



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

# POSOUZENÍ VLIVU PROVOZNÍCH PODMÍNEK NA VÝSLEDNÉ PŘESNOSTI KRUHOVITOSTI A POLOHOVÁNÍ

ASSESSING THE INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON THE RESULTING CIRCULARITY  
AND POSITIONING ACCURACY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matej Sarvaš

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.

BRNO 2023





TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

# Technische Universität Chemnitz

Fakultät für Maschinenbau

## Masterarbeit

Thema: Bewertung des Einflusses der Betriebsbedingungen auf die resultierende Kreisform und Positionierungsgenauigkeit

vorgelegt von: Matej Sarvaš  
geb. am: 22. September 1998 in: Zvolen

Studiengang: Maschinenbau  
Berufsfeld: Werkzeugmaschinen  
Betreuer: Dr. Michal Holub (VUT Brno)  
M.Sc. Max Engelmann (TU Chemnitz)

Abgabe: 26. 05. 2023



## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. Matej Sarvaš</b>
Studijní program:	Výrobní systémy
Studijní obor:	Výrobní systémy
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Posouzení vlivu provozních podmínek na výsledné přesnosti kruhovitosti a polohování**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Zvyšování způsobilosti výrobního procesu patří mezi inovativní kroky v každé výrobní firmě. CNC obráběcí stroj hraje v tomto úkolu významnou roli. Mezi klíčové faktory, které ovlivňují způsobilosti výroby jsou mimo jiné okolní podmínky, provozní podmínky, technologie výroby a stabilita ustavení stroje. Z pohledu posuzování přesnosti stroje jsou klíčové zkoušky najetí do požadované polohy a zkouška kruhovitosti. Způsob posuzování těchto sledovaných parametrů může hrát významnou roli při dalším posuzování způsobilosti výrobního procesu. Tato práce je zaměřena na využití moderních technologií pro posuzování vlivu provozních podmínek na výsledné přesnosti kruhovitosti a polohování CNC obráběcího stroje.

Toto téma diplomové práce je podpořeno projektem "Strojírenská výrobní technika a přesné strojírenství" CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008404 prostřednictvím Operačního programu výzkum, vývoj, vzdělávání (2014 – 2020) a spolufinancováno Evropskou unií.

#### **Cíle diplomové práce:**

Rozbor současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky.

Systémový rozbor řešené problematiky, dále návrh a zdůvodnění zvoleného způsobu řešení zadaného úkolu.

Návrh způsobu testování CNC obráběcího stroje a způsobu vyhodnocení.

Potřebné analýzy výsledných měření.

Komentář k získaným výsledkům a návrhu testování.

#### **Seznam doporučené literatury:**

MAREK, J. a kol., MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů IV. 2018. Speciální vydání. Dostupný z WWW: ISBN 978-80-906310-8-3.

WECK, M., Brecher, Ch. Werkzeugmaschinen: Konstruktion und Berechnung. 2006. überarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.

HOLUB, M. Geometric Accuracy of Machine Tools. In Measurement in Machining and Tribology. Springer, Cham, 2019. p. 89-112. ISBN: 978-3-030-03821-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Aufgabenstellung Masterarbeit**

für Herrn Matej Sarvaš

**Thema:** Bewertung des Einflusses der Betriebsbedingungen auf die resultierende Kreisform und Positionierungsgenauigkeit

### **Aufgabenstellung**

Die Verbesserung der Kompetenz des Produktionsprozesses ist einer der innovativen Schritte in jedem Fertigungsunternehmen. CNC-Werkzeugmaschinen spielen bei dieser Aufgabe eine wichtige Rolle. Die wichtigsten Faktoren, die sich auf die Produktionsfähigkeit auswirken, sind u. a. die Umgebungsbedingungen, die Betriebsbedingungen, die Produktionstechnologie und die Stabilität der Maschineneinrichtung. Für die Beurteilung der Maschinengenauigkeit sind die Einlauf- und Kreisformprüfungen die wichtigsten Tests. Die Art und Weise, wie diese überwachten Parameter bewertet werden, kann eine wichtige Rolle bei der weiteren Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Produktionsprozesses spielen. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Einsatz moderner Technologien zur Bewertung der Auswirkungen von Betriebsbedingungen auf die resultierende Kreisform und Positioniergenauigkeit einer CNC-Werkzeugmaschine.

Diese Masterarbeit wird durch das Projekt "Mechanische Produktionstechnologie und Feinwerktechnik" CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008404 durch das operationelle Programm Forschung, Entwicklung, Bildung (2014-2020) unterstützt und durch die Europäische Union gefördert.

### **Schwerpunkte der Arbeit**

- Analyse des aktuellen Stands von Wissenschaft und Technik in Bezug auf die beschriebene Problemstellung.
- systematische Analyse der Problemstellung sowie ein Vorschlag und eine Begründung der gewählten Methode zur Lösung der Aufgabe.
- Vorschlag für die Prüf- und Bewertungsmethode der CNC-Werkzeugmaschine. Erforderliche Analysen der durchgeführten Messungen.
- Kritische Reflektion der erzielten Ergebnisse und des Prüfkonzeptes.

**Beginn:** 24.10. 2022

**Abgabe:** 26. 05. 2023

**Betreuer:** Dr. Michal Holub (VUT Brno)

M.Sc. Max Engelmann (TU Chemnitz)





## **ABSTRAKT**

Diplomová práca posudzuje význam prevádzkových vplyvov, ako je napríklad rýchlosť posuvu, poloha na stroji a teplota jednotlivých súčiastok stroja na výslednú presnosť polohovania a kruhovej interpolácie CNC stroja. Na začiatku je popísaný súčasný stav riešenej problematiky, ako napríklad typy presností stroja, chyby obrábacích strojov a ich meranie. Následne je spracovaný systémový rozbor problematiky, kde sú popísané všetky faktory vplývajúce na stroj a je navrhnutý spôsob testovania stroja. V predposlednej kapitole sú navrhnuté merania spracované a v poslednej vyhodnotené.

## **ABSTRACT**

This thesis assesses the influence of operating conditions such as feed rate, position on the machine and temperature of individual machine components on the resulting positioning accuracy and circularity of a CNC machine. At the beginning, the current state of the art of the problem is described, such as types of machine accuracy, machine tool errors and their measurement. Subsequently, a system analysis of the problem is developed, where all the factors affecting the machine are described and a method for testing the machine is proposed. In the penultimate chapter, the proposed measurements are processed and in the last chapter they are evaluated.

## **ABSTRAKT**

In der Arbeit wird die Bedeutung betrieblicher Einflüsse wie Vorschubgeschwindigkeit, Position auf der Maschine und Temperatur einzelner Maschinenkomponenten auf die resultierende Positioniergenauigkeit und Kreisform der CNC-Maschine bewertet. Zu Beginn wird der aktuelle Stand der Technik des behandelten Problems beschrieben, wie z.B. Arten der Maschinengenauigkeit, Werkzeugmaschinenfehler und deren Messung. Anschließend wird eine systematische Analyse des Problems entwickelt, in der alle Faktoren, die die Maschine beeinflussen, beschrieben werden und eine Methode zur Prüfung der Maschine vorgeschlagen wird. Im vorletzten Kapitel werden die vorgeschlagenen Messungen durchgeführt und im letzten Kapitel ausgewertet.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

Presnosť obrábacieho stroja, prevádzkové podmienky, kruhovitosť, tolerancia polohy, kompenzácie, Ballbar, laserový interferometer

## **KEYWORDS**

Machine accuracy, operating conditions, circularity, positional tolerance, compensations, Ballbar, laser interferometer

## **SCHLÜSSELWÖRTER**

Genauigkeit von Werkzeugmaschinen, Betriebsbedingungen, Kreisform, Positionstoleranz, Kompensation, Ballbar, Laserinterferometer



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

SARVAŠ, Matej. *Posouzení vlivu provozních podmínek na výsledné přesnosti kruhovitosti a polohování*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149812>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Michal Holub.



## **POĎAKOVANIE**

Chcel by som sa poďakovať najmä doc. Ing., Dipl.-Ing Michalovi Holubovi, Ph.D, za jeho pomoc, trpezlivosť a ochotu pri konzultovaní tejto diplomovej práce. Ďalej by som chcel poďakovať všetkým, ktorí ma podporovali či už počas štúdia na VUT alebo na TU Chemnitz. Osobitne by som chcel ešte poďakovať mojej rodine.



## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Čestne prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, ktoré som spracoval samostatne pod vedením doc. Ing., Dipl.-Ing Michala Holuba, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 25.5.2023

.....

Matej Sarvaš





# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>MOTIVÁCIA</b> .....	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b> .....	<b>23</b>
3.1	Obrábací stroj .....	23
3.1.1	Operácie na obrábacích strojoch .....	23
3.2	Obrábanie rôznych materiálov .....	24
3.2.1	Nerezová oceľ .....	24
3.2.2	Zliatiny hliníka .....	25
3.3	Stroj MCV 754 QUICK .....	26
3.4	Presnosť obrábacích strojov .....	27
3.5	Chyby obrábacích strojov .....	30
3.6	Merania geometrických chýb .....	31
3.7	Meriacie prístroje na hodnotenie geometrických chýb .....	32
3.7.1	Laser-interferometer .....	32
3.7.2	Ballbar QC20-W .....	36
3.8	Definície a terminológia .....	38
3.8.1	Kruhovitosť na stroji .....	38
3.8.2	Kruhovitosť na obrobku .....	38
3.8.3	Polohovanie na stroji .....	39
3.8.4	Chyba polohy na obrobku .....	39
<b>4</b>	<b>SYSTÉMOVÝ ROZBOR RIEŠENEJ PROBLEMATIKY</b> .....	<b>41</b>
4.1	Vonkajšie vplyvy .....	41
4.2	Vplyvy častí stroja .....	41
4.3	Analýza vplyvov častí stroja na kruhovitosť .....	42
4.3.1	Geometrické chyby .....	42
4.3.2	Chyby chodu .....	42
4.3.3	Dynamické chyby .....	42
4.4	Vplyvy merania .....	43
4.5	Vplyvy prevádzkových podmienok .....	43
4.6	Štatistické plánovanie experimentu .....	44
4.6.1	Základné princípy plánovania experimentu .....	44
4.6.2	Úplný faktorový plán skúšok .....	45
<b>5</b>	<b>NÁVRH SPÔSOBU TESTOVANIA</b> .....	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>ANALÝZA VÝSLEDKOV MERANÍ</b> .....	<b>49</b>
6.1	Meranie č.1 .....	49
6.2	Meranie č.2 .....	56
6.3	Meranie č.3 .....	59
6.4	Meranie č.4 .....	63
<b>7</b>	<b>ZHODNOTENIE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKOV</b> .....	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>DISKUSIA</b> .....	<b>67</b>
8.1	Meranie č.5 – Skúška pracovnej presnosti .....	67
8.1.1	Nastavenie stroja MCV 754 QUICK .....	67
8.1.2	Jednouúčelový merací stroj (JUS) .....	68
8.1.3	Súradnicový merací stroj CMM ZEISS ECLIPSE .....	69
8.1.4	Celkové zhodnotenie .....	70

<b>9</b>	<b>ZÁVER.....</b>	<b>71</b>
<b>10</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>72</b>
10.1	Kapitel 3: EIN ÜBERBLICK ÜBER DEN AKTUELLEN WISSENSSTAND	72
10.2	Kapitel 4: SYSTEMATISCHE ANALYSE DES BEHANDELTEN PROBLEMS	74
10.3	Kapitel 5: KONZEPTION DES PRÜFVERFAHRENS .....	76
10.4	Kapitel 6: ANALYSE DER MESSERGEBNISSE .....	78
10.4.1	Messung 1 .....	78
10.4.2	Messung 2 .....	79
10.4.3	Messung 3 .....	80
10.4.4	Messung 4 .....	81
10.5	Kapitel 7: BEWERTUNG DER ERZIELTEN ERGEBNISSE .....	83
<b>11</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....</b>	<b>85</b>
<b>12</b>	<b>ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, TABULIEK A OBRÁZKOV .....</b>	<b>88</b>
12.1	Zoznam skratiek .....	88
12.2	Zoznam tabuliek .....	88
12.3	Zoznam obrázkov .....	89
<b>13</b>	<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>91</b>
	<b>PRÍLOHY .....</b>	<b>92</b>

# 1 ÚVOD

V súčasnej dobe je v priemysle kladený čím ďalej tým väčší dôraz na presnosť a kvalitu výroby. Táto požiadavka sa týka aj procesu obrábania, kde dokonalosť spracovania materiálov závisí od mnohých faktorov, ktoré majú vplyv na výslednú presnosť kruhovitosti a polohovania obrábacieho centra. Jedným z týchto faktorov sú aj prevádzkové podmienky, ktoré zohrávajú kľúčovú úlohu v procese obrábania a ovplyvňujú aj celkovú presnosť výroby.

Presnosť obrábacieho centra je základnou požiadavkou pri výrobe presných obrobkov. V prípade, že je obrábacie centrum nedostatočne presné, môže to viesť k výrobe nekvalitných dielov a k výraznému nárastu množstva odpadu, čo zvyšuje náklady a znižuje efektívnosť výroby.

Presné obrábacie centrum, naopak, dokáže vyrábať obrobky s požadovanými rozmermi s minimálnym množstvom odpadu. Takáto výroba nie je len ekonomicky efektívna, ale má aj pozitívny vplyv na životné prostredie, keďže redukuje množstvo odpadu a znižuje množstvo použitého materiálu a spotreby energie potrebnej na jeho spracovanie. Preto je výskum problematiky vplyvu prevádzkových podmienok na presnosť obrábacieho centra veľmi dôležitý nielen z technického hľadiska, ale aj z pohľadu ochrany životného prostredia.

Cieľom diplomovej práce je analyzovať vplyv rôznych prevádzkových podmienok na presnosť kruhovitosti a polohovania obrábacieho centra pri použití 3-osovej frézky. Naplnenie cieľa pozostávalo z posúdenia súčasného stavu poznania riešenej problematiky, následne sa systematickým prístupom posúdili jednotlivé vplyvy a vybrali sa tie, o ktorých je predpoklad nielen ich odmerania a vyhodnotenia, ale aj možnosť relatívne ľahkého obmedzenia ich účinku. V ďalšej časti bol naplánovaný spôsob testovania samotného obrábacieho stroja. Posledným naplneným cieľom bolo vyhodnotenie a okomentovanie výsledkov tohto testovania

V poslednej časti sú najdôležitejšie časti tejto diplomovej práce zhrnuté v nemeckom jazyku.



## 2 MOTIVÁCIA

Výber témy diplomovej práce "Posúdenie vplyvu prevádzkových podmienok na výslednú presnosť kruhovitosti a polohovania" bol motivovaný niekoľkými dôležitými faktormi. Jedným z hlavných dôvodov bol môj záujem o problematiku presnej výroby, jej vplyv na kvalitu produktov a možnosti posúdenia výslednej kvality obrobku na základe nameraných dát zo stroja. Presná výroba má v súčasnosti zásadný význam v mnohých priemyselných odvetviach a je nevyhnutná pre dosiahnutie požadovaných výsledkov.

Ďalším dôvodom je záujem modernej spoločnosti 21. storočia, ktorá neberie ohľad len na ekonomicky výhodnú výrobu ale rieši aj problematiku ekologickej výroby. Práve ekologickosť je dôvodom, prečo sú čoraz viac dôležité presné stroje a teda aj výroba. Vďaka presnej výrobe je totiž možné dosiahnuť znižovanie nákladov na výrobu a tým zvýšenie efektivity výroby, pričom súčasne pri obmedzovaní výroby nepodarkov dochádza aj k pozitívnym efektom na životné prostredia vo forme znižovania množstva odpadu a spotreby energie. Tým sa podporuje udržateľnosť výrobných procesov a zlepšuje environmentálna stránka výroby.

Priemysel 4.0 je ďalším dôležitým faktorom, ktorý ma motivoval k výberu témy. V súčasnosti je digitalizácia a automatizácia výroby kľúčovým prvkom v mnohých odvetviach a presná výroba je jedným zo základných krokov pri zavádzaní nových technológií a procesov. Bez presnej výroby a zberu dát je totiž náročné zavádzať prvky priemyslu 4.0. Výskum tejto témy môže prispieť k lepšiemu porozumeniu tohto procesu a umožniť lepšie využitie nových technológií.

Posledným dôležitým faktorom, ktorý ma motivoval na výber tejto témy je súčasná politická a ekonomická situácia. V tejto dobe je zvýšená potreba presnej výroby vzhľadom na rastúcu konkurenciu na trhu, zvyšujúce sa nároky zákazníkov na kvalitu produktov a sprísňujúce sa normy a regulácie. Výskum tejto témy môže pomôcť pri zlepšovaní konkurencieschopnosti firiem a zvyšovaní kvality produktov.

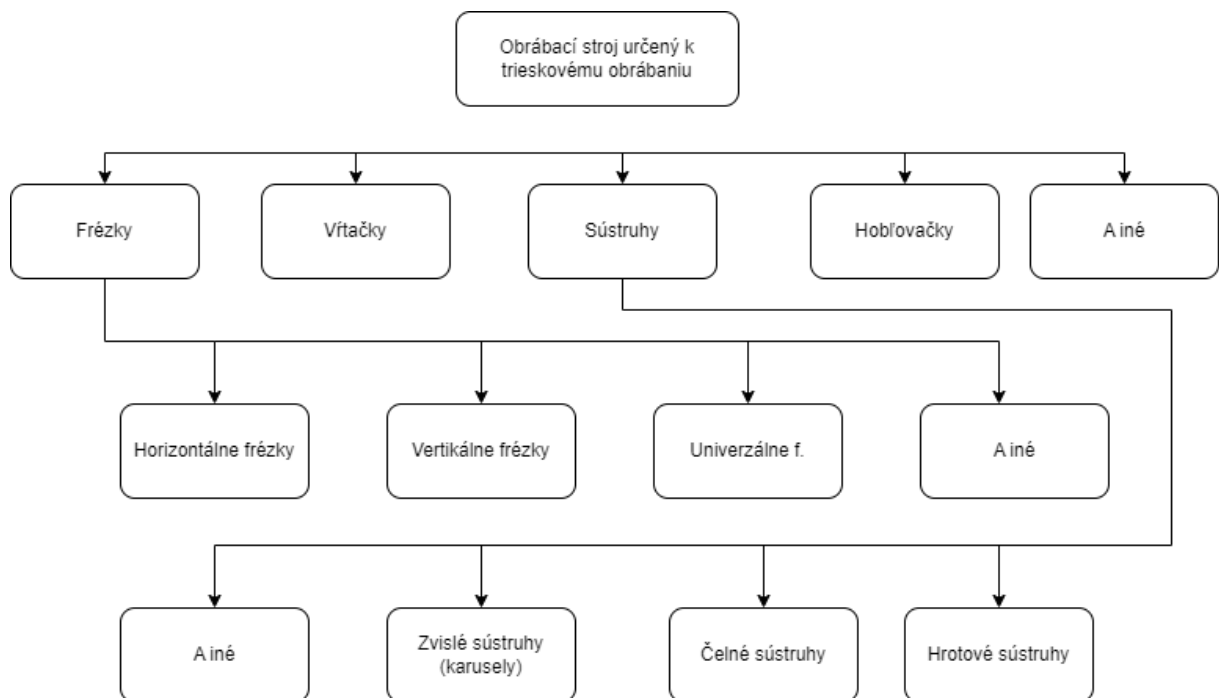


## 3 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

### 3.1 Obrábací stroj

Pojem obrábací stroj (OS) (Werkzeugmaschine) je definovaný podľa DIN 69 651 ako: *“Mechanizované a viac alebo menej automatizované výrobné zariadenie, ktoré prostredníctvom relatívneho pohybu medzi obrobkom a nástrojom vytvára na obrobku vopred určený tvar alebo zmenu vopred určeného tvaru na obrobku.”*

Avšak aj podľa tejto normy je označenie pojmu obrábací stroj nie úplne presné, a tak sa musí tento pojem ešte viac špecifikovať podľa niekoľkých druhov klasifikácie. Ako príklad je možné použiť rozdelenie OS podľa druhu výrobných operácií (Obr. 1) alebo podľa stupňa automatizácie.[1]



Obr. 1 Rozdelenie obrábacích strojov [1]

#### 3.1.1 Operácie na obrábacích strojoch

Ako už bolo spomenuté na OS je možné vykonávať nespočetne veľa rôznych druhov technologických operácií. Dvomi najnákladnejšími operáciami sú hrubovanie a dokončovanie.

Hlavným cieľom hrubovacej operácie je odobrať, čo najväčšie množstvo materiálu z obrobku za čo najkratší čas. Musí sa však dbať aj na bezpečné upnutie obrobku. Pri tejto operácii vzniká enormné silové a teplotné zaťaženie na opracovávaný povrch. Ich dôsledkom je často nedostatočná kvalita povrchu (12,5 až 50  $\mu\text{m}$ ) a nevyhovujúce rozmerové a geometrické tolerancie (IT 10 až IT 13). Charakteristickými reznými podmienkami je hĺbka záberu ostria, ktorá môže dosahovať až niekoľko milimetrov a aj väčší posuv.[2]

Preto sa po hrubovacej operácii zväčša obrobok následne dokončuje. Pri dokončovacej operácii je najdôležitejšie dosiahnutie konečnej drsnosti povrchu (1,6  $\mu\text{m}$ ), rozmerových a geometrických tolerancií (až do IT 6). Tu sa na druhú stranu hĺbka záberu ostria pohybuje v desatinách milimetrov a aj posuv býva väčšinou menší.[2]

Rezné podmienky určuje niekoľko parametrov:

- Obrábaný materiál
- Materiál nástroja
- Geometria nástroja + obrobnku

V tabuľke 1 sú zobrazené rezné podmienky pri frézovaní nerezovej oceli, pre rovnakú doštičku typu M. [3]

Technologická operácie	Hrubovanie	Dokončovanie
Rezná rýchlosť [m/mm]	200	160
Posuv na zub [mm]	0,2	0,2
Hĺbka záberu ostria [mm]	3	0,5

Tab. 1 Porovnanie hrubovania a dokončovania

### 3.2 Obrábanie rôznych materiálov

Pri obrábaní sa musí dbať na materiál, z ktorého je obrobok vyrobený. Ten udáva celkovú charakteristiku rezného procesu. Ako dôležité parametre, pri materiáloch používaných v strojárstve, sú udávané hodnoty ako napríklad: modul pružnosti, pevnosť v ťahu, hustota, tvrdosť, teplota topenia, odolnosť voči korózií a iné.

