

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** Strojní Inženýrství  
**Studijní specializace:** Strojírenská technologie-technologie  
obrábění

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Analýza procesu měření tvarových prvků na 3D měřicím stroji**

**Autor:** Jakub Čása  
**Vedoucí práce:** Ing. Dana Kubátová, Ph.D.  
**Akademický rok:** 2022/2023

## Zadání BP

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub ČÁSA**  
Osobní číslo: **S19B0235P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Specializace: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**  
Téma práce: **Analýza procesu měření tvarových prvků na 3D měřicím stroji**  
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

## Zásady pro vypracování

1. Úvod a definice cílů
2. Rešerše současného stavu
3. Návrh experimentů a jejich vyhodnocení
4. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1209-6.
- [https://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE\\_FINAL.pdf](https://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE_FINAL.pdf).
- <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology>.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Dana Kubátová, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Dana Kubátová, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji paní Ing. Daně Kubátové Ph.D. za ochotu, trpělivost a za poskytnutí odborných rad a informací při konzultacích.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Čása	<b>Jméno</b> Jakub	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Kubátová, Ph.D.	<b>Jméno</b> Dana	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU – FST – KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Analýza procesu měření tvarových prvků na 3D měřicím stroji		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	44	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	33	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	11
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Bakalářská práce se věnuje problematice volby velikosti doteku pro 3D měřicí stroj. Zjistit, jak velkou nepřesnost přinese nedodržení vztahu pro volbu velikosti doteku. Vyhodnocení kruhovitosti průměru a válcovitosti u měřených vzorků.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	3D měřicí stroj, kruhovitost, válcovitost, průměr, dotek,

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Čása	<b>Name</b> Jakub
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering	
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Kubátová, Ph.D.	<b>Name</b> Dana
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST – KTO	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b> <b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Analysis of the process of measuring shape elements on a 3D measuring machine	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	44	<b>TEXT PART</b>	33	<b>GRAPHICAL PART</b>	11
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The bachelor's thesis deals with the problem of choosing the touch size for a 3D measuring machine. To find out how much inaccuracy will be caused by not following the relationship for choosing the touch size. Evaluation of the roundness of the diameter and the cylindricity of the measured samples.
<b>KEY WORDS</b>	3D measuring machine, roundness, cylindricity, diameter, touch,

## Obsah

Zadání BP.....	2
Prohlášení o autorství .....	3
Poděkování.....	5
Seznam obrázků .....	11
Seznam tabulek .....	11
Seznam grafů .....	12
1 Úvod a definice cílů .....	13
1.1 Cíl práce .....	13
2 Rešerše současného stavu .....	15
2.1 Historie 3D měřicích strojů .....	15
2.2 3D měřicí stroje.....	15
2.2.1 Portálové měřicí stroje .....	16
2.2.2 Mostové měřicí stroje .....	17
2.2.3 Konzolové měřicí stroje.....	17
2.2.4 Horizontální rameno .....	18
2.3 Měřicí sondy.....	18
2.4 Typy dotyků .....	19
2.4.1 Materiál měřeného objektu .....	19
2.4.2 Geometrie měřeného objektu.....	20
2.4.3 Tolerance měření .....	20
2.4.4 Velikost a délka dotyku .....	20
2.4.5 Prostředí a podmínky měření .....	21
2.5 Zaznamenávání hodnot .....	23
2.6 Měřicí vybavení laboratoře metrologie RTI.....	23
2.7 Geometrické tolerance.....	24
3 Návrh experimentu a jejich vyhodnocení .....	26
3.1 Volba vzorků .....	26
3.2 Příprava vzorků na měření .....	26
3.3 Měření na kruhoměru .....	26
3.4 Měření na 3D měřicím stroji se skenovací hlavou.....	28
3.5 Volba doteků a počet bodů měření pro studentské CMM.....	30
3.6 Příprava programů pro měření .....	30
3.7 Měření na studentském 3D měřicím stroji.....	30
3.8 Vyhodnocení výsledků.....	32



3.8.1	Data ze studentského 3D měřicího stroje.....	32
3.8.2	Data z kruhoměru.....	33
3.8.3	Data ze 3D měřicího stroje se skenovací hlavou .....	34
3.8.4	Data ze 3D měřicího stroje se skenovací hlavou za použití 10 bodů.....	34
3.8.5	Zprůměrování hodnot ze studentského CMM .....	35
3.9	Porovnání naměřených dat.....	35
3.9.1	Výpočet nejistoty měření .....	36
3.9.2	Grafy průměrů.....	36
3.9.3	Grafy kruhovitostí.....	37
3.9.4	Graf válcovitosti.....	38
3.10	Vyhodnocení dat.....	38
3.10.1	Vyhodnocení průměru .....	38
3.10.2	Vyhodnocení kruhovitosti.....	39
3.10.3	Vyhodnocení válcovitosti .....	40
3.11	Sumarizace získaných výsledků .....	42
4	Závěr .....	43

### Přehled použitých zkratk a symbolů

FST	Fakulta strojní
KTO	Katedra technologie obrábění
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
CMM	Souřadnicový měřicí stroj
mm	milimetry

## Seznam obrázků

Obrázek 2-1 3D měřicí stroj [2].....	16
Obrázek 2-2 Portálový CMM pohyblivý rám [7] .....	17
Obrázek 2-3 Portálový CMM pohyblivý stůl [8].....	17
Obrázek 2-4 Mostový měřicí stroj [8] .....	17
Obrázek 2-5 Konzolový měřicí stroj [9].....	18
Obrázek 2-6 Horizontální rameno [10].....	18
Obrázek 2-7 Tlakový přenos [11].....	19
Obrázek 2-8 Optický přenos [11] .....	19
Obrázek 2-9 Karbid wolframu rovný [7] .....	21
Obrázek 2-10 Karbid wolframu odstupňovaný [7].....	21
Obrázek 2-11 Stopka z uhlíkových vláken [7] .....	21
Obrázek 2-12 Keramická stopka [7].....	21
Obrázek 2-13 Příliš velký dotek .....	23
Obrázek 2-14 Porovnání velmi malého doteku a ideálního.....	23
Obrázek 2-15 Zeiss Eclipse .....	24
Obrázek 2-16 Kruhovitost [14].....	25
Obrázek 2-17 Válcovitost [14].....	25
Obrázek 3-1 Výkres vzorku D16 .....	26
Obrázek 3-2 Pracoviště kruhoměru .....	27
Obrázek 3-3 Protokol kruhoměr .....	27
Obrázek 3-4 protokol ze CMM se skenovací hlavou.....	29
Obrázek 3-5 Zvolené doteky.....	30
Obrázek 3-6 Kalibrace .....	31
Obrázek 3-7 Měření D19,8.....	31
Obrázek 3-8 Protokol studentské CMM .....	32
Obrázek 3-9 Vzorek D6,5 .....	42
Obrázek 3-10 Vzorek D19,8 .....	42

## Seznam tabulek

Tabulka 2-1 hodnoty Zeiss Eclipse.....	24
Tabulka 3-1 Kruhoměr hodnoty stroje.....	27
Tabulka 3-2 hodnoty CMM se skenovací hlavou .....	28
Tabulka 3-3 použitých doteků .....	31

Tabulka 3-4 Dotek 5mm měření vzorku D19,8 .....	33
Tabulka 3-5 Dotek 8mm měření vzorku D19,8 .....	33
Tabulka 3-6 Dotek 3mm měření vzorku D19,8 .....	33
Tabulka 3-7 naměřená data z kruhoměru.....	34
Tabulka 3-8 Měření průměru a válcovitosti.....	34
Tabulka 3-9 Měření kruhovitosti .....	34
Tabulka 3-10 Měření válcovitosti a průměru na 3D skenu s 10 body.....	34
Tabulka 3-11 Měření kruhovitosti na 3D skenu s 10 body.....	35
Tabulka 3-12 Zprůměrované hodnoty pro D19,8 .....	35
Tabulka 3-13 Průměry .....	39
Tabulka 3-14 Kruhovitost v závislosti na kruhoměru.....	39
Tabulka 3-15 Kruhovitost v závislosti na 3D s 10 body.....	40
Tabulka 3-16 Válcovitost vůči kruhoměru .....	41
Tabulka 3-17 Válcovitost vůči 3D skenu s 10 body .....	41
Tabulka 3-18 Sumarizace výsledků .....	42

## Seznam grafů

Graf 3-1 Průměr vzorku D19,8 v hloubce 12mm .....	36
Graf 3-2 Průměr vzorku D19,8 v hloubce 17mm .....	36
Graf 3-3 Průměr vzorku D19,8 v hloubce 5 mm .....	36
Graf 3-4 Kruhovitost vzorku D19,8 v hloubce 5mm.....	37
Graf 3-5 Kruhovitost vzorku D19,8 v hloubce 12mm.....	37
Graf 3-6 Kruhovitost vzorku D19,8 v hloubce 17mm.....	37
Graf 3-7 Válcovitost D19,8.....	38

# 1 Úvod a definice cílů

Měření na CMM (Coordinate Measuring Machine) je jednou z nejvíce produktivních a nejpreciznějších metod měření geometrických prvků. CMM je stroj, který umožňuje měřit rozměry, tvary a polohy dílů s vysokou přesností. V průmyslové výrobě se stále více kladou požadavky na přesnost výroby a měření, a to s ohledem na vysokou konkurenci na trhu a nároky zákazníků na vysokou kvalitu výrobků. Výroba součástí s přesností na mikrometry je stále běžnější a vyžaduje velmi přesné a spolehlivé měřicí nástroje. Souřadnicové měřicí stroje (CMM) jsou jedním z takových nástrojů. [1][2]

Metrologie je obor, který se zabývá měřením a analýzou rozměrů, tvarů, polohy a dalších geometrických charakteristik objektů. V průmyslové výrobě je metrologie klíčová pro kontrolu přesnosti a kvality výroby, a proto se neustále vyvíjí nové a vylepšené metody měření. Souřadnicové měřicí stroje jsou jednou z nejmodernějších metod měření v průmyslové výrobě.[1][2]

CMM umožňuje měření geometrických charakteristik objektů v trojrozměrném prostoru pomocí různých senzorů. Výsledky měření jsou zpracovávány počítačem a poskytují velmi přesné a opakovatelné výsledky. Díky tomu se CMM staly nedílnou součástí výrobního cyklu v mnoha průmyslových odvětvích, jako jsou například automobilový, letecký, strojírenský a elektrotechnický průmysl.[1][2]

Souřadnicové měřicí stroje pracující s maximální nejistotou měření kolem pár mikrometrů jsou již běžnou součástí výrobního cyklu. Tyto stroje umožňují velmi přesné a spolehlivé měření, což je klíčové pro kontrolu kvality a přesnosti v průmyslové výrobě. Díky tomu se minimalizují chyby výroby a zvyšuje se výkonnost a efektivita výrobního procesu.[1][2]

Je tedy zřejmé, že strojírenská metrologie a přesné měření na souřadnicovém stroji jsou klíčovými obory pro současnou průmyslovou výrobu a pro její další rozvoj. S rostoucími požadavky na přesnost a s rostoucími možnostmi souřadnicových měřicích strojů se otevírají nové možnosti pro zvyšování kvality výroby, minimalizování vadných výrobků a maximalizaci výrobní efektivity. Díky souřadnicovým měřicím strojům je možné dosáhnout přesností na řádově nižší mikrometry, což je nezbytné pro výrobu velmi precizních a složitých součástí v různých oborech průmyslu. [1][2]

Je tedy jasné, že souřadnicové měřicí stroje jsou nezbytnou součástí moderního výrobního procesu a jejich využití je stále častější. Pokud se budou nadále zvyšovat požadavky na přesnost a kvalitu výroby, můžeme očekávat další rozvoj této oblasti a využití stále vyspělejších technologií v souřadnicovém měření. [2][3]

## 1.1 Cíl práce

Cílem této práce je ověřit, jak volba menšího nebo většího dotyku ovlivní přesnost měření geometrických a tvarových charakteristik. Pro tento účel se plánuje provést experiment, na kterém se projeví odchylky měření. Měření bude primárně nahlížet na charakteristiky jako průměr, kruhovitost a válcovitost.

