenování proběhla kontrola ustavení jednotlivých snímků do sebe. K tomu posloužila kontrola přesnosti transformace referenčních bodů.



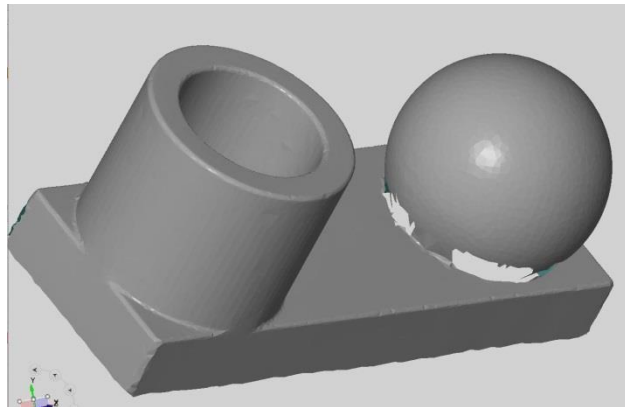
Obrázek 30 Kontrola přesnosti transformace ref. bodů

Následovala tvorba polygonální sítě.



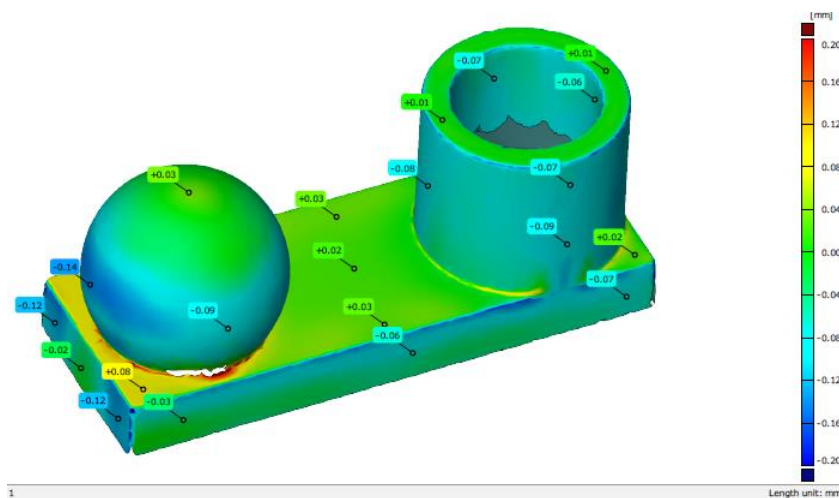
Obrázek 31 Polygonální síť a její detail

Ze vzniklé polygonální sítě došlo k vyexportování meshe ve formátu *.stl.



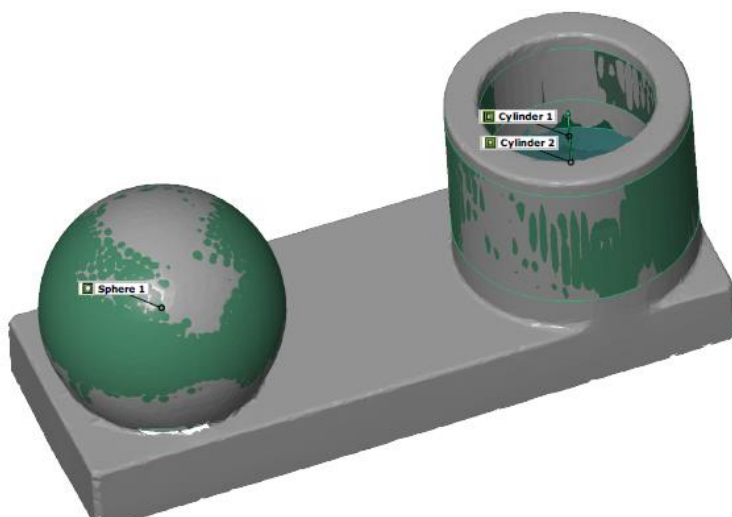
Obrázek 32 Mesh

Po vytvoření meshů pro všechny projekty následovala tvorba reportů v programu GOM Inspect Professional V8. Vzorový report je součástí přílohy této práce. V něm bylo potřeba sesadit na sebe 3D model a naskenovaný mesh. Tímto překrytím jsme již měli vizualizovanou představu o přesnosti. Ovšem jedná se o přesnost skenovaného povrchu a 3D modelu, což není pro tuto práci směrodatné, jelikož si tato práce nebere za cíl přesnost výroby ať už tisku nebo obrábění. Proto není pro nás ani tak zajímavá barevná mapa odchylek, která je jedním z výstupů reportu.



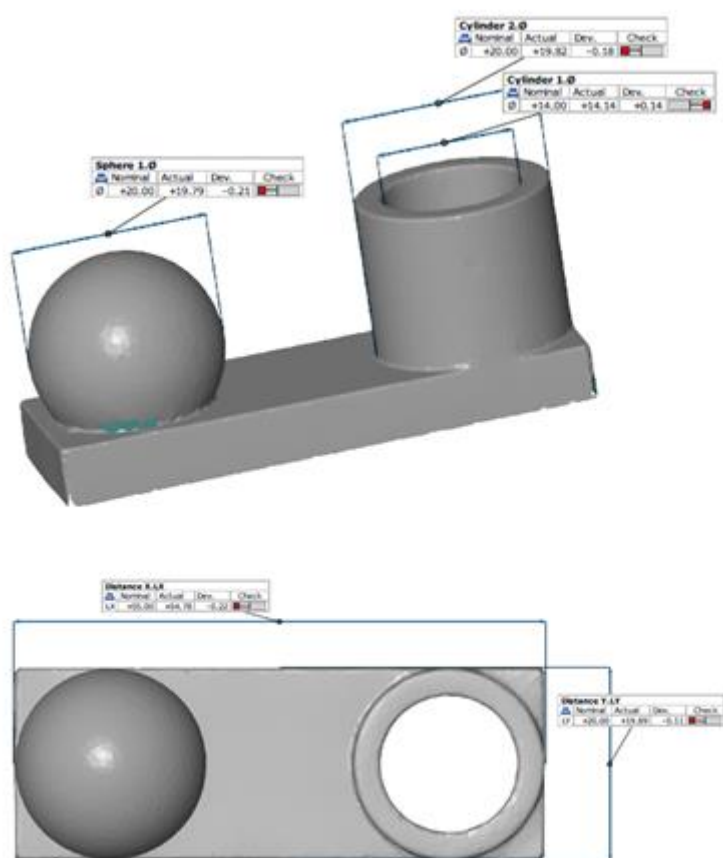
Obrázek 33 Barevná mapa odchylek

Dalším prvkem, který obsahuje report, je vizualizace překrytí meshe a modelu, i když stejně jako barevná mapa není pro tuto práci směrodatná, jelikož se zde porovnává opět mesh s 3D daty.



Obrázek 34 Překrytí meshe s 3D modelem

Jedinými opravdu užitečnými informacemi byly naměřené rozměry meshe.



Obrázek 35 Naměřené hodnoty meshe

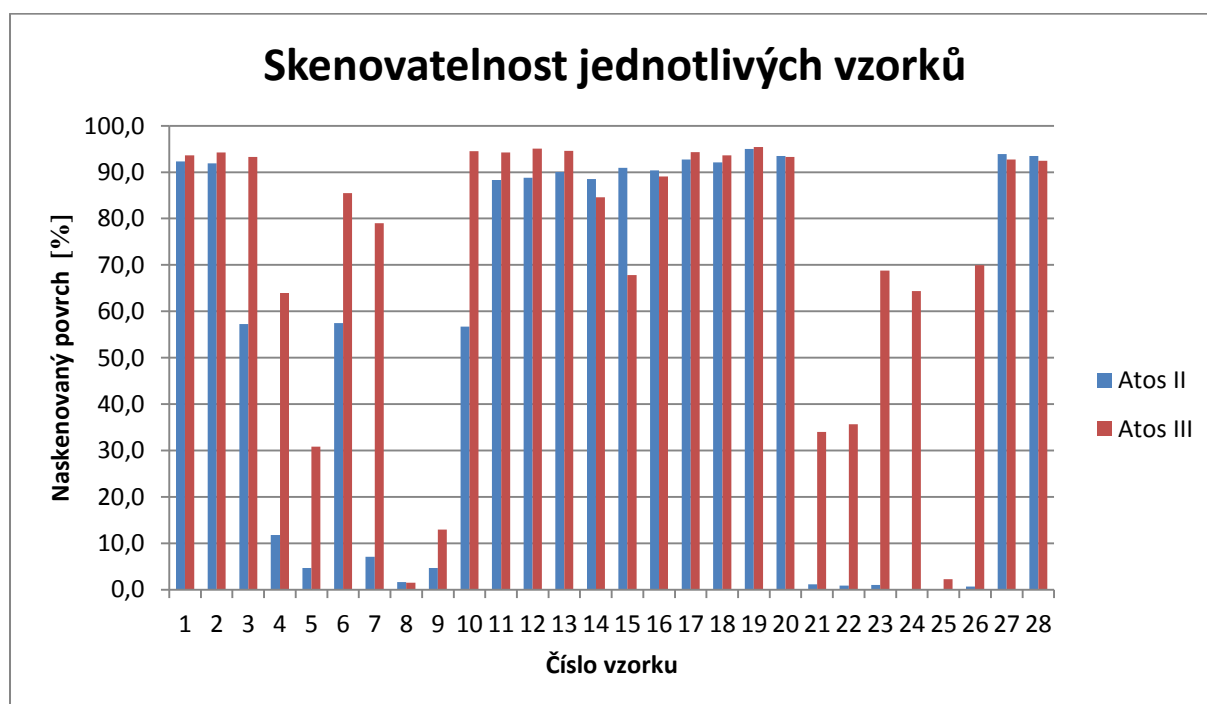
Naměřené hodnoty byly zpracovány v softwaru MS Excel.

2.4 Výsledky měření

Měření proběhlo na dvou skenerech. Prvním z nich byl Atos II a druhým skener o řadu novější Atos III. Porovnání vzorků bylo rozděleno podle dvou kritérií a to dle procenta naskenovaného povrchu a podle přesnosti naměřených dat. Kombinací výsledků bylo možné určit, které materiály je možno skenovat i bez použití nástřiků aniž by došlo ke zkreslení skenovaných dat. Z tohoto rozdělení vzešlo několik skupin materiálů.

Pro rozdělení materiálů dle skenovatelnosti povrchu byly stanoveny tři skupiny:

- Materiály bez nástřiku neskenovatelné, kde naskenovaný povrch byl do 50 %
- Materiály částečně skenovatelné, jejichž naskenovaný povrch se pohyboval mezi 50 – 80 %
- Materiály dobře skenovatelné, kde se procento naskenovatelnosti pohybovalo mezi 80 – 100% povrchu.



Graf 1 Skenovatelnost vzorků

Dalším parametrem rozdělení byla přesnost naskenovaných rozměrů:

- Materiály skenovatelné se špatnými rozměry
- Materiály skenovatelné s dobrými rozměry

2.4.1 Materiály bez nástřiku neskenovatelné (do 50%)

Pro Atos II se jako nenaskenované či naskenovatelné v tak malé míře, že nebylo možné vytvořit mesh, z kterého by bylo následně možné získat nějaká data, ukázala celkem početná řada vzorků,

konkrétně jedenáct, z čehož pět vzorků vyrobených na 3D tiskárnách a všech šest vzorků obráběných. Procento naskenování se pohybovalo do 12 % povrchu u tištěných vzorků.


Tabulka 2 Atos II - Neskenovatelné materiály bez nástřiku (3D tisk)

	technologie	č. vzorku	material	lesk/ mat	naskenování [%]	čas závěrky [ms]	naskenování bez křídly
	FDM	4	PC-ABS	lesk	11,7	125,9	
	SLA	5	Durable	x	4,7	27,4	
	PolyJet	7	VeroBlack	lesk	7,0	94,8	
	PolyJet	8	VeroClear	lesk	1,6	30,5	
	PolyJet	9	VeroClear	mat	4,7	30,5	

Klasicky obráběné vzorky dopadly ještě o něco hůře, hliníkový a teflonový vzorek se nenaskenovaly vůbec a u ostatních čtyř vzorků došlo k digitalizaci nepatrných segmentů, zhruba do jednoho procenta povrchu.

Pro o řadu novější Atos III se jako neskenovatelné jeví šest vzorků. Tři tištěné (vzorek č. 5, 8 a 9) a tři obráběné (č. 21, 22 a 25). Procento skenovatelnosti u některých vzorků dosáhlo až k 36 % povrchu.


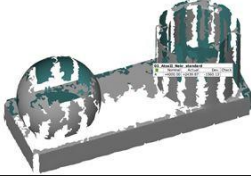
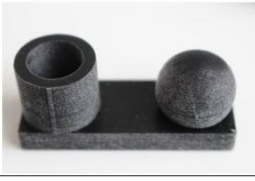
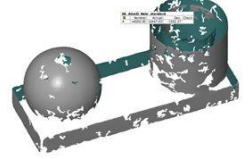


Tabulka 3 Atos III – Materiály neskenovatelné

	technologie	č. vzorku	material	lesk/ mat	naskenování [%]	čas závěrky [ms]	naskenování bez křídly
	SLA	5	Durable	x	30,8	84,0	
	PolyJet	8	VeroClear	lesk	1,5	142,0	
	PolyJet	9	VeroClear	mat	13,0	142,0	
	obrábění	21	AMPCO 22		34,0	400,0	
	obrábění	22	11 523		35,7	295,0	
	obrábění	25	teflon		2,2	39,0	

2.4.2 Materiály částečně skenovatelné (naskenování 50 – 80%)

Mezi materiály, jejichž skenovatelnost se pohybovala mezi 50 až 80 % povrchu se u skeneru Atos II jednalo o tři vzorky, konkrétně o č. 3, 6 a č. 10, kdy všechny vzorky byly naskenovány přibližně na 57 % povrchu.

Tabulka 4 Atos II - Materiály částečně skenovatelné

	technologie	č. vzorku	material	lesk/ mat	naskenování [%]	čas závěrky [ms]	naskenování bez křídly
	FDM	3	ABS black	lesk	57,3	125,9	
	PolyJet	6	VeroBlack	mat	57,5	94,8	
	PolyJet	10	VeroCyan	lesk	56,7	78,2	

Pro skener Atos III byla skupina částečně skenovatelných vzorků o něco početnější, neboť se do této skupiny zařadily vedle tří vzorků tištěných ještě tři vzorky obráběné. Procento naskenování se v tomto případě pohybuje mezi 60 – 80 % povrchu. Největšího procenta naskenování dosáhl vzorek č. 7 PolyJet VeroBlack v lesklém provedení a to 79%. U dvou vzorků ze skupiny obráběných (č. 23 a č. 24) nedošlo i přes celkem vysoké procento naskenovaného povrchu k získání všech pěti měřených hodnot, ale pouze ke čtyřem. U obou vzorků chyběla hodnota vnitřního průměru válce.


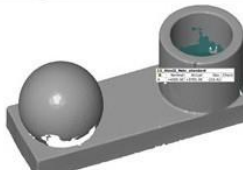
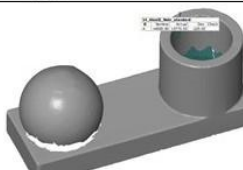

Tabulka 5 Atos III - Materiály částečně skenovatelné

	technologie	č. vzorku	material	lesk/ mat	naskenování [%]	čas závěrky [ms]	naskenování bez křídly
	FDM	4	PC-ABS	lesk	63,9	333,0	
	PolyJet	7	VeroBlack	lesk	79,0	750,0	
	PolyJet	15	ABS_like	mat	67,8	64,0	
	obrábění	23	mosaz		68,8	430,0	
	obrábění	24	hliník		64,4	142,0	
	obrábění	26	polyamid PA6		69,9	750,0	

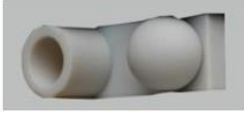
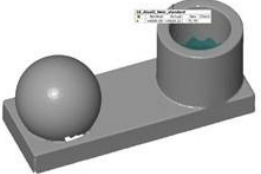
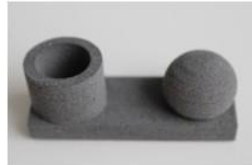
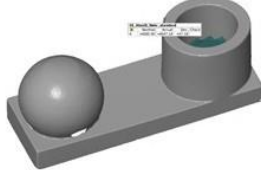

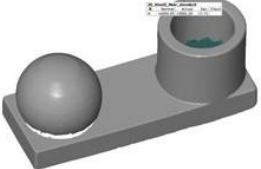
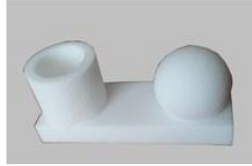
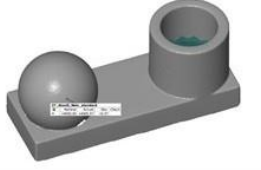

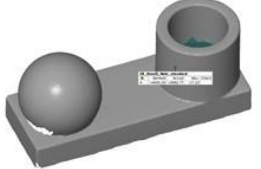
2.4.3 Materiály dobře skenovatelné (naskenování 80 a více %)

Vzorků, které se podařilo naskenovat z více, jak z osmdesáti procent bylo 14 vzorků pro Atos II a 16 vzorků pro Atos III. Skenovaný povrch se pohyboval mezi 88,3 – 95 % pro Atos II a mezi 84,6 – 95,4 % pro Atos III.