Cieľom tejto diplomovej práce je určiť vplyv prevádzkových podmienok na výslednú presnosť polohovania a kruhovitosti. Ako už bolo spomenuté každý materiál má iné vlastnosti a teda aj iné prevádzkové podmienky pri obrábaní. Ako príklad je teda vybraté porovnanie obrábania Al zliatin a ocelí, ako najbežnejších materiálov používaných v strojárstve (Tab.2). Tento príklad aj vhodne demonštruje ako veľmi rozdielne môže byť obrábanie, a jeho nastavené parametre na tom istom stroj.[4]

Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Pevnosť v ťahu [MPa]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
Nerezová oceľ	210	500 -1700	7,85
Al - zliatina	69-72	100-540	2,7
Titán	105-117	290-740	4,5

Tab. 2 Vybrané materiálové charakteristiky

#### 3.2.1 Nerezová oceľ

Nerezová oceľ je zliatina železa obsahujúca najmenej 10,5 % chrómu a ďalšie prvky ako hliník, kremík, síru, nikel, selén, molybdén, dusík, titán, atď., ktoré predstavujú približne 0,03 % až 1 % z celkového podielu. [5]

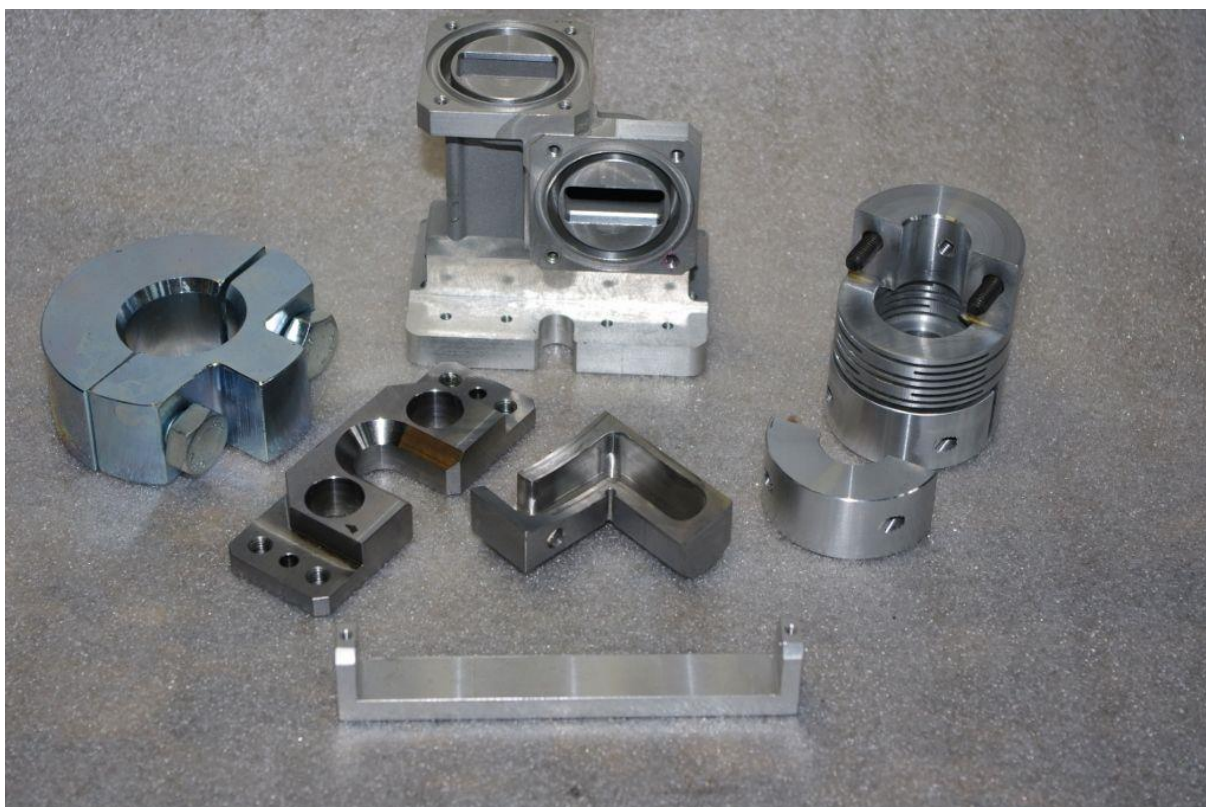
Výhodou nerezovej ocele je obsah chrómu, ktorý vytvára ochrannú vrstvu na povrchu nerezovej ocele a tým jej zvyšuje odolnosť voči korózií. Ďalšou výhodou ocele je jej teplota topenia. Tá má hodnotu 1530 °C, a tým pádom si oceľ zachováva svoje fyzikálne charakteristiky aj do vyšších teplôt. Tvrdosť ocele sa pohybuje v rozmedzí 80-600 HB, pri čom sa pre nerezovú oceľ udáva hodnota 300HB. Cena ocelí je vo všeobecnosti vyššia ako u hliníkových zliatin (toto je závislé na pridaných legúrach) [5]



### 3.2.2 Zliatiny hliníka

Hliníkové zliatiny sa prejavujú najmä nižšou hustotou a teda aj celkovou hmotnosťou než ocele. Ďalšou pozitívnou vlastnosťou hliníka je vysoký tepelný koeficient. Teplota topenia hliníka sa uvádza 660 °C a jeho tvrdosť je približne 63,6 HB. [6] Cena hliníka je v porovnaní s nerezovou oceľou nižšia a to najmä z dôvodu nižších výrobných nákladov (nie je potrebné zdĺhavé legovanie).

Pri obrábaní hliníka sa dosahujú nižšie rezné sily, je menšie opotrebenie nástroja a dosahujú sa aj vyššiu kvalitu povrchu obrobka. Je možné vytvárať aj zložité prvky geometrie základnými trieskovými technologickými operáciami bez dodatočných špeciálnych prípravkov alebo výrobných technológií. Na obrázku 2 je možné vidieť súčiastky vyrobené z hliníkovej poprípade ocelevej zliatiny za pomoci sústruženia, frézovania a vrtania.[4]



Obr. 2 Hliníkové a ocelové obrobky

### 3.3 Stroj MCV 754 QUICK

V tejto diplomovej práci všetky merania presnosti polohovania a kruhovitosti prebiehali na stroji MCV 754 QUICK (obr.3). Jedná sa o trojosé frézovacie obrábacie centrum s rámom typu C, vybavené priamym odmerovaním, automatickým výmenníkom nástrojov a vysokotlakovým chladením.

Ako riadiaci systém je použitý software od spoločnosti SIEMENS (SINUMERIC 840D) Technické parametre tohto vertikálneho OS sú uvedené v tabuľke 3. [7]

Pracovný rozsah	Osa X [mm]	754
	Osa Y [mm]	500
	Osa Z [mm]	550
Presnosť	Presnosť nastavenia plochy [mm]	0,012
	Opakovateľnosť nastavenia plochy [mm]	0,005
Stôl	Upínacia plocha stola [mm]	1000x500
	Maximálna nosnosť [kg]	400
Vreteno	Maximálne otáčky [ $\text{mm}^{-1}$ ]	10 000
Posuv	Pracovný posuv [mm/min]	1-30 000
	Rýchloposuv [mm/min]	30 000

Tab. 3 Technické parametre MCV 754 Quick



Obr. 3 Stroj MCV 754 QUICK v laboratóriu UVSSR

### 3.4 Presnosť obrábacích strojov

Obrábací stroj je komplexné a zložité zariadenie, na ktoré sa kladú vysoké požiadavky na jeho presnosť. Pod pojmom presnosť sa rozumie schopnosť dlhodobo dosahovať zhody medzi požadovanými a dosiahnutými parametrami. Presnosť OS sa delí podľa faktorov, ktoré ju ovplyvňujú. Rozoznáva sa

- Výrobná presnosť
- Pracovná presnosť
- Geometrická presnosť
- Presnosť polohovania
- Presnosť kruhovej interpolácie
- Volumetrická presnosť
- Teplotné dilatácie

Z dôvodu rôznych meniacich sa vplyvov prostredia na stroj sa musia vykonávať jej priebežné kontroly [7],[8]

#### Výrobná presnosť

Výrobná presnosť je schopnosť dlhodobo dosahovať požadované hodnoty obrobku. Posudzuje sa vždy na konkrétnom stroji v konkrétnom prostredí, nie je to inherentná charakteristika stroja. Nedá sa použiť na určenie okamžitého stavu výroby na stroji.

Zahrňuje do seba všetky chyby, ktoré nastávajú nielen pri samotnej výrobe, ale aj v takzvanej pred-výrobnej a po- výrobnnej fáze. V pred-výrobnej fáze má veľký vplyv na výslednú výrobnú presnosť počiatočná kvalita materiálu, jeho uskladnenie a pod. Počas samotnej výroby chyby vznikajú pri upnutí, zmenách teploty a tuhosti stroja/nástroja. V po – výrobnnej fáze sa opäť musí dbať ohľad na jeho uskladnenie a starnutie materiálu. [9]

#### Pracovná presnosť

Pracovná presnosť je obdobne ako výrobná presnosť, ukazateľom výroby a nie samostatného stroja. Je možné ju merať aj nepriamo na obrobku. Rozdielom oproti výrobnnej presnosti je, že sa neposudzuje dlhodobo, ale len podľa jednej série (dávky).

Zahrňuje do seba aj geometrickú presnosť a všetky chyby spôsobované technologickými operáciami ale bez ohľadu na zmeny teploty v dôsledku iného ročného obdobia. Jej hodnota je spoľahlivá len v prípade ak je táto presnosť normalizovaná. [8]

#### Geometrická presnosť

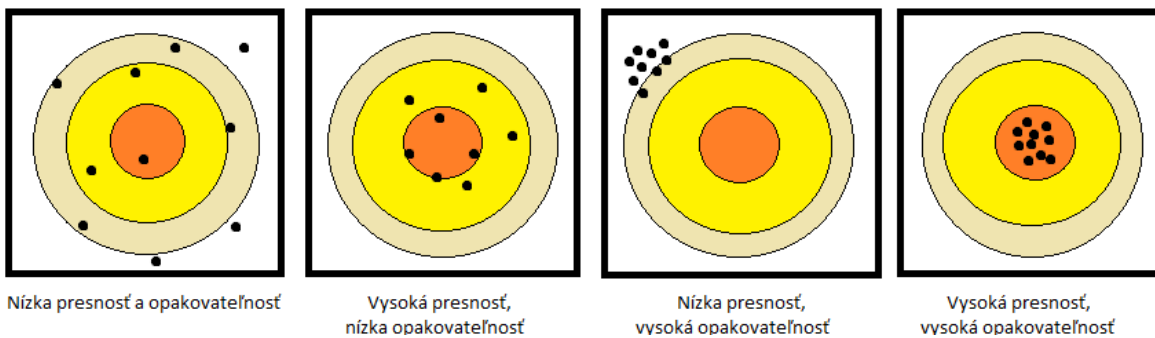
Geometrická presnosť popisuje geometrickú štruktúru OS, pomocou ktorej je možné vyhodnotiť vlastnosti funkčných častí ovplyvňujúcich pracovnú presnosť. Je jeden z ukazovateľov, ktorý udáva kvalitu stroja pri nezaťaženom stave. Patria sem okrem iného:

- odchýlky tvaru a polohy upevňovacích plôch obrobkov a nástrojov
- relatívna poloha medzi obrobkom a nástrojom pri definovaní ich vzájomnej polohy [8]

Jej úlohou je teda opisovať geometrickú štruktúru stroja a nástroja na základe ktorej, je možné vyhodnotiť vlastnosti funkčných častí, ktoré následne ovplyvňujú výrobnú a pracovnú presnosť daného stroja. Meranie geometrickej presnosti je definované v ISO 230, kde je dané, že testy musia prebiehať pri nezaťaženom stave stroja a/alebo pri dokončovacích podmienkach obrábania. [10]

## Presnosť polohovania

Určuje presnosť a opakovateľnosť nájzdov do požadovanej polohy pri lineárnych a rotačných osiach. Je definovaná okrem iných napríklad normami ISO 230-2; VDI 3441. Významný vplyv na presnosť polohovania má pohonný systém a typ uloženia. Pojem presnosť polohovania sa často spája s pojmom opakovateľnosť nájzdu, ktorý je definovaný ako rozdiel zadanej hodnoty od skutočnej pri n-násobnom počte opakovaní cyklu. V praxi sa tieto dva pojmy často spájajú do jedného slova "presnosť", hoci v skutočnosti je dôležitejšia opakovateľnosť, pretože opakovateľnosť závisí od presnosti a mechanickej jednotky stroja, zatiaľ čo presnosť možno "doladiť" korekciami. Na obrázku 4 je vidieť dôležitosť zahrnutia oboch spomínaných parametrov. [8]



Obr. 4 Presnosť polohovania

## Presnosť kruhovej interpolácie

V ideálnom prípade pri dokonale presnom CNC stroji by výsledná kruhová dráha vytvorená interpoláciou, odpovedala naprogramovanému príkazu. V realite je však ovplyvnená ktoroukoľvek chybou, (odmerovania, priamosti, zmenou teploty atď. ) a výsledná dráha nemá po celom obvode rovnaký polomer.

V prípade presného odmerania skutočnej dráhy je možné ju porovnať s ideálnou a na základe tohto merania vytvoriť mierku presnosti OS. Toto meranie je detailne popísané v norme ČSN ISO 230-4.

ISO 230-4:2005(E)

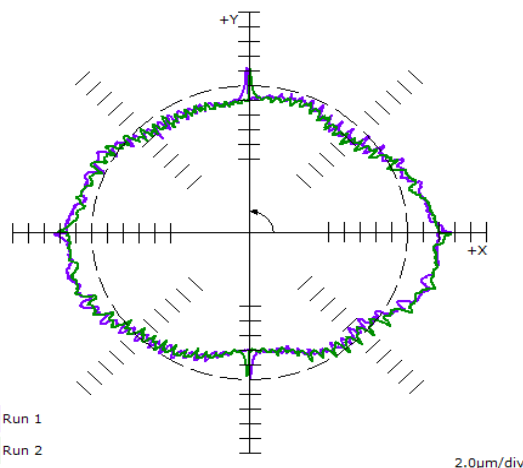
Bi-directional circular deviation  
XY 360deg 150mm Calibrated f=3000

Operator: Matej Sarvaš  
Date: 2023-Jan-17 12:13:02

RENISHAW

Machine: MCV  
QC20-W: 2G7C44, Last calibrated: 2020-04-16

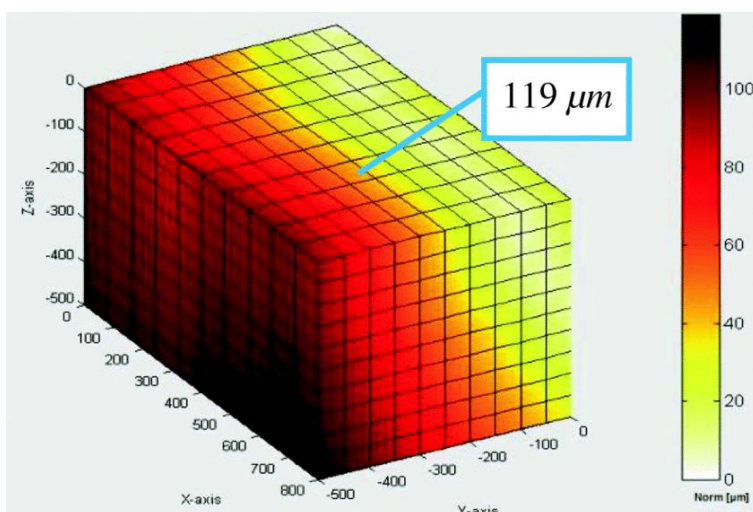
Bi-directional circular deviation  
Value 9.6µm  
Test parameters  
Radius 150.0000mm  
Feedrate 3000.0mm/min  
Run sequence CCW CW  
Plane under test XY  
Test position  
Start angle 45.00°  
End angle 45.00°



Obr. 5 Kruhovitost' podľa ISO

## Volumetrická presnosť

Volumetrická presnosť je definovaná v norme ISO 230-1 ako maximálny rozsah relatívnych chýb medzi skutočnou a dokonalou polohou v smere osí X,Y,Z a maximálny rozsah orientácie odchýliek pre smery rotačných osí A,B,C pre pohyby v lineárnych osiach v definovanom objeme (obr. 6). Určovanie volumetrickej presnosti je však zložitý a zdĺhavý proces, preto sú určené skúšky, ktoré zredukujú potrebný čas, avšak nemôžu sa považovať za plnohodnotnú náhradu určenia volumetrickej presnosti. Skúšky diagonálneho prestavenia na určenie volumetrickej presnosti sú definované v norme ISO 230-6. [11]

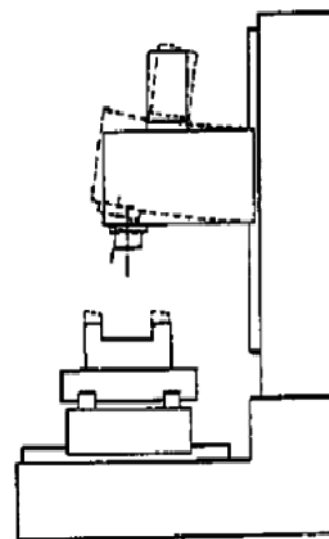


Obr. 6 Volumetrická presnosť [11]

## Teplotné dilatácie

Obrábací proces je okrem iného činnosť, kde sa pracuje s energiou. Pri zmene energie sa zákonite jej časť mení na teplo. Nárast teploty ovplyvňuje fyzikálne vlastnosti stroja. Zmenou teploty sa tieto časti predlžujú a to má za následok nepresnosti výslednej polohy a teda dochádza k výrobe nepodarkov. Objavenie tepelného driftu je obvykle jednoduchšia úloha ako určenie príčiny jeho vzniku. Teplo môže byť generované vonkajšími (prostredie) alebo vnútornými zdrojmi (ložiska, pohony). [12]

Na obrázku 7 je možné vidieť deformáciu stroja spôsobenú rozťahovaním jednotlivých komponentov pod vplyvom tepla generovaného vo vnútri stroja



Obr. 7 Pôsobenie teplotných dilatácií [13]

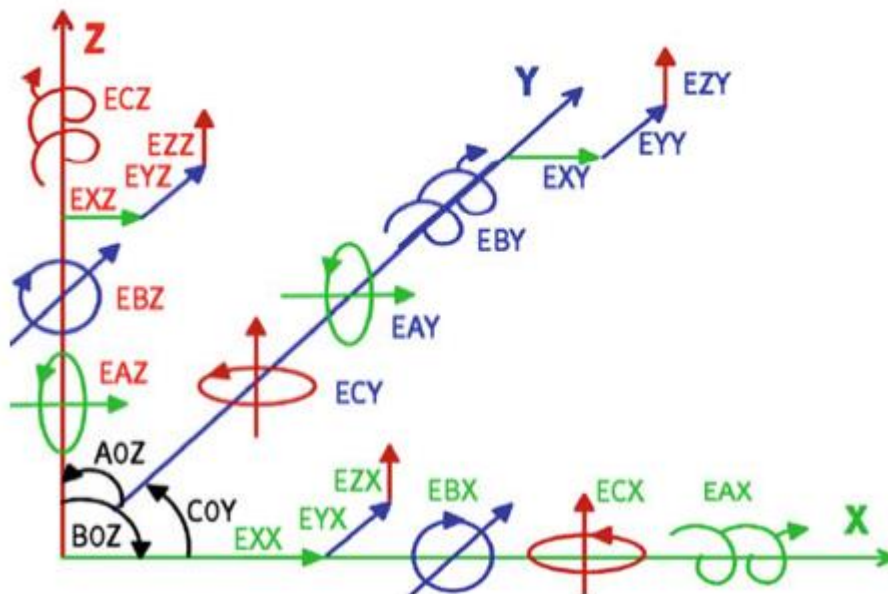


### 3.5 Chyby obrábacích strojov

Existujú tri hlavné pôvodny zdroju chýb, ktoré určujú presnosť:

- Chyby spôsobené geometrickou nepresnosťou
- Teplotne podmienené chyby
- Chyby spôsobené záťažou [14]

Chyby spôsobené geometrickou nepresnosťou sú chyby na obrábacom stroji spôsobené jeho samotnou výrobou a montážou (mechanické chyby na jeho konštrukcii a nesprávne prvotné nastavenie nástrojov. Časom sa tieto chyby v dôsledku mechanického opotrebovania zhoršujú. Na trojosom obrábacom stroji sa vyskytuje 21 geometrických chýb. Delia sa na chyby translačné (3x3), uhlové (3x3) a chyby kolmosti lineárnych osí(3). Tieto chyby sú znázornené na obrázku 8. Všetky tieto chyby môžu mať negatívny vplyv na výslednú presnosť polohovania stroja a teda aj na presnosť obrábaného dielu. Pravdepodobnosť výskytu chyby sa zvyšuje pri dynamickej interpolácii osí. Chyby kolmosti sú v A0Z (kolmost' v rovine Y-Z), B0Z(kolmost' v rovine Z-X), a C0Z(kolmost' v rovine X-Y).[8]



Obr. 8 Geometrické chyby [10]

Translačné chyby	EXX	Chyba polohovania v osi x	Uhlové chyby	EAX	uhlová chyba naklopenia v smere osi x
	EXY	Chyba priamosti osi x v smere osi y		EAY	uhlová chyba naklopenia v smere osi y
	EXZ	Chyba priamosti osi x v smere osi z		EAZ	uhlová chyba naklopenia v smere osi z
	EYX	Chyba priamosti osi y v smere osi x		EBX	uhlová chyba klopenia v smere osi x
	EYY	Chyba polohovania v osi y		EBY	uhlová chyba klopenia v smere osi y
	EYZ	Chyba priamosti osi y v smere osi z		EBZ	uhlová chyba klopenia v smere osi z
	EZX	Chyba priamosti osi z v smere osi x		ECX	uhlová chyba natočenia v smere osi x
	EZY	Chyba priamosti osi z v smere osi y		ECY	uhlová chyba natočenia v smere osi y
	EZZ	Chyba polohovania v osi z		ECZ	uhlová chyba natočenia v smere osi z

Tab. 4 Popis geometrických chýb

### 3.6 Merania geometrických chýb

V súčasnej dobe sa kladie veľký dôraz na celkovú presnosť obrábacích strojov, ktorá následne ovplyvňuje aj výslednú presnosť obrobkov. Ako základné merania pri určovaní geometrickej presnosti sa vykonáva:

#### Meranie priamosti

Chyba priamosti je ohyb a/alebo nesúosnosť jednotlivých častí stroja. Tieto chyby môžu byť spôsobené zlým dizajnom súčastí, ktoré následne zmenia svoju polohu v stroji, ich opotrebením alebo nehodou. Meranie priamosti sa vykonáva pre vodiace plochy, lineárne vedenia a podobne. Na zisťovanie priamosti sa používajú najmä libely a laserové interferometre. [8]

#### Meranie kolmosti

Meranie kolmosti je vlastne zisťovanie chyby priamosti dvoch nominálne ortogonálnych osí. Meranie prebieha za pomoci rôznych prípravkov ako napríklad meracie hranoly alebo trny a zariadení (úchylkomery a lasery). [8]

#### Meranie rovinnosti

Toto meranie sa používa na overenie rovinnosti stolov obrábacích strojov, doskových polí a podobne. Určuje, či sa v rovine stola nevyskytujú významné vrcholy alebo korytá, ktoré by mali byť korigované. [8]

#### Meranie kruhovitosti

Skúška prebieha pomocou meriaceho zariadenia zvaného Ballbar, ktoré sa pohybuje po naprogramovanej kruhovej dráhe, definovanej priemerom. Po prejdení tejto dráhy sa určí skutočná dráha. Tak ako aj v predošlých meraniach musia byť aj tu splnené požiadavky na meranie uvedené v norme ČSN ISO 230. Ide najmä o ideálnu teplotu prostredia 20°C a stroj musí byť funkčný a zahriaty na prevádzkovú teplotu. [8]

### 3.7 Meriace prístroje na hodnotenie geometrických chýb

Súčasnosť vyžaduje na presnú výrobu obrobkov čím rastie aj požiadavka na presné obrábacie stroje. Na označenie stroja za dostatočne presný je potrebné určiť a následne kalibrovať jeho chyby.

Na meranie chýb sa využíva hneď niekoľko technických zariadení, ktoré sa stále zlepšujú, po hardwarovej aj softwarovej stránke, avšak stále neexistuje jedno univerzálne, ktoré by dokázalo zmerať všetky chyby. Tieto prístroje sa rozdeľujú na základe spôsobu zbierania dát na mechanické, optické a elektronické. [9]

Medzi mechanické prístroje patria libely alebo rovnováhy, ktoré v dnešnej dobe priemyslu 4.0 strácajú na svojom význame z dôvodu náročnosti automatizácie zberu ich dát. Na vypracovanie úloh zadaných v tejto diplomovej práci sa budú využívať optické a elektronické prístroje a to produkty od firmy Renishaw (Laser-interferometer XL-80, Ballbar QC20-W).

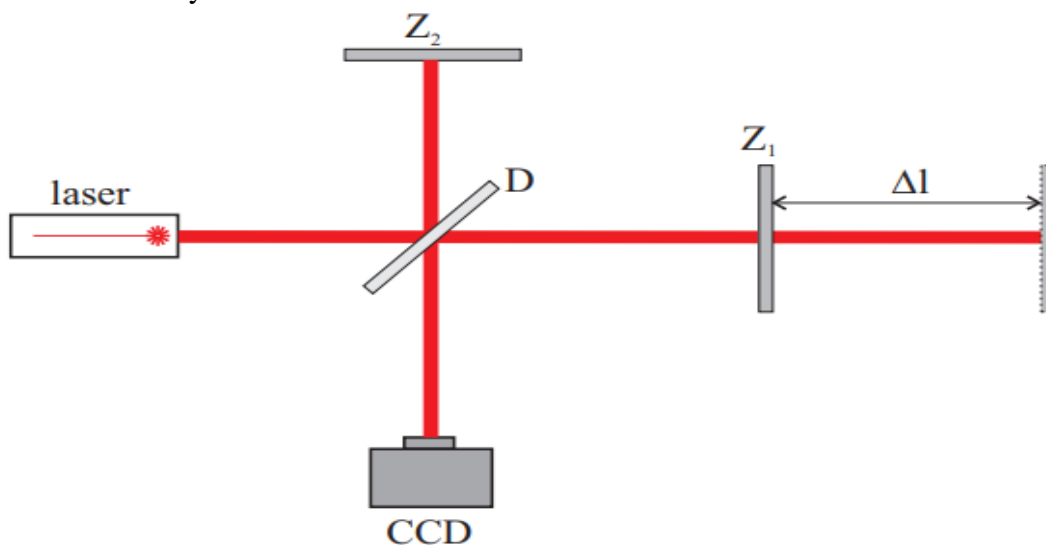
#### 3.7.1 Laser-interferometer

Laser interferometer (LI) je zariadenie slúžiace okrem iného na meranie a kalibráciu chyby priamosti, rovinnosti, kolmosti a iných. [15]

Výhoda merania rozdielov dĺžky s interferometrom je v porovnaní so skleneným meradlom v princípe ich činnosti. Laserový interferometer pracuje s vlnovou dĺžkou svetla ako s hlavnou časťou. Princíp využitia vlnových dĺžok svetla ako jednotky vzdialenosti je známy už od konca 19. storočia. Jeho využitie je možné vďaka 3 kľúčovým vlastnostiam vlnovej dĺžky svetla a to: vlnová dĺžka svetla je vždy konštantná, veľmi krátka a fázovaná. Tieto vlastnosti umožňujú presné meranie s vysokým rozlíšením a zo známeho miesta. [16]

Poznáme niekoľko druhov delení laserových interferometrov a to napríklad podľa počtu interferujúcich vln: [17]

- Dvozvázkové
  - Michelsonov (obrázok 9)
  - Mach-Zehnderov
- Viacvázkové
  - Fabry-Perotov



Obr. 9 Michelsonov interferometer [17]



### Zdroje nepresností pri meraní s LI

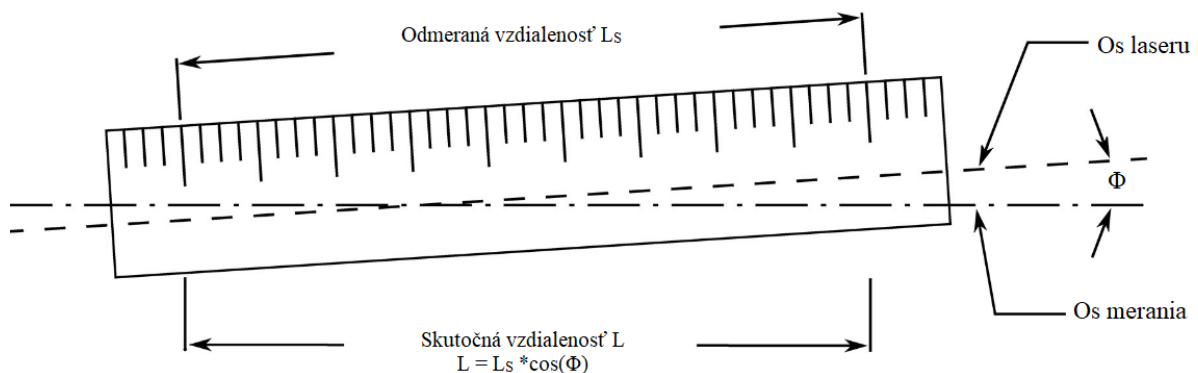
Nepresnosti pri použití interferometrov pochádzajú najmä z dvoch zdrojov, a to impakty, ktoré ovplyvňujú charakteristiku meranej optickej dráhy a elektronické zariadenia, ktoré následne tieto výsledky vyhodnocujú.

