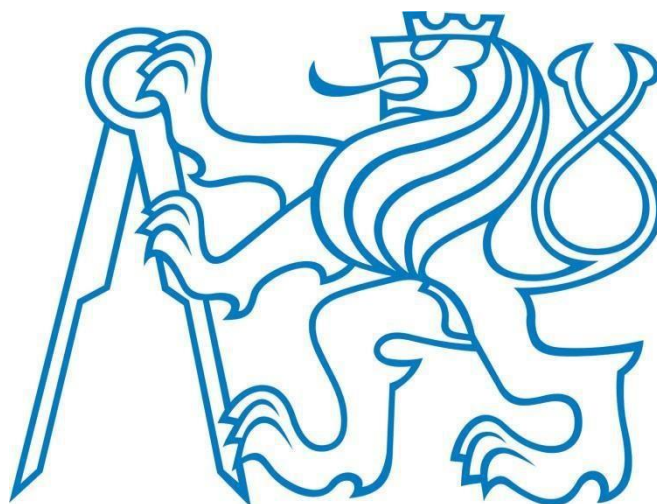


# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Porovnání kontaktních a bezkontaktních metod při  
měření obecných tvarových ploch

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Jiří Vaněček

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

Praha 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaněček** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **474993**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Porovnání kontaktních a bezkontaktních metod při měření obecných tvarových ploch**

Název bakalářské práce anglicky:

**Comparison of tactile and non-contact sensors when measuring freeform surfaces**

Pokyny pro vypracování:

Princip CMM, princip CT, využití, rozdělení  
Volba součástí a definice srovnávacích charakteristik  
Příprava plánů měření  
Vyhodnocení naměřených dat

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_



Ing. Jan Šimota  
podpis vedoucí(ho) práce



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



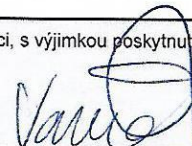
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.06.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta



## Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....  
podpis



## Poděkování:

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Šimotovi za veškeré rady, poznatky, trpělivost, ochotu a čas během tvorby této práce, kterých si nesmírně cením.



## Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na porovnání kontaktních a bezkontaktní metod měření obecných tvarových ploch. První část se zabývá popisem dotykové souřadnicové měřicí techniky. Pozornost je zaměřena na rozdělení, možnostech využití a principu měření na dotykových souřadnicových měřicích strojích. V další části je rozebírána bezdotyková souřadnicová měřicí technika. Tato část zahrnuje její rozdělení, možnosti využití a princip měření součástí. Zvláštní pozornost bude věnována počítačové tomografii. Poté dojde k popsání obecných tvarových ploch a křivek a možnostem jejich měření. Dále se práce zabývá volbou součásti a definicí srovnávacích charakteristik. Poté se bude věnovat způsobu získání dat na jednotlivých zařízeních. V závěru se vyhodnotí naměřená data a dojde k porovnání daných měření.

## Klíčová slova

CMM, souřadnicové měřicí stroje, souřadnicové měřicí techniky, kontaktní a bezkontaktní sensorika, optická měřicí technika, průmyslová metrologie, CT, počítačová tomografie.

## Abstract

This bachelor thesis is focused on comparison of tactile and non-contact sensors when measuring freeform surfaces. The thesis introduction describes tactile coordinate measurement methods, it is focused on distribution, possibilities of use and principle of measuring on tactile coordinate measuring machines. The next section shows non-contact coordinate measuring machines. This section includes it's distribution, possibilities of use and principle of measuring, especially is focused on computer tomography. Then will be described freeform surfaces and curves and possibilities of their measurement. Furthermore the thesis deals with the choice of the measured component and the definition of comparative characteristics. Then it is focused on how to obtain data on individual devices. Finally, the measured data are evaluated and the measurements are compared.

## Keywords

CMM, Coordinate Measuring Machines, coordinate measuring techniques, tactile and non-contact sensors, optical measurement technology, industrial metrology, X-Rays, computer tomography.



## Obsah

Úvod .....	9
1. Souřadnicové měřicí stroje.....	10
1.1 Konstrukce CMM .....	10
1.1.1 Kartézsky uspořádané CMM .....	11
1.1.2 Nekartézsky uspořádané CMM .....	13
1.2 Prvky mechanického systému .....	13
1.2.1 Rám.....	13
1.2.2 Stůl (pracovní deska) .....	13
1.2.3 Most .....	14
1.2.4 Pinola .....	14
1.2.5 Vedení.....	14
1.3 Princip měření na CMM.....	15
1.4 Postup kontroly součástí na CMM .....	15
1.4.1 Analýza výkresové dokumentace .....	16
1.4.2 Definování upnutí měřené součásti .....	16
1.4.3 Konfigurace a verifikace snímačů .....	17
1.5.4 Vyrovnání součásti .....	20
1.5.5 Extrakce bodů a definování geometrických prvků .....	21
1.5.6 Výpočet charakteristik.....	22
1.5.7 Vyhodnocení měření a tvorba protokolů .....	23
1.6 Zdroje variability.....	23
1.7 Snímací systémy .....	24
2. Kontaktní snímací systémy .....	25
2.1 Spínací snímací systém .....	26
2.2 Elektromechanická sonda .....	27
2.3 Skenovací snímací systém .....	29
2.4 Příklady dotykových snímacích systémů .....	30
3. Bezkontaktní snímací systémy .....	31
3.1 Principy pro 3D měření objektu .....	31
3.2 Optické 3D skenery.....	32
3.2.1 Kamerové systémy .....	33
3.2.2 Pruhový projektor .....	33
3.2.3 Fotogrammetrie .....	34



3.2.4	Senzor bílého světla.....	35
3.3	Laserové 3D skenery.....	36
3.3.1	Laser scanner.....	37
3.3.2	Laser tracker.....	38
3.3.3	Laser radar.....	39
3.4	Ultrazvukové skenery.....	39
3.5	Počítačová tomografie.....	40
3.5.1	Druhy počítačových tomografů.....	40
3.5.2	Konstrukční řešení.....	40
3.5.3	Princip průmyslových tomografů.....	41
3.5.4	Získávání dat.....	42
4.	Obecné tvarové plochy a křivky.....	44
4.1	Možnosti měření křivek a obecných ploch v software Calypso.....	45
4.1.1	Měření křivek.....	45
4.1.2	Měření obecných tvarových ploch.....	46
5.	Měření.....	48
5.1	Získání dat z CT.....	50
5.1.1	Ustavení a upnutí artefaktů.....	50
5.1.2	Nastavení parametrů skenu.....	51
5.1.3	Nastavené parametry pro sken čočky.....	51
5.1.4	Výsledky skenu čočky.....	52
5.1.5	Nastavené parametry pro sken čočky s podstavou.....	54
5.1.6	Výsledky skenu čočky.....	55
5.2	Tvorba STL modelů.....	55
5.3	Získání dat z optického skeneru COMET L3D 2.....	59
5.4	Získání dat z CMM.....	60
5.4.1	Upnutí součástí.....	60
5.4.2	Měřicí konfigurace.....	61
5.4.3	Vyrovnání.....	62
5.4.4	Extrakce bodů a výpočet charakteristik.....	63
5.4.5	Teplotní kompenzace.....	63
5.4.6	Vyhodnocení.....	64
6.	Porovnání výsledků.....	65
6.1	Porovnání výsledků čočky.....	65
6.1.1	Porovnání: CT x OPTON x COMET.....	65



6.1.2 Zhodnocení porovnání: CT x OPTON x COMET .....	68
6.1.3 Porovnání: s a bez teplotní korekce .....	70
6.1.4 Zhodnocení porovnání: s a bez teplotní korekce .....	72
6.1.5 Porovnání CT x STL .....	73
6.1.6 Zhodnocení porovnání CT x STL.....	78
6.2 Porovnání výsledků čočky s podstavou .....	80
6.2.1 Porovnání: CT x COMET x OPTON u čočky s podstavou .....	80
6.2.2 Zhodnocení porovnání: CT x COMET x OPTON u čočky s podstavou .....	83
6.2.3 Porovnání: s a bez teplotní korekce u čočky s podstavou.....	85
6.2.4 Zhodnocení porovnání: s a bez teplotní korekce u čočky s podstavou.....	87
6.2.5 Porovnání: CT x STL u čočky s podstavou .....	89
6.2.6 Zhodnocení porovnání: CT x STL u čočky s podstavou .....	93
Závěr .....	95
Zdroje .....	97
Seznam obrázků .....	99
Seznam tabulek .....	101
Seznam grafů .....	101





# Úvod

Vzhledem ke stále se zvyšujícím požadavkům na funkční vlastnosti produktů je potřeba složitějších výrobních programů a je kladen veliký důraz na výrobu, která se musí stále zpřesňovat. Pro měření tvaru a dalších požadovaných vlastností vyráběných výrobků trh nabízí mnoho druhů měřidel. Jsou to měřidla, která měří v jedné ose (např. posuvná měřítka), ve dvou osách (např. dílenské mikroskopy), nebo ve třech osách. Poslední jmenovaná měřidla nazýváme souřadnicové měřicí stroje neboli Coordinate Measuring Machines (CMM).

Hlavní funkcí souřadnicových měřicích strojů je komplexní změření obrobku, tedy změření jeho aktuálního tvaru, porovnání s požadovaným tvarem a vyhodnocení metrologických parametrů jako je velikost, tvar apod. Z toho vyplývá, že souřadnicové měřicí stroje jsou velmi využívanými stroji pro kontrolu kvality výrobků, z hlediska rozměrových a geometrických tolerancí. Obecné tvarové plochy se hojně vyskytují u plastových dílů, a především u topologicky a ergonomicky optimalizovaných dílů. Jsou značně využívány v průmyslových odvětvích, jako je automobilový a letecký průmysl, kosmonautika a další. Proto nachází souřadnicové měřicí stroje značné uplatnění v měření a kontrole kvality obecných tvarových ploch. Díky širokému spektru využití jsou souřadnicové měřicí stroje univerzální zařízení, umožňující kontrolu kvality, při zachování vysoké produktivity výroby.

Počítačová tomografie (computed tomography) neboli také rentgenová tomografie je významný nástroj v medicínské diagnóze, kterým můžeme například nalézt nádorové struktury. Medicína však není jediný obor, ve kterém nachází počítačová tomografie uplatnění. Její uplatnění v posledních letech významně roste také v průmyslovém sektoru.

Počítačovou tomografii lze rovněž použít ke kontrole prostorových objektů. Jedná se o metodu nedestruktivního testování hojně využívanou v defektoskopii. Pomocí rentgenového záření je možné detekovat vady a defekty výrobku, které nejsou patrné pouhým okem. Může se jednat například o kontrolu pórovitosti, staženin nebo bublin, kontrolu svarů a podobně. S technickým pokrokem v rámci zvyšování výkonu zdroje rentgenového záření je v současné době možné využití tomografie také v metrologii. Metoda měření zvaná metrotomografie umožňuje získat informace o vnější i vnitřní geometrii s vysokou přesností.

Daný způsob se kromě možnosti měření vnitřní struktury součásti, je možné jej využít ke komplexní kontrole dílů v průmyslu, a také vyznačuje také menší časovou náročností oproti konvenčním měřicím metodám, jako jsou například souřadnicové měřicí přístroje.

Cílem této práce je seznámit čtenáře s problematikou kontaktních souřadnicových měřicích strojů a bezkontaktních měřicích strojů, z nichž se konkrétněji zaměří na porovnání měření dotykového souřadnicového měřicího stroje OPTON UMC 850, počítačového tomografu Metronom 1500 a optického zařízení COMET L3D 2, vše od společnosti Zeiss. Dále dojde k porovnání dotykových měření s deaktivovanou a aktivovanou teplotní kompenzací. Poslední porovnání bude zkoumat rozdíly v měření mraku bodů z tomografu a datově redukoványými modely tohoto mraku tvořené trojúhelníkovou sítí. Veškerá měření budou prováděna na dvou artefaktech čočky.



# 1. Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje představují jednu z nejdůležitějších, dynamicky se rozvíjejících inovací v oblasti měření ve strojírenství. CMM se začaly využívat zhruba před padesáti lety paralelně s nástupem výpočetní techniky a jejím propojováním s výrobou a kontrolou kvality.

Konstrukce souřadnicových měřicích strojů byla zapříčiněna potřebou měření tvarově složitých součástí v automobilovém a leteckém průmyslu (např. měření karoserií vozů), nebo u NC a CNC strojů. V současné době se většina výrobních podniků bez CMM téměř neobejde. Souřadnicová měřicí technika se tedy stala nezbytným předpokladem pro kontrolu kvality v průmyslu. Postupem času byly vyvinuty normy a směrnice k harmonizaci specifikace výkonnosti CMM. Hlavním důvodem byla především možnost, aby byl uživatel schopen provést porovnání při nákupu zařízení a jeho způsobilosti ve výrobě. Návaznost na národní standardy a přesnost měření provedených u tříosých souřadnicových měřicích strojů je velice důležitá pro zachování důvěry a spolehlivosti měření. [3]

Mezi další významné výhody měření pomocí CMM patří rychlost měření umožňující kontrolovat větší počet kusů a tím urychlit vyhodnocování. CMM kontroluje výrobky podobným způsobem, jako je CNC stroj vyrábí, měřené časy redukuje asi o 80 %. Spolehlivost CMM se neustále zvyšuje, a přitom se snižuje jejich citlivost vůči vnějším rušivým vlivům, tudíž je možné zařazení těchto strojů přímo do dílen a nemusí se nacházet jen v laboratořích. Toto umožňuje bezprostřední zapojení do systému kontroly kvality a vytvoření 100 % podmínek pro kontrolu důležitých součástí. [5] [10]

## 1.1 Konstrukce CMM

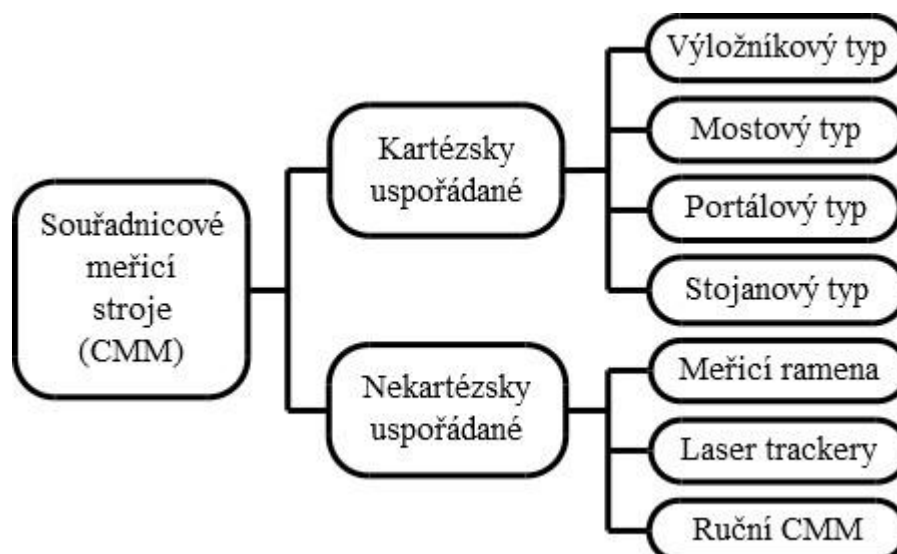
Každá konstrukce CMM se skládá ze základny stroje, stolu pro umístění součásti, pohybujících se pilířů, vodících ploch a pinoly. Souřadnicový měřicí stroj by měl splňovat následující požadavky:

- rozměrová stabilita,
- nízká hmotnost,
- vysoká schopnost tlumení vibrací,
- nízký koeficient teplotní roztažnosti,
- vysoká tepelná vodivost.

Mezi nejvíce používané materiály pro konstrukci CMM patří ocel, granit (žula), slitiny hliníku, keramika a kompozitní materiály. Granit je základním materiálem pro výrobu desky pracovního stolu, neboť je vysoce odolný proti opotřebení a poškrábání. Mezi jeho další výhody patří nízký koeficient teplotní roztažnosti a dobré tlumení vibrací. Naopak nevýhodou je jeho vysoká hmotnost. Dalším konstrukčním materiálem je ocel. Tento materiál se vyznačuje tím, že to nejdostupnější konstrukční materiál. Bohužel jeho nevýhodou je velká hmotnost a teplotní roztažnost. Slitiny hliníku se využívají pro jejich nízkou hmotnost a vysokou odolnost proti korozi. Proto je to vhodný materiál pro konstrukce. Keramika je materiál vyznačující se nízkou hmotností, vysokou pevností a teplotní stabilitou. Výraznou nevýhodou je cena tohoto materiálu. Kompozitní materiály jsou vysoce pevné, teplotně stabilní a jejich hlavní předností je jejich výrazně nízká hmotnost. Bohužel cena kompozitních materiálů je v porovnání s ostatními dostupnými konstrukčními materiály velice vysoká. [1] [9]



Rozdělení souřadnicových měřicích strojů zobrazeno na obrázku níže.



Obr. 1 Rozdělení souřadnicových měřicích strojů [9]

### 1.1.1 Kartézsky uspořádané CMM

Stroje tohoto typu pracují na základně kartézského souřadného systému. Tento systém se skládá ze třech na sebe kolmých os, pomocí kterých se měří všechny souřadnice obrobku. [6]

#### Výložníkový typ CMM

Tato konstrukce CMM se skládá z pohyblivého konzolového ramene, na kterém je umístěn pojezd s pinolou. Nesmírnou výhodou této konstrukce je dobrý přístup k obrobku. Manipulační prostor je otevřen ze tří stran. Výložníková konstrukce nabízí dlouhý stůl s relativně malými měřicími rozsahy s vysokou přesností. Výhodou je také vysoká výkonnost, která se uplatňuje jak ve výrobě, tak i laboratořích pro rychlé proměření součásti. Naopak nevýhodou je prohýbání této konstrukce. Příklad CMM výložníkového typu je na Obr. 2. [6]



Obr. 2 Zeiss DuraMax [25]

Tabulka 1 Parametry Zeiss DuraMax [25]

Měřicí rozsah X x Y x Z [mm]	Délková chyba [ $\mu\text{m}$ ]
500 x 500 x 500	2,4 + L/300 při 18-22°C
	2,7 + L/250 při 18-26°C
	2,9 + L/200 při 18-30°C



### Mostový typ CMM

V dnešní době jde o nerozšířenější konstrukci kartézských CMM. Masivní konstrukce vyniká vysokou tuhostí, přesností a velkým měřicím prostorem, proto se nejvíce uplatňuje v automobilovém a leteckém průmyslu např. při měření karoserií automobilů. Výhodou je, že obsluha stroje má umožněný přístup do celého prostoru souřadnicového měřicího stroje. Příkladem CMM s mostovou konstrukcí je zobrazen na Obr. 3. [6]



Tabulka 2 Parametry Zeiss MMZ E [25]

Měřicí rozsah X x Y x Z [mm]	Délková chyba [ $\mu\text{m}$ ]
2000 x 3000 x 1000	od 3,5 + L/230
2000 x 4000 x 1500	od 3,5 + L/230
2500 x 5000 x 1500	od 4,0 + L/170
2500 x 6000 x 1800	od 4,0 + L/170

Obr. 3 Zeiss MMZ E [25]

### Portálový typ CMM

Tento typ konstrukce kartézsky uspořádaného CMM vyniká svou vysokou pevností a přesností. Používá se pro měření středních a velkých rozsahů měření. Tento typ se vyrábí ve dvou variantách-s pohyblivým portálem nebo s pevným portálem. Konstrukce s pohyblivým portálem se pohybuje pomocí ložisek po krajích pracovního stolu. Nevýhodou pohyblivého stolu je, že se musí pohybovat i s měřenou součástí. Konstrukce s pevným portálem vyžaduje pohyblivý stůl. Výhodou je vyšší tuhost konstrukce. Příkladem provedení s pohyblivým portálem je na Obr. 4. [6]



Tabulka 3 Parametry Zeiss Prismo [25]

Měřicí rozsah X x Y x Z [mm]	Délková chyba [ $\mu\text{m}$ ]
700 x 1000 x 500	0,5 + L/500
900 x 1300 x 650	0,5 + L/500
1200 x 2400 x 1000	od 1,0 + L/500
1600 x 3000 x 1000	od 1,6 + L/400

Obr. 4 Zeiss PRISMO [25]



### Stojanový typ CMM

Tato konstrukce je ideální pro měření např. automobilových dílů. Konstrukce se skládá z nosného sloupu, na kterém je posuvně upevněno horizontální rameno, na jehož konci je umístěna snímací hlava. Pro měření velkých součástí z obou stran se využívá dvou synchronně měřících souřadnicových strojů této stojanové konstrukce. Rychlost a přesnost měření závisí na velikosti měřené součásti. Výhodou této konstrukce je dobrá přístupnost snímací hlavy ke všem stranám měřené součásti. Příklad stojanové konstrukce je zobrazen na Obr. 5. [6]



Obr. 5 Zeiss PRO [25]

Tabulka 4 Parametry Zeiss PRO [25]

Měřicí rozsah X x Y x Z [mm]	Délková chyba [ $\mu\text{m}$ ]
5000 x 3000 x 2100	od 18 + L/125
6000 x 3000 x 2500	od 18 + L/125
7000 x 3500 x 2500	od 27 + L/80
10000 x 3500 x 3000	od 27 + L/80

#### 1.1.2 Nekartézsky uspořádané CMM

Jak je uvedeno na Obr. 1 dalším typem souřadnicových měřících strojů jsou CMM s nekartézsky uspořádaným souřadným systémem. Tyto stroje pracují s ostatními druhy souřadných systémů, jako jsou např. cylindrické, sférické.

Pro realizaci měření v tomto souřadném systému se využívá různých způsobů – měření pomocí kloubových ramen, měření založené na triangulaci, měření pomocí sférického souřadného systému či měření využívající měření vzdálenosti charakteristických bodů z několika referenčních bodů. Patří sem zařízení jako jsou měřící ramena, laser trackery a ruční CMM.[6]

## 1.2 Prvky mechanického systému

### 1.2.1 Rám

Jedná se o svařovanou nebo odlitou konstrukci co největší tuhosti (nese ostatní části mechanického systému). U mostových typů je rám nahrazen deskou v podlaze.

### 1.2.2 Stůl (pracovní deska)

Nejčastěji se vyrábí z umělého kamene (granit), přírodního kamene (žula), případně z litinového odlitku. Je ustaven na čtyřech podpěrách. Horní plocha stolu je broušená (vysoké požadavky na rovinnost funkčních ploch). V pracovní ploše jsou otvory se závity, které pomocí šroubů, upínek a upínacích přípravků slouží k upevnění měřených dílců.



K vlastnostem materiálu, které jsou vyžadovány patří:

- Vysoká životnost
- Objemová stálost
- Minimální tepelná roztažnost
- Odolnost proti korozi
- Možnost opravy při případném poškození

### 1.2.3 Most

Složená uzavřená konstrukce, jejíž stojiny tvoří normované profily (ČSN 42 6936). Překlad mostu tvoří vedení příčných saní.

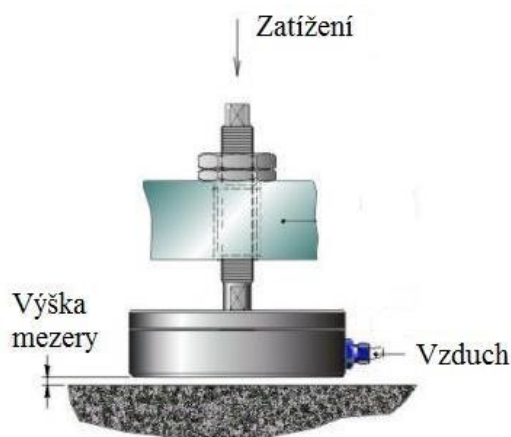
### 1.2.4 Pinola

Tyč profilu H, vyrobená buď z duralu nebo litiny, případně z přírodního kamene či keramiky. Může být navrhována ve vertikálním nebo horizontálním provedení. Horizontální pinola musí být navíc opatřena vyvažovacím mechanismem, který minimalizuje chyby způsobené rozdílnou délkou vysunutí pinoly. Ty jsou způsobeny ohybovým namáháním od vlastní hmotnosti. Sloupy, mostní konstrukce, portály – většinou bývají provedeny jako svařence. Důraz je kladen na dostatečnou tuhost, rozměrovou a tvarovou stálost.

### 1.2.5 Vedení

U CMM je konstrukce pohyblivých částí provedena tak, aby pohyblivé části mohly lehce realizovat plynulý pohyb bez trhání s maximální přesností i při minimálních rychlostech, které jsou v koncových polohách. Je nezbytné, aby při posuvu pohyblivých částí na vedení docházelo k co nejmenšímu tření a minimálnímu opotřebení. Nejběžnějšími typy uložení jsou bezdotykové vzduchové uložení a mechanické uložení.

Aerostatické vzduchové uložení (Obr. 6) umožňuje pohyb částí CMM po vzduchovém polštáři. Šířka tohoto polštáře je mezi 1-10  $\mu\text{m}$ . Mezi výhody tohoto uložení patří nízké tření i při vyšších rychlostech. Problémem u tohoto uložení je čistota vzduchu. Musíme udržovat povrch, po kterém se části pohybují, neustále čistý. Pokud by se zde vyskytovaly nečistoty, mohlo by dojít k poškození vzduchové vrstvy a následně k poškození celého vedení.



Obr. 6 Princip vzduchového uložení [8]

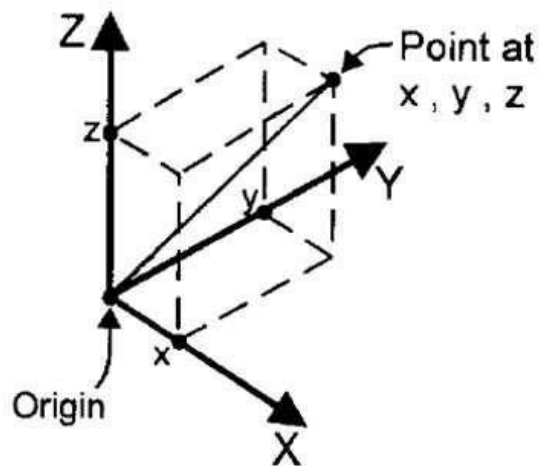


Mezi mechanická vedení patří vedení valivé a kluzné. Valivé vedení je uloženo na válečkových nebo kuličkových ložiskách. Je nevhodnějším a často využívaným vedením pro CMM. Výhodami je malé tření, vysoká rovnoměrnost pohybů, odolnost proti opotřebení a tuhost. Kluzné vedení vyniká svou vysokou tuhostí. Nevýhodou je velký odpor. Toto vedení je jen pro malé rychlosti posuvů. Musí se neustále mazat. Proto se dnes již téměř nevyužívá. [3] [10]

### 1.3 Princip měření na CMM

Základním principem měření na CMM je nasnímání jednotlivých bodů v prostoru. Z takovýchto nasnímaných bodů jsou vyhodnocovány geometrické elementy, jako například přímka, rovina, kružnice a válec. Pomocí těchto geometrických elementů můžeme vyhodnocovat rozměrové a úhlové charakteristiky, nebo tolerance tvaru součástí vzhledem k předepsaným hodnotám z výkresové dokumentace.

Na Obr. 7 je znázorněn bod určený souřadnicemi  $(x, y, z)$  v kartézském souřadném systému.



Obr. 7 Kartézský souřadný systém [8]

### 1.4 Postup kontroly součástí na CMM

Proces postupu měření na souřadnicových měřicích strojích se dá obecně rozdělit do několika určitých kroků, které by měl uživatel tohoto stroje dodržovat.

1. Analýza výkresové dokumentace
2. Definování upnutí měřené součásti
3. Konfigurace a kalibrace snímacího systému
4. Vyrovnání součásti
5. Extrakce bodů a definování geometrických prvků
6. Výpočet charakteristik – rozměrové a tvarové specifikace (metoda výpočtu, filtrace, ...)
7. Vyhodnocení měření a tvorba protokolů [9]





### 1.4.1 Analýza výkresové dokumentace

Důkladné nastudování výkresové dokumentace nám umožňuje určit geometrické charakteristiky, které lze na CMM kontrolovat. V určitých případech sama výroba, nebo konstrukce určí, které geometrické specifikace mají být kontrolovány. Pomocí analýzy výkresové dokumentace můžeme dále určit plochy, které budou sloužit jako možné základny pro upnutí součástí. V neposlední řadě slouží také pro představu, pomocí jakých dostupných konfigurací snímacího systému bude součást kontrolována. [8]

### 1.4.2 Definování upnutí měřené součásti

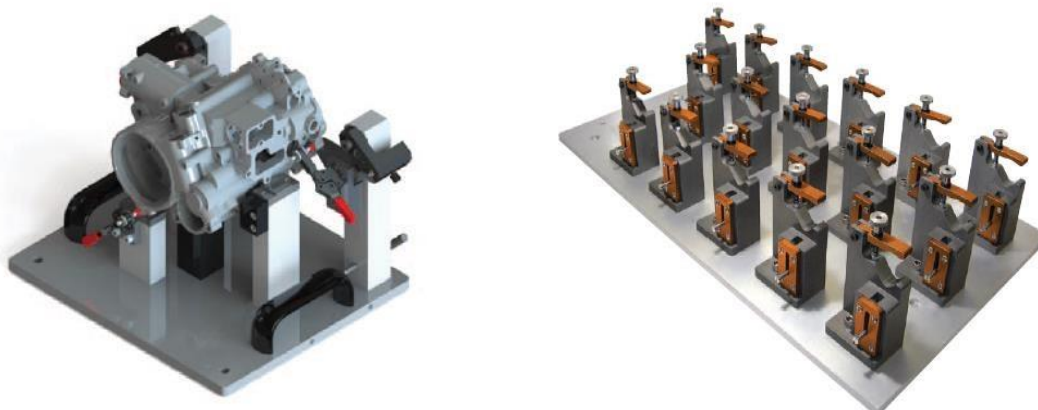
Pro zajištění vyhovující polohy pro měření kontrolované součásti se v praxi používají upínací přípravky. Při výběru správného upínacího přípravku pro součást, jenž je určena ke kontrole měřením pomocí CMM je důležité dodržet určité základní zásady. Například zajištění volného přístupu ke všem částem měřené součásti, na nichž se vyskytují vybrané charakteristiky, které musí být změřeny. Je třeba brát v potaz vliv sil od měřicího zařízení, nebo od upínacích sil přípravku a tím negativně neovlivnit výsledky měření. Při volbě upnutí kontrolované součásti je důležitá také hmotnost kontrolované součásti. Je zapotřebí si uvědomit, že příliš těžká břemena mohou narušit geometrii stroje.

V praxi se nejčastěji setkáváme se dvěma druhy upínacích přípravků, a to s modulárními upínacími systémy, nebo s druhou variantou jednoúčelovými upínacími přípravky. Obě varianty musí zajistit dobrou tuhost upnutí, opakovatelnost a reprodukovatelnost procesu měření. Modulární upínací systémy jsou navrženy na bázi stavebnice, jsou složeny z výměnných komponent, které může uživatel kombinovat v závislosti na měřené aplikaci. [8]

Jednoúčelové upínací přípravky jsou efektivním způsobem upnutí, který nachází uplatnění především při kontrole kvality v sériové výrobě. Pro návrh koncepce nevhodnějšího řešení až po výrobu je potřeba mít dobrou představu o měřicí úloze, disponovat výkresovou dokumentací, nebo CAD soubory dané součásti a také myslet na jednoznačné ustavení a snadnou výměnu součásti pro obsluhu stroje. Abychom došli, pokud možno, k co nejlepšímu řešení, je třeba znát všechny aspekty úlohy:

- jak často se bude součást měřit,
- materiál, velikost a tvar součástí,
- rozměry a tolerance součástí,
- vztažné roviny, nebo orientaci součástí,
- hmotnost a velikost přípravku. [9]





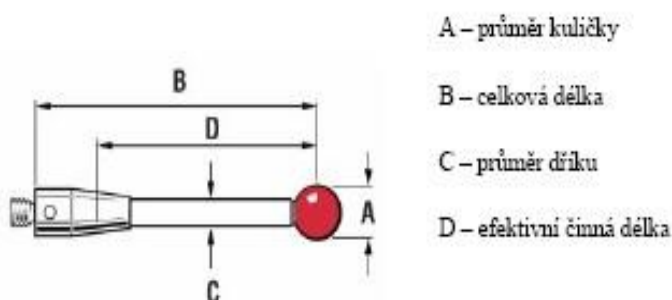
Obr. 8 Příklady jednoúčelových přípravků [8]

Upínání je jednou z cest ke zvýšení produktivity. Pokud jde o upínání součástí na CMM, je třeba zvážit řadu otázek, jako například typ upínání, který chceme použít, opakovatelnost měření a přístupnost CMM. Otázkou je použít jednoúčelové, nebo modulární upínání. Modulární upínací systémy se skládají z výměnných komponent určených pro bezpečné a přesné držení měřených součástí. Jednoúčelové měřicí přípravky splňují stejnou funkci, ale jejich návrh a posléze výroba může vyžadovat týdny, jejich uskladnění zabírá velké množství prostoru, když se nepoužívají a často mohou být použity pouze pro aplikaci, pro kterou byly navrženy. Naproti tomu modulární přípravky lze rozebrat na jednotlivé části po dokončení kontroly dané součásti a později je znovu použít v různých konfiguracích pro jiné aplikace. [8]

### 1.4.3 Konfigurace a verifikace snímačů

Snímací dotek vykonává jako součást snímacího systému nejdůležitější práci tím, že vytváří kontakt s měřenou součástí a snímací sondou. Způsobuje sepnutí v mechanismu sondy, jehož výsledkem je signál, který zaznamenává souřadnice sejmutého bodu. Dotek je tvořen ze snímacího hrotu a díku. Tvar, typ a materiál snímacího doteku vždy záleží na konkrétní měřené aplikaci. Před samotným měřením je tedy třeba provést rozbor součásti a podle toho zvolit snímací dotek. V případě, že k tomu nedojde, může nastat situace, kdy bude do výsledku měření vnesena určitá nepřesnost, která by mohla mít za následek například neshodu se zadanými geometrickými tolerancemi. [8] [14]

Důležitou roli hraje především tuhost doteku a využijeme-li nejčastěji používané zakončení ve tvaru kuličky, tak i kulovitost doteku.