Jedním z hlavních cílů této práce bude zjistit, jak se nevhodná volba dotyku projeví v přesnosti výsledků. Práce se zaměří na zkoumání chování různých velikostí dotyků v odlišných částech vzorku a jak se to následně projeví v geometrických a tvarových charakteristikách. Cílem je zjistit, zda jsou některé charakteristiky více náchylné na změnu velikosti dotyku než jiné.

Výsledky této studie by mohly být velmi užitečné pro průmysl, zejména pro ten, který se zabývá strojírenskou metrologií a používá souřadnicové měřicí stroje pro kontrolu přesnosti výroby. Tato studie by mohla poskytnout velmi cenné informace pro volbu velikosti dotyku, která by mohla vést k větší přesnosti měření, a tudíž i výroby

## 2 Rešerše současného stavu

### 2.1 Historie 3D měřicích strojů

3D měřicí stroje neboli CMM (coordinate measuring machine) se poprvé objevily v roce 1959 na mezinárodní technické výstavě obráběcích strojů v Paříži. Tyto stroje byly schopné měřit v trojrozměrném prostoru. [4][5]

I když se první tříosé stroje objevily už v roce 1959, vede se spor o to, kdo z výrobců Ferranti ze Skotska anebo DEA z Itálie byl první. Nicméně první stroje byly velmi primitivní a disponovaly nízkou přesností, ale i tak to byl velký krok vpřed v oblasti trojrozměrného měření. Jejich konstrukce byla založena na použití přesného souboru stop, na kterých se pohybovala měřicí sonda. Tento přístroj byl velmi složitý na obsluhu a velmi pomalý. [4][5]

V průběhu 60. a 70. let byly vyvinuty další typy CMM, které využívaly modernější způsoby měření a byly rychlejší a přesnější. V roce 1965 byl vyvinut první CMM s využitím laserové technologie pro měření. Tento stroj měřil laserovými paprsky vzdálenost a zajistil tak velmi přesné měření s vysokou rychlostí. V roce 1973 přišel vynález technologie využívající dotykovou sondu. Ta se stala standardní součástí CMM.[2] [4][5]

Následně proběhl vývoj v 80. a 90. letech, technologie CMM se dále vylepšovala a výrobci začali nabízet více možností a funkcí. Byly vyvinuty CMM s fotoaparáty, které umožňovaly měření nejen geometrických charakteristik, ale i jakosti povrchu objektů. V této době se také začalo přecházet na počítačem řízený CMM a počítačem zpracování dat z CMM. [2][4][5]

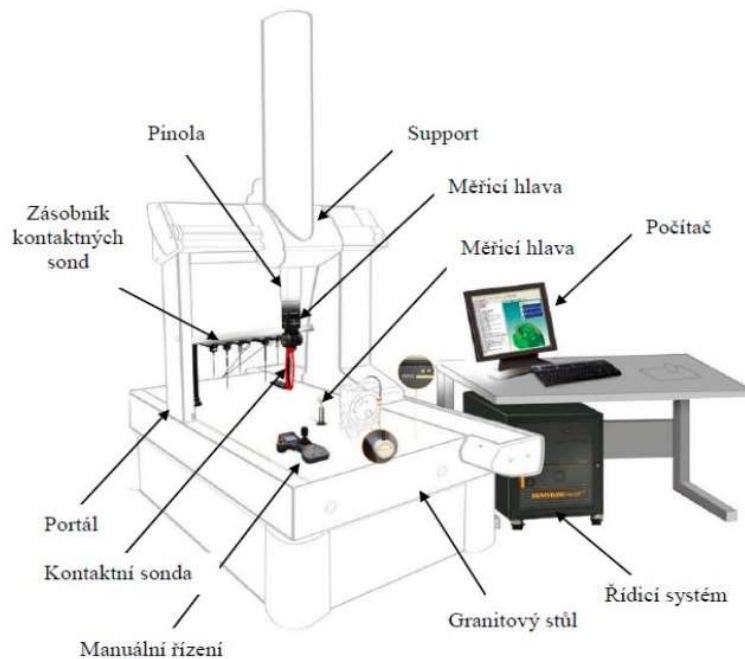
S nástupem nového tisíciletí se technologie CMM stala ještě výkonnější a přesnější. V dnešní době jsou k dispozici CMM s nejmodernějšími technologiemi, jako je například využití optických snímačů nebo laserových triangulačních senzorů, což umožňuje velmi přesné měření. [4][5]

### 2.2 3D měřicí stroje

Tyto stroje mají za úkol měřit součásti a vyhodnocovat odchylky od požadovaných tvarů a rozměrů. Stroj získává data díky dotykové sondě, která je uchycena na pohyblivé ose stroje. Pro měření je zapotřebí ustavit měřené těleso na základnu stroje. Tato základna musí být vyrobena ze stálého materiálu. Nejčastěji bývá vyrobena z granitu. Na této základně se díky vzduchovým ložiskům pohybuje portál. Stroj pro měření využívá 3 základní osy X, Y a Z. [2]

Stroj se skládá z těchto částí, které jsou vidět na obrázku 2-1.

- a) **portál** – tento prvek tvoří pevný rám stroje a je základní strukturou pro celý systém.
- b) **support** – tento systém zajišťuje pohyb měřicí hlavy a umožňuje tak měření v měřicím prostoru.[2]
- c) **měřicí hlava** – tato část obsahuje senzor, který je použit k měření součásti. Senzor může být dotykový, optický nebo laserový [2]
- d) **stůl** – slouží k uchycení měřené součásti. Musí být stabilní, aby minimalizoval pohyb měřené součásti.
- e) **řídící systém** – tento systém slouží ke zpracování dat získaných kontaktní sondou.
- f) **kontaktní sonda** – vytváří kontakt mezi dotykem a měřenou součástí. Musí být přesná a odolná, aby vydržela opakované měření.



**Obrázek 2-1 3D měřicí stroj [2]**

Stroje se dělí podle konstrukce na čtyři základní: a) portálové viz kapitola 2.2.1.

b) mostové viz kapitola 2.2.2.

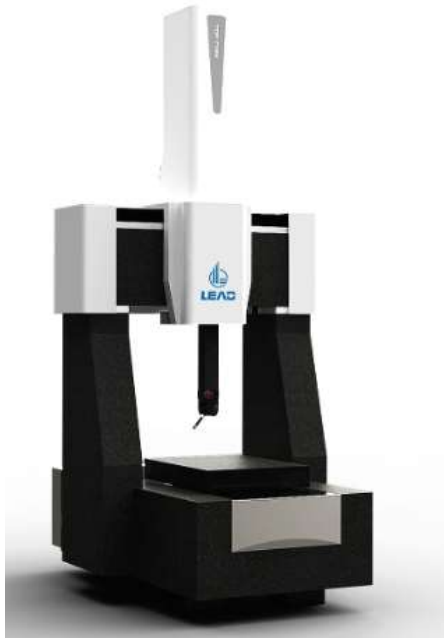
c) konzolové viz. kapitola 2.2.3

d) horizontální rameno viz. kapitola 2.2.4

### **2.2.1 Portálové měřicí stroje**

Tyto stroje jsou nejrozšířenější. Mohou se ještě dělit na stroje s pohyblivým stolem anebo mostem. Portálová konstrukce zajišťuje stabilní uchycení měřicích sond. Tento typ stroje je vidět na obrázku 2-3 a 2-2 a je vhodný pro měření menších až středně velkých součástí, které se musí umístit na měřicí stůl. Tento typ stroje bude použit k provedení experimentu. [6]





Obrázek 2-3 Portálový CMM  
pohyblivý stůl [8]



Obrázek 2-2 Portálový CMM pohyblivý rám [7]

### 2.2.2 Mostové měřicí stroje

Mostové měřicí stroje se používají pro velké součásti. Za největší výhodu lze považovat to, že podlaha může být využita jako měřicí stůl a díky tomu se nemusí se součástí složitě manipulovat. Jejich hlavní nevýhodou je cena, ale pro rozměrné produkty jsou nepostradatelné. Konstrukci mostového 3D měřicího stroje můžeme vidět na obrázku 2-4.[6]



Obrázek 2-4 Mostový měřicí stroj [8]

### 2.2.3 Konzolové měřicí stroje

Konzolové stroje jsou podepřeny jen v jednom místě. Díky této konstrukci má tento typ menší tuhost než stroje předchozí, které mají podporu ve dvou bodech. Tento stroj je vidět na obrázku 2-5. Jejich největší výhodou je možnost měřit součást ze tří stran. Jsou vhodné pro měření malých dílů. [6]



Obrázek 2-5 Konzolový měřicí stroj [9]

#### 2.2.4 Horizontální rameno

Předchozí typy měřicích strojů mají měřicí rameno vertikálně. Tyto stroje ovšem mají rameno horizontálně. Díky této konstrukci je toto řešení nejvhodnější pro měření dlouhých, štíhlých dílů, které by díky rozměrům nebylo možné měřit vertikálně. Nevýhodou této konstrukce je menší přesnost než u předchozích strojů. Horizontální rameno můžeme vidět na obrázku 2-6. [6]



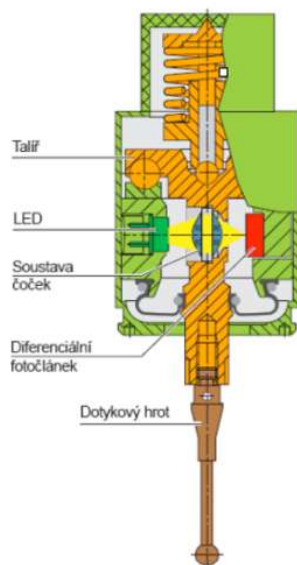
Obrázek 2-6 Horizontální rameno [10]

### 2.3 Měřicí sondy

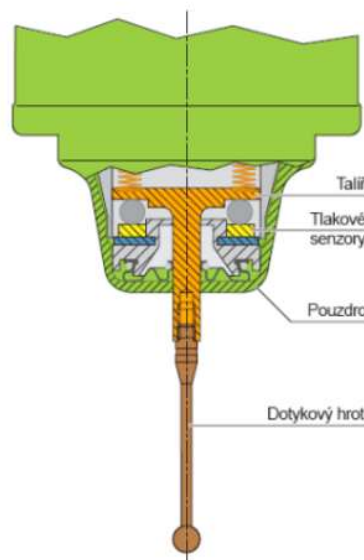
Sonda získává informace za pomoci kontaktu mezi dotykem a měřenou součástí. Existují dva základní druhy sond. Spínací dotykové sondy a skenovací sondy.

**Spínací dotykové sondy** získávají data na základě změny odporu, magnetické indukce nebo optického dotyku. Tyto sondy získávají menší počet bodů než skenovací sondy. Díky této vlastnosti nedokážou spínací sondy získat tak přesné informace o měřené součásti. Na obrázku 2-7 je vidět dotyková sonda s optickým přenosem. Ke snímání je využito infračervené spektrum světelného záření. Tento typ má velmi spolehlivý přenos a je zdravotně nezávadný,

jeho náchylnost na rušení je minimální. Na obrázku 2-8 je vidět příklad dotykové sondy s tlakovým přenosem signálu. Oproti optické sondě je zde jinak uložen talíř a sonda má tlakové senzory. Spínací impuls je vytvářen silou a ta je přenesena na spínací talíř, který působí na tlakové senzory. Sonda s tlakovým přenosem signálu je součástí vybavení RTI a bude použita pro provedení experimentu. [11][1]



Obrázek 2-8 Optický přenos [11]



Obrázek 2-7 Tlakový přenos [11]

**Skenovací sondy** umožní snímat stovky bodů z povrchu. Při měření je sonda neustále v kontaktu s povrchem součásti. Větší počet nasnímaných bodů zajistí i větší přesnost měření a také přesnější vyhodnocení tvaru měřené součásti. [7][12][1]

Sondy zajišťují správné načtení dotyku mezi dílem a strojem CMM.

## 2.4 Typy dotyků

V současné době existuje mnoho typů dotyků. Použití ovlivňuje tvar měřeného tvaru, požadovaná přesnost, ale i prostředí a materiál měřené součásti.