Tieto faktory nepresnosti sa môžu rozdeliť na: [18]

- **Chyby závislé na usporiadaní** – tieto chyby je možné eliminovať dodržaním správneho postupu merania
  - kosínusová chyba
  - chyba Abbého aberácie
  - chyba mŕtvej dráhy
- **Chyby závislé na prístroji** – sú dané konštrukciou daného prístroja, nedajú sa ovplyvniť
  - stabilita vlnovej dĺžky
  - chyba elektroniky
  - nelinearita prístroja

### Kosínusová chyba

Táto chyba sa je dôsledkom vychýlenia osi laseru od osi merania o uhol  $\Phi$ . Toto natočenie spôsobí, že odmeraná dĺžka  $L_s$  nekorešponduje so skutočnou dĺžkou  $L$  (viď obrázok 10). Výsledná veľkosť je priamo úmerná kosínusu uhla vychýlenia. Chyba sa eliminuje tým, že sa obe osi umiestnia navzájom rovnobežne. [19]



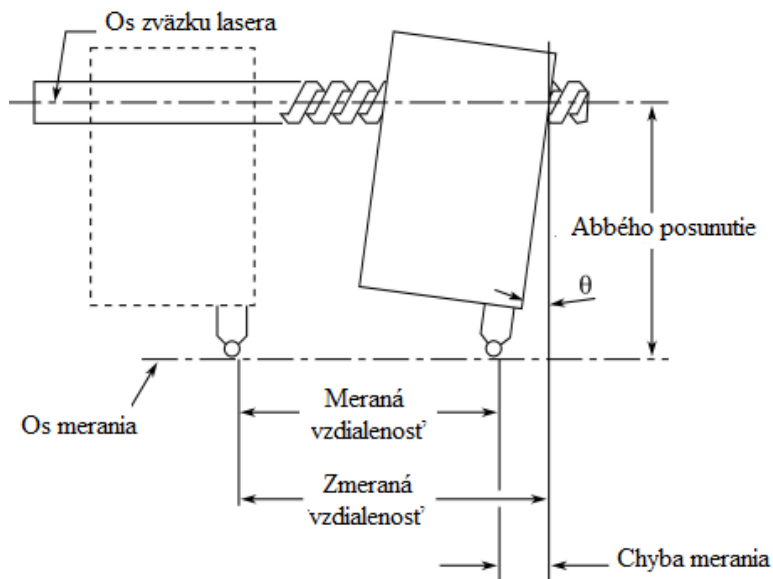
Obr. 10 Kosínusová chyba [18]

### Chyba Abbého aberácie

Abbého chyby aberácie sú často najdôležitejšími zdrojmi neistoty pri rozmerových chybách v metrologických aplikáciách, ktorých cieľom je neistota merania len niekoľko nanometrov. [20]

Túto chybu prvý popísal Dr. Ernst Abbé. V prípade merania LI sa chyba Abbého aberácie vyskytuje, keď sa skutočná a zmeraná dráha líšia kvôli rozdielnym osiam merania a pohybu laserového lúča. Pôvod tejto chyby môže byť spôsobený nevhodným náklonom optických komponentov a pre jeho odstránenie je potrebné použiť polohovací systém, ktorý prenáša meranú vzdialenosť z osi merania na os laserového zväzku. Aby bola presnosť merania maximálna, polohovací systém musí byť kolmý na os laserového zväzku aj na os merania. V priebehu merania môže dôjsť k nechcenému posunu polohy, čo spôsobí zväčšenie alebo

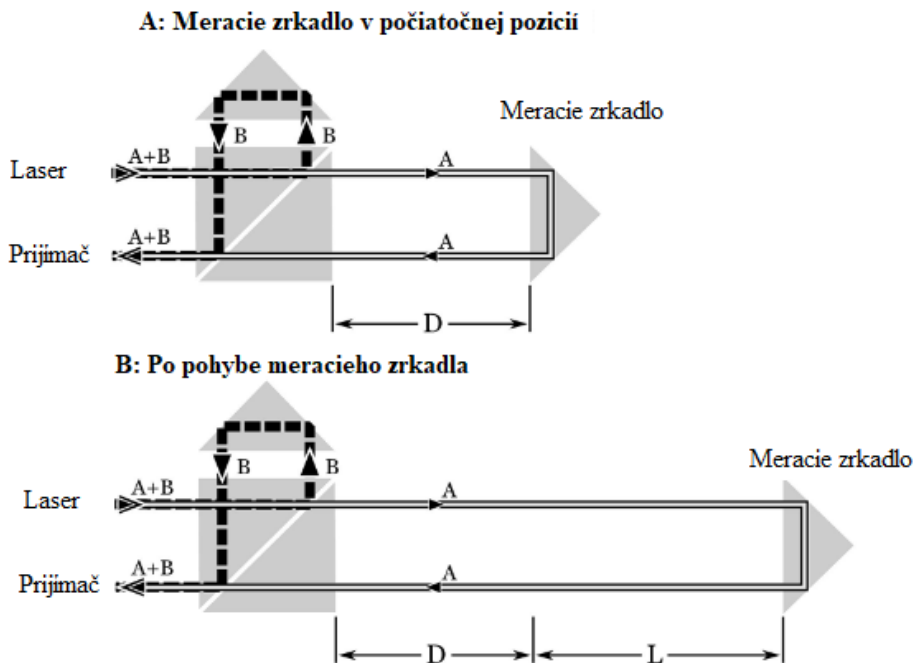
zmenšenie zmeranej vzdialenosti v závislosti od uhla natočenia  $\Phi$  (vid' obr. 11). V aplikáciách s vysokou presnosťou nie je možné úplné odstránenie tohto efektu.[18]



Obr. 11 Chyba Abbého aberácie [19]

### Chyba mŕtvej dráhy

Chyba mŕtvej dráhy  $D$  vzniká z rozdielu dĺžok dráh zväzkov v meracej ( $A$ ) a referenčnej ( $B$ ) vetve interferometra v nulovej pozícii. Táto chyba je spôsobená zmenou vlnovej dĺžky laserového zväzku  $\lambda$  počas celého jeho priebehu na dráhe  $D + L$ . Merací systém môže tento vplyv kompenzovať na základe meranej vzdialenosti  $L$ . Avšak ak zostane nevykompenzovaná zmena vlnovej dĺžky  $\lambda$  laserového zväzku na vzdialenosti  $D$ , potom sa táto chyba prejaví ako chyba mŕtvej dráhy v meranej vzdialenosti  $L$  (obrázok 12). Je dôležité poznamenať, že nulová mŕtva dráha nastáva, keď má referenčná a meraná optická dráha rovnakú dĺžku.[18]



Obr. 12 Chyba mŕtvej dráhy [18]

### Laser interferometer XL-80

XL-80 je laserový interferometer (obr. 13) vyrábáný firmou Renishaw umožňujúci presné merania obrábacích strojov. Jeho kľúčové vlastnosti sú presnosť lineárneho merania  $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$  v teplotnom rozmedzí 0 až 40 °C a tlaku 65 – 115 kPa. [16]

Ako pri každom procese je aj používanie LI ovplyvnené prostredím, v ktorom toto meranie prebieha. Zmena teploty, tlaku a relatívnej vlhkosti prostredia sa premietajú vo výsledkoch meraní a preto aj tu výrobcovia meracích zariadení vyrábajú kompenzátory prostredia, ktoré sú používané v tandeme so samotnými LI. XL-80 je preto používaný s XC-80 kompenzátorom a jeho príslušnými senzormi Tieto senzory merajú teplotu, tlak a relatívnu vlhkosť vzduchu a upravujú namerané údaje. Celý tento proces prebieha každých 7 sekúnd

Na získanie a vyhodnotenie získaných údajov sa používa software Capture a Explore, ktoré umožňujú zobrazenie výsledkov podľa noriem ISO 230-4, ASME a pod.



Obr. 13 Laser interferometer XL-80 [16]

Technické parametre - LI XL-80	
Presnosť lineárneho merania	$\pm 0,5 \mu\text{m/m}$
Minimálne rozlíšenie	1 nm
Max. rýchlosť	4 m/s
Čas predhriatia lasera	6 min
Štandardný lineárny dosah	80 m
Štandardná záruka	3 roky

Tab. 5 Technické parametre XL-80 [16]

### Neistota merania laserového interferometra

Tak ako každé zariadenie má aj LI XL-80 a jeho kompenzátor XC-80 svoje maximálne rozlišovacie schopnosti. Týmito vlastnosťami je daná výsledná presnosť výsledkov, ktorá je potom udávaná s istými odchýlkami (neistotami meraní). Ako príklad je udávané výrobcom, že už pri náraste teploty o 0,26 °C alebo poklese tlaku o 0,93 mbar sa vlnová dĺžka lasera z XL-80 zvýši o 0,25 ppm (častíc na milión).[21]

Následnou kombináciou zmien v teplote, tlaku a vlhkosti od nominálnych hodnôt môže výsledná neistota (nepresnosť) dosiahnuť 20-30 ppm (dokonca aj pri stabilných podmienkach skúšky). Preto je výsledná odchýlka lineárnej presnosti XL-80 udávaná výrobcom  $\pm 0,5 \text{ ppm}$

( $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$ ), v tepelnom rozsahu 0-40°C. Pre kompenzátor XC-80 platí presnosť podľa tabuľky 6.

Rozsah prac. podmienok - kompenzátor XC-80		Presnosť
Teplota materiálu	0-55 °C	$\pm 0,1 \text{ °C}$
Teplota vzduchu	0-40 °C	$\pm 0,2 \text{ °C}$
Tlak vzduchu	650-1150 mbar	$\pm 1 \text{ mbar}$
Relatívna vlhkosť	0-95%	$\pm 6 \text{ \% RV}$

Tab. 6 Neistota merania pomocou XC-80

Všetky vyššie uvedené neistoty kompenzátora sa skombinujú, čím sa získa celková neistota kompenzátora  $\pm 0,38 \text{ ppm}$ .

V tabuľke 7 je definované rozdelenie neistoty systému ako celku, kde je zahrnutý XL, XC a všetky snímače. Kombinovaná neistota je druhou odmocninou súčtu štvorcov všetkých neistôt. Rozšírená neistota je dvojnásobkom kombinovanej neistoty. Práve táto hodnota sa používa na posúdenie celkovej neistoty (presnosti) merania. [21]

Druh neistoty	Neistota	Rozdelenie pravdepodobnosti	Koeficient	Neistota ppm
Jednotka XC - 80	$\pm 0,38 \text{ ppm}$	Normálne (k=2)	0,5	0,19
Laserová frekvencia	$\pm 0,05 \text{ ppm}$	Normálne (k=2)	0,5	0,025
Nehomogenita vzduchu	$\pm 0,3 \text{ ppm}$	Normálne (k=2)	0,5	0,15
Kombinovaná neistota (k=2)		$\pm 6 \text{ \% RV}$		0,24
Rozšírená neistota (k=2)				0,49

Tab. 7 Výsledná neistota merania LI ako celku.

### 3.7.2 Ballbar QC20-W

Systém Ballbar (DBB) (obr. 15) je zariadenie umožňujúce merať zmeny polomeru pri otáčaní Ballbaru okolo pevného bodu. Toto meranie prebieha za pomoci presne nakalibrovaného lineárneho snímača. Priebeh diagnostiky obrábacieho stroja pozostáva z upevnenia 2 magnetických držiakov, jedného na stôl a druhého do vretena stroja. Do týchto držiakov sa umiestnia konce Ballbaru a spustí sa test. Skúška je postavená na interpolácii 2 lineárnych osí. Následne sa získané údaje spracujú v software Renishaw Ballbar Advanced, ktorý umožňuje aj simulovanie následkov zmeny zaznamenaných chýb a ich vplyv na výslednú kruhovitosť. [22]



Obr. 14 Ballbar QC20-W[22]

Technické parametre zariadenia DBB sú v tabuľke č.8.

Technické parametre - DBB	
Rozlíšenie snímača	0,1 $\mu\text{m}$
Presnosť snímača ballbaru	$\pm 0,5 \mu\text{m}$
Presnosť merania systému (20 °C)	$\pm 1,25 \mu\text{m}$
Rozsah merania snímačom	$\pm 1,0 \text{ mm}$
Rozsah prac. teplôt	0 °C - 40 °C
Max. rýchlosť snímania	1000 Hz

Tab. 8 Technické parametre Ballbaru

#### Neistota merania Ballbaru QC-20W

Podobne ako LI aj zariadenie DBB pracuje s určitou mierou neistoty. Výrobca udáva, že radiálna variácia sa pohybuje v rozmedzí  $\pm [0.7+0.3\%*L]$   $\mu\text{m}$  at  $20 \pm 5$  °C, kde L je absolútna hodnota dosahu DBB. Samotná dĺžka DBB je kalibrovaná s mierou neistoty  $\pm 1 \mu\text{m}$ . [23]

Metodika určenia tejto miery neistoty je uvedená v norme ISO 9001:2015. Prvky prispievajúce k celkovému určeniu neistoty sú odvodené z kombinácie špecifikácií komponentov, experimentálnych dôkazov o výkonnosti a teoretických výpočtov. Všetky špecifikácie sú uverejnené s 95 % ( $k = 2$ ) úrovňou spoľahlivosti. V nasledujúcich tabuľke č.9 sú uvedené jednotlivé elementy DBB QC20 a jeho kalibrátora. [23]

Pôvod neistoty	Hodnota neistoty	Rozdelenie pravdepodobnosti	Neistota $\pm \mu\text{m}$
Neistota kalibrácie DBB	$\pm 0.40$	Normálne ( $k=2$ )	0,2
Limit testu akceptácie Ballbaru	$\pm 0.40$	Normálne ( $k=2$ )	0,2
Ballbar drift počas 1 roka	$\pm 0.30\%L^*$	Normálne ( $k=2$ )	$0,15\%*L$
Sféricita guľôčky	0.13	Obdĺžnikové	0,11
Hysteréza	$\pm 0.06$	Normálne ( $k=3$ )	0,02
Tepelná rozťažnosť Ballbaru	$\pm 0.10$	Normálne ( $k=1$ )	0,1
Odchýlka stredového čapu	$\pm 0.15$	Normálne ( $k=1$ )	0,15
Ballbar drift počas 1 roka			$0.35 \mu\text{m} + 0.15\%L$
Kombinovaná neistota ( $k=2$ )			$0.70 \mu\text{m} + 0.30\%L$
Rozšírená neistota ( $k=2$ )			$0.70 \mu\text{m} + 0.30\%L$

Tab. 9 Výsledná neistota merania s DBB QC-20W

### 3.8 Definície a terminológia

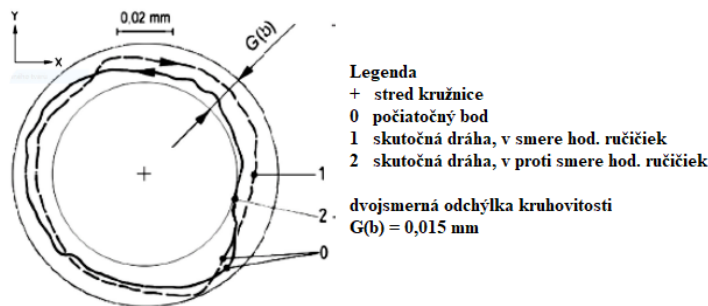
Táto podkapitola sa bude venovať vysvetleniu hlavných pojmov. Keďže sa pojem kruhovitosť spája nielen so strojom ale je to aj vlastnosť obrobku, mohli by bez dodatočného vysvetlenia vzniknúť nedorozumenia. Takisto je dôležité vysvetlenie rozdielu medzi polohovaním na stroji a prejavom chyby polohovania na obrobku.

#### 3.8.1 Kruhovitosť na stroji

Kruhovitosť (kruhovú interpoláciu dvoch lineárnych osí) na stroji je definovaná normou ČSN ISO 230-4. Táto norma je českým ekvivalentom medzinárodnej normy ISO 230-4 a popisuje metódy a vyhodnotenia skúšok dvojsmerné chyby kruhovitosti, odchýlku kruhovitosti a radiálnu odchýlku F. Kruhovitosť na stroji sa meria Ballbarom, mriežkovým snímačom a pod.

##### Dvojsmerná chyba kruhovitosti - $G(b)$

$G(b)$  je minimálna radiálne oddelená vzdialenosť dvoch sústredných kružníc ohraničujúca dve skutočné dráhy, kde je jedna tvorená pohybom v smere a jedna v protismere hodinových ručičiek. [24]



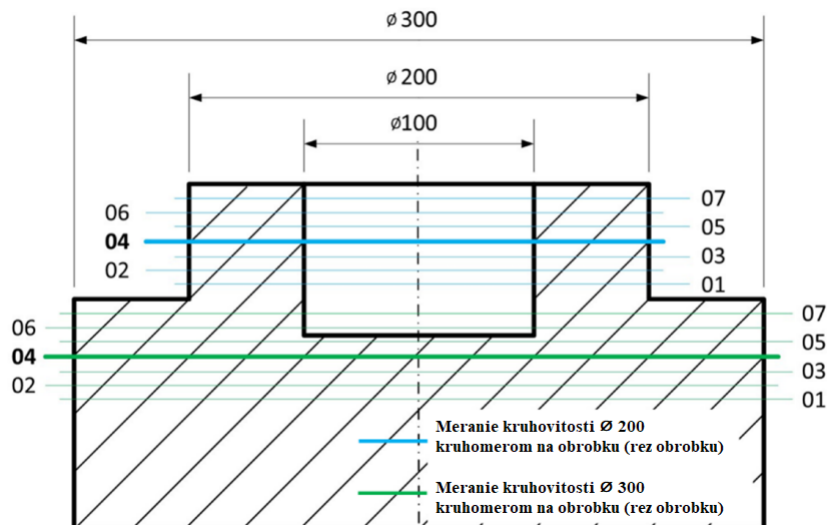
Obr. 15 Kruhovitosť na stroji [24]

#### 3.8.2 Kruhovitosť na obrobku

Kruhovitosť obrobku je jeho geometrická vlastnosť, požiadavka ktorú musí hotový výrobok splniť v rámci zadaných tolerancií. Je to tolerančná zóna ohraničená dvoma sústredenými kružnicami v rovine. Jej meranie prebieha napríklad dvojbodovou metódou, trojbodovou metódou, sondou súradnicového meracieho stroja alebo kruhomerom. [24]

Typom kruhomeru je napríklad prístroj Taylond 595S, ktorý meria s rozšírenou neistotou ( $k=2$ )  $0,063 \mu\text{m}$ . [26]

Tento kruhomer bol použitý na meranie kruhovitosti na obrobku na obrázku 16.



Obr. 16 Meranie kruhomerom zobrazené v reze obrobku [26]

<b>Kruhovitost'</b>		
	Na stroji	Na obrobnku
Pojem	Výsledok kruhovej interpolácie 2 lineárnych osí	Daná geometrická tolerančná zóna
Meranie	Ballbar, lasertracker, mriežkový snímač	Dvoj-, trojbodová metóda, súradnicový mer. prístroj

Tab. 10 Kruhovitost' – porovnanie

### 3.8.3 Polohovanie na stroji

Ako už bolo spomínané v kapitolách vyššie, polohovanie na stroji je definované normou ISO 230-2. Táto norma určuje zásady skúšok pri určovaní presnosti a opakovateľnosti polohovania pre obrábací stroj. Dôležitými pojmom definovaným v tejto norme je obojsmerná chyba polohovania A.

#### Obojsmerná chyba polohovania - A

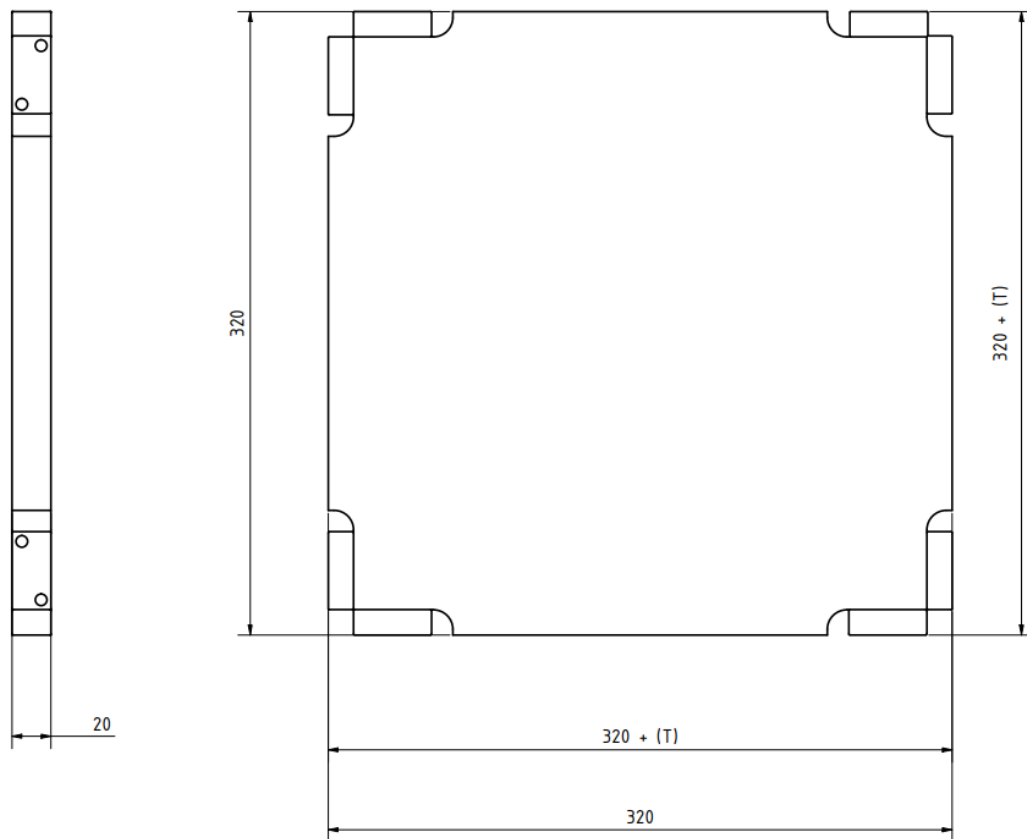
Rozsah A je odvodený z kombinácie priemernej obojsmernej systematickej polohovej chyby a odhadu pre opakovateľnosť pri obojsmernom nastavení polohy pri použití koeficientu rozšírenia  $k = 2$ . [27]

Norma ISO 230-2 ďalej definuje celý postup merania od nastavenia stroja, až po vyhodnotenie výsledkov a ich prezentáciu. Presnosť a opakovateľnosť polohovania sa meria zvyčajne laserovými interferometrami.

### 3.8.4 Chyba polohy na obrobnku

Chyba polohy stroja sa teda musí prejavíť aj na obrobnku. Pri nesprávnej presnosti polohovania sa nástroj nepresunie do správnej teoretickej polohy a teda vznikajú pri reznom procese na obrobnku odchýlky, ktoré sú mimo predpísaných tolerancií z čoho plynie výroba nepodarkov. Pri zlej opakovateľnosti polohovania vzniká veľký rozptyl presunu do rovnakej pozície. Toto má opäť za dôsledok výrobu nepodarkov. Parameter opakovateľnosti je obvykle nižší ako presnosti polohovania, má na neho väčší vplyv okolitá teplota.