Tabulka 6 Atos II - Dobře skenovatelné (část I)

vzorek	technologie	č. vzorku	material	lesk/ mat	naskenování [%]	čas závěrky [ms]	naskenování bez křídly
	PolyJet	1	PureWhite	lesk	92,3	12,6	
	PolyJet	2	PureWhite	mat	91,9	12,6	
	PolyJet	11	VeroCyan	mat	88,3	78,2	
	PolyJet	12	VeroMagenta	lesk	88,8	14,6	
	PolyJet	13	VeroMagenta	mat	90,0	14,6	
	FDM	14	ABSwhite	lesk	88,5	18,3	
	PolyJet	15	ABS_like	mat	90,9	22,0	
	PolyJet	16	ABS_Like	lesk	90,4	22,0	
	PolyJet	17	VeroGrey	lesk	92,7	15,4	

Tabulka 7 Atos II - Dobře skenovatelné (část II)

vzorek	technologie	č. vzorku	material	lesk/ mat	naskenování [%]	čas závěrky [ms]	naskenování bez křídly
	PolyJet	18	VeroGrey	matt	92,1	15,4	
	SLS	19	Sintratec PA12 Powder	matt	95,0	53,8	
	SLS	20	Sintratec PA12 Powder	matt	93,5	53,8	
	SLS	27	PA2200	matt	93,9	10,0	
	SLS	28	PA2200	matt	93,5	10,0	

Tabulka 8 Atos III - Dobře skenovatelné (část I)

vzorek	technologie	č. vzorku	material	lesk/ mat	naskenování [%]	čas závěrky [ms]	naskenování bez křídly
	PolyJet	1	PureWhite	lesk	93,6	45,0	
	PolyJet	2	PureWhite	mat	94,2	45,0	
	FDM	3	ABS black	lesk	93,3	333,0	
	PolyJet	6	VeroBlack	mat	85,5	320,0	
	PolyJet	10	VeroCyan	lesk	94,5	78,0	
	PolyJet	11	VeroCyan	mat	94,3	78,0	
	PolyJet	12	VeroMagenta	lesk	95,1	163,0	
	PolyJet	13	VeroMagenta	mat	94,6	163,0	
	FDM	14	ABSwhite	lesk	84,6	47,0	

Tabulka 9 Atos III - Dobře skenovatelné (část II)

vzorek	technologie	č. vzorku	material	lesk/ mat	naskenování [%]	čas závěrky [ms]	naskenování bez křídly
	PolyJet	16	ABS_Like	lesk	89,1	64,0	
	PolyJet	17	VeroGrey	lesk	94,3	54,0	
	PolyJet	18	VeroGrey	mat	93,6	54,0	
	SLS	19	Sintratec PA12 Powder	mat	95,4	203,0	
	SLS	20	Sintratec PA12 Powder	mat	93,3	203,0	
	SLS	27	PA2200	mat	92,7	34,0	
	SLS	28	PA2200	mat	92,4	34,0	

2.4.4 Materiály skenovatelné se špatnými rozměry

Data vzorků, které spadají do skupin částečně skenovatelné a dobře skenovatelné, byla vyhodnocena na základě porovnání s daty ze skenování vzorků opatřených antireflexní vrstvou. Graficky byla porovnávána data naskenovaných vzorků bez povrchové úpravy na skenerech Atos II a Atos III s daty získanými naskenováním vzorků s antireflexní úpravou ze skeneru Atos II. Pro větší přesnost skenovaných dat byla tato hodnota zmenšena o sílu nanášené vrstvy. Jako síla vrstvy byla použita hodnota 0,015 mm, jejíž velikost dokládá diplomová práce B. Levínské (2017, s. 35). Od naskenovaných rozměrů křídovaných vzorků byl tedy odečten dvojnásobek zmiňované tloušťky,

jelikož rozměry se měří mezi dvěma plochami, na které byla nanášena antireflexní vrstva. Porovnávány byly jednotlivé rozměry zvlášť. Pro lepší vizualizaci výsledků byla data zobrazena pomocí grafů a tabulek. Pro přehlednější orientaci v tabulkách je zde uvedena legenda, která obšírněji popisuje jednotlivé prvky tabulky.

Legenda:

Číslo vzorku: číslo, které bylo vzorkům přiřazeno pro jasnou orientaci mezi výsledky

Technologie: označení technologie, kterou byl vzorek vytisknut (platí pro 3D tisk)

Metoda výroby: rozdělení, zda byl vzorek tisknut nebo obráběn

Materiál: označení vzorku materiálu

Lesk/ mat: rozdělení úpravy povrchu materiálu (platí pro 3D tisk)

Nominal: hodnota získaná dotykovou metodou na souřadnicovém měřicím stroji (SMS)

Křída po odečtu: rozdíl hodnot mezi naskenovaným rozměrem a nominální hodnotou po odečtení tloušťky nanášené vrstvy (Atos II, křídováno)

All Nekřída: rozdíl hodnot mezi naskenovaným rozměrem a nominální hodnotou (Atos II, nekřídováno)

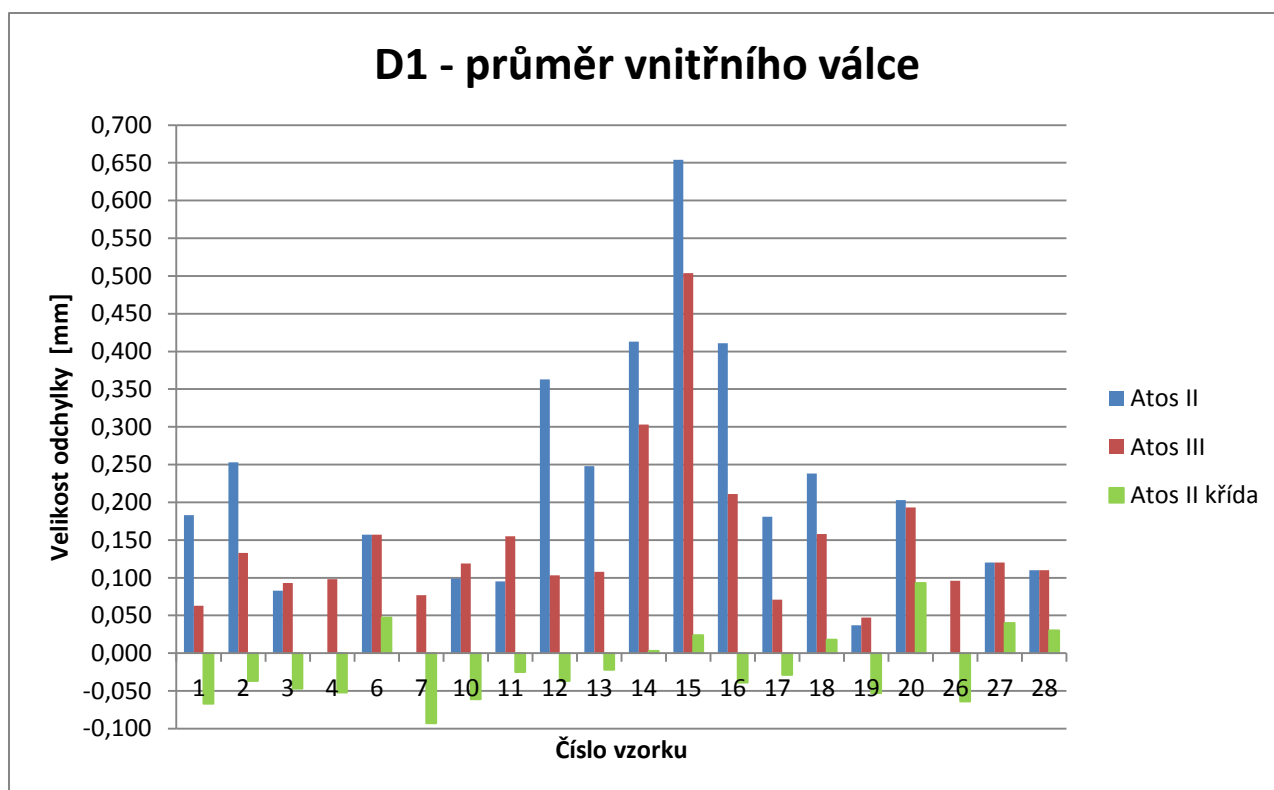
AllI Nekřída: rozdíl hodnot mezi naskenovaným rozměrem a nominální hodnotou (Atos III, nekřídováno)

Atos II Odchylka: rozdíl mezi rozměrem z nekřídovaného skenování (Atos II) s křídovaným rozměrem (Atos II) po odečtení tloušťky křídované vrstvy

Atos III Odchylka: rozdíl mezi rozměrem z nekřídovaného skenování (Atos III) s křídovaným rozměrem (Atos II) po odečtení tloušťky křídované vrstvy

Obrázek 36 Legenda k tabulkám 9 - 13

Prvním z ověřovaných rozměrů byl průměr vnitřního válce. Po antireflexní úpravě povrchu se vnitřní průměry obvykle jeví jako menší nežli skutečně jsou, což je dáno tloušťkou vrstvy na snímaném vzorku, který je o tuto hodnotu větší. Měřené vnitřní průměry jsou tedy zákonitě menší. Tato nesrovnalost by měla být odečtením antireflexní vrstvy odstraněna. To však nemusí platit vždy, jelikož vnitřní průměr je hůře dostupný a proto ani nanášená vrstva nemusí mít konstantní tloušťku.



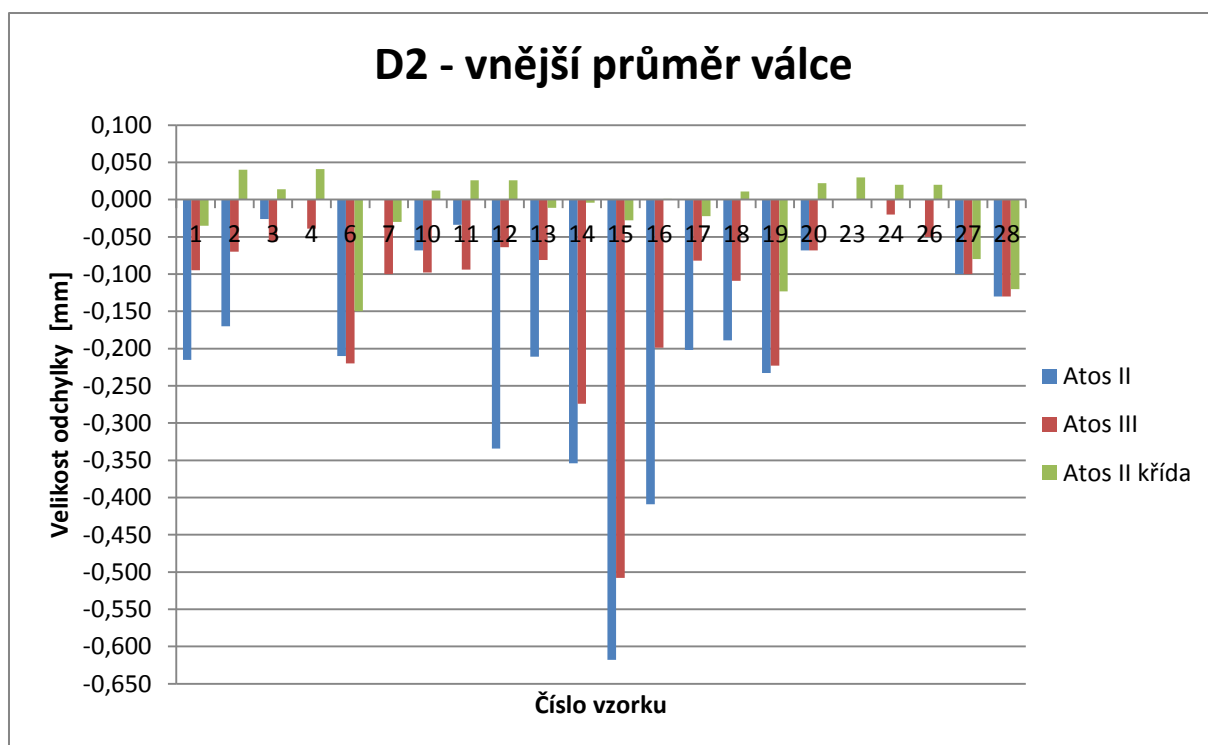
Graf 2 Porovnání přesnosti skenovaných dat (D1)

Z grafu 2 lze vyčíst, že přesnost hodnot bez povrchové úpravy není ani u jednoho ze skenerů moc přesvědčivá. Nejmenší odchylky od křídovaných dat dosáhly vzorky tištěné technologií SLS č. 27 a 28 s hodnotou 0,080 mm a nejhůře dopadl vzorek č. 15, technologie PolyJet z materiálu ABS_like s matnou povrchovou úpravou s odchylkou 0,630 mm pro Atos II a 0,480 mm pro Atos III.

Tabulka 10 Nejpřesnější a nejméně přesné vzorky (D1)

Číslo vzorku	Technologie	metoda výroby	material	lesk/mat	nominal [mm]	křída po odečtu [mm]	All Nekřída [mm]	All Nekřída [mm]	Atos II Odchylka [mm]	Atos III Odchylka [mm]
27	SLS	tisk	PA2200	matt	13,990	0,040	0,120	0,120	0,080	0,080
28	SLS	tisk	PA2200	matt	13,930	0,030	0,110	0,110	0,080	0,080
15	PolyJet	tisk	ABS_like	matt	13,766	0,024	0,654	0,504	0,630	0,480

Dalším rozměrem, který byl v této práci předmětem zájmu, byl vnější průměr válce.



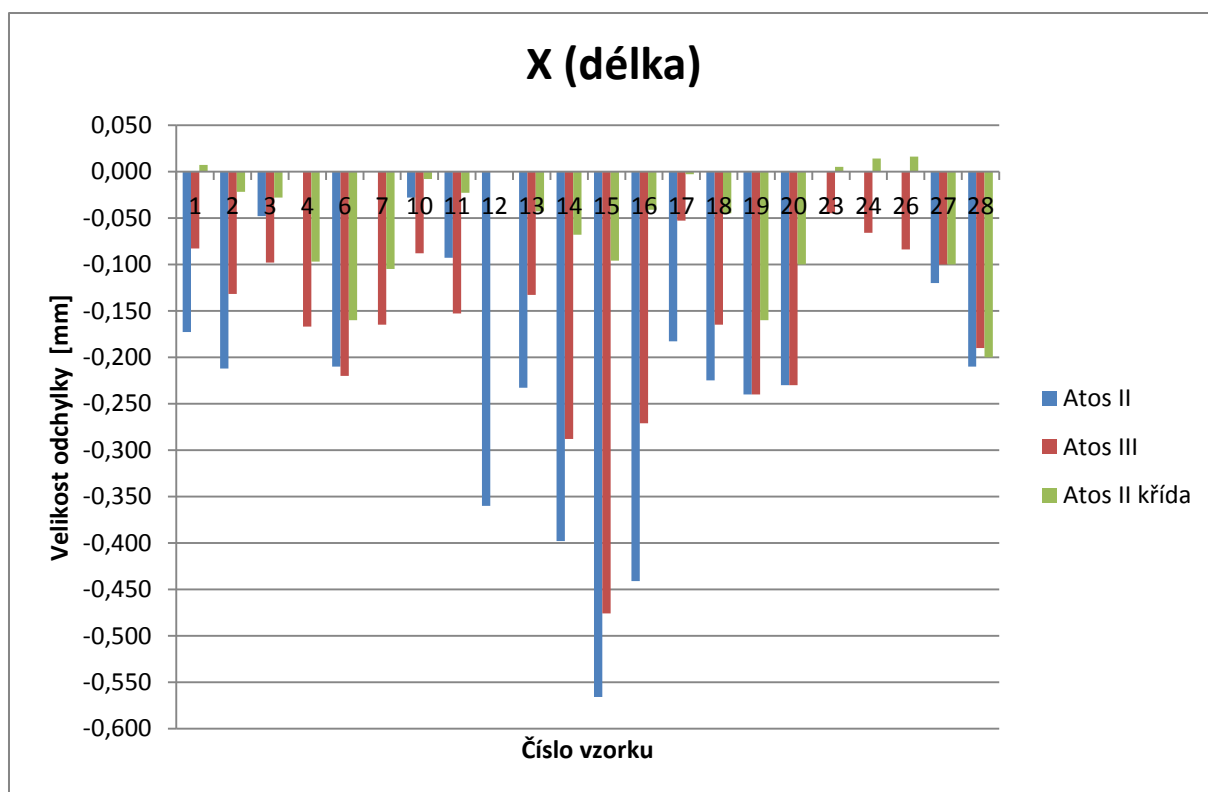
Graf 3 Porovnání přesnosti skenovaných dat (D2)

Při pohledu na graf 3 je zřejmé, že ani tento průměr válce není možné naskenovat se správnými rozměry. Nejmenší odchylku -0,010 mm dosáhl vzorek č. 28 pro oba skenery. Druhým nejpřesnějším výsledkem byl vzorek č. 27 s odchylkou -0,020 mm. Jako nejhorší se ukázal vzorek č. 15 s odchylkami -0,590 mm (Atos II) a -0,480 mm (Atos III).