### 2.4.1 Materiál měřeného objektu

Zvolení správného dotyku závisí na materiálu, ze kterého je součást vyrobena. Různé materiály mají různé tvrdosti a vlastnosti, které mohou ovlivnit výběr správného dotyku. Nejčastější materiály pro výrobu doteku jsou:

**a) rubín** – nejpoužívanější materiál. Hodí se pro běžné měřicí metody. Lze vyrobit doteky malých průměrů již od 0,12mm. [7][12]

**b) nitrid křemíku** – jsou často používané stejně jako rubínové, ale nejčastěji se používají pro měření hliníkových součástí, jelikož nitrid křemíku odpuzuje hliník a ten se na kuličce neusazuje. [7][12]

**c) keramika** – jsou málo porézní. Nabízejí se ve velmi přesných variantách a také ve velkých rozměrech. Díky vlastnostem keramiky jsou vhodné pro měření drsných povrchů, například litiny. [7][12]

**d) karbid wolframu** – má vysokou hmotnost, ale jeho vlastnosti umožňují výrobu speciálních průměrů, a proto je vhodný pro měření ozubených kol. [7][12]

**e) doteky s diamantovým povlakem** – díky tomuto povlaku je kulička velmi tvrdá, a proto nedochází tolik k otěru jako například u ostatních materiálů. Jsou vhodné pro měření měkkých materiálů a také pro měření skleněných a zrcadlových povrchů, protože je nepoškodí.[7][12]

**f) diamant** – má podobné vlastnosti jako doteky s diamantovým povlakem. Je vhodný pro měření vysoce tvrdých a abrazivních materiálů.[7][12]

#### 2.4.2 Geometrie měřeného objektu

Tvar a geometrie měřeného objektu mohou ovlivnit výběr dotyku. Pokud je objekt složitý nebo má mnoho různých tvarů, musíme použít různé typy dotyků. Nejčastější typy doteků jsou [12]:

- a) přímé
- b) hvězdicové
- c) válcové
- d) půlkulové
- e) diskové

#### 2.4.3 Tolerance měření

Přesnost a citlivost měření závisí na typu dotyku, který je použit. Pokud je potřeba velmi přesné měření, je nutné zvolit dotyk s vysokou citlivostí. Rubínové doteky se například vyrábějí ve dvou stupních přesnosti. Označují se Grade 5 nebo Grade 10. Hodnota se vztahuje k tvarové odchylce doteku k ideální kouli. Z toho vyplývá, že čím menší hodnota je, tím větší přesnosti dotek dosahuje. U stupně přesnosti Grade 5 je tvarová úchylka 0,13 mikrometru a u doteku s tvarovou přesností Grade 10 je tvarová úchylka 0,25 mikrometru. Pro potřebu přesnějšího měření se vyrábějí doteky s přesností Grade 3, které mají tvarovou úchylku pouze 0,08 mikrometru. To zajistí velmi přesné měření. [7][12]

#### 2.4.4 Velikost a délka dotyku

Délka dotyku by měla být dostatečná k dosažení všech bodů měřeného objektu, ale zároveň dostatečně krátká, aby minimalizovala chyby měření vzniklé ohýbáním doteku z důvodu nízké tuhosti doteku. Velikost dotyku by měla být volena tak, aby byl schopen dosáhnout všech potřebných bodů. Velikost se nejčastěji určuje za pomoci vzorce uvedeného níže (1). Délka stopky doteku se vyrábí z různých materiálů pro různé použití.[7][12] Nejčastěji se využívá materiálu:

**a) keramika** – tento materiál poskytuje vysokou tuhost a díky nízké hustotě i dobrou hmotnost. Další výhodou je, že při kolizi se stopka roztříští a vytváří tak další ochranu měřicí sondy. Na obrázku 2-12 je vidět dotek s keramickou stopkou. Využívá se zejména pro dlouhé stopky doteků, kde se klade důraz především na hmotnost. [7][12]

**b) uhlíková vlákna** – jejich hlavní výhodou je lineární tepelná roztažnost, díky které jsou doteky využívány při měření s měnící se teplotou. Jejich další výhodou je dobrá tuhost a hmotnost. Dobrou vlastností je, že stopka z uhlíkového vlákna je nemagnetická. Celý dotek je vidět na obrázku 2-11.[7][12]

**c) karbid wolframu** – tyto stopky se dělají ve dvou konstrukcích v odstupňovaném provedení a v rovném provedení. Obě varianty jsou vidět na obrázku 2-10 a 2-9. V odstupňovaném provedení je největší výhodou, že stopka má u upnutí větší průměr, to znamená i větší tuhost, a tím pádem i stabilitu měření, avšak nevýhodou je, že se zkrátí využitelná délka stopky. Oproti tomu rovné provedení je jednodušší

na výrobu, ale proti předchozímu nemá tak dobrou tuhost. Doteky mají tu výhodu, že je využitelná skoro celá délka stopky, avšak musí se dát pozor na tuhost doteku.  
[7][12]



Obrázek 2-10 Karbid wolframu odstupňovaný [7]



Obrázek 2-9 Karbid wolframu rovný [7]



Obrázek 2-12 Keramická stopka [7]



Obrázek 2-11 Stopka z uhlíkových vláken [7]

#### 2.4.5 Prostředí a podmínky měření

Některé doteky mohou být vhodné pro specifická prostředí a podmínky měření, jako jsou například vysoké teploty nebo extrémní tlaky. Například v automobilovém průmyslu se může doteková sonda vystavit agresivním chemikáliím nebo vysokým teplotám. [7][12]

Výběr správného doteku pro měření na CMM může být složitý proces, který vyžaduje poznatky o měřeném objektu a možnostech dotekové sondy.

Práce se zaměřuje na řešení problematiky velikosti dotyku, která je jedním z faktorů, které je třeba zvážit při výběru dotyku pro měření na CMM. Správná velikost dotyku by měla být volena tak, aby byla v souladu se všemi předchozími body.

Při volbě velikosti dotyku je třeba vzít v úvahu několik faktorů:

- **Velikost měřeného objektu** – velikost dotyku by měla být přiměřená velikosti měřeného objektu. Pokud je měřený objekt menší, bude vyžadován menší dotyk, aby bylo možné dosáhnout všech měřených bodů. Pokud je měřený objekt větší, může být potřeba větší dotyk.
- **Tvar měřeného objektu** – tvar a geometrie měřeného objektu mohou ovlivnit velikost dotyku. Pokud má měřený objekt mnoho různých tvarů a kontur, může být nutné použít různé velikosti dotyků.
- **Požadovaná přesnost měření** – přesnost měření může být ovlivněna velikostí dotyku. Menší doteky mohou poskytnout vyšší přesnost měření, ale mohou být citlivější na vibrace a odchylky.
- **Typ dotyku** – různé typy dotyku mohou mít různé velikosti. Například konvenční doteky mají obvykle menší průměr než doteky s koulí.
- **Dostupnost měřených bodů** – velikost dotyku by měla být volena tak, aby byl schopen dosáhnout všech potřebných měřených bodů na měřeném objektu. Pokud jsou některé body měření obtížně dostupné, může být nutné zvolit dotyk s menší velikostí.

Celkově je tedy důležité zvolit správnou velikost doteku tak, aby byl schopen dosáhnout všech potřebných měřených bodů na měřeném objektu při zachování potřebné přesnosti měření a minimalizaci možných chyb.

Pro výpočet velikosti dotyku při měření vnitřních rozměrů se obvykle používá následující vzorec:

$$R = \frac{\pi \cdot d}{24} \quad (1)$$

kde:

R – maximální doporučený poloměr dotyku [mm]

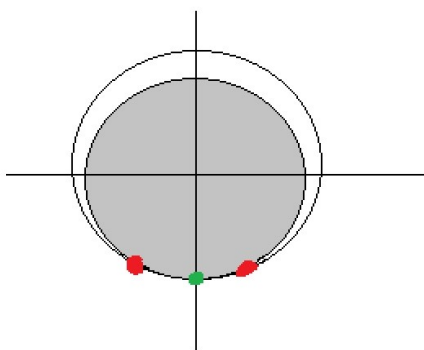
d – průměr měřeného vnitřního otvoru [mm]

$\pi$  - konstanta

Pro správné měření vnitřního otvoru je třeba zvolit takovou velikost dotyku, aby se dotyk dokázal dostat do otvoru a dosáhnout všech měřených bodů. Výška doteku se musí zvolit tak, aby bylo možné dosáhnout na stěnu otvoru a získat přesné hodnoty. Nejčastěji se pro měření vnitřních rozměrů používají doteky s kuličkou, které mají různé průměry.

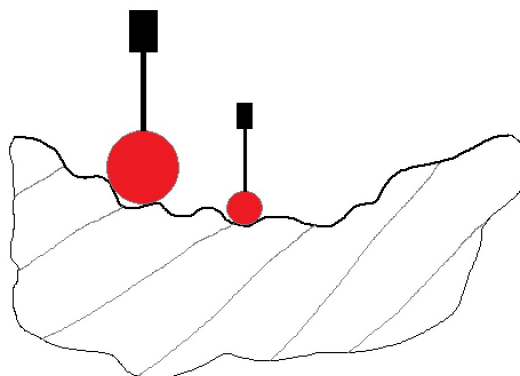
Je třeba mít na paměti, že velikost dotyku ovlivňuje celkovou přesnost měření, a proto by měla být volena pečlivě a s ohledem na požadovanou přesnost a dostupnost měřených bodů.

Při volbě velikosti doteku se může stát, že dotek bude moc velký, a to způsobí, že nemusí docházet ke kontaktu s měřeným tělesem ideálně na ose měření kuličky, viz. obrázek 2-13 zelený bod, ale mimo ni to lze vidět na obrázku 2-13, označeny červenými body. To vnese do měření chybu. Tento problém je patrný na obrázku 2-13.



Obrázek 2-13 Příliš velký dotek

Naopak při volbě až moc malého doteku se může stát, že nepřesnost povrchu vnese do měření chybu, jelikož dotek bude vnikat do velmi malých nepřesností. Tento problém je vidět na obrázku 2-14.



Obrázek 2-14 Porovnání velmi malého doteku a ideálního

## 2.5 Zaznamenávání hodnot

Hodnoty se získávají díky dotykové sondě. Tato sonda je upnuta v pinole stroje a pohybuje se současně s portálem. Sonda získá data, když se dotkne součásti, při dotyku sonda vyšle elektrický signál, který počítač zaznamená. Změřené body se následně vyhodnotí. Sondy mohou být dotykové, anebo skenovací. Hlavní výhodou skenovací sondy je počet získaných bodů z měření a přesnost získaných výsledků. Viz. kapitola 2.3

## 2.6 Měřicí vybavení laboratoře metrologie RTI

Stroj Zeiss Eclipse je portálový 3D měřicí stroj, který byl použit pro získání hodnot z testovaných vzorků. Tento stroj je vidět na obrázku 2-15. Využitelná měřicí plocha je vidět v tabulce 2-1 společně s dosahovanou přesností stroje. Tímto prostorem je tedy limitována i největší měřitelná součást. Pohyb stroje zajišťují vzduchová ložiska, která se pohybují po granitovém stole. Doteky se upínají do spínací hlavy za pomoci magnetů. Po upnutí je potřeba

dotek vyvážit. To se provede za pomoci otočení kroužku na spínací hlavě. Následně se dotek musí zkalibrovat za pomoci kalibrační koule.[7]

Využitelná plocha v ose X	700mm
Využitelná plocha v ose Y	1000mm
Využitelná plocha v ose Z	500mm
Přesnost stroje	$2,9+(L/250) \mu\text{m}$

Tabulka 2-1 hodnoty Zeiss Eclipse



Obrázek 2-15 Zeiss Eclipse

## 2.7 Geometrické tolerance

Tato práce je zaměřena na vyhodnocení odchylek tvaru a polohy rozměru. Za tímto účelem byly zvoleny tři geometrické tolerance u rotačních vzorků, těmi jsou průměr, válcovitost a kruhovitost.

**Kruhovitost** se používá pro vyhodnocení odchylky od přesné kružnice. Geometrickou značku lze vidět na obrázku 2-16, například vychýlení povrchu vůči středu referenční kružnice. Měření kruhovitosti je velmi důležité u rotačních součástí. [13]

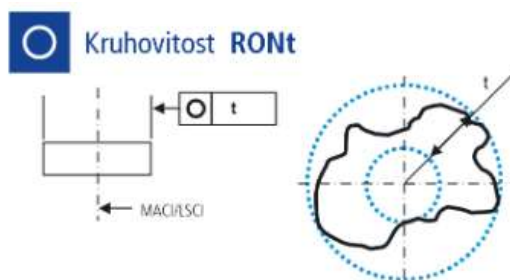
Existují čtyři základní typy referenčních kružnic.