Ako doplnkový cieľ tejto práce bude aj meranie chyby na obrobnku spôsobenej chybou polohy stroja pri obrábaní. Bude sa obrábať zostava (jej náčrt je zobrazený na obrázku 17). Táto zostava sa skladá z jednej základnej dosky o rozmeroch 320x320 mm. Táto doska je v rohoch ofrízovaná a sú na ňu prišraubované menšie doštičky. Po zmontovaní a ofrízovaní tejto zostavy, by mali byť v ideálnom svete rozmery opäť 320x320mm. Avšak tu sa prejaví chyba polohy na obrobnku, keďže výsledný rozmer bude  $320 \pm (T)$ , kde T je už vyššie spomenutá chyba polohy na obrobnku.



Obr. 17 Náčrt obrábaného dielu

V nasledujúcej tabuľke je ešte raz uvedené porovnanie medzi chybou polohovania na stroji a chybou na obrobku.

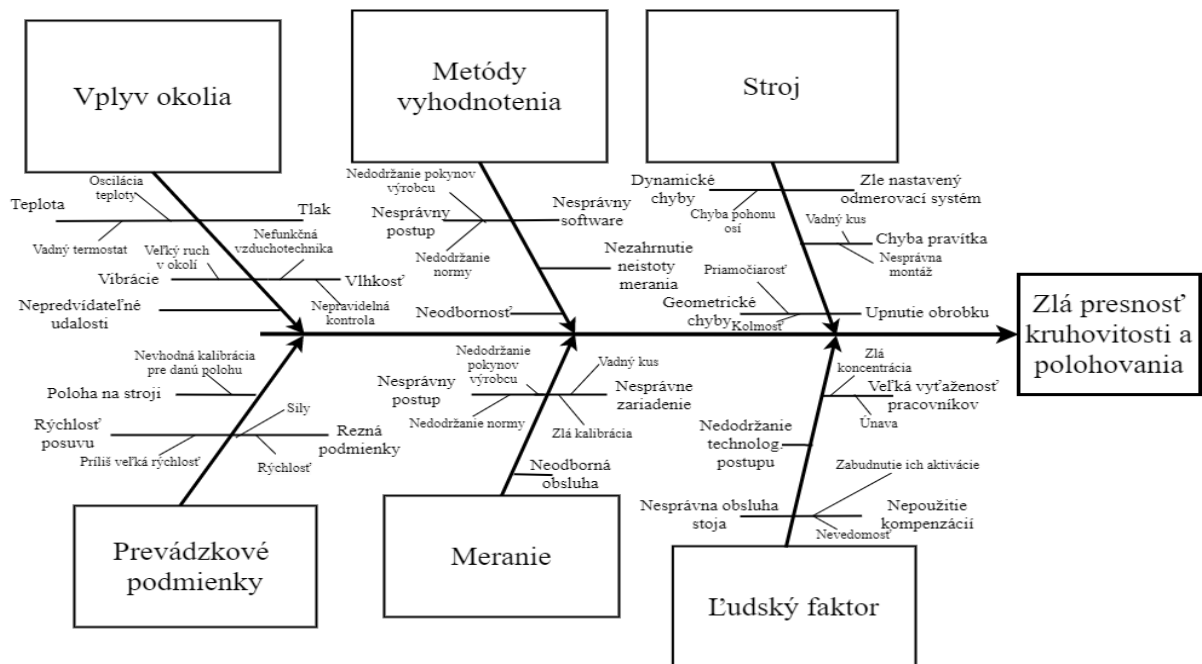
<b>Polohovanie</b>		
	Na stroji (presnosť a opakovateľnosť)	Chyba na obrobku
Definícia	Charakteristika stroja, meraná podľa ISO 230 -2	Nedodržané rozmerové tolerancie
Meranie	Laserový interferometer	Súradnicovým mer. stroj

Tab. 11 Polohovanie – na stroji vs. chyba na obrobku



# 4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Táto časť diplomovej práce sa zaoberá systémovým rozborom problematiky. Úlohou diplomovej práce je posúdiť vplyv prevádzkových podmienok na výslednú presnosť kruhovitosti a polohovania na obrábacom frézovacom centre. Pred samotným vykonaním experimentu je nevyhnutné určiť závislosti medzi jednotlivými vplyvmi, ako je poloha merania v rámci stroja, rýchlosť posuvu, teploty osí a okolia a pod. Na tento účel sa použije Ishikawa diagram (diagram rybej kosti), ktorý sa nazýva aj diagram príčin a následkov (viď obrázok 18 a prílohu 1).



Obr. 18 Ishikawa diagram

## 4.1 Vonkajšie vplyvy

CNC stroj sa vždy nachádza v určitom prostredí, ktoré naň vplyva. Tieto vplyvy nie je možné dokonale odizolovať a preto je potrebné ich aspoň pozorovať. Medzi hlavné vonkajšie vplyvy patria napríklad:

- Teplota okolia a jej zmena
- Vplyv vibrácií od okolia
- Ľudský činiteľ

## 4.2 Vplyvy častí stroja

Čím má stroj viac na seba nadväzujúcich súčastí tým viac sa chyby prenášajú a sčítavajú. Napríklad pri chybe na pravítku sa táto chyba prenáša do systému vyhodnocovania odmerovania, kde sa môže navýšiť o ďalšiu nepresnosť a ich výsledok sa prenáša do obrodku.

Medzi takéto vplyvy patrí napríklad chyba na:

- Lineárnom snímači polohy,
- Riadiacom systéme,
- Upínaní,
- Chyba stúpania na šróbe,
- Generovanie tepla vnútornými zdrojmi,
- Tuhosť jednotlivých komponentov (torzná tuhosť)

### 4.3 Analýza vplyvov častí stroja na kruhovitosť

#### Kruhovitost'

je pri meraní DBB definovaná ako rozdiel nameraný medzi najväčším a najmenším polomerom pri pohybe Ballbaru okolo oblúka snímania údajov. Je to teda parameter charakteristiky stroja. Platí, že čím väčšia je hodnota, tým horší je výkon stroja. [28]

#### 4.3.1 Geometrické chyby

##### Relatívna chyba odmerovania

je rozdiel nameraných dráh osí počas testu. Napríklad ak stroj vykonáva kružnicu v rovine XY; osi X a Y by mali prejsť presne rovnakú vzdialenosť. Ak sa tak nestane, rozdiel v ich pohyboch vyneseny v grafe predstavuje chybu odmerovania. Jej presnosť závisí najmä na správnej kalibrácii Ballbaru a použitia teplotných kompenzácií. Tento parameter je tiež citlivý na rýchlosť posuvu. Čím väčšia je rýchlosť posuvu, tým je vyššia hodnota rel. chyby odmerovania a teda horší výkon stroja. [28]

##### Kolmost'

udáva uhol medzi dvoma osami v skúšobnej rovine. V ideálnom prípade by osi zvierali uhol  $90^\circ$  a teda hodnota chyby kolmosti by bola nulová. Dôsledkom tejto chyby je, že výsledné obrábané plochy na obrobku na seba nebudú kolmé. Oprava tejto chyby je možná prestavením osí stroja a/alebo vymenením opotrebovaných vodiacich dráh, ktoré spôsobujú vôľu. [28]

##### Priamočiarosť

je daná nedostatočnou priamočiarosťou vodiacich dráh. Toto môže byť spôsobené ohnutím jednej osi v prípade lokálnej chyby alebo celkovou nesúosnosťou viacerých dráh. Efektom tejto chyby je zhoršenie presnosti stroja a jeho výkonu. [28]

#### 4.3.2 Chyby chodu

##### Mŕtvy chod

je daný vôľou v jednotlivých osiach najmä v guľôčkovom šróbe, poprípade matici. Táto vôľa spôsobuje, že pohyb sa „stráca“ a teda je omeškaný o hodnotu vôle. Účinok tejto chyby je skrátenie interpolovanej dráhy frézky. Zamedzenie tohto vplyvu na kruhovitosť je odstránenie všetkých vôlí v celom pohybovom systéme osí výmenou opotrebovaných súčiastok, poprípade ich kompenzáciou vôlí. [28]

#### 4.3.3 Dynamické chyby

##### Nezhoda serva

nastáva pri nezhode servopohonou jednotlivých osí. Výsledkom je oválny tvar miesto kruhovitého, keďže pohon jednej osi je rýchlejší ako druhej. Ako možné riešenie sa ponúka vybalancovať oba pohony na rovnakú hodnotu, t.j. zrýchliť zaostávajúce servo alebo spomaliť pohon rýchlejšej osi. [28]

## Omeškanie serva

je výsledkom zmeny smeru pohybu osi. Miesto plynulého obrátenia v mieste obratu môže nastať zastavenie. Toto je spôsobené napríklad neprímeraným krútiacim momentom, pri ktorom nastala zmena smeru trecích síl. Ďalším možným dôvodom je nedostatočne vykompenzovaná hodnota mŕtveho chodu. Následkom tohto javu sú špičky na miestach zmien smeru vo výslednej kruhovej dráhe. [28]

## 4.4 Vplyvy merania

Na samotné výsledky merania má vplyv umiestnenie meraného objektu alebo meracieho zariadenia. Ako už bolo spomenuté každé meracie zariadenie má dané výrobcom svoje nepresnosti. Pri LI sú to napríklad Abbého chyba, kosínusová chyba. Tieto vplyvy je potrebné eliminovať.

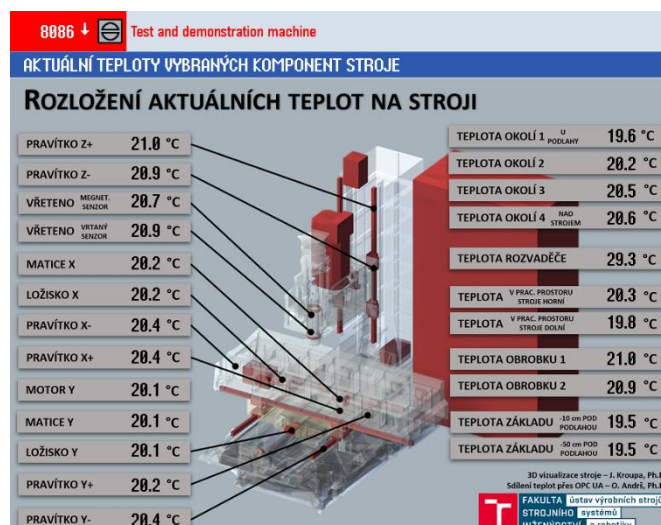
## 4.5 Vplyvy prevádzkových podmienok

Pod prevádzkovými podmienkami sa z Ishikawa diagramu zaraďujú: rýchlosť posuvu, poloha na stroji, teplo generované jednotlivými časťami a rezné podmienky. Keďže rezné podmienky sú, ako už bolo vyššie uvedené rozdielne pre rôzne typy operácií a aj pre rôzne materiály, sú pre účely tejto práce zvolené ako skúmané podmienky rýchlosť posuvu, poloha na stroji a generované teplo.

Maximálna rýchlosť posuvu pri meraní je ohraničená maximálnou možnou rýchlosťou posuvu samotného stroja a následne aj výrobcom meracieho zariadenia. Nie je však uvedené aký vplyv majú rozličné rýchlosti v dovolenom rozsahu. Týmto problémom sa bude zaoberať táto práca ako s jedným z čiastkových cieľov.

Poloha na stroji je dôležitým faktorom keďže obrábanie neprebíha stále na tom istom mieste ale vo väčšine prípadov v časti pracovného priestoru. Predpoklad je, že presnosť v tomto priestore nemôže byť všade rovnaká z dôvodu geometrického a tepelného rozloženia stroja.

Pri každom pohybe v rámci stroja je generované teplo vplyvom trenia jednotlivých komponentov. Toto zahrievanie spôsobuje rozťahovanie súčastí stroja a teda musí mať vplyv na jeho výslednú presnosť. Stroj MCV 754 Quick je vybavený tepelnými čidlami (viď obr. 19). Tieto zariadenia nám umožňujú zistiť okamžitú teplotu jednotlivých komponent v reálnom čase.



Obr. 19 Teploty na stroji

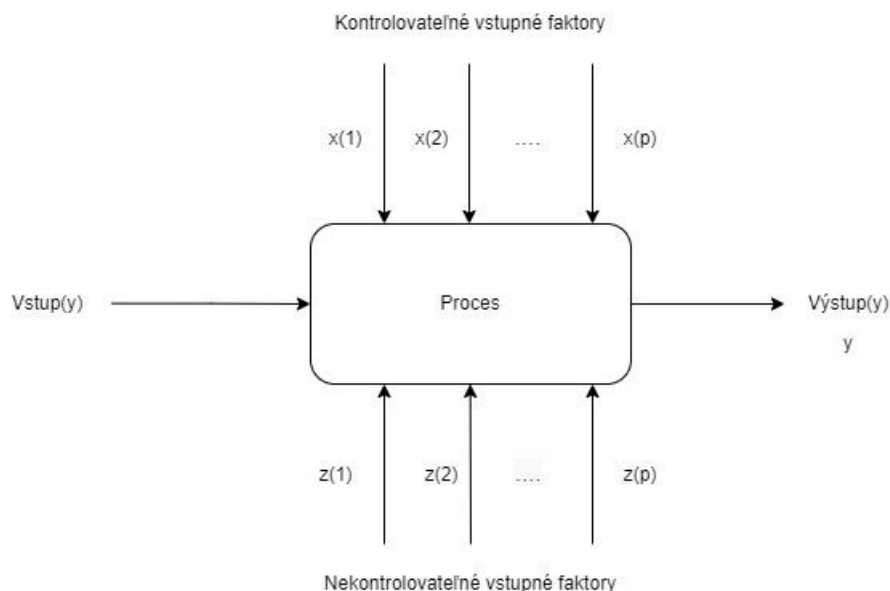
Pre vyhodnotenie týchto parametrov je potrebné zvoliť vedecký a systematický prístup a preto bolo pripravené štatistické plánovanie experimentu a následne navrhnutý spôsob testovania.

## 4.6 Štatistické plánovanie experimentu

Pre správne navrhnutie experimentu je najskôr potrebné porozumieť experimentu ako druhu procesu. Proces je definovaný ako zmena vstupov (v strojárstve: ľudí, materiálu, metód, strojov) na výstupy (napr. zlepšenie výroby alebo charakteristiky produktov). [29]

Na proces vplývajú rozličné faktory. V reálnom svete sa niektoré z nich dajú kontrolovať a relatívne ľahko meniť v priebehu procesu. V našom prípade sa za kontrolovaný vstupný faktor berie napríklad stabilita laserového lúča. Na druhej strane existuje množstvo faktorov, ktoré sa síce dajú merať ale nie meniť. Tieto faktory sa nazývajú nekontrolovateľné vstupné faktory. [30]

Typickým príkladom nielen v tomto experimente je teplota okolia, ktorá sa dá pozorovať, ale len náročne ovplyvňovať. Model procesu je znázornený na obrázku č. 20.



Obr. 20 Proces

### 4.6.1 Základné princípy plánovania experimentu

Pri návrhu experimentu je potrebné dbať na to, aby výsledky plánovania, dizajnu a vyhodnocovania experimentu boli platné a objektívne. Na to slúžia základné princípy plánovania:

- Randomizácia
  - Jej cieľom je odstrániť zdroje vonkajších odchýlok, ktoré nie je možné kontrolovať v reálnych podmienkach a tým pádom znížiť dopad systematických vplyvov (napríklad zlej kalibrácie stroja). Dôležitým faktorom je nezávislosť jednotlivých meraní. [31]

- Replikovateľnosť
  - Replikovateľnosť experimentu znamená jeho opakovanie. Tento princíp slúži na odstránenie náhodnej chyby, ktorá sa môže vyskytnúť z dôvodu miernej zmeny napríklad testovaného materiálu, strojov atď.
- Blokovanie
  - Blokovanie je metóda slúžiaca na elimináciu nežiadúcich zdrojov variability ako je napríklad rozdiel medzi jednotlivými dávkami surovín. Blokovanie je postavené na princípe združovania homogénnych meraní do samostatných blokov, čo eliminuje chyby experimentu spôsobené rozdielnymi vstupnými faktormi. [29]

#### 4.6.2 Úplný faktorový plán skúšok

Ako ideálne riešenie návrhu experimentu je použitie plne faktorového plánu skúšok. Jeho podstatou je obmenenie všetkých posudzovaných faktorov (vplyvov). Výhodou tohto riešenia je podchytenie všetkých možností a posúdenie pôsobenia jednotlivých faktorov na proces pri zmene iných. Jeho hlavnou nevýhodou je veľký počet skúšok, ktoré stúpajú s počtom testovaných faktorov. [32]

Ako príklad je uvedený priebeh skúšky, kde sú zvolené 3 faktory. Priebeh takejto skúšky sa pri úplnom faktorovom pláne skúšok riadi nasledujúcim postupom:

- Určí sa počet faktorov, ktoré sa chcú preveriť (v tomto príklade 3)
- Vyberie sa počet nastavení, s koľkými je každý faktor preverovaný
- Určí sa počet nastavení – pri lineárnom procese 2 („+“ a „-“)
- Vytvorí sa matica s n-stĺpcami (počet faktorov) a m-riadkami (počet kombinácií – väčšinou  $2^n$ )

	A	B	C
1	-	-	-
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	+
5	+	-	-
6	+	-	+
7	+	+	-
8	+	+	+

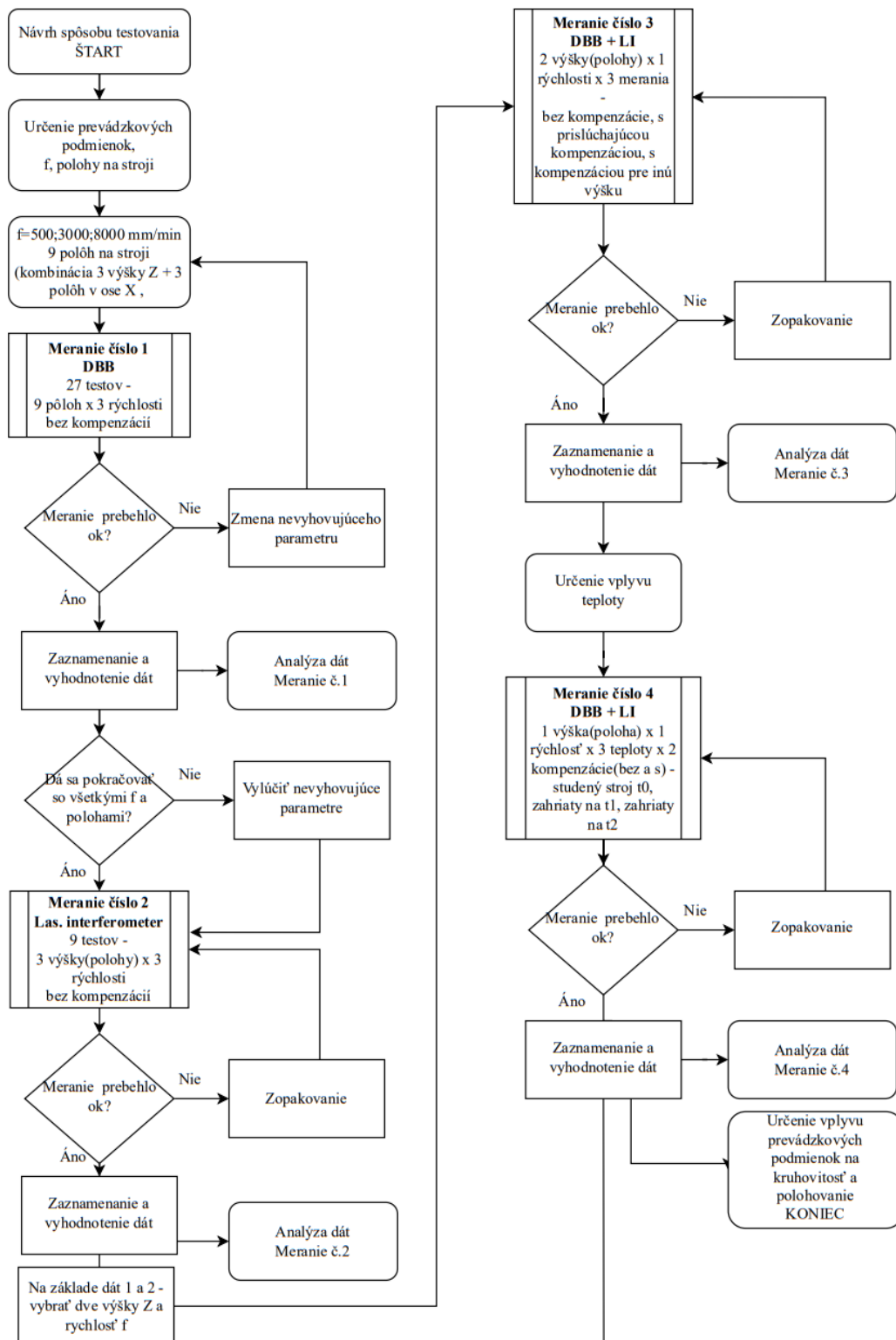
Tab. 12 Úplne faktorový plán skúšky

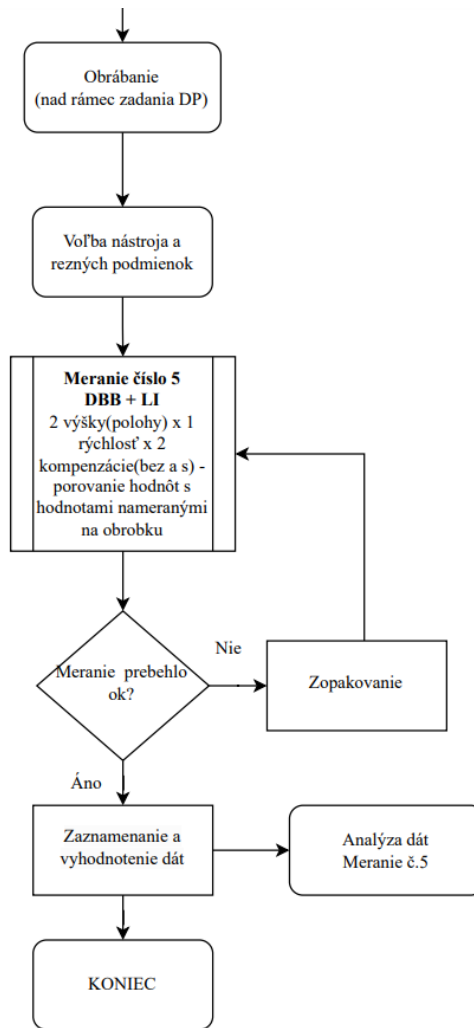
Z dôvodu vysokého počtu faktorov, ktoré sú vybraté pre riešenie tejto práce (viď Ishikawa diagram) by samotné testovanie trvalo príliš dlho. Preto bol zvolený ako návrh spôsobu testovania Flow-chart, ktorý je bližšie popísaný v nasledujúcej kapitole.



## 5 NÁVRH SPÔSOBU TESTOVANIA

Táto kapitola sa bude zaoberať návrhom postupu a spôsobu testovania. Ako už bolo uvedené vyššie prebehne viacero testov na kruhovitú, ktorá sa bude merať pomocou DBB a na presnosť polohovania meraní laserovým interferometrom. Merať sa bude vplyv prevádzkových podmienok. Spôsob testovania je navrhnutý pomocou Flowchartu, kde je systematicky a prehľadne zobrazený postup skúšok.





Ako je vidieť na vývojovom diagrame, sú navrhnuté 4 základné merania. Tieto merania sú bližšie rozpísané v kapitole č.6. Následne je nad rámec cieľov diplomovej práce pridané meranie 5, kde je navrhnutý aj proces obrábania. Tam porovnávajú dáta, ktoré je možné získať meraním na stroji (LI) s dátami nameranými na obrobenej výrobku (namerané na súradnicovom meracom prístroji).



## 6 ANALÝZA VÝSLEDKOV MERANÍ

V tejto kapitole sú zhrnuté výsledky meraní a ich následná analýza. Všetky merania sú popísané na základe toho, čo sa meralo kedy a akým spôsobom. Sú skúmané vplyvy jednotlivých meraných veličín ako napríklad: rýchlosti posuvu, teploty, polohy na stroji. Výsledky sú následne zanalyzované a je popísaný ich význam na výslednú presnosť polohovania a kruhovitosti.