Obr. 9 Snímací dotek [9]



Pravidla a zásady k výběru a tvorbě konfigurace dotyku:

- volit co nejkratší dotyk, aby nedocházelo k průhybu,
- volit co nejmenší počet prodlužovacích nástavců, protože každý spoj dotyku je zdrojem nepřesností,
- volit co největší průměr kuličky, společně s volbou větší kuličky se volí větší průměr stopky dotyku a tím se zvýší tuhost dotyku,
- dbát na dostatečně dotažené doteky, čistotu kuliček. [15] [29]

Nejpoužívanější a nejjednodušší jsou přímé doteky. Tvar doteku je tvořen přesnou kuličkou a dříkem. Tento způsob snímání se používá pro celou škálu aplikací. Volba krátkého doteku s velkou kuličkou umožní dosažení velké mezery mezi kuličkou a stopkou a současně dosažení vysoké tuhosti doteku. Další používané doteky jsou hvězdicové, válcové, diskové a doteky s hrotem. [29]

#### Materiály kuliček

- Rubín
- Nitrid křemíku
- Oxid zirkoničitý

#### Rubín

Rubín patří do skupiny nejtvrdějších materiálů. Syntetický rubín je prakticky oxid hlinitý s čistotou 99 %. Rubín je z drtivé většiny nejpoužívanější materiál kuliček, ale existují dva případy, kdy je doporučen jiný materiál. Prvním případem je skenování dílů z hliníku. U těchto dílců se doporučuje použít kuličku z nitridu křemíku. Druhým případem je skenování litinových dílů, kdy je vhodnější použít jako materiál kuliček oxid zirkoničitý. [29]

#### Nitrid křemíku

Jedná se o materiál podobný rubínu, je také velmi tvrdý a má dobrou odolnost proti opotřebení. Jak již bylo zmíněno, jeho doménou je kontakt s hliníkovými povrchy. [29]

#### Oxid zirkoničitý

Jde o velmi pevný keramický materiál. Tvrdost a opotřebení se postupem času přibližuje rubínu. Využívá se pro kontakt s litinovými součástmi. [29]



Obr. 10 Materiály kuliček (rubín, nitrid křemíku, oxid zirkoničitý) [29]



## Materiály dříků

- Ocel
- Karbid wolframu
- Keramika
- Uhlíková vlákna
- Hliník
- Titan



Obr. 11 Materiály dříků snímacích systémů (ocel, karbid wolframu, keramika, uhlíková vlákna, hliník, titan) [29]

### Ocel

V současnosti je trendem vyrábět stopky z nemagnetické nerezové oceli. Používá se pro většinu doteků s kuličkou, popř. s hrotem o minimálním průměru 2 mm a délce do 30 mm, v případě jednodílné konstrukce poskytuje ideální poměr tuhosti vzhledem k hmotnosti. [29]

### Karbid wolframu

Dříky z karbidu wolframu jsou optimálním řešením pro maximální tuhost doteku při minimálním průměru dříku. Tyto parametry jsou vyžadovány pro doteky s průměrem kuličky pod 1 mm nebo pro délky až do 50 mm. Problematické je použití tohoto materiálu pro doteky delší než 50 mm z důvodu vyšší hmotnosti a také vzhledem k rameni působících sil menší tuhosti spoje dříku a závitové části doteku. [29]

### Keramika

Při použití kuličky nad 3 mm a při délkách nad 40 mm mají tyto stopky tuhost podobnou, jako má ocel. Výhodou keramiky je její lehkost. Keramické dříky nabízejí navíc dodatečnou ochranu sondy před poškozením, neboť dotek se v případě kolize roztříští. [29]

### Uhlíková vlákna

Hmotnost doteků z uhlíkových vláken je přibližně o 20 % nižší než hmotnost doteků z karbidu wolframu. Je tedy vhodným materiálem pro dlouhé doteky. Výhodná je také jeho tepelná stabilita, zejména u velmi dlouhých doteků používaných v obráběcích strojích. [29]

### Hliník

Jedná se o velmi lehký materiál, ideální například pro prodlužovací nástavce, avšak kvůli nízké tepelné stabilitě je vhodný pouze pro stabilní klimatizované prostředí. [29]

### Titan

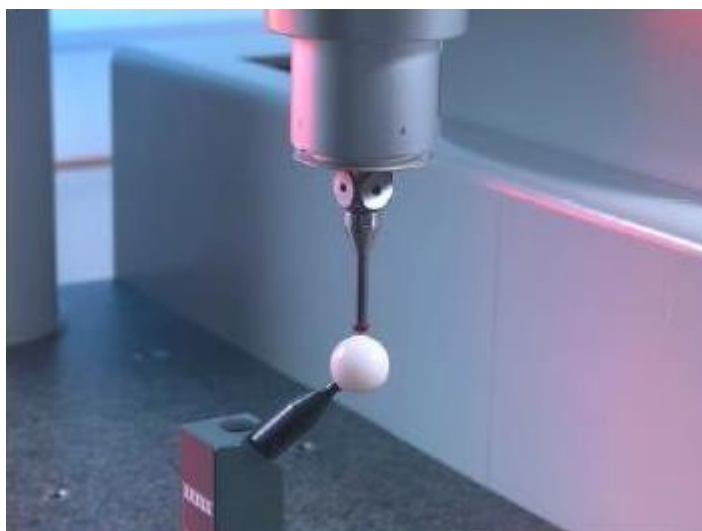
Titan je oproti hliníku tepelně stabilní, má dobrou ohybovou tuhost a rovněž je velmi lehký. Tyto charakteristiky jej předurčují jako velmi vhodný materiál pro dlouhé nástavce.

Po sestavení měřicí konfigurace doteků je třeba tuto konfiguraci verifikovat. Verifikace snímače se provádí pomocí kalibrační koule umístěné na stole CMM. [29]



### Verifikace snímačů

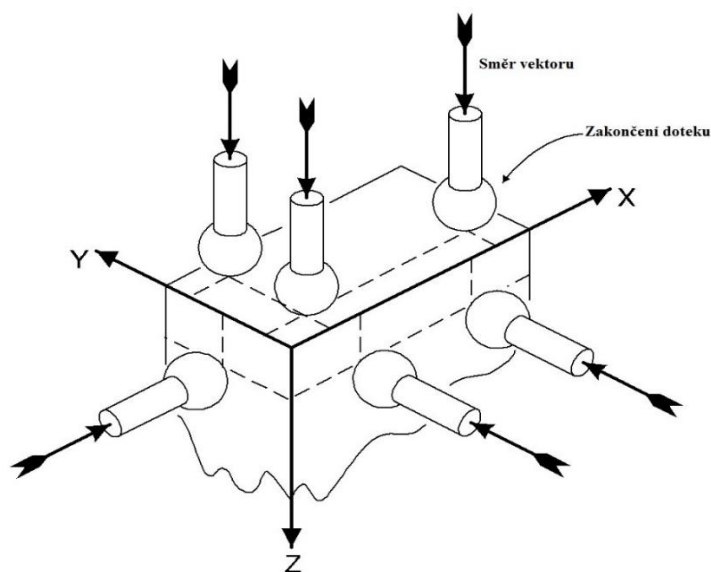
Verifikace snímačů probíhá na vysoce přesné kalibrační kouli, která slouží jako etalon. Kouli je potřeba upnout na měřicí desku do jedné z připravených závitových děr. Důležité je správně určit snímač na měřicí konfiguraci, který je třeba ověřit. Po určení polohy kalibrační koule stroj provede verifikaci zvoleného snímače a vypíše výsledek tohoto kroku. Tento úkon se musí provést u každého snímače, který obsahuje měřicí konfigurace a u všech měřících konfigurací, které se budou používat při měření.



Obr. 12 Kalibrace snímacího doteku [8]

### 1.5.4 Vyrovnání součásti

Z hlediska geometrie má těleso v prostoru šest stupňů volnosti. Může rotovat kolem tří na sebe kolmých os, které tvoří kartézský souřadný systém, obvykle se značí písmeny X-Y-Z. Současně se může lineárně pohybovat ve směru těchto tří os. Úkolem vyrovnání je vymezení všech šesti stupňů volnosti v prostoru. Definice souřadného systému u většiny úloh začíná změřením minimálně tří bodů, které určí rovinu (primární prostor), dva body poté definují přímku (sekundární rovina) a nakonec je definován bod (terciální nulový bod). Tato standardní metoda se nazývá 3-2-1.



Obr. 13 Schéma vyrovnání souřadného systému metodou 3-2-1 [8]

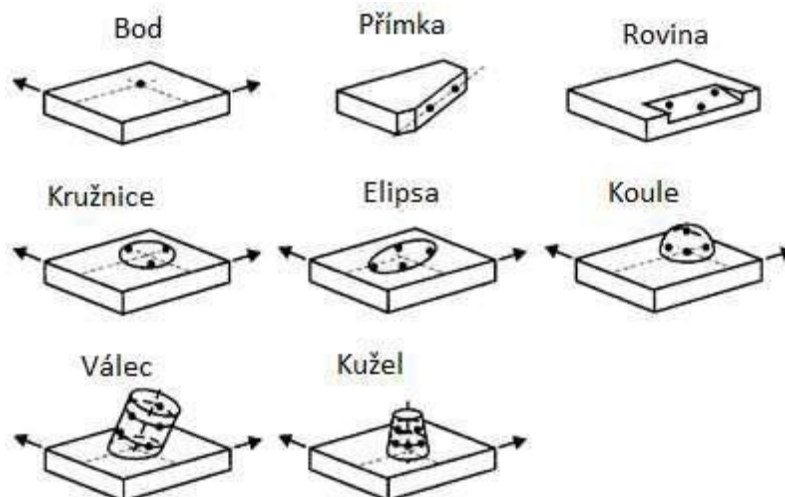
Vyjma standartního vyrovnání metodou 3-2-1, která je výše popsána lze souřadný systém definovat také metodou RPS a pomocí 3D přizpůsobení. 3D přizpůsobení neboli metoda best fit se může použít pro vyrovnání součástí, pro které nejsou definovány jednoznačné referenční elementy. Pomocí 3D přizpůsobení je libovolný počet bodů optimálně napasován do jejich jmenovité geometrie. Když se použije pro 3D přizpůsobení málo bodů, je potřeba více iterací (smyček).

#### 1.5.5 Extrakce bodů a definování geometrických prvků

Tvar měřených součástí je tvořen ze základních geometrických elementů jako například kružnice, rovina, válec, kužel, koule. Měřené elementy obsahují jmenovitou geometrii, na základě, které se provádí vyhodnocení rozměrů, úchylek tvaru a polohy. Za tímto účelem jsou měřené elementy spojovány s minimem bodů, které je třeba nasnímat k sestavení geometrických prvků.

Tabulka 5 Minimum potřebných bodů pro sestavení geometrického elementu [10]

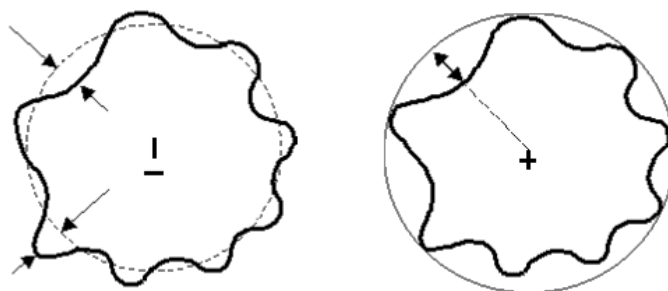
Element	Minimální počet snímání:
bod	1
2D přímka	2
rovina	3
bod symetrie	2
kružnice	3
válec	5
kužel	6
koule	4
torus	7
rovina symetrie	4
elipsa	5
obdélník	5
podélný otvor	5



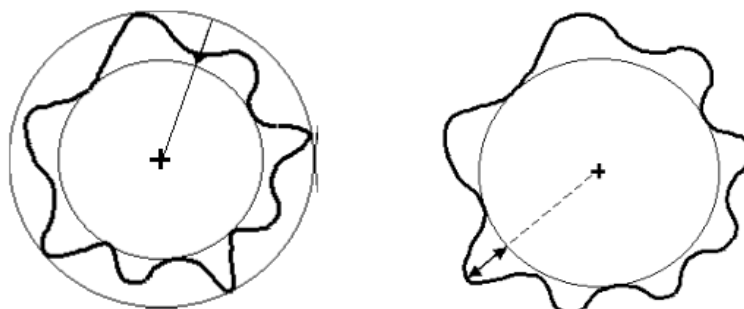
Obr. 14 Geometrické elementy sestaveny z minima bodů [8]

### 1.5.6 Výpočet charakteristik

Dalším důležitým krokem je naměření vybraných geometrických elementů pro základní vyrovnání a následné aplikování. Jak je důkladněji popsáno v kapitole výše. Po aplikaci vhodné metody se přenesou souřadný systém stroje automaticky na měřenou součást. Jakmile se stanoví základní souřadný systém, nastává měření ostatních geometrických elementů. Jsou to elementy, které jsou potřebné pro výpočet požadovaných charakteristik měřené součásti. Tyto elementy se na základě vztahů zpracovávají softwarem např. rozměry, geometrické odchylky tvaru a polohy. Například pro výpočet kružnice existuje více možností získání daného rozměru. Existují možnosti, jako jsou Gaussova metoda nejmenších čtverců LSC, minimální opsaná kružnice MCC, maximální vepsaná MIC nebo minimální zóna MZC (Obr. 15 a 16).



Obr. 15 Metoda nejmenších čtverců (LSC) (vlevo), Minimální opsaná kružnice (MCC) (vpravo) [12]



Obr. 16 Minimální zóna (MZC) (vlevo), Maximální vepsaná kružnice (MIC) (vpravo) [12]



Gaussovou metodou se určuje průměrný rozměr z naměřených hodnot, za pomoci metody nejmenších čtverců. Minimální opsaná kružnice naopak udává rozměr například válce, který je možný dostat do zmíněného rozměru náboje. Opakem je maximální vepsaná kružnice, ta udává rozměr náboje neboli maximální průměr, který je možný vložit. Tímto se tedy pro výpočet průměru hřídele použije metody minimální opsané a pro náboj maximální vepsané kružnice. Pomocí filtrů je možné odstranit případné stopy po řezném nástroji nebo potlačit chyby způsobené chvěním či špatným seřízením. Použitím vhodných filtrů jde rozložit profil výrobku na základní profil, profil drsnosti a profil vlnitosti, které jsou poté základem pro hodnocení parametrů drsnosti, respektive vlnitosti. [9] [11]

### 1.5.7 Vyhodnocení měření a tvorba protokolů

Porovnání hodnot se provádí s CAD modelem. Na základě určení základních geometrických prvků se vyhodnocují rozměry, geometrické specifikace a tím i kvalita měřeného komponentu. Hodnoty získané měřením, které popisují skutečný povrch dílu, se vypočítávají pomocí softwaru z daných souřadnic naměřených hodnot. Tyto hodnoty se využívají pro kontrolu měřené součástky, nebo jestli daný geometrický tvar vyhovuje konstrukčním požadavkům vyrobené součásti. Zpětná kontrola charakteristik daných výkresem je vyobrazena v protokolu. Na protokolu se charakteristiky, které splňují požadavky, zobrazí v zeleném rámečku, naopak ty, které nesplňují, jsou v červeném rámečku. Možnosti protokolů jsou mnohem větší, například grafické znázornění naměřených hodnot, rozptyl v tolerančním poli a další. [13]

## 1.6 Zdroje variability

Systém měření je ovlivňován jak náhodnými zdroji variability, tak i systematickými zdroji. Jsou způsobovány buď náhodnými, nebo zvláštními příčinami. Pro řízení variability systému měření se možné zdroje variability identifikují, eliminují se, nebo se monitorují zdroje variability. I přes to, že specifické příčiny jsou závislé na dané situaci, lze některé zdroje variability identifikovat. [13]

Druhy zdrojů variability jsou zobrazené na obrázku níže.



Obr. 17 Zdroje variability [9]





#### Měřicí stroj:

- Parametry přesnosti
- Měřicí rozsah
- Senzorika
- Měřicí SW
- Konstrukční provedení
- Korekce reziduálních chyb
- atd.

#### Strategie měření:

- Výběr snímačů
- Měřicí metoda
- Výběr filtrů
- Poloha a orientace součásti
- Metoda vyhodnocení
- atd.

#### Měřená součást:

- Teplota součásti
- Znečištění
- Materiál
- Elasticita
- Plasticita
- Tvarové odchylky
- atd.

#### Obsluha stroje:

- Kvalifikace a vyškolení
- Vyrovnání součásti
- Upnutí součásti
- Kalibrace snímačů
- Kolize
- atd. [9]

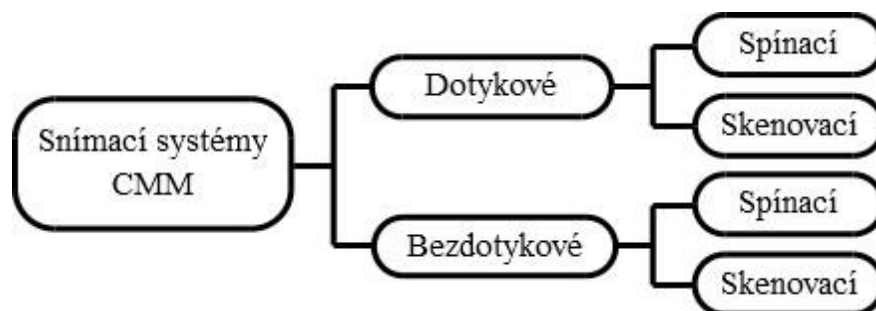
#### Okolní prostředí:

- Teplota okolí a její kolísání
- Teplotní gradienty (prostorové a časové)
- Vibrace podlahy
- Znečištění kovovými, prachovými částicemi
- Výskyt oleje, chladicí emulze ve vzduchu
- atd.

## 1.7 Snímací systémy

Snímací systém je nedílnou součástí v celém měřícím systému stroje, které tvoří spojení mezi strojem a součástí, kterou máme měřit. Slouží k vyhodnocení polohy bodů nasnímaných na obrobku vzhledem k souřadnicovému systému CMM. Snímací systémy se obvykle vztahují k počtu os, v nichž mohou pracovat. Rozdělujeme je na lineární (1D), rovinné (2D) a trojrozměrné (3D) operační systémy.

Základní rozdělení snímacích systémů CMM je zobrazeno na Obr. 18. Hlava pro upnutí snímače může být pevná nebo otočná. Přičemž platí, že z pevné hlavice nemůžeme udělat otočnou hlavici, ale z otočné pevnou ano.



Obr. 18 Rozdělení snímacích systémů CMM [9]





Pro snímání povrchu obrobku můžeme využívat snímací systémy s interakcemi:

- dotykovými – síla – kontakt s obrobkem je zaznamenán, když síla překročí elektronicky nebo mechanicky řízenou hodnotu,
- elektrickými – odpor, kapacitance, induktance,
- optickými – odraz světla,
- magnetickými.

V dnešní době moderní CMM využívají nejvíce dotykové nebo optické snímací systémy. Na trhu jsou k dispozici také snímací systémy, které nejsou dotykové ani optické. Interakce s obrobkem může být elektrická, prostřednictvím útlumu harmonického kmitání přerušováním kontaktu nebo prostřednictvím viskozity vzduchu mezi snímacím dotykem a měřeným obrobkem. Tyto snímací systémy jsou obvykle používány pro měření jemných částí a velmi malých prvků. [6]

## 2. Kontaktní snímací systémy

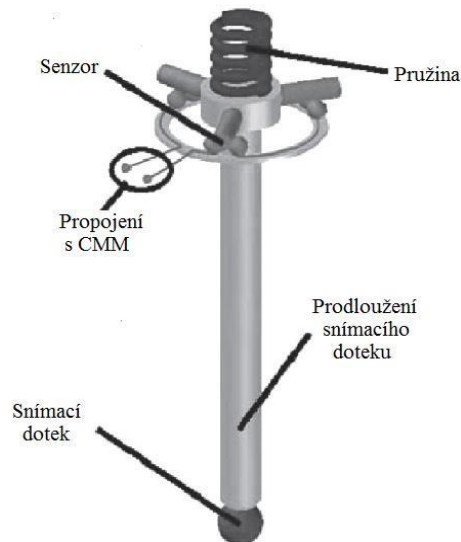
Dotykové snímací systémy potřebují ke své funkci hmotný dotyk s měřeným povrchem. U dotykových snímacích systémů rozlišujeme spínací (kontaktní sonda) a měřicí (skenovací sonda) snímací systémy. Příklad užití dotykového snímacího systému je uveden na Obr. 19.



Obr. 19 Měření dotykovým snímacím systémem [6]

### *Prvky dotykového snímacího systému*

Základní prvky dotykového snímacího systému jsou zobrazeny na Obr. 20. [6]



Obr. 20 Dotykový snímáčí systém [6]

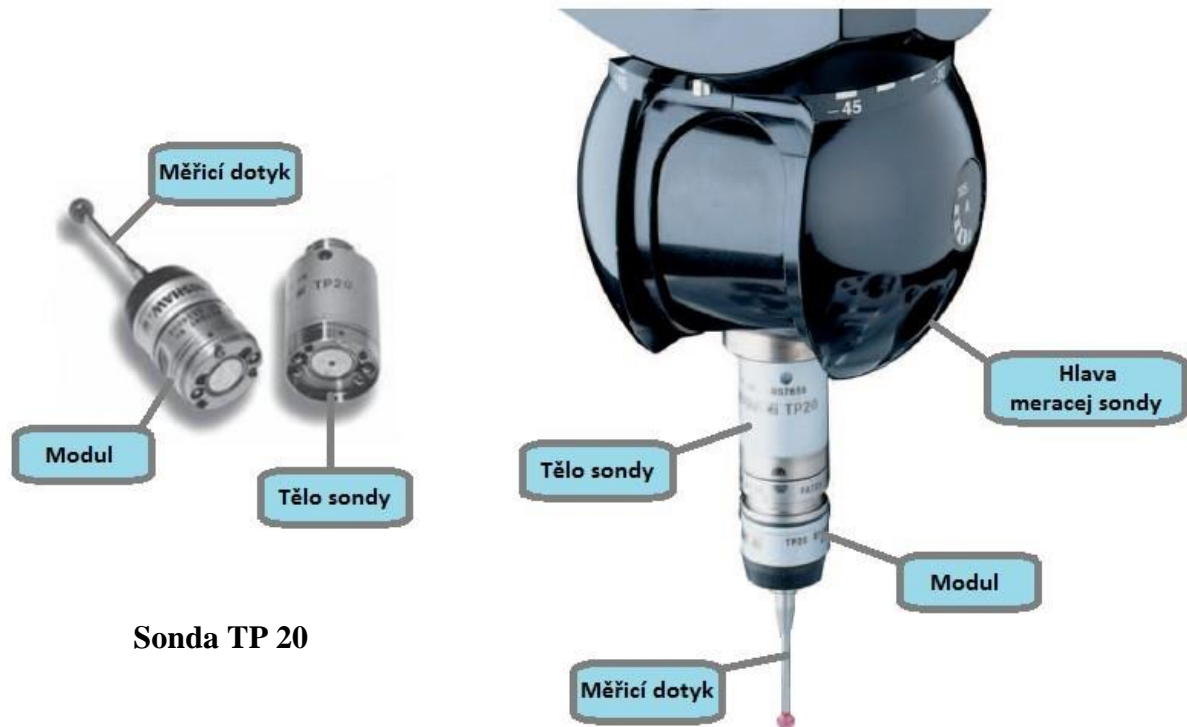
## 2.1 Spínací snímáčí systém

Funkce spínací sondy funguje tak, že v okamžiku, kdy se dotyk dotkne měřeného kusu, spínací sonda vydá signál, dojde k okamžitému zastavení pohybu a následně k odečtení aktuálních souřadnic z odměřovacího systému stroje. Existují dva způsoby, jako toho docílit:

- elektromechanicky,
- piezoelektricky.

Spínací sonda (Obr. 21) se skládá z následujících částí – tělo sondy, modulu a dotyku, kde tělo sondy je zašroubováno do hlavice. Modul je k tělu přichycen magneticky, což umožňuje automatickou výměnu modulu, nebo měřicího dotyku a zároveň chrání měřicí sondu před poškozením (např. při nárazu). Dosedací plochy modulu a těla sondy jsou opatřeny třemi klínovými drážkami a výstupky, které zajišťují přesné dosednutí modulu na tělo sondy.

Tyto systémy spínacích sond pracují v dynamickém režimu, pomocí nich se získávají diskrétní hodnoty, takže hovoříme o kontaktním diskrétním snímání (není možné spojitě snímání souřadnic – tzv. skenování). [6] [8] [29]



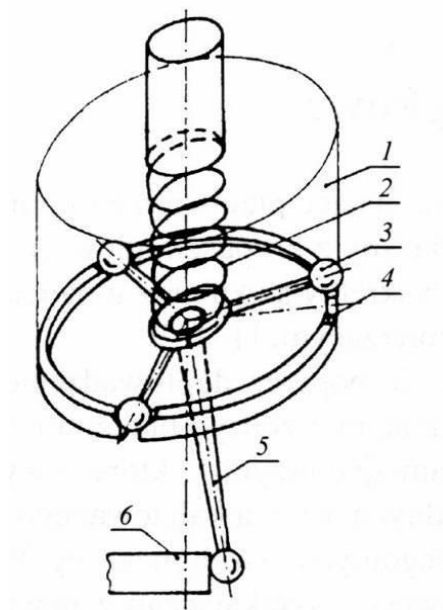
**Sonda TP 20**

*Obr. 21 Dotyková spínací sonda TP20 firmy RENISHAW a její popis [29]*

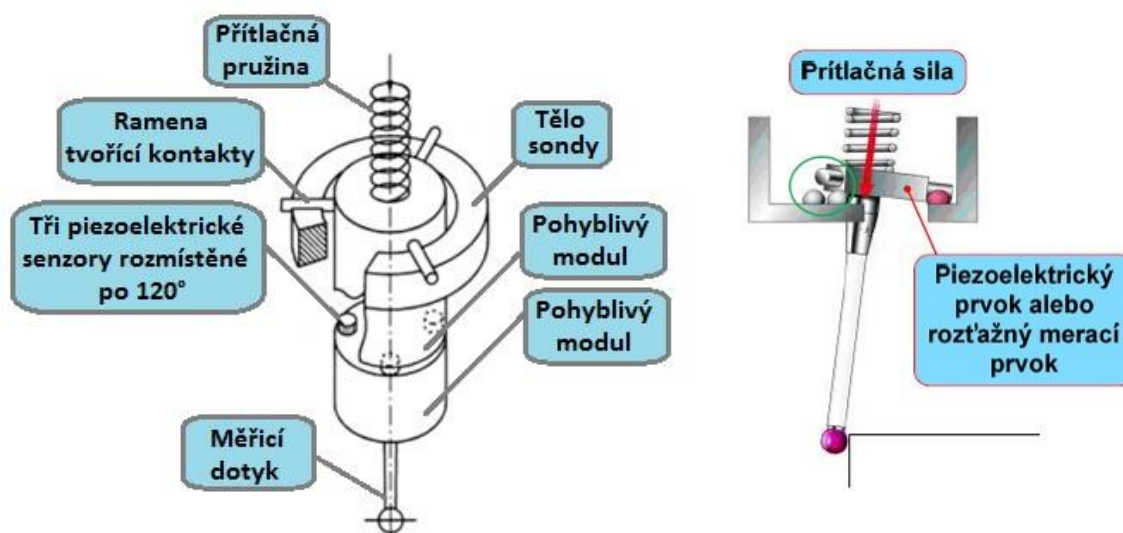
## 2.2 Elektromechanická sonda

Uvnitř modulu elektromechanické sondy je elektrický (Obr. 22) obvod obsahující součást ve tvaru hvězdice, rozpínací kontakty vzájemně pootočené o 120°. Měřicí dotyk je na druhém konci opatřen prstencem, který v klidovém stavu propojuje všechny kontakty. V okamžiku vychýlení měřicího dotyku ze základní polohy dojde k rozpojení jednoho z kontaktů a tím k odečtení polohy stroje.

Kontakty jsou tvořené kulovými plochami, aby při odpojení kontaktu docházelo vždy ke stejné výchylce dotyku. I napříč tomu se dopouštíme drobné chyby, která je způsobena tím, že než se kontakt rozpojí, dojde k malému vychýlení měřicího dotyku sondy a zároveň dojde k posunu osy stroje oproti okamžiku, kdy se dotyk skutečně dotkl povrchu měřené součásti. Této chyby se můžeme vyvarovat, pokud použijeme piezoelektrickou sondu. [6] [8]



Obr. 22 Kinematické schéma kontaktní sondy s elektrokontaktním snímačem pracujícím ve třech směrech [8]



Obr. 23 Schéma spínací dotykové piezoelektrické sondy a její princip [8]

Některé firmy používají u spínacích sond piezoelektrické prvky, které při zatížení udají signál pro odečítání hodnot souřadnic.

Piezoelektrické sondy (resp. tenzometrické), viz. Obr. 23, mají dvojitou indikaci měřeného bodu:

První způsob indikace – piezokrystaly (při malém vychýlení se deformují piezokrystaly vevnitř sondy a vydávají elektrické impulsy pro odečtení a dočasné uložení souřadnic).

Druhý způsob indikace – elektromechanický (při větším vychýlení dojde k rozpojení elektrického kontaktu – naměřený impuls se potvrdí a dočasně uloží souřadnice a dojde k zastavení pohybu stroje).



Piezoelektrické senzory jsou tak citlivé zařízení, že mohou vydat signál při náhodném zachvění stroje, proto je potřebné jejich signál potvrzovat.

Tyto typy sond mají schopnost nést až 5 různých dotyků současně, přičemž koncovka s dotyky se mění podle potřeby v automatickém režimu. [6] [8]

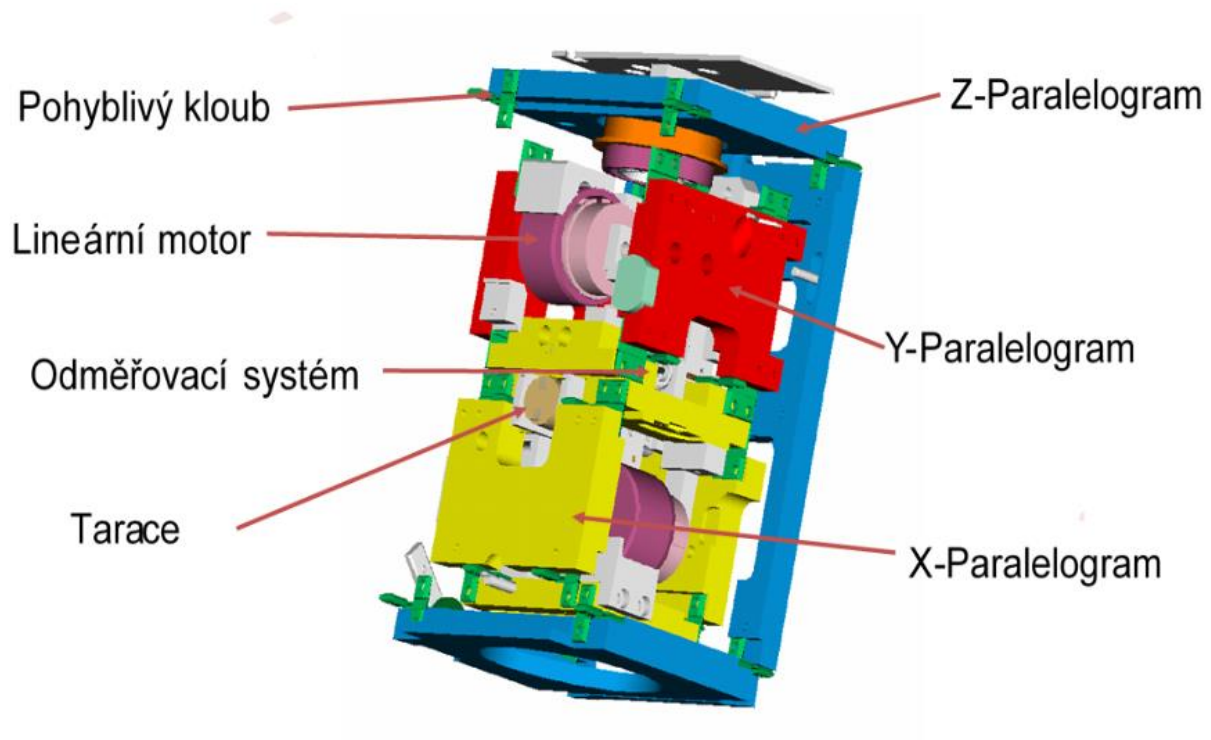
### 2.3 Skenovací snímací systém

Systém snímacího typu (tzv. skenující sonda), viz. Obr. 24 se skládá z těla sondy, které je v pouzdře snímací hlavy a je uložené ve dvojitém nebo trojitým paralelogramu.

Funkce skenující sondy je následující: Měřicí hrot pracuje v režimu, při kterém je v neustálém kontaktu s měřeným objektem. Během procesu měření řídicí systém v okamžiku, kdy zaznamená kontakt hrotu s měřeným objektem, vypne přítlak, který vyvozuje nastavenou měřicí sílu a zapne pohony pro příslušné osy. Tímto způsobem se zabezpečí trvalý kontakt hrotu s měřeným předmětem.

Skenující sonda může pracovat ve dvou režimech:

- ve statickém režimu – pokud je indukční měřicí systém v „0“ poloze je možnost snímání správných hodnot souřadnic, jedná se o tzv. diskrétní snímání,
- v dynamickém režimu – možnost spojitého snímání, tzv. skenování složitých tvarů. [6] [8]



Obr. 24 Skenovací hlava [9]



## 2.4 Příklady dotkových snímacích systémů

VAST XXT (Obr. 26) společnosti Carl Zeiss je dotkový snímač umístěný v otočné hlavě RDS (Obr. 25) schopný snímat měřenou součást skenováním. Otočná hlava je schopna měřit ve všech prostorových úhlech. [7]



Obr. 25 Otočná hlava RDS [25]



Obr. 26 VAST XXT [25]



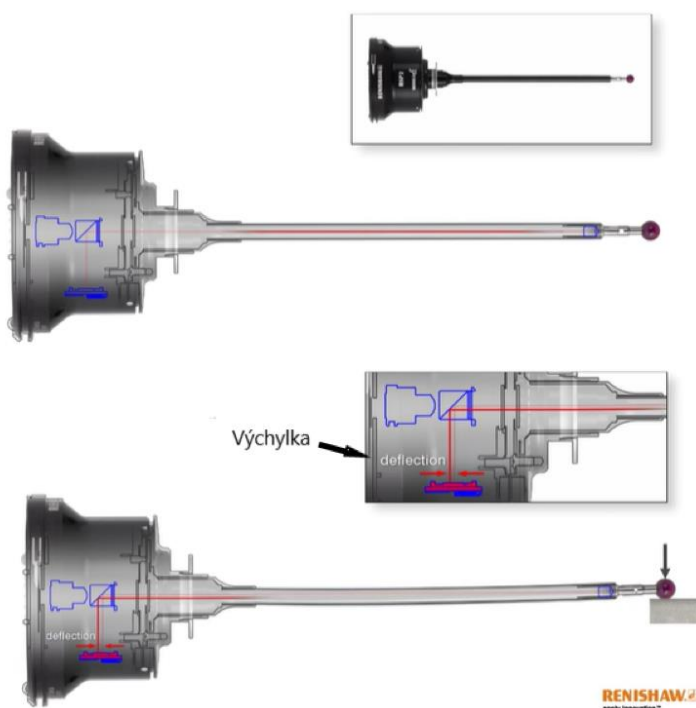
Obr. 27 VAST gold [25]

VAST gold (Obr. 27) společnosti Carl Zeiss je pevná hlava určená pro dotkové snímání jak bodově, tak skenováním. U této pevné hlavy je možné pracovat se snímači dlouhými až 800 mm a vážícími až 600 g. [7]

REVO RSP2 (Obr.28) společnosti Renishaw je dotkový snímač umístěn v otočné hlavě Renscan5 umožňující 5-ti osé skenování. Snímač RSP2 využívá technologii tip-sensing, která umožňuje sledování průhybu dřívku. Když se dotek ohne dotykem dílce, reflektor se posune. Změněná vratná dráha laseru potom sejme, a protože jsou reflektor a kulička doteku blízko sebe, je známa přesná poloha doteku. [29]



Obr. 28 Snímač REVO RSP2 umístěn v otočné hlavě Renscan5 [29]



Obr. 29 Schéma funkce tip-sensing na snímači RSP2 [29]





## 3. Bezkontaktní snímací systémy

Druhým typem snímacích systémů CMM, jak je zobrazeno na Obr. 18, jsou bezdotykové snímací systémy. Tento systém nevyžaduje ke své funkci hmotný dotyk s měřeným povrchem, proto v dnešní době nahrazuje v některých aplikacích dotykové snímací systémy. Výhodami oproti dotykovým snímacím systémům je, že nám umožňují měřit křehké obrobky, vysoká rychlost snímání nám umožňuje nasnímat větší počet bodů a v poslední řadě větším pracovním prostorem se nám snižuje riziko kolize mezi snímacím systémem a obrobkem.

Mezi vyskytující se nevýhody bezdotykových snímacích systémů patří vyšší nejistota měření u každého nasnímaného bodu a nevýhodou je, že výsledky měření mohou být ovlivněny optickými vlastnostmi obrobku a okolního světla. Téměř všechny bezdotykové snímací systémy CMM jsou optické. Optické senzory kombinují prvky optiky, videa a laserové technologie. Jsou to bodové a liniové senzory, jejichž funkce je založena na triangulaci. [14]



Obr. 30 Měření bezdotykovým laserovým snímacím systémem [25]



Obr. 31 Měření bezdotykovým optickým skenerem [25]

### 3.1 Principy pro 3D měření objektu

Řadíme sem optická zařízení, která jsou založena na bezkontaktním způsobu snímání „3D digitalizace“. Bezdotykové systémy měření se považují za skenery (digitizéry). Digitální 3D podoba reálného objektu se získá měřením třetí souřadnice, použitím optické metody triangulace a interference světla (tyto metody využívají několik CCD kamer, laserové zařízení a další pomocná zařízení).

Rozdělení skenerů podle konstrukce:

- stacionární (pevné),
- mobilní (přenosné).

**Stacionární skenery** – jsou vázány na jedno místo a skenovaný předmět je nutné dopravit k nim.

**Mobilní skenery** – dají se lehce přenášet a dopravit ke skenovanému předmětu. Mají malé rozměry, a jsou rychle smontovatelné a lehké na převoz.



Výhodou těchto přístrojů je, že mají značnou produktivitu a vytvářejí po nasnímání bodů hustou síť bodů. Přístroje jsou vhodné pro snímání vnější geometrie, ale existují i systémy pro snímání vnitřní geometrie.