- Metoda nejmenších čtverců referenční kružnice. Toto je nejběžnější z metod referenční kružnice. Využívá odchylky tvaru kružnice a vyhodnocuje je. Výsledná referenční kružnice je taková, že součet druhých mocnin odchylek menších, než referenční kružnice byl co nejvíce roven součtu druhých mocnin větších než referenční kružnice. [13]
- Minimální opsaná referenční kružnice – u tohoto typu je referenční kružnice nejmenší možná opsaná kružnice. Všechny body skutečného profilu musí ležet uvnitř této kružnice.[13]



- c) Minimální zóna referenční kružnice – tato metoda určuje dvě soustředné kružnice, které v mezikruží obsahují všechny body měřeného profilu. Jejich radiální vzdálenost je co nejmenší. [13]
- d) Maximální vepsaná referenční kružnice – u této metody je vepsaná kružnice skutečného profilu. Každý bod této kružnice se nachází mimo referenční hodnotu. [13]

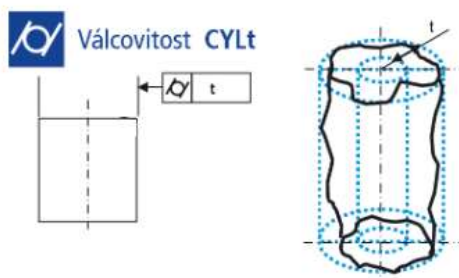
Kruhovitost se bude měřit pomocí 3D měřicího stroje tak, že změříme průměr kružnic a díky Gaussově metodě nejmenších čtverců získáme kruhovitost.



Obrázek 2-16 Kruhovitost [14]

**Válcovitost** je odchylka měřeného válce od geometricky přesného válce. Válcovitost se bude vyhodnocovat ze třech kružnic. Tolerance válcovitosti je určena dvěma koaxiálními plochami se vzdáleností požadované tolerance. Geometrická značka je vidět na obrázku 2-17.[13][14]

Tolerance válcovitosti ohraničují odchylky kruhovitosti, přímosti povrchových přímek a rovnoběžnosti. Názorně je válcovitost zobrazena na obr. 2-17. [13][14]



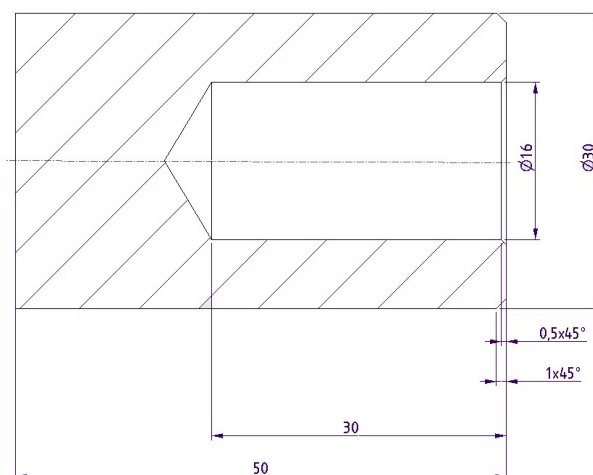
Obrázek 2-17 Válcovitost [14]

**Průměr** se bude také měřit pomocí 3D měřicího stroje. Systém sejme dotykovou hlavou vnitřní průměr součásti na několika bodech a následně vyhodnotí průměr otvoru.

### 3 Návrh experimentu a jejich vyhodnocení

#### 3.1 Volba vzorků

Pro vyhodnocení odchylky způsobené nedodržením vztahu pro volbu doteku byly zvoleny vrtané vzorky, jejichž tvar lze vidět na obrázku 3-1. Na vyvrtané díře se dobře promítnou odchylky od válcovitosti a kruhovitosti. Kdybychom zvolili přesně vyrobené otvory, byly by odchylky minimální. Pro měření byly zvoleny vzorky s vyvrtanými dírami s rozměry 6,5; 8,5; 10,5; 13; 16; 19,8mm. Díky odlišným průměrům budeme mít představu o změně velikosti doteku na průměru měřené díry. Vzorky budou vyvrtané do hloubky 30mm, aby bylo možné provést měření ve třech řezech. Po volbě vzorků došlo na přípravu vzorků.



Obrázek 3-1 Výkres vzorku D16

#### 3.2 Příprava vzorků na měření

Vzhledem k odlišným průměrům vrtaných otvorů byly použity i různé rozměry doteků. Zvolená metoda vrtání byla vhodná k demonstraci odlišností mezi průměry doteků.

Měřené vzorky se nejdříve musely důkladně očistit. K očištění byla použita vata a líh. Následně se vzorky označily pro jednodušší orientaci. Před prvním měřením na kruhoměru se musela zkontrolovat hloubka vrtané díry, aby nedošlo ke kolizi mezi dnem díry a dotekem. Po zkontrolování hloubky a očištění od nečistot byly vzorky připraveny pro měření. Před jednotlivým měřením byly vzorky ještě ofouknuty stlačeným vzduchem. Následovalo měření na kruhoměru.

#### 3.3 Měření na kruhoměru

Kruhoměr je vhodný pro měření rotačních součástí. Díky vysoké kvalitě a dosahované přesnosti je oproti 3D měřicímu stroji daleko přesnější. Proto byl zvolen jako nejlepší metoda pro vyhodnocení kruhovitosti a válcovitosti. Jako dotek byla použita rubínová kulička s průměrem 1,5mm. Pro vyhodnocení válcovitosti a kruhovitosti bylo zvoleno 5 řezů. Vzorky byly měřeny do hloubky 15mm s konstantním krokem 3,75mm. Na obrázku 3-2 je vidět pracoviště kruhoměru, na kterém bylo měření provedeno. Z tabulky 3-1 lze vyčíst nastavení měření a toleranci kruhoměru.

















### 3.4 Měření na 3D měřicím stroji se skenovací hlavou

Měření na 3D měřicím stroji se skenovací hlavou má oproti studentskému 3D měřicímu stroji tu výhodu, že dotek je při snímání neustále v kontaktu s měřicí plochou. Díky této vlastnosti jsme získali mnohem více bodů a za kratší čas než u dotykové sondy. Oproti kruhoměru tento stroj dokáže jednodušeji změřit i průměr. Vzhledem ke větší přesnosti jsme mohli data získaná pomocí tohoto stroje dále porovnávat se získanými daty ze studentského měřicího stroje.

Všechny vzorky byly změřeny v různých hloubkách. Na obrázku 3-4 je vidět protokol získaný z měření. Je zde vidět kruhovitost, válcovitost a průměr. Pro vyhodnocení výsledků byla zvolena Gaussova metoda nejmenších čtverců. Poté se data zaznamenala do tabulky. Data z tohoto 3D měřicího stroje a data z kruhoměru se následně použijí jako etalonová hodnota pro další práci. V tabulce 3-2 lze vidět nastavení stroje a také dosahovaná přesnost.

Tolerance	$0,9+(L/350) \mu\text{m}$
Počet bodů měření	500; 10
Maximální hloubka měření vzorku	19mm
Velikost doteku	1,5mm

Tabulka 3-2 hodnoty CMM se skenovací hlavou

Regionální technologický institut - Laboratoř RTI - pracoviště LDM					
Regional technological institute - RTI Laboratory - Workplace LDM					
Zkouška č. (Test no.): 054-22					
Plán měření 054-22-KTO-DP_Casa-Vzorek_13		Datum krátce 16.11.22		Metoda LDM_OP1	
Číslo výkresu		Čas 7:55:59		Tepl. souč.	
Operátor Dana Kubátová		Stroj * LDM 15/003 *		Č. dílu inkrementálně 13	
Délková jednotka mm					
Stránka 1 / 2					
Mer	Jmen	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka	
	2-bod.průměr1^Min 13.063 v hloubce 1 mm od čela	13.000	0.100	-0.100	--- 0.063
	2-bod.průměr1^Max 13.104 v hloubce 1 mm od čela	13.000	0.100	-0.100	0.004 0.104
	Kruhovitost1 0.049 v hloubce 1 mm od čela	0.000	0.000		0.049 0.049
	2-bod.průměr2^Min 13.040 v hloubce 5,5 mm od čela	13.000	0.100	-0.100	-- 0.040
	2-bod.průměr2^Max 13.054 v hloubce 5,5 mm od čela	13.000	0.100	-0.100	--- 0.054
	Kruhovitost2 0.013 v hloubce 5,5 mm od čela	0.000	0.000		0.013 0.013
	2-bod.průměr3^Min 13.045 v hloubce 10 mm od čela	13.000	0.100	-0.100	-- 0.045
	2-bod.průměr3^Max 13.054 v hloubce 10 mm od čela	13.000	0.100	-0.100	--- 0.054
	Kruhovitost3 0.007 v hloubce 10 mm od čela	0.000	0.000		0.007 0.007
	2-bod.průměr4^Min 13.034 v hloubce 14,5 mm od čela	13.000	0.100	-0.100	-- 0.034
Mer	Jmen	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka	
	2-bod.průměr4^Max 13.043 v hloubce 14,5 mm od čela	13.000	0.100	-0.100	-- 0.043
	Kruhovitost4 0.010 v hloubce 14,5 mm od čela	0.000	0.000		0.010 0.010
	2-bod.průměr5^Min 13.037 v hloubce 19 mm od čela	13.000	0.100	-0.100	-- 0.037
	2-bod.průměr5^Max 13.045 v hloubce 19 mm od čela	13.000	0.100	-0.100	-- 0.045
	Kruhovitost5 0.008 v hloubce 19 mm od čela	0.000	0.000		0.008 0.008
	Válcovitost1 0.050	0.000	0.000		0.050 0.050

Obrázek 3-4 protokol ze CMM se skenovací hlavou

### 3.5 Volba doteků a počet bodů měření pro studentské CMM

Nejprve se pro zahájení experimentu musely zvolit vhodné doteky k měření. Doteky byly voleny podle vzorce (1). Od výsledné hodnoty se odvíjel i menší a větší rozměr doteku. Počet bodů závisí na požadované přesnosti, ale také na času a živostnosti dotyku. S ohledem na všechny tyto požadavky bylo zvoleno 10 bodů jak na měření roviny, tak i kružnice. Tento počet bude vyhovovat v požadované přesnosti a časově nebude náročný. Materiál dotyku byl zvolen rubín v závislosti na materiálu vzorků. Vzorky byly vyrobeny z oceli, a proto byl rubín nejlepší volbou. Použité doteky jsou vidět na obrázku 3-5.



Obrázek 3-5 Zvolené doteky

### 3.6 Příprava programů pro měření

Před samotným měřením byly vytvořeny v měřicím programu Calypso 2021 programy pro jednotlivé vzorky. V programu se nastavily měřené elementy: rovina a kružnice, které sloužily k manuálnímu vyrovnání. Dále se nastavily kružnice, které se odsadily v hloubce Z. Následně se zvolily charakteristiky měření: průměr, kruhovitost a válcovitost. Poté se upravily strategie měření na kruhové a počet měřených bodů na 10. Takto připravené programy se pak využily jako šablona pro šest měřených válečků.

### 3.7 Měření na studentském 3D měřicím stroji.

Před spuštěním programu bylo nutno zkalibrovat veškeré použité doteky. Kalibrace byla provedena za použití kalibrační koule. Ta se před měřením očistila speciálním hadříkem. Kalibraci lze vidět na obrázku 3-6. Po zkalibrování všech doteků už bylo možné začít s měřením. Pro měření byl využit software Calypso 2021, tento software je přímo od výrobce stroje, tedy Carl Zeiss spol. s.r.o. Po spuštění programu bylo třeba vybrat měřené elementy a poté těmto elementům přiřadit charakteristiky měření. U vnitřních děr se vyhodnotil průměr válcovitost a kruhovitost. Tyto geometrické charakteristiky se vyhodnotily pomocí 10 získaných bodů. Následně se měřený váleček ustavil na granitový stůl a připevnil za pomoci modelíny, aby byl zamezen pohyb součásti v důsledku měření. Poté bylo provedeno manuální vyrovnání. Následně byl stroj přepnut do automatického režimu a provedlo se měření. Měření se uskutečnilo ve třech řezech válce v každém po 10 bodech a každé měření se zopakovalo

pětkrát, aby bylo možno následně zprůměrovat změřené hodnoty a předešlo se tak vzniku chyb při jednom měření.