Tabulka 11 Nejpřesnější a nejméně přesné vzorky (D2)

Číslo vzorku	Technologie	metoda výroby	material	lesk/mat	nominal [mm]	křída po odečtu [mm]	AII Nekřída [mm]	AIII Nekřída [mm]	Atos II Odchylka [mm]	Atos III Odchylka [mm]
28	SLS	tisk	PA2200	matt	19,930	-0,120	-0,130	-0,130	-0,010	-0,010
27	SLS	tisk	PA2200	matt	19,900	-0,080	-0,100	-0,100	-0,020	-0,020
15	PolyJet	tisk	ABS_like	matt	20,228	-0,028	-0,618	-0,508	-0,590	-0,480

Dalším porovnávaným rozměrem byla délka x modelu.



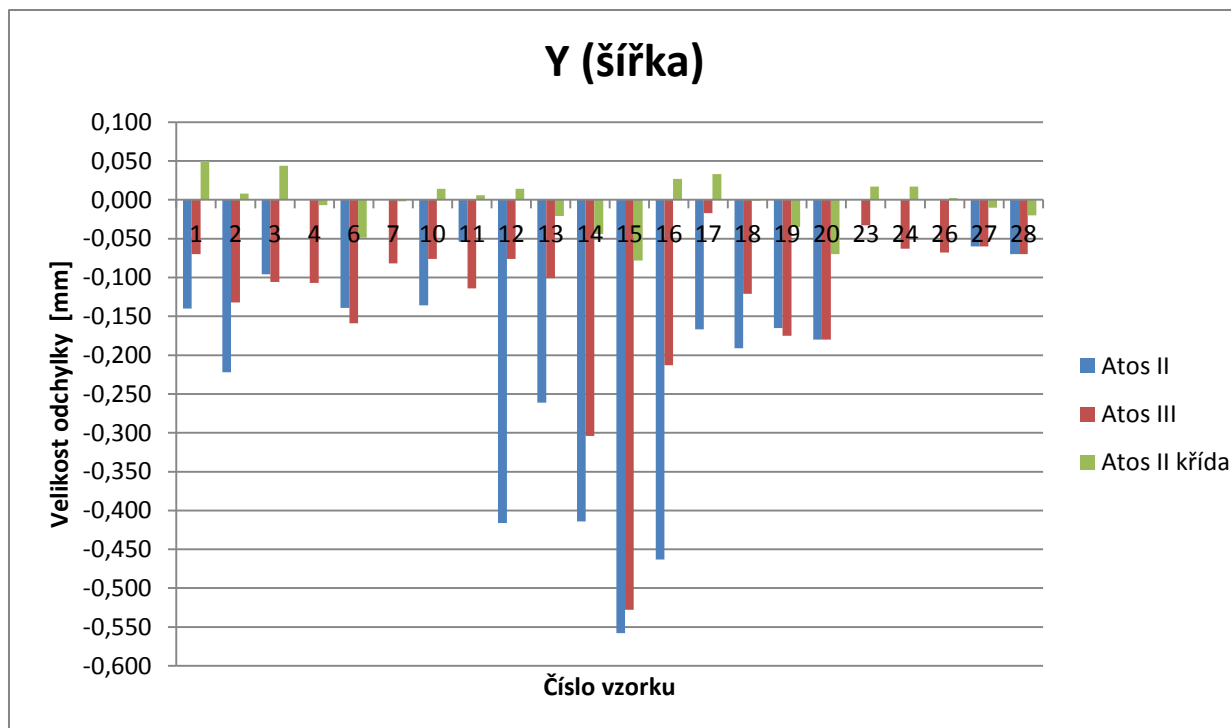
Graf 4 Porovnání přesnosti skenovaných dat (délka X)

Pro délku X, jak je patrné z grafu 4, se hodnoty nejvíce shodují u vzorků č. 28 a 27, kdy u Atosu III se dostáváme na hodnotu odchylky 0,010 mm pro vzorek č. 28 a 0,000 pro vzorek 27. Nejhůře skenovatelným se opět ukazuje vzorek číslo 15, kde nepřesnost dosahuje hodnoty -0,470 mm pro Atos II a o něco lepších - 0,380 mm pro Atos III.

Tabulka 12 Nejpřesnější a nejméně přesné vzorky (délka X)

Číslo vzorku	Technologie	metoda výroby	material	lesk/mat	nominal [mm]	křída po odečtu [mm]	All Nekřída [mm]	AllI Nekřída [mm]	Atos II Odchylka [mm]	Atos III Odchylka [mm]
28	SLS	tisk	PA2200	matt	54,990	-0,200	-0,210	-0,190	-0,010	0,010
27	SLS	tisk	PA2200	matt	54,960	-0,100	-0,120	-0,100	-0,020	0,000
15	PolyJet	tisk	ABS_like	matt	55,076	-0,096	-0,566	-0,476	-0,470	-0,380

Pro další parametr, kterým byla šířka modelu Y, došlo ke stejné velikosti odchylky hned u několika vzorků.



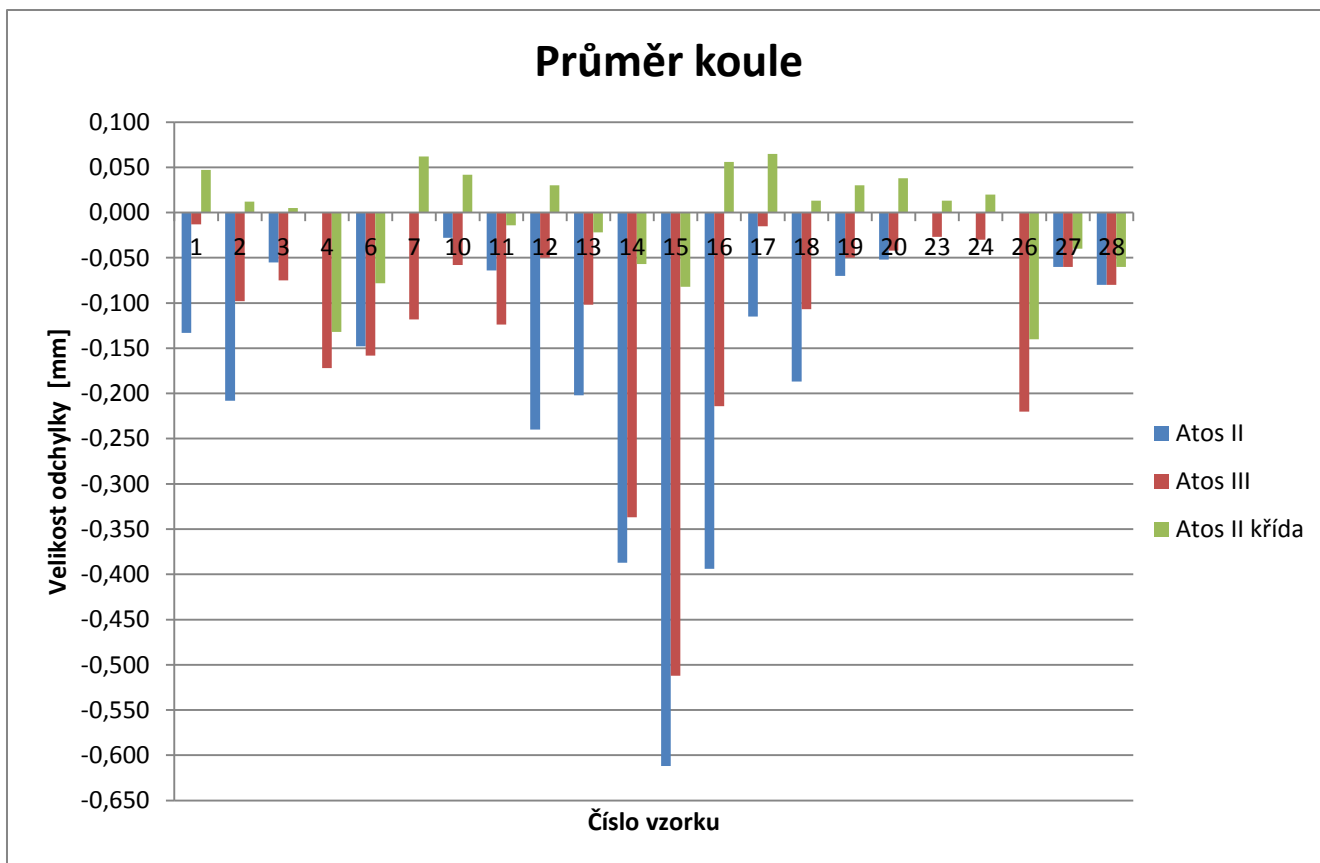
Graf 5 Porovnání přesnosti skenovaných dat (šířka Y)

Jak lze vyčíst z grafu 5, se stejnou odchylkou -0,050 mm se potýkáme u vzorků 27 a 28, pro oba skenery a totožné odchylky dosáhl Atos III ještě pro vzorky č. 23 a 17. Nejméně přesnými hodnotami se vyznačuje opět vzorek č. 15 (-0,480 mm Atos II, -0,450 mm Atos III).

Tabulka 13 Nejpřesnější a nejméně přesné vzorky (šířka Y)

Číslo vzorku	Technologie	metoda výroby	material	lesk/mat	nominal [mm]	křída po odečtu [mm]	AII Nekřída [mm]	AIII Nekřída [mm]	Atos II Odchylka [mm]	Atos III Odchylka [mm]
27	SLS	tisk	PA2200	mat	19,990	-0,010	-0,060	-0,060	-0,050	-0,050
28	SLS	tisk	PA2201	mat	20,000	-0,020	-0,070	-0,070	-0,050	-0,050
23		obrábění	mosaz		19,723	0,002	-	-0,033	-	-0,035
17	PolyJet	tisk	VeroGrey	lesk	20,007	0,033	-0,167	-0,017	-0,200	-0,050
15	PolyJet	tisk	ABS_like	mat	20,248	-0,078	-0,558	-0,528	-0,480	-0,450

Posledním zkoumaným geometrickým tvarem byla koule, konkrétně její průměr.



Graf 6 Porovnání přesnosti skenovaných dat (průměr koule)

Jak je patrné z grafu 6 opět se jako nejpřesnější ukázaly vzorky 27 a 28 s velikostí odchylky -0,020 mm pro oba skenery. Největší odchylky dosáhl vzorek č. 15, kdy pro Atos II se velikost odchylky dostala až na -0,530 mm a na -0,430 mm pro Atos III.

Tabulka 14 Nejpřesnější a nejméně přesné vzorky (průměr koule)

Číslo vzorku	Technologie	metoda výroby	material	lesk/mat	nominal [mm]	křída po odečtu [mm]	AII Nekřída [mm]	AIII Nekřída [mm]	Atos II Odchylka [mm]	Atos III Odchylka [mm]
27	SLS	tisk	PA2200	matt	19,900	-0,040	-0,060	-0,060	-0,020	-0,020
28	SLS	tisk	PA2200	matt	19,920	-0,060	-0,080	-0,080	-0,020	-0,020
15	PolyJet	tisk	ABS_like	matt	20,232	-0,082	-0,612	-0,512	-0,530	-0,430

2.5 Vyhodnocení výsledků

Pokud zkompletujeme data z obou hodnotících kritérií, dojdeme k zjištění, že nejlépe jsou na tom vzorky č. 27 a 28 vytištěné pomocí technologie SLS. Jejich skenovatelnost dosáhla 93,5 a 93,9% povrchu a odchylka je zapsána v následující tabulce.

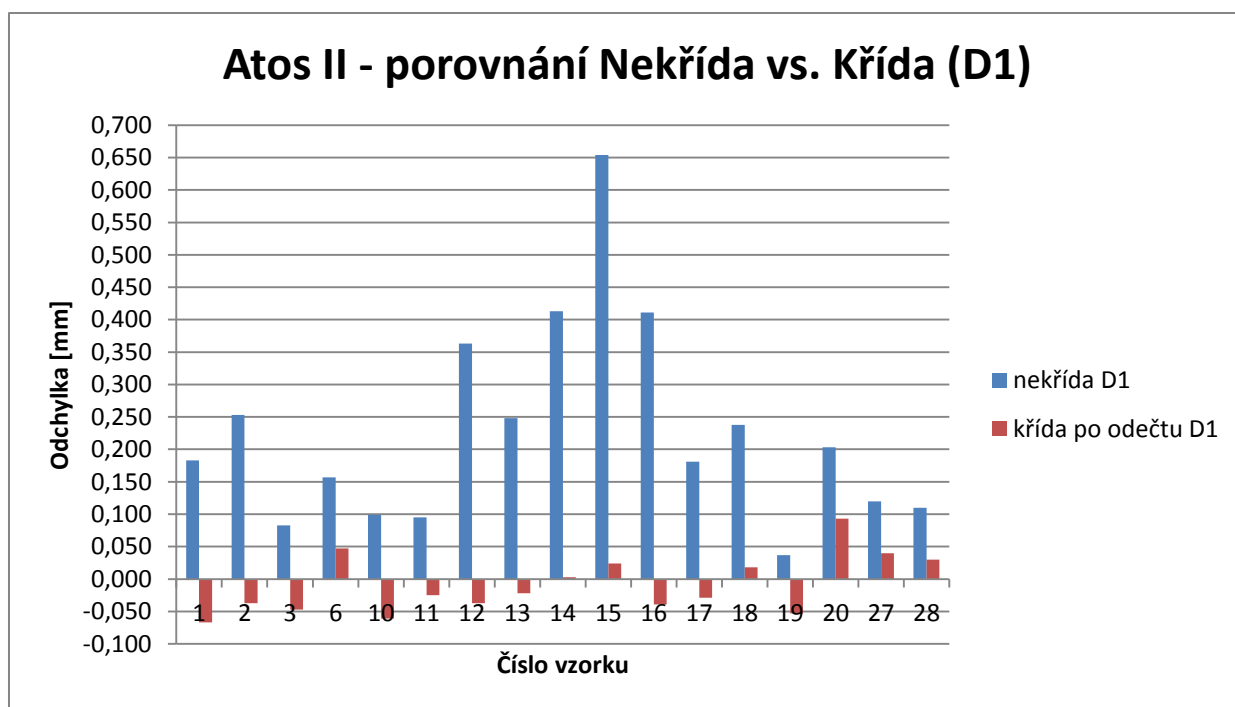
Tabulka 15 Vyhodnocení nejpřesnějších vzorků *