Podle použité technologie snímání rozdělujeme bezdotykové skenery na:

- optické skenery,
- laserové skenery,
- mechanické skenery,
- ultrazvukové skenery,
- rentgenové skenery. [14]

### 3.2 Optické 3D skenery

Optické 3D technologie se v posledních několika letech prosadily v celé řadě různých aplikací. Jejich hlavní výhodou oproti dotykovým měřicím metodám je mnohem vyšší flexibilita a efektivita – za několik sekund mohou v jediném měření zaznamenat a zpracovat velké množství bodů. [25]

Optické skenery pracují na principu bezdotykového snímání, digitalizují vnější povrch a dokážou rozpoznávat i textury povrchu.

Princip činnosti optických skenerů spočívá v tom, že skenovaný objekt je snímán z několika úhlů. Při každém natočení se součástka naskenuje (vyfotí) a data se odešlou do PC na zpracování. K přesnějšímu vystihnutí tvaru povrchu se využívá pásů a značek.

Po získání všech snímků, ze všech stran (úhlů pohledu) se data zpracují a pomocí metody aproximace se vytvoří digitalizovaný model.

Většina skenerů umožňuje vytvářet počítačové modely použitím:

- snímaných bodů,
- polygonů,
- křivek typu spline,
- standardních geometrických entit.

Kvalita objektu se dá dosáhnout:

- počtem získaných snímků (čím jemnější vzorkování polohy, tím vyšší shoda s originálem),
- jednobarevné pozadí za skenovaným objektem (nejlepší je ta barva, která je víc kontrastní s objektem), aby bylo možné oddělit součástku od prostředí,
- před skenováním vhodně vyznačit na součástce orientační body, které slouží pro přesnější spojování obrázků do 3D tělesa.

Vzhledem na to, že optické skenery jsou zařízení, kde jednotlivé snímky jsou „obyčejné“ 2D fotografie, mají své výhody i nevýhody.

*Výhoda* – informace o povrchu skenované součásti (textuře), jsou obsáhnuté už ve skenovaných datech, proto je není potřeba uměle dotvářet.

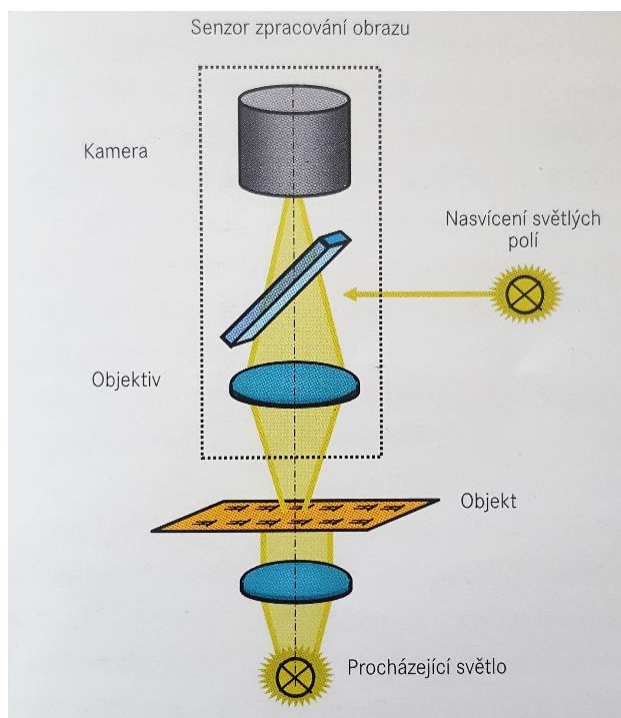
*Nevýhoda* – z 2D obrázků (profilů) nedokáže systém rozpoznávat neprůchozí díry. Jediné, co tento přístroj dokáže rozpoznat, jsou nepatrné náznaky změny hloubky povrchu v kritických místech prohlubin. [14]





### 3.2.1 Kamerové systémy

Kamerové senzory jsou všechny senzory, které fungují na podobném principu jako lidské oko a mají alespoň dvourozměrné zobrazení měřené součásti. Kamerové systémy neumožňují snímat třetí rozměr. Základní kamerové systémy jsou senzory na zpracování obrazu (Obr. 32), kde se měřený objekt pomocí kamery převede z optického signálu na digitální obraz. Digitální obraz slouží vyhodnocovacímu softwaru k výpočtu měřených bodů. Na nejistoty v měření mají největší vliv jednotlivé komponenty přístroje jako je osvětlení, optika, čip senzoru a algoritmus programu sloužící k výpočtu.



Obr. 32 Schéma senzoru pro zpracování obrazu [1]



Obr. 33 Kamerová snímací hlava [25]

Kamerové systémy se využívají především na menší součásti z plastů nebo jiných křehkých materiálů, které se mohou mechanicky poškodit. Tento typ senzoru dokáže rozpoznat pouze hrany měřené součásti. Proto je tato metoda velice rychlá a produktivní u měřená dvourozměrných elementů. Nevýhodou tohoto systému oproti dotykovým metodám je neschopnost změřit třetí rozměr jako je například hloubka nebo celý průběh součásti. Dále se do měření vkládají nejistoty způsobené špatným osvětlením nebo lesklostí měřeného povrchu. Příklad kamerové snímací hlavy je na Obr. 33. [1] [31] [32]

### 3.2.2 Pruhový projektor

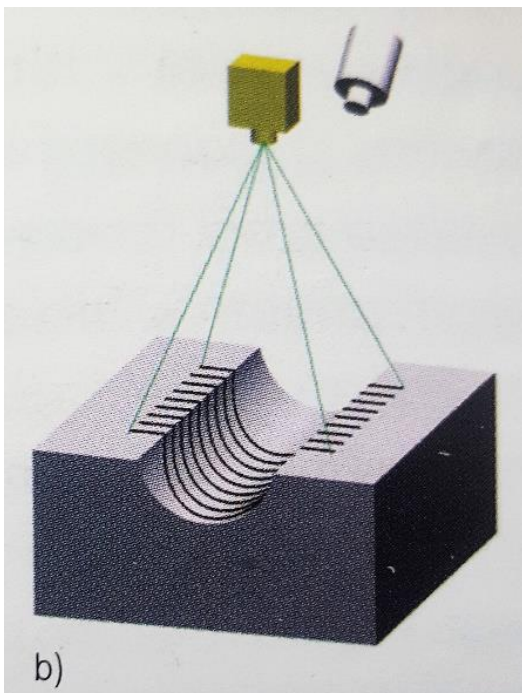
Pracuje na principu 3D aktivní triangulační metody. Pruhový projektor na snímáný objekt promítá proužky světla, zachytává a zaznamenává je za pomoci digitální kamery. Při digitálním fotoaparátu je snímáný objekt snímán z určité vzdálenosti a za pomoci metody triangulace je 2D obraz převeden do 3D (prostorové) podoby. [14]

Skenovaný objekt se snímá pomocí skeneru z několika úhlů, ale aby se rychleji a jednodušeji sestavil model, tak se na snímáný objekt nalepí pomocné značky, pomocí nichž systém vypočítá pozici měřených kamer a přesněji sestaví 3D model. Je potřeba vytvořit co nejvíce kontrastní pozadí se snímáným objektem, aby nenastal problém s odlišením objektu od prostředí. V případě, že povrch je



příliš lesklý, nebo tmavý je nutné ho vhodně nasvítit. U transparentních a lesklých objektů se využívá křídový sprej, aby je bylo možné naskenovat.

Na povrchu snímaného předmětu jsou pruhovým projektorem promítané proužky světla, tzv. metoda Fringe Light Projection a prostřednictvím jedné, nebo dvou vzájemně posunutých digitálních kamer se snímá objekt. Tímto způsobem se získají obrazy z různých úhlů, kde se následným digitálním zpracováním s danou přesností vypočítá poloha každého obrazového bodu, a za pomoci úhlů, které svírají sdružené paprsky, se dopočítá třetí souřadnice bodu (aby bylo dosaženo většího rozlišení s jednoznačným přiřazením bodů k jejich prostorovým souřadnicím, promítají se na povrchu postupně různé vzory). [14]



Obr. 34 Schéma pruhové projekce [1]



Obr. 35 Pruhový projektor Zeiss COMET L3D [25]

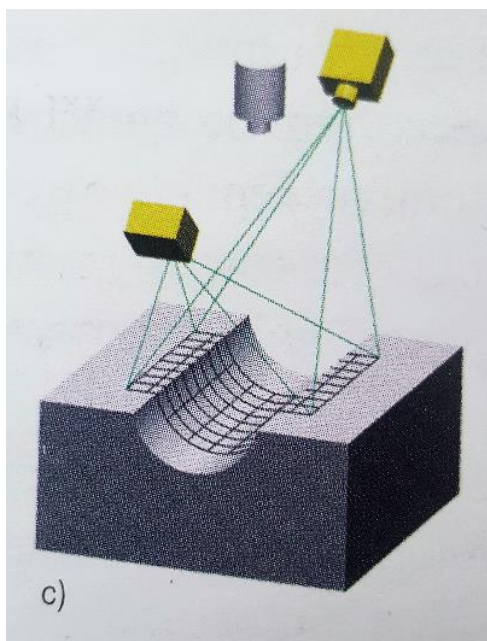
### 3.2.3 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je jednou z optických metod, která se zařazuje mezi nekontaktní pasivní 3D měřicí metody a funguje na principu jako lidské oči. Zabývá se rekonstrukcí tvarů, měřením rozměrů a určováním polohy objektu, které jsou zobrazené na fotografických snímcích. [14]

Základem je, že ze dvou nebo více snímků stejného objektu v různých směrech je možné získat prostorové souřadnice kteréhokoliv bodu vskytnutého na všech snímcích.

Fotogrammetrii je možné rozdělit podle různých kritérií jako např.:

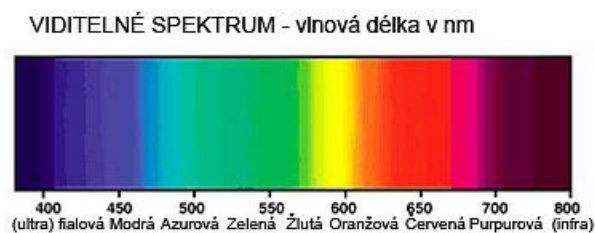
- vzdálenost objektu a pozice fotoaparátu (kamery),
- počtu měřených snímků,
- způsobu pořízení a vyhodnocení,
- dostupnosti výsledku měření,
- atd. [14]



Obr. 36 Schéma fungování fotogrammetrie [1]

### 3.2.4 Senzor bílého světla

Světlo je viditelná část elektromagnetického záření. Bílé viditelné světlo má vlnovou délku od 390 nm až do 760 nm a leží mezi ultrafialovým zářením a infračerveným zářením. [30]



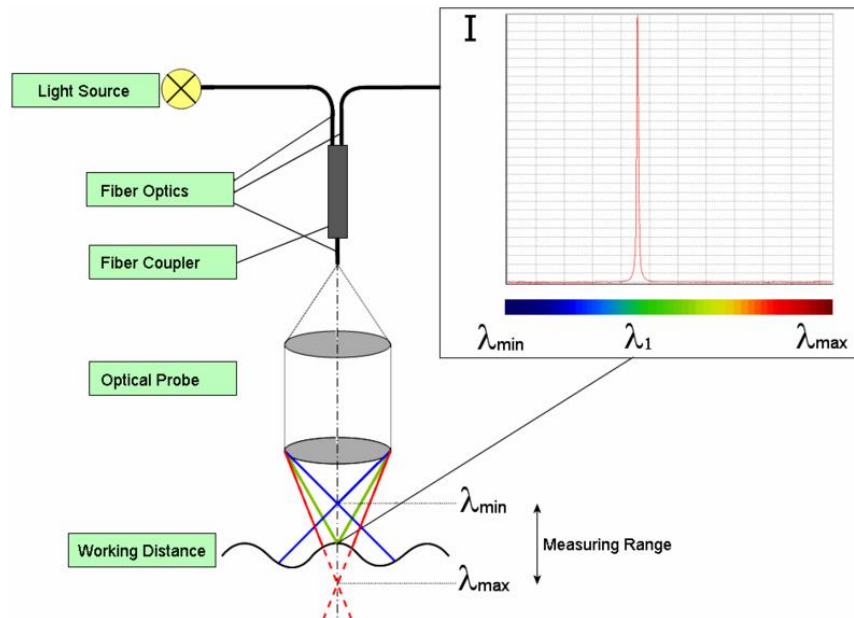
Obr. 37 Spektrum viditelného světla (vlnová délka je uvedena v nm) [30]

Chromatický senzor bílého světla je bodový senzor vzdálenosti. Princip fungování tohoto bodového senzoru vzdálenosti můžeme vidět na schématu na Obr. 38. Ze zdroje bílého světla se pomocí optických vláken pohybuje světelný signál do optické sondy. V optické sondě se bílé světlo pomocí čoček s využitím chromatické aberace rozloží na ohniskové vzdálenosti celého viditelného spektra. Tyto senzory mají daný rozsah měření, do kterého se promítají rozložené jednotlivé ohniskové vzdálenosti.

Po vložení měřené součásti do rozsahu měření se na její povrch promítnou paprsky světla o jednotlivých vlnových délkách. Pouze jedna vlnová délka je nejostřejší a dokonale odrazena. Odražené světlo putuje zpět do spektrometru, který na základě největší intenzity odražené vlnové délky přesně změří vzdálenost měřeného bodu. Senzory dokážou pomocí naskenování povrchu součásti vygenerovat rastrový obraz měřené součásti. Vysoká hustota měřených bodů vykreslí přesně topografii povrchu měřené součásti. Výsledkem měření tohoto senzoru může být zetová vzdálenost bodu nebo celkový tvar povrchu součásti ve formě mračna bodů. Tyto body se dají využít k měření rovinnosti a drsnosti povrchu a k měření základních geometrických prvků.



Díky tomuto principu, kdy se nevyužívá světlo o jedné vlnové délce, ale celé viditelné spektrum, tento senzor dokáže měřit jakýkoliv druh materiálu od tmavých až po lesklé povrchy. Dokáže změřit i tloušťku skla nebo čoček. Senzor je hojně využíván k měření malých součástí nebo snadně deformovaných, které dokáže přesně změřit za krátkou dobu. [33] [34]



Obr. 38 Schéma fungování senzoru bílého světla [35]

Tento senzor má výhody jako ostatní bezkontaktní optické senzory. Dokáže rychle a s velkou přesností bezkontaktně měřit a je proto vhodný i pro křehké a měkké materiály. Chromatický senzor bílého světla má však nad ostatními senzory výhodu v měření na lesklých a reflexních površích. Nemá problém s měřením zrcadel a skel, kdy dokáže změřit i tloušťku skla. Tento senzor se proto často využívá v automobilovém průmyslu k měření tloušťky skel nebo deformací jejich povrchu při výrobě.

Další aplikace tohoto senzoru můžeme najít v továrnách na výrobu skleněných nebo plastových lahví či nádob z bílého nebo barevného materiálu. V takových provozech se opět využívá k měření tloušťky skla a malých defektů.

Chromatický senzor bílého světla se také používá při výrobě fotovoltaických panelů, kdy je nutné dodržovat přesnou rozteč mezi přední a zadní stranou panelu. Obě strany jsou vyrobeny z průhledného skla, proto je výhodné využít tento senzor, který dokáže změřit mezeru mezi nimi, aniž by se musel panel rozebírat. Senzor se dále hojně využívá k měření tenkých průhledných vrstev, které jsou aplikovány ve všech možných odvětvích průmyslu. V poslední řadě se senzor využívá k přesnému naskenování povrchu a vytvoření rastrového obrazu celé součásti s následným porovnáním s CAD modelem.

Nevýhodou tohoto senzoru je jeho dražší pořizovací cena, menší rozsah měření a problém s měřením ostřejších úhlů. [33] [36] [37]

### 3.3 Laserové 3D skenery

Laserové skenování je založeno na principu triangulace a řadíme je mezi aktivní metody digitalizace. Tyto laserové skenery pracují na stejném principu jako např. sonar, který využívá vlastnosti laserového paprsku. Systém obsahuje zdroj laserového světla a optický detektor (digitální kamera – snímá deformovaný vzor na naskenované součástce). Laser vysílá světlo v podobě čáry nebo složitějšího vzoru



(Obr. 39). Laser je zdrojem intenzivního monochromatického a časově i prostorově koherentního záření. [14]

### 3.3.1 Laser scanner

Laserové skenery pracují na principu záření laseru. Skenovací hlavou, ve které je umístěn laser, najedeme nad měřenou součást. Ze skenovací hlavy září laserový paprsek na měřený prvek. Odražené světlo zachycuje objektiv a velice citlivá kamera. Díky tomu nám umožňuje vyhodnotit polohu nasnímaných bodů od skeneru. Využívá se princip triangulace bodů. Skener může mít jeden nebo tři skenovací roviny tzv. kříž (Obr. 40). [40]

Laserovým skenerem se získává obrovské množství bodů (desítky tisíc), které je potom filtrováno na trojúhelníkovou síť, která se dá použít např. pro pevnostní výpočty součásti.

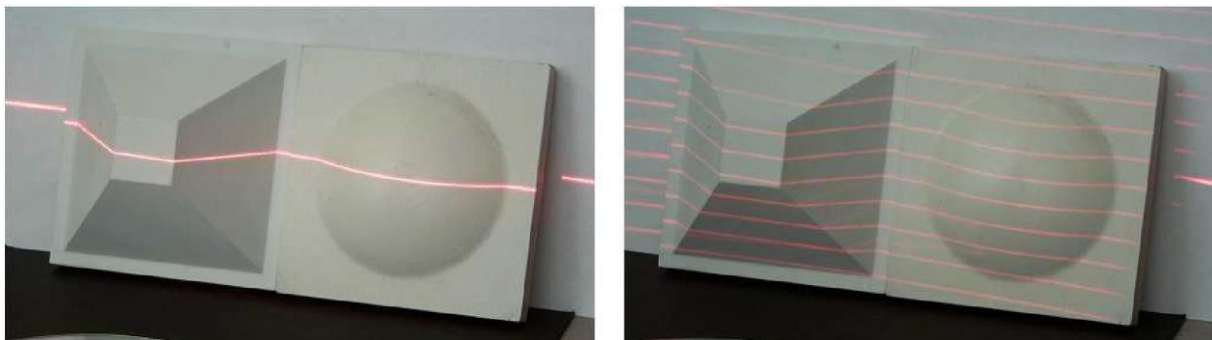
Kvalita zdigitalizovaného tělesa je dána hustotou, s jakou laserový paprsek pokrývá plochu reálného tělesa. Výstupem je soubor dat o polygonech definujících geometrii povrchu zkoumaného tělesa (součástky).

*Výhody laserových skenerů:*

- vysoká přesnost měřené geometrie,
- rychlá a lehká obsluha oproti optickým skenerům,
- schopnost rozpoznat neprůchozí otvory, prohlubiny a výstupky,
- možnost skenování velkých těles.

*Nevýhody laserových skenerů:*

- menší produktivita oproti jiným metodám,
- vyšší cena oproti ostatním typům skenerů,
- problémy skenování při skenování lesklých a průhledných povrchů. [14]



Obr. 39 Příklad laserového skenování [14]





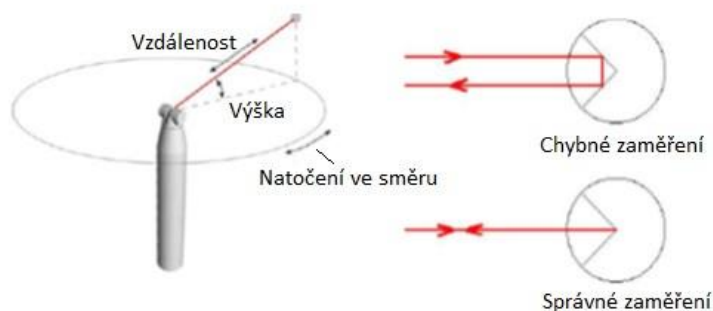
Obr. 40 Porovnání 2D laseru a hlavou se třemi rovinami osvitu (laserový kříž) [40]

### 3.3.2 Laser tracker

Zařazujeme k mobilním měřicím systémům, které sledují polohu odrazového systému z určité vzdálenosti. K měření snímaného objektu využívají laserový měřič vzdálenosti typu TOF (Time of Flight) o dvou přesných úhlových senzorech polohy (enkóдеры) a softwaru pro výpočet, ukládání a zobrazení polohy odrazového systému (reflektoru). [14]

Laserový paprsek vycházející z vysílače se ovládá podle pohybu reflektoru dvěma servomotory, které natáčí laserovou hlavu. Sledovaný obraz laserového pulzu na reflektoru je aktualizovaný 1000x za sekundu, zajišťuje přesnost a opakovatelnost. Reflektor je vedený ručně nebo automaticky na objekty připravené k měření. [14]

Průmyslové laser trackery jsou vhodné pro měření středně velkých až velkých dílců v řádech jednotek metrů. Staly se nezbytným kusem metrologického vybavení ve většině průmyslových odvětvích od povrchových inspekci automobilových karosérií až po velkoobjemová měření v instalacích v energetickém průmyslu či leteckém průmyslu. [39]



Obr. 41 Laser tracker (vlevo) a schéma určení pozice reflektoru (vpravo) [14]



### 3.3.3 Laser radar

Jedná se o zařízení pro skenování a pozicování objektů, které jsou vzdáleny od skenovací hlavy v řádech desítek metrů. Zařízení měří vzdálenost metodou TOF a je osazeno měřicím laserem o frekvenci 100 GHz, který vytváří robustní signál potřebný na měření takto vzdálených těles. Tento typ laseru pracuje v infračervené části spektra, a je bezpečný vůči poškození zraku.

Skenovací hlava je schopna se otáčet celých 360° a úhel náklonu skenovacího paprsku se pohybuje v rozmezí  $\pm 45^\circ$ . Hlavní využití nachází při sestavování a pozicování dílu v leteckém průmyslu, kdy je nutno tyto obrobky těžkou manipulační technikou přestavovat, a poté sestavovat. [38]



Obr. 42 Nikon laser radar MV331/351 [38]

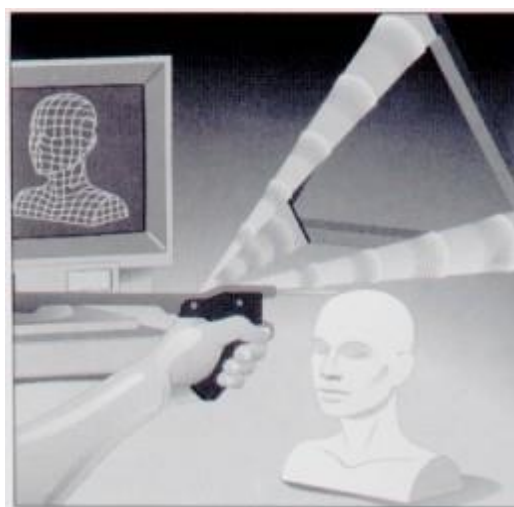
### 3.4 Ultrazvukové skenery

Tento způsob 3D digitalizace funguje na principu bezkontaktního snímání povrchu objektu ultrazvukovou sondou. Skenování se provádí manuálně ultrazvukovou sondou, která má tvar pistole s kovovým hrotem, který přikládáme ke skenovanému povrchu, kde stisknutím páčky (spouště) dojde k vyslání signálu. Tento signál se dekoduje za pomoci ultrazvukových čidel do prostorových souřadnic, které se můžou vyslat do CAD systému.

*Výhoda:* nejnižší cena.

*Nevýhoda:* malá přesnost (pohybuje se v rozmezích 0,3 – 0,5 mm).

Využití: v oblasti filmu, reklamy a animací. [14]



Obr. 43 Ultrazvukový skener Freepoint [14]



## 3.5 Počítačová tomografie

Počítačová tomografie má dnes v průmyslové technice významnou roli. Možnost uplatnění je velmi široká od zjišťování nejrůznějších defektů dílů přes velmi přesné měření. A to i komplikovaných vnitřních struktur, které není možné jiným nedestruktivním způsobem prozkoumat.

Historie počítačové tomografie sahá do 70. let 20. století, kdy byl zkonstruován první počítačový tomograf k lékařským účelům Newboldem Hounsfieldem. Od 80.let pak roste jeho popularita v průmyslovém sektoru, kde je hojně využíván pro materiálové analýzy a nedestruktivní testování. V poslední době, s rostoucím technologickým pokrokem na poli počítačové tomografie, se začíná CT sken používat také v metrologii jako náhrada 3D souřadnicových měřících strojů. Velkou výhodou je možnost analyzovat i vnitřní struktury. Velmi významné místo má nyní počítačová tomografie na poli kontroly tolerancí 3D tištěných dílů nebo kontroly sestav. [1] [2]

### 3.5.1 Druhy počítačových tomografů

#### *Lékařské*

V lékařství má CT sken důležitou roli. Jedná se o neinvazivní metodu vyšetření orgánů člověka či zvířete. Díky počítačové tomografii lze diagnostikovat mnoho chorobných stavů. Nezastupitelnou roli má také v prevenci. Na rozdíl od průmyslového tomografu se zdroj rentgenového záření a detektor otáčejí okolo nehybného pacienta. V lékařství jsou také nižší požadavky na rozlišení a přesnost. Napětí na rentgence zpravidla nepřekročí hodnotu 100 kV. [2]

#### *Průmyslové*

Možností uplatnění počítačové tomografie v průmyslu je mnoho a obliba této technologie stoupá. Průmyslové tomografy se využívají při materiálových analýzách, nedestruktivním testování a v metrologii. V těchto přístrojích se nachází stacionární zdroj rentgenového záření, detektor a kinematický systém. Mezi zdrojem záření a detektorem potěje měřená součást. U dnešních komerčních tomografů je napětí na rentgence maximálně 450 kV. [2] [16]

#### *CT pro velkoobjemové díly a sestavy*

Při skenování velkých součástí je limitujícím faktorem maximální napětí na rentgence, které v závislosti na materiálu dokáže prozářit pouze určitou tloušťku materiálu. Konvenční tomografy s maximálním napětím na rentgence 450 kV často nebyly dostačující. Donedávna bylo nutné k inspekci velkých artefaktů použití lineárních akceleratorů, začínajících na napětí 2 MeV, což vzhledem k finančním nákladům a vládním regulacím, ohledně lineárních akceleratorů, nebylo ideální. Avšak dnes jsou k dispozici také rentgenky s maximálním přípustným napětím rentgenky 600 kV a 800 kV. Díky tomu je možné skenovat velké díly a celé sestavy. U velkokapacitních tomografů je požadavkům na objemná tělesa uzpůsoben také detektor. [17]

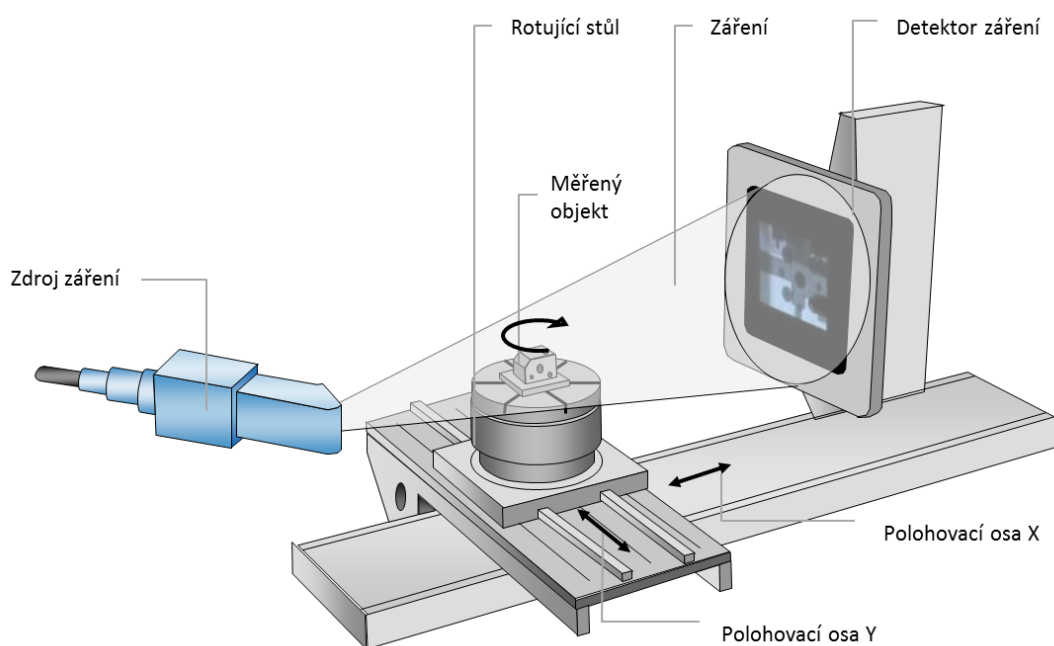
### 3.5.2 Konstrukční řešení

Každá konstrukce tomografických strojů je obdobná a má tři základní součástky: zdroj záření – rentgenka, rotační stůl a detektor. Často se k těmto součástkám také přidávají různé druhy senzorů pro přesnější a rychlejší měření. Je třeba neopomínat škodlivost záření a každý tomograf by měl odpovídat předpisům pro přístroje s úplnou ochranou podle nařízení o rentgenovém záření. Měřicí přístroje bývají vybaveny olověnou clonou v plášti přístroje.





Z hlediska konstrukce je důležitá rotační osa, dle které se tomografy dělí na dva druhy. Prvním je případ, kdy se otáčí měřená součást, a zdroj záření s detektorem jsou statické. U druhého případu se otáčí zdroj záření s detektorem okolo měřeného dílce. Ten je umístěn na vodorovném stole. První případ konstrukčního uspořádání je typický pro průmyslové využití a dává se mu přednost především z ekonomických důvodů. Takovýto stroj je možné vyrobit s nižšími náklady, a to i při velmi vysoké přesnosti. Další výhodou této konstrukce je, že lze při měření využít souřadnicové měřicí techniky. V lékařství je užití této konstrukce nemyslitelné, a proto se používá druhá varianta s pohyblivou rentgenovou jednotkou. V tomto případě jsou velmi důležité vlastnosti rotační osy. Do výsledku měření vstupuje mnoho zdrojů chyb: radiální odchylka, axiální odchylka, házení otočné osy a vlivy ostatních částí stroje. Proto jsou požadavky na vlastnosti rotační osy velmi vysoké, obzvláště pokud se jedná o velké průměry. U menších průměrů jsou požadavky na rotační osu nižší. [17] [18]



Obr. 44 Vizualní návrh konstrukce počítačového tomografu [18]

### 3.5.3 Princip průmyslových tomografů

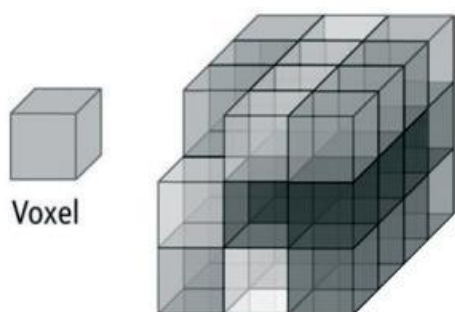
Průmyslový počítačový tomograf se skládá ze statického zdroje rentgenových paprsků-rentgenky, snímaný objekt je uložen na rotačním podstavci, který se otáčí. Proniklé záření se skrze objekt dostává na detektor. V závislosti na absorpčních vlastnostech objektu a jeho geometrické struktuře je získána 2D informace o snímaném objektu.

Při průchodu vzduchem ztrácí záření jen málo energie, naopak například absorpční vlastnosti oceli jsou velké (nutno použít záření s vyšší energií). V závislosti na absorpci záření se na snímku body jeví v určitém kontrastu.

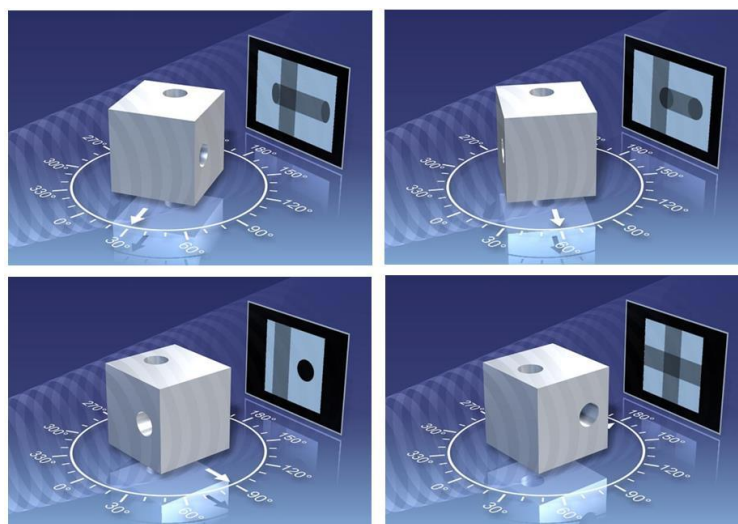
Určitý problém nastává při zkoumání látek, které mají malou absorpci nebo velmi podobnou – jedná se například uhlíkové kompozity, polymery, měkké tkáně aj. Záření které, prochází těmito materiály mění intenzitu záření jen nepatrně. Dochází však ke změně fází záření. Detektor nezaznamenává měnící se fázi. Je nutné pozorování ve fázovém kontrastu. [1] [19]



Rotací objektu o 360 stupňů kolem rotační osy stolu jsou získávány až tisíce snímků s dílčím pootočením. Ze snímků je získán vhodnou matematickou metodou mrak bodů tzv. voxelový obraz ve kterém je uložena trojrozměrná informace o objektu. Voxel (objemový pixel) představuje hodnotu absorpce záření v pravidelné mřížce trojrozměrného prostoru. Ačkoliv má voxel objemový charakter jeho rozměr je udáván pouze jako jednorozměrný v jednotkách mikrometrů [μm]. Tím se myslí lineární rozměr pravidelného útvaru a objem lze tak vypočítat. Voxely jsou poté zpracovávány počítačovým programem, který je schopen vygenerovat 3D model. [1] [2] [20] [21]



Obr. 45 Vizualizace voxelu [21]



Obr. 46 Zachycení měřeného dílce ve 360° [18]

Limitujícím faktorem u počítačové tomografie je hlavně výkon zdroje rentgenového záření. Maximální možná přípustná akumulovaná tloušťka materiálu je ovlivněna druhem materiálu a výkonem zdroje rentgenového záření. [20]

Skenování malých součástí lze provádět díky posunutí rotační osy vůči rentgenové jednotce. Dochází tak k zvětšení objektu.

Výběr zvětšení má vliv na výsledné rozlišení obrazu. Rozlišení je rovněž ovlivněno ohniskovou vzdáleností. [2]

### 3.5.4 Získávání dat

#### *Příprava před snímáním*

Aby bylo možné získat požadovaná data pomocí počítačové tomografie je nutné provést sérii kroků, které zajistí správný výsledek. Příprava před snímáním artefaktu – je potřeba nastavit několik parametrů, které jsou pro snímání klíčové.

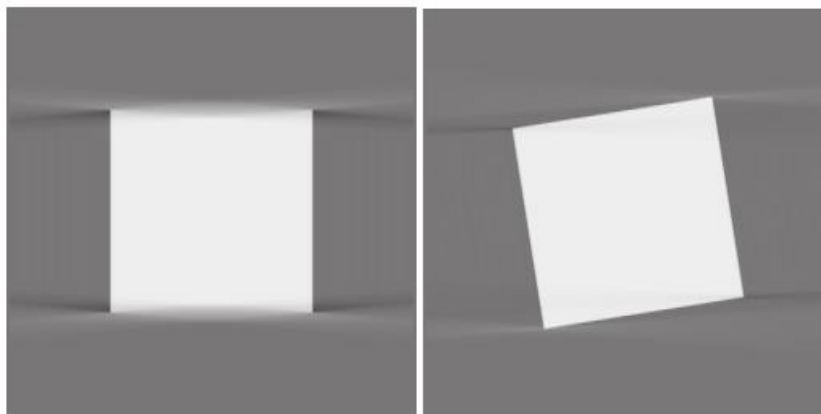
Jedná se o zvolení vhodného měřítka zobrazení podle požadovaného rozlišení. Musí být rovněž zajištěna možnost nasnímání celého vzorku. [2]

V případě, že je vyžadováno nejlepší možné rozlišení, musí měřený objekt na detektoru zaujímat co největší plochu. Jestliže není možné nasnímání celé části najednou, je možné použít princip rastrování součástí.



Upínací materiál by měl mít nízkou absorpční schopnost záření, aby neovlivňoval výsledek snímání. Ideální materiál pro upínání je například polystyren.

Artefakt je umístěn do středu rotačního stolu. Poloha rotačního stolu je nastavena tak, aby byl měřený dílec kompletně zobrazen na detektoru. Povrch artefaktu by měl svírat s rotační osou stolu úhel 10 až 15°, při úhlu menším dochází k nepříznivým optickým jevům, které mohou negativně ovlivnit snímání, například rozostřit hrany artefaktu. Na obrázku níže je tento nepříznivý zobrazen.