Pro každý měřený válec se zvolily tři doteky, jeden vypočtený optimální, následně jeden větší dotek a jeden menší. Měření proběhlo se třemi doteky u každého ze šesti válečků. Bylo zapotřebí upravit měřicí program v závislosti na vybrané doteky, zvláště na délku dřívku. Na obrázku 3-7 probíhá měření vzorku D19,8.



Obrázek 3-6 Kalibrace



Obrázek 3-7 Měření D19,8

Na obrázku 3-8 je vidět protokol pro válec s průměrem 16mm, který je získaný z měření na studentském stroji. Z protokolu je patrná kruhovitost, válcovitost a průměr. Kruhovitost a průměr byly vyhodnoceny ve třech řezech v různých hloubkách v závislosti na použité doteky. Pro konkrétní válec s vyvrtaným průměrem D16mm je hloubka měření 3, 5 a 8mm. V tabulce 3-3 jsou vidět všechny použité doteky pro dané průměry vzorků. Pro každý vzorek jsou dány tři zvolené rozměry doteků. Vždy jeden vypočítaný, jeden menší, a naopak jeden větší.

Vzorky	Doteky		
	menší	vypočítaný	větší
D6,5mm	1 (34%)	1,5	2 (33%)
D8,5mm	1,5 (25%)	2	3 (50%)
D10,5mm	1,5 (25%)	2	3 (50%)
D13mm	2 (34%)	3	5 (66%)
D16mm	2 (34%)	3	5 (66%)
D19,8mm	3 (40%)	5	8 (60%)

Tabulka 3-3 použitých doteků

ZEISS Calypso					
Plán měření Válec D16		Datum 20. ledna 2023		ZEISS	
Číslo výkresu * drawingno *		Čas 12:21:55		Zakázka * order *	
Operátor Master		Stroj C32Bit		Č.dilu inkrementálně 3	
Mer	Jmen	Horní tol.	Došní tol.	Odchyška	
	Prumer1 h3 16.063	16.056	0.100	-0.100	± 0.007
	Prumer2 h5 16.063	16.056	0.100	-0.100	± 0.007
	Prumer3 h8 16.065	16.056	0.100	-0.100	± 0.010
	Kruhovitost1 h3 0.009	0.000	0.000		0.009 0.009
	Kruhovitost2 h5 0.004	0.000	0.000		0.004 0.004
	Kruhovitost3 h8 0.004	0.000	0.000		0.004 0.004
	Válcovitost1 0.009	0.000	0.000		0.009 0.009

Obrázek 3-8 Protokol studentské CMM

### 3.8 Vyhodnocení výsledků

Pro vyhodnocení výsledků byl použit program Microsoft Excel. Z každého válečku byla změřena kruhovitost, válcovitost a průměr. Data byla získána pomocí 5 náměrů ve třech hloubkách po 10 bodech s doteky z tabulky 3-3. V tabulce 3-4, 3-5 a 3-6 jsou vidět všechna změřená data vzorku s průměrem vrtané díry 19,8mm ze studentského 3D měřicího stroje. Data z pěti náměrů byla následně zprůměrována a poté se tyto zprůměrované hodnoty mohly začít porovnávat s hodnotami získanými z kruhoměru anebo přesnějšího 3D měřicího stroje.

#### 3.8.1 Data ze studentského 3D měřicího stroje

Následující tabulky 3-4; 3-5 a 3-6 uvádí naměřené hodnoty ze studentského 3D měřicího stroje pro jeden konkrétní vzorek. Vzorek s průměrem 19,8mm byl naměřen se třemi velikostmi doteků. S dotekem vypočítaným ze vztahu (1), ten představoval dotek s průměrem kuličky 5mm. Poté se zvoleným větším dotekem, a to byl dotek s průměrem kuličky 8mm a dále zvolený menší dotek, ten byl s průměrem kuličky 3mm. Každý z doteků měřil pětkrát ve třech hloubkách, v hloubce 5, 12 a 17mm. Počet bodů byl zvolen na 10. Hodnoty uvedené v následujících tabulkách 3-4; 3-5 a 3-6 jsou uvedeny v milimetrech.



<b>D19,8 dotek 5 hloubka 5mm</b>	1.měření	2.měření	3.měření	4.měření	5.měření
průměr	19,83	19,83	19,829	19,829	19,83
kruhovitost	0,013	0,012	0,013	0,013	0,012
válcovitost	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
<b>D19,8 dotek 5 hloubka 12mm</b>	1	2	3	4	5
průměr	19,829	19,829	19,828	19,828	19,829
kruhovitost	0,004	0,005	0,004	0,005	0,005
<b>D19,8 dotek 5 hloubka 17mm</b>	1	2	3	4	5
průměr	19,825	19,824	19,824	19,825	19,825
kruhovitost	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006

Tabulka 3-4 Dotek 5mm měření vzorku D19,8

<b>D19,8 dotek 8 hloubka 5mm</b>	1.měření	2.měření	3. měření	4. měření	5. měření
průměr	19,831	19,831	19,831	19,83	19,83
kruhovitost	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
válcovitost	0,012	0,013	0,012	0,012	0,012
<b>D19,8 dotek 8 hloubka 12mm</b>	1	2	3	4	5
průměr	19,829	19,829	19,829	19,83	19,83
kruhovitost	0,004	0,005	0,004	0,004	0,005
<b>D19,8 dotek 8 hloubka 17mm</b>	1	2	3	4	5
průměr	19,826	19,826	19,826	19,826	19,826
kruhovitost	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005

Tabulka 3-5 Dotek 8mm měření vzorku D19,8

<b>D19,8 dotek 3 hloubka 5mm</b>	1.měření	2.měření	3.měření	4.měření	5.měření
průměr	19,829	19,83	19,83	19,83	19,829
kruhovitost	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
válcovitost	0,016	0,015	0,016	0,016	0,016
<b>D19,8 dotek 3 hloubka 12mm</b>	1	2	3	4	5
průměr	19,829	19,829	19,829	19,829	19,829
kruhovitost	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
<b>D19,8 dotek 3 hloubka 17mm</b>	1	2	3	4	5
průměr	19,822	19,822	19,822	19,822	19,822
kruhovitost	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003

Tabulka 3-6 Dotek 3mm měření vzorku D19,8

### 3.8.2 Data z kruhoměru

Tabulka 3-7 zobrazuje data získaná pomocí kruhoměru. V tabulce jsou uvedené kruhovitosti v jednotlivých hloubkách a celková válcovitost jednotlivých vzorků. Hodnoty jsou uvedené v milimetrech.

Kruhoměr	D6,5mm	D8,5mm	D10,5mm	D13mm	D16mm	D19,8mm
válcovitost	0,07699	0,08507	0,0169	0,03949	0,0193	0,05145
kruhovitost v hloubce 1mm	0,00431	0,00551	0,01105	0,03704	0,01262	0,05263
hloubka 4,75	0,00576	0,00587	0,00688	0,00904	0,00625	0,00467
hloubka 8,5	0,00918	0,01804	0,00888	0,006	0,0107	0,00654
hloubka 12,25	0,00901	0,01893	0,0031	0,00591	0,01149	0,00368
hloubka 16	0,01422	0,03118	0,01149	0,00587	0,00868	0,00607

Tabulka 3-7 naměřená data z kruhoměru

### 3.8.3 Data ze 3D měřicího stroje se skenovací hlavou

Následující tabulka 3-8 a 3-9 zobrazuje data získaná pomocí 3D měřicího stroje se skenovací hlavou. V tabulkách jsou zanesena měření válcovitosti, průměru a kruhovitosti. Stejně jako u kruhoměru jsou data v tabulce uvedena v milimetrech. Označení průměr h1 znamená průměr v hloubce 1mm od čela vzorku. Tabulka je uvedena v milimetrech.

3D měření	D6,5mm	D8,5mm	D10,5mm	D13mm	D16mm	D19,8mm
válcovitost	0,075	0,086	0,017	0,05	0,04	0,072
průměr v h1	6,511	8,54	10,226	13,083	16,084	19,898
průměr h5,5	6,51	8,539	10,226	13,046	16,071	19,836
průměr h10	6,512	8,537	10,222	13,049	16,071	19,833
průměr h14,5	6,523	8,547	10,224	13,041	16,063	19,824

Tabulka 3-8 Měření průměru a válcovitosti

3D měření	D6,5mm	D8,5mm	D10,5mm	D13mm	D16mm	D19,8mm
kruhovitost h1	0,011	0,007	0,017	0,049	0,041	0,068
kruhovitost h5,5	0,008	0,008	0,009	0,013	0,011	0,014
kruhovitost h10	0,011	0,016	0,005	0,007	0,01	0,009
kruhovitost h14,5	0,008	0,017	0,006	0,01	0,012	0,004
kruhovitost h19	0,017	0,034	0,006	0,008	0,012	0,005

Tabulka 3-9 Měření kruhovitosti

### 3.8.4 Data ze 3D měřicího stroje se skenovací hlavou za použití 10 bodů

V další tabulce 3-10 a 3-11 lze vidět data změřená za pomoci 3D měřicího stroje se skenovací hlavou, ale k měření bylo použito jen deset bodů. Značení je jako v předchozích tabulkách. Data jsou v milimetrech.

3D sken 10 bodů	D6,5mm	D8,5mm	D10,5mm	D13mm	D16mm	D19,8mm
válcovitost	0,069	0,078	0,012	0,043	0,03	0,057
průměr h1mm	6,515	8,541	10,227	13,081	16,076	19,894
průměr h5,5mm	6,514	8,539	10,226	13,045	16,066	19,833
průměr h10mm	6,515	8,54	10,223	13,05	16,066	19,83
průměr h14,5mm	6,525	8,55	10,225	13,042	16,061	19,823

Tabulka 3-10 Měření válcovitosti a průměru na 3D skenu s 10 body

3D sken 10 bodů	D6,5mm	D8,5mm	D10,5mm	D13mm	D16mm	D19,8mm
kruhovitost h1mm	0,009	0,005	0,011	0,042	0,031	0,059
kruhovitost h5,5mm	0,006	0,006	0,005	0,009	0,004	0,009
kruhovitost h10mm	0,007	0,009	0,003	0,005	0,008	0,005
kruhovitost h14,5mm	0,007	0,011	0,004	0,006	0,003	0,002
kruhovitost h19mm	0,012	0,024	0,003	0,004	0,006	0,003

Tabulka 3-11 Měření kruhovitosti na 3D skenu s 10 body

### 3.8.5 Zprůměrování hodnot ze studentského CMM

V následující tabulce 3-12 jsou zaznamenána data vypočtených aritmetických průměrů pro pět náměrů na studentském 3D měřicím stroji. Tabulka 3-12 je výsledkem pro dotek 8mm. Hodnoty jsou zprůměrovány z tabulek 3-4, 3-5 a 3-6, ve které jsou uvedeny hodnoty z pěti náměrů vzorku D19,8. Hodnoty jsou průměrovány v jednotlivých hloubkách. Takto se postupovalo u všech tří velikostí doteků. Následně se zprůměrovaná data přenesla do grafů.

Studentský 3D měřicí stroj. Vzorek D19,8	Naměřené hodnoty
Průměrný naměřený průměr v hloubce 5mm	19,8306mm
Průměrná naměřená kruhovitost v hloubce 5mm	0,012mm
Válcovitost	0,0122mm
Průměrný naměřený průměr v hloubce 12mm	19,8294mm
Průměrná naměřená kruhovitost v hloubce 12mm	0,0044mm
Průměrný naměřený průměr v hloubce 17mm	19,826mm
Průměrná naměřená kruhovitost v hloubce 17mm	0,005mm

Tabulka 3-12 Zprůměrované hodnoty pro D19,8

## 3.9 Porovnání naměřených dat

V každém grafu je vidět srovnání kruhoměru, 3D měřicího stroje se skenovací hlavou s počtem bodů 500 a 10 a studentského 3D měřicího stroje s různými velikostmi doteků. Pro studentské CMM byla použita zprůměrovaná data z tabulky 3-12. Do grafů je zanesena i nejistota strojů.