Vzorek	rozměr	nominal (SMS)	Atos II křída	Atos II	Atos III	Atos II	Atos III	Atos II	Atos II	Atos III
				naskenovaný rozměr	odchylka od nominálu	křída po odečtu	odchylka od Atos II křída po odečtu			
27	D1	13,990	14,06	14,11	14,11	0,120	0,120	0,040	0,080	0,080
SLS	D2	19,900	19,85	19,80	19,80	-0,100	-0,100	-0,080	-0,020	-0,020
92,7 - 93,9 %	x	54,960	54,89	54,84	54,86	-0,120	-0,100	-0,100	-0,020	0,000
	y	19,990	20,01	19,93	19,93	-0,060	-0,060	-0,010	-0,050	-0,050
	Koule	19,900	19,89	19,84	19,84	-0,060	-0,060	-0,040	-0,020	-0,020
28	D1	13,930	13,99	14,04	14,04	0,110	0,110	0,030	0,080	0,080
SLS	D2	19,930	19,84	19,80	19,80	-0,130	-0,130	-0,120	-0,010	-0,010
92,4 - 93,5 %	x	54,990	54,82	54,78	54,80	-0,210	-0,190	-0,200	-0,010	0,010
	y	20,000	20,01	19,93	19,93	-0,070	-0,070	-0,020	-0,050	-0,050
	Koule	19,920	19,89	19,84	19,84	-0,080	-0,080	-0,060	-0,020	-0,020

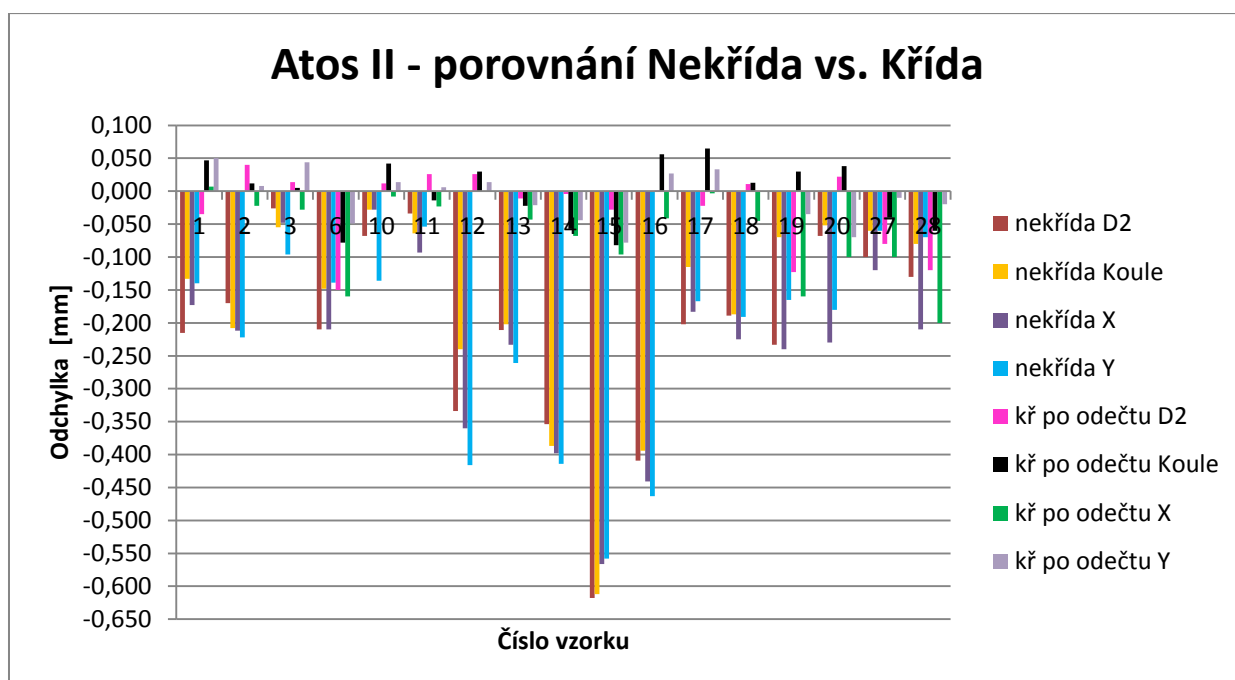
*hodnoty uvedené v tabulce jsou v milimetrech

Přesnost skenerů je údaj, který závisí na velkém množství faktorů a není jednoduché definovat její hodnotu. Jedním z takových činitelů je drsnost povrchu. Jelikož měření na SMS probíhá „otukáváním“ povrchu měřeného materiálu kuličkou o určitém průměru, může se stát, že bude kulička vtlačena do nerovnosti a dojde tedy ke zkreslení rozměru.

Další faktorem, který ovlivňuje naskenované výsledky, je prohnutí tištěného vzorku, vzniklého na základě vnitřního pnutí materiálu. SMS si „otukne“ plochu na dvou místech, čímž vzniknou na každé straně dva body, které následně proloží přímkou a ze vzdálenosti dvou takto vzniklých přímek vypočítá vzdálenost. Dá se předpokládat, že SMS použije na jedné ploše krajní body, čímž může prohnutí materiálu, které bude patrné uprostřed, naprosto minout. Kdežto skener snímá celé plochy i s prohnutím a na základě těchto informací o všech bodech proloží daný povrch plochou, jejíž poloha se od přímky na SMS bude lišit.



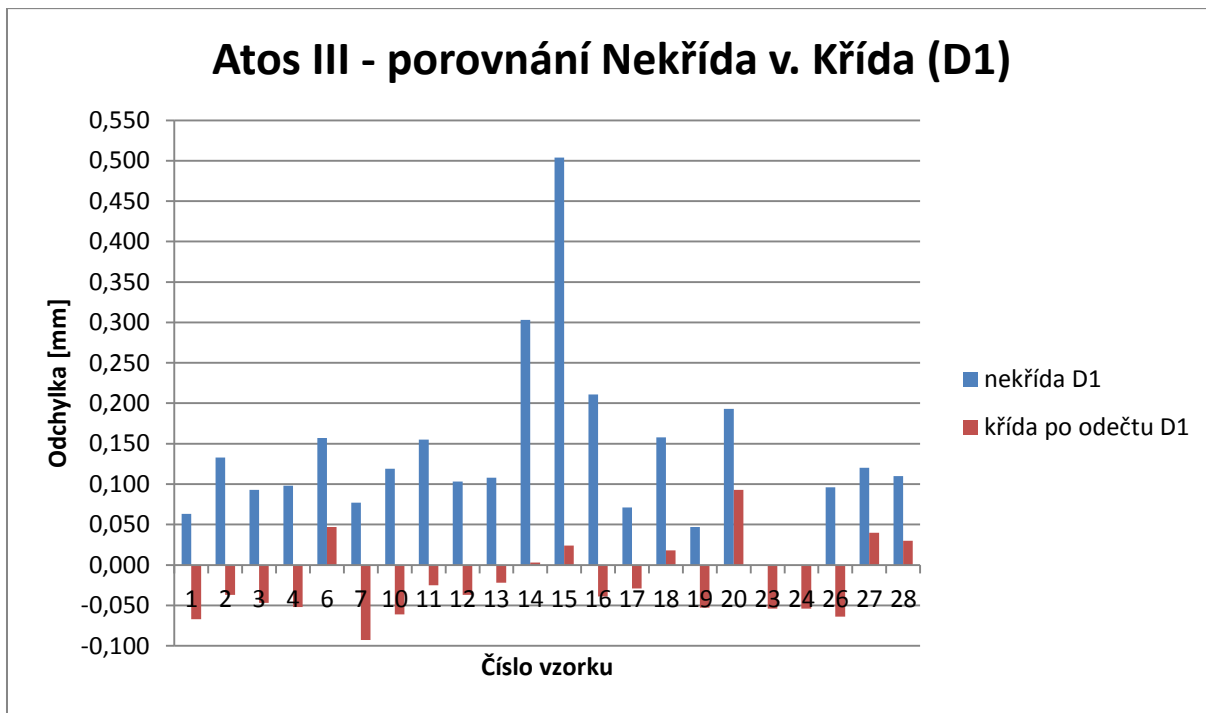
Graf 7 Atos II - porovnání nekřídovaných a křídovaných vzorků (D1)



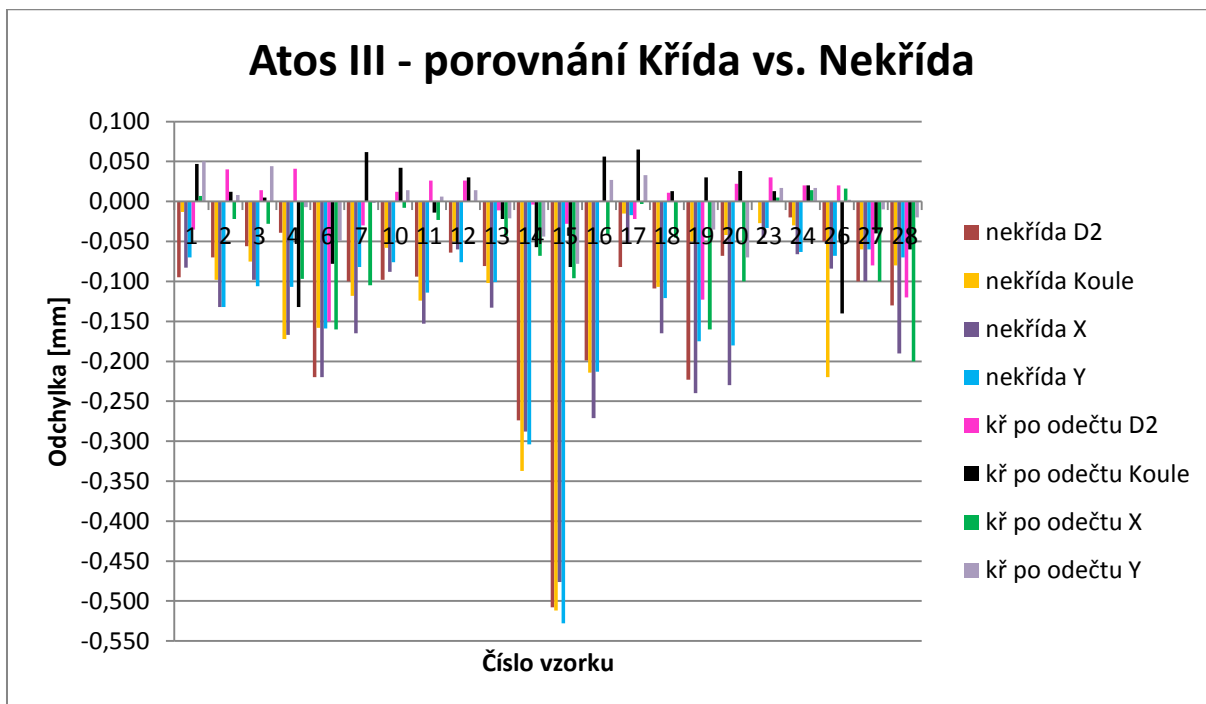
Graf 8 Atos II - porovnání nekřídovaných a křídovaných vzorků

V grafech 7 a 8 byla porovnávána data naskenovaných rozměrů bez křídou a s křídou, respektive jejich odchylky od nominální hodnoty. Jelikož u rozměru D1 se jedná o vnitřní rozměr, byl porovnáván samostatně. Z grafů je zřejmé, že vzorek č. 15 je naskenován s odchylkou přibližně 0,58 mm pro vnější rozměry a 0,65 pro rozměr vnitřní. To znamená, že skener neskenoval skutečný povrch vzorku, ale zdánlivý, posunutý přibližně o 0,29 mm (pro vnější rozměr) a 0,33 mm (vnitřní rozměr) do materiálu. Takže přesto, že procento naskenovaného povrchu dosáhlo 90,9 %, můžeme konstatovat, že

materiál ABS_like v matné úpravě je bez ošetření povrchu antireflexní vrstvou neskenovatelný. Obdobně je na tom ABS_like v lesklé úpravě (vzorek č. 16), kdy je skenerem zachycen povrch v hloubce 0,2 mm. O něco lépe, ale stále pod povrchem, byl zachycen bílý lesklý vzorek z materiálu ABS white (vzorek č. 14), kdy hodnota pod povrchem byla 0,15 mm.



Graf 9 Atos III - porovnání nekřídovaných a křídovaných vzorků (D1)



Graf 10 Atos III - porovnání nekřídovaných a křídovaných vzorků

Při měření na skeneru Atos III došlo k měření „pod povrchem“ u stejných vzorků jako u prvního skeneru, pouze měřená nepřesnost byla menší. Jako nejméně přesný se ukázal vzorek číslo 15, kde povrch byl skenován 0,25 mm pod skutečným povrchem. Tento vzorek byl navíc se svými necelými 68 procenty naskenovaného povrchu zařazen mezi částečně skenovatelné. Dalším materiálem skenovaným pod povrchem byl ABS white (vzorek č. 14), jež byl skenován přibližně 0,15 mm pod povrchem.

K přihlídnutí ke všem faktorů, jež mají vliv na přesnost digitalizace, můžeme říci, že jako skenovatelné materiály, které není nutné opatřit antireflexní vrstvou, abychom získali rozměry, které můžeme ještě považovat za odpovídající realitě, jsou ty materiály, jejichž průměr velikosti odchyly vnějších rozměrů se pohybuje do 0,1 mm, čili nepřesnost je 0,05 mm na každé straně. Tímto kritériem nám vyplyne 8 vzorků pro Atos II, které lze označit za přesně skenovatelné s rozměry odpovídajícími realitě.

Tabulka 16 Atos II - Odchyly jednotlivých vzorků

č. vzorku	odchyly Atos II					průměrná odchyly
	rozdíl D1	rozdíl D2	rozdíl Koule	rozdíl X	rozdíl Y	
1	0,250	-0,180	-0,180	-0,180	-0,190	-0,183
2	0,290	-0,210	-0,220	-0,190	-0,230	-0,213
3	0,130	-0,040	-0,060	-0,020	-0,140	-0,065
6	0,110	-0,060	-0,070	-0,050	-0,090	-0,067
10	0,160	-0,080	-0,070	-0,020	-0,150	-0,080
11	0,120	-0,060	-0,050	-0,070	-0,060	-0,060
12	0,400	-0,360	-0,270	-0,360	-0,430	-0,355
13	0,270	-0,200	-0,180	-0,190	-0,240	-0,202
14	0,410	-0,350	-0,330	-0,330	-0,370	-0,345
15	0,630	-0,590	-0,530	-0,470	-0,480	-0,517
16	0,450	-0,410	-0,450	-0,400	-0,490	-0,438
17	0,210	-0,180	-0,180	-0,180	-0,200	-0,185
18	0,220	-0,200	-0,200	-0,180	-0,190	-0,193
19	0,090	-0,110	-0,100	-0,080	-0,130	-0,105
20	0,110	-0,090	-0,090	-0,130	-0,110	-0,105
27	0,080	-0,020	-0,020	-0,020	-0,050	-0,028
28	0,080	-0,010	-0,020	-0,010	-0,050	-0,023

Vzorky jsou označeny barevně v tabulce (Tabulka 16), přičemž nejpřesnější vzorky jsou označeny zeleně.

Tabulka 17 Atos III – Odchylky jednotlivých vzorků

odchylka Atos III						
č. vzorku	rozdíl D1	rozdíl D2	rozdíl Koule	rozdíl X	rozdíl Y	průměrná odchylka
1	0,130	-0,060	-0,060	-0,090	-0,120	-0,083
2	0,170	-0,110	-0,110	-0,110	-0,140	-0,118
3	0,140	-0,070	-0,080	-0,070	-0,150	-0,093
4	0,150	-0,080	-0,040	-0,070	-0,100	-0,073
6	0,110	-0,070	-0,080	-0,060	-0,110	-0,080
7	0,170	-0,070	-0,180	-0,060	-0,080	-0,098
10	0,180	-0,110	-0,100	-0,080	-0,090	-0,095
11	0,180	-0,120	-0,110	-0,130	-0,120	-0,120
12	0,140	-0,090	-0,080	-0,060	-0,090	-0,080
13	0,130	-0,070	-0,080	-0,090	-0,080	-0,080
14	0,300	-0,270	-0,280	-0,220	-0,260	-0,258
15	0,480	-0,480	-0,430	-0,380	-0,450	-0,435
16	0,250	-0,200	-0,270	-0,230	-0,240	-0,235
17	0,100	-0,060	-0,080	-0,050	-0,050	-0,060
18	0,140	-0,120	-0,120	-0,120	-0,120	-0,120
19	0,100	-0,100	-0,080	-0,080	-0,140	-0,100
20	0,100	-0,090	-0,080	-0,130	-0,110	-0,102
23		-0,030	-0,040	-0,050	-0,050	-0,042
24		-0,040	-0,050	-0,080	-0,080	-0,063
26	0,160	-0,070	-0,080	-0,100	-0,070	-0,080
27	0,080	-0,020	-0,020	0,000	-0,050	-0,023
28	0,080	-0,010	-0,020	0,010	-0,050	-0,018

Pro Atos III, jak je patrné z tabulky 17 bylo vzorků s rozměry přibližujícími se realitě dvakrát více, tedy šestnáct, ovšem například u vzorků 23 a 24 nebyl naskenován vnitřní průměr válce D1, takže přesto, že byl vzorek vyhodnocen jako způsobilý pro skenování bez nástřiku, pro získání rozměrů vnitřních otvorů a děr bude aplikace antireflexního nástřiku nezbytná.