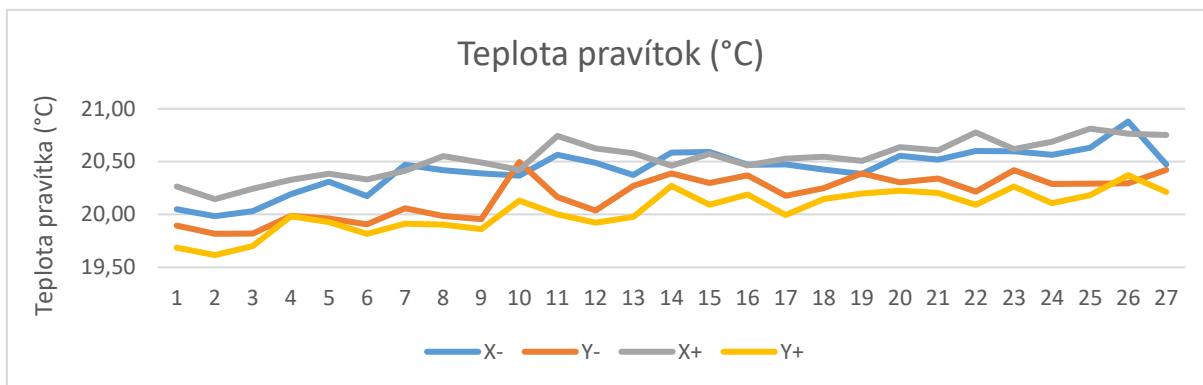
### 6.1 Meranie č.1

Úvodné meranie sa uskutočnilo 17.01.2023 v priestoroch laboratória ÚVSSR C1/118. Úlohou tohto merania bolo stanoviť si základné chybové charakteristiky, merateľné pomocou DBB ako napríklad toleranciu polohy, kruhovitosť, relatívnu chybu odmerovania, omeškanie serva Y a pod., pre rôzne rýchlosti posuvu ( $f=500,3000,8000$  mm/min) a v rôznych polohách na stroji. Vykonalo sa 27 testov pomocou DBB (obr. 23) v 9 polohách (obr. 21) (pri zmene x-ovej a z-ovej súradnici) v rámci pracovného priestoru stroja MCV. Polomer Ballbaru bol nastavený na 150 mm, vykonali sa dva celé okruhy ( $360^\circ$ ) aj s  $45^\circ$  prejazdom na vymedzenie vôľí. Celé meranie prebehlo bez zapnutých kompenzácií.



Obr. 21 Polohy jednotlivých testov – meranie 1

Vyhodnotenie týchto testov je možné vidieť v tabuľke č 13. V tejto tabuľke je okrem samotných výsledkov vidieť napríklad súradnice, kde boli vykonané jednotlivé testy, ďalej teplotu pravítok na osiach X a Y apod. Teplotný rozdiel medzi začiatkom merania a koncom merania, ktoré trvalo približne 5 hodín je maximálne 0,8 °C (viď obrázok 22) aj to len pre pravítko umiestnené pri X-. Z tohto dôvodu môžeme vplyv teplotnej rozťažnosti na výslednú presnosť zanedbať.



Obr. 22 Teplota pravítok v priebehu merania 1



Obr. 23 Proces merania s DBB

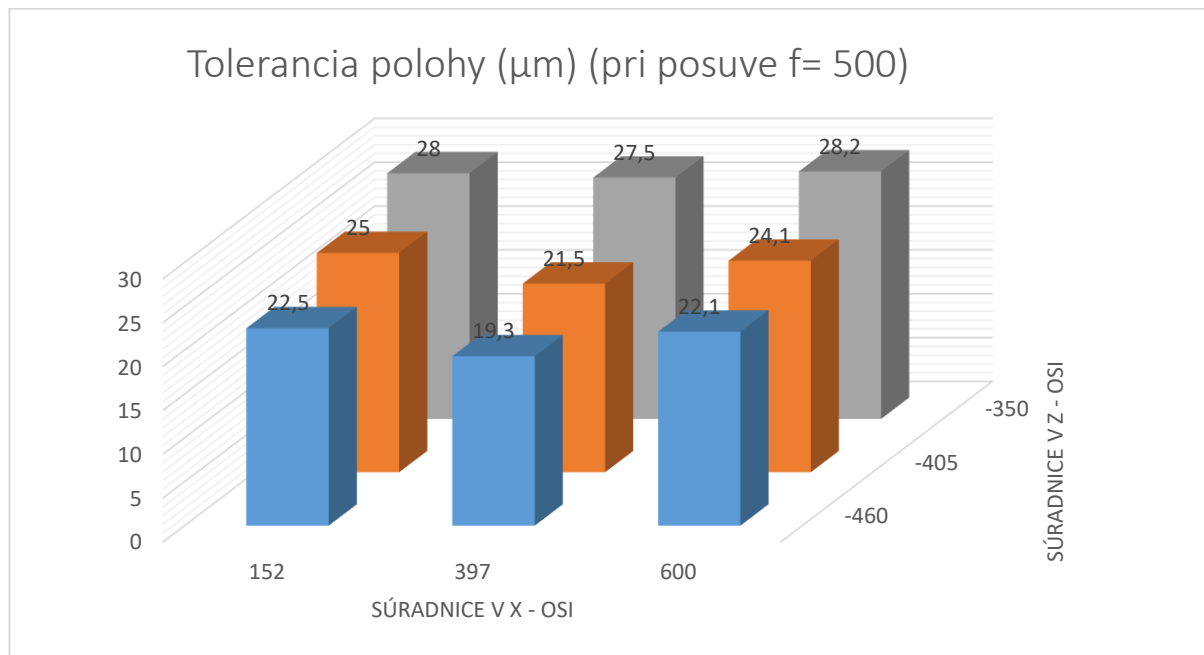
Test	Poloha	Teplota pravíka				Rychlostí posuvu f	Tolerancia polohy (µm)	Kruhovitost (µm)	Rel. chyba odměrovania (µm)	Kolmost (µm/m)	Ormeškianie serva Y (µm)
		X-	Y-	X+	Y+						
Test 1	X = 397	20,05	19,90	20,27	19,68	500	19,3	7,8	9,4	20,3	↑ 1,4 ↓ 1,1
	Y = 254	19,98	19,82	20,15	19,62	3000	17,6	8,8	9,5	9,4	↑ 3,5 ↓ 2,7
	Z = -460	20,03	19,82	20,24	19,70	8000	17,6	9,7	8,8	9,6	↑ 4,7 ↓ 4,4
Test 2	X = 397	20,19	19,99	20,33	19,98	500	21,5	9,0	11,4	11,5	↑ 1,3 ↓ 1,1
	Y = 254	20,31	19,96	20,38	19,93	3000	21,4	9,8	11,3	11,0	↑ 3,7 ↓ 3,0
	Z = -405	20,17	19,91	20,33	19,82	8000	19,3	10,8	10,6	10,4	↑ 4,8 ↓ 4,5
Test 3	X = 397	20,47	20,06	20,41	19,91	500	27,5	9,7	12,3	10,3	↑ 1,3 ↓ 1,0
	Y = 254	20,42	19,99	20,55	19,90	3000	27,1	10,6	12,7	11,4	↑ 3,4 ↓ 2,9
	Z = -350	20,39	19,96	20,49	19,86	8000	24,3	11,7	11,7	10,6	↑ 4,8 ↓ 4,2
Test 4	X = 600	20,37	20,50	20,42	20,13	500	22,1	8,8	10,9	-0,2	↑ 1,2 ↓ 0,9
	Y = 254	20,56	20,16	20,74	20,00	3000	22,6	9,6	11,4	0,1	↑ 3,4 ↓ 2,7
	Z = -460	20,49	20,04	20,62	19,92	8000	20,4	10,0	10,9	-1,3	↑ 4,6 ↓ 3,6
Test 5	X = 600	20,37	20,27	20,58	19,98	500	24,1	8,8	10,6	0,1	↑ 0,9 ↓ 0,6
	Y = 254	20,59	20,39	20,46	20,27	3000	24,4	9,6	11,4	0,3	↑ 3,2 ↓ 3,0
	Z = -405	20,59	20,30	20,57	20,09	8000	22,0	10,0	10,6	-0,8	↑ 4,4 ↓ 4,0
Test 6	X = 600	20,47	20,37	20,46	20,19	500	28,2	10,1	14,4	-1,3	↑ 1,2 ↓ 1,1
	Y = 254	20,47	20,18	20,53	19,99	3000	27,9	11,3	13,8	-1,6	↑ 3,4 ↓ 3,1
	Z = -350	20,43	20,25	20,55	20,15	8000	25,8	11,8	13,1	-2,4	↑ 4,7 ↓ 3,8
Test 7	X = 152	20,38	20,39	20,51	20,20	500	22,5	8,0	9,7	19,1	↑ 1,1 ↓ 1,5
	Y = 254	20,56	20,30	20,64	20,23	3000	22,7	9,0	9,6	19,3	↑ 3,3 ↓ 3,2
	Z = -460	20,52	20,34	20,61	20,21	8000	21,1	10,1	9,2	18,7	↑ 4,4 ↓ 3,8
Test 8	X = 152	20,60	20,22	20,78	20,09	500	25,0	9,0	11,1	18,3	↑ 1,3 ↓ 1,4
	Y = 254	20,60	20,42	20,62	20,26	3000	25,6	9,8	11,3	18,6	↑ 3,3 ↓ 3,3
	Z = -405	20,56	20,29	20,69	20,11	8000	23,4	10,6	11,0	17,4	↑ 4,7 ↓ 4,0
Test 9	X = 152	20,63	20,29	20,81	20,18	500	28,0	9,1	11,7	20,3	↑ 1,1 ↓ 1,0
	Y = 254	20,88	20,30	20,76	20,37	3000	28,3	10,0	11,9	20,3	↑ 3,2 ↓ 2,8
	Z = -350	20,47	20,42	20,75	20,21	8000	26,0	11,0	11,6	19,1	↑ 4,6 ↓ 4,1

Legenda:  
 Najväčšia chyba (nad 25%)  
 Závažné chyby (nad 10%)

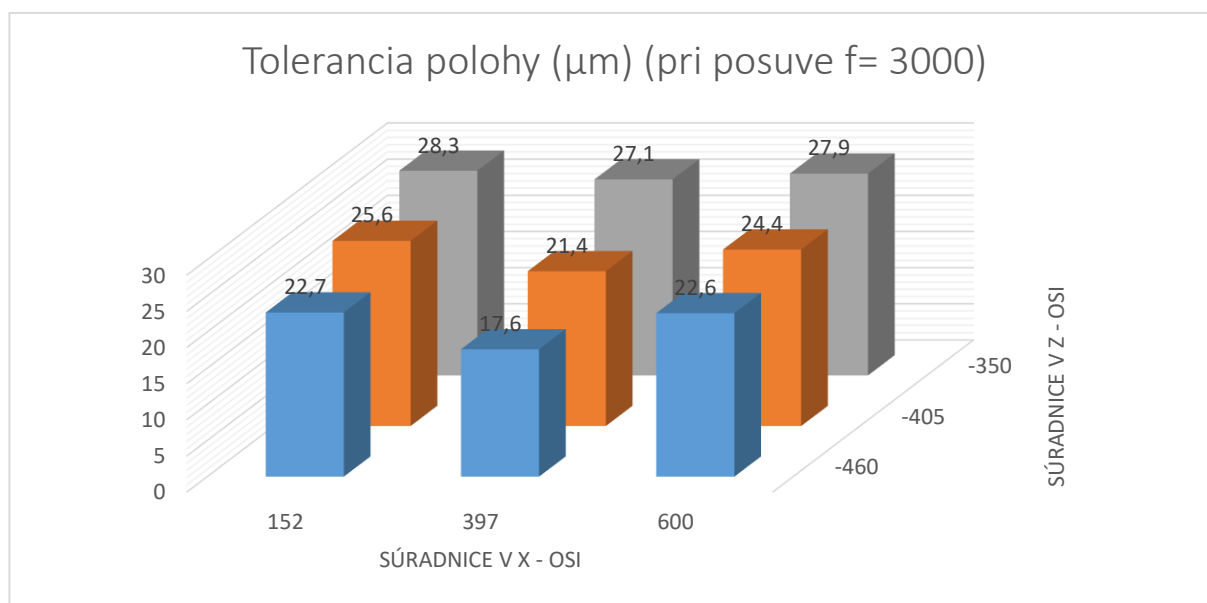
Tab. 13 Výsledky merania č.1

### Tolerancia polohy

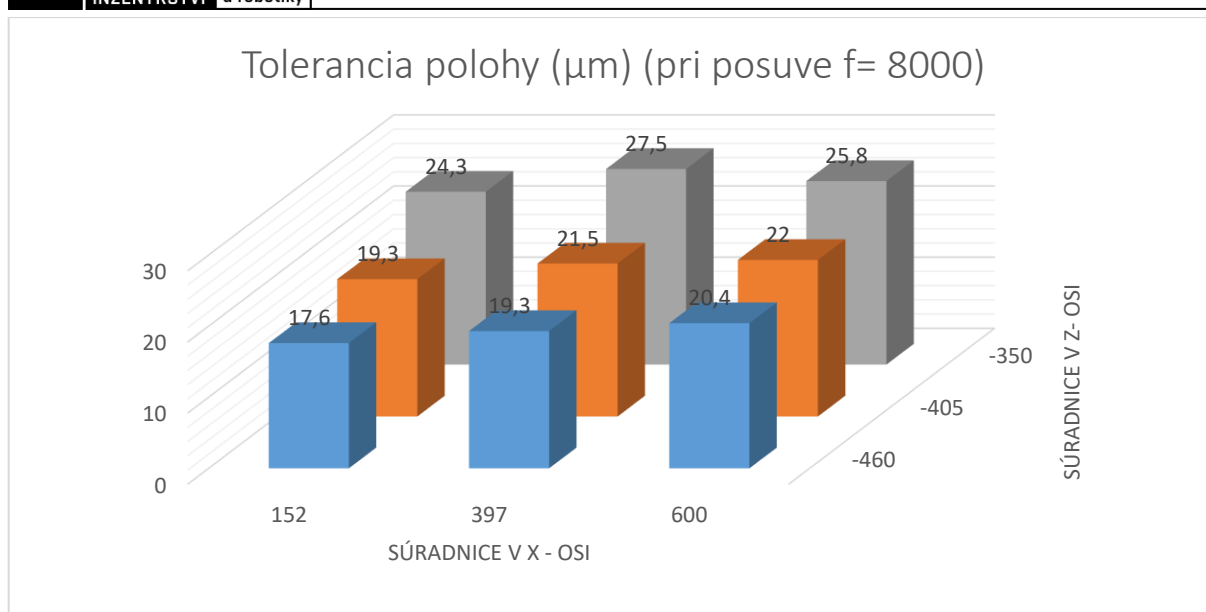
Významným parametrom pre presnosť je tolerancia polohy. Tolerancia polohy je odhad rovinatej, obojsmernej presnosti polohovania stroja v oblasti ohraničenej Ballbarom v nezaťaženom stave. [28] Tu je zrejmé (podľa tabuľky 13 a grafov na obrázkoch 24,25 a 26), že pri všetkých rýchlostiach posuvu sa tolerancia polohy zhoršuje v smere od stredu stola do krajných X súradníc a zároveň sa taktiež zvyšuje chyba pri narastajúcej Z hodnote. Rýchlosť posuvu má pre tento parameter zanedbateľný vplyv (v rámci neistoty merania).



Obr. 24 Tolerancia polohy ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve  $f=500$ )



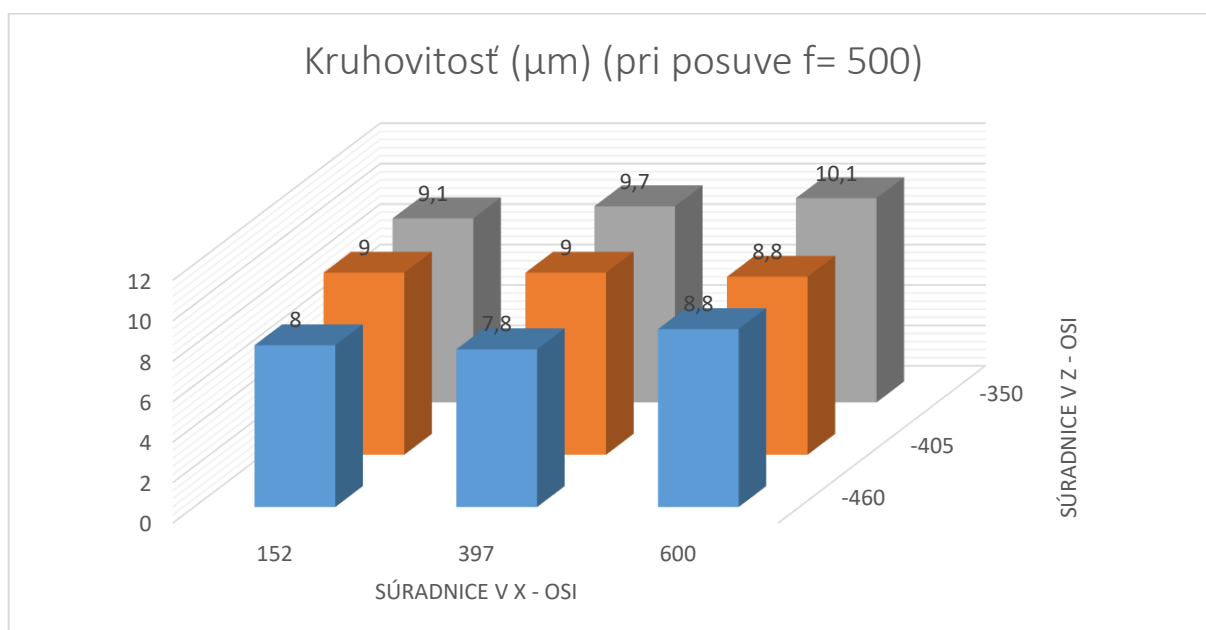
Obr. 25 Tolerancia polohy ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve  $f=3000$ )



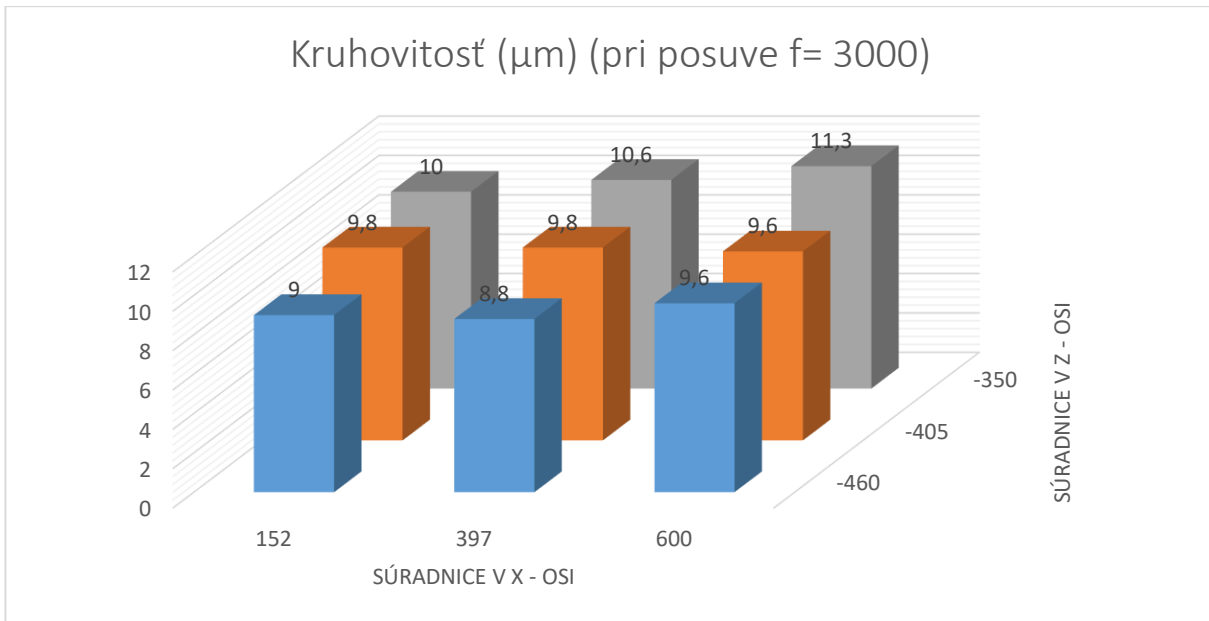
Obr. 26 Tolerancia polohy ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve  $f= 8000$ )

### Kruhovitost'

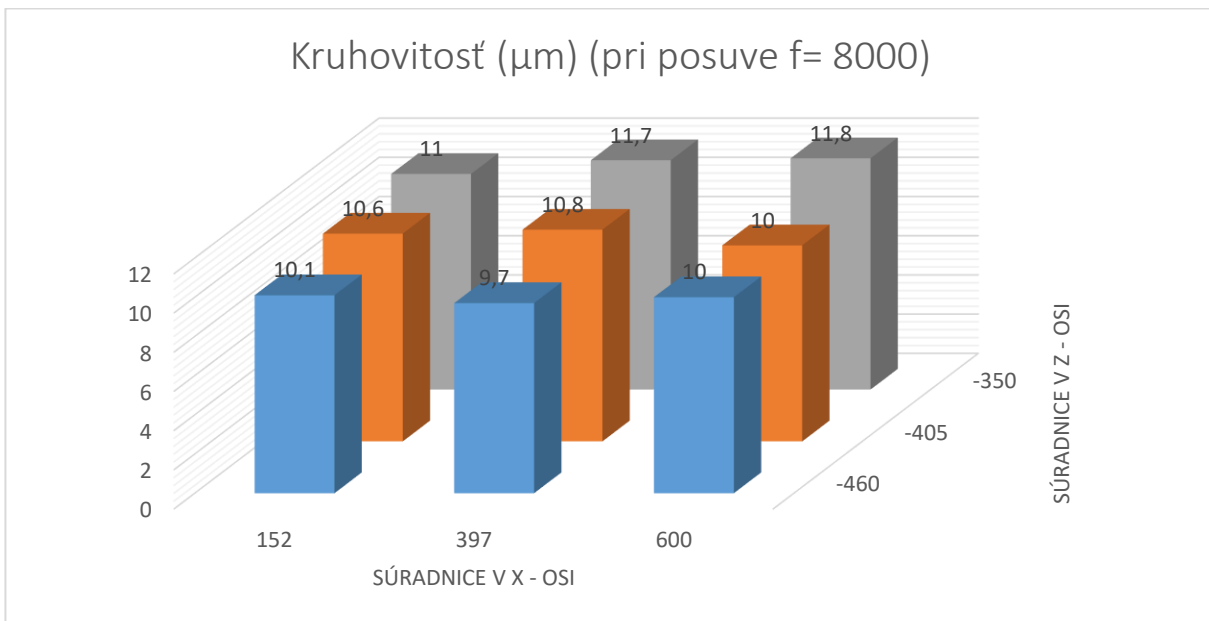
Ďalším pozorovaným parametrom pri meraní bola kruhovitost'. Pri kruhovitosti sa už začína prejavovať vplyv rýchlosti posuvu na výslednú presnosť. Tento trend je však opäť spojený aj s polohou v pracovnom priestore, kde test prebieha. Znova sa tu objavuje prepojenie s rastúcou hodnotou súradnice Z, kde sa kruhovitost' zhoršuje. Oproti tolerancii polohy sa však kruhovitost' zhoršuje aj s nárastom v smere osi X. Táto zmena je spôsobená nevhodnou konštrukciou stroja MCV, ktorý má umiestnený zásobník nástrojov nad ľavou stranou stola (v X súradniciach blízkyh nule), čo spôsobuje náklon stroja a teda aj zhoršenie kruhovitosti.