Obr. 47 Ovlivnění nenatočeného artefaktu (vlevo), vhodné řešení (vpravo) [15]

Po celou dobu snímacího procesu se nesmí vzorek vychýlit od své původní rotační osy. Vychýlení by mělo za následek značné odchylky v snímání. [2] [16]

Podle materiálu snímaného objektu je nutné nastavit odpovídající napětí a proud rentgenky. Různé materiály při daném napětí rentgenky mají stanovené maximální možnou vzdálenost prozáření. Intenzita záření se dá také regulovat pomocí filtrů různých materiálů a jejich tloušťek. [2]

Tabulka 6 Maximální možná prozařitelná akumulovaná tloušťka materiálu v závislosti na druhu materiálu a na velikosti napětí na rentgence [2]

Rentgenové napětí	130 kV	150 kV	190 kV	225 kV	450 kV
Ocel/keramika	do 5 mm	do 8 mm	do 25 mm	do 40 mm	do 70 mm
Hliník	do 30 mm	do 50 mm	do 90 mm	do 150 mm	do 250 mm
Plast	do 90 mm	do 130 mm	do 200 mm	do 250 mm	do 450 mm

Díky filtrům se lze zbavit určitého spektra rentgenového záření, které může působit šum. Filtry jsou nejčastěji měděné nebo hliníkové (Obr. 47). Tloušťka filtru závisí na materiálu měřeného dílce a dráhou materiálu, kterou musí rentgenové záření pronikat. [2]



Obr. 48 Měděné filtry

### Snímání objektu

Po nastavení vstupních parametrů je možné, přejít k samotnému skenování objektu. Objekt je polohován s velmi vysokou přesností ve třech kolmých osách tak, aby jeho obraz zabral na detektoru co největší plochu. Následně je snímáný objekt natáčen o 360° kolem svislé osy rotačního stolu. V jednotlivých krocích (až několik tisíc) jsou pořízeny rentgenogramy-neboli 2D rentgenové snímky. Průchodem materiálem ztrácí záření intenzitu, například vzduchem ztrácí minimum intenzity, body rentgenogramu jsou světlé, naopak při průchodu ocelovou deskou ztrácí velkou část své intenzity, a proto jsou body tmavé. [2] [16]

### Filtrovaná zpětná projekce

Voxelová data se získávají výpočtem filtrované zpětné projekce. Rekonstrukce snímků zpětnou projekcí je jedna z nejběžnějších a nejvíce užívaných metod. Běžně se používá k potlačení šumu, vylepšení obrazu a k zvýšení intenzity hran. Při rekonstrukci zpětnou projekcí vzniká charakteristické hvězdicové rozmazání snímku. K filtraci se využívá Ramp filtru. Ramp filtr zvyšuje intenzitu hran, avšak také způsobuje zesílení šumu obrazu. Z tohoto důvodu je Ramp filtr používá vždy v kombinaci s jiným typem filtru například Shepp-Logan filtr. Po filtraci se projekční snímky promítají zpět do objemu. Objem je tvořený voxely, objemovou reprezentací pixelu. [2]

### Výstupní data

Výstupem tomografického skenování je mrak bodů, který se skládá z voxelů. Hodnota šedé barvy voxelu reprezentuje úroveň absorpce rentgenového záření. Naměřená data jsou uživatelům dostupná ve formátu .scv. [23]

## 4. Obecné tvarové plochy a křivky

Průmyslová výroba umožňuje široké využití jednoduchých tvarů pro výrobu součástí. Mnoho výrobků má geometrii, která je kombinací rovin, válců, koulí a jiných jednoduchých tvarů. Tyto elementy jsou zásadní pro funkčnost většiny mechanických produktů a obecně jsou jednodušší a méně nákladnější než složitější díly. Nicméně, v některých aplikacích nejsou dostatečné, například když je funkce součásti dána interakcí s tekutinou nebo vlnou, jako je tomu v případě aerodynamiky a optiky.

V optice se tvar, který není ani částí koule, ani válce, nazývá asféra. Nejčastěji používané asférické povrchy jsou axiálně symetrické, protože jsou snadnější na výrobu. Obecně platí, že složitější tvary rotačně symetrické je také snadnější měřit, protože měření se může spoléhat na pořízení několika profilů.



Obecné tvarové plochy, někdy nazývané zakřivené, lze klasifikovat jako složité geometrické prvky. Volně tvarované díly jsou mnoha případech využity ve velmi zajímavých aplikacích, a to jak z funkčních, tak z estetických důvodů. Jejich význam pro průmysl je ve výrobě produktů, které mají komplexní funkční vlastnosti povrchu, a v návrhu designu. Tyto součásti jsou důležité složky v průmyslových odvětvích, jako je automobilový a letecký průmysl, kosmonautika a další. Obecné tvarové plochy mohou mít velký vliv na funkčnost výrobku. Geometrické odchylky ve výrobě způsobují neefektivnost, která může způsobit velké ztráty energie. Návrh, konstrukce a testování součástí, které mají obecné tvarové plochy jako funkční plochy, jsou klíčovými činnostmi vývoje pro dosažení lepších výkonů součástí.

V designu mnoha výrobků je estetičnost čím dál tím důležitějším hlediskem pro zaujetí trhu. Toto je kritický faktor úspěchu zejména pro spotřební zboží, kde může mít tvar a vzhled větší vliv na zákazníka než funkce. Příklady jsou velmi časté: karoserie automobilů, mobilní telefony a spotřební produkty obecně.

Křivky a obecné tvarové plochy základním nástrojem pro popis složitých tvarů. Tradičně byly křivky a obecné plochy reprezentovány několika ortografickými projekcemi. S příchodem počítačové grafiky a rychlý vývoj v oblasti výpočetní geometrie, se modelování ploch stalo společným rysem pro systémy modelování podporovaného počítačem (CAD). Dnes je jmenovitá geometrie obecného tvaru typicky definována CAD modelem. [4] [15]

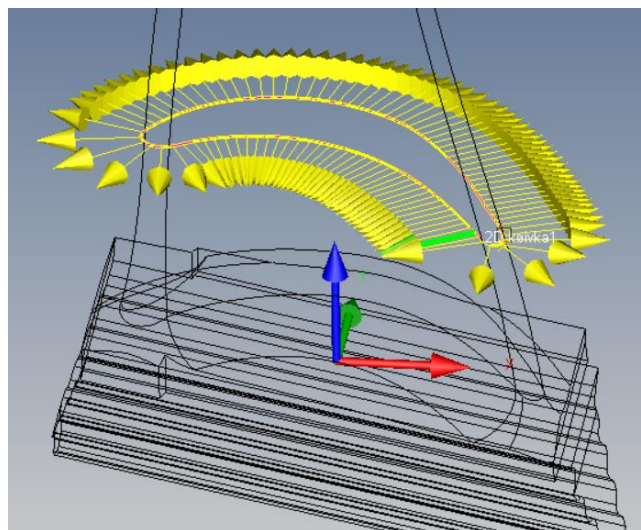
## 4.1 Možnosti měření křivek a obecných ploch v software Calypso

Vybrané možnosti jsou demonstrovány na modelu turbínové lopatky.

### 4.1.1 Měření křivek

#### *Vytvoření elementu křivka*

Prvním krokem je vytvoření elementu křivka. V záložce CAD se vybere možnost *Vytvořit měřené elementy*. V záložce Řez se zvolí poloha, ve které se bude daná křivka měřit. Po nastavení vyhovující pozice se klikne na tlačítko Řez. Na modelu se vytvoří obrys roviny řezu. Následně se překlikne do záložky *Vytvořit*, označí se celá křivka a poté se klikne na tlačítko *Křivka* a dojde k vytvoření elementu křivka (Obr. 49).



Obr. 49 Element 2D křivka



K nastavení strategie měření se otevře element křivky, klikne se na tlačítko *Strategie* a otevře se položku *Segment*. Zde je možné nastavit parametry snímání jako rychlost snímání, počet snímaných bodů atd. Ovšem tyto parametry platí komplexně pro celou křivku. Jak je ale vidět, daná křivka se skládá ze čtyř různých částí, proto by bylo korektnější, mít i různé parametry snímání pro každou část. Toho se docílí tak, že se vytvoří další segmenty. Následně se každý segment vytyčí počátečním a koncovým bodem a zvolí se parametry snímání.

Například pro hřbet a koryto lopatky je vhodné zvýšit počet bodů k detailnějšímu zachycení tvaru křivky a vykompenzovat časovou náročnost zvýšením rychlosti snímání. Tyto úpravy jsou vhodné vzhledem k podlouhlému, a ne příliš zakřivenému tvaru těchto částí.

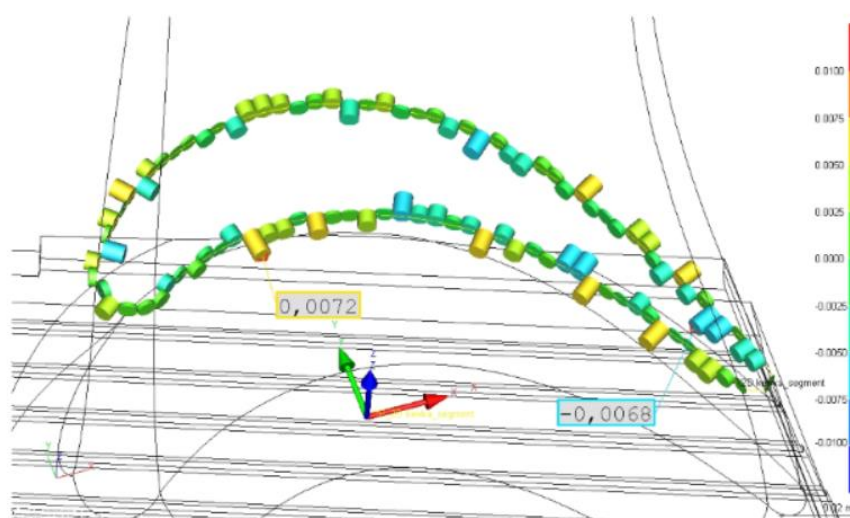
Pro náběžnou a odvodnou hranu je vhodné, vzhledem k jejich velmi zakřivenému tvaru, snížit rychlost snímání. Vzhledem k tomu, že se jedná o krátké části, tak jim byl přidělen pouze zlomek bodů z celé křivky, tudíž je třeba zvýšit i počet bodů.

### Vyhodnocení křivek

Po definování elementu křivky je možné se přesunout k jeho vyhodnocení. K vyhodnocení tvaru křivky se využívají charakteristiky *Tvar profilu*, *Tvar*, *Tvar křivky*.

Pomocí charakteristiky „Tvar profilu“ se kontroluje úchylka tvaru křivky vzhledem ke jmenovité geometrii. Pomocí charakteristiky „Tvar křivky“ se kontroluje dodržení tvaru křivky nebo jeho segmentů. Charakteristika „Tvar“ určuje z extrémních hodnot měřených elementů úchylku tvaru jako rozdíl mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou kolmo k měřenému elementu.

Pro představu je předneseno vyhodnocení křivky pomocí charakteristiky *Tvar profilu*. V záložce *Tvar-Poloha* se zvolí možnost *Tvar profilu*. Otevře se charakteristika, jako element se vybere vytvořená křivka a určí se požadovaná tolerance. Následně se provede měření charakteristiky. Grafický výsledek zobrazen níže (Obr. 50).



Obr. 50 Grafický výsledek tvaru profilu křivky

## 4.1.2 Měření obecných tvarových ploch

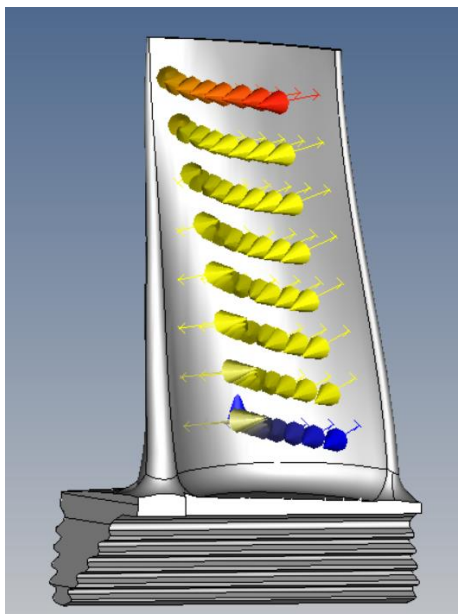
### Vytvoření elementu z plochy

První ukázkou je vytvoření elementu obecná tvarová plocha generováním dráhy z plochy. V záložce *CAD* se vybere možnost *Vytvořit měřené elementy*. V záložce *Množina bodů* se v okně *Měř. element*





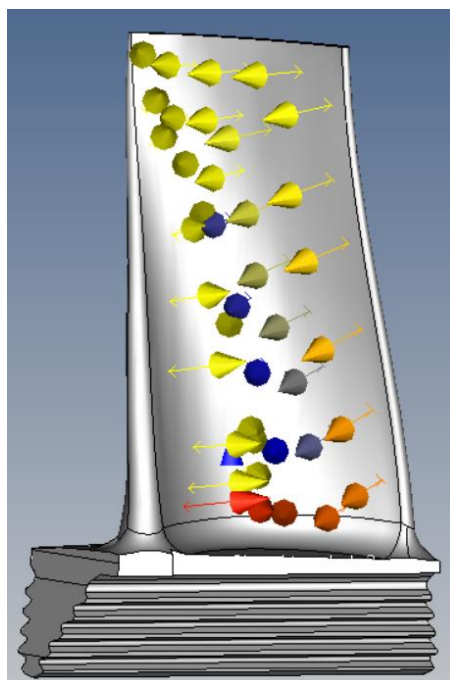
zvolí *Obecná tvarová plocha* a v okně *Generování dráhy* se vybere *Z plochy*. V okně *Nastavení* se zvolí velikost rastru, poté se označí plocha, na které je třeba element vytvořit. Následně se klikne na tlačítko *Vytvořit* a vygenerují se body na označené ploše. Kliknutím na tlačítko *Vytvořit element* dojde k vytvoření elementu (Obr. 51).



Obr. 51 Element vytvořený z plochy

#### Vytvoření elementu body

Další ukázkou je vytvoření elementu obecná tvarová plocha generováním dráhy body. Postup je totožný jako v předchozím případě pouze se v okně *Generování dráhy* vybere možnost *Body*. Následně se nakliká libovolný počet bodů na ploše, kterou je třeba měřit. Je vhodné rozložit body po celé ploše, aby se došlo k adekvátním výsledkům. Poté se klikne na tlačítko *Vytvořit element* a dojde k vytvoření elementu (Obr. 52).



Obr. 52 Element vytvořený body



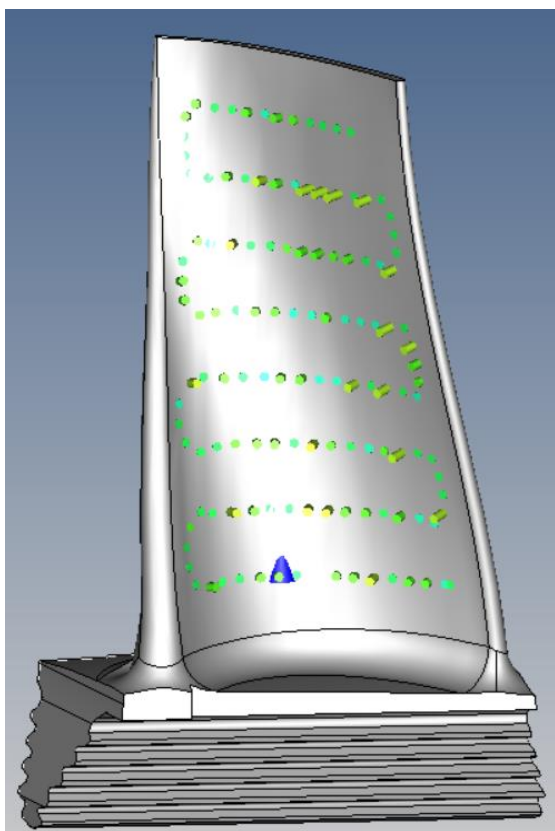


### *Vyhodnocení elementu obecná tvarová plocha*

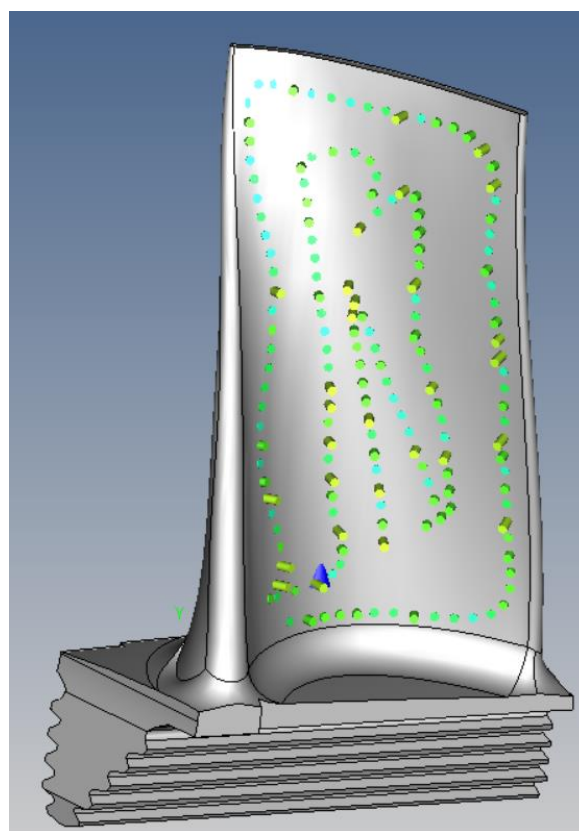
K vyhodnocení elementů obecná tvarová plocha se využije charakteristika *Profil plochy*. V záložce *Tvar-Poloha* se zvolí možnost *Profil plochy*. Otevře se charakteristika a jako element se vybere vytvořená obecná tvarová plocha. Potvrdí se a provede se měření charakteristiky.

Dráhu snímání elementu obecné tvarové plochy vytvořeného z plochy představuje rastr. Grafické vyhodnocení na Obr. 53.

U elementu obecné tvarové plochy vytvořeného body je dráha snímání ovlivněna tím, jak se postupně určily jednotlivé body, kterými je vedena. Grafické vyhodnocení na Obr. 54.



Obr. 53 Grafické vyhodnocení-z plochy

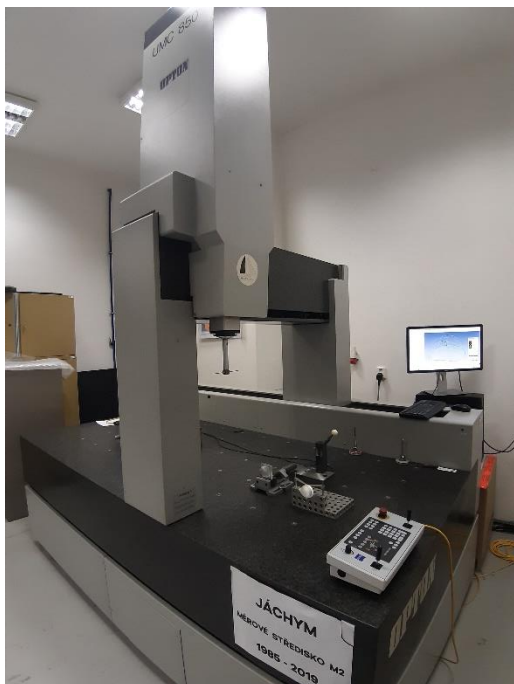


Obr. 54 Grafické vyhodnocení-body

## 5. Měření

Tato část bakalářské práce je zaměřena na získávání dat ze souřadnicového měřicího stroje Opton UMC 850 (Obr. 55), optického skeneru Comet L3D 2 (Obr. 56) a počítačového tomografu Metrotom 1500 (Obr. 57), vše od společnosti Zeiss. Jejich zpracování pomocí software Calypso a Metrotom OS od společnosti Zeiss a VG Studio Max od společnosti Volume Graphics.

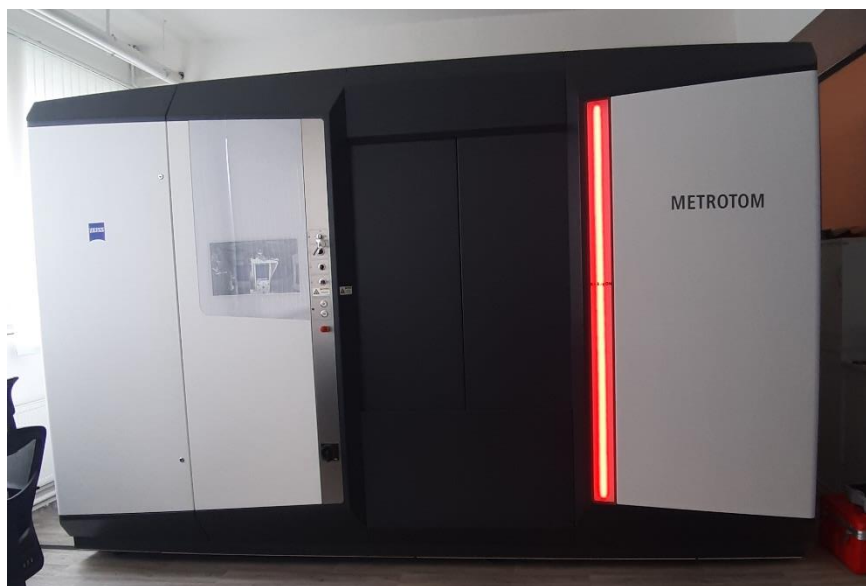
Následně všechna získaná data budou změřena v softwaru Calypso. Na všechny získaná data bude aplikován stejný plán měření, popsáný v kapitole 5.4.



Obr. 55 OPTON UMC 850



Obr. 56 COMET L3D 2



Obr. 57 METRONOM 1500

Jako měřené artefakty byly zvoleny dvě čočky (Obr. 58). Obě byly vyrobeny technologií obrábění. První čočka na sobě má okem viditelné stopy po obráběcích nástroji. Druhá je leštěna a má podstavu. Obě čočky jsou vyrobeny z materiálu polyamid PA6, známý též pod názvem silon. Na obou čočkách se vyhodnocovala obecná tvarová plocha, která byla předmětem porovnání jednotlivých metod.



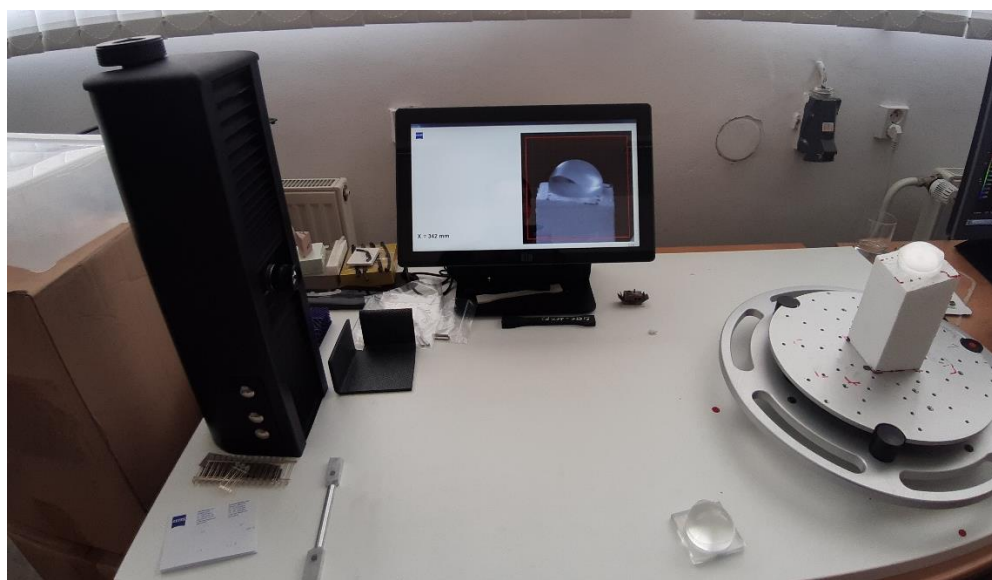
Obr. 58 Měřené artefakty, čočka s podstavou (vlevo) a čočka (vpravo)

## 5.1 Získání dat z CT

### 5.1.1 Ustavení a upnutí artefaktů

Nejdříve bylo nutné zvolit vhodné ustavení artefaktu v pracovním prostoru stroje. Bylo třeba, aby měřený artefakt na detektoru zaujímal co největší plochu k docílení nejlepšího možného rozlišení a zároveň byla zajištěna možnost nasnímání celého artefaktu. K tomu se využil nastavovací přípravek dodávaný s tomografem, složený z kamery, obrazovky a rotačního podstavce. Na tomto zařízení se určila vhodná poloha artefaktu od rentgenky, která použita pro skenování.

K upnutí byl použitý polystyrenový blok s plochou seříznutou pod malým uhlím vůči rotační ose stolu, na kterou byl umístěn artefakt. K dodatečnému zajištění dílu je možné použít oboustranné lepicí pásy.



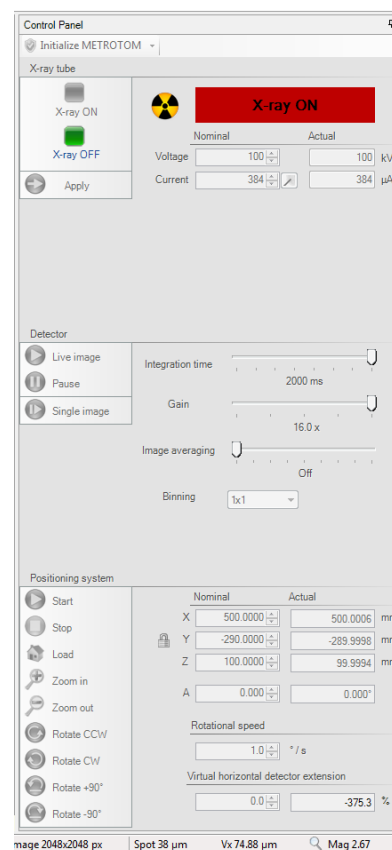
Obr. 59 Upnutí a ustavení artefaktu



### 5.1.2 Nastavení parametrů skenu

Parametry, které je možné nastavit:

- Napětí na rentgence – Napětí se volí v závislosti na materiálu a velikosti artefaktu.
- Integrovaný čas (integration time) – jedná se o dobu, které je vystaven dílec rentgenovému záření na jeden snímek. Čím delší expozice tím více fotonů pronikne na detektor a bude využito k rekonstrukci obrazu a tím více se zlepší celková kvalita obrazu. Vzhledem delšímu integračnímu času je objekt lépe prozářený, díky tomu je možné snížit napětí na rentgence. S delší dobou vystavení rentgenovému záření úměrně roste také celková doba skenování.
- zesílení (gain) – zesílení má vliv na obrazový signál a na ostrost. Díky většímu zesílení je obraz světlejší, avšak s menší ostroostí.
- Průměrování obrazů (Image averaging) - Snímek objektu je zachycen v jedné poloze na detektoru vícekrát, poté dochází k sjednocení těchto obrazů do jednoho, což má za následek zvýšení kvality. Toto nastavení zvyšuje celkovou dobu snímání.
- Binning – Tato funkce může být využita k redukci množství naměřených dat. Například:
  - 1x1 binning – počet pixelů odpovídá počtu pixelů na detektoru
  - 2x2 binning – zredukuje čtyři pixely na jeden nový pixel
- Velikost snímku (image size) – představuje šířku a výšku snímku v pixelech.



Obr. 60 Panel nastavení

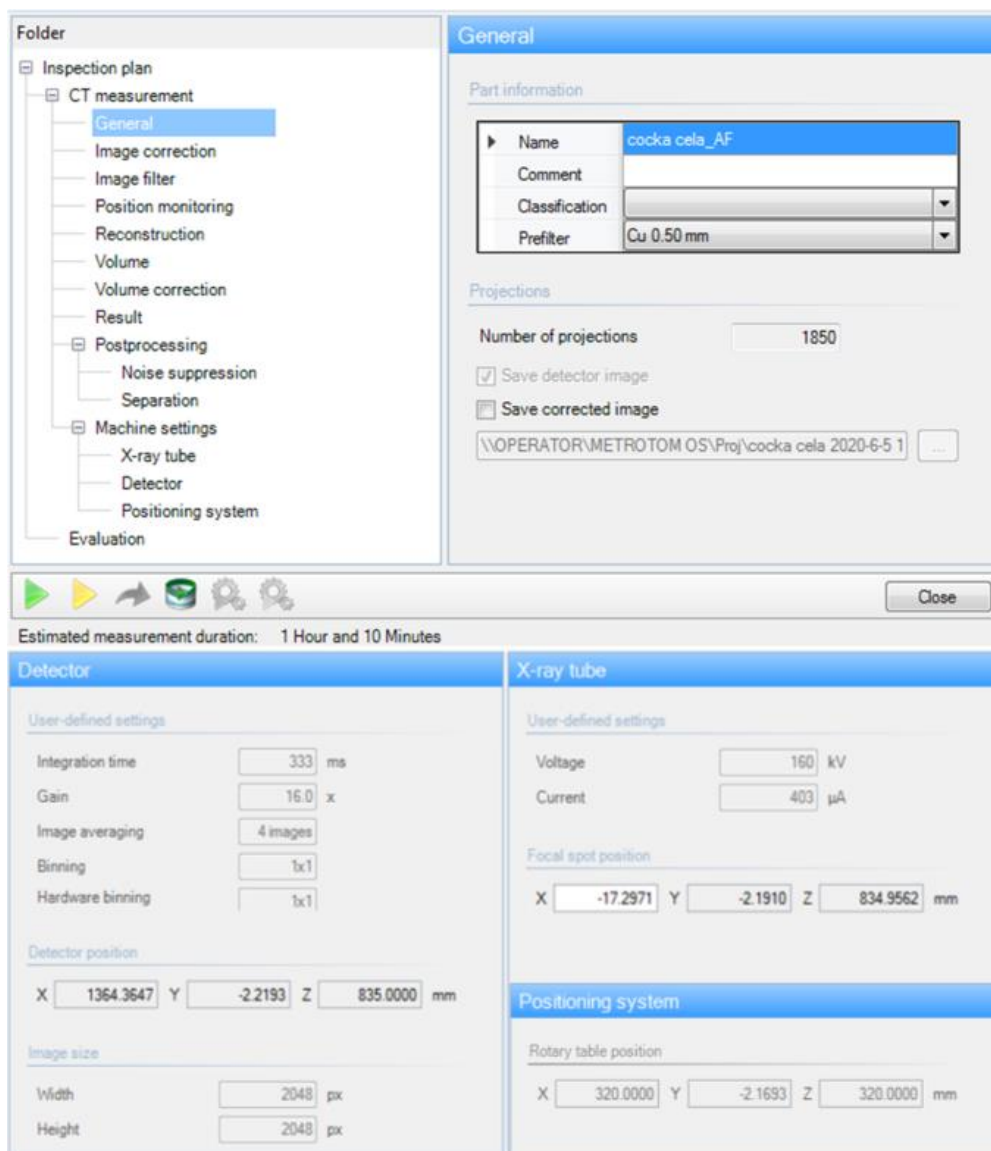
Po nastavení všech výše zmíněných parametrů se musí přepočítat výchozí proud. Poté se může spustit skenování.

Dále je třeba nastavit pozici rotačního stolu v pracovním prostoru, tak aby byl měřený dílec zobrazený na detektoru. Určení vzdálenosti od rentgenky čili hodnoty X, popsáno v předchozím bodu.

### 5.1.3 Nastavené parametry pro sken čočky

▪ Integrovaný čas	333 ms
▪ zesílení	16x
▪ Průměrování obrazů	4
▪ Binning	1x1
▪ Napětí	160 kV
▪ Přepočítaný proud	403 µA
▪ Vzdálenost od rentgenky (X)	320 mm
▪ Velikost snímku	2048x2048 px

Byl použit filtr Cu 0,5 mm, tedy měděný filtr o tloušťce 0,5 mm. Počet vytvořených snímků byl 1850 a předpokládaný čas skenu vycházel na 1 hodinu a 10 minut (Obr 61). K získání ostřejších snímků byla použita funkce autofokus.

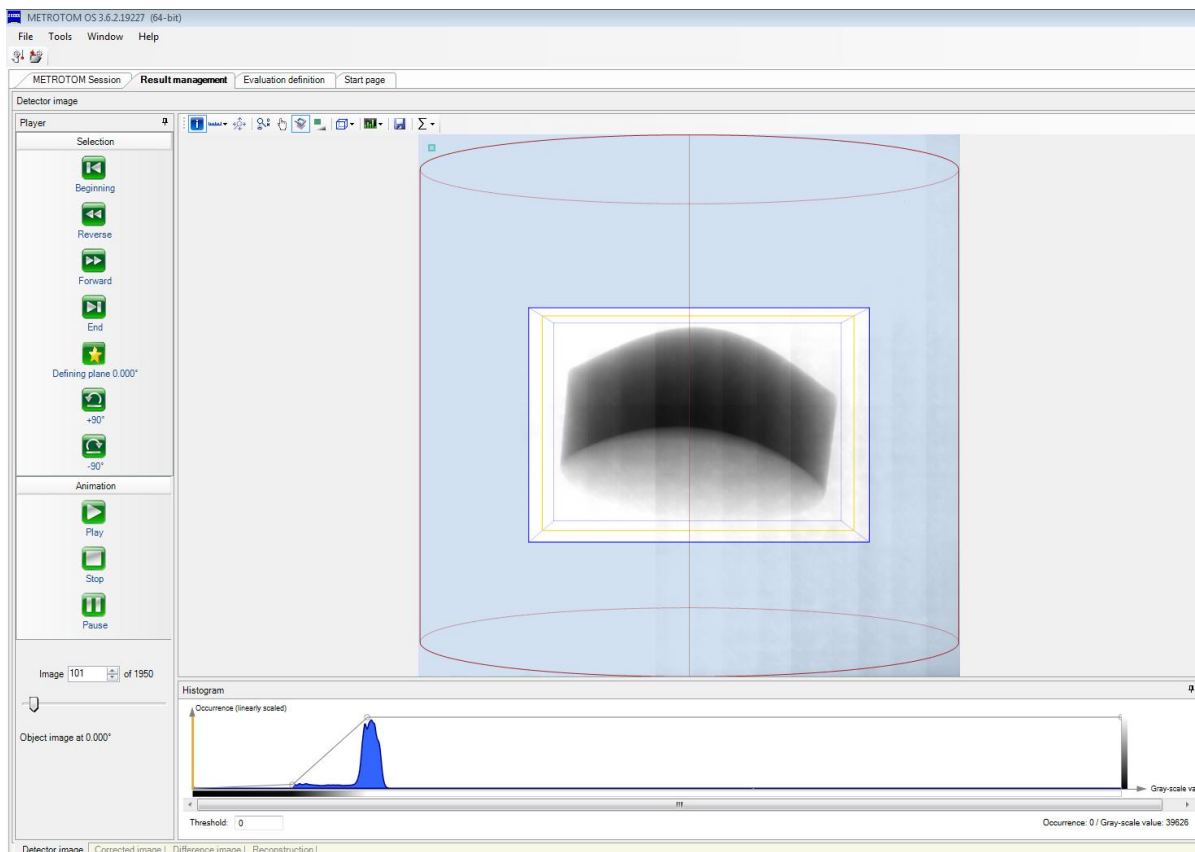


Obr. 61 Rekapitulační okno nastavených parametrů čočky

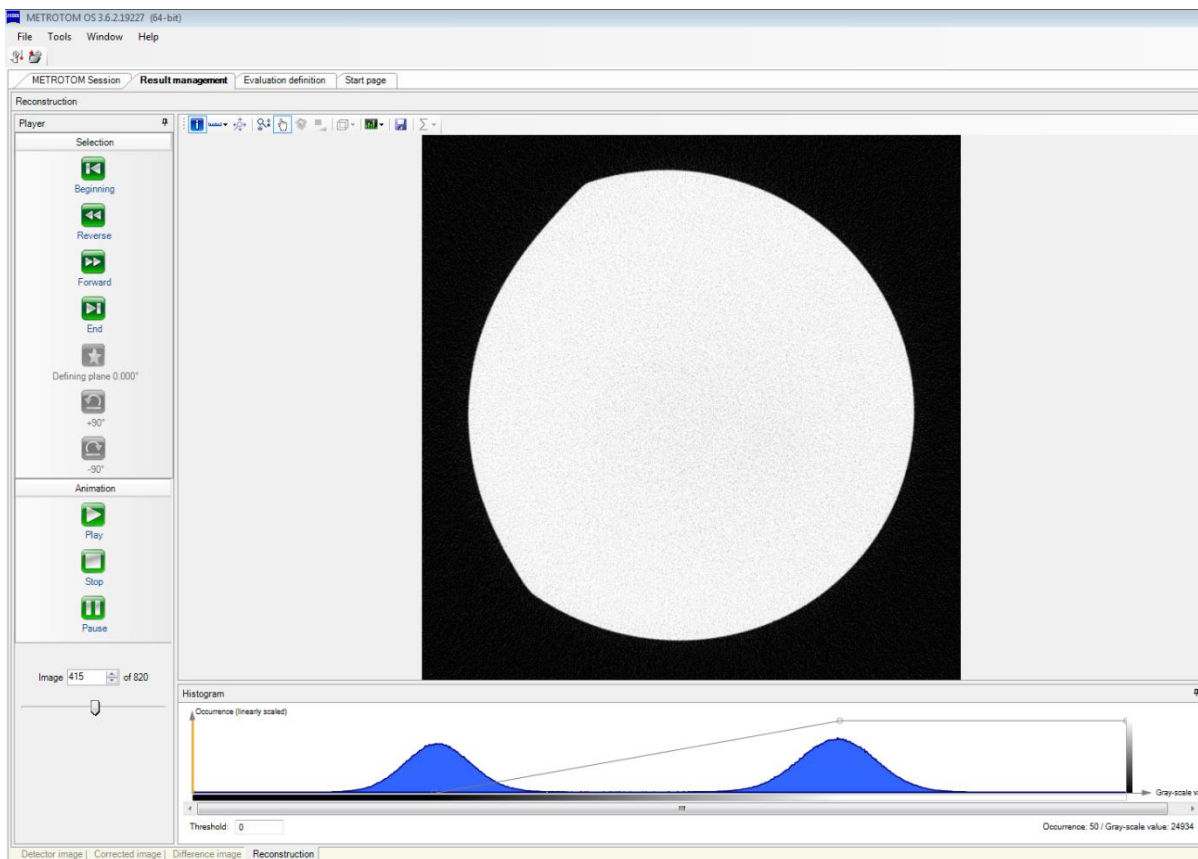
#### 5.1.4 Výsledky skenu čočky

Po dokončení skenování se výsledky zobrazí v okně *Result management* (Obr 62). Zde je možné se podívat na každý nasnímaný snímek eventuálně si přehrát celý sken. V dolním okně *Histogram* je možné si nastavit úroveň stupňů šedi. Detailnější zobrazení jednotlivých snímků se zobrazí v záložce *Reconstruction* (Obr. 63).