Zajímavé jistě je také porovnání přesnosti vzorků z jednotlivých skenerů. Na počet naskenovaných vzorků je na tom lépe novější Atos III, který naskenoval dobře nebo částečně (tedy od 50 % povrchu více) 22 vzorků, kdežto Atos II jen 17 vzorků. Rozdíl tvořily obráběné vzorky, respektive neschopnost skeneru Atos II tyto vzorky naskenovat. Na počet vzorků s rozměry odpovídající realitě také vyhrává Atos III s počtem 16 vzorků oproti 8mi vzorků z Atosu II. Pokud ovšem porovnáme data těchto vzorků, zjistíme, že ve čtyřech případech (vzorek č. 3, 6, 10 a 11) je odchylka menší a tudíž vzorek

přesnější u Atosu II a dokonce vzorek číslo 11 tento skener naměřil v toleranci, kterou můžeme považovat za reálný model, kdežto Atos III jej naměřil s odchylkou dvojnásobnou a tedy od reality se již výrazně liší. Tato skutečnost bude jistě souviset s barvou využívaného světla jednotlivých skenerů. Tudíž se nabízí vysvětlení, že vzorky č. 10 a 11, jejichž materiál VeroCyan má modrou barvu, jsou v modrém světle, které pro osvit využívá Atos III, hůře viditelné a proto jejich přesnost vyšla lépe ze skeneru Atos II, který používá k osvětlení vzorků bílého světla. Tuto domněnku můžeme aplikovat i na vzorky černé barvy (vzorek č. 3 a 6), kdy je přesnost opět větší u bílého světla.

3 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zanalyzovat vliv materiálu obrobku na přesnost optické 3D digitalizace za použití skenerů Atos II 400 a Atos III Triple Scan, které jsou součástí vybavení laboratoří KSA.

Z výsledků této práce vzešla skupina vzorků, jejichž rozměry lze ještě považovat za skenovatelné bez antireflexního nástřiku, aniž by došlo k výraznému zkreslení rozměrových hodnot.

Jako nejpresnější se ukázaly vzorky tištěné pomocí SLS technologie z materiálu PA 2200, kdy se jednotlivé odchylky rozměrů odlišují od nominálních hodnot získaných ze souřadnicového měřicího stroje v rozmezí -0,005 až -0,025 pro vnější a 0,040 mm pro vnitřní rozměry pro oba skenery.

Objevila se zde i skupina vzorků, jejichž povrch skener zachytí pod povrchem, jednalo se o vzorky v barvě slonoviny. Kdy u prvního skeneru (Atos II) byl povrch změřen až 0,29 mm pod povrchem a u druhého skeneru až 0,25 mm.

Zajímavým výstupem této práce bylo porovnání použitých skenerů z hlediska jejich přesnosti skenování jednotlivých vzorků, při čemž se ukázalo, že dalším vlivem, jenž může mít vliv na přesnost výstupních dat, je vhodnost použití skeneru v závislosti na používané barvě světla osvěčujícího vzorky. Neboť vzorky č. 10 a 11, které jsou z materiálu modré barvy, stejně tak vzorky černé barvy (č. 3 a 5), vyšly s menší přesností na skeneru Atos III, který používá zmíněnou modrou barvu pro osvit vzorků.

Je tedy možné některé materiály skenovat bez nástřiku, ovšem pokud chceme mít jistotu, že data budou odpovídat realitě, je vhodné antireflexní úpravu použít, zejména pro vnitřní otvory a díry, jelikož jak dokazuje tato práce, materiál obrobku má na přesnost 3D digitalizace vliv.

Použitá literatura

- [1] *Skenování ve 3D* [online]. [cit. 2-12-17] Dostupné z: <http://www.skenovani3d.cz/>
- [2] MENDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER. *3D skenery pro použití v průmyslu*. AUTOMA: časopis pro automatizační techniku, 2015, **2015**(12). [cit. 2-12-17] Dostupné také z: <http://automa.cz/>
- [3] PALOUSEK, D., M., OMASTA, D., KOUTNY, J., BEDNAR, T., KOUTECKY, F., DOKOUPIL, *Effect of matte of matte coating on 3D optical measurement accuracy*, Brno 2014. Contents lists available at ScienceDirect. *Optical Materials*. 40, 2015. 9s.
- [4] LEVÍNSKÁ, Barbora. *Vliv zmatňujících nástřiků na přesnost optické 3D digitalizace*. Liberec, 2017, 64 s. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů a automatizace.
- [5] PĚČEK, Jaroslav. *Využití 3D skenování při kontrole kvality*. AUTOMA: časopis pro automatizační techniku, 2015, **2015**(12). [cit. 3-12-17] Dostupné také z: <http://automa.cz/>
- [6] TESAŘ, Jaroslav. *Aplikace moderních metod pro výrobu odkládacího stojanu na mobilní telefon*. Brno, 2012, 70 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Dostupné také z: <http://docplayer.cz/>
- [7] CHREN, Tibor. *Optické scanovací systémy*. Brno, 2008, 42 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné také z: <https://dspace.vutbr.cz/>
- [8] *The Fastest Way to Create in 3-D!*, MicroScribe Software Solutions. 3D Microscribe.com Dostupné také z: <http://www.3d-microscribe.com/>
- [9] ŠNAJDÁREK, L. *Metody 3D laserového skenování obrobků ve výrobním procesu*. Brno, 2008. 52 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 52 s.
- [10] HOFFMANN, V. *A Brief History of 3D Scanning*. [online]. 1998 [cit. 5-12-17]. Dostupné také z: <http://vr.isdale.com/3DScanners/>
- [11] ŠIMONÍK, Martin, *Digitalizace – její princip a rozdělení*. MM Průmyslové spektrum, 2004 (6) Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/>
- [12] CHYLÍK, Michal, *Využití 3D skenování v oblasti přesného vstřikování plastů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 41 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/>
- [13] BRANDON, JF. *Challenge Creafom to Make your Dream Engineering Project Happen*. [online]. 2013 [cit. 10-12-17] Dostupné z: <http://blog.grabcad.com/>
- [14] *Rozptyl světla*, Techmania Science Center [online] [cit. 27-1-18] Dostupné zde: <http://edu.techmania.cz/>
- [15] *Tři základní barvy a tři základní vlastnosti barvy*, Konica Minolta, [online], [cit. 28-1-18]. Dostupné zde: <https://manuals.konicaminolta.eu/>

- [16] Barva, Wikipedia, [online], [cit. 28-1-18], Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Barva>
- [17] VOJÁČEK, Antonín. *Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření*, Automatizace.hw.cz, 13-7-15, [online], [cit. 28-1-18]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/>
- [18] JANÁKOVÁ, Ilona. *Optické 3D měření*, přednáška z předmětu Počítačové vidění. VUT v Brně. [online], [cit. 28-1-18]. Dostupné z: <http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/>
- [19] KALOVÁ, Ilona a Karel HORÁK, *Optické metody měření 3D objektů*, Elektrotechnika 2005/23 – 12. 4. 2005, [online], [cit. 28-1-18]. Dostupné z: <http://www.elektrotechnika.cz/>
- [20] BERNAL C., B. de AGUSTINA, M. M. MARIN, A. M. CAMACHO, *Performance evaluation of optical scanner based on blue LED Structured light*, Proc. Eng. 63 (2013) 591–598.
- [21] *Fotogrammetrie – Základní pojmy, rozdělení, metody a využití*, Geodézie – přednáška 10. Mendelova univerzita v Brně, [online], [cit. 4-2-18] Dostupné z: <http://uhulag.mendelu.cz/>
- [22] SPŠ ZEMĚMĚŘIČSKÁ, *Kapitoly z fotogrammetrie*, Praha, 2013, [online]. [cit. 4-2-18] Dostupné z: <http://spszem.cz/>
- [23] MANDÁT, Dušan, *Optické bezkontaktní topografické metody*, Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 2012, [online], [cit. 4-2-2018]. ISBN 978-80-244-3075-1 Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/>
- [24] KELLER, Petr. *3D digitalizace a Reverse Engineering*, Technická univerzita Liberec, přednášky z předmětu M3D, 2010
- [25] MENDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER, *3D měření a optická digitalizace, reverzní inženýrství*, Katedra výrobních systémů, FS TUL. 2011. [online], [cit. 4-2-2018]. Dostupné z: www.kvs.tul.cz/atos
- [26] MAČÁK, Josef, *Optický skener v průmyslové praxi*, MM Průmyslové spektrum, 2008, [online], [cit. 4-2-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/>
- [27] *Scanner GOM ATOS II 400*, smarticinfra.com, 2017, [online], [cit. 4-2-18]. Dostupné z: <https://smarticinfra.com/>
- [28] ČERMÁK, Jan, *Metody 3D skenování objektů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Bakalářská práce.
- [29] *STL, 3D-tisk – aditivní výroba & rapid prototyping*, [online], [cit. 4-2-18]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/stl/>
- [30] *KFO-620-5AX*, Inaxes CNC machinery, [online], [cit. 12-2-18]. Dostupné z: <http://www.cnc-inaxes.cz/>
- [31] *PolyJet technologie*, 3D tisk a 3D tiskárny Stratasys [online], [cit. 13-2-18]. Dostupné z: www.objet.cz
- [32] ZELENÝ, Petr, *3D tisk na TUL*, Fakulta strojní, KSA, Technická univerzita v Liberci, Liberec, 2014.

- [33] MASTNÝ, Gabriel, *Technologie 3D tisku*, ITnetwork.cz, [online], [cit. 14-2-18]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/>
- [34] *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping*, učební text, TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra Výrobních systémů, Liberec, 2012
- [35] *Zvýšení produktivity a úspora nákladů díky použití materiálů AMPCO*, ampcometal.cz, [online]. [cit. 26-2-018] Dostupné z: <https://www.ampcometal.com/>
- [36] ČSN 11 523/ 1.0570/ ST52.3, JKZ Bučovice a.s., [online], [cit. 26-2-18]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/>
- [37] *Mosaz*, Metal centrum.cz, [online], [cit. 26-2-18]. Dostupné z: www.metalcentrum.cz/mosaz/
- [38] *Hliník a jeho slitiny*, Alfun Metal service center, [online], [cit. 26-2-18]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/>
- [39] *PTFE – technické informace*, Sittech.cz, [online], [cit. 26-2-18]. Dostupné z: <http://www.sittech.cz/>
- [40] *PA6 – extrudovaný polyamid*, Tech Plasty, [online], [cit. 26-2-18]. Dostupné z: <http://www.techplasty.sk/>
- [41] HOTAŘ, Vlastimil. *Úvod do problematiky strojového vidění: Část 1 : Základní principy a hardware*. Liberec, 2015. ISBN 978-80-7494-156-6. Skripta. Technická univerzita v Liberci.
- [42] HLAVÁČ, Václav. *Pořízení obrazu a jeho fyzikální základy*. Praha. Dostupné také z: <http://cmp.felk.cvut.cz/>. Přednáška. České vysoké učení technické v Praze.
- [43] *Stratasys, Materials & service consumables*, [online], [cit. 24-3-18]. Dostupné z: <https://store.stratasys.com>
- [44] *ISO10360*, [online], [cit. 1-5-18]. Dostupné z: <https://iso10360.wordpress.com/>
- [45] MENDŘICKÝ, Radomír a Petr KELLER. *Obsluha měřicích zařízení: bezkontaktní metody*. Liberec, 2015. Výukový text. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra Výrobních systémů a automatizace.
- [46] *Sintratec PA12 Powder*, Sintratec, [online], [cit. 18-5-18]. Dostupné z: <https://sintratec.com/>
- [47] *Materiál PA 2200/ 2201*, 3Rsystems, [online], [cit. 18-5-18] Dostupné z: <http://www.3rsystems.cz/>

Přílohy

A Obsah přiloženého CD

Text diplomové práce

- Diplomova_prace_2018_Ondrej_Langer.pdf
- Diplomova_prace_2018_Ondrej_Langer.docx
- Kopie_zadani_Diplomova_prace_2018_Ondrej_Langer.pdf