### 3.9.1 Výpočet nejistoty měření

Z tabulky 3-1, 3-2 a 2-1 lze vyčíst tolerance použitých přístrojů. Kruhoměr je oproti 3D měřicím strojům natolik přesný, že se mohla jeho odchylka zanedbat. Rovnice (2) je výpočet odchylky pro studentský měřicí stroj. Rovnice (3) je pro přesnější 3D měřicí stroj se skenovací hlavou.

$$Odchylka_{stud.} = 2,9 + \left(\frac{L}{250}\right) = 2,9 + \left(\frac{0,0198}{250}\right) = \pm 2,9\mu\text{m} \quad (2)$$

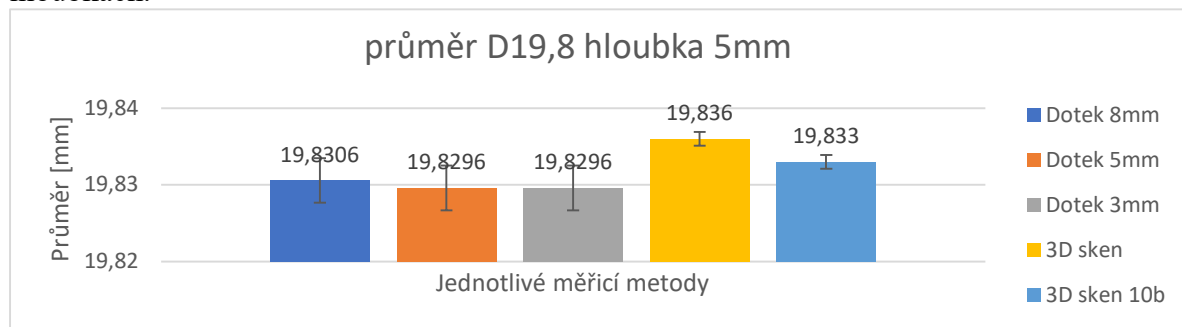
$$Odchylka_{sken} = 0,9 + \left(\frac{L}{350}\right) = 0,9 + \left(\frac{0,0198}{350}\right) = \pm 0,9\mu\text{m} \quad (3)$$

L – měřená délka v metrech

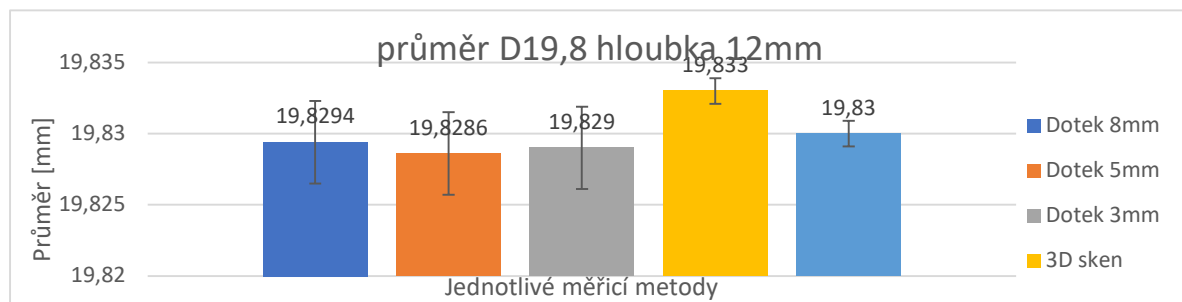
### 3.9.2 Grafy průměrů

Prvním krokem vyhodnocení bylo zaznamenání dat do sloupcových grafů.

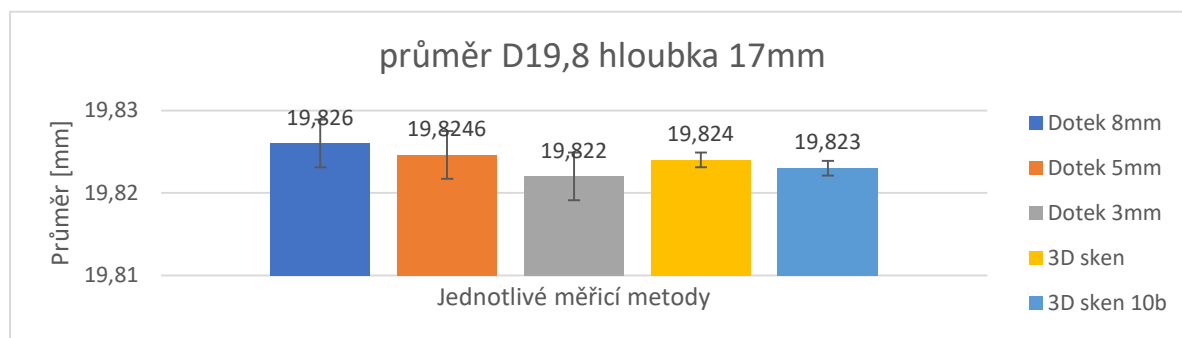
Následující grafy 3-1, 3-2 a 3-3 představují měření průměrů pro konkrétní vzorek D19,8 ve třech různých hloubkách. V grafech je vidět rozdíl hodnot pro jednotlivé doteky v různých hloubkách.



Graf 3-3 Průměr vzorku D19,8 v hloubce 5 mm



Graf 3-1 Průměr vzorku D19,8 v hloubce 12mm

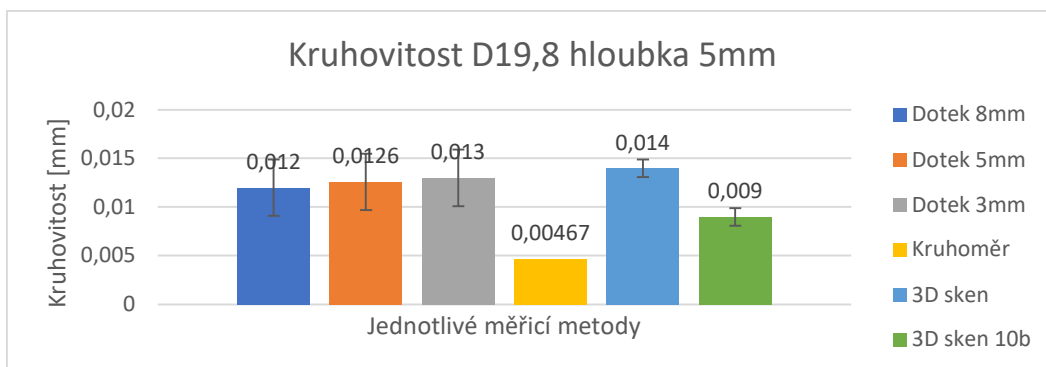


Graf 3-2 Průměr vzorku D19,8 v hloubce 17mm

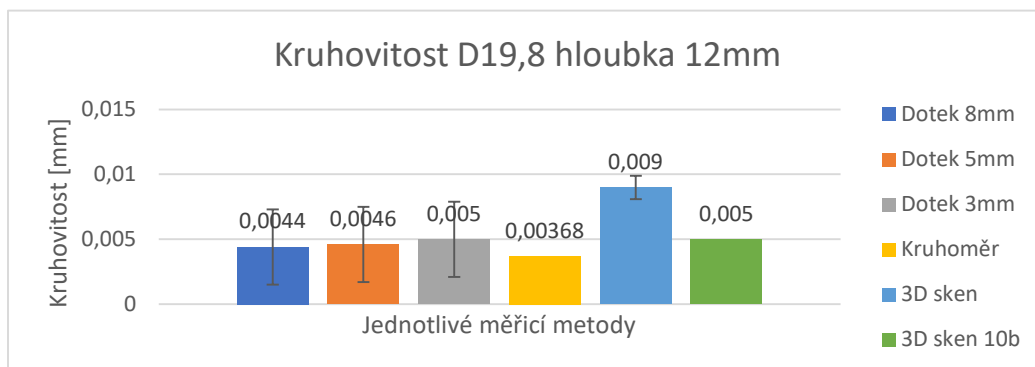
Z grafů pro průměr je možné vyčíst konkrétní číslo pro konkrétní hodnotu měření. Je to ale velmi obtížné, a proto interpretujeme výsledky v kapitole 3.10, kde bylo použita procentuální odchylka od etalonové hodnoty.

### 3.9.3 Grafy kruhovitostí

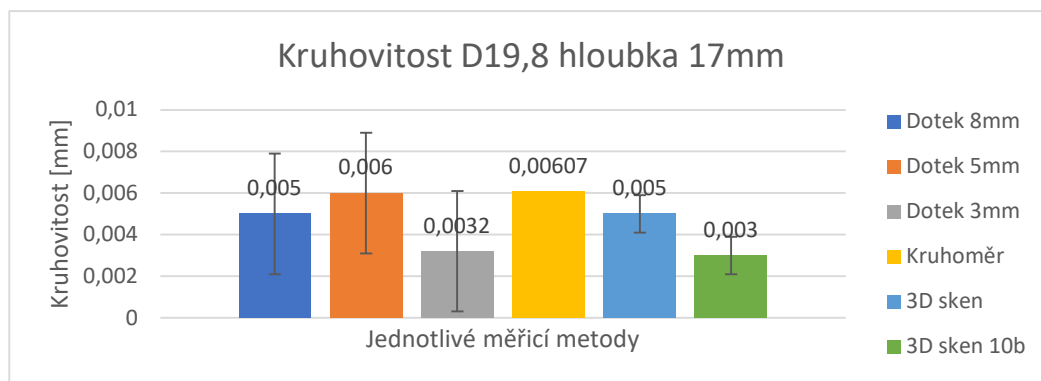
Následující grafy 3-4, 3-5 a 3-6 představují měření kruhovitosti pro vzorek D19,8mm. Měření proběhlo ve hloubkách 5,12 a 17mm. Zde už jsou patrné větší rozdíly mezi naměřenými hodnotami.



Graf 3-4 Kruhovitost vzorku D19,8 v hloubce 5mm



Graf 3-5 Kruhovitost vzorku D19,8 v hloubce 12mm

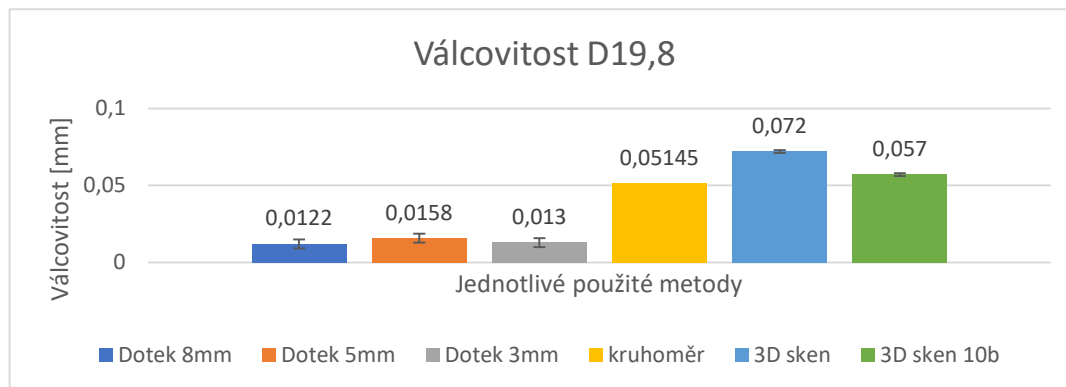


Graf 3-6 Kruhovitost vzorku D19,8 v hloubce 17mm

Stejně jako u průměru byla data vyhodnocena přes procentuální odchylku od etalonové hodnoty v kapitole 3.11, protože výsledky byly nejasné a bylo by velmi obtížné až nemožné z grafu vyčíst konkrétní hodnoty.

### 3.9.4 Graf válcovitosti

Jako poslední byla měřena válcovitost. Další graf 3-7 zobrazuje válcovitost vzorku s průměrem vrtané díry 19,8mm. Na grafu 3-7 lze vidět, že u měření kruhoměrem, 3D skenem a 3D skenem s 10 b., které mohly využít celou hloubku vrtané díry, daly daleko lepší představu o válcovitosti vzorku než studentský 3D měřicí přístroj, který měl omezené doteky, kterými nebylo možné provést měření v celé hloubce vrtané díry.