Obr. 62 Zobrazení výsledků čočky



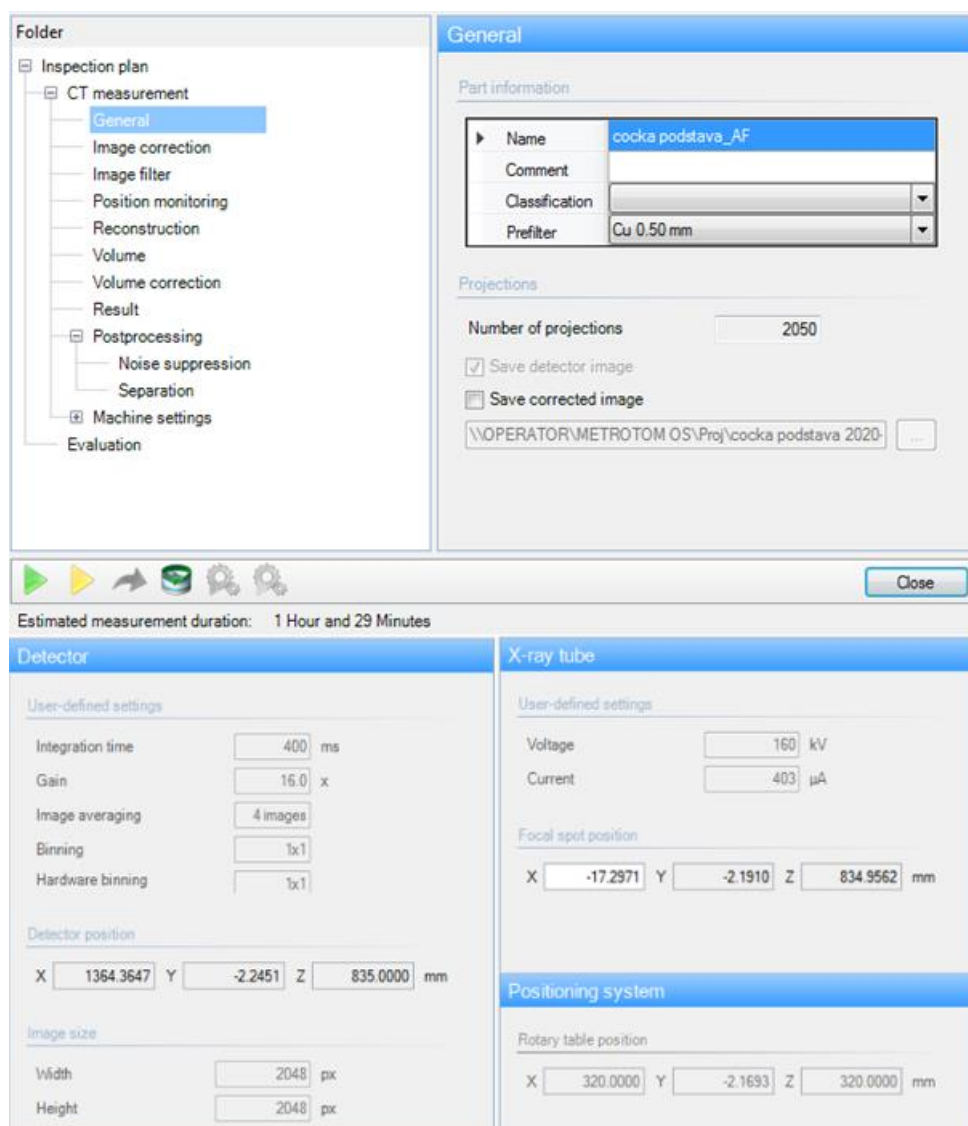
Obr. 63 Záložka Reconstruction



### 5.1.5 Nastavené parametry pro sken čočky s podstavou

- Integrovaný čas 400 ms
- Zesílení 16x
- Průměrování obrazů 4
- Binning 1x1
- Napětí 160 kV
- Přepočítaný proud 403  $\mu$ A
- Vzdálenost od rentgenky (X) 320 mm
- Velikost snímku 2048x2048 px

Byl použit filtr Cu 0,5 mm, tedy měděný filtr o tloušťce 0,5 mm. Počet vytvořených snímků byl 2050 a předpokládaný čas skenu vycházel na 1 hodinu a 29 minut (Obr. 64). K získání ostřejších snímků byla použita funkce autofokus.



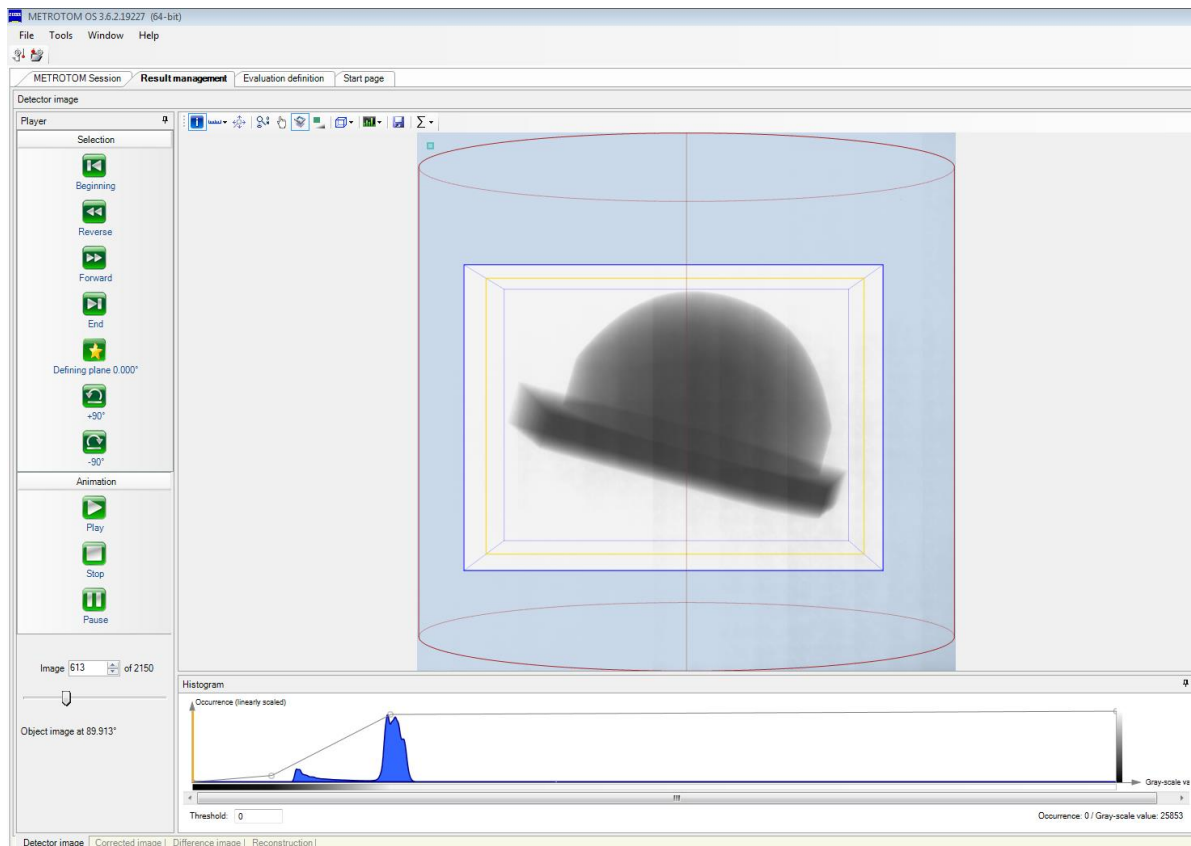
Obr. 64 Rekapitulační okno nastavených parametrů čočky s podstavou





### 5.1.6 Výsledky skenu čočky

Po dokončení skenování se výsledky zobrazily v okně *Result management* (Obr 65). Zde se lze podívat na každý nasnímaný snímek, eventuálně si přehrát celý sken. V dolním v okně Histogram je možné nastavit úroveň stupňů šedi.



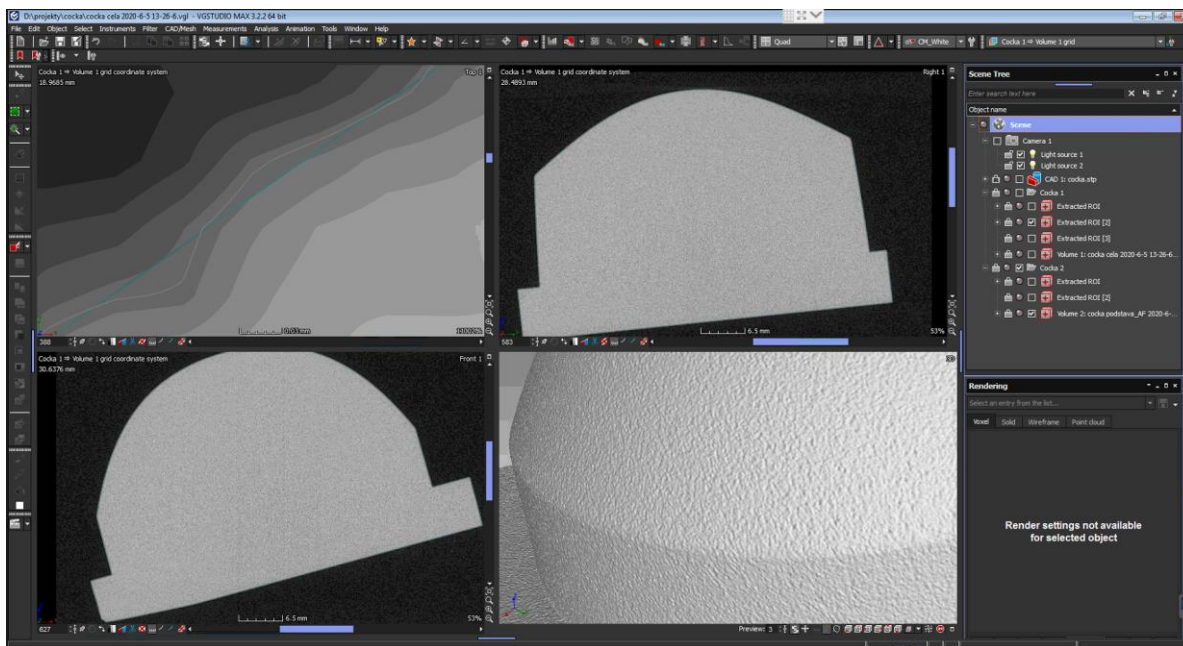
Obr. 65 Zobrazení výsledků čočky s podstavou

Výsledky skenů neboli mraky bodů, obou čoček jsou vyexportovány jako soubory .scv pro pozdější zpracování. Teplota během skenování byla 27°C.

## 5.2 Tvorba STL modelů

I přestože by se získaný mrak bodů mohl již měřit, jedná se stále o velmi objemný soubor dat, který by mohl komplikovat pozdější zpracování. Redukce objemu se provedla převodem mraku bodů na trojúhelníkovou síť pomocí programu VG Studio Max.

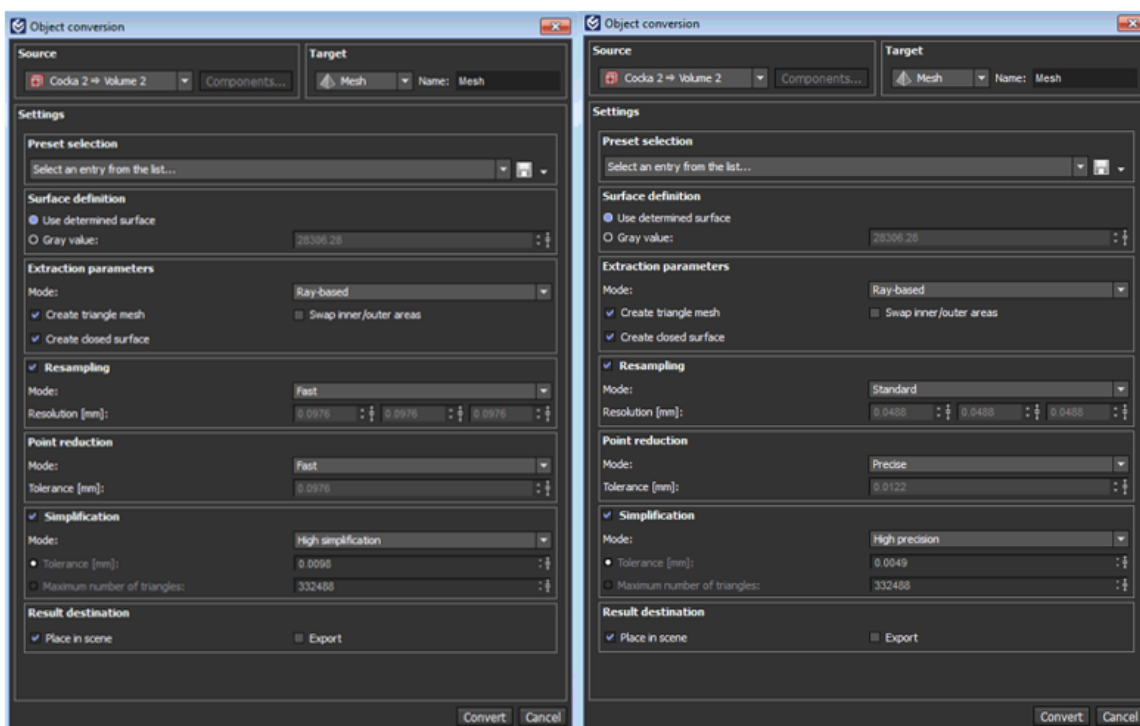
VG Studio Max je softwarový program určený k analýze a vizualizaci voxelových dat neboli mraku bodů získaných pomocí počítačové tomografie. Po nahrání .scv souboru, získaného tomografem, do pracovního prostředí, je nezbytné nejprve provést vymezení povrchu (surface determination), tedy vytvořit přechodovou linii mezi stupni šedi, program toto vypočítá sám Gaussovou metodou. Po provedení tohoto kroku je možné mračnem bodů libovolně procházet. V prostředí softwaru je zobrazen mrak bodů a tři řezy součásti, v navzájem kolmých rovinách, v kterých je možno procházet. Tyto řezy reprezentují nezkreslené rentgenové snímky součásti (Obr. 66). [41]



Obr. 66 Pracovní prostředí VG Studio Max

Pro účely porovnání byly vytvořeny soubory trojúhelníkové sítě s co nejvyššími a s co nejnižšími detaily. Velikost souboru tvořeného trojúhelníkovou sítí s nejvyššími detaily má zhruba poloviční objem a soubor s nejnižšími detaily má méně jak desetinovou velikost.

Převedení mraku bodů na model tvořený trojúhelníkovou sítí se docílí tak, že se klikne pravým tlačítkem myši na mrak bodů v okně *Scene tree* (strom souborů) a zvolí se *Create mesh* (vytvořit síť). Otevře se okno *Object conversion* (převod objektu), ve kterém se nastaví požadované parametry (Obr. 67).

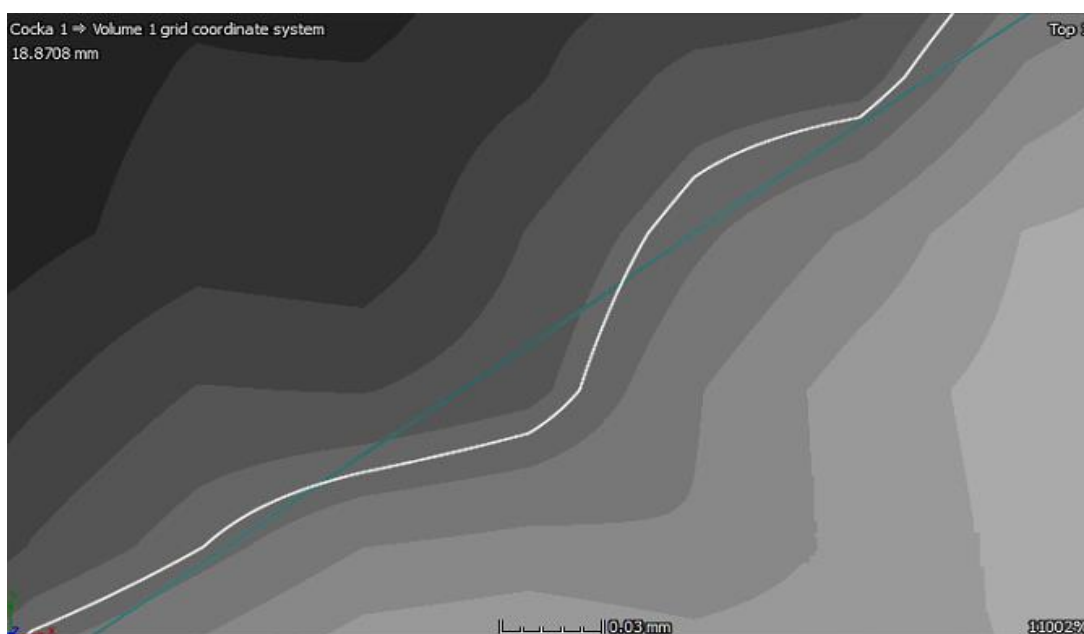


Obr. 67 Nastavené parametry pro nejnižší detail (vlevo) a nejvyšší detail (vpravo)

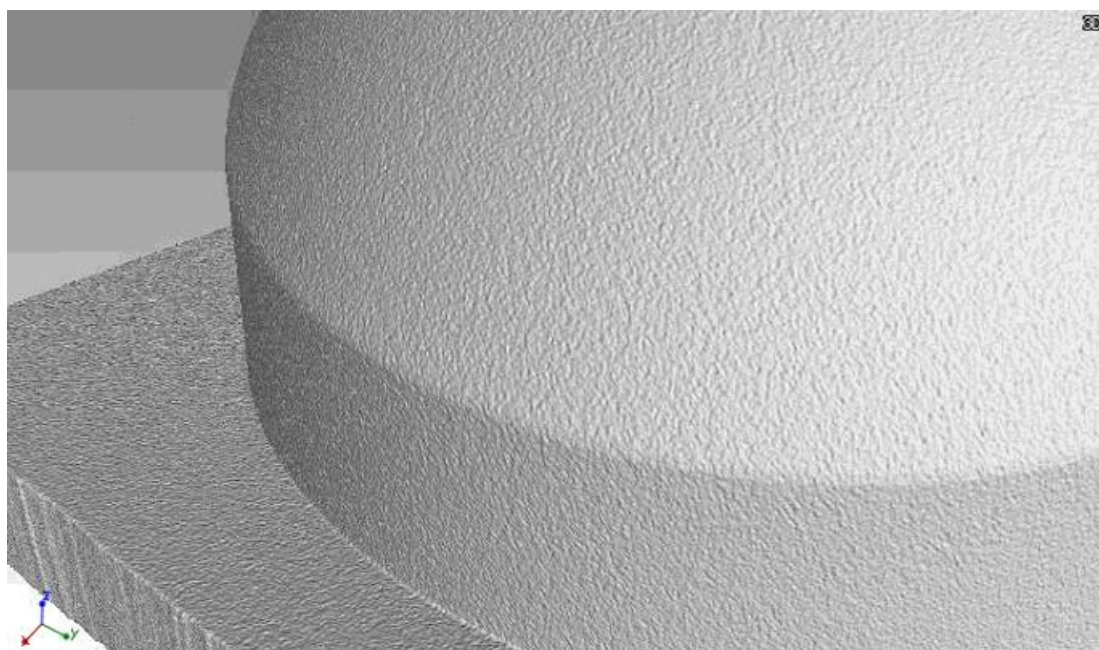


Nastavované parametry jsou Resampling (převzorkování), Point reduction (redukce bodů) a Simplification (zjednodušení), přičemž poslední zmiňovaný parametr má nejvyšší vliv na velikost souboru. Pro dosažení souboru s nejnižšími detaily byly nastaveny parametry Fast (rychle), Fast (rychle) a High simplification (hodně zjednodušeně). Pro soubor s nejvyššími detaily byly nastaveny parametry Standart (standartně), Precise (precizně) a High precision (hodně precizně).

Jelikož se tato práce zabývá měřením obecných tvarových ploch, tak byl ještě vytvořen soubor, ve kterém došlo k vyhlazení hrubého povrchu mraku bodů a tím dosáhnutí přesnějšího tvaru měřené plochy. Na Obr. 68 je bílou křivkou naznačen tvar povrchu mraku bodů čili přechodová linie mezi stupni šedi a na Obr. 69 je znázorněn mrak bodů.



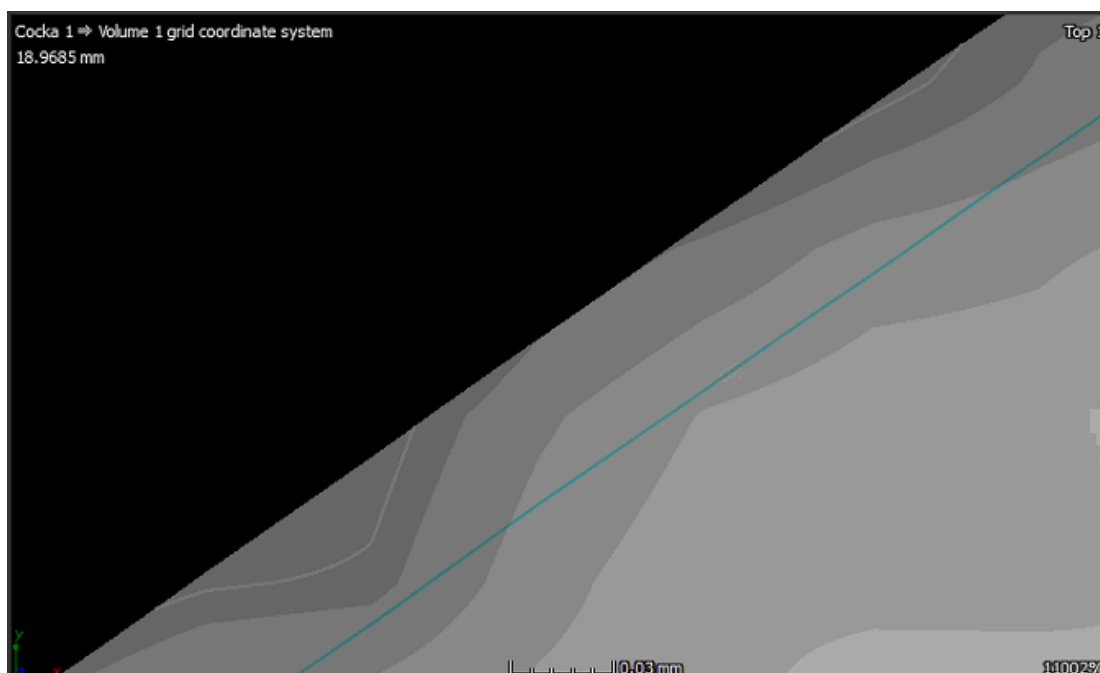
Obr. 68 Přechodová linie



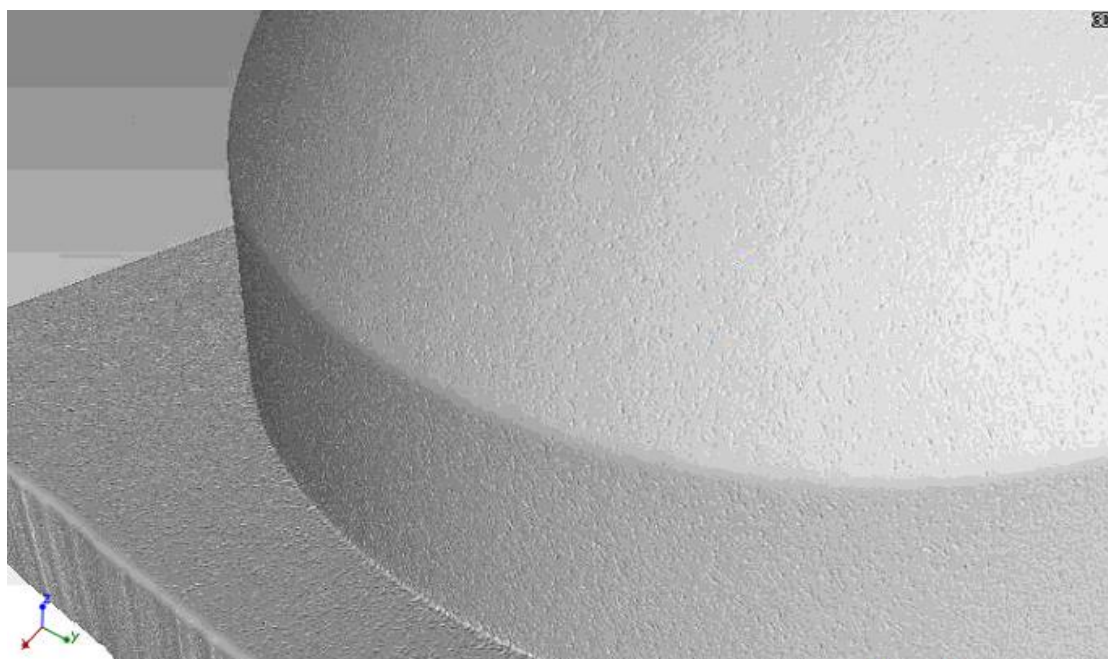
Obr. 69 Mrak bodů



Na Obr. 70 je zobrazen detail vyhlazeného povrchu čočky. Je vidět, že došlo ke značnému potlačení výstupků, jako by se daný povrch přebrousil, tudíž dojde i zmenšení velikosti vůči modelu. Na Obr. 71 je vidět již vyhlazený mrak bodů.



Obr. 70 Detail vyhlazeného povrchu



Obr. 71 Vyhlažený mrak bodů

Z obou artefaktů jak z čočky, tak z čočky s podstavou byly vytvořeny tři modely tvořeny trojúhelníkovou sítí. Jeden model s nejnižšími detaily, jeden s nejvyššími detaily a jeden vyhlazený s nejvyššími detaily.





### 5.3 Získání dat z optického skeneru COMET L3D 2

Inovativní senzory COMET pro sběr 3D dat (na základě pruhové projekce a technologie Blue LED) se díky modulární koncepci hodí pro rozmanité aplikace. Vysoce přesná naměřená data se používají v oblasti zajišťování kvality (např. porovnání naměřených a jmenovitých dat s CAD daty) nebo pro konstrukci, rapid manufacturing a reverzní inženýrství.

Systémy COMET poskytují vynikající kvalitu dat a mají velmi snadné použití. Jsou používány v nejrůznějších průmyslových odvětvích, zejména v automobilovém průmyslu a u jeho subdodavatelů, při výrobě forem a nástrojů, elektrických zařízení apod.

ZEISS COMET L3D 2 poskytuje nejmodernější sensorovou technologii a projektově orientovaný software pro snadné a spolehlivé získávání 3D dat. Zaznamenává 3D data součástí rychle a přesně. Díky unikátní flexibilitě systému je možný zvětšený rozsah pro mnoho měřicích úloh. [25]

Měření probíhalo externě ve společnosti Carl Zeiss spol. s.r.o. sídlící v Praze, kde bylo umožněno nasnímání měřených čoček.

Aby bylo možné obě čočky naskenovat, musela se na ně nanést tenká vrstva křídového prášku, kvůli jejich transparentnosti. Skenování probíhalo na otočném stole. Aby software lépe rozeznal měřenou součást, využilo se dvou dvanáctistěnnů k vytvoření kontrastu. Upnutí bylo realizováno pomocí modelovací hmoty (Obr. 72).



Obr. 72 Upnutí čočky

Měření probíhalo tak, že po každém pootočení byl zaznamenán snímek. Všechny snímky se k sobě postupně připasovaly a vznikl kompletní mrak bodů reprezentující měřenou čočku. Po nasnímání celého artefaktu se následně provedlo odstranění šumu a vyexportování mraku bodů ve formátu .stl.



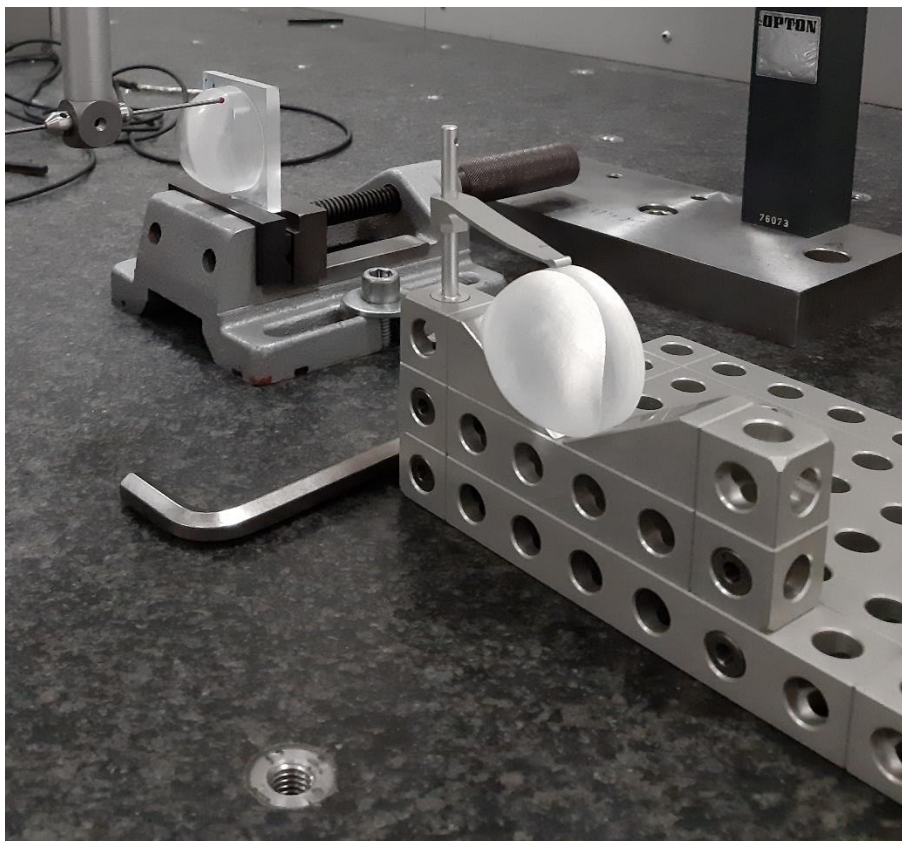
*Obr. 73 Průběh skenování čočky*

## 5.4 Získání dat z CMM

Měření obou artefaktů, jak čočky, tak čočky s podstavou, probíhalo na souřadnicovém měřícím stroji OPTON UMC 850 a bylo k tomu využito softwaru Calypso.

### 5.4.1 Upnutí součástí

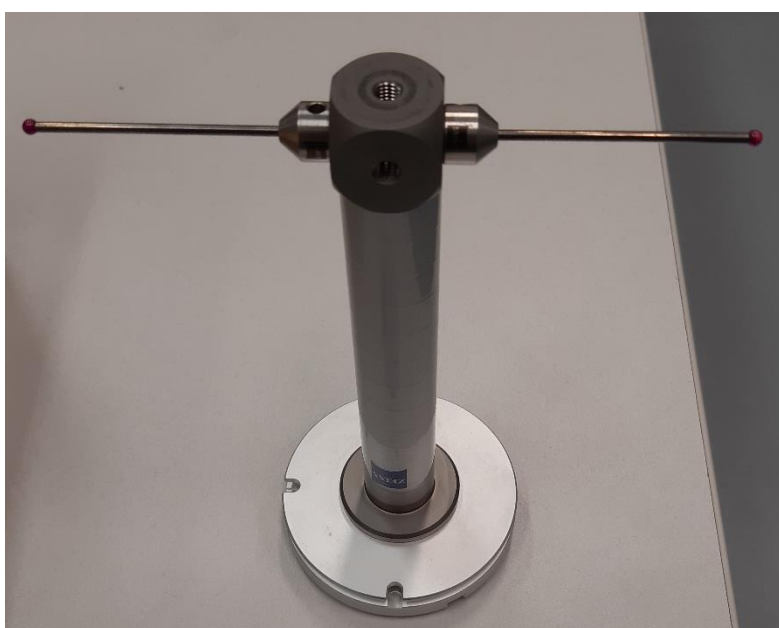
Prvním krokem bylo upnutí součástí, které je zobrazeno na Obr. 74. Pro první čočku se použil upínací systém Alufix od firmy WITTE, jenž se připevnil k pracovní desce souřadnicového stroje. Čočka s podstavou byla upnuta do svěráku, který se posléze taktéž připevnil k pracovní desce souřadnicového stroje.



Obr. 74 Upnutí součástí

#### 5.4.2 Měřící konfigurace

V dalším kroku bylo vytvoření měřící konfigurace. Měřící konfigurace byla složena z upínacího talířku, na který je připevněno thermofitové prodloužení, na jehož konci se nachází spojovací kostka, v níž jsou upevněny snímače ve směru +X a -X. Snímače jsou tvořeny snímacími doteky v podobě rubínových kuliček o průměru 3 mm.