Fotografie

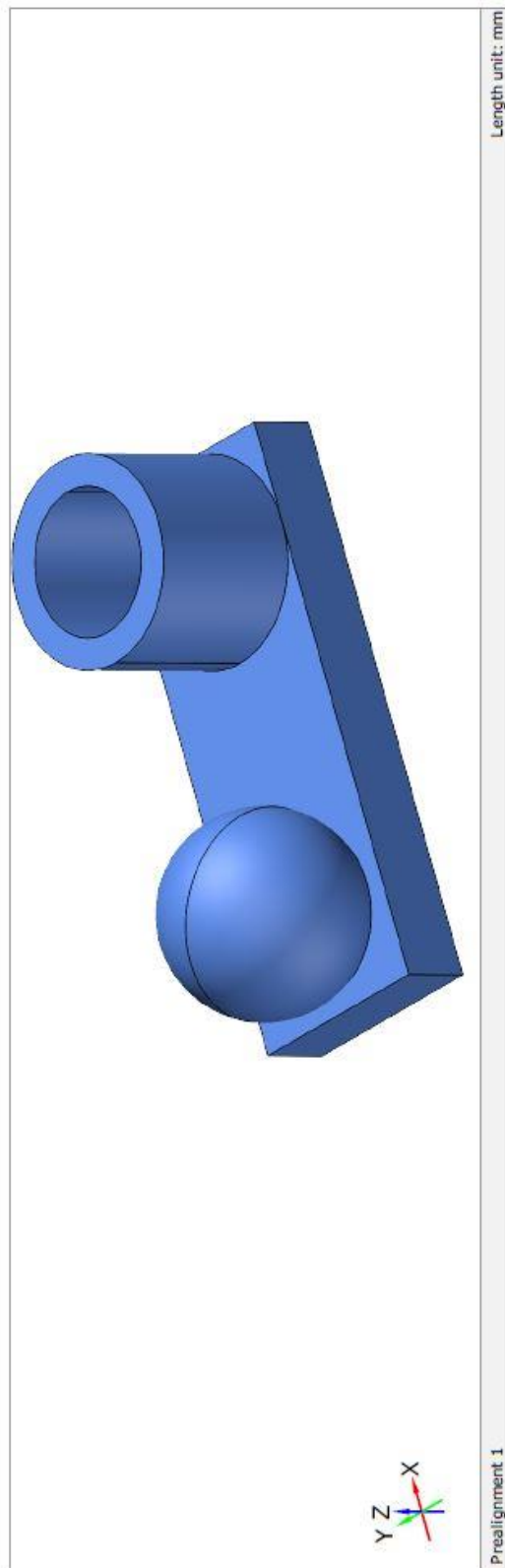
- Vzorky
- Měření

CAD data modelu

- Model 3D tisk
- Model obrábění

B Ukázkový protokol ze softwaru GOM Inspect

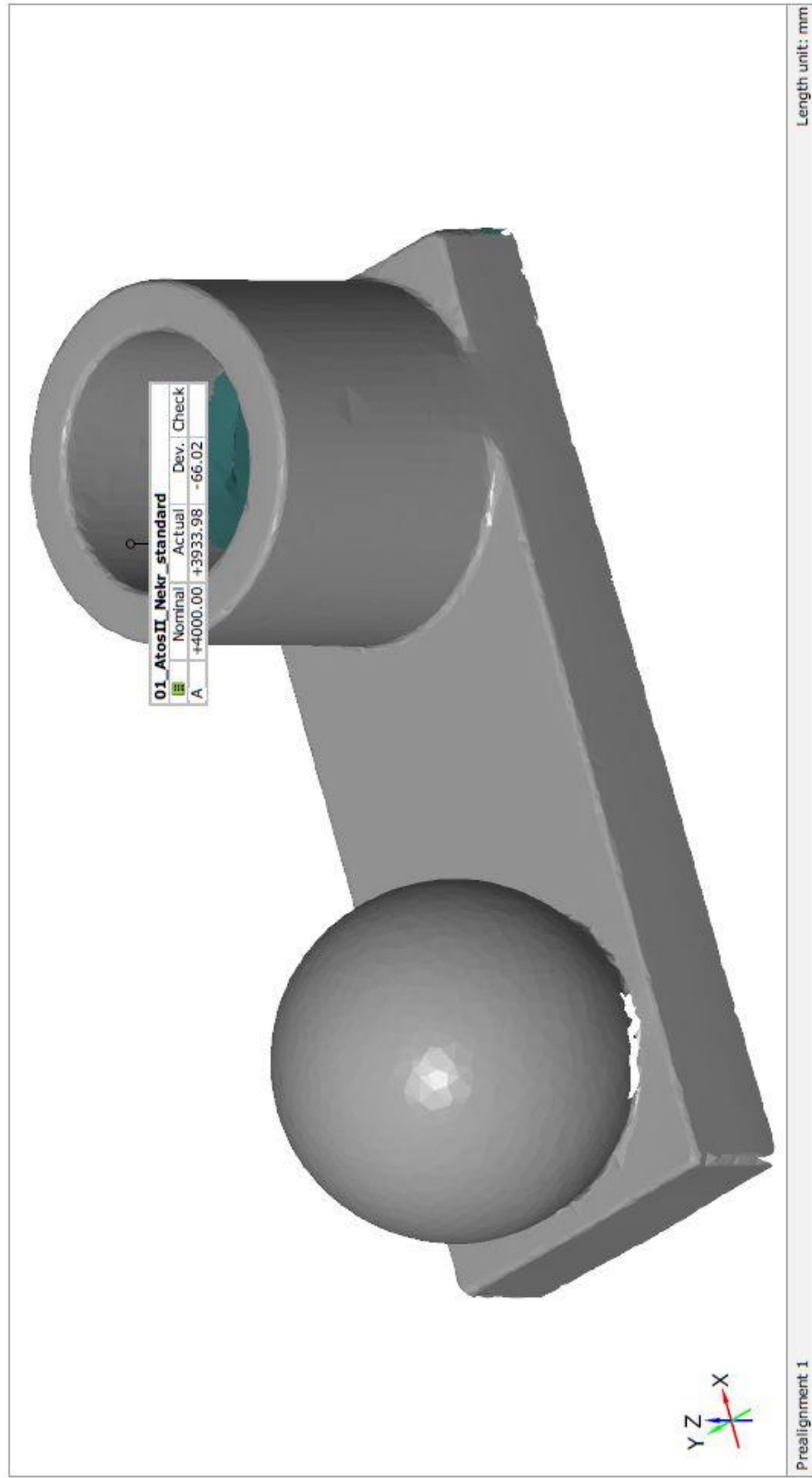
Inspekce



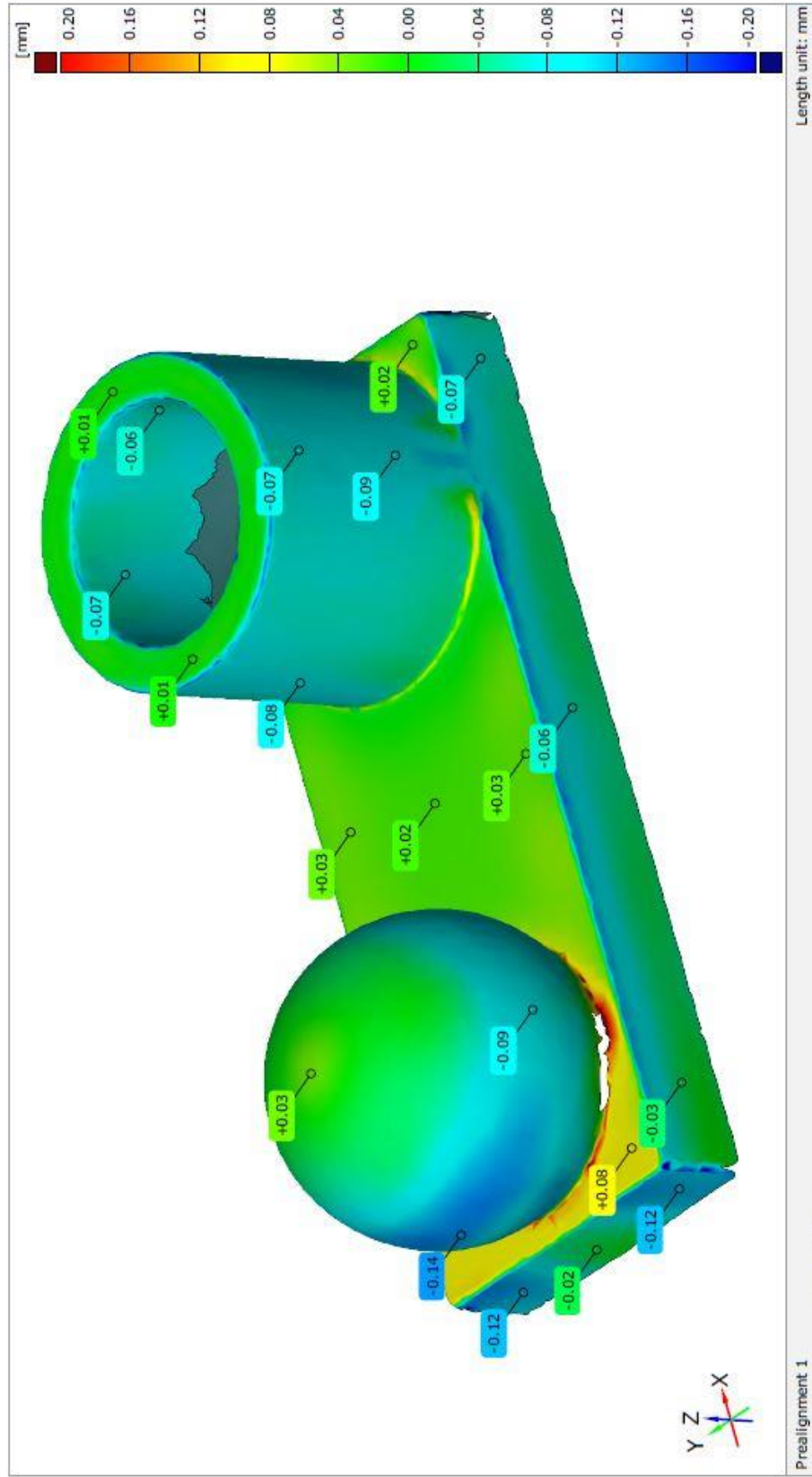
Inspector: Mendřický Radomír
Company: Technická univerzita v Liberci
Department: www.ksa.tul.cz
Location: Liberec
Date: 6.4.2018
Project:

Part: Tisteny
Part no.: 01
Version: Atos II - nekrídovany
Charge no.:
System: ATOS - GOM Inspect Pro v8