Obr. 27 Kruhovitost' ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve  $f= 500$ )



Obr. 28 Kruhovitost' ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve  $f= 3000$ )

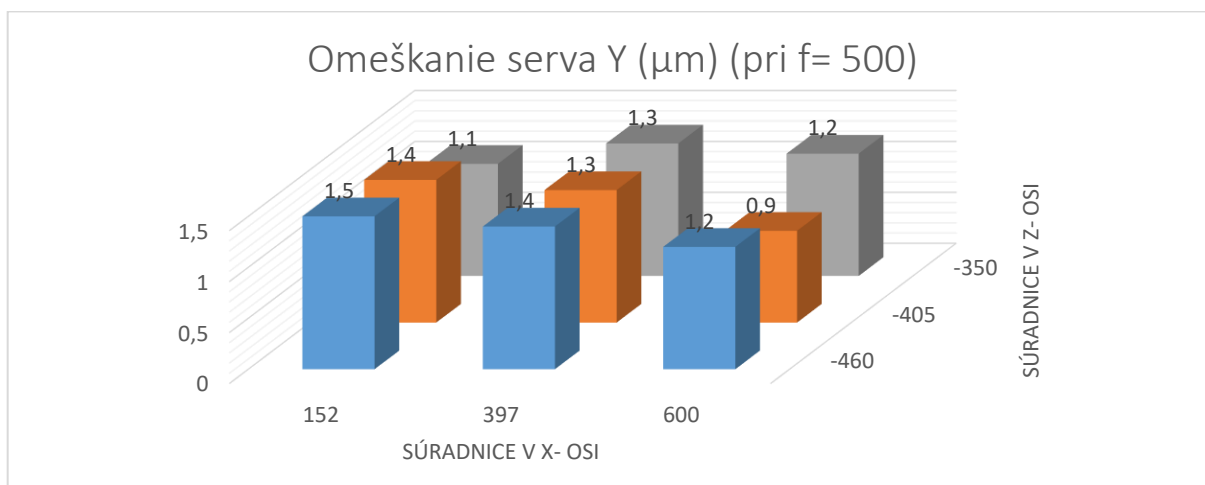


Obr. 29 Kruhovitost' ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve  $f= 8000$ )

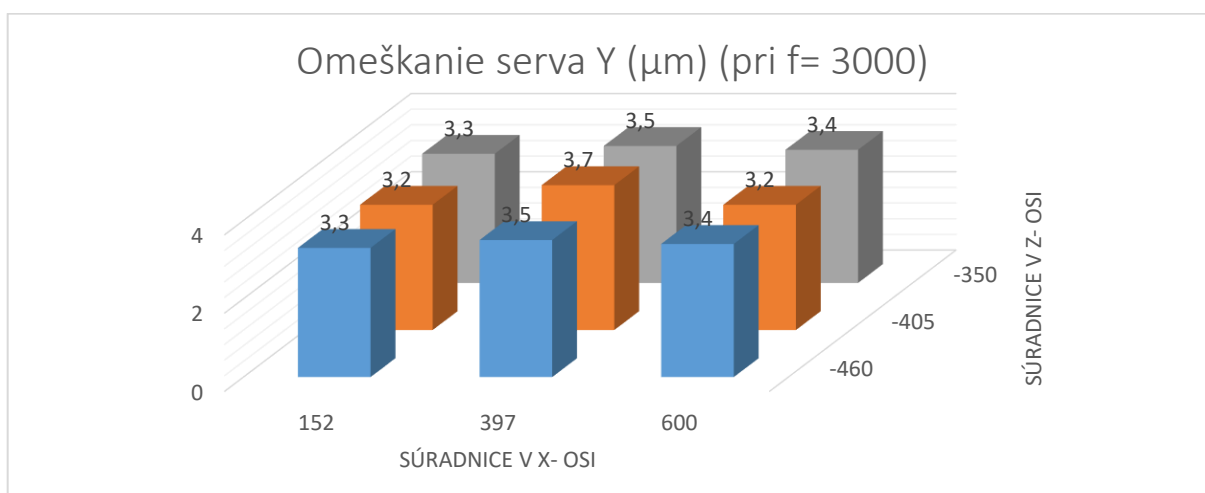
Najvýznamnejšou chybou, ktorá sa podieľala na výslednú presnosť pri všetkých testoch bola relatívna chyba odmerovania (vid' tabuľka 13). Toto bolo spôsobené vypnutím kompenzácií lineárneho odmerovania. Táto chyba sa dá teda ľahko odstrániť ich použitím. Keďže je pre všetky testy rovnako veľká a kompenzácie boli naschvál vypnuté, nebude sa ňou pri tomto vyhodnocovaní zaoberať.

### Omeškanie serva Y

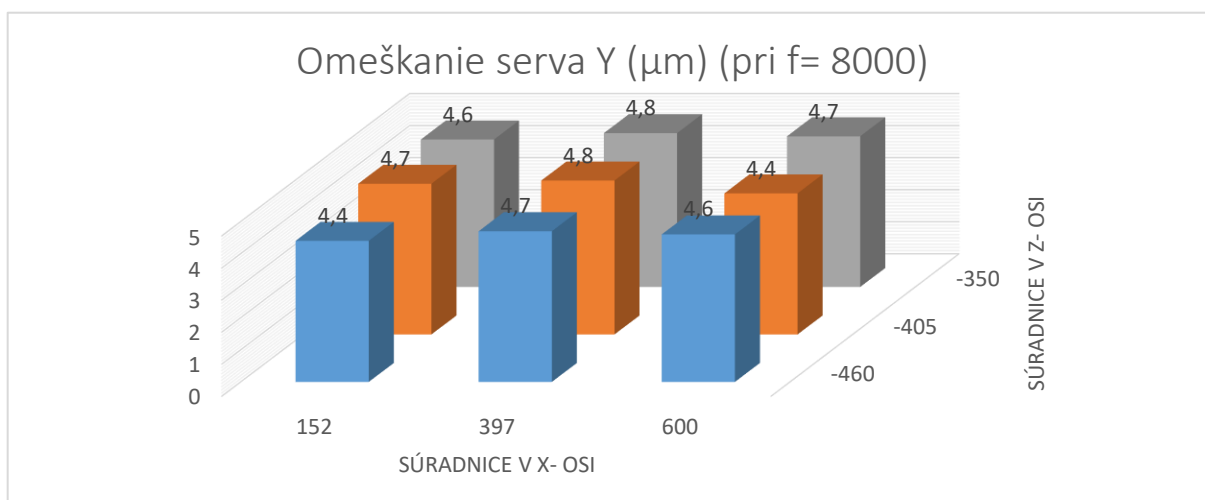
Naopak dôležitou hodnotou je určenie omeškania serva Y, ktoré má priamo úmerný rast s rýchlosťou posuvu. Okrem toho je z grafov zrejmé, že omeškanie serva je nezávislé na polohe v rámci pracovného priestoru.



Obr. 30 Omeškanie serva Y ( $\mu\text{m}$ ) (pri  $f=500$ )



Obr. 31 Omeškanie serva Y ( $\mu\text{m}$ ) (pri  $f=3000$ )

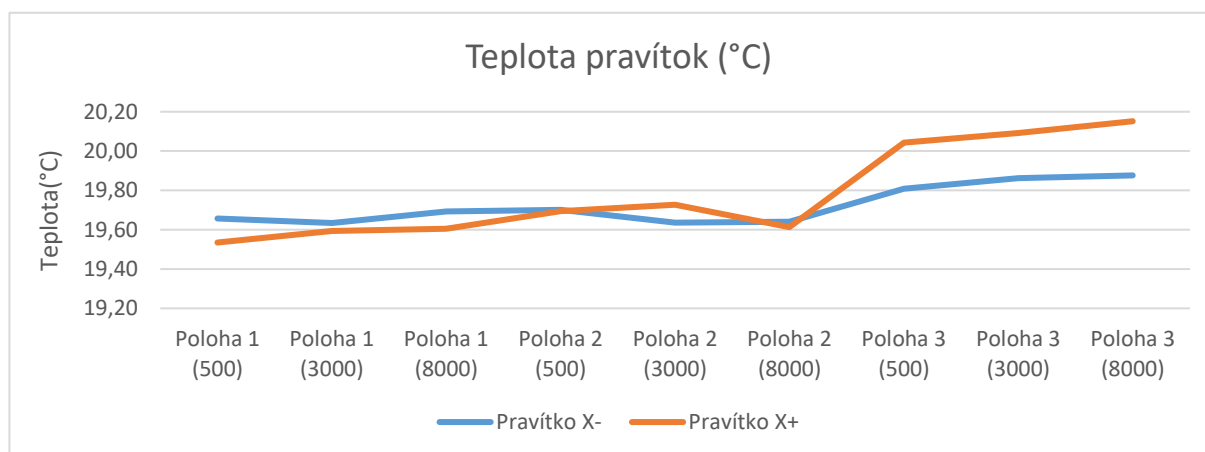


Obr. 32 Omeškanie serva Y ( $\mu\text{m}$ ) (pri  $f=8000$ )

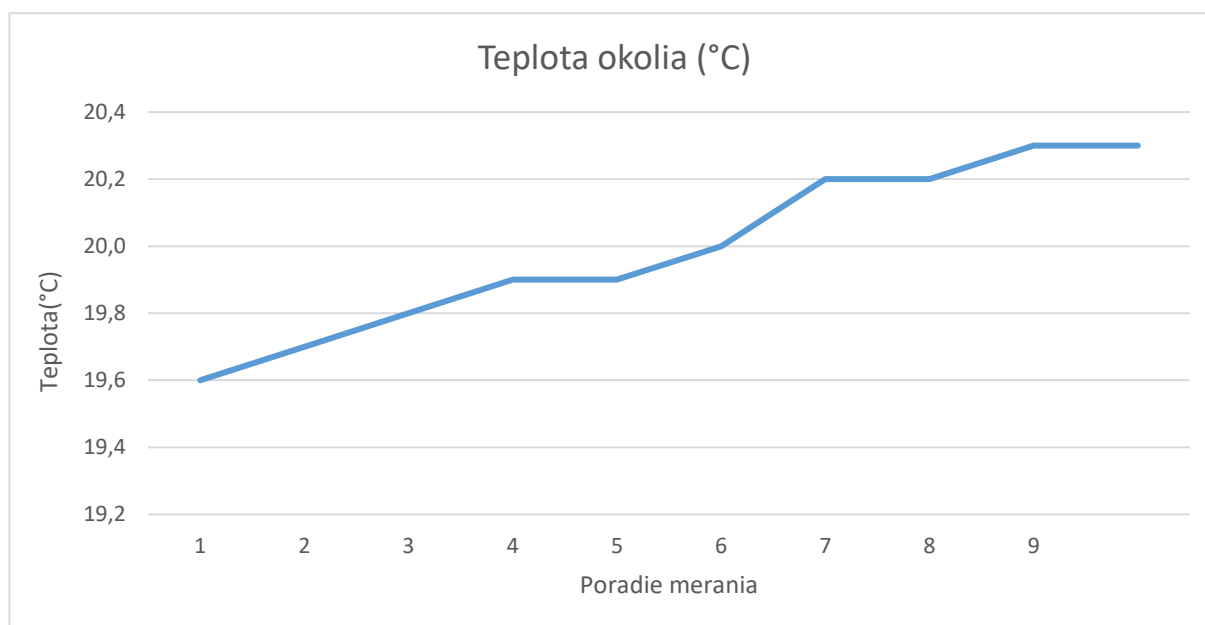
## 6.2 Meranie č.2

V poradí druhé meranie bolo uskutočnené 24.1.2023 a jeho úlohou bolo získať údaje pomocou Laser interferometra (obr.35). Merala sa priamosť v smere osi X, pre 3 rôzne výšky Z, v každej výške 3 rôznymi rýchlosťami posuvu. Celé meranie prebehlo na stroji bez zapnutých kompenzácií.

Výška v osi Z korešpondovala s výškou použitou v meraní č.1 (a to Z=-460;-405;-350). Rýchlosti sa taktiež zvolili rovnaké ako v predchádzajúcom meraní (f=500;3000;8000mm/min). Teplota sa merala len na koncoch pravítka v osi X. Ako je možné vidieť na grafe na obrázku 33 a 34, maximálna zmena teploty za celý priebeh merania sa zmenila len minimálne (o maximálne 0,6 °C), vďaka čomu môžeme považovať vplyv zmeny teploty na výslednú presnosť výsledkov za zanedbateľný.



Obr. 33 Teplota pravítka X – meranie 2



Obr. 34 Teplota okolia z kompenzátora XC – meranie 2





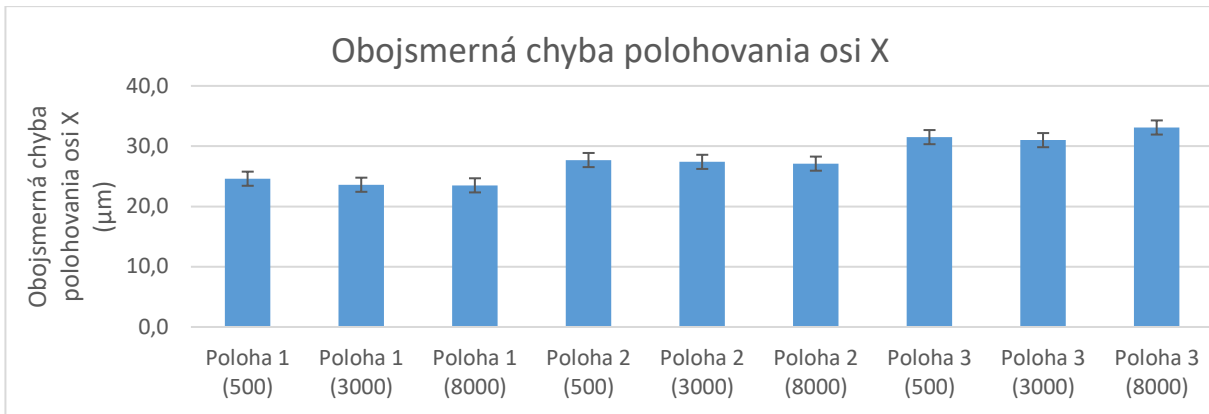
Obr. 35 Proces merania s LI

Ako je možné vidieť v tabuľke 14 hodnoty určené pomocou LI a softwaru na jeho vyhodnocovanie Carto Explore, sa menia priamo úmerne s narastajúcou výškou v osi Z a rýchlosťou. Napríklad obojsmerná chyba polohovania je pri najnižšej výške ( $Z=460$ ) a najpomalšej rýchlosti ( $f=500\text{mm/min}$ )  $23,3\ \mu\text{m}$ . Táto chyba sa zhoršuje, pri druhej polohe a rovnakej rýchlosti je to  $27,2\ \mu\text{m}$  a pri najvyššej polohe už  $31,1\ \mu\text{m}$ . Väčší vplyv má zmena výšky polohy než zmena rýchlosti, ktorá sa pohybuje v štatistickej odchýlke (viď obr. 36)

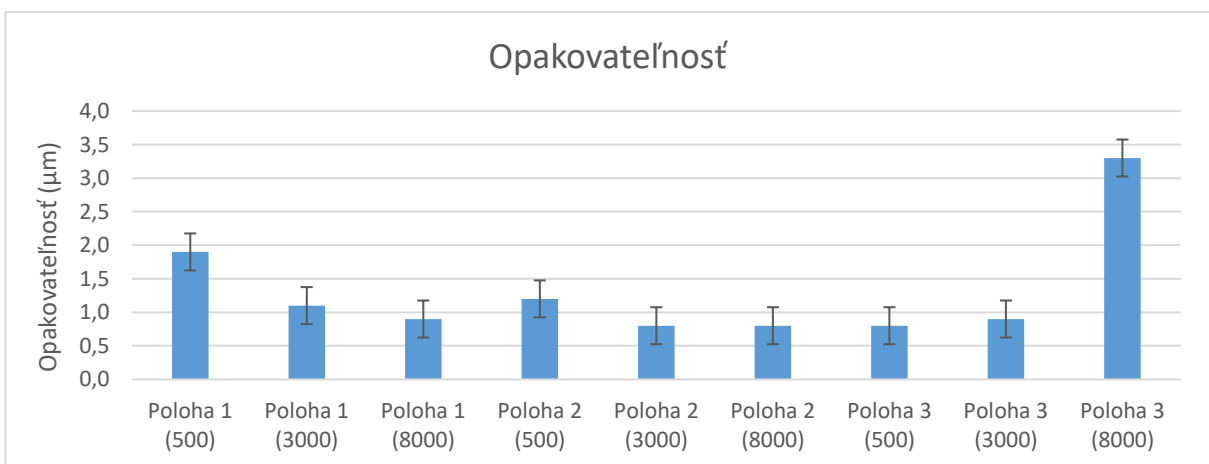
Ďalším dôležitým poznatkom je, že pri maximálnej výške a rýchlosti je zostava LI nedostatočne tuhá a nastáva výrazné zhoršenie hodnoty opakovateľnosti, reversal a mean reversal

		Poloha 1			Poloha 2			Poloha 3		
		Z=-460			Z=-405			Z=-350		
		500	3000	8000	500	3000	8000	500	3000	8000
Teplota (°C)	Súradnice									
	Rýchlosť posuvu $f$ (mm/min)									
	Pravítko X-	19,7	19,6	19,7	19,7	19,6	19,6	19,8	19,9	19,9
	Pravítko X+	19,5	19,6	19,6	19,7	19,7	19,6	20,0	20,1	20,2
	Chyba polohy ( $\mu\text{m}$ )	24,6	23,6	23,5	27,7	27,4	27,1	31,5	31,0	33,1
	Opakovateľnosť ( $\mu\text{m}$ )	1,9	1,1	0,9	1,2	0,8	0,8	0,8	0,9	3,3
	Systematická chyba ( $\mu\text{m}$ )	23,6	23,3	23,1	27,4	27,0	26,9	31,1	30,8	32,5
	Reversal ( $\mu\text{m}$ )	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	2,7
	Mean reversal ( $\mu\text{m}$ )	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	2,0
	Rozsah strednej obojsmernej odchýlky umiestnenia ( $\mu\text{m}$ )	23,3	23,0	22,9	27,2	26,8	26,6	31,0	30,5	31,9

Tab. 14 Výsledky merania č.2



Obr. 36 Obojsmerná chyba polohovania osi X – meranie 2

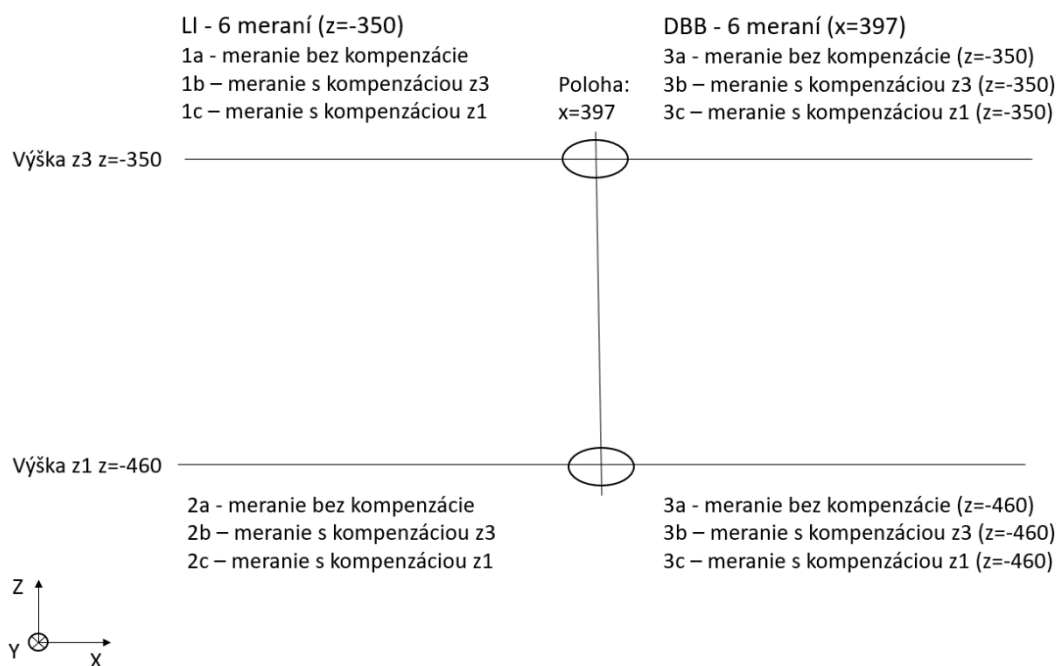


Obr. 37 Opakovateľnosť – meranie 2

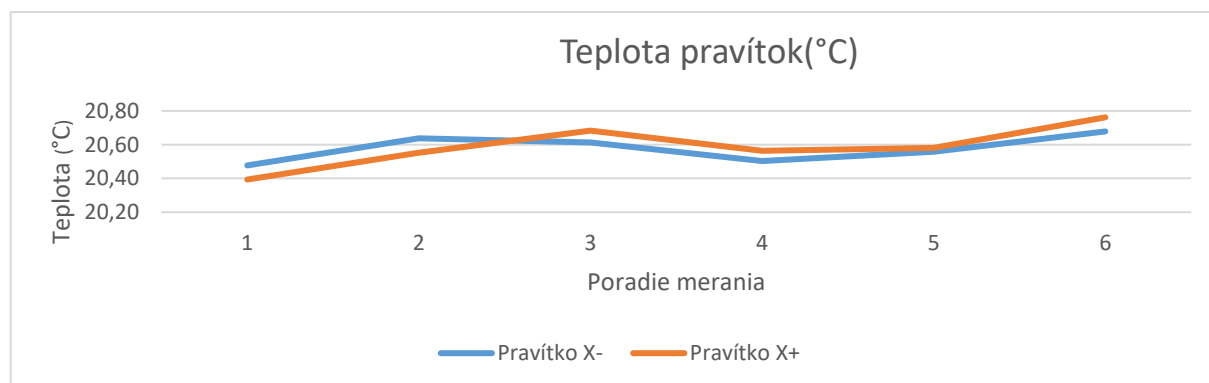
Obojsmerná chyba polohy odmeraná LI vyšla nasledovne: v polohe 1 ( $Z=-460$ )  $23,3\mu\text{m}$  ( $f = 500\text{mm/min}$ ),  $23,0\mu\text{m}$  ( $f = 3000\text{ mm/min}$ ) a  $22,9\mu\text{m}$  ( $f = 8000\text{ mm/min}$ ). Pri využití poznatkov z teoretickej časti, konkrétne kapitoly o neistote merania LI môžeme tvrdiť, že všetky tieto hodnoty sú rovnaké, pretože sa nachádzajú v rozmedzí neistoty merania. Obdobne to platí aj pre polohu 2 a polohu 3, kde je chyba polohy pre všetky rýchlosti rovnaká (v rámci neistoty).

### 6.3 Meranie č.3

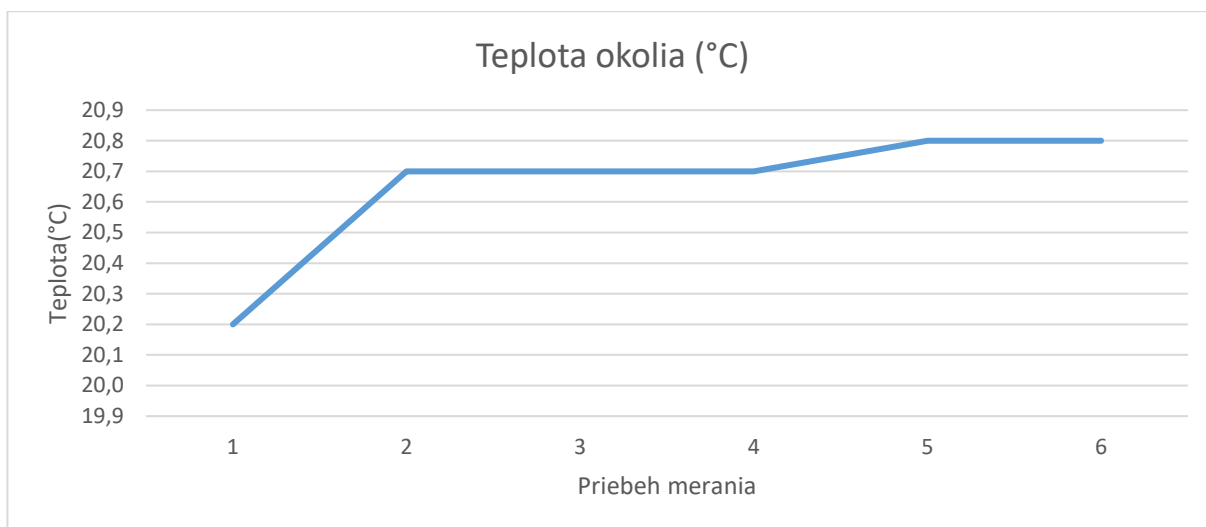
Pri tomto meraní z 14.2.2023 sa použil DBB aj Laser Interferometer. Merania boli vykonané pomocou LI v 2 výškach z predchádzajúcich meraní (v minimálnej výške  $Z = -460$  a maximálnej výške  $Z = -350$ ). V týchto polohách boli vykonané po tri merania, raz bez kompenzácií, raz so správnou kompenzáciou pre danú výšku na raz s „nesprávnou“ kompenzáciou z druhej výšky. Kompenzačné tabuľky boli vygenerované pomocou softwaru CARTO Explore. Následne sa vykonalo 2x3 meraní pomocou DBB, obdobne ako s LI, t.j. bez, so správnou a s nesprávnou kompenzáciou v každej výške. Súradnica v osi X bola rovnaká ako v predchádzajúcich meraniach, uprostred stola ( $X = 397$ ). Celý zjednodušený náčrt merania je na obrázku 38.