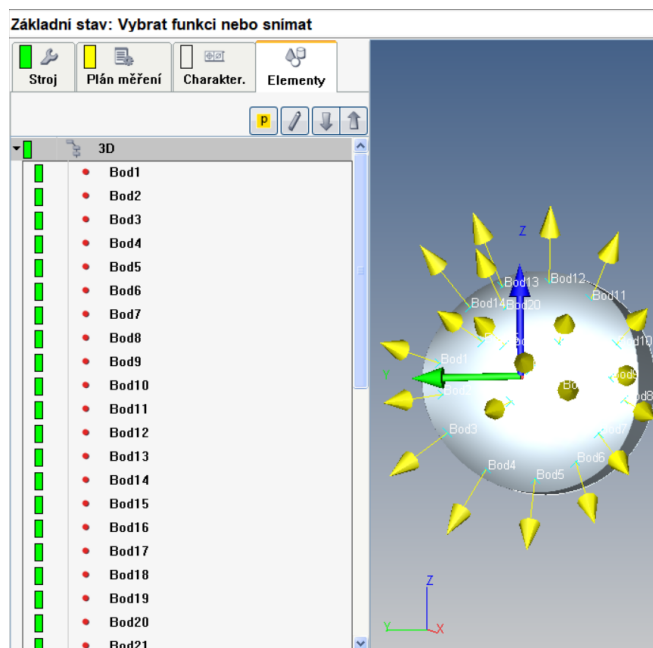
Obr. 75 Snímací systém



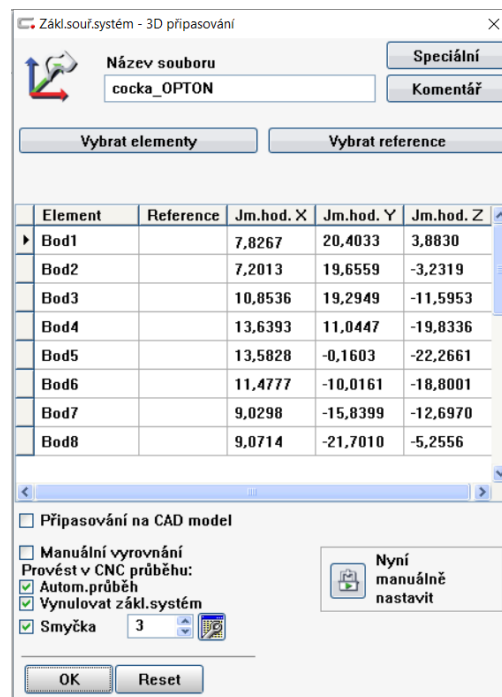


### 5.4.3 Vyrovnání

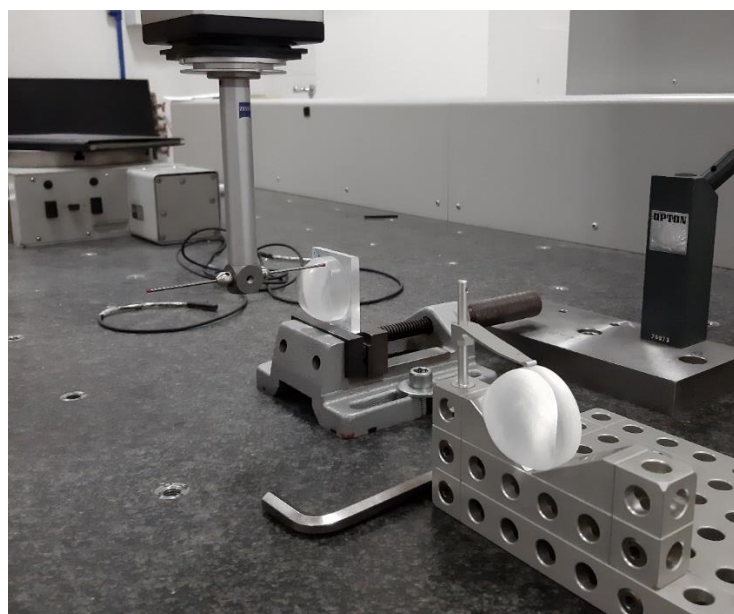
Dalším krokem pro získání dat je vytvoření souřadného systému, zároveň se jedná o první bod plánu měření. Pro vyrovnání obou artefaktů jsem na obecné tvarové ploše 3D modelu nadefinoval prostorové body, které jsem se pokusil rovnoměrně rozmístit po celé součásti (Obr. 76). V záložce *Plán měření* jsem otevřel položku *Základní souř. systém* a tam jsem pro vytvoření souřadného systému vybral metoda *3D připisování*. Klikl jsem na *Vybrat elementy* a vybral jsem všechny nadefinované prostorové body. Zvolil jsem požadavek na měření tří smyček (Obr. 77). Jedna smyčka se musí nadefinovat manuálně, zbytek vyrovnání a měření provede stroj v automatickém režimu (Obr. 78).



Obr. 76 Nadefinované prostorové body



Obr. 77 Okno 3D připisování



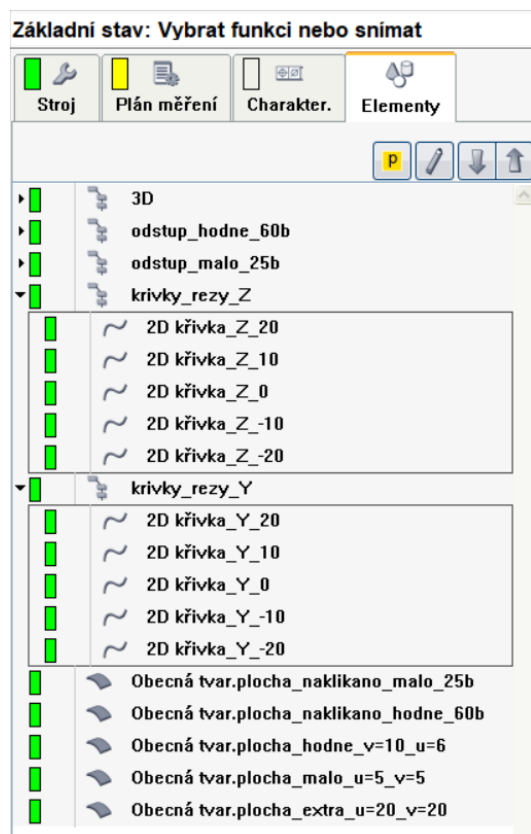
Obr. 78 Průběh vyrovnávání součásti



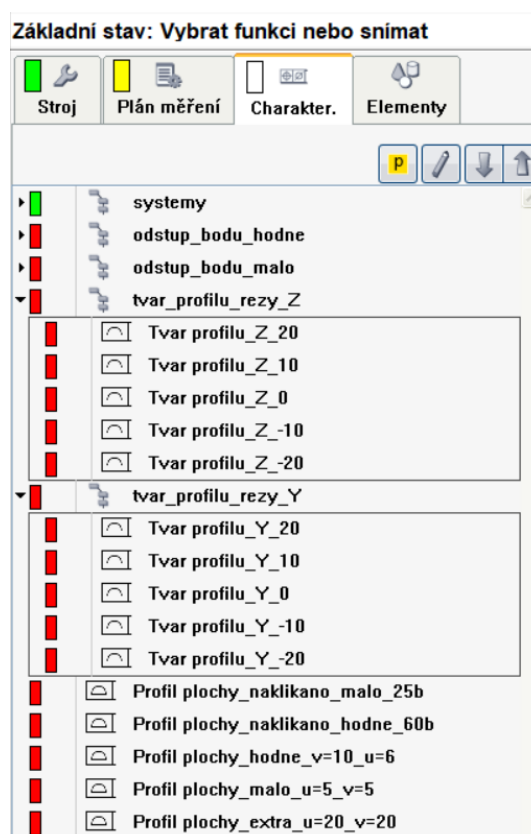
#### 5.4.4 Extrakce bodů a výpočet charakteristik

Následujícím krokem byla extrakce bodů z vytvořených elementů. Vytvořené elementy jsou zobrazeny na Obr. 79. Pro zjištění polohy obecné tvarové plochy vůči artefaktu jsem vytvořil dva soubory prostorových bodů. Jeden soubor je tvořen 60 body druhý tvoří 25 bodů. Tyto dva soubory byly použity proto, aby se zjistilo, zdali je menší počet bodů dostačující či nikoliv.

Poté jsem vytvořil elementy obecné tvarové plochy. Dva elementy byly generované body a tři elementy byly generovány z plochy. Způsob vytvoření těchto elementů popsán v kapitole 4.1.



Obr. 79 Vytvořené elementy

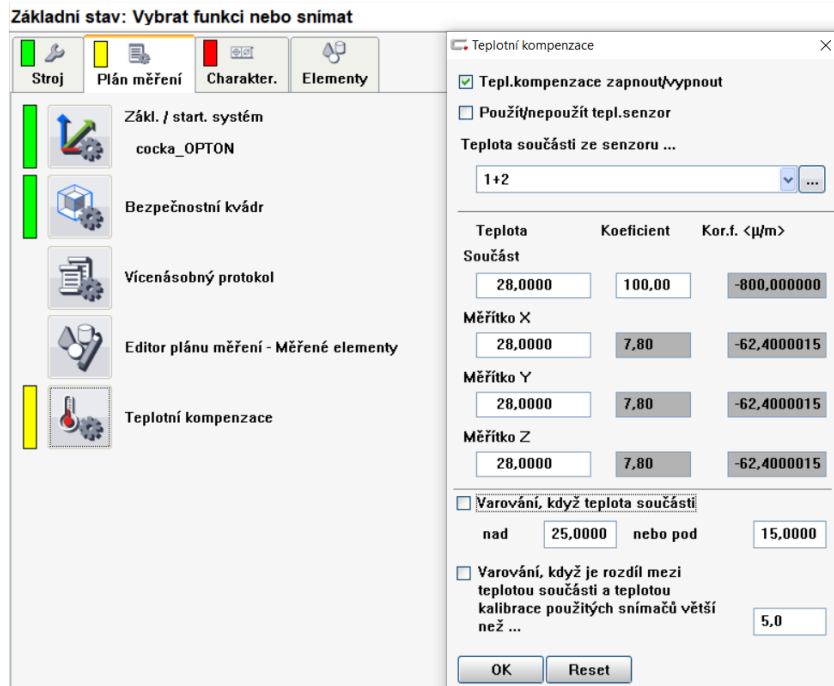


Obr. 80 Vytvořené charakteristiky

Dalším krokem byl výpočet charakteristik čili vytvoření měřených charakteristik z výše vytvořených elementů. Charakteristikou prostorových bodů je odstup bodu. Pro vyhodnocení křivek byla zvolena charakteristika tvar profilu a obecné tvarové plochy jsou vyhodnoceny charakteristikou profil plochy (Obr. 80). Pro všechny charakteristiky krom odstupu bodů byla zvolena tolerance 0,05 mm. Detailní popis tvorby těchto charakteristik v kapitole 4.1. V tuto chvíli se mohlo provést měření pomocí tlačítka *CNC Start*.

#### 5.4.5 Teplotní kompenzace

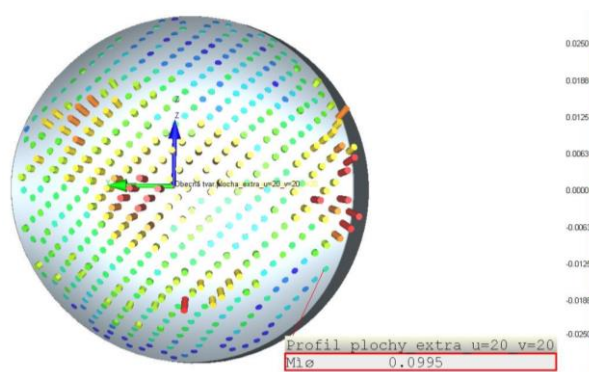
Vzhledem k tomu, že teplota v místnosti byla během měření čochy 28°C a během měření čochy s podstavou 27°C, rozhodl jsem se i k provedení měření s aktivovanou teplotní kompenzací v Calypsu. Obě čochy jsou vyrobeny z polyamidu, jehož koeficient teplotní roztažnosti má hodnotu  $100 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$  (Obr. 81). Po nastavení parametrů bylo třeba znovu provést měření.



Obr. 81 Nastavení teplotní kompenzace

#### 5.4.6 Vyhodnocení

Vyhodnocení změřených charakteristik je možné zobrazit v různých grafických znázornění ať už 2D nebo 3D. Dále je možné využít některý z protokolů, které software Calypso nabízí jako například prezentační protokol či vícenásobný protokol.



Obr. 82 3D grafické znázornění

ZEISS Calypso		ZEISS	
Plán měření cocka_OPTON	Datum 22 Juli 2020		
Číslo výkresu * drawingno *	Čas 21:36:52	Zakázka	
Operátor Master	Stroj Simulation	Č.dílu inkrementálně bez_korekce	
Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.
0,0995	0,0000	0,0500	0,0995

Obr. 83 Prezentační protokol



## 6. Porovnání výsledků

Vyhodnocení je prezentováno jako válce se stonásobným zvětšením ze softwaru Calypso. Pro všechny charakteristiky byla zvolena tolerance 0,05  $\mu\text{m}$ . Výsledky z dotykového měření byly brány jako referenční hodnoty, kvůli nejmenší nejistotě měření.

### 6.1 Porovnání výsledků čočky

#### 6.1.1 Porovnání: CT x OPTON x COMET

Tabulka 7 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
CT	CAD_Profil plochy_u=5_v=5						
	Profil plochy_u=5_v=5	0,132	0,000	0,050	0,000	0,132	0,082
OPTON	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,1113	0,0000	0,0500	0,0000	0,1113	0,0613
COMET	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,118	0,000	0,050	0,000	0,118	0,068



V předchozí tabulce jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy rastrem velikosti 5x5. Dotykové měření vykazuje odchylku 111,3  $\mu\text{m}$ . Velmi podobných hodnot dosahuje optické měření, kdy je odchylka 118  $\mu\text{m}$ , tedy o 7  $\mu\text{m}$  vyšší než u dotykového měření. U výsledků z tomografu je odchylka 132  $\mu\text{m}$ .

Tabulka 8 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
CT	CAD_Profil plochy_u=20_v=20						
	Profil plochy_u=20_v=20	0,110	0,000	0,050	0,000	0,110	0,060
OPTON	CAD_Profil plochy_extra_u=20_v=20						
	Profil plochy_extra_u=20_v=20	0,0995	0,0000	0,0500	0,0000	0,0995	0,0495
COMET	CAD_Profil plochy_extra_u=20_v=20						
	Profil plochy_extra_u=20_v=20	0,117	0,000	0,050	0,000	0,117	0,067

V Tabulce 8 jsou také srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy, ale tentokrát rastrem velikosti 20x20. Dotykové měření vykazuje odchylku 99,5  $\mu\text{m}$ . Optické měření uvádí odchylku 118  $\mu\text{m}$ , což je o 18  $\mu\text{m}$  vyšší než u dotykového měření. Bližší hodnoty odchylky k dotykovému měření jsou tentokrát z tomografu, kdy je odchylka 110  $\mu\text{m}$ .





Tabulka 9 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
CT	CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...						
	Profil plochy_naklikano_hodne_60b	0,142	0,000	0,050	0,000	0,142	0,092
OPTON	CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...						
	Profil plochy_naklikano_hodne_60b	0,1037	0,0000	0,0500	0,0000	0,1037	0,0537
COMET	CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...						
	Profil plochy_naklikano_hodne_60b	0,103	0,000	0,050	0,000	0,103	0,053

Tabulka 9 uvádí porovnání obecné tvarové plochy generované 60 body. Výsledky z dotykového měření uvádějí odchylku 103,7  $\mu\text{m}$ . Prakticky totožná velikost odchylky je i u výsledku z optického měření, která je 103  $\mu\text{m}$ . Hodnota odchylky z tomografu činí 142  $\mu\text{m}$ , což je o 38  $\mu\text{m}$  vyšší než z dotykového měření.



Tabulka 10 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body

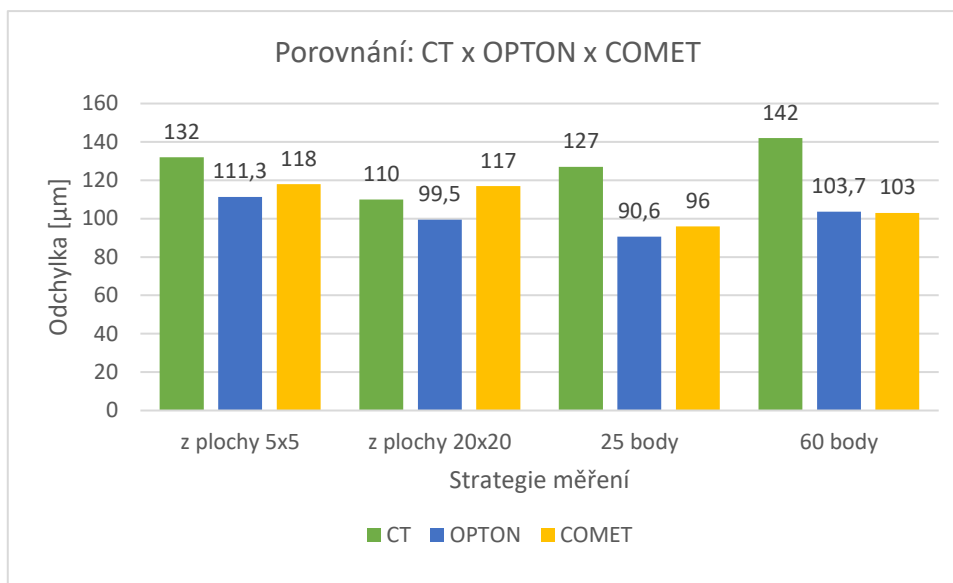
	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
CT	CAD_Profil plochy_naklikano_malo_25b						
	Profil plochy_naklikano_malo_25b	0,127	0,000	0,050	0,000	0,127	0,077
OPTON	CAD_Profil plochy_naklikano_malo_25b						
	Profil plochy_naklikano_malo_25b	0,0906	0,0000	0,0500	0,0000	0,0906	0,0406
COMET	CAD_Profil plochy_naklikano_malo_25b						
	Profil plochy_hodne_u=10_v=6	0,096	0,000	0,050	0,000	0,096	0,046

V Tabulce 10 jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované 25 body. Dotykové měření vykazuje odchylku 90,6  $\mu\text{m}$ . Velmi podobných hodnot dosahuje optické měření, kdy je odchylka 96  $\mu\text{m}$ , tedy o 5  $\mu\text{m}$  vyšší než u dotykového měření. U výsledků z tomografu je odchylka 127  $\mu\text{m}$ .

### 6.1.2 Zhodnocení porovnání: CT x OPTON x COMET

Z porovnání počítačové tomografie s dotykovým a optickým měřením je patrné, že měřená plocha na artefaktu čočky nebyla vyrobena příliš přesně, jelikož ve všech případech výsledné hodnoty výrazně převyšují jmenovitou hodnotu.





Graf 1 Porovnání: CT x OPTON x COMET

Jak je vidět v Grafu 1, tak při použití rastru o menším počtu bodů je odchylka optického měření vyšší o 7 µm a v případě tomografie je vyšší o 21 µm, než je tomu tak u dotykového měření, kde je odchylka 111,3 µm. V případě použití rastru o více bodech se odchylka tvaru sníží ve všech případech. Na 99,5 µm se sníží u dotykového měření, u tomografu na 110 µm a u optického měření se sníží jen lehce na 117 µm.

V případě využití generování dráhy 25 body je dotykovým měřením naměřena odchylka tvaru 90,6 µm. Lehce vyšší odchylka je u optického měření, kde je rozdíl 5 µm a v případě tomografu je vyšší o 36 µm. Při využití 60 bodu udává dotykové měření odchylku 103,7 µm. Prakticky totožná hodnota je získána i optickým měřením. V případě tomografu je měřená odchylka o 38 µm vyšší. V případech využití generace dráhy pomocí bodů je třeba zohlednit i to, jak jsou body nanášeny na plochu ve smyslu, do jakých míst a jak jsou rozloženy po ploše, jelikož to má vliv na výsledky.

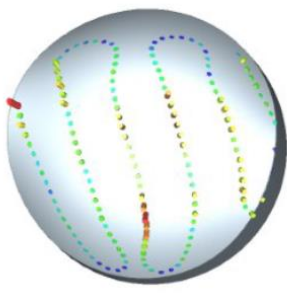
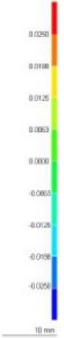

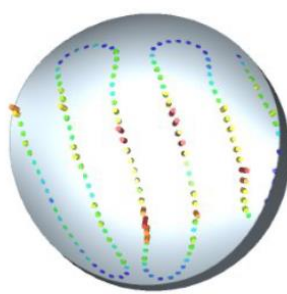
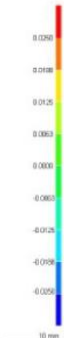

Vyšší hodnoty odchylek z počítačového tomografu jsou způsobeny viditelnými stopami po obráběcím nástroji na měřeném povrchu čočky. Tento jev byl v případě dotykového měření potlačen velikostí kuličky a použitým křídovým práškem v případě optického měření.

Další významný faktor k porovnání je čas měření. Skenování na počítačovém tomografu trvalo 1 hodinu a 20 minut, měření na souřadnicovém stroji trvalo 40 minut a skenování optickým zařízením i s přípravou povrchu bylo na 30 minut, opomene-li se příprava, tak skenování trvalo zhruba 8 minut.



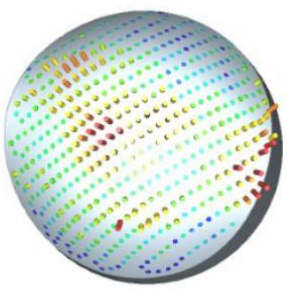


### 6.1.3 Porovnání: s a bez teplotní korekce

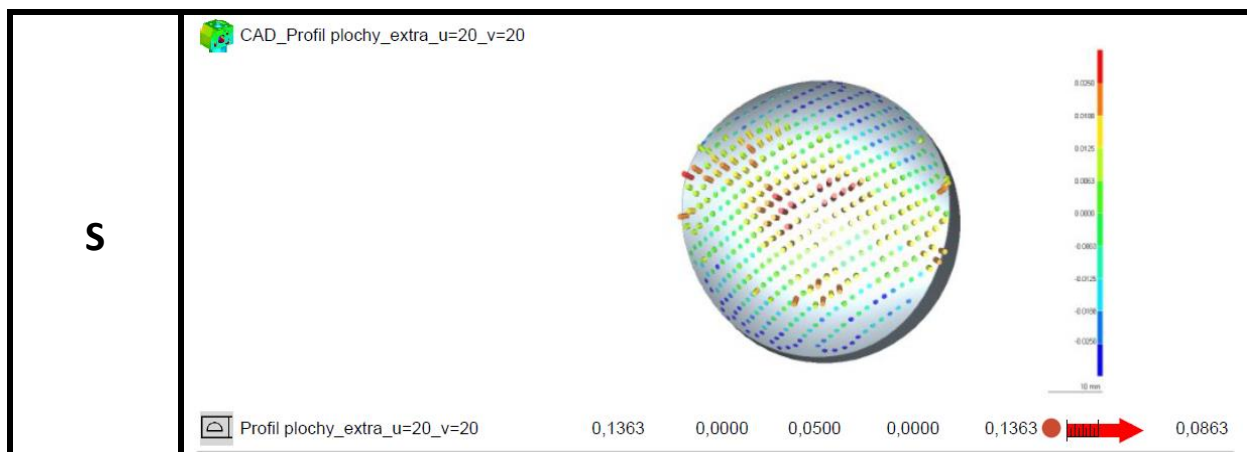
Tabulka 11 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
<b>BEZ</b>	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,1113	0,0000	0,0500	0,0000	0,1113 	0,0613
<b>S</b>	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,1654	0,0000	0,0500	0,0000	0,1654 	0,1154

V předchozí tabulce jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy rastrem velikosti 5x5. Dotykové měření bez aktivované teplotní kompenzace vykazuje odchylku 111,3  $\mu\text{m}$ . Kdežto měření s aktivovanou teplotní kompenzací udává odchylku 165,4  $\mu\text{m}$ , tedy o 54,1  $\mu\text{m}$  vyšší.

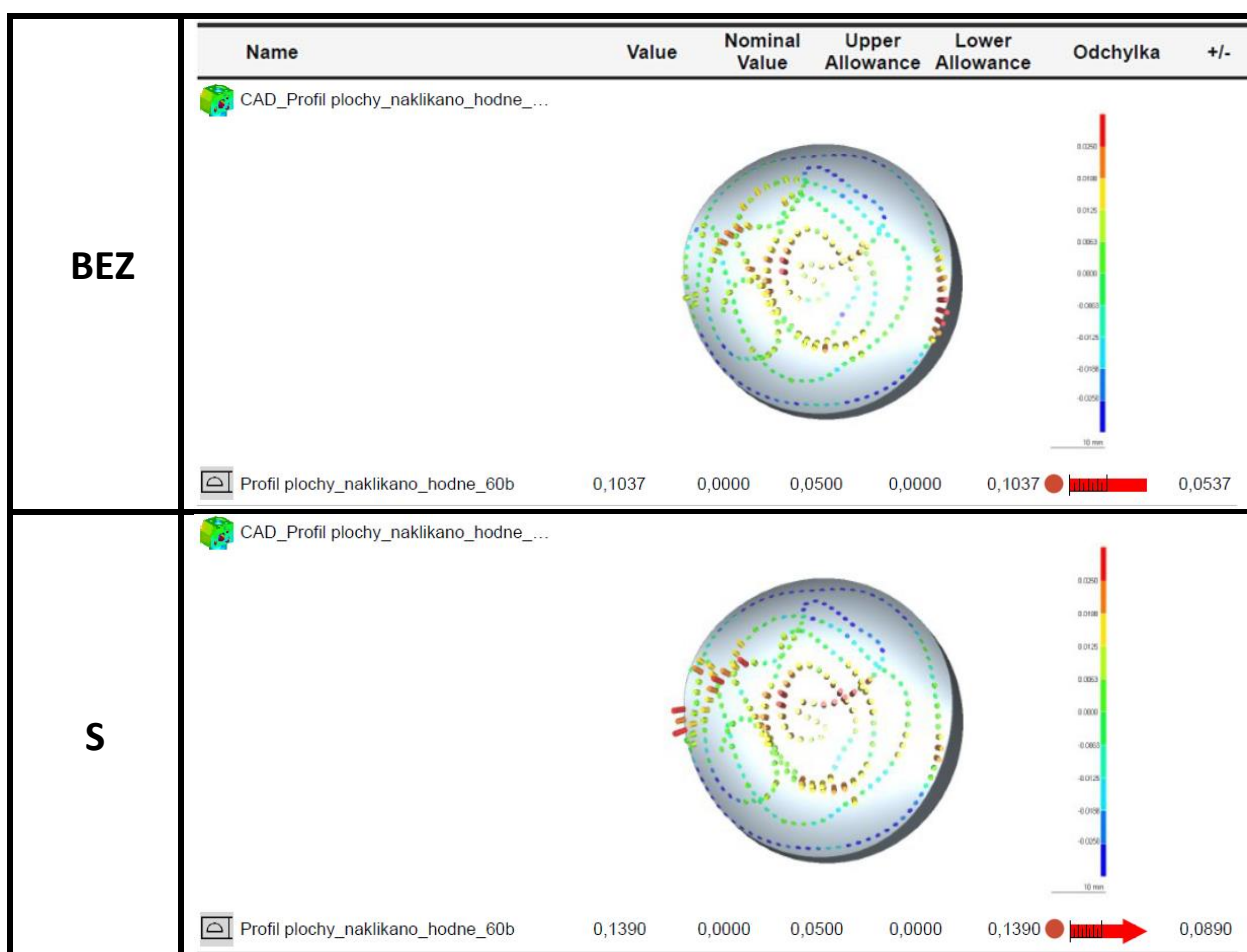
Tabulka 12 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
<b>BEZ</b>	CAD_Profil plochy_extra_u=20_v=20						
	Profil plochy_extra_u=20_v=20	0,0995	0,0000	0,0500	0,0000	0,0995 	0,0495



V Tabulce 12 jsou také srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy, ale tentokrát rastroem velikosti 20x20. Dotykové měření s aktivovanou teplotní kompenzací vykazuje odchylku 99,5  $\mu\text{m}$ . Měření s aktivovanou teplotní kompenzací udává opět vyšší hodnotu odchylky, kdy je měřené hodnota 136,3  $\mu\text{m}$ , tedy rozdíl o 37  $\mu\text{m}$ .

Tabulka 13 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body



Tabulka 13 uvádí porovnání obecné tvarové plochy generované 60 body. Výsledky z dotykového měření bez aktivované teplotní kompenzace uvádí odchylku 103,7  $\mu\text{m}$ . Hodnota odchylky u měření s aktivovanou teplotní kompenzací činí 139  $\mu\text{m}$ , což je o 35  $\mu\text{m}$  vyšší.



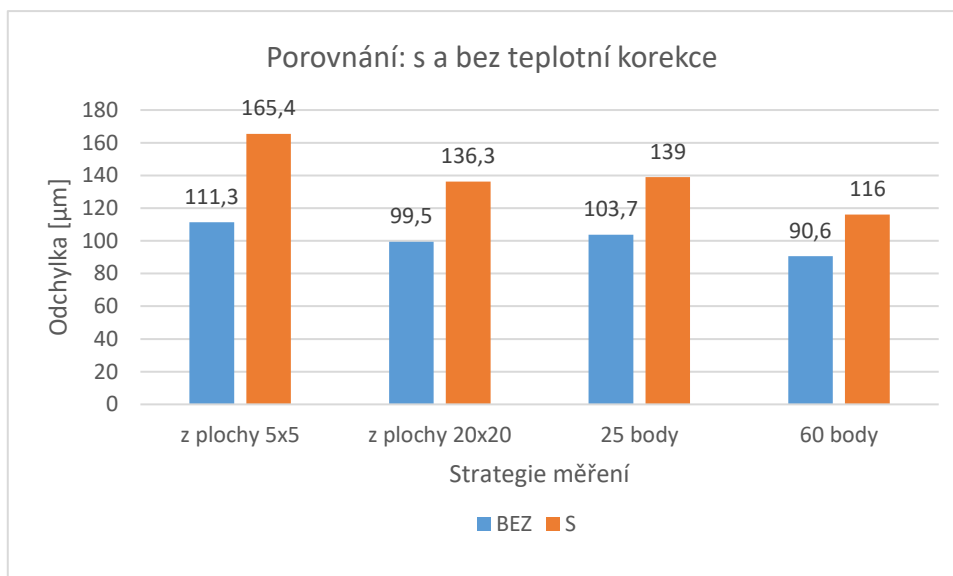
Tabulka 14 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
<b>BEZ</b>	CAD_Profil plochy_naklikano_malo_25b						
	Profil plochy_naklikano_malo_25b	0,0906	0,0000	0,0500	0,0000	0,0906	0,0406
<b>S</b>	CAD_Profil plochy_naklikano_malo_25b						
	Profil plochy_naklikano_malo_25b	0,1160	0,0000	0,0500	0,0000	0,1160	0,0660

V Tabulce 14 jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované 25 body. Dotykové měření vykazuje odchylku 90,6  $\mu\text{m}$ . Odchylka získaná z měření s aktivovanou teplotní kompenzací je 116  $\mu\text{m}$ , je tedy vyšší o 25  $\mu\text{m}$ .

#### 6.1.4 Zhodnocení porovnání: s a bez teplotní korekce

Opět je z výsledných tabulek porovnání patrná nepřesnost při výrobě měřené čočky. Při aktivované teplotní kompenzaci se evidentně více projevila deformace dílu, která byla způsobena obráběcím procesem. Proto dosahují výsledky měření bez aktivované teplotní kompenzace nižších hodnot odchylek než ty s aktivovanou.



Graf 2 Porovnání: s a bez teplotní korekce

Z předchozích tabulek a z Grafu 2 je patrné, že při použití rastru o menším počtu bodů je odchylka bez aktivované teplotní kompenzace 111,3 µm a s aktivovanou je vyšší o 54,1 µm. V případě použití rastru o více bodech se odchylka tvaru sníží na 99,5 µm u měření bez aktivované teplotní kompenzace. U měření s aktivovanou teplotní kompenzací se odchylka také snížila, ale vůči měření s aktivovanou teplotní kompenzací je odchylka vyšší o 37 µm.

V případě využití generování dráhy 60 body je měřením bez aktivované teplotní kompenzace naměřena odchylka 103,7 µm a u měření s aktivovanou teplotní kompenzací je odchylka 138 µm, takže je vyšší o 34,3 µm. Při využití 25 bodů udává měření bez aktivované teplotní kompenzace odchylku 90,6 µm. Hodnota získána měřením s aktivovanou teplotní kompenzací je v tomto případě 116 µm, tudíž je vyšší o 25 µm.

Z výsledků tohoto porovnání je pozorován výrazný rozdíl toho, zda je aktivována teplotní kompenzace či není. Za zmínku stojí časový rozdíl měření, kdy je měření s aktivovanou teplotní kompenzací o 5 minut delší oproti měření bez aktivované teplotní kompenzace.

#### 6.1.5 Porovnání CT x STL

V následující tabulce jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy rastrem velikosti 5x5. Mrak bodů vykazuje odchylku 119 µm. Podobné hodnoty dosahuje STL model s nejnižšími detaily, kdy je odchylka 114 µm, tedy o 5 µm nižší než u výsledků z mraku bodů. Odchylka STL modelu s nejvyššími detaily je 93 µm, což je vůči mraku bodů nižší o 26 µm. Výsledek odchylky vyhlazeného STL modelu je 136 µm.



Tabulka 15 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchyka	+/-
<b>CT</b>	CAD_Profil plochy_u=5_v=5						
	Profil plochy_u=5_v=5	0,119	0,000	0,050	0,000	0,119	0,069
<b>STL fast</b>	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,114	0,000	0,050	0,000	0,114	0,064
<b>STL precision</b>	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,093	0,000	0,050	0,000	0,093	0,043
<b>STL extract precision</b>	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,136	0,000	0,050	0,000	0,136	0,086





Tabulka 16 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20

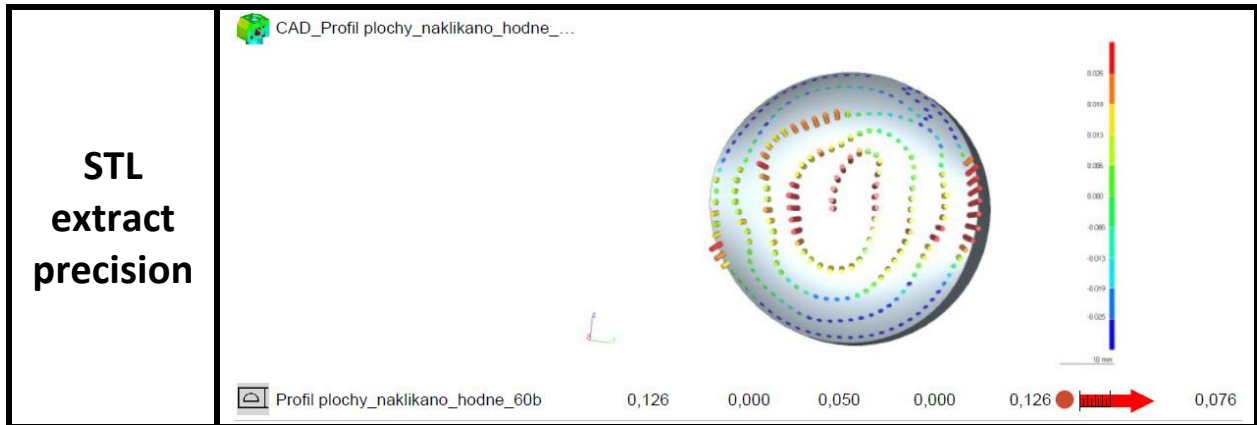
	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchyłka	+/-
<b>CT</b>	CAD_Profil plochy_u=20_v=20						
	Profil plochy_u=20_v=20	0,110	0,000	0,050	0,000	0,110	0,060
<b>STL fast</b>	CAD_Profil plochy_extra_u=20_v=20						
	Profil plochy_extra_u=20_v=20	0,140	0,000	0,050	0,000	0,140	0,090
<b>STL precision</b>	CAD_Profil plochy_extra_u=20_v=20						
	Profil plochy_extra_u=20_v=20	0,167	0,000	0,050	0,000	0,167	0,117
<b>STL extract precision</b>	CAD_Profil plochy_extra_u=20_v=20						
	Profil plochy_extra_u=20_v=20	0,190	0,000	0,050	0,000	0,190	0,140



V Tabulce 16 jsou také srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy, ale tentokrát rastrem velikosti 20x20. Mrak bodů vykazuje odchylku 119  $\mu\text{m}$ . Všechny ostatní modely mají vyšší odchylky. STL model s nejnižšími detaily dosahuje odchylky 140  $\mu\text{m}$ , tedy o 21  $\mu\text{m}$  vyšší než u mraku bodů. Odchylka STL modelu s nejvyššími detaily je 167  $\mu\text{m}$ , což je vůči mraku bodů vyšší o 48  $\mu\text{m}$ . Výsledek odchylky vyhlazeného STL modelu je 190  $\mu\text{m}$ , tudíž odchylka je o 71  $\mu\text{m}$  vyšší oproti mraku bodů.