Graf 3-7 Válcovitost D19,8

Z grafu 3-7 lze vidět, že doteky použité na studentském 3D měřicím stroji nedokázaly změřit válcovitost v celé hloubce, a proto jsou výsledky u kruhoměru, 3D skenu a 3D skenu s 10 b. dosti odlišné. U studentského 3D měřicího stroje vychází hodnoty válcovitosti vynikající, nicméně je třeba je porovnat s ostatními. I přes poměrně jasnou grafovou interpretaci se data vyhodnotila přes procentuální odchylku v kapitole 3.11.

## 3.10 Vyhodnocení dat

### 3.10.1 Vyhodnocení průměru

Pro vyhodnocení dat byla použita tabulka 3-13 s odchylkami měření vůči nejpřesnějšímu použitému stroji. Pro průměr byly jako etalon použity výsledky ze 3D měřicího stroje se skenovací hlavou. Pro vyhodnocení kruhovitosti a válcovitosti byla jako etalonová hodnota využita kruhoměrová hodnota. Následně se určila procentuální odchylka od etalonů.

V tabulce 3-13 lze vidět procentuální odchylky od etalonových hodnot. Etalonové hodnoty jsou vyznačeny zelenou barvou. V levé části tabulky jsou zapsané použité metody pro získání výsledků, jsou označeny modrou barvou. Pod řádkou odchylky jsou vidět procentuální odchylky od naměřených hodnot ze 3D měření se skenovací hlavou. Pod vzorky jsou uvedené hloubky měření.

Z vyhodnocení je patrné, že odchylky jsou v řádech desetin procent. Pro tento účel lze zanedbat odchylky do 5 %, do této hodnoty je odchylka přijatelná. Z výsledných hodnot je tedy patrné, že pro měření průměrů je menší nebo naopak větší dotek zvolený v rozsahu padesáti procent od stanoveného vzorce použitelný

U všech použitých metod se výsledky od sebe skoro neliší.

Průměry [mm]	D19,8			D16			D13,5			D10,5			D8,5			D6,5		
	h=5mm	h=12mm	h=17mm	h=3mm	h=5mm	h=8mm	h=2mm	h=5mm	h=8mm	h=2mm	h=5mm	h=8mm	h=1,5mm	h=5mm	h=8mm	h=1,5mm	h=3mm	h=4mm
3D sken	19,84	19,83	19,82	16,07	16,07	16,07	13,05	13,05	13,05	10,23	10,22	10,22	8,54	8,54	8,54	6,51	6,51	6,51
největší dotek	19,83	19,83	19,83	16,06	16,06	16,07	13,04	13,04	13,05	10,22	10,22	10,22	8,54	8,54	8,54	6,51	6,51	6,51
vypočítaný dotek	19,83	19,83	19,82	16,06	16,06	16,07	13,04	13,04	13,05	10,22	10,22	10,22	8,59	8,54	8,54	6,51	6,51	6,51
nejmenší dotek	19,83	19,83	19,82	16,06	16,06	16,07	13,04	13,04	13,05	10,22	10,22	10,22	8,54	8,54	8,54	6,51	6,51	6,51
3D sken 10b	19,83	19,83	19,82	16,07	16,07	16,07	13,05	13,05	13,05	10,23	10,22	10,22	8,54	8,54	8,54	6,52	6,51	6,51
odchylky [%]																		
největší dotek	0,03	0,02	-0,01	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02
vypočítaný dotek	0,03	0,02	0,00	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,00	0,00	-0,56	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
nejmenší dotek	0,03	0,02	0,01	0,05	0,05	0,04	0,03	0,01	0,02	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02
3D sken 10b	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,04	-0,06	-0,06	-0,06

Tabulka 3-13 Průměry

Ukázka výpočtu odchylky u vzorku D19,8.

$$odchylka = 100 - \left( 100 \cdot \frac{19,8306}{19,836} \right) = 0,03\% \quad (4)$$

Takto se provedl výpočet u všech hodnot v tabulce 3-13.

### 3.10.2 Vyhodnocení kruhovitosti

Pro vyhodnocení kruhovitosti byla použita stejná metoda jako u průměrů, ale s tou odlišností, že jako etalonová hodnota byla použita hodnota z kruhoměru. Podobně jako v předchozí tabulce je v levé části znázorněna použitá metoda. V první řádce tabulky 3-14 je hloubka, ve které bude kruhovitost vyhodnocena. Pořadí je stejné jako v předchozí tabulce, a tedy od největšího průměru po nejmenší a na každý průměr vycházejí tři sloupce. Hodnoty jsou udávány také jako procentuální odchylka od etalonové hodnoty. Znaménko mínus odkazuje, že hodnota je menší než etalonová hodnota naměřená kruhoměrem. Naopak kladné znaménko značí, že hodnota je větší než etalonová.

Vyhodnocení výsledků je oproti průměru o dost nejasnější. Odchylky se pohybují od jednotek do stovek procent.

Měření kruhovitosti odlišnými velikostmi doteků se projevilo v závislosti na hloubkách měření. Až na vzorek D19,8 se u všech vzorků ukázalo, že při největší hloubce měření je odchylka mezi největším použitým dotekem a nejmenším do 5 % od etalonové hodnoty. U vzorků D6,5; D8,5; 10,5; 13,5 jsou odchylky ve střední hloubce taktéž do 5 %. Největší odchylky se projevují v nejmenší měřené hloubce.

Kruhovitost [mm]	D19,8			D16			D13			D10,5			D8,5			D6,5		
	h=5mm	h=12mm	h=17mm	h=3mm	h=5mm	h=8mm	h=2mm	h=5mm	h=8mm	h=2mm	h=5mm	h=8mm	h=1,5mm	h=5mm	h=8mm	h=1,5mm	h=3mm	h=4mm
3D sken	0,0140	0,0090	0,0050	0,0110	0,0110	0,0100	0,0110	0,0130	0,0170	0,0070	0,0080	0,0160	0,0070	0,0080	0,0160	0,0110	0,0110	0,0080
největší dotek	0,0120	0,0044	0,0050	0,0092	0,0050	0,0040	0,0050	0,0216	0,0090	0,0036	0,0062	0,0056	0,0036	0,0062	0,0066	0,0070	0,0046	0,0070
vypočítaný dotek	0,0126	0,0046	0,0060	0,0098	0,0038	0,0040	0,0038	0,0218	0,0090	0,0032	0,0060	0,0060	0,0032	0,0060	0,0060	0,0072	0,0044	0,0072
nejmenší dotek	0,0130	0,0050	0,0032	0,0090	0,0040	0,0040	0,0040	0,0218	0,0092	0,0040	0,0058	0,0064	0,0040	0,0058	0,0064	0,0072	0,0046	0,0072
Kruhoměr	0,0047	0,0037	0,0061	0,0063	0,0063	0,0107	0,0063	0,0090	0,0111	0,0055	0,0059	0,0180	0,0055	0,0059	0,0180	0,0043	0,0058	0,0058
3D sken 10b	0,0090	0,0050	0,0030	0,0040	0,0040	0,0080	0,0040	0,0420	0,0110	0,0050	0,0060	0,0090	0,0050	0,0060	0,0090	0,0090	0,0060	0,0060
odchylky [%]																		
největší dotek	-157,0	-19,6	17,6	-47,2	20,0	62,6	20,0	-198,9	18,6	34,7	-5,6	63,4	34,7	-5,6	63,4	-62,4	20,1	-21,5
vypočítaný dotek	-169,8	-25,0	1,2	-56,8	-56,8	62,6	39,2	-141,2	18,6	41,9	-2,2	66,7	41,9	-2,2	66,7	-67,1	23,6	-21,5
nejmenší dotek	-178,4	-35,9	47,3	-44,0	-44,0	62,6	36,0	-141,2	16,7	27,4	1,2	64,5	27,4	1,2	64,5	-67,1	20,1	-25,0
3D sken	-199,8	-144,6	17,6	-76,0	-76,0	6,5	-76,0	-43,8	-53,8	-27,0	-36,3	11,3	-27,0	-36,3	11,3	-155,2	-91,0	-38,9
3D sken 10b	-92,7	-35,9	50,6	36,0	36,0	25,2	36,0	-364,6	0,5	9,3	-2,2	50,1	9,3	-2,2	50,1	-108,8	-4,2	-4,2

Tabulka 3-14 Kruhovitost v závislosti na kruhoměru

Následně se provedlo vyhodnocení vůči 3D skenu s 10 body. To lze vidět v tabulce 3-15.

Kruhovitosti [mm]	D19,8			D16			D13,5			D10,5			D8,5			D6,5		
	h=5mm	h=12mm	h=17mm	h=3mm	h=5mm	h=8mm	h=2mm	h=5mm	h=8mm	h=2mm	h=5mm	h=8mm	h=1,5mm	h=5mm	h=8mm	h=1,5mm	h=3mm	h=4mm
3D sken	0,0140	0,0090	0,0050	0,0110	0,0050	0,0100	0,0110	0,0130	0,0170	0,0070	0,0080	0,0160	0,0070	0,0080	0,0160	0,0110	0,0110	0,0080
největší dotek	0,0120	0,0044	0,0050	0,0092	0,0050	0,0040	0,0050	0,0216	0,0090	0,0036	0,0062	0,0066	0,0036	0,0062	0,0066	0,0070	0,0046	0,0070
vypočítaný dotek	0,0126	0,0046	0,0060	0,0098	0,0038	0,0040	0,0038	0,0218	0,0090	0,0032	0,0060	0,0060	0,0032	0,0060	0,0060	0,0072	0,0044	0,0070
nejmenší dotek	0,0130	0,0050	0,0032	0,0090	0,0040	0,0040	0,0040	0,0218	0,0092	0,0040	0,0058	0,0064	0,0040	0,0058	0,0064	0,0072	0,0046	0,0072
kruhoměr	0,0047	0,0037	0,0061	0,0063	0,0063	0,0107	0,0063	0,0090	0,0111	0,0055	0,0059	0,0180	0,0055	0,0059	0,0180	0,0043	0,0058	0,0058
3D sken 10b	0,0090	0,0050	0,0030	0,0040	0,0040	0,0080	0,0040	0,0420	0,0110	0,0050	0,0060	0,0090	0,0050	0,0060	0,0090	0,0060	0,0060	0,0060
odchylky																		
největší dotek	-33,3	12,0	-66,7	-130,0	-25,0	50,0	-25,0	48,6	18,2	28,0	-3,3	26,7	28,0	-3,3	26,7	22,2	23,3	-16,7
vypočítaný dotek	-40,0	8,0	-100,0	-145,0	5,0	50,0	5,0	48,1	18,2	36,0	0,0	33,3	36,0	0,0	33,3	20,0	26,7	-16,7
nejmenší dotek	-44,4	0,0	-6,7	-125,0	0,0	50,0	0,0	48,1	16,4	20,0	3,3	28,9	20,0	3,3	28,9	20,0	23,3	-20,0

Tabulka 3-15 Kruhovitost v závislosti na 3D s 10 body

Ukázka výpočtu odchylky u vzorku D19,8.

$$\text{odchylka} = 100 - \left(100 \cdot \frac{0,012}{0,009}\right) = -33,3\% \quad (5)$$

Takto se provedl výpočet u všech hodnot v tabulkách 3-15 a 3-14.

Největší odchylka pro vypočítaný dotek je -145 % vůči skenu s 10 body, pro nejmenší dotek je to -125 % a pro největší dotek je -130 %. Takto velká odchylka může být způsobena tím, že 3D měřicí stroj s 10 body prováděl měření v hloubce 1mm nebo 5 mm. Do tabulky byla použita hodnota z pěti milimetrů, protože v hloubce jeden milimetr byla odchylka skoro 400 %. To je způsobené tím, že vrták je v začátku vrtání díry nestabilní.

### 3.10.3 Vyhodnocení válcovitosti

Pro vyhodnocení válcovitosti byla jako v předchozích případech využita tabulka s procentuálními odchylkami od etalonové hodnoty. Jako etalon byl použit kruhoměr. Do výsledků je zanesena chyba, jelikož disponovanými doteky pro studentský 3D měřicí stroj nebylo možné naměřit válcovitost v celém rozsahu vrtané díry. U kruhoměru, 3D skenu a 3D skenu s 10 body byla možnost změřit válcovitost v celém rozsahu. Výsledky získané z 3D skenu a ze stejného 3D skenu, ale s omezením na 10 získaných bodů, bude znázorňovat, jak hodně závisí na volbě počtu bodů.