Obr. 38 Náčrt merania č.3



Obr. 39 Teplota pravítka X – meranie 3



Obr. 40 Teplota okolia z kompenzátora XC – meranie 3

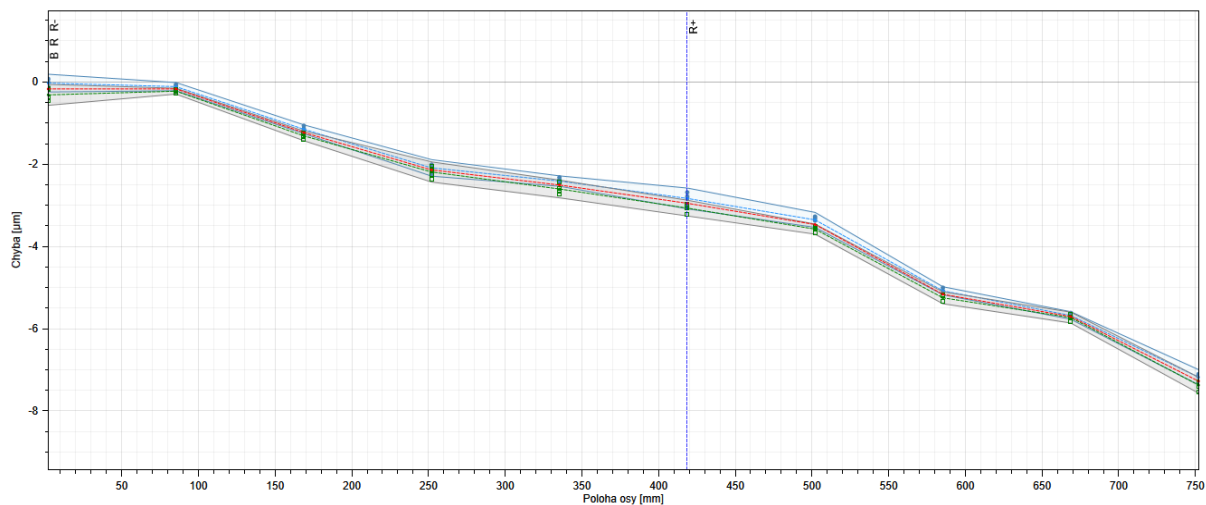
		Výška z3			Výška z1		
		Z = -350			Z = -460		
		3000			3000		
Kompenzácie		nie	z3 (správna kom.)	z1 (nesprávna komp.)	nie	z3 (nesprávna komp.)	z1 (správna komp.)
Teplota	Pravítko X-	20,48	20,64	20,61	20,50	20,56	20,68
	Pravítko X+	20,39	20,55	20,68	20,56	20,58	20,76
Poloha	Chyba polohy (µm)	29,5	1,4	7,7	21,4	7,6	1,4
	Opakovateľnosť (µm)	2,5	1,0	1,4	0,9	0,8	1,0
	Systematická chyba (µm)	28,3	1,1	6,9	21,1	7,3	1,0
	Reversal (µm)	0,5	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3
	Mean reversal (µm)	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Rozsah str. obous. odch. umiestnění (µm)	28,0	0,9	6,6	20,9	7,1	0,8

Tab. 15 Výsledky merania č.3 (LI)

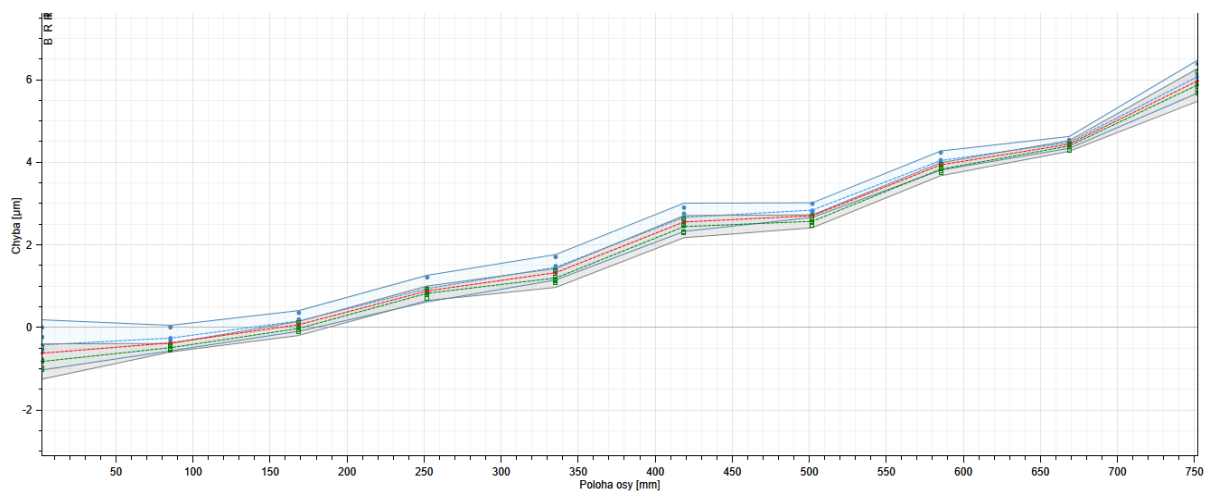
Po výsledkoch predchádzajúcich meraní, kde sa určovali vplyvy rýchlosti a výšky na presnosť (príliš veľká rýchlosť neumožňuje presné meranie vo výške s LI, a medzi rýchlosťami 500 a 3000 mm/min nie je znateľný rozdiel vo výsledkoch meraní, či už s DBB alebo LI.), bolo toto meranie uskutočnené len rýchlosťou 3000 mm/min.

Ako je vidieť z grafov na obr. 39 a 40 teplota pravítka a okolia sa počas merania menila minimálne a preto jej vplyv môžeme aj pri tomto meraní zanedbať. Dáta získané z tohto merania v tabuľke 15 nám ukazujú, že zapnutá kompenzácia má výrazný vplyv na zlepšenie chýb polohy. Pri vyhodnotení dát získaných bez zapnutej kompenzácie je rozsah str. obojsmernej odchýlky umiestnenia až 20- násobne väčšia ako pri použití správnej kompenzácie. Ak sa však použije v určitej výške kompenzácia z inej výšky je chyba polohy síce menšia ako bez kompenzácie, ale je stále značná (niekoľkonásobne).

Ďalším dôležitým poznatkom je, že použitie zlej kompenzácie spôsobuje, že sú chyby približne rovnako veľké, ale majú opačný priebeh (obr.41 a 42) .



Obr. 41 Priebeh rozsahu str. obojsmernej odchýlky umiestnenia pri použití nesprávnej kompenzácie vo výške Z1

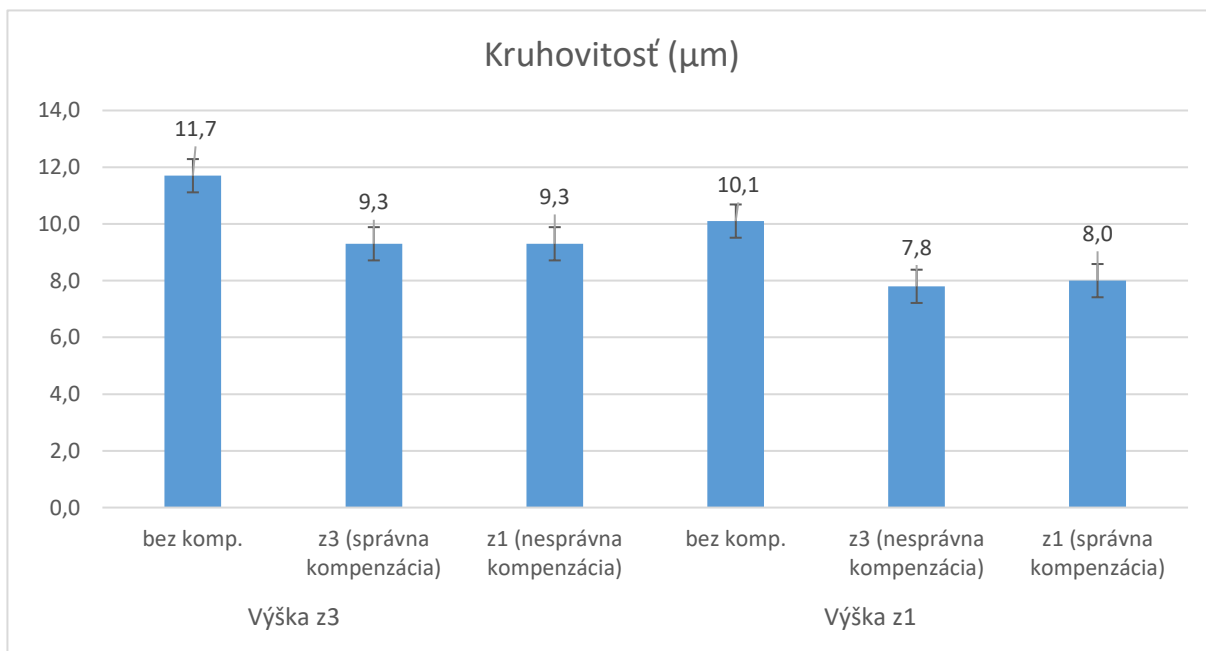


Obr. 42 Priebeh rozsahu str. obojsmernej odchýlky umiestnenia pri použití nesprávnej kompenzácie vo výške Z3

		Výška z3			Výška z1		
Poloha		X = 397	Y = 254	Z = -350	X = 397	Y = 254	Z = -460
f (mm/min)		3000			3000		
Kompenzácie		bez	z3 (správna komp.)	z1 (nesprávna komp.)	bez	z3 (nesprávna komp.)	z1 (správna komp.)
Teplota pravítka (°C)	X-	20,62	20,60	20,61	20,85	20,73	20,70
	Y-	20,51	20,51	20,46	20,38	20,39	20,48
	X+	20,68	20,79	20,71	20,73	20,71	20,73
	Y+	20,33	20,22	20,28	20,28	20,27	20,34
	Tolerancia polohy (μm)	22,4	12,9	14,1	19,4	17,3	14,7
	Kruhovitosť (μm)	11,7	9,3	9,3	10,1	7,8	8,0
Rel. chyba odmerovania (μm)		13,3	2,8	4,6	12,0	1,6	2,8
Kolmosť (μm/m)		6,8	6,9	6,8	9,4	9,1	9,4
Priamočiarosť X (μm/m)		-4,0	-3,7	-3,5	-2,4	-2,5	-2,3
Ampl. cyklickej chyby X (μm)		↑0,9 ↓1,2	↑0,9 ↓1,3	↑0,9 ↓1,3	↑0,9 ↓1,4	↑0,9 ↓1,3	↑0,9 ↓1,4
Omeškanie serva Y (μm)		↑3,8 ↓2,7	↑3,9 ↓2,7	↑3,8 ↓3,1	↑4,0 ↓2,9	↑3,6 ↓2,8	↑3,7 ↓2,7
Omeškanie serva X (μm)		→1,3 ←1,3	→0,1 ←1,4	→1,3 ←1,2	→2,2 ←1,7	→2,0 ←1,6	→2,3 ←1,7

Tab. 16 Výsledky merania č.3 (DBB)

Pri meraní DBB sa prejavuje účinok podobne ako pri dátach nameraných LI, t.j bez kompenzácie sú chyby najväčšie(tab. 16), s nesprávnou kompenzáciou menšie a najideálnejšie výsledky sú pri použití správnej kompenzácie. Na výslednú presnosť má najväčší vplyv samotné použitie kompenzácie. Výsledná kruhovitosť (obr.43) je pri použití „správnej“ alebo „nesprávnej“ kompenzácie v rámci neistoty merania DBB (viď subkapitola Neistota merania Ballbaru QC-20) Najväčší vplyv na výslednú kruhovitosť má bez zapnutej kompenzácie relatívna chyba odmerovania(tab.16) Pri správnej kompenzácii je to naopak omeškanie serva Y. Toto platí pre obidve výšky v osi Z. Zmena teploty tu opäť nehrá významnejšiu rolu.

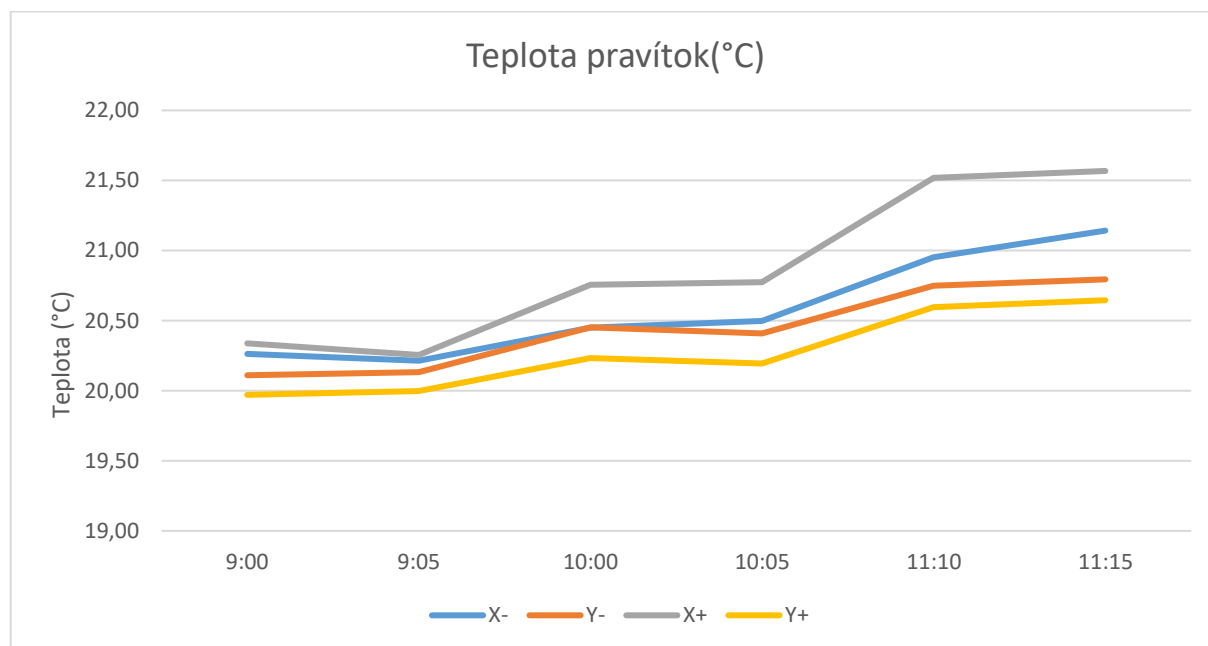


Obr. 43 Kruhovitost' (μm) – rôzne kompenzácie – meranie 3

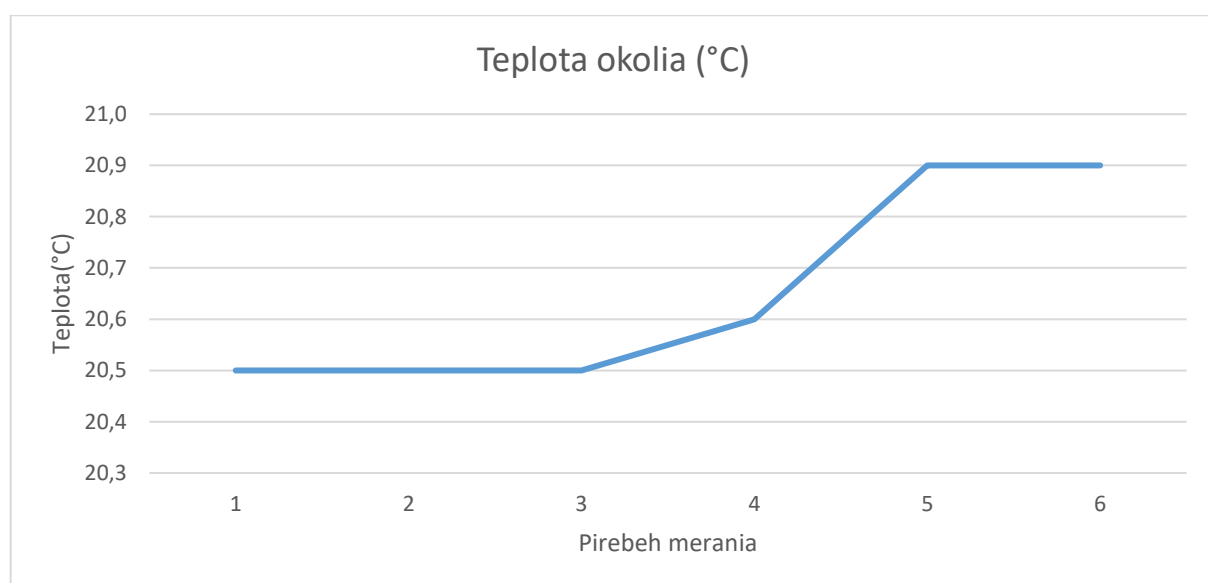
## 6.4 Meranie č.4

Úlohou 4. merania bolo posúdiť vplyv zmeny teploty na výslednú presnosť polohovania a kruhovitosti. Meranie prebehlo 9.3 na rovnakom mieste a stroji. Prebehli 3 sady meraní opäť aj s LI aj s DBB. Pri týchto meraniach sa meralo len v jednej výške a to najbližšie pri stole ( $z1 = -460$ ), jednou rýchlosťou  $f = 3000\text{mm/min}$  a raz s a raz bez kompenzácií polohy.

Prvé meranie bolo na stroji za „studená“, t.j. bez jeho predošlého zahriatia. Toto meranie je označené teplotou  $t_0$ . Po odmeraní sa následne zapol program na zahriatie pravítok, ktorý bežal asi 40 minút. Nasledovala druhá sada meraní pri teplote  $t_1$ . Celý proces sa ešte raz zopakoval, prebehol program na zahriatie teraz približne 1 hodinu a spravila sa posledná sada meraní pri teplote  $t_2$ . (obr. 44) Teplota okolia zostávala počas celého merania podobná ako v predchádzajúcich meraniach (obr.45).



Obr. 44 Teplota pravítok X a Y – meranie.4



Obr. 45 Teplota okolia – meranie.4

		Mer. 1 (t0)		Mer. 2 (t1)		Mer. 3 (t2)	
Poloha		Z = -460		Z = -460		Z = -460	
f (mm/min)		3000		3000		3000	
Kompenzácie		nie	áno	nie	áno	nie	áno
Teplota (°C)	Pravítko X-	20,12	20,18	20,55	20,64	20,85	20,93
	Pravítko X+	20,25	20,26	20,61	20,81	21,34	21,31
Poloha	Chyba polohy (μm)	22,7	1,7	21,3	1,4	20,5	1,3
	Opakovateľnosť (μm)	0,7	0,9	0,7	1,2	0,7	0,8
	Systematická chyba (μm)	22,3	1,4	21,0	1,0	20,1	0,8
	Reversal (μm)	0,3	0,0	0,2	0,3	0,2	0,2
	Mean reversal (μm)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
	Rozsah strední obousměrné odchylky umístění (μm)	22,1	1,2	20,8	0,9	19,9	0,7

Tab. 17 Výsledky merania č.4 (LI)

Zo získaných dát vyplýva, že vplyv na presnosť polohovania bez kompenzácií sa pri zvyšujúcej teplote paradoxne zlepšuje (viď tabuľka 17). Toto je však po dôkladnejšej analýze spôsobené tým, že všetky kompenzácie sa dávali v kladnom smere a teda sa os musela „predlžovať“. Keďže súčasti stroja sa pri zahrievaní predlžujú, stroj sa týmto miernym zahrievaním v rámci jedného stupňa sám „kompenzoval“. Bohužiaľ meranie nebolo možné zhotoviť pri väčšom rozptyle teplôt, ktoré by lepšie ukázalo vplyv veľmi vysokej, poprípade veľmi nízkej teploty.

Pri zapnutých kompenzáciách sa vplyv teploty na presnosť polohovania (chyba polohy, opakovateľnosť) preukazuje len minimálnou zmenou v desatinách mikrometru. Tieto údaje nemožno považovať za výpovedné, pretože rozlišovacia schopnosť spôsobená neistotou merania s LI je väčšia ako zmeny.

		Mer. 1 (t0)		Mer. 2 (t1)		Mer. 3 (t2)	
Poloha		X = 397	Z = -460	X = 397	Z = -460	X = 397	Z = -460
f (mm/min)		3000		3000		3000	
Kompenzácie		nie	áno	nie	áno	nie	áno
Teplota (°C)	Pravítko X-	20,26	20,21	20,45	20,50	20,95	21,14
	Pravítko Y-	20,11	20,13	20,45	20,41	20,75	20,79
	Pravítko X+	20,34	20,26	20,76	20,77	21,52	21,57
	Pravítko Y+	19,97	20,00	20,23	20,20	20,60	20,65
	Tolerancia polohy (μm)	18,7	12,6	20,7	9,8	22,9	9,7
	Kruhovitost (μm)	11,3	8,5	10,7	7,3	10,6	6,6
Relatívna chyba odmerovania (μm)	11,4	3,8	11,5	3,0	11,9	3,3	
Kolmost (μm/m)	7,7	9,1	8,8	9,1	9,1	9,3	
Priamočiarost X (μm/m)	-2,1	-2,2	-2,6	-2,5	-2,4	-2,4	
Amplitúda cyklickej chyby X (μm)	↑1,1 ↓1,6	↑1,1 ↓1,6	↑1,0 ↓1,3	↑1,0 ↓1,4	↑1,0 ↓1,4	↑0,9 ↓1,5	
Omeškanie serva Y (μm)	↑3,9 ↓3,3	↑3,5 ↓3,3	↑3,6 ↓2,9	↑3,6 ↓3,4	↑3,4 ↓3,0	↑3,3 ↓3,2	
Omeškanie serva X (μm)	→1,8 ←1,9	→1,6 ←1,9	→1,5 ←1,6	→2,0 ←1,9	→2,2 ←1,8	→2,1 ←2,0	

Tab. 18 Výsledky meranie č.4 (DBB)

Pri meraní DBB bez zapnutých kompenzácií sa obdobne ukazuje vplyv teploty na presnosť kruhovitosti tak, že so stúpajúcou teplotou sa stroj opäť „sám“ kompenzuje. Pri zapnutých kompenzáciách sú opäť zmeny minimálne, čiže s prihliadnutím na neistoty merania sa nedá presne určiť jej vplyv (tab.18).



## 7 ZHODNOTENIE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKOV

Po vyhodnotení všetkých meraní sa prišlo na nasledujúce zistenia:

### Meranie č.1:

Tolerancia polohy sa zhoršuje najmä s polohou na stroji. V X-osi platí, že v strede stola je pre nevykompenzovaný stroj tolerancia polohy najlepšia a zhoršuje sa podobne o cca 14% pri zvyšujúcich aj klesajúcich hodnotách X. Väčší vplyv má však Z súradnica a teda výška v pracovnom priestore. Tu sa zhoršuje meraný parameter až o približne 22%. Rýchlosť posuvu na toleranciu polohy nemá jednoznačný vplyv (výsledky meraní sú v rámci neistoty DBB).

Kruhovitosť má taktiež obdobný priebeh, a teda je najlepšia v strede stola, pri minimálnej výške. Tu má na rozdiel od tolerancie polohy značný vplyv aj rýchlosť posuvu. Na grafoch (str. 53 a 54) je vidieť, že sa na výslednej kruhovitosti podieľa rýchlosť posuvu približne rovnakým dielom ako zmena polohy v rámci stroja. Okrem toho nastávajú pri vyšších rýchlostiach aj dynamické chyby spôsobené omeškaním servopohonou jednotlivých osí.

### Meranie č.2:

Z dát získaných meraním číslo 2 vyplýva, že obojsmerná chyba polohovania je v rámci neistoty merania LI rovnaká pre danú polohu. Je teda možné konštatovať že rýchlosť posuvu tu nehrá významnú rolu. Naopak pri zmene výšky zo z1 na z2 a následne na z3 (2 krát o 60 mm) sa tento parameter zhoršuje o 14%, respektíve 12%.

Opakovateľnosť je pre všetky výšky a rýchlosti, okrem maximálnej výšky (z3) a rýchlosti ( $f=8000\text{mm/min}$ ) v rámci neistoty merania rovnaká. V prípade kombinácie z3 a max.  $f$  nastáva razantný nárast, o ktorom je predpoklad, že nastal kvôli nedostatočnej tuhosti LI a vzbudenými frekvenciami.

### Meranie č.3:

Výsledky tohto merania dokazujú dôležitosť použitia kompenzácie polohy. Pri použití správnej kompenzácie pre danú výšku sa hodnota obojsmernej chyby polohovania zlepši až 20-násobne. Pri použití nesprávnej kompenzácie je rozdiel medzi požadovanou polohou a skutočnou rádovo v  $\mu\text{m}$  na meter kompenzovanej dĺžky, čiže nastáva isté zlepšenie ale je násobne nižšie.

Kruhovitosť je rovnaká pri použití kompenzácie z ktorejkoľvek výšky. Namerané rozdiely sa totiž opäť pohybujú len v rámci neistoty DBB.

### Meranie č.4:

Vplyv teploty bol určovaný len pre najnižšiu výšku a prostrednú rýchlosť  $f = 3000\text{mm/min}$ . V rámci merania bol nárast teploty len  $1,5^\circ\text{C}$ . Tento minimálny nárast spôsobil, že sa nevykompenzovaný stroj začal „kompenzovať“ pod vplyvom teploty. Tento efekt je spôsobený tým, že predchádzajúce namerané kompenzácie boli vždy zadávané ako kladné hodnoty (stroj nedochádzal do požadovanej polohy), a teda pri zahriatí jednotlivých súčastí sa stroj predĺžil a „vykompenzoval“ – zlepšil presnosť polohy aj kruhovitosti.



## 8 DISKUSIA

### 8.1 Meranie č.5 – Skúška pracovnej presnosti

Po splnení základných cieľov tejto diplomovej práce sa rozhodlo na základe získaných dát vykonať meranie pracovnej presnosti.

Pracovná presnosť bola zisťovaná meraním č. 5. Postup meranie spočíval v obrobení 4 rovnakých dosiek vid' obr. 46, kde boli v rohoch upnuté doštičky, ktoré sa obrábali. Po obrobení sa nechali diely temperovať a následne sa odmerali na jednoúčelovom meracom stroji a na súradnicovom meracom stroji.