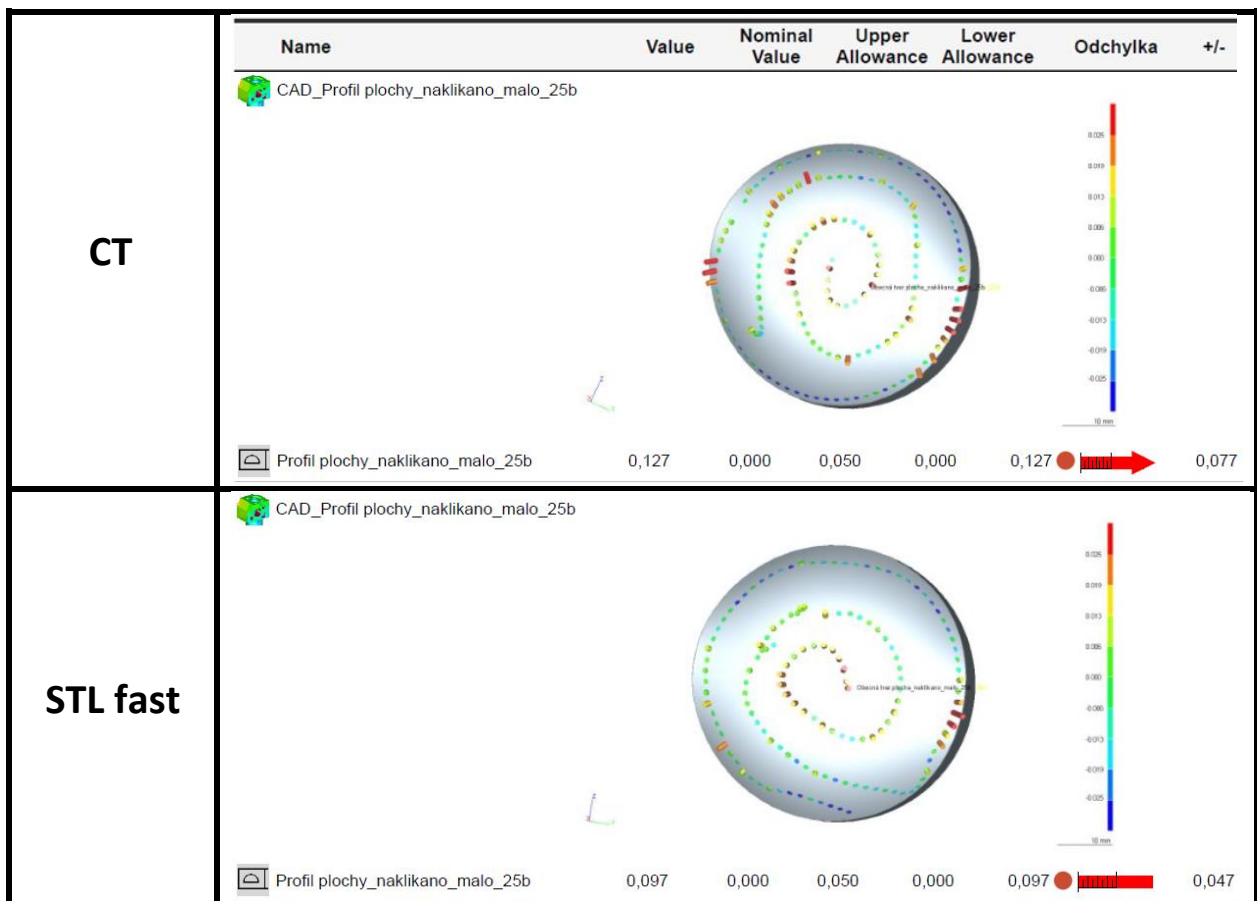
Tabulka 17 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body

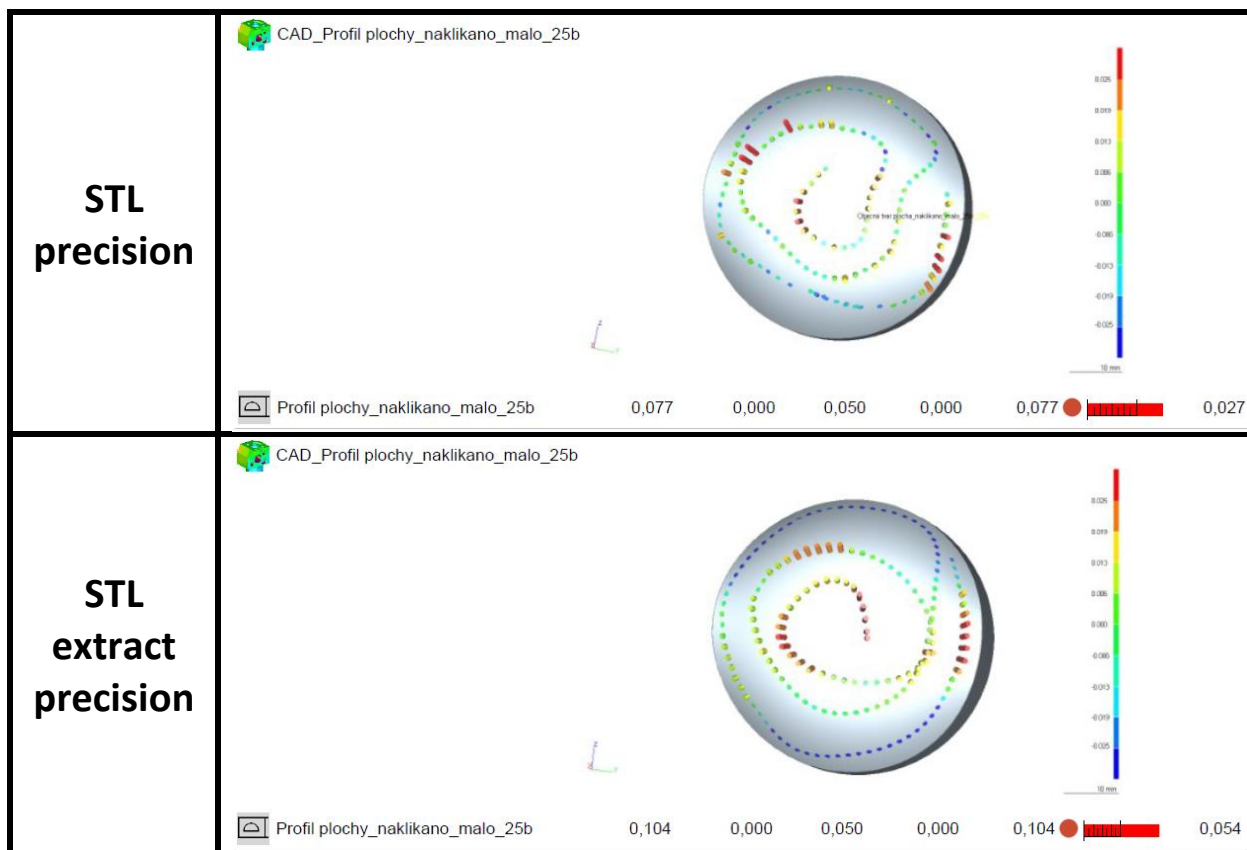
	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
<b>CT</b>	CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...						
	Profil plochy_naklikano_hodne_60b	0,142	0,000	0,050	0,000	0,142	0,092
<b>STL fast</b>	CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...						
	Profil plochy_naklikano_hodne_60b	0,126	0,000	0,050	0,000	0,126	0,076
<b>STL precision</b>	CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...						
	Profil plochy_naklikano_hodne_60b	0,114	0,000	0,050	0,000	0,114	0,064



Tabulka 17 uvádí porovnání obecné tvarové plochy generované 60 body. Výsledky z mraku bodů uvádějí odchylku 142  $\mu\text{m}$ . STL model s nejnižšími detaily dosahuje odchylky 126  $\mu\text{m}$ , stejně jako vyhlazený STL model, a tudíž jsou odchylky obou o 16  $\mu\text{m}$  nižší než u mraku bodů. Odchylka STL modelu s nejvyššími detaily je nejnižší a činí 114  $\mu\text{m}$ , což je vůči mraku bodů nižší o 28  $\mu\text{m}$ .

Tabulka 18 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body

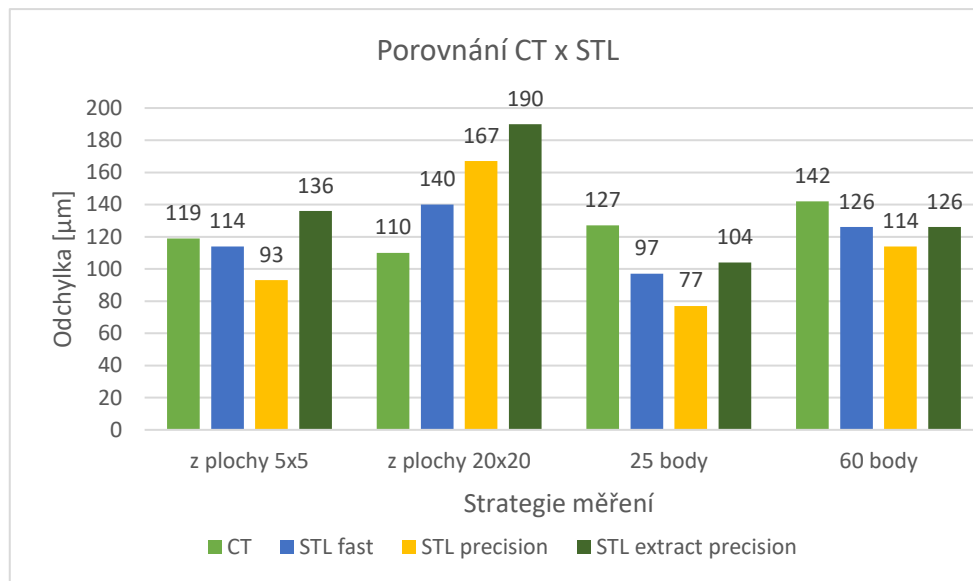




V Tabulce 18 jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované 25 body. Výsledky z mraku bodů uvádějí odchylku 127  $\mu\text{m}$ . Všechny ostatní modely mají nižší odchylky. STL model s nejnižšími detaily dosahuje odchylky 97  $\mu\text{m}$ , tedy o 30  $\mu\text{m}$  nižší než u mraku bodů. Odchylka STL modelu s nejvyššími detaily je 77  $\mu\text{m}$ , což je vůči mraku bodů nižší o 50  $\mu\text{m}$ . Výsledek odchylky vyhlazeného STL modelu je 104  $\mu\text{m}$ , tudíž odchylka je o 23  $\mu\text{m}$  nižší oproti mraku bodů.

#### 6.1.6 Zhodnocení porovnání CT x STL

Na výsledcích z modelů tvořených trojúhelníkovou sítí s nejvyššími a nejnižšími detaily je vidět potlačení některých výčnělků, ale zároveň je vidět i vznik nových v důsledku natočení jednotlivých trojúhelníků. Na vyhlazeném modelu je vidět postupný přechod mezi odchylkami, bohužel ale v důsledku vyhlazení došlo k potlačení hran a tím vzniklé velké odchylky po obvodu měřené plochy.



Graf 3 Porovnání CT x STL

Jak je vidět v Grafu 3 a ve výsledných tabulkách, tak při použití rastru o menším počtu bodů je na výsledku z mraku bodů naměřena odchylka 119  $\mu\text{m}$ . V případě STL modelu s nejnižšími detaily je měřená hodnota nižší o 5  $\mu\text{m}$ , u STL modelu s nejvyššími detaily je odchylka nižší o 26  $\mu\text{m}$  a u vyhlazeného STL modelu je odchylka vyšší o 17  $\mu\text{m}$ . V případě použití rastru o více bodech se odchylka tvaru lehce sníží u výsledku z mraku bodů, ve zbylých případech došlo ke zvýšení. U mraku bodů se sníží na 110  $\mu\text{m}$ , což činí odchylku u STL modelu s nejnižšími detaily vyšší o 30  $\mu\text{m}$ , u STL modelu s nejvyššími detaily vyšší o 57  $\mu\text{m}$  a u vyhlazeného STL modelu razantně vyšší o 80  $\mu\text{m}$ .

V případě využití generování dráhy 25 body je na mraku bodů naměřena odchylka tvaru 127  $\mu\text{m}$ . Nižší odchylka je u STL modelu s nejnižšími detaily, kde je rozdíl 30  $\mu\text{m}$ . V případě STL modelu s nejvyššími detaily je odchylka nižší o 50  $\mu\text{m}$  a u vyhlazeného STL modelu je nižší o 23  $\mu\text{m}$ . Při využití 60 bodů udává mrak bodů odchylku 142  $\mu\text{m}$ . Stejná hodnota je získána z STL modelu s nejnižšími detaily a z vyhlazeného modelu. Pro oba modely je odchylka nižší o 16  $\mu\text{m}$ . V případě STL modelu s nejvyššími detaily je měřená odchylka o 28  $\mu\text{m}$  nižší.

Z provedených porovnání se jeví STL model s nejnižšími detaily jako ten nejhodnější, nejen proto že se jedná o významně redukováný soubor dat, ale i proto že dosahuje nejmenší odchylky z porovnání s ostatními vytvořenými modely. Naměřená odchylka od mraku bodů je  $\pm 30 \mu\text{m}$ . Ovšem pokud je dán požadavek na přesnost a povolí to technické možnosti, tak je lepší provést měření na mraku bodů.



## 6.2 Porovnání výsledků čočky s podstavou

### 6.2.1 Porovnání: CT x COMET x OPTON u čočky s podstavou

Tabulka 19 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
CT	CAD_Profil plochy_u=5_v=5_						
	Profil plochy_u=5_v=5_	0,099	0,000	0,050	0,000	0,099	0,049
OPTON	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,0979	0,0000	0,0500	0,0000	0,0979	0,0479
COMET	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,100	0,000	0,050	0,000	0,100	0,050

V předchozí tabulce jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy rastrem velikosti 5x5. Hodnoty jsou si velmi blízké. Dotykové měření vykazuje odchylku 97,9  $\mu\text{m}$ . U výsledků z optického měření je odchylka 100  $\mu\text{m}$ , což činí rozdíl 2  $\mu\text{m}$  vůči dotykovému měření. Téměř totožných hodnot dosahuje výsledek z tomografu, kdy je odchylka 99  $\mu\text{m}$ , tedy o 1  $\mu\text{m}$  nižší než u optického měření a o 1  $\mu\text{m}$  vyšší než u dotykového měření.





Tabulka 20 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
CT	CAD_Profil plochy_u=20_v=20						
	Profil plochy_u=20_v=20	0,139	0,000	0,050	0,000	0,139	0,089
OPTON	CAD_Profil plochy_extra_u=20_v=20						
	Profil plochy_extra_u=20_v=20	0,1363	0,0000	0,0500	0,0000	0,1363	0,0863
COMET	CAD_Profil plochy_extra_u=20_v=20						
	Profil plochy_extra_u=20_v=20	0,103	0,000	0,050	0,000	0,103	0,053

V Tabulce 20 jsou také srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy, ale tentokrát rastrem velikosti 20x20. Dotykové měření vykazuje odchylku 136,3  $\mu\text{m}$ . Optické měření uvádí odchylku 103  $\mu\text{m}$ , což je o 33  $\mu\text{m}$  nižší než u dotykového měření. Bližší hodnoty odchylky k dotykovému měření jsou z tomografu, kdy je naměřená odchylka 139  $\mu\text{m}$ , tedy zhruba o 3  $\mu\text{m}$  vyšší.



Tabulka 21 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
CT	CAD_Profil plochy_naklikano_malo_25b						
	Profil plochy_naklikano_malo_25b	0,154	0,000	0,050	0,000	0,154	0,104
OPTON	CAD_Profil plochy_naklikano_malo_25b						
	Profil plochy_naklikano_malo_25b	0,1233	0,0000	0,0500	0,0000	0,1233	0,0733
COMET	CAD_Profil plochy_naklikano_malo_25b						
	Profil plochy_naklikano_malo_25b	0,088	0,000	0,050	0,000	0,088	0,038

V Tabulce 21 jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované 25 body. Dotykové měření vykazuje odchylku 123,3  $\mu\text{m}$ . U optického měření dosahuje odchylka 88  $\mu\text{m}$ , tedy o 35  $\mu\text{m}$  nižší než u dotykového měření. U výsledků z tomografu je odchylka 154  $\mu\text{m}$ , což je oproti dotykovému měření vyšší o 31  $\mu\text{m}$ .



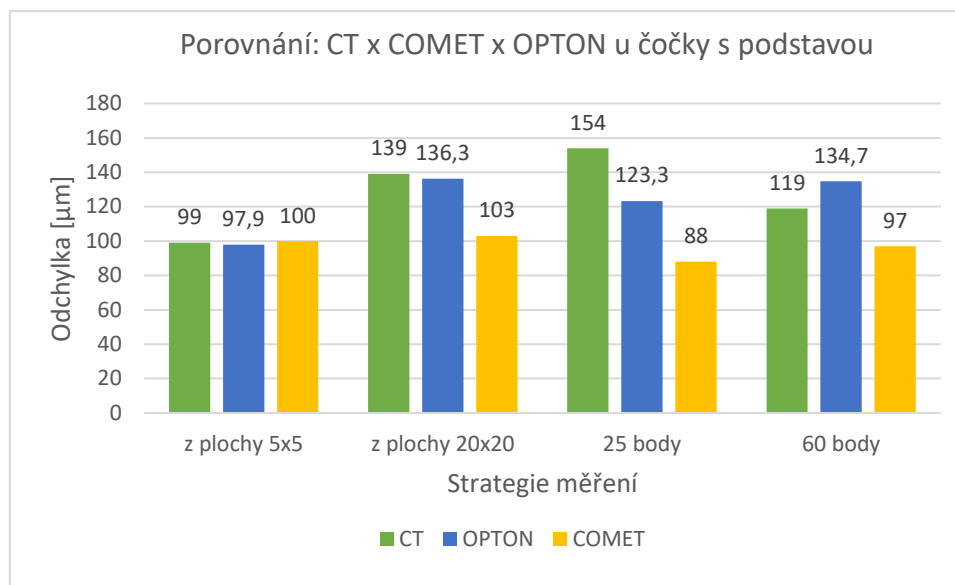
Tabulka 22 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
CT	CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...						
	Profil plochy_naklikano_hodne_60b	0,119	0,000	0,050	0,000	0,119	0,069
OPTON	CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...						
	Profil plochy_naklikano_hodne_60b	0,1347	0,0000	0,0500	0,0000	0,1347	0,0847
COMET	CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...						
	Profil plochy_naklikano_hodne_60b	0,097	0,000	0,050	0,000	0,097	0,047

Tabulka 22 uvádí porovnání obecné tvarové plochy generované 60 body. Výsledky z dotykového měření uvádějí odchylku 134,7  $\mu\text{m}$ . Velikost odchylky u výsledků z optického měření je 97  $\mu\text{m}$ , tudíž je nižší o 37  $\mu\text{m}$  oproti dotykovému měření. Hodnota odchylky z tomografu činí 119  $\mu\text{m}$ , což je o 20  $\mu\text{m}$  nižší než u dotykového měření.

### 6.2.2 Zhodnocení porovnání: CT x COMET x OPTON u čočky s podstavou

Z porovnání počítačové tomografie s dotykovým a optickým měřením je patrné, že měřená plocha na artefaktu čočky s podstavou nebyla vyrobena příliš přesně, jelikož ve všech případech výsledné hodnoty výrazně převyšují jmenovitou hodnotu.



Graf 4 Porovnání: CT x COMET x OPTON u čočky s podstavou

Z předchozích tabulek a z Grafu 4 je patrné, že při použití rastru o menším počtu bodů je odchylka u všech případů velmi blízká. Z optického měření je vyšší o 2 µm a v případě tomografie je vyšší o 1 µm, než je tomu tak u dotykovému měření, kde je odchylka 97,9 µm. V případě použití rastru o více bodech se odchylka tvaru zvýší ve všech případech. Na 136,3 µm se zvýší u dotykového měření, u tomografu na 139 µm a u optického měření se lehce zvýší na 103 µm. U tomografu to činí odchylku vyšší o 3 µm a u optického měření je nižší o 33 µm.

V případě využití generování dráhy 25 body je dotykovým měřením naměřena odchylka tvaru 123,3 µm. Nižší odchylka je u optického měření, kde je rozdíl 35 µm a v případě tomografu je vyšší o 31 µm. Při využití 60 bodu udává dotykové měření odchylku 134,7 µm. Hodnota získána optickým měřením je nižší o 37 µm. V případě tomografu je měřená odchylka o 15 µm nižší. V případech využití generace dráhy pomocí bodů je třeba zohlednit i to, jak jsou body naneseny na plochu ve smyslu, do jakých míst a jak jsou rozloženy po ploše, jelikož to má vliv na výsledky.

Nepravidelné výčnělky na výsledcích z tomografu poukazují na hrubost mraku bodů, ovšem díky leštěnému povrchu součásti nejsou tak markantní. Nižší hodnoty odchylek u výsledků z optického skeneru jsou patrně způsobeny použitým křídovým práškem, který měřenou plochu lehce vyhladil.

Skenování na počítačovém tomografu trvalo 1 hodinu a 40 minut, měření na souřadnicovém stroji bylo 40 minut a skenování optickým zařízením i s přípravou povrchu bylo na 30 minut, opomene-li se příprava, tak skenování trvalo zhruba 8 minut.



### 6.2.3 Porovnání: s a bez teplotní korekce u čočky s podstavou

Tabulka 23 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5

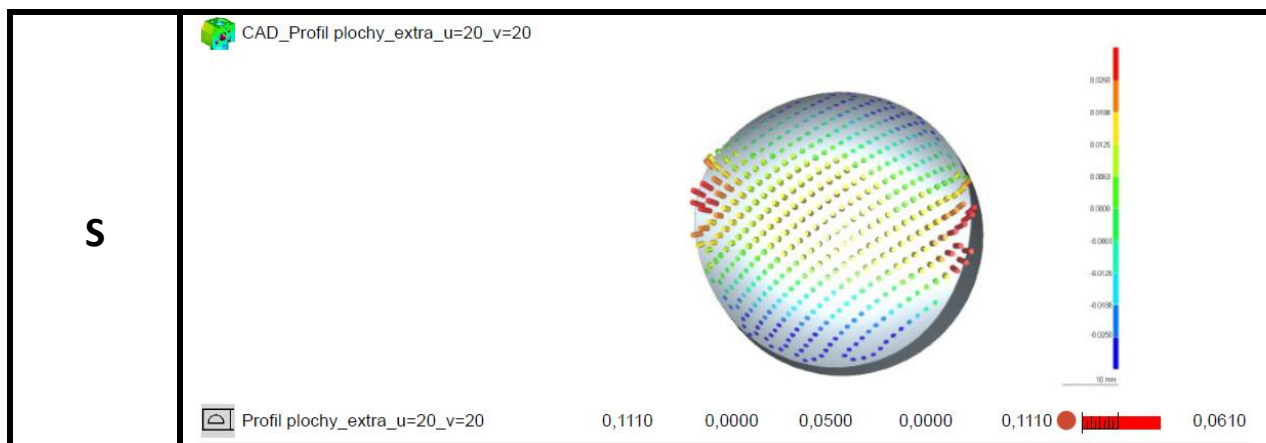
	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
<b>BEZ</b>	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,0979	0,0000	0,0500	0,0000	0,0979	0,0479
<b>S</b>	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,0762	0,0000	0,0500	0,0000	0,0762	0,0262

V předchozí tabulce jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy rastrem velikosti 5x5. Dotykové měření bez aktivované teplotní kompenzace vykazuje odchylku 97,9  $\mu\text{m}$ . Kdežto měření s aktivovanou teplotní kompenzací udává odchylku 76,2  $\mu\text{m}$ , tedy o 21,7  $\mu\text{m}$  nižší.

Tabulka 24 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
<b>BEZ</b>	CAD_Profil plochy_extra_u=20_v=20						
	Profil plochy_extra_u=20_v=20	0,1363	0,0000	0,0500	0,0000	0,1363	0,0863





V Tabulce 24 jsou také srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy, ale tentokrát rastroem velikosti 20x20. Dotykové měření bez aktivované teplotní kompenzaci vykazuje odchylku 136,3  $\mu\text{m}$ . Měření s aktivovanou teplotní kompenzací udává opět nižší hodnotu odchylky, kdy je měřené hodnota 111  $\mu\text{m}$ , tedy rozdíl o 25,3  $\mu\text{m}$ .

Tabulka 25 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
<b>BEZ</b>							
	<p>Profil plochy_naklikano_malo_25b      0,1233    0,0000    0,0500    0,0000    0,1233    0,0733</p>						
<b>S</b>							
	<p>CAD_Profil plochy_naklikano_malo_25b</p> <p>Profil plochy_naklikano_malo_25b      0,1021    0,0000    0,0500    0,0000    0,1021    0,0521</p>						

V Tabulce 25 jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované 25 body. Dotykové měření vykazuje odchylku 90,6  $\mu\text{m}$ . Odchylka získaná z měření s aktivovanou teplotní kompenzací je 116  $\mu\text{m}$ , je tedy vyšší o 25  $\mu\text{m}$ .





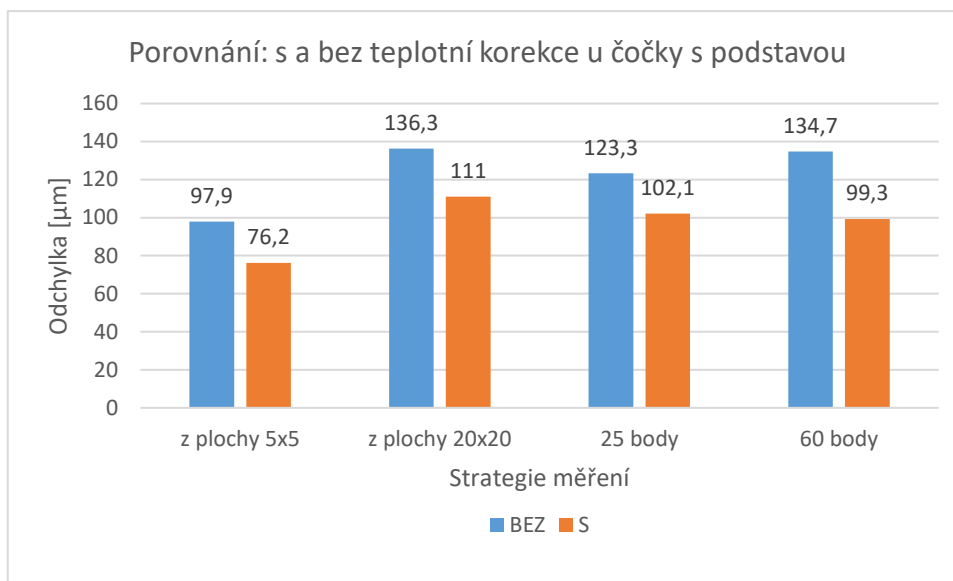
Tabulka 26 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body

	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
<b>BEZ</b>	CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...						
	Profil plochy_naklikano_hodne_60b	0,1347	0,0000	0,0500	0,0000		0,0847
<b>S</b>	CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...						
	Profil plochy_naklikano_hodne_60b	0,0993	0,0000	0,0500	0,0000		0,0493

Tabulka 26 uvádí porovnání obecné tvarové plochy generované 60 body. Výsledky z dotykového měření bez aktivované teplotní kompenzace uvádí odchylku 134,7  $\mu\text{m}$ . Hodnota odchylky u měření s aktivovanou teplotní kompenzací činí 99,3  $\mu\text{m}$ , což je o 35,4  $\mu\text{m}$  nižší.

#### 6.2.4 Zhodnocení porovnání: s a bez teplotní korekce u čočky s podstavou

Opět je z výsledných tabulek porovnání patrná nepřesnost při výrobě měřené čočky. Při aktivované teplotní kompenzaci se projevilo větší zocelení měřené plochy, kterou jinak ovlivňovala teplota během měření. Proto dosahují výsledky měření s aktivovanou teplotní kompenzací nižších hodnot odchylek než ty s neaktivovanou.



Graf 5 Porovnání: s a bez teplotní korekce u čocky s podstavou

Jak je vidět v Grafu 5 a ve výsledných tabulkách, tak při použití rastru o menším počtu bodů je odchylka bez aktivované teplotní kompenzace 97,9 µm a s aktivovanou je nižší o 21,7 µm. V případě použití rastru o více bodech se odchylka tvaru zvýšila na 136,3 µm u měření bez aktivované teplotní kompenzace. U měření s aktivovanou teplotní kompenzací se odchylka také zvýšila, ale vůči měření s aktivovanou teplotní kompenzací je odchylka nižší o 26,3 µm.

V případě využití generování dráhy 25 body je měřením bez aktivované teplotní kompenzace naměřena odchylka 123,3 µm a u měření s aktivovanou teplotní kompenzací je odchylka 102,1 µm, takže je nižší o 21,2 µm. Při využití 60 bodů ke generování dráhy udává měření bez aktivované teplotní kompenzace odchylku 134,7 µm. Hodnota získána měřením s aktivovanou teplotní kompenzací je v tomto případě 99,3 µm, tudíž je nižší o 35,4 µm.

Z výsledků tohoto porovnání je pozorován výrazný rozdíl toho, zda je aktivována teplotní kompenzace či není. Evidentně zde hrála roli struktura měřené plochy, která byla v tomto případě leštěna a neobsahovala tak stopy po nástroji, které by ovlivňovaly výpočty teplotní kompenzace. Za zmínku stojí časový rozdíl měření, kdy je měření s aktivovanou teplotní kompenzací o 5 minut delší oproti měření bez aktivované teplotní kompenzace.



## 6.2.5 Porovnání: CT x STL u čočky s podstavou

Tabulka 27 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5

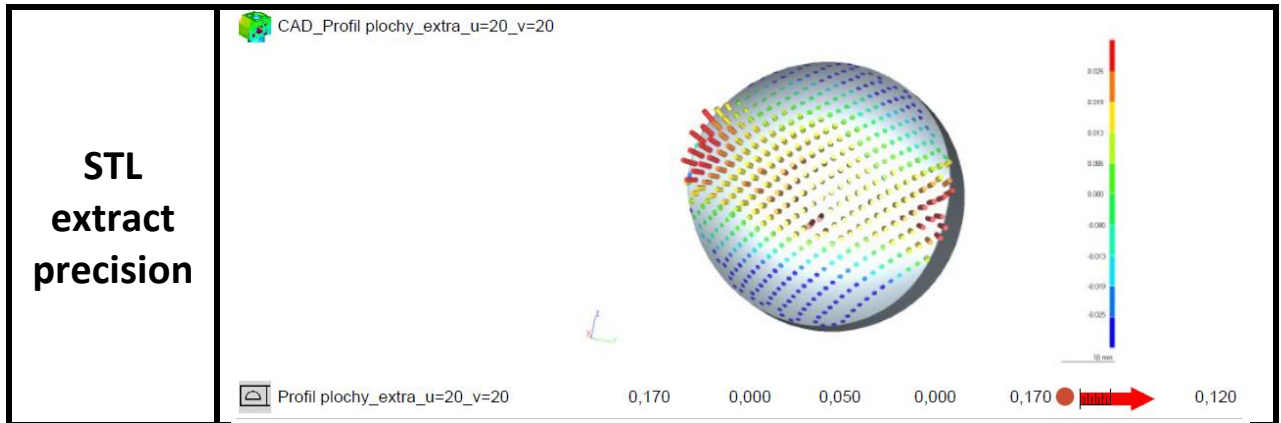
	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchyška	+/-
CT	CAD_Profil plochy_u=5_v=5						
	Profil plochy_u=5_v=5	0,128	0,000	0,050	0,000	0,128	0,078
STL fast	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,091	0,000	0,050	0,000	0,091	0,041
STL precision	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,104	0,000	0,050	0,000	0,104	0,054
STL extract precision	CAD_Profil plochy_malo_u=5_v=5						
	Profil plochy_malo_u=5_v=5	0,168	0,000	0,050	0,000	0,168	0,118



V předchozí tabulce jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy rastrem velikosti 5x5. Mrak bodů vykazuje odchylku 128  $\mu\text{m}$ . STL model s nejnižšími detaily udává hodnotu odchylky 91  $\mu\text{m}$ , tedy o 37  $\mu\text{m}$  nižší než výsledek z mraku bodů. Odchylka STL modelu s nejvyššími detaily je 104  $\mu\text{m}$ , což je vůči mraku bodů nižší o 24  $\mu\text{m}$ . Výsledek odchylky vyhlazeného STL modelu je 168  $\mu\text{m}$ , tedy o 40  $\mu\text{m}$  vyšší odchylka oproti mraku bodů.