V tabulce 3-16 jsou uvedeny jednotlivé naměřené válcovitosti. V levé části jsou uvedeny jednotlivé měřicí metody. V horní části tabulky jsou průměry vyvrtaných vzorků. Pod odchylkou jsou znázorněny procentuální odchylky od etalonových hodnot.

Z výsledků jsou patrné velké rozdíly mezi naměřenými hodnotami z různých strojů. Jak již bylo napsáno, u měření na studentském měřicím stroji nebylo možné s disponovanými doteky provést měření v celé délce vyvrtané díry. Vzorek D19,8 se v závislosti na zvolené doteky mohl změřit do hloubky 14mm, a proto by měl mít největší vypovídající hodnotu v porovnání s ostatními stroji.

Největší odchylka od vypočítaného a zvoleného doteku je 5 % u větších průměrů D19,8 a D16. Tato hodnota je hraniční, ale ještě ji lze použít pro měření. U vzorků s průměry D13, D10,5, D8,5 a D6,5 se hodnoty liší minimálně.

Odchylky 3D skenu a 3D skenu s 10 b. mohou být způsobeny špatnou měřicí strategií anebo volbou doteku. U menších průměrů D6,5, D8,5 a D10,5 se 3D sken od kruhoměru liší minimálně. Při pohledu na stejný stroj, ale zvolený menší počet bodů, je už patrný značný rozdíl s většími odchylkami.



Válcovitost [mm]	D19,8	D16	D13	D10,5	D8,5	D6,5
3D sken	0,072	0,04	0,05	0,017	0,086	0,075
největší dotek	0,0122	0,0092	0,0216	0,009	0,031	0,0086
vypočítaný dotek	0,013	0,0098	0,0218	0,009	0,031	0,0086
nejmenší dotek	0,0158	0,009	0,0218	0,0092	0,0308	0,009
kruhoměr	0,05145	0,0193	0,03949	0,0169	0,08507	0,07699
3D sken 10b	0,057	0,03	0,043	0,012	0,078	0,069
odchylky [%]						
největší dotek	76,29	52,33	45,30	46,75	63,56	88,83
vypočítaný dotek	74,73	49,22	44,80	46,75	63,56	88,83
nejmenší dotek	69,29	53,37	44,80	45,56	63,79	88,31
3D sken	-39,94	-107,25	-26,61	-0,59	-1,09	2,58
3D sken 10b	-10,79	-55,44	-8,89	28,99	8,31	10,38

Tabulka 3-16 Válcovitost vůči kruhoměru

Ukázka výpočtu odchylky u vzorku D19,8.

$$odchylka = 100 - \left( 100 \cdot \frac{0,0122}{0,05145} \right) = 76,287\% \quad (6)$$

Takto se vypočítaly všechny odchylky v tabulkách 3-16 a 3-17.

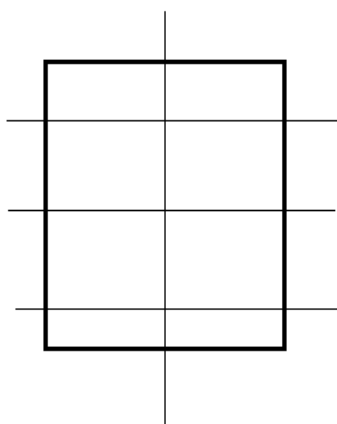
Odchylky byly ve srovnání s kruhoměrem a 3D skenem moc velké, a proto bylo zvoleno ještě jedno vyhodnocení válcovitosti vůči 3D skenu s 10 body. Toto nám zajistí lepší představu o válcovitosti. Tabulka 3-17 představuje srovnání studentského 3D měřicího stroje vůči 3D skenu s 10 body.

Válcovitost [mm]	D19,8	D16	D13	D10,5	D8,5	D6,5
3D sken	0,072	0,04	0,05	0,017	0,086	0,075
největší dotek	0,0122	0,0092	0,0216	0,009	0,031	0,0086
vypočítaný dotek	0,013	0,0098	0,0218	0,009	0,031	0,0086
nejmenší dotek	0,0158	0,009	0,0218	0,0092	0,0308	0,009
kruhoměr	0,05145	0,0193	0,03949	0,0169	0,08507	0,07699
3D sken 10b	0,057	0,03	0,043	0,012	0,078	0,069
odchylka [%]						
největší dotek	78,60	69,33	49,77	25,00	60,26	87,54
vypočítaný dotek	77,19	67,33	49,30	25,00	60,26	87,54
nejmenší dotek	72,28	70,00	49,30	23,33	60,51	86,96

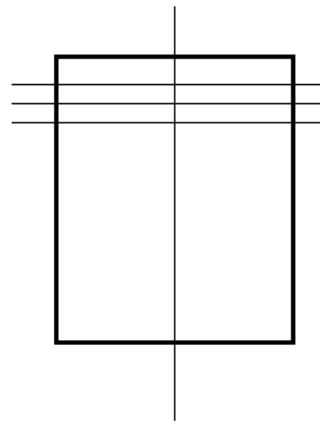
Tabulka 3-17 Válcovitost vůči 3D skenu s 10 body

Vyhodnocení válcovitosti vůči 3D skenu s 10 body ukazuje, že největší odchylka vychází pro největší dotek 87,5 %, rovněž tak pro vypočítaný a pro nejmenší dotek vychází odchylka 87 % vůči etalonovým hodnotám. Takto vysoká odchylka je způsobená tím, že 3D sken s 10 body mohl proměřit celou hloubku vrtaného otvoru, ale se zvolenými doteky pro studentské CMM nebylo možné tak hluboko dosáhnout, jak je vidět na ilustrativních obrázcích

3-10 a 3-9. U vzorku jsou vodorovné řezy, kde bylo provedeno měření. Lze vidět, že řezy jsou od sebe mnohem dál, a tudíž i výsledná válcovitost bude větší než u vzorku D6,5 kde jsou řezy blízko u sebe, a tudíž výsledná válcovitost bude menší.



Obrázek 3-10 Vzorek D19,8



Obrázek 3-9 Vzorek D6,5

Při zaměření se na odchylky mezi doteky na studentském 3D měřicím stroji lze vidět, že největší odchylka mezi doteky je do 7 % u vzorku D19,8, u ostatních vzorků byla odchylka do 5 %. To znamená, že u pěti ze šesti měřených vzorků je odchylka přijatelná. Nicméně ve srovnání s etalonovou hodnotou jsou odchylky příliš vysoké.

### 3.11 Sumarizace získaných výsledků

V tabulce 3-18 je vidět vyhodnocení kruhovitosti, válcovitosti a průměru v závislosti na vybrané doteky. V tabulce jsou uvedeny hodnoty vůči etalonovým hodnotám.

	Větší dotek	Vypočítaný dotek	Menší dotek
průměr	do 5%	do 5%	do 5%
kruhovitost	-130%	-145%	-125%
Válcovitost	87,54%	87,54%	86,96%

Tabulka 3-18 Sumarizace výsledků

Z tabulky 3-18 lze vidět, že největší odchylka průměru od etalonové hodnoty je u všech třech doteků do 5 %. Tato hodnota je přijatelná.

U největší odchylky kruhovitosti vycházejí odchylky přes 30 % od etalonové hodnoty, což je pro měření nepřijatelná hodnota.

Největší odchylka válcovitosti taktéž vyšla přes 30 % od etalonové hodnoty, a to je pro měření nepřijatelné.

## 4 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zjistit, jak velkou odchylku způsobí nedodržení vztahu pro volbu velikosti doteku při vyhodnocování vnitřního rozměru (průměru, kruhovitosti, válcovitosti). V námi zvoleném experimentu se šesti vyvrtanými vzorky bylo zjištěno, že při vyhodnocování průměru se nedodržení vztahu a volby menší nebo naopak větší velikosti doteku do 70 % od vypočítaného doteku projeví minimálně. To dokazuje tabulka 3-13. U kruhovitosti a válcovitosti se velikost doteku již projevila.

V rámci předkládání bakalářské práce se za pomoci šesti vyvrtaných vzorků testoval vliv odchylky velikosti doteku daného vztahu  $R = \frac{\pi \cdot d}{24}$  (1).

Postup byl zvolen následovný. Zvolené vzorky se nechaly změřit na kruhoměru a přesnějším 3D CMM, aby bylo možné získané hodnoty ze studentského 3D CMM porovnat.

Než bylo možné provést vlastní experiment, bylo zapotřebí provést rozsáhlou rešerši zdrojů. Poznatky z této rešerše jsou sepsány především v kapitole 2., zejména pak v částech 2.4 až 2.7, kde se řeší problematika volby doteku, jako jsou délka, velikost a materiál na vyhodnocované parametry – průměr, kruhovitost a válcovitost.

Výsledky této práce ukazují, že pro měření průměru nemá velikost doteku až tak zásadní vliv. Největší odchylky od etalonových hodnot jsou do 5 %. Tato hodnota je v porovnání s přesností stroje vyhovující.

Volba velikosti doteku se u kruhovitosti projevila, značně do procesu měření vstupuje i počet měřených bodů. V okamžiku, kdy porovnáme zbylé počty bodů, už se pohybujeme v odchylkách přes 10 %, což je v porovnání přesností strojů velká, ale poměrně očekávaná odchylka.

U válcovitosti to je ještě extrémnější. Zde už velikost doteku a počet bodů do vyhodnocení vstupuje, záleží i na délce měřeného válce. Jak již bylo uvedeno, válec se nemohl proměřit na studentském CMM v celé hloubce. V rámci této práce nebylo možné provést vyhodnocení a bude nutné doplnit doteky či provést měření na větších průměrech, kde by bylo možné použít delší a tužší doteky, aby bylo možné provést měření ve větší části vzorku. Největší odchylka od etalonové hodnoty je 87,5 %. Tato hodnota je v porovnání s přesností strojů velká odchylka.

Poslední porovnání bylo porovnání odchylky mezi doteky použitými pro studentské CMM. Jak již bylo řečeno, u průměru se volba velikosti doteku neprojevila. U válcovitosti se až na vzorek D19,8 odchylka mezi jednotlivými doteky pohybovala do 5 % a u vzorku D19,8 do 7 %. U kruhovitosti bylo porovnání mezi jednotlivými doteky vůči etalonovým hodnotám naměřených na 3D skenu s 10 body. Zde byly odchylky u vzorku D19,8 přes 30 %, u ostatních vzorků se v nejmenší hloubce odchylka pohybuje také přes 30 %, ve větších hloubkách přes 5 mm se odchylky pohybují do 10 %.

## Citovaná literatura

1. TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
2. ČEPOVÁ, Lenka a PETŘKOVSKÁ Lenka. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
3. *Úvod do souřadnicového měření* [online]. [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: [https://hexagon.com/cs/resources/resource-library/intro-coordinate-metrology?utm\\_easyredir=www.hexagonmi.com](https://hexagon.com/cs/resources/resource-library/intro-coordinate-metrology?utm_easyredir=www.hexagonmi.com)
4. *What Everybody Ought to Know About the History of CMM Coordinate Measuring Machines*. Wenzelamerica [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.wenzelamerica.com/>
5. *CMM Evolution – MDM Standard* [online]. [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.mdmstandard.ro/wp-content/uploads/Istoria-CMM-in-engleza.pdf>
6. *Where Innovation Meets Precision*. Winndeavor [online]. [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://winndeavor.com/>
7. Zeiss [online]. [cit.2023-03-01]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/corporate/home.html>
8. *XI'AN LEAD METROLOGY CO., LTD\_EXPERT Series\_GREAT Series* [online]. [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <http://www.leadmetrology.com/>
9. *Coordinate Measuring Machine Types* [online]. [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://www.smlase.com/entries/manufacturing/what-is-cmm-machine/>
10. *Discover Series Horizontal Arm CMM*. Allbiz [online]. [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://in.all.biz/discover-series-horizontal-arm-cmm-g73384>
11. *Heidenhain* [online]. [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: [https://www.heidenhain.cz/cs\\_CZ/](https://www.heidenhain.cz/cs_CZ/)
12. *Renishaw* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz>
13. *Úchytky tvaru a polohy dle DIN ISO | HOMMEL CS s.r.o. Jenoptik* [online]. [cit. 2023-03-016]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/uchytky-tvaru-polohy-dle-din-iso/>
14. *Průmyslová měřicí technika a Polovodičová výrobní zařízení ACCRETECH* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/>