#### 8.1.1 Nastavenie stroja MCV 754 QUICK

Úlohou tohto merania bolo porovnať vplyv vypnutých a zapnutých kompenzácií na výslednom obrobenom kuse v dvoch rôznych výškach v rámci pracovného priestoru. Boli teda naplánované 4 procesy obrábania 4 rovnakých obrobkov (obrázok 46 V týchto výškach prebehne obrábanie dokončovacou frérou 16/D16 HRC 45, podľa ktorej boli určené aj rezné podmienky (tabuľka 19).



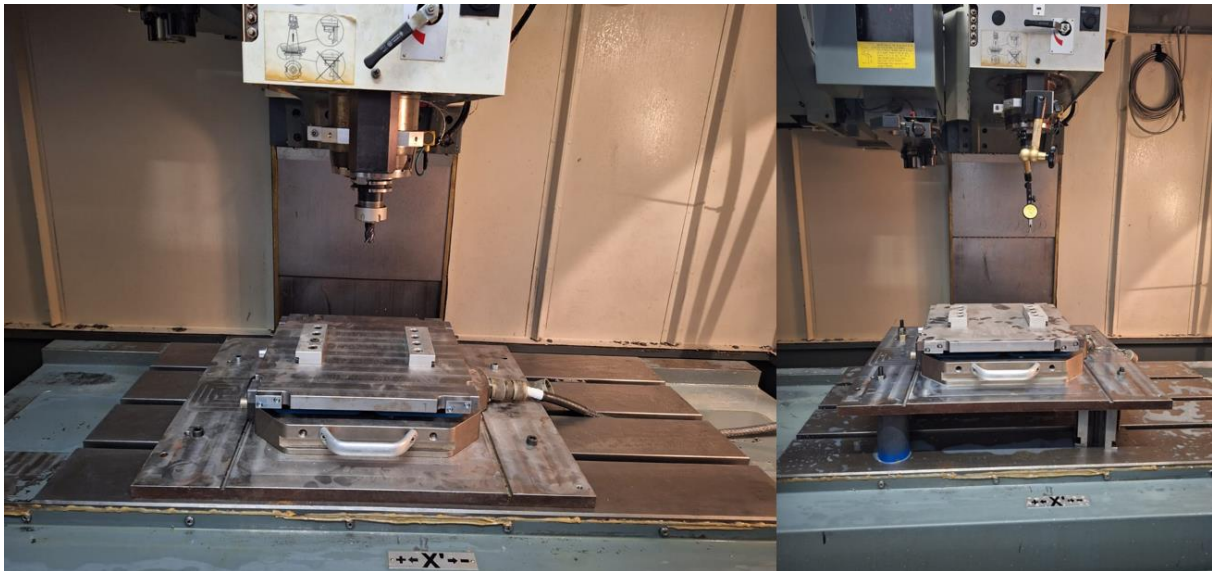
Obr. 46 Obrobok - meranie č.5

Rezné parametre	
Rezná rýchlosť (mm/min)	100
Posuv na zub (mm/zub)	0,05
Otáčky (min <sup>-1</sup> )	2300

Tab. 19 Rezné parametre - meranie 5

Z dôvodu nemožnosti upnúť obrobok do rovnakých výšok ako boli predchádzajúce merania, sa rozhodlo aspoň zachovať rozdiel 100mm medzi výškami. Poloha upnutia stredu dosky bola teda :  $X = 294$ ;  $Y = 246$ ; a  $Z1 = -555$  pre upnutie dole a  $Z2 = -445$  pre upnutie hore (viď obr. 47).

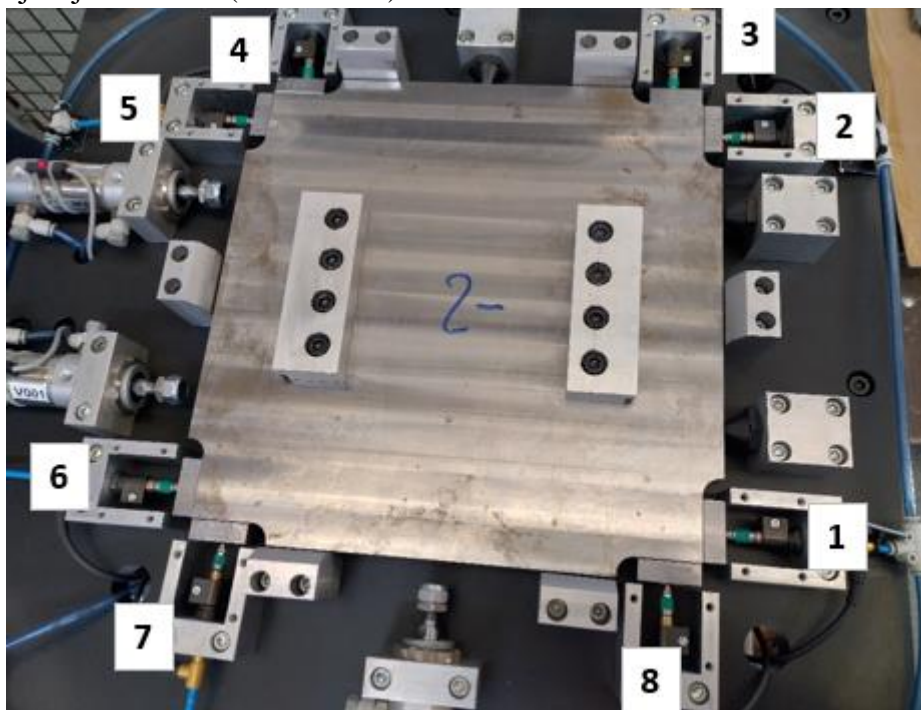
Pred samotným obrábaním boli pomocou LI namerané a vytvorené kompenzačné tabuľky. Rezný proces trval približne 2 minúty a všetkých 8 doštičiek sa obrobilo na jeden chod.



Obr. 47 Upnutie obrobku "dole" a "hore"

### 8.1.2 Jednouúčelový merací stroj (JUS)

Po temperovaní obrobku prebehlo meranie na JUS (obrázok 48). Výsledky merania je možné vidieť v nasledujúcej tabuľkách (tab. 20 a 21).



Obr. 48 Jednouúčelový merací stroj s označenými senzormi

	Senz1 (μm)	Senz2 (μm)	Senz3 (μm)	Senz4 (μm)	Senz5 (μm)	Senz6 (μm)	Senz7 (μm)	Senz8 (μm)
Etalon	-0,300	0,854	1,105	0,160	-0,712	-0,001	1,337	0,486
1- (upnutie dole; bez komp.)	-0,259	0,901	1,15	0,172	-0,706	0,001	1,351	0,512
1+ (upnutie dole; s komp.)	-0,253	0,894	1,111	0,167	-0,696	0,000	1,361	0,508
2+ (upnutie hore; s komp.)	-0,242	0,890	1,113	0,175	-0,693	-0,011	1,350	0,488
2- (upnutie hore; bez komp.)	-0,232	0,920	1,333	0,195	-0,681	0,017	1,363	0,524

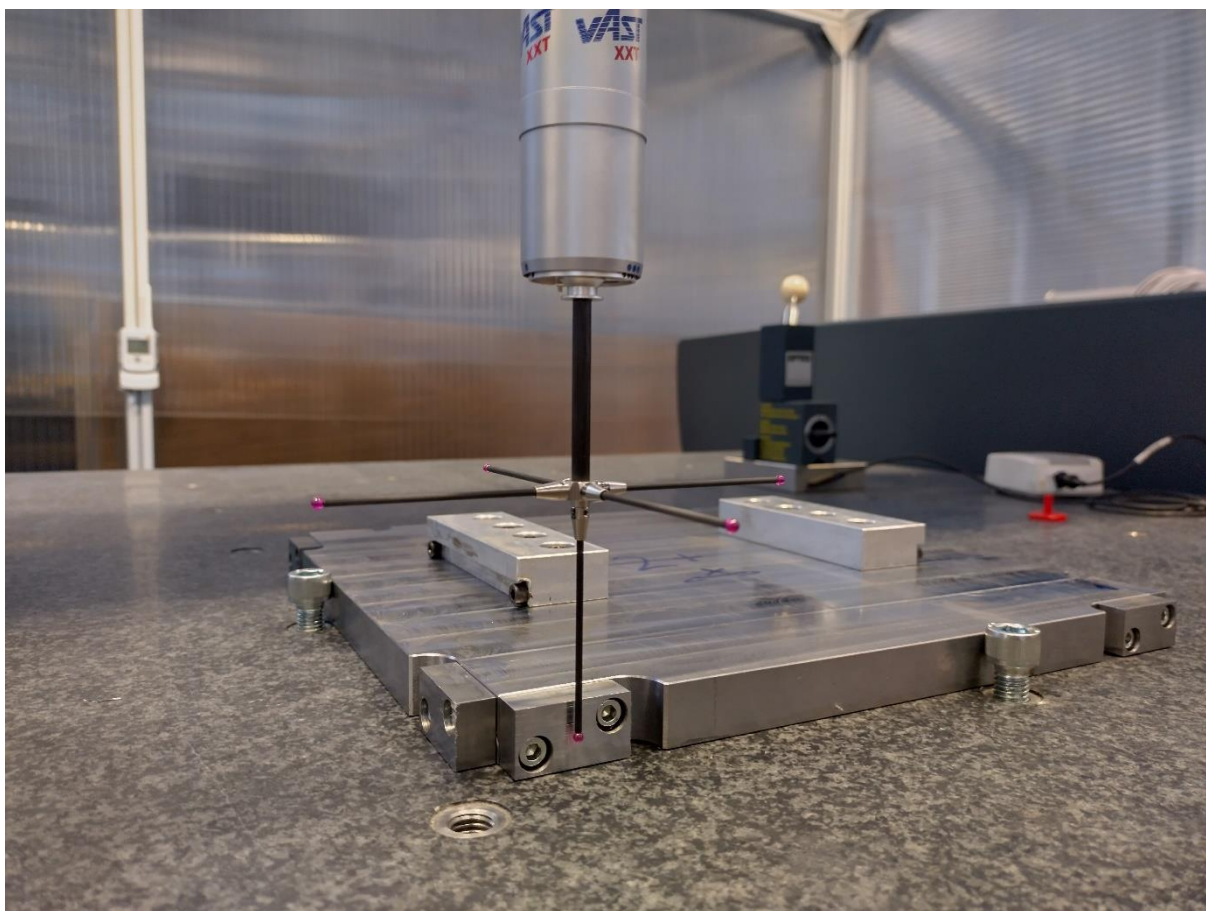
Tab. 20 Namerané hodnoty - JUS

Zmena dĺžky oproti požadovanej hodnote				
	Dĺžka 1-6 (μm)	Dĺžka 2-5 (μm)	Dĺžka 3-8 (μm)	Dĺžka 4-7 (μm)
1- (upnutie dole; bez komp.)	-0,260	1,607	1,662	1,523
1+ (upnutie dole; s komp.)	-0,253	1,590	1,619	1,528
2+ (upnutie hore; s komp.)	-0,231	1,583	1,601	1,525
2- (upnutie hore; bez komp.)	-0,249	1,601	1,857	1,558

Tab. 21 Rozdiel nameraný na obrobku - JUS

### 8.1.3 Súradnicový merací stroj CMM ZEISS ECLIPSE

Meranie prebehlo aj na súradnicovom stroji vid' obr. 49. Jeho výsledky sú v tabuľke 22.



Obr. 49 Meranie na súradnicovom meracom stroji



Zmena dĺžky oproti požadovanej hodnote				
	Dĺžka 1-6 (µm)	Dĺžka 2-5 (µm)	Dĺžka 3-8 (µm)	Dĺžka 4-7 (µm)
1- (upnutie dole; bez komp.)	0,0720	0,0808	0,0542	0,0547
1+ (upnutie dole; s komp.)	0,0792	0,0878	0,0576	0,0594
2+ (upnutie hore; s komp.)	0,1307	0,1419	0,1097	0,1121
2- (upnutie hore; bez komp.)	0,0804	0,8630	0,0659	0,0620

Tab. 22 Rozdiel nameraný na obrobnku - CMM

#### 8.1.4 Celkové zhodnotenie

V tejto podkapitole sa bližšie rozobraté získané údaje, postupy merania a návrhy pre ďalšie možné analýzy.

Náročnosť témy presnosť obrábacích strojov, je daná už tým, že veličiny, ktoré chcem odmerať sa razantne menia v priebehu času a to najmä pôsobením tepla. Dôležité preto je vykonať jednu skúšku, čo v najkratšom časovom intervale. Ako vyšlo z meraní 1 až 4 je zrejmé že poloha na stroji má značný vplyv na výslednú presnosť polohovania a kruhovitosti. Dôležité zistenie je, že namerané a použité kompenzácie jednej polohy nemusia spĺňať požiadavky na presnosť pri obrábaní v polohe druhej.

Pri spätnom posúdení celého priebehu tejto diplomovej práce by som navrhol ešte niekoľko vecí, ktoré by sa s väčším časovým fondom mohli urobiť lepšie a inak. Ako príklad vykonať experiment podľa navrhnutého štatistického plánu (úplného faktorového plánu skúšok), kde by sa overili všetky kombinácie rôznych vplyvov (f, poloha na stroji a teplota). Ďalším návrhom je vykonať merania raz v zimnom a raz v letnom období, kde by sa dala simulovať väčšia zmena vonkajšej teploty a teda posúdiť aj jej vplyv.

Pri meraniach 1 až 4 sa ako chyba ukázala aj nedostatočná kolmost' jednotlivých osí na seba. Toto by bolo vhodné tiež v nasledujúcich meraniach dobré skompenzovať a teda posúdiť aj vplyv kolmosti.

Pri meraní č.5 sa ukázalo, že v tomto meraní je dobré pokračovať a overiť výsledky pri obrábaní s inými reznými podmienkami ako je napríklad iná hĺbka záberu ostria. Táto zmena by ukázala vplyv tuhosti stroja, keďže by na stroj pôsobili iné rezné sily.

## 9 ZÁVER

Hlavným cieľom tejto diplomovej práce bolo posúdiť vplyv prevádzkových podmienok na výslednú presnosť polohovania a kruhovitosti. Ako posudzované faktory boli určené rýchlosť posuvu, poloha na stroji a teplota. Jednotlivé skúšky sa vykonávali na 3-osej frézke MCV 754 QUICK pomocou Laserového interferometra XL -80 a zariadenia Double Ballbar QC -20W. Boli vykonané 4 merania v rámci zadaných cieľov práce a rozpracované piate meranie, ktoré bolo vykonané na základe získaných výsledkov.

V teoretickej časti sa určili pojmy ako obrábací stroj, následne sa určili aké operácie sa dajú na takomto stroji vykonávať a objasnili sa rozdiely medzi obrábaním rôznych materiálov. V ďalšom bode bol definovaný stroj(MCV 754 QUICK), na ktorom sa posudzovali vplyvy na presnosť. Následne bola definovaná presnosť a chyby obrábacích strojov. Podrobnejšie tu boli rozobraté geometrické chyby a možnosť ich zisťovania. Ako zariadenia na posudzovanie vybraných parametrov boli bližšie definované zariadenia laser interferometer a Double Ballbar. Súčasťou teoretickej časti bola aj kapitola, kde sa definovala terminológia používaná v tejto práci.

V nasledujúcej časti bol splnený ďalší cieľ práce a to systémový rozbor problematiky. Tu sa určili aké rôzne faktory vplyvajú na presnosť stroja. Na toto bol využitý Ishikawa diagram. Pomocou neho boli určené vonkajšie vplyvy, vplyvy častí stroja, vplyvy merania a samotné vplyvy prevádzkových podmienok. Každé z týchto vplyvov boli bližšie rozobraté vo vlastných podkapitolách. Bolo tu aj naplánované štatistické plánovanie experimentu, ktoré sa z dôvodu časovej náročnosti zmenilo podľa Flowchartového návrhu. Týmto bol splnený aj ďalší cieľ práce, a to návrh spôsobu testovania stroja.

Praktická časť práce pozostávala z merania a z analýzy výsledkov meraní. Postupovalo sa podľa navrhnutého plánu. V prvom merní sa určili chyby v pracovnom priestore stroja pre 9 rôznych polôh (pri zmene X a Z súradnice) a pri rôznych rýchlostiach posuvu. Z nameraných výsledkov sa zistilo, že napríklad tolerancia polohy sa zhoršuje smerom od stredu stola ku krajom(o 14%) aj s rastúcou Z- súradnicou(o 22%). Z druhého merania vykonaného pomocou LI, ktoré prebehlo v 3 rôznych výškach Z pomocou rôznych rýchlostí, vyšlo napríklad že, rýchlosť posuvu nehrá takú významnú rolu ako poloha, kde sa meranie uskutočňuje. Meraním číslo 3 sa dokázal význam kompenzácií polohy. Tu sa pri použití kompenzácií zlepšuje parameter obojsmernej chyby polohovania až 20 násobne. Ukázalo sa však aj, že použitie kompenzácie polohy v inej výške ako nameranej, má za dôsledok opačný priebeh chyby polohy. Úlohou merania č.4 bolo posúdiť vplyv zmeny teploty okolia a stroja. Vplyvom okolností sa teplota okolia nedala meniť a teplota stroja sa zmenila len o 1,5°C. Avšak aj z tohto malého nárastu, bolo zrejme predlžovanie strojných súčastí. Vďaka tejto zmene nastalo „samo“ kompenzovanie stroja a zlepšenie chybových parametrov.

Na základe získaných poznatkov bolo nad rámec cieľov práce, vykonané neúplné meranie č.5, kde sa určovala presnosť na obrobku. Toto meranie je naplánované ešte zopakovať aj s inými reznými podmienkami a následne vyhodnotiť.

Ako posledná časť je zhrnutie najdôležitejších poznatkov tejto diplomovej práce v nemeckom jazyku.

# 10 ZUSAMMENFASSUNG

## 10.1 Kapitel 3: EIN ÜBERBLICK ÜBER DEN AKTUELLEN WISSENSSTAND

Dieses Kapitel befasst sich mit dem aktuellen Stand des untersuchten Themas. Zu Beginn werden der Begriff der Werkzeugmaschine und ihre verschiedenen Arten definiert.

Im nächsten Unterkapitel werden die auf Werkzeugmaschinen ausgeführten Arbeitsgänge näher erläutert. Es werden die Unterschiede zwischen Schrupp- und Schlichtbearbeitungen beschrieben. Ein wichtiger Punkt ist der Vergleich, wie stark die Maschine durch die Schnittbedingungen bei einem bestimmten Arbeitsgang belastet wird (siehe Tabelle 23).

Fertigungsverfahren	Schruppen	Schlichten
Schnittgeschwindigkeit [m/mm]	200	160
Vorschub pro Zahn [mm]	0,2	0,2
Schnitttiefe [mm]	3	0,5

Tab. 23 Vergleich zwischen Schruppen und Schlichten

Anschließend wird die Bearbeitung verschiedener Materialien verglichen, da jedes Material unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften hat und sich daher auch der Bearbeitungsprozess ändert. Eigenschaften wie Härte, Schmelzpunkt, Preis usw. werden hier z. B. für Edelstahl, Aluminium und Titan definiert.

Im nächsten Unterabschnitt wird die Maschine beschrieben, auf der die Messungen der Positioniergenauigkeit und die Kreisformabweichung durchgeführt werden. Diese Maschine ist eine 3-Achs Fräsmaschine mit C-Gestell. Sie heißt MCV 754 QUICK. Die Steuerungssoftware ist Siemens Sinumerik 840D. Die technischen Parameter dieser Maschine sind in Tabelle 24 aufgeführt.

Verfahrweg	X - Achse [mm]	754
	Y - Achse [mm]	500
	Z - Achse [mm]	550
Genauigkeit	Genauigkeit der Flächenanpassung [mm]	0,012
	Reproduzierbarkeit der Flächeneinstellung [mm]	0,005
Tisch	Aufspannfläche des Tisches [mm]	1000x500
	Maximale Tragfähigkeit [kg]	400
Spindel	Max. Drehzahl [mm <sup>-1</sup> ]	10 000
Vorschub	Tischvorschub [mm/min]	1-30 000
	Eilgang [mm/min]	30 000

Tab. 24 Technische Parameter – MCV 754 QUICK





Messgerät selbst abhängen. Beispiele für layoutabhängige Fehler sind Kosinusfehler, Abbe-Fehler und Dead-Track-Fehler.

Im letzten Teil dieser Unterkapitel wurde XL-80 Laserinterferometer von Renishaw definiert. Dieser wurde für die Messungen der Auswirkungen der Betriebsbedingungen auf die resultierende Kreisform- und der Positionierungsgenauigkeit verwendet. Außerdem wurden die technischen Parameter vom XL-80 (Betriebstemperaturen, Feuchtigkeit und Druck) und die vom Hersteller angegebenen Arten der Messunsicherheit (Laserfrequenz, Luftinhomogenität usw.) festgelegt.

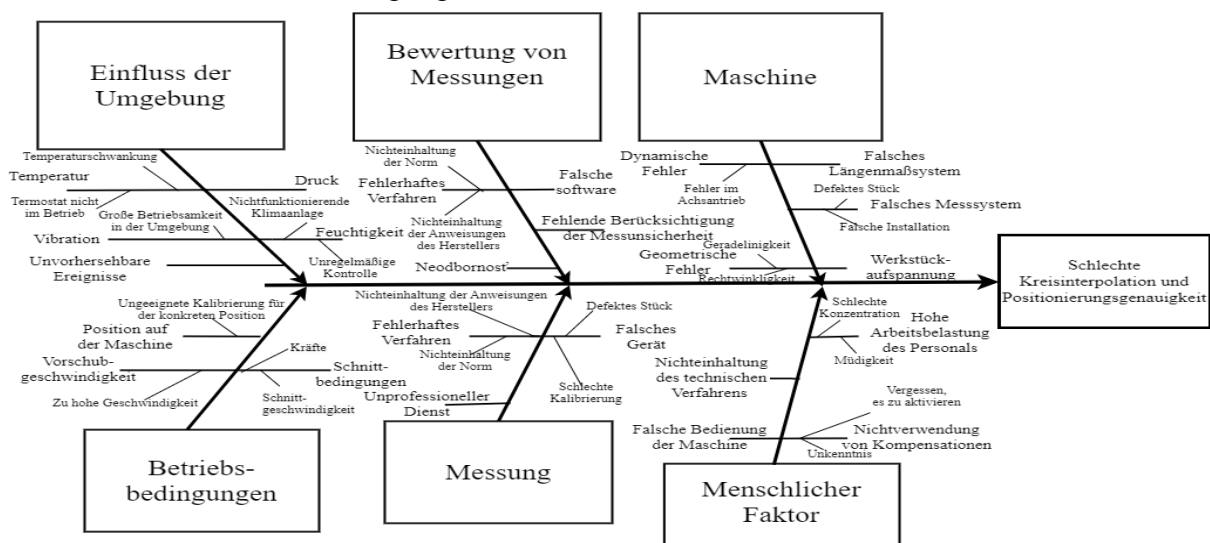
Im folgenden Unterabschnitt wurde das Prinzip der Doubleballbar auf ähnlicher Weise beschrieben. Als Messgerät für diese Masterarbeit wurde der Ballbar QC-20, ebenfalls von Renishaw, gewählt. Seine technischen Parameter (Sensorgenauigkeit, Messgenauigkeit, Temperaturbereich...) und wiederum die Messunsicherheiten (DBB-Kalibrierunsicherheit, Sphärizität der Kugel, Hysterese, Temperaturstreuung usw.) wurden definiert.

Der letzte Teil des theoretischen Teils definiert die Terminologie und den Unterschied zwischen dem Konzept der Kreisinterpolation an der Maschine und Rundheit am Werkstück. Diese Definition war wichtig, weil das slowakische Wort "Kruhovitost" für das Konzept Kreisform und auch für Werkstückrundheit verwendet wird. Bei der Kreisform handelt es sich um die Kreisinterpolation zweier linearer Achsen und bei der Werkstückrundheit um die geometrische Eigenschaft (Toleranz) kreisförmiger Oberflächen. Auf die gleiche Weise wird in diesem Kapitel die Positionierung auf der Maschine mit dem Positionierungsfehler am Werkstück verglichen.

## 10.2 Kapitel 4: SYSTEMATISCHE ANALYSE DES BEHANDELTEN PROBLEMS

Für ein genau definiertes Problem des Ablaufs der Betriebsbedingungen war es notwendig, die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Einflüssen und die daraus resultierende Genauigkeit der Kreisinterpolation und der Positionierung zu ermitteln.

Zu diesem Zweck wurde ein Ishikawa-Diagramm (Abbildung 51 und Anhang 2) erstellt. Ursachen wie der Einfluss der Umgebung, der Maschine, der Messung, des menschlichen Faktors und der Betriebsbedingungen selbst wurden diskutiert



Obr. 51 Ishikawa-Diagramm

Im folgenden Abschnitt werden äußere Einflüsse beschrieben, von denen die Maschine nie vollständig isoliert werden kann, wie z. B. Umgebungstemperatur und deren Veränderung, Vibrationseinflüsse und der menschliche Faktor.

Dann werden die Auswirkungen von Maschinenteilen wie linearen Encodern, Steuerungssystem, Aufspannung, Steigungsfehler und Steifigkeit des Kugelgewindespindels diskutiert