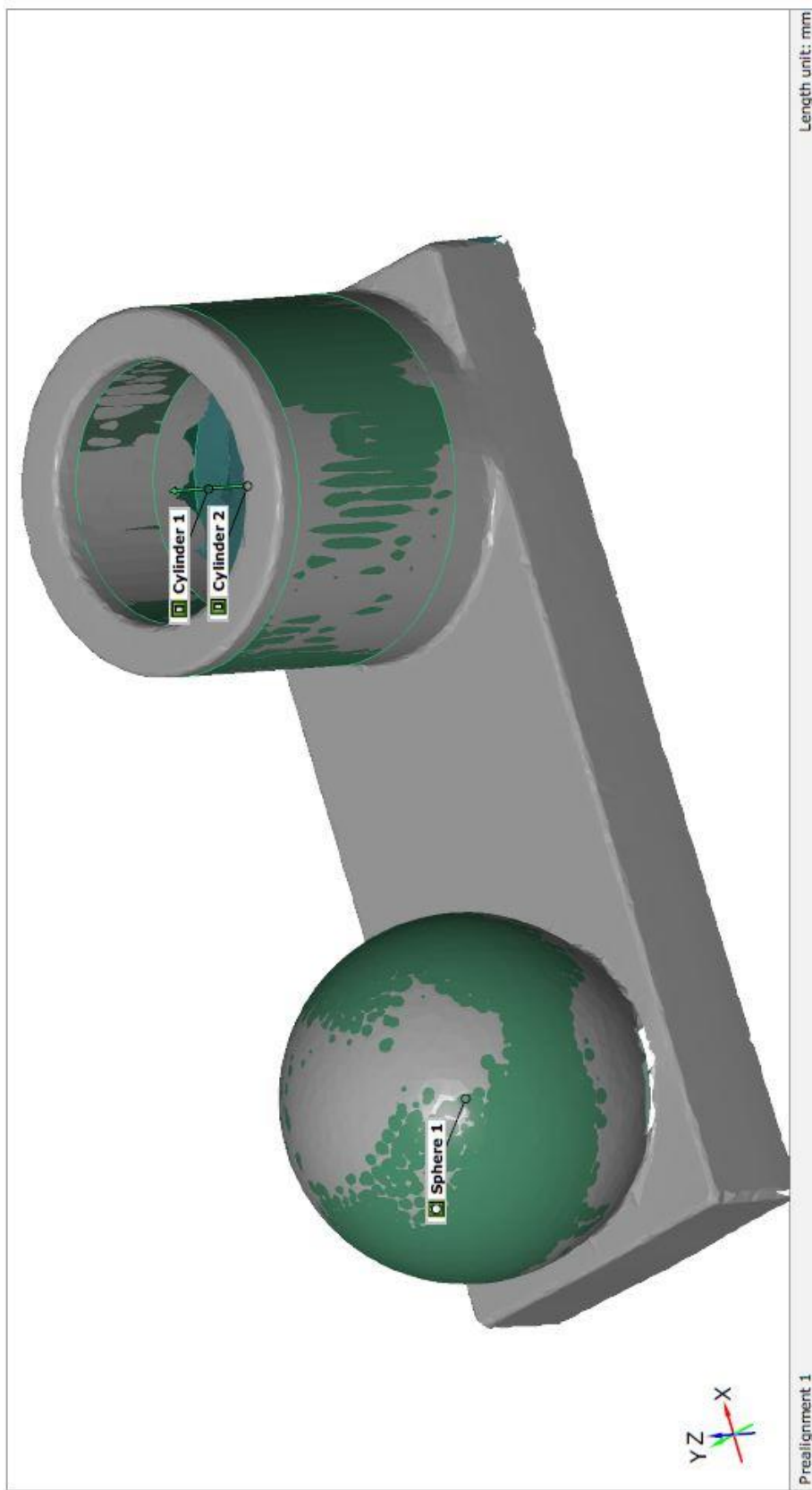
Mesh



Barevná mapa odchylek



Prvky



Prealignment 1

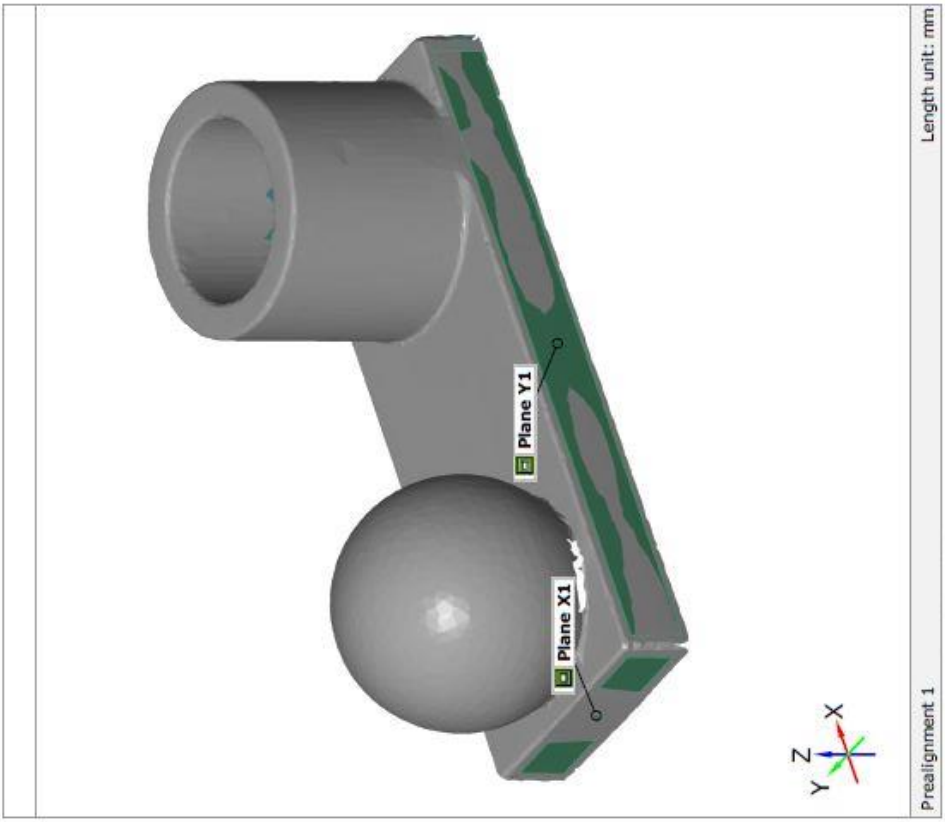
Length unit: mm

Tisteny 01 Atos II - nekrídovany

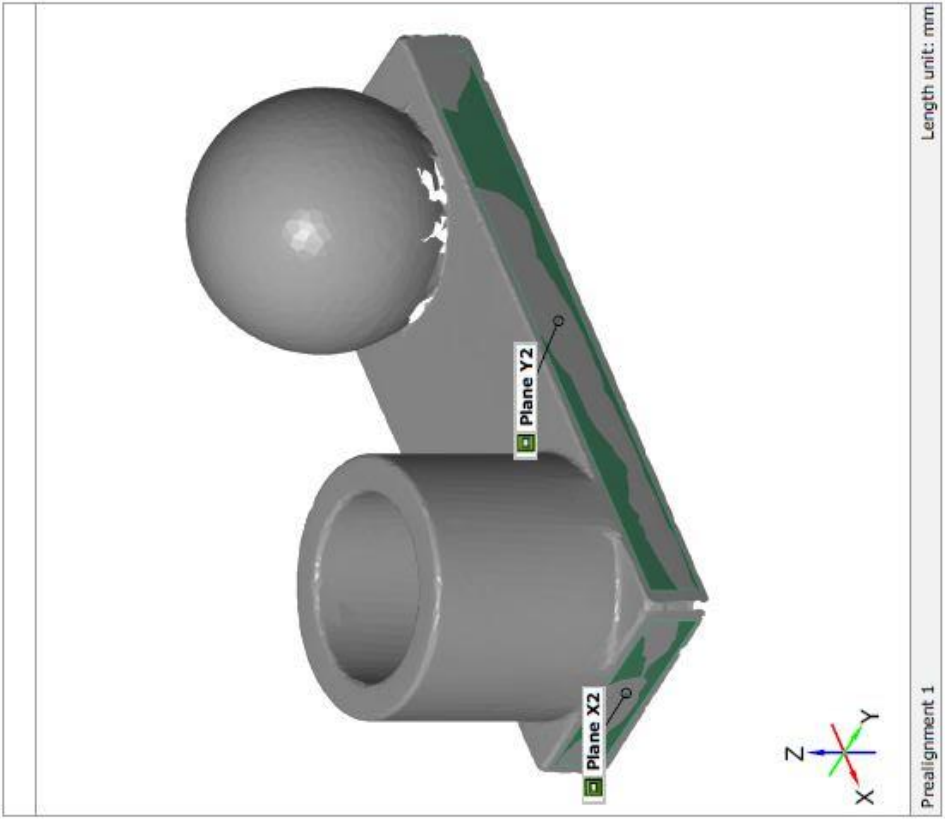
4/8

Generated with GOM Inspect Professional V8

Prvky

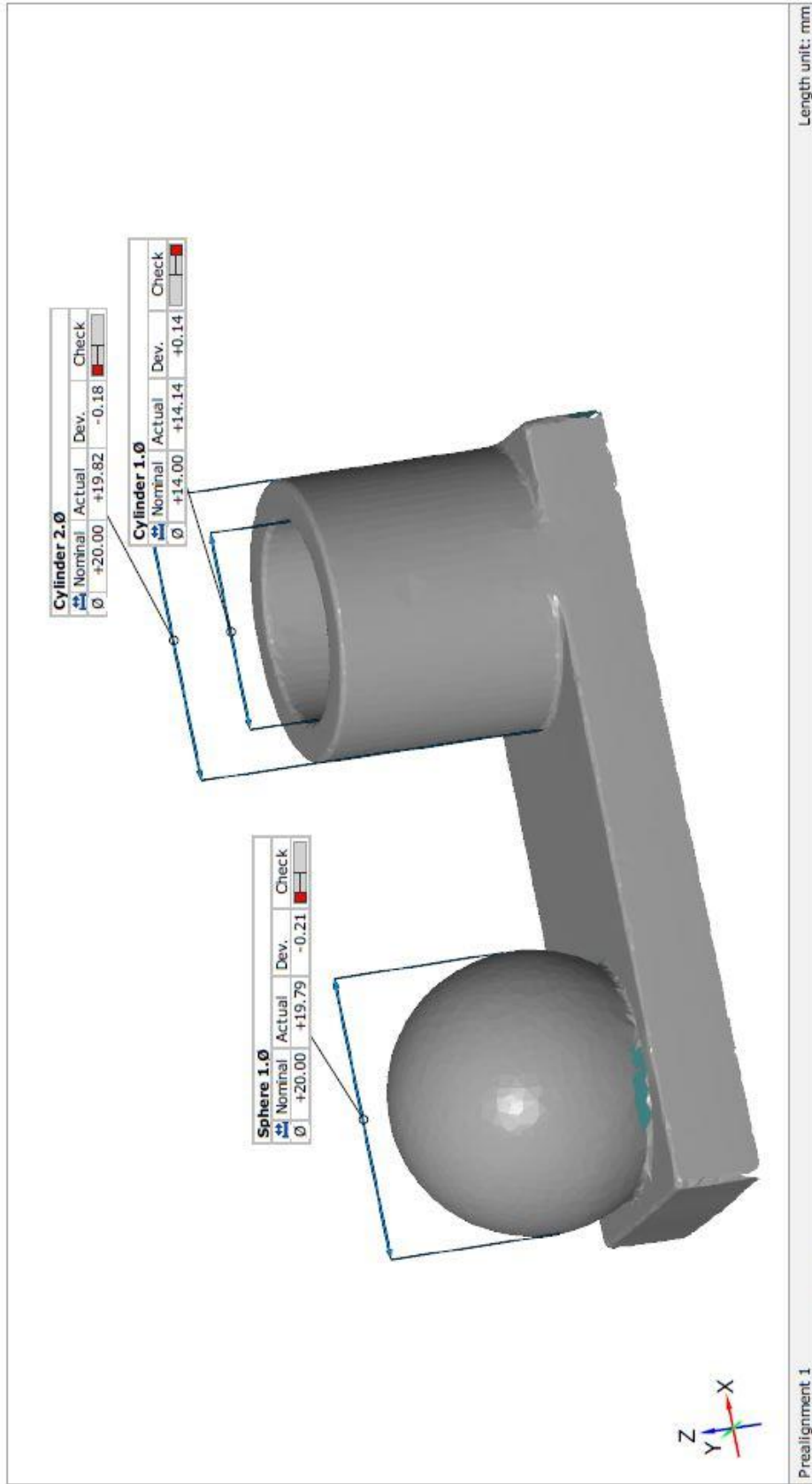


Tisteny 01 Atos II - nekrídovany

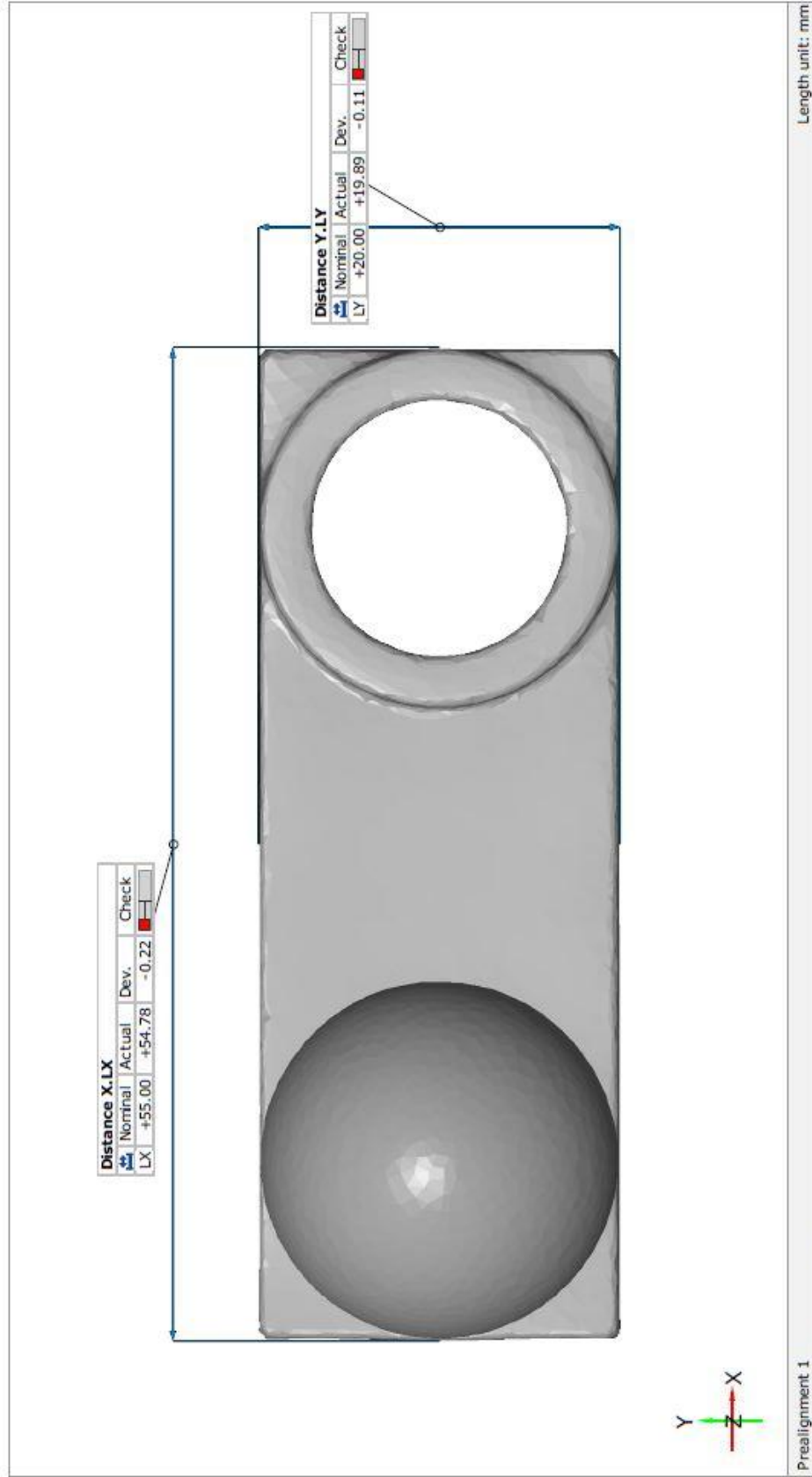


Generated with GOM Inspect Professional V8
 5/8

Rozměry



Rozměry



Rozměry

Name	Datum	Property	Criterion	Type	Nominal	Actual	Tol -	Tol +	Dev
Cylinder 1		Ø		Inspection_dimension_scalar	+14.00	+14.14	-0.10	+0.10	+0.14
Cylinder 2		Ø		Inspection_dimension_scalar	+20.00	+19.82	-0.10	+0.10	-0.18
Distance X		LX		Inspection_dimension_scalar	+55.00	+54.78	-0.10	+0.10	-0.22
Distance Y		LY		Inspection_dimension_scalar	+20.00	+19.89	-0.10	+0.10	-0.11
Sphere 1		Ø		Inspection_dimension_scalar	+20.00	+19.79	-0.10	+0.10	-0.21

Prealignment 1

Length unit: mm

Třístý 01 Atos II - nekrídovány

8/8

Generated with GOM Inspect Professional V8

C Kalibrační list Souřadnicového měřicího stroje



Hexagon Metrology s.r.o., Litvinovská 609/3, CZ-190 00 Praha 9, tel.: +420 272 680 830, fax: +420 272 680 833, www.hexagonmetrology.cz

KALIBRAČNÍ LIST č. 26317122015 / ISO 10360-2

Zákazník: STEINEL Technik s.r.o.
Rumunská 655/9
CZ-460 01 Liberec

Měřicí zařízení: Souřadnicový měřicí stroj
Výrobce: DEA
Model: Global 07.10.05
Výrobní číslo: 263

Použité etalony: Sada koncových měrek 25 – 1000 mm Kalibrační list č. 070574/14/15032
Kalibrační koule průměr 25 mm Kalibrační list č. 8015-KL-S0150-14

Podmínky měření: Teplota prostředí (24.5 ± 0.5)°C

Metoda měření: Testy podle normy ČSN EN ISO 10360-2

Přesnost stroje: Specifikace podle výrobce stroje
MPE_E = 2.5 + L / 333 μm L ... měřená délka v mm
MPE_P = 2.5 μm

Výsledky měření: Souřadnicový měřicí stroj **VYHOVUJE** specifikované přesnosti MPE_E a MPE_P.
Výsledky měření jsou uvedeny v protokolu č. 71052631512210856 (ISO 10360-2) /
11 listů, který je nedílnou součástí Kalibračního listu.


Datum měření: 17.12.2015


Měření provedl: Jan Horák

.....
Jan Horák
Podpis




D Data náměrů ze SMS

		Report NO.: 18.02.28.001				Datum: 28.2.2018		
						Place: Liberec		
						Author: Franěk		
Part name:								
Part NO:		1,2,3,4,5,6		Material:				
Drawing NO.:		x		Measuring instruments:		DEA Global 07.10.05		
Name of inspection facility:		CNC Test lab.		Supplier:		Radomír Mendřický		
All in mm:								
Position	Name	Dimension	Nominal	Actual	Upp. Tol.	Low. Tol.	Deviation	OK / Outside
1								
D1	diameter	D	14.000	13.957			-0.043	
D2	diameter	D	20.000	20.035			0.035	
Koule	diameter	D	20.000	19.923			-0.077	
x	distance	DIST	55.000	54.953			-0.047	
y	distance	DIST	20.000	20.030			0.030	
2								
D1	diameter	D	14.000	13.867			-0.133	
D2	diameter	D	20.000	20.010			0.010	
Koule	diameter	D	20.000	19.998			-0.002	
x	distance	DIST	55.000	54.922			-0.078	
y	distance	DIST	20.000	19.972			-0.028	
3								
D1	diameter	D	14.000	13.947			-0.053	
D2	diameter	D	20.000	19.886			-0.114	
Koule	diameter	D	20.000	19.955			-0.045	
x	distance	DIST	55.000	55.078			0.078	
y	distance	DIST	20.000	19.956			-0.044	
4								
D1	diameter	D	14.000	13.972			-0.028	
D2	diameter	D	20.000	19.939			-0.061	
Koule	diameter	D	20.000	20.062			0.062	
x	distance	DIST	55.000	55.097			0.097	
y	distance	DIST	20.000	20.057			0.057	
5								
D1	diameter	D	14.000	13.522			-0.478	
D2	diameter	D	20.000	20.556			0.556	
Koule	diameter	D	20.000	20.421			0.421	
x	distance	DIST	55.000	55.405			0.405	
y	distance	DIST	20.000	20.525			0.525	
6								
D1	diameter	D	14.000	13.633			-0.367	
D2	diameter	D	20.000	20.360			0.360	
Koule	diameter	D	20.000	20.388			0.388	
x	distance	DIST	55.000	55.310			0.310	
y	distance	DIST	20.000	20.329			0.329	
Leaves: 1/1		Place: Liberec		Datum: 28.2.2018		Signature: Franěk		

	Report NO.: 18.02.28.001		Datum: 28.2.2018					
			Place Liberec					
			Author: Franěk					
Part name:								
Part NO:		7,8,9,10,11,12		Material:				
Drawing NO.:		x		Measuring instruments: DEA Global 07.10.05				
Name of inspection facility:		CNC Test lab.		Supplier: Radomír Mendřický				
All in mm:								
Position	Name	Dimension	Nominal	Actual	Upp. Tol.	Low. Tol.	Deviation	OK / Outside
7								
D1	diameter	D	14.000	13.983			-0.017	
D2	diameter	D	20.000	20.070			0.070	
Koule	diameter	D	20.000	19.998			-0.002	
x	distance	DIST	55.000	55.015			0.015	
y	distance	DIST	20.000	20.072			0.072	
8								
D1	diameter	D	14.000	13.965			-0.035	
D2	diameter	D	20.000	19.950			-0.050	
Koule	diameter	D	20.000	19.924			-0.076	
x	distance	DIST	55.000	54.922			-0.078	
y	distance	DIST	20.000	19.934			-0.066	
9								
D1	diameter	D	14.000	13.998			-0.002	
D2	diameter	D	20.000	19.893			-0.107	
Koule	diameter	D	20.000	19.894			-0.106	
x	distance	DIST	55.000	54.872			-0.128	
y	distance	DIST	20.000	19.818			-0.182	
10								
D1	diameter	D	14.000	13.941			-0.059	
D2	diameter	D	20.000	19.968			-0.032	
Koule	diameter	D	20.000	19.928			-0.072	
x	distance	DIST	55.000	54.938			-0.062	
y	distance	DIST	20.000	19.946			-0.054	
11								
D1	diameter	D	14.000	13.865			-0.135	
D2	diameter	D	20.000	19.984			-0.016	
Koule	diameter	D	20.000	19.974			-0.026	
x	distance	DIST	55.000	54.903			-0.097	
y	distance	DIST	20.000	19.924			-0.076	
12								
D1	diameter	D	14.000	13.947			-0.053	
D2	diameter	D	20.000	19.944			-0.056	
Koule	diameter	D	20.000	19.930			-0.070	
x	distance	DIST	55.000	54.930			-0.070	
y	distance	DIST	20.000	19.936			-0.064	
Leaves:	1/1	Place:	Liberec	Datum:	28.2.2018	Signature:	Franěk	

STEINEL	Report NO.: 18.02.28.001		Datum: 28.2.2018					
			Place: Liberec					
			Author: Franěk					
Part name:								
Part NO.:	13,14,15,16,17,18	Material:						
Drawing NO.:	x	Measuring instruments:		DEA Global 07.10.05				
Name of inspection facility:	CNC Test lab.	Supplier:		Radomír Mendřický				
All in mm:								
Position	Name	Dimension	Nominal	Actual	Upp. Tol.	Low. Tol.	Deviation	OK / Outside
13								
D1	diameter	D	14.000	13.892			-0.108	
D2	diameter	D	20.000	20.001			0.001	
Koule	diameter	D	20.000	19.982			-0.018	
x	distance	DIST	55.000	54.913			-0.087	
y	distance	DIST	20.000	19.931			-0.069	
14								
D1	diameter	D	14.000	13.937			-0.063	
D2	diameter	D	20.000	19.884			-0.116	
Koule	diameter	D	20.000	19.967			-0.033	
x	distance	DIST	55.000	54.938			-0.062	
y	distance	DIST	20.000	20.014			0.014	
15								
D1	diameter	D	14.000	13.766			-0.234	
D2	diameter	D	20.000	20.228			0.228	
Koule	diameter	D	20.000	20.232			0.232	
x	distance	DIST	55.000	55.076			0.076	
y	distance	DIST	20.000	20.248			0.248	
16								
D1	diameter	D	14.000	13.959			-0.041	
D2	diameter	D	20.000	20.059			0.059	
Koule	diameter	D	20.000	19.974			-0.026	
x	distance	DIST	55.000	54.961			-0.039	
y	distance	DIST	20.000	20.053			0.053	
17								
D1	diameter	D	14.000	13.959			-0.041	
D2	diameter	D	20.000	20.012			0.012	
Koule	diameter	D	20.000	19.895			-0.105	
x	distance	DIST	55.000	54.903			-0.097	
y	distance	DIST	20.000	20.007			0.007	
18								
D1	diameter	D	14.000	13.832			-0.168	
D2	diameter	D	20.000	20.049			0.049	
Koule	diameter	D	20.000	19.987			-0.013	
x	distance	DIST	55.000	54.955			-0.045	
y	distance	DIST	20.000	19.971			-0.029	
Leaves:	1/1	Place:	Liberec	Datum:	28.2.2018	Signature:	Franěk	