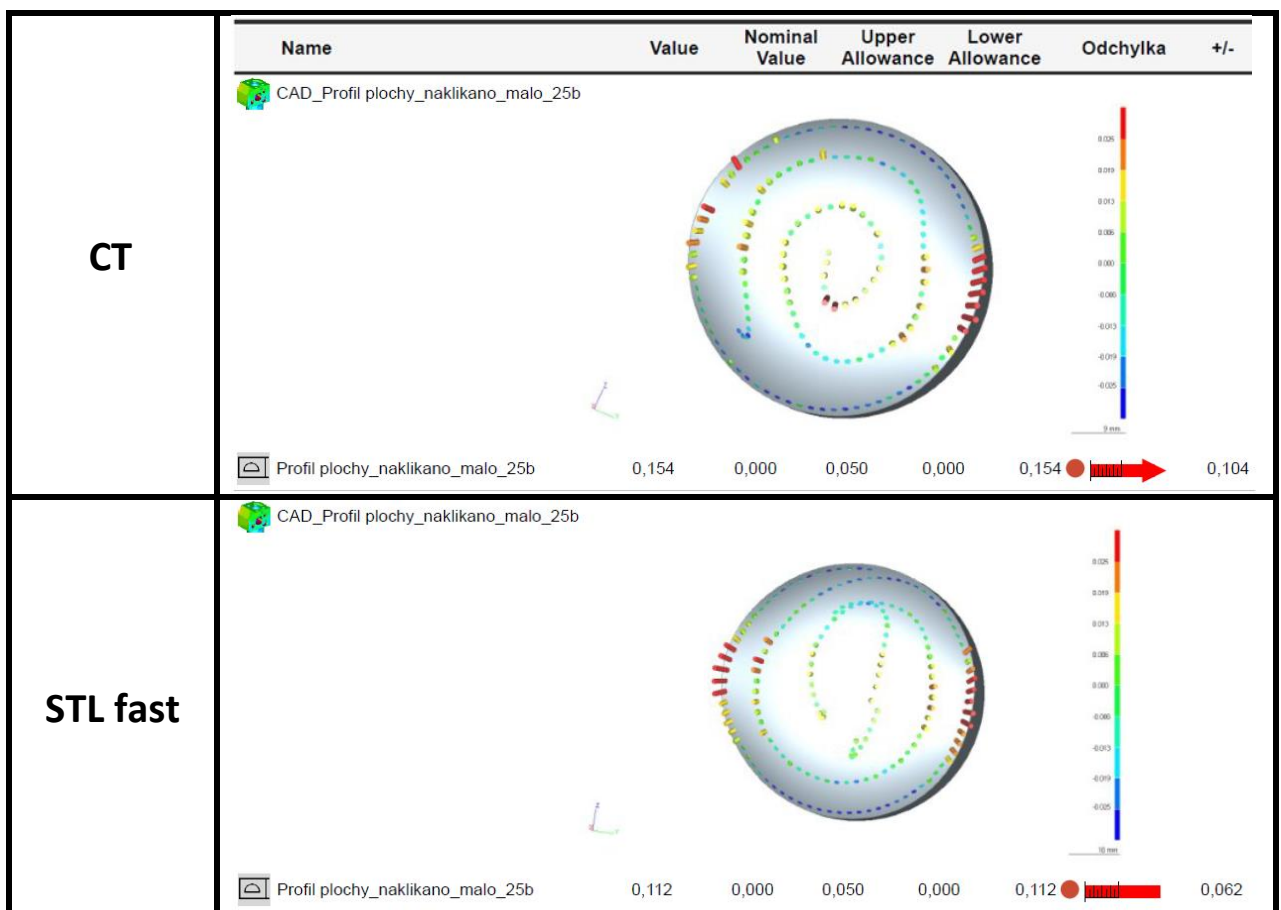
Tabulka 28 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20

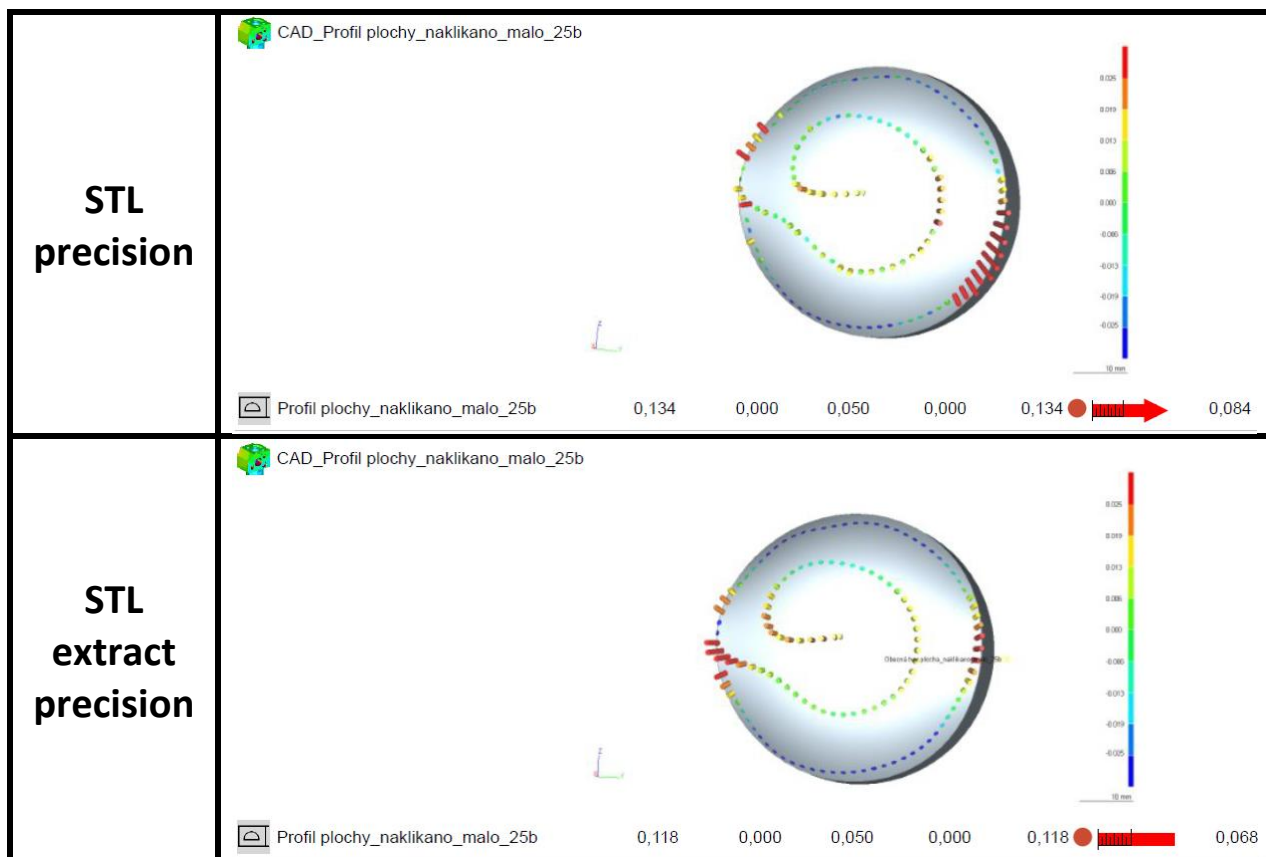
	Name	Value	Nominal Value	Upper Allowance	Lower Allowance	Odchylka	+/-
<b>CT</b>	CAD_Profil plochy_u=20_v=20						
	Profil plochy_u=20_v=20	0,139	0,000	0,050	0,000	0,139	0,089
<b>STL fast</b>	CAD_Profil plochy_extra_u=20_v=20						
	Profil plochy_extra_u=20_v=20	0,134	0,000	0,050	0,000	0,134	0,084
<b>STL precision</b>	CAD_Profil plochy_extra_u=20_v=20						
	Profil plochy_extra_u=20_v=20	0,171	0,000	0,050	0,000	0,171	0,121



V Tabulce 28 jsou také srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované z plochy, ale tentokrát rastrem velikosti 20x20. Mrak bodů vykazuje odchylku 139  $\mu\text{m}$ . STL model s nejnižšími detaily dosahuje odchylky 134  $\mu\text{m}$ , tedy je o 5  $\mu\text{m}$  nižší než u mraku bodů. Odchylka STL modelu s nejvyššími detaily je 171  $\mu\text{m}$ , což je vůči mraku bodů vyšší o 32  $\mu\text{m}$ . Výsledek odchylky vyhlazeného STL modelu je 170  $\mu\text{m}$ , tudíž odchylka je o 31  $\mu\text{m}$  vyšší oproti mraku bodů.

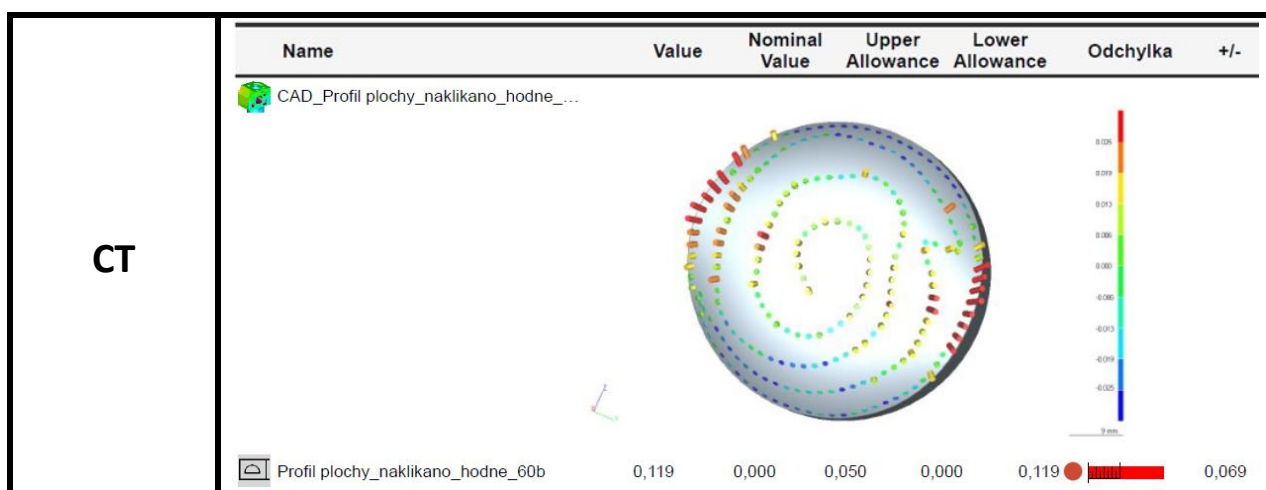
Tabulka 29 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body





V Tabulce 29 jsou srovnávány vyhodnocení obecné tvarové plochy generované 25 body. Výsledky z mraku bodů uvádějí odchylku 154  $\mu\text{m}$ . Všechny ostatní modely mají nižší odchylky. STL model s nejnižšími detaily dosahuje odchylky 112  $\mu\text{m}$ , tedy o 42  $\mu\text{m}$  nižší než u mraku bodů. Odchylka STL modelu s nejvyššími detaily je 134  $\mu\text{m}$ , což je vůči mraku bodů nižší o 20  $\mu\text{m}$ . Výsledek odchylky vyhlazeného STL modelu je 118  $\mu\text{m}$ , tudíž odchylka je o 36  $\mu\text{m}$  nižší oproti mraku bodů.

Tabulka 30 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body





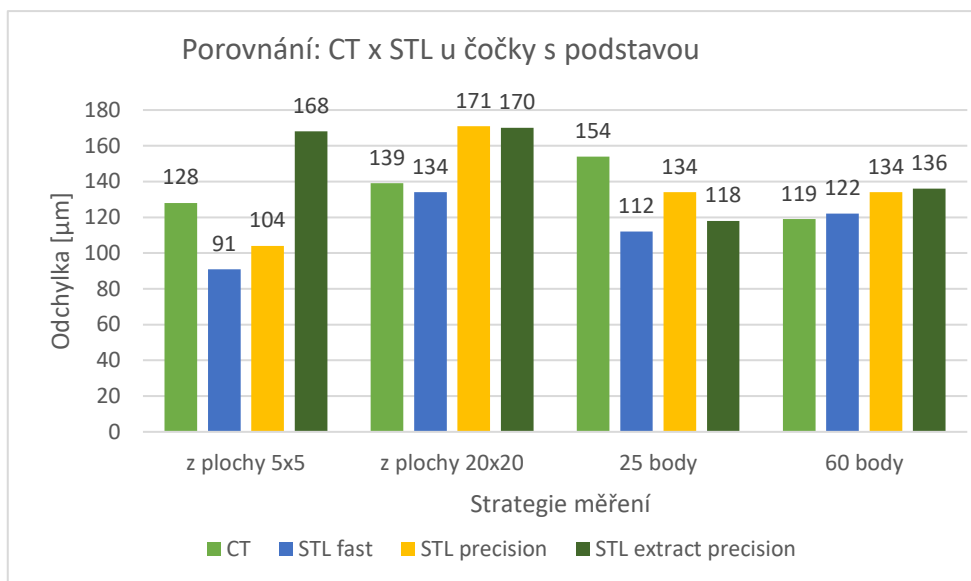


<p><b>STL fast</b></p>	<p>CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...</p> <p>Profil plochy_naklikano_hodne_60b 0,122 0,000 0,050 0,000 0,122 0,072</p>
<p><b>STL precision</b></p>	<p>CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...</p> <p>Profil plochy_naklikano_hodne_60b 0,134 0,000 0,050 0,000 0,134 0,084</p>
<p><b>STL extract precision</b></p>	<p>CAD_Profil plochy_naklikano_hodne_...</p> <p>Profil plochy_naklikano_hodne_60b 0,136 0,000 0,050 0,000 0,136 0,086</p>

Tabulka 30 uvádí porovnání obecné tvarové plochy generované 60 body. Výsledky z mraku bodů uvádějí odchylku 119  $\mu\text{m}$ . Velmi podobné hodnoty dosahuje STL model s nejnižšími detaily, který má odchylku 122  $\mu\text{m}$ , což je vůči mraku bodů vyšší o 3  $\mu\text{m}$ . Odchylka STL modelu s nejvyššími detaily je nejnižší a činí 134  $\mu\text{m}$ , což je vůči mraku bodů nižší o 15  $\mu\text{m}$ . Podobnou hodnotu udává i vyhlazený STL model, jehož odchylka je 136  $\mu\text{m}$ , což činí rozdíl 17  $\mu\text{m}$  oproti mraku bodů.

#### 6.2.6 Zhodnocení porovnání: CT x STL u čočky s podstavou

Na výsledcích z STL modelů tvořených trojúhelníkovou sítí s nejvyššími a nejnižšími detaily je vidět potlačení některých výčnělků, ale zároveň je vidět i vznik nových v důsledku natočení jednotlivých trojúhelníků. Na vyhlazeném modelu je opět vidět postupný přechod mezi odchylkami, bohužel ale v důsledku vyhlazení došlo k potlačení hran a proložení výčnělků a tím vznikly velké odchylky měřené plochy.



Graf 6 Porovnání: CT x STL u čočky s podstavou

Z předchozích tabulek a z Grafu 6 je patrné, že při použití rastru o menším počtu bodů je na výsledku z mraku bodů naměřena odchylka 128  $\mu\text{m}$ . V případě STL modelu s nejnižšími detaily je měřená hodnota nižší o 37  $\mu\text{m}$ , u STL modelu s nejvyššími detaily je odchylka nižší o 24  $\mu\text{m}$  a u vyhlazeného STL modelu je odchylka vyšší o 40  $\mu\text{m}$ . V případě použití rastru o více bodech se odchylka tvaru ve všech případech zvýšila. U mraku bodů se zvýšila na 139  $\mu\text{m}$ , což činí odchylku u STL modelu s nejnižšími detaily nižší o 5  $\mu\text{m}$ , u STL modelu s nejvyššími detaily vyšší o 32  $\mu\text{m}$  a u vyhlazeného STL modelu vyšší o 31  $\mu\text{m}$ .

V případě využití generování dráhy 25 body je na mraku bodů naměřena odchylka tvaru 154  $\mu\text{m}$ . Nižší odchylka je u STL modelu s nejnižšími detaily, kde je oproti mraku bodů rozdíl 42  $\mu\text{m}$ . V případě STL modelu s nejvyššími detaily je odchylka nižší o 20  $\mu\text{m}$  a u vyhlazeného STL modelu je nižší o 36  $\mu\text{m}$ . Při využití 60 bodů udává mrak bodů odchylku 119  $\mu\text{m}$ . Hodnota získána z STL modelu s nejnižšími detaily je vyšší o 3  $\mu\text{m}$ . V případě STL modelu s nejvyššími detaily je měřená odchylka o 15  $\mu\text{m}$  vyšší a u vyhlazeného STL modelu je vyšší o 17  $\mu\text{m}$ .

Z provedených porovnání se jeví STL model s nejvyššími detaily jako ten nejvhodnější, jelikož dosahuje nejmenší odchylky z porovnání s ostatními vytvořenými modely a velikost dat je zhruba poloviční oproti velikosti mraku bodů. Naměřená odchylka od mraku bodů je  $\pm 32 \mu\text{m}$ . Ovšem pokud je dán požadavek na přesnost a povolí to technické možnosti, tak je lepší provést měření na mraku bodů.



## Závěr

Vzhledem ke stále se zvyšujícím možnostem strojírenské výroby, je třeba k tomu volit i vhodné metody pro komplexní kontrolu dílů ať už z hlediska času tak i přesnosti. Z hlediska času je vhodné zvolit optické metody, které měří v řádech jednotek minut, kdežto souřadnicové stroje v řádech desítek minut a počítačová tomografie v řádech hodin. Z hlediska přesnosti bychom volily souřadnicové stroje, které jsou schopny měřit v řádech desetin mikrometru, zatímco optická zařízení v jednotkách mikrometru a počítačová tomografie v řádech desítek mikrometru. Ovšem nespornou výhodou počítačové tomografie je možnost podívat dovnitř dílu, což ostatní metody nenabízí.

Tato bakalářská práce se zabývala porovnáním kontaktních a bezkontaktních metod při měření obecných tvarových. Kontaktní metody reprezentuje souřadnicový měřicí stroj OPTON UMC 850 a bezkontaktní metody reprezentuje počítačový tomograf Metronom 1500 a optický skener využívající pruhovou projekci modrého světla COMET L3S 2, vše od společnosti Carl Zeiss. Měření obecné tvarové plochy bylo realizováno na dvou artefaktech čočky. Dále byly porovnávány výsledky měření s aktivovanou teplotní kompenzací a bez ní. Nakonec se porovnávaly modely redukovaného mraku bodů získaného z počítačového tomografu.

Úvodní část se věnuje souřadnicovým měřicím strojům. Jsou zde prezentovány jednotlivé konstrukce, prvky mechanického systému, odměřovací systémy nezbytné k jejich fungování. Dále byl popsán princip měření, jednotlivé body při postupu kontroly a zdroje variability měření. Dále byla věnována pozornost kontaktním a bezkontaktním snímacím systémům, kde byly popsány jednotlivé druhy a uvedeny příklady. Následně byla uvedena kapitola o obecných tvarových plochách a křivkách, význam jejich měření pro průmyslovou výrobu. Potom byly uvedeny možnosti měření obecných tvarových ploch a křivek v softwaru Calypso, které byly prezentovány na artefaktu turbínové lopatky.

Dále se práce zabývá získáváním dat z použitých zařízení. Je zde popsáno upnutí a způsob zisku mraku bodů obou čoček z počítačového tomografu za pomoci programu Metronom OS, pak jeho zpracování a tvorba modelů tvořených trojúhelníkovou sítí v softwaru VG Studio Max. Následuje získání dat z optického skeneru COMET L3D 2, kde je popsán průběh skenování. Poslední bod v této kapitole je věnován získání dat ze souřadnicového měřicího stroje OPTON UMC 850. Zde jsou popsány postupy upnutí součástí, konfigurování snímacího systému a jeho následná kalibrace, poté zobrazení měřených elementů a charakteristik obsažených v plánu měření. Následuje postup tvorby teplotní kompenzace, a pak jsou zobrazena možná vyhodnocení a protokoly.

Poslední kapitola je věnována porovnání naměřených dat. Jsou zde uvedeny tři druhy porovnání pro každou čočku. První se zabývá porovnáním výsledků z tomografu, optického skeneru a souřadnicového stroje. Druhé porovnání zkoumá rozdíly při aktivované a deaktivované teplotní kompenzaci během měření artefaktů na souřadnicovém stroji. Třetí porovnání se zabývá využitelností převedení mraku bodů na trojúhelníkovou síť, která je prezentována ve třech různých nastaveních.

Z výsledků měření vyplývá, že jako nejvíce vypovídací se jeví strategie, kdy je měřená obecná tvarová plocha generována z plochy rastrem o velikosti 20x20, jelikož rovnoměrně obsadí celou měřenou plochu oproti rastru o velikosti 5x5. V případě využití generace dráhy pomocí bodů je třeba zohlednit i to, jak jsou body naneseny na plochu ve smyslu, do jakých míst a jak jsou rozloženy po ploše, jelikož to má vliv na výsledky.

Pro porovnání výsledků z počítačového tomografu, dotykového a optického měření bylo zvoleno dotykové měření jako reference, jelikož dosahuje nejmenších nejistot měření. Odchylka tvaru u dotykového měření artefaktu čočky byla 99,5  $\mu\text{m}$ . Optické měření vykazovalo odchylku vyšší o 17  $\mu\text{m}$



a počítačová tomografie měla odchylku vyšší o 10  $\mu\text{m}$ . Nicméně do měření promluvila i nevalná kvalita měřené plochy, na které byly viditelné stopy po obráběcím nástroji. Nejvíce jsou patrné na výsledcích z tomografu, kde jsou viditelné nepravidelné vyčnívající body. U optického měření byly tyto stopy lehce potlačeny křídovým práškem, který se vzhledem k transparentnosti měřené čočky musel použít a u dotykového měření byly lehce potlačeny velikostí kuličky.

Při měření artefaktu čočky s podstavou pomocí dotykového měření naměřena odchylka 136,3  $\mu\text{m}$ . U tomografu byla naměřena odchylka o 3  $\mu\text{m}$  vyšší a u optického měření byla nižší o 33  $\mu\text{m}$ . Čas skenování čočky byl 1 hodina a 20 minut a čočky s podstavou byl 1 hodina a 40 minut. V případě dotykového měření byl čas měření 40 minut, a to pro obě čočky. Skenování optickým zařízením trvalo pár minut, připočte-li se i příprava, tak naskenování jedné čočky trvalo zhruba 30 minut.

Porovnávání měření s a bez aktivované teplotní kompenzace na artefaktu čočky poukazyvalo na to, že při aktivované teplotní kompenzaci se ztlačně projevila deformace měřeného artefaktu, která byla způsobena obráběcím procesem. Odchylka naměřena bez teplotní kompenzace byla 99,5  $\mu\text{m}$  a s aktivovanou teplotní kompenzací byla odchylka vyšší o 37  $\mu\text{m}$ . Při porovnávání měření na artefaktu čočky s podstavou byla bez teplotní kompenzace naměřena odchylka 136,3  $\mu\text{m}$  a při aktivování teplotní kompenzace byla odchylka nižší o 26,3  $\mu\text{m}$ . Z výsledků porovnávání obou čoček byl pozorován výrazný rozdíl toho, zdali je aktivována teplotní kompenzace či nikoliv. Tudiž je vhodné dodržovat v měřících laboratořích optimální teplotu  $20^{\circ}\pm 2^{\circ}$ . Vzhledem k tomu, že nebylo možné v laboratoři s tomografem regulovat teplotu a tomograf nenabízí funkci teplotní korekce, bylo ostatní měření provedeno za zvýšené teploty. Proto bylo provedeno dotykové měření bez a s aktivovanou teplotní kompenzací, aby se zjistil vliv teploty na měřené artefakty. Je třeba zmínit i časový vliv, jelikož měření s aktivovanou teplotní kompenzací bylo na měřených artefaktech o 5 minut delší než bez.

Na výsledcích z modelů tvořených trojúhelníkovou sítí s nejvyššími a nejnižšími detaily je viditelné potlačení některých výčnělků, ale zároveň je vidět i vznik nových v důsledku natočení jednotlivých trojúhelníků. Na vyhlazeném STL modelu je vidět postupný přechod mezi odchylkami, k čemuž se dostal díky potlačování hran a prokládání výčnělků, čímž ale dosahuje i velkých odchylek. Při měření artefaktu čočky byla z mraku bodů naměřena odchylka 110  $\mu\text{m}$ . STL model s nejnižšími detaily dosahoval odchylky vyšší o 30  $\mu\text{m}$ , v případě STL modelu s nejvyššími detaily byla vyšší o 57  $\mu\text{m}$  a u vyhlazeného STL modelu byla o 80  $\mu\text{m}$  vyšší. V případě měření artefaktu čočky s podstavou byla počítačovým tomografem naměřena odchylka 139  $\mu\text{m}$ , což činí odchylku STL modelu s nejnižšími detaily nižší o 5  $\mu\text{m}$ , STL model s nejvyššími detaily vyšší o 32  $\mu\text{m}$  a vyhlazený měl odchylku o 31  $\mu\text{m}$  vyšší.

Z provedených porovnaní na artefaktu čočka se jeví STL model s nejnižšími detaily jako ten nejvhodnější, nejen protože se jedná o významně redukováný soubor dat, ale i protože dosahuje nejmenší odchylky z porovnaní s ostatními vytvořenými modely. Přesto by minimální odchylka vůči mraku bodů byla  $\pm 30 \mu\text{m}$ . V případě artefaktu čočky s podstavou se jako nejvhodnější ukázal STL model s nejvyššími detaily, jenž nabývá odchylek  $\pm 32 \mu\text{m}$  vzhledem k hodnotám mraku bodů. Vyhlazený STL model by se mohl využít k vizuální kontrole, jelikož se více zvýrazní kritická místa, ale díky tomu to i zkresluje hodnotu měřené odchylky. Ovšem pokud je dán požadavek na přesnost a povolí to technické možnosti, tak je lepší provést měření přímo na mraku bodů.



## Zdroje

- [1] CHRISTOPH, Ralf a NEUMANN, Hans Joachim. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti – opticky, dotykově a rentgenovou tomografií*. 4. Přeprac. a rozš. Vyd. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčík, 2008.
- [2] CHRISTOPH, Ralf a NEUMANN, Hans Joachim. *Rentgenová tomografie v průmyslové měřicí technice: přesná, hospodárná a univerzální*. Uherský Brod: PRIMA Bilavčík, c2011.
- [3] PFEIFER, Tilo; IMKAMP, Dietrich; SCHMITT, Robert. *Coordinate Metrology and CAXApplication in Industrial Production : Basics, Interfaces and Integration*. Munich : Carl Hanser Verlag, 2006. 205 s.
- [4] SAVIO, E., L. DE CHIFFRE a R. SCHMITT. *Metrology of freeform shaped parts*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2007, 56(2), 810-835 [cit. 2020-06-05]. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.008. ISSN 00078506.
- [5] BOSH, John. *Coordinate measuring machines and systems*. New York: MARCELL DEKKER, 1995. 444 s.
- [6] EDITED BY ROBERT J. HOCKEN & PAULO H. PEREIRA. *Coordinate measuring machines and systems*. 2nd ed. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2012. ISBN 9781420017533.
- [7] *Hexagon Metrology* [online]. [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: <http://www.hexagonmetrology.cz>
- [8] Techpark [Online] [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/>
- [9] BERÁNEK, Libor. ČVUT V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ, ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE. *Strojírenská metrologie*. Praha, 2018.
- [10] POKORNÝ, Přemysl. *Souřadnicové měřicí stroje*. Liberec: Technická univerzita, 1999. 76 s. ISBN 80-7083-326-2
- [11] *A Proposal for the Metrological Characterization of Circular Features with Digital Optical Machines* [online]. [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: [http://oa.upm.es/12647/2/INVE\\_MEM\\_2011\\_106986.pdf](http://oa.upm.es/12647/2/INVE_MEM_2011_106986.pdf)
- [12] SMITH, Graham T. *Industrial metrology: surfaces and roundness*. New York: Springer, c2002. ISBN 1-85233-507-6
- [13] CORPORATION, DaimlerChrysler. *Measurement systems analysis: reference manual*. 4th ed. [Detroit, Mich: DaimlerChrysler, 2010. ISBN 978-160-5342-115
- [14] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch*. Ostrava, 2011. Studijní opora. VŠB-TU Ostrava.
- [15] *Interní dokumenty společnosti Zeiss*
- [16] KRUTH, J. P. et al. *Computed tomography for dimensional metrology*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2011, vol. 60, no. 2, s. 821-842. ISSN 0007-8506.
- [17] DE CHIFFRE, L. et al. *Industrial applications of computed tomography*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2014, vol. 63, no. 2, s. 655-677. ISSN 0007-8506.
- [18] KATUCH, Peter. *Industrial Computed Tomography: by Zeiss* [online]. In: . s. 43 [cit. 2019-11-16].
- [19] *Informační magazín výzkumné skupiny Rentgenová mikrotomografie a nanotomografie CEITEC VUT v Brně* [online], 2017. léto 2017 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <http://ctlab.ceitec.cz/files/271/176.pdf>
- [20] KNAP, Petr. *METROTOMOGRAFIE JAKONOVÝNÁSTROJZAJIŠŤOVÁNÍ JAKOSTIVEVÝROBĚ* [online]. , 5 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/23956895-Metrotomografie-jako-novy-nastroj-zajistovani-jakosti-ve-vyrobe.html>
- [21] *Informační magazín výzkumné skupiny Rentgenová mikrotomografie a nanotomografie CEITEC VUT v Brně* [online], 2014. [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <http://ctlab.ceitec.cz/files/252/157.pdf>





- [22] *X-Ray attenuation & absorption calculator* [online]. [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: [http://web-docs.gsi.de/~stoe\\_exp/web\\_programs/x\\_ray\\_absorption/index.php](http://web-docs.gsi.de/~stoe_exp/web_programs/x_ray_absorption/index.php)
- [23] *Informační magazín výzkumné skupiny Rentgenová mikrotomografie a nanotomografie CEITEC VUT v Brně* [online], 2017. podzim 2017 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <http://ctlab.ceitec.cz/files/271/177.pdf>
- [24] *Neusoft* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: [http://www.neusoft.cz/?page\\_id=3946](http://www.neusoft.cz/?page_id=3946)
- [25] *Zeiss* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/home.html>
- [26] *Heidenhain* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.heidenhain.cz/>
- [27] *Global encoder* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: [http://www.globalencoder.com/xist4c/web/GESgroup---Encoders\\_id\\_4901\\_.htm](http://www.globalencoder.com/xist4c/web/GESgroup---Encoders_id_4901_.htm)
- [28] *Megatron* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.megatron.cz/>
- [29] *Renishaw* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz>
- [30] *Fototechnika. Světlo a barva ve fotografii.* [Online] 27. 1.2010. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: [www.fotoradce.cz/svetlo-a-barva-ve-fotografii-blog](http://www.fotoradce.cz/svetlo-a-barva-ve-fotografii-blog).
- [31] Hocken, Robert J. a Pereira, Paul H. *Coordinate Measuring Machines and Systems Second Edition*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. ISBN 978-1-4200-1753-3.
- [32] *Technická univerzita v Liberci – katedra výrobních systémů a automatizace. Souřadnicové měřicí stroje.* [Online] [cit. 2019-12-20] [www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522](http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522).
- [33] *Vojáček, Antonín. Velmi přesné optické měření s konfokálními snímači* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz//komponenty/velmi-presne-opticke-mereni-s-konfokalnimi-snimaci.html>
- [34] *Axiom Optics. Chromatic Confocal Sensor - Point Sensors* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: [www.axiomoptics.com/wsm/chromatic-confocal-point-sensors/](http://www.axiomoptics.com/wsm/chromatic-confocal-point-sensors/).
- [35] *Precitec. Measurment principle* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/products/optical-measuring-technology/how-it-works/>
- [36] *AzoSensors* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.azosensors.com/>
- [37] *PRIMA BILAVČÍK. Vysoce přesný chromatický lineární senzor pro měření rozličných povrchů.* [Online] 27. 1.2010. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <http://www.mericipristroje.cz/novinky/detail/chromaticky-linearni-senzor-pro-rychle-mereni.htm>.
- [38] *Nikon metrology* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.nikonmetrology.com/>
- [39] *Leica geosystems* [Online] [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://leica-geosystems.com/products/laser-tracker-systems>
- [40] *Kadlčík, Rostislav. Senzor pro přesnou a komplexní inspekci či reverzní inženýrství.* [Online] 20.6.2007 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/senzor-pro-presnou-a-komplexni-inspekci-ci-reverzni-inzenyrstvi.html>
- [41] *Volume graphics* [Online] [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio.html>





## Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení souřadnicových měřících strojů [9] .....	11
Obr. 2 Zeiss DuraMax [25] .....	11
Obr. 3 Zeiss MMZ E [25] .....	12
Obr. 4 Zeiss PRISMO [25] .....	12
Obr. 5 Zeiss PRO [25] .....	13
Obr. 6 Princip vzduchového uložení [8] .....	14
Obr. 7 Kartézský souřadný systém [8] .....	15
Obr. 8 Příklady jednoúčelových přípravků [8] .....	17
Obr. 9 Snímací dotek [9] .....	17
Obr. 10 Materiály kuliček (rubín, nitrid křemíku, oxid zirkoničitý) [29] .....	18
Obr. 11 Materiály dřívků snímacích systémů (ocel, karbid wolframu, keramika, uhlíková vlákna, hliník, titan) [29] .....	19
Obr. 12 Kalibrace snímacího doteku [8] .....	20
Obr. 13 Schéma vyrovnání souřadného systému metodou 3-2-1 [8] .....	21
Obr. 14 Geometrické elementy sestaveny z minima bodů [8] .....	22
Obr. 15 Metoda nejmenších čtverců (LSC) (vlevo), Minimální opsaná kružnice (MCC) (vpravo) [12] ..	22
Obr. 16 Minimální zóna (MZC) (vlevo), Maximální vepsaná kružnice (MIC) (vpravo) [12] .....	22
Obr. 17 Zdroje variability [9] .....	23
Obr. 18 Rozdělení snímacích systémů CMM [9] .....	24
Obr. 19 Měření dotykovým snímacím systémem [6] .....	25
Obr. 20 Dotykový snímací systém [6] .....	26
Obr. 21 Dotyková spínací sonda TP20 firmy RENISHAW a její popis [29] .....	27
Obr. 22 Kinematické schéma kontaktní sondy s elektrokontaktním snímačem pracujícím ve třech směrech [8] .....	28
Obr. 23 Schéma spínací dotykové piezoelektrické sondy a její princip [8] .....	28
Obr. 24 Skenovací hlava [9] .....	29
Obr. 25 Otočná hlava RDS [25] .....	30
Obr. 26 VAST XXT [25] .....	30
Obr. 27 VAST gold [25] .....	30
Obr. 28 Snímač REVO RSP2 umístěn v otočné hlavě Renscan5 [29] .....	30
Obr. 29 Schéma funkce tip-sensing na snímači RSP2 [29] .....	30
Obr. 30 Měření bezdotykovým laserovým snímacím systémem [25] .....	31
Obr. 31 Měření bezdotykovým optickým skenerem [25] .....	31
Obr. 32 Schéma senzoru pro zpracování obrazu [1] .....	33
Obr. 33 Kamerová snímací hlava [25] .....	33
Obr. 34 Schéma pruhové projekce [1] .....	34
Obr. 35 Pruhový projektor Zeiss COMET L3D [25] .....	34
Obr. 36 Schéma fungování fotogrammetrie [1] .....	35
Obr. 37 Spektrum viditelného světla (vlnová délka je uvedena v nm) [30] .....	35
Obr. 38 Schéma fungování senzoru bílého světla [35] .....	36
Obr. 39 Příklad laserového skenování [14] .....	37
Obr. 40 Porovnání 2D laseru a hlavou se třemi rovinami osvitu (laserový kříž) [40] .....	38
Obr. 41 Laser tracker (vlevo) a schéma určení pozice reflektoru (vpravo) [14] .....	38
Obr. 42 Nikon laser radar MV331/351 [38] .....	39
Obr. 43 Ultrazvukový skener Freepoint [14] .....	39



Obr. 44 Vizualizace konstrukce počítačového tomografu [18] .....	41
Obr. 45 Vizualizace voxelu [21] .....	42
Obr. 46 Zachycení měřeného dílce ve 360° [18] .....	42
Obr. 47 Ovlivnění nenatočeného artefaktu (vlevo), vhodné řešení (vpravo) [15] .....	43
Obr. 48 Měděné filtry .....	44
Obr. 49 Element 2D křivka .....	45
Obr. 50 Grafický výsledek tvaru profilu křivky .....	46
Obr. 51 Element vytvořený z plochy .....	47
Obr. 52 Element vytvořený body .....	47
Obr. 53 Grafické vyhodnocení-z plochy .....	48
Obr. 54 Grafické vyhodnocení-body .....	48
Obr. 55 OPTON UMC 850 .....	49
Obr. 56 COMET L3D 2 .....	49
Obr. 57 METRONOM 1500 .....	49
Obr. 58 Měřené artefakty, čočka s podstavou (vlevo) a čočka (vpravo) .....	50
Obr. 59 Upnutí a ustavení artefaktu .....	50
Obr. 60 Panel nastavení .....	51
Obr. 61 Rekapitulační okno nastavených parametrů čočky .....	52
Obr. 62 Zobrazení výsledků čočky .....	53
Obr. 63 Záložka Reconstruction .....	53
Obr. 64 Rekapitulační okno nastavených parametrů čočky s podstavou .....	54
Obr. 65 Zobrazení výsledků čočky s podstavou .....	55
Obr. 66 Pracovní prostředí VG Studio Max .....	56
Obr. 67 Nastavené parametry pro nejnižší detail (vlevo) a nejvyšší detail (vpravo) .....	56
Obr. 68 Přejížděcí linie .....	57
Obr. 69 Mrak bodů .....	57
Obr. 70 Detail vyhlazeného povrchu .....	58
Obr. 71 Vyhlazený mrak bodů .....	58
Obr. 72 Upnutí čočky .....	59
Obr. 73 Průběh skenování čočky .....	60
Obr. 74 Upnutí součástí .....	61
Obr. 75 Snímací systém .....	61
Obr. 76 Nadefinované prostorové body .....	62
Obr. 77 Okno 3D přizpůsobení .....	62
Obr. 78 Průběh vyrovnávání součástí .....	62
Obr. 79 Vytvořené elementy .....	63
Obr. 80 Vytvořené charakteristiky .....	63
Obr. 81 Nastavení teplotní kompenzace .....	64
Obr. 82 3D grafické znázornění .....	64
Obr. 83 Prezentační protokol .....	64



## Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry Zeiss DuraMax [25] .....	11
Tabulka 2 Parametry Zeiss MMZ E [25] .....	12
Tabulka 3 Parametry Zeiss Prismo [25] .....	12
Tabulka 4 Parametry Zeiss PRO [25] .....	13
Tabulka 5 Minimum potřebných bodů pro sestavení geometrického elementu [10] .....	21
Tabulka 6 Maximální možná prozařitelná akumulovaná tloušťka materiálu v závislosti na druhu materiálu a na velikosti napětí na rentgence [2] .....	43
Tabulka 7 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5 .....	65
Tabulka 8 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20 .....	66
Tabulka 9 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body .....	67
Tabulka 10 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body .....	68
Tabulka 11 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5 .....	70
Tabulka 12 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20 .....	70
Tabulka 13 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body .....	71
Tabulka 14 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body .....	72
Tabulka 15 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5 .....	74
Tabulka 16 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20 .....	75
Tabulka 17 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body .....	76
Tabulka 18 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body .....	77
Tabulka 19 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5 .....	80
Tabulka 20 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20 .....	81
Tabulka 21 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body .....	82
Tabulka 22 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body .....	83
Tabulka 23 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5 .....	85
Tabulka 24 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20 .....	85
Tabulka 25 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body .....	86
Tabulka 26 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body .....	87
Tabulka 27 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 5x5 .....	89
Tabulka 28 Porovnání ob. tvar. plochy generované z plochy rastrem 20x20 .....	90
Tabulka 29 Porovnání ob. tvar. plochy generované 25 body .....	91
Tabulka 30 Porovnání ob. tvar. plochy generované 60 body .....	92

## Seznam grafů

Graf 1 Porovnání: CT x OPTON x COMET .....	69
Graf 2 Porovnání: s a bez teplotní korekce .....	73
Graf 3 Porovnání CT x STL .....	79
Graf 4 Porovnání: CT x COMET x OPTON u čočky s podstavou .....	84
Graf 5 Porovnání: s a bez teplotní korekce u čočky s podstavou .....	88
Graf 6 Porovnání: CT x STL u čočky s podstavou .....	94