		Report NO.: 18.02.28.001			Datum: 28.2.2018				
					Place: Liberec				
					Author: Franěk				
Part name:									
Part NO.:		21,22,23,24,25,26		Material:					
Drawing NO.:		x		Measuring instruments:		DEA Global 07.10.05			
Name of inspection facility:		CNC Test lab.		Supplier:		Radomír Mendřický			
All in mm:									
Position	Name	Dimension	Nominal	Actual	Upp. Tol.	Low. Tol.	Deviation	OK / Outside	
21									
D1	diameter	D	14.000	13.889			-0.111		
D2	diameter	D	20.000	19.906			-0.094		
Koule	diameter	D	20.000	19.631			-0.369		
x	distance	DIST	90.000	89.479			-0.521		
y	distance	DIST	20.000	19.763			-0.237		
22									
D1	diameter	D	14.000	13.970			-0.030		
D2	diameter	D	20.000	19.886			-0.114		
Koule	diameter	D	20.000	19.651			-0.349		
x	distance	DIST	90.000	89.701			-0.299		
y	distance	DIST	20.000	19.721			-0.279		
23									
D1	diameter	D	14.000	13.924			-0.076		
D2	diameter	D	20.000	19.886			-0.114		
Koule	diameter	D	20.000	19.647			-0.353		
x	distance	DIST	90.000	89.715			-0.285		
y	distance	DIST	20.000	19.723			-0.277		
24									
D1	diameter	D	14.000	13.934			-0.066		
D2	diameter	D	20.000	19.876			-0.124		
Koule	diameter	D	20.000	19.640			-0.360		
x	distance	DIST	90.000	89.696			-0.304		
y	distance	DIST	20.000	19.713			-0.287		
25									
D1	diameter	D	14.000	13.917			-0.083		
D2	diameter	D	20.000	19.889			-0.111		
Koule	diameter	D	20.000	19.655			-0.345		
x	distance	DIST	90.000	89.676			-0.324		
y	distance	DIST	20.000	19.721			-0.279		
26									
D1	diameter	D	14.000	13.894			-0.106		
D2	diameter	D	20.000	19.914			-0.086		
Koule	diameter	D	20.000	19.680			-0.320		
x	distance	DIST	90.000	89.694			-0.306		
y	distance	DIST	20.000	19.728			-0.272		
Leaves:		1/1		Place:		Liberec		Datum: 28.2.2018	
				Signature:		Franěk			

Date	Time	Temp. ext. [°C]	Humidity [%]	Dew-poit [°C]	Pressure [hPa]	Temp. int. [°C]
20.2.2018	8:00:00	24.8	17.5	-1.5	992.2	25.4
20.2.2018	8:15:00	24.8	17.5	-1.5	992.3	25.4
20.2.2018	8:30:00	24.8	17.5	-1.5	992.4	25.4
20.2.2018	8:45:00	24.8	17.6	-1.4	992.4	25.5
20.2.2018	9:00:00	24.8	17.5	-1.4	992.5	25.5
20.2.2018	9:15:00	24.8	17.6	-1.4	992.7	25.5
20.2.2018	9:30:00	24.8	17.6	-1.4	992.8	25.5
20.2.2018	9:45:00	24.8	17.6	-1.4	992.9	25.5
20.2.2018	10:00:00	24.8	17.7	-1.3	992.9	25.5
20.2.2018	10:15:00	24.9	17.8	-1.2	992.7	25.5
20.2.2018	10:30:00	24.9	18	-1	992.6	25.6
20.2.2018	10:45:00	25	17.9	-1	992.6	25.6
20.2.2018	11:00:00	25	18.2	-0.8	992.4	25.7
20.2.2018	11:15:00	25	18.2	-0.8	992.2	25.7
20.2.2018	11:30:00	25	18.5	-0.6	992.2	25.7
20.2.2018	11:45:00	24.9	19.5	0.1	991.9	25.7
20.2.2018	12:00:00	25	23.7	2.8	991.7	25.7
20.2.2018	12:15:00	25	20	0.5	991.7	25.7
20.2.2018	12:30:00	25	19.3	0	991.5	25.7
20.2.2018	12:45:00	25	19	-0.1	991.1	25.7
20.2.2018	13:00:00	25	18.8	-0.3	991.2	25.7
20.2.2018	13:15:00	25	18.7	-0.3	991.1	25.7
20.2.2018	13:30:00	25	18.5	-0.5	991.1	25.7
20.2.2018	13:45:00	25	18.5	-0.5	991.1	25.7
20.2.2018	14:00:00	25	18.7	-0.4	991	25.7
20.2.2018	14:15:00	25	18.5	-0.5	990.9	25.7
20.2.2018	14:30:00	25	18.5	-0.5	990.8	25.8
20.2.2018	14:45:00	25.1	18.6	-0.4	990.8	25.8
20.2.2018	15:00:00	25.1	18.7	-0.3	991.1	25.8
20.2.2018	15:15:00	25.1	18.6	-0.4	991.3	25.8
20.2.2018	15:30:00	25.1	18.6	-0.4	991.3	25.7
20.2.2018	15:45:00	25.1	18.5	-0.4	991.2	25.7
20.2.2018	16:00:00	25.1	18.6	-0.4	991.1	25.7
20.2.2018	16:15:00	25	18.6	-0.5	990.9	25.7
20.2.2018	16:30:00	25	18.5	-0.5	991	25.6
20.2.2018	16:45:00	25	18.4	-0.6	990.8	25.5

Conditions for max. measurement accuracy	
Temperature neighbourhood machine	20°C ± 2°C
Thermal gradient	1°C/h 2°C/24h
Process conditions	
Temperature of working	10°C ÷ 40°C
Relative humidity	25 ÷ 75 %

E Kompletní data ze skenerů Atos II a Atos III

Č. vzorku		naměřeno				odchyka		odchyka		
		nominal (SMS)	Atos II		Atos III		Atos II		Atos III	
			nekřídované	křídované	nekřídované	křídované	nekřídované	křídované	nekřídované	křídované
1	D1	13,957	14,14	13,92	14,02	13,94	0,183	-0,037	0,063	-0,017
	D2	20,035	19,82	20,03	19,94	20,02	-0,215	-0,005	-0,095	-0,015
	x	54,953	54,78	54,99	54,87	54,96	-0,173	0,037	-0,083	0,007
	y	20,030	19,89	20,11	19,96	20,11	-0,140	0,080	-0,070	0,080
	Koule	19,923	19,79	20,00	19,91	20,01	-0,133	0,077	-0,013	0,087
2	D1	13,867	14,12	13,86	14,00	13,88	0,253	-0,007	0,133	0,013
	D2	20,010	19,84	20,08	19,94	20,07	-0,170	0,070	-0,070	0,060
	x	54,922	54,71	54,93	54,79	54,89	-0,212	0,008	-0,132	-0,032
	y	19,972	19,75	20,01	19,84	20,01	-0,222	0,038	-0,132	0,038
	Koule	19,998	19,79	20,04	19,90	20,04	-0,208	0,042	-0,098	0,042
3	D1	13,947	14,03	13,93	14,04		0,083	-0,017	0,093	
	D2	19,886	19,86	19,93	19,83		-0,026	0,044	-0,056	
	x	55,078	55,03	55,08	54,98		-0,048	0,002	-0,098	
	y	19,956	19,86	20,03	19,85		-0,096	0,074	-0,106	
	Koule	19,955	19,90	19,99	19,88		-0,055	0,035	-0,075	
4	D1	13,972	-	13,95	14,07			-0,022	0,098	
	D2	19,939	-	20,01	19,90			0,071	-0,039	
	x	55,097	-	55,03	54,93			-0,067	-0,167	
	y	20,057	-	20,08	19,95			0,023	-0,107	
	Koule	20,062	-	19,96	19,89			-0,102	-0,172	
5	D1	13,522	-	13,49	14,63			-0,032	1,108	
	D2	20,556	-	20,54	19,15			-0,016	-1,406	
	x	55,405	-	55,33	-			-0,075		
	y	20,525	-	20,79	17,37			0,265	-3,155	
	Koule	20,421	-	20,43	19,21			0,009	-1,211	
6	D1	13,633	13,79	13,71	13,79		0,157	0,077	0,157	
	D2	20,360	20,15	20,24	20,14		-0,210	-0,120	-0,220	
	x	55,310	55,10	55,18	55,09		-0,210	-0,130	-0,220	
	y	20,329	20,19	20,31	20,17		-0,139	-0,019	-0,159	
	Koule	20,388	20,24	20,34	20,23		-0,148	-0,048	-0,158	
7	D1	13,983	-	13,92	14,06			-0,063	0,077	
	D2	20,070	-	20,07	19,97			0,000	-0,100	
	x	55,015	-	54,94	54,85			-0,075	-0,165	
	y	20,072	-	20,10	19,99			0,028	-0,082	
	Koule	19,998	-	20,09	19,88			0,092	-0,118	
8	D1	13,965	-	13,98	-			0,015		
	D2	19,950	-	19,99	-			0,040		
	x	54,922	-	54,95	-			0,028		
	y	19,934	-	19,96	-			0,026		
	Koule	19,924	-	19,96	-			0,036		
9	D1	13,998	-	13,99	10,72			-0,008		
	D2	19,893	-	19,95	19,77			0,057		
	x	54,872	-	54,84	54,74			-0,032		
	y	19,818	-	19,83	19,73			0,012		

	Koule	19,894	-	19,91	19,82		0,016		
10	D1	13,941	14,04	13,91	14,06		0,099	-0,031	0,119
	D2	19,968	19,90	20,01	19,87		-0,068	0,042	-0,098
	x	54,938	54,91	54,96	54,85		-0,028	0,022	-0,088
	y	19,946	19,81	19,99	19,87		-0,136	0,044	-0,076
	Koule	19,928	19,90	20,00	19,87		-0,028	0,072	-0,058
11	D1	13,865	13,96	13,87	14,02		0,095	0,005	0,155
	D2	19,984	19,95	20,04	19,89		-0,034	0,056	-0,094
	x	54,903	54,81	54,91	54,75		-0,093	0,007	-0,153
	y	19,924	19,87	19,96	19,81		-0,054	0,036	-0,114
	Koule	19,974	19,91	19,99	19,85		-0,064	0,016	-0,124
12	D1	13,947	14,31	13,94	14,05		0,363	-0,007	0,103
	D2	19,944	19,61	20,00	19,88		-0,334	0,056	-0,064
	x	54,930	54,57	54,96	54,87		-0,360	0,030	-0,060
	y	19,936	19,52	19,98	19,86		-0,416	0,044	-0,076
	Koule	19,930	19,69	19,99	19,88		-0,240	0,060	-0,050
13	D1	13,892	14,14	13,90	14,00		0,248	0,008	0,108
	D2	20,001	19,79	20,02	19,92		-0,211	0,019	-0,081
	x	54,913	54,68	54,90	54,78		-0,233	-0,013	-0,133
	y	19,931	19,67	19,94	19,83		-0,261	0,009	-0,101
	Koule	19,982	19,78	19,99	19,88		-0,202	0,008	-0,102
14	D1	13,937	14,35	13,97	14,24		0,413	0,033	0,303
	D2	19,884	19,53	19,91	19,61		-0,354	0,026	-0,274
	x	54,938	54,54	54,90	54,65		-0,398	-0,038	-0,288
	y	20,014	19,60	20,00	19,71		-0,414	-0,014	-0,304
	Koule	19,967	19,58	19,94	19,63		-0,387	-0,027	-0,337
15	D1	13,766	14,42	13,82	14,27		0,654	0,054	0,504
	D2	20,228	19,61	20,23	19,72		-0,618	0,002	-0,508
	x	55,076	54,51	55,01	54,60		-0,566	-0,066	-0,476
	y	20,248	19,69	20,20	19,72		-0,558	-0,048	-0,528
	Koule	20,232	19,62	20,18	19,72		-0,612	-0,052	-0,512
16	D1	13,959	14,37	13,95	14,17		0,411	-0,009	0,211
	D2	20,059	19,65	20,09	19,86		-0,409	0,031	-0,199
	x	54,961	54,52	54,95	54,69		-0,441	-0,011	-0,271
	y	20,053	19,59	20,11	19,84		-0,463	0,057	-0,213
	Koule	19,974	19,58	20,06	19,76		-0,394	0,086	-0,214
17	D1	13,959	14,14	13,96	14,03		0,181	0,001	0,071
	D2	20,012	19,81	20,02	19,93		-0,202	0,008	-0,082
	x	54,903	54,72	54,93	54,85		-0,183	0,027	-0,053
	y	20,007	19,84	20,07	19,99		-0,167	0,063	-0,017
	Koule	19,895	19,78	19,99	19,88		-0,115	0,095	-0,015
18	D1	13,832	14,07	13,88	13,99		0,238	0,048	0,158
	D2	20,049	19,86	20,09	19,94		-0,189	0,041	-0,109
	x	54,955	54,73	54,94	54,79		-0,225	-0,015	-0,165
	y	19,971	19,78	20,00	19,85		-0,191	0,029	-0,121
	Koule	19,987	19,80	20,03	19,88		-0,187	0,043	-0,107
19	D1	14,463	14,50	14,44	14,51		0,037	-0,023	0,047
	D2	20,913	20,68	20,82	20,69		-0,233	-0,093	-0,223
	x	58,200	57,96	58,07	57,96		-0,240	-0,130	-0,240

	y	20,105	19,94	20,10	19,93		-0,165	-0,005	-0,175	
	Koule	20,260	20,19	20,32	20,21		-0,070	0,060	-0,050	
20	D1	14,407	14,61	14,53	14,60		0,203	0,123	0,193	
	D2	20,708	20,64	20,76	20,64		-0,068	0,052	-0,068	
	x	55,730	55,50	55,66	55,50		-0,230	-0,070	-0,230	
	y	21,03	20,85	20,99	20,85		-0,180	-0,040	-0,180	
	Koule	20,352	20,30	20,42	20,31		-0,052	0,068	-0,042	
21	D1	13,890	-	13,85	-			-0,040		
	D2	20,060	-	20,15	-			0,090		
	x	89,479	-	89,52	-			0,041		
	y	19,763	-	19,84	19,73			0,077	-0,033	
	Koule	19,640	-	19,69	19,50			0,050	-0,140	
22	D1	13,970	-	13,92	-			-0,050		
	D2	20,040	-	20,13	-			0,090		
	x	89,701	-	89,76	89,66			0,059	-0,041	
	y	19,721	-	19,80	19,74			0,079	0,019	
	Koule	19,651	-	19,71	19,61			0,059	-0,041	
23	D1	13,924	-	13,90	-			-0,024		
	D2	20,040	-	20,10	20,04			0,060	0,000	
	x	89,715	-	89,75	89,67			0,035	-0,045	
	y	19,723	-	19,77	19,69			0,047	-0,033	
	Koule	19,647	-	19,69	19,62			0,043	-0,027	
24	D1	13,934	-	13,91	-			-0,024		
	D2	20,040	-	20,09	20,02			0,050	-0,020	
	x	89,696	-	89,74	89,63			0,044	-0,066	
	y	19,713	-	19,76	19,65			0,047	-0,063	
	Koule	19,640	-	19,69	19,61			0,050	-0,030	
25	D1	13,917	-	13,89	-			-0,027		
	D2	20,030	-	20,07	-			0,040		
	x	89,676	-	89,71	-			0,034		
	y	19,721	-	19,75	-			0,029		
	Koule	19,655	-	19,66	-			0,005		
26	D1	13,894	-	13,86	13,99			-0,034	0,096	
	D2	20,070	-	20,12	20,02			0,050	-0,050	
	x	89,694	-	89,74	89,61			0,046	-0,084	
	y	19,728	-	19,76	19,66			0,032	-0,068	
	Koule	19,680	-	19,57	19,46			-0,110	-0,220	
27	D1	13,990	14,11	14,06	14,11	14,08	0,120	0,070	0,120	0,090
	D2	19,900	19,80	19,85	19,80	19,84	-0,100	-0,050	-0,100	-0,060
	x	54,960	54,84	54,89	54,86	54,90	-0,120	-0,070	-0,100	-0,060
	y	19,990	19,93	20,01	19,93	20,00	-0,060	0,020	-0,060	0,010
	Koule	19,900	19,84	19,89	19,84	19,89	-0,060	-0,010	-0,060	-0,010
28	D1	13,930	14,04	13,99	14,04	14,01	0,110	0,060	0,110	0,080
	D2	19,930	19,80	19,84	19,80	19,84	-0,130	-0,090	-0,130	-0,090
	x	54,990	54,78	54,82	54,80	54,84	-0,210	-0,170	-0,190	-0,150
	y	20,000	19,93	20,01	19,93	20,00	-0,070	0,010	-0,070	0,000
	Koule	19,920	19,84	19,89	19,84	19,89	-0,080	-0,030	-0,080	-0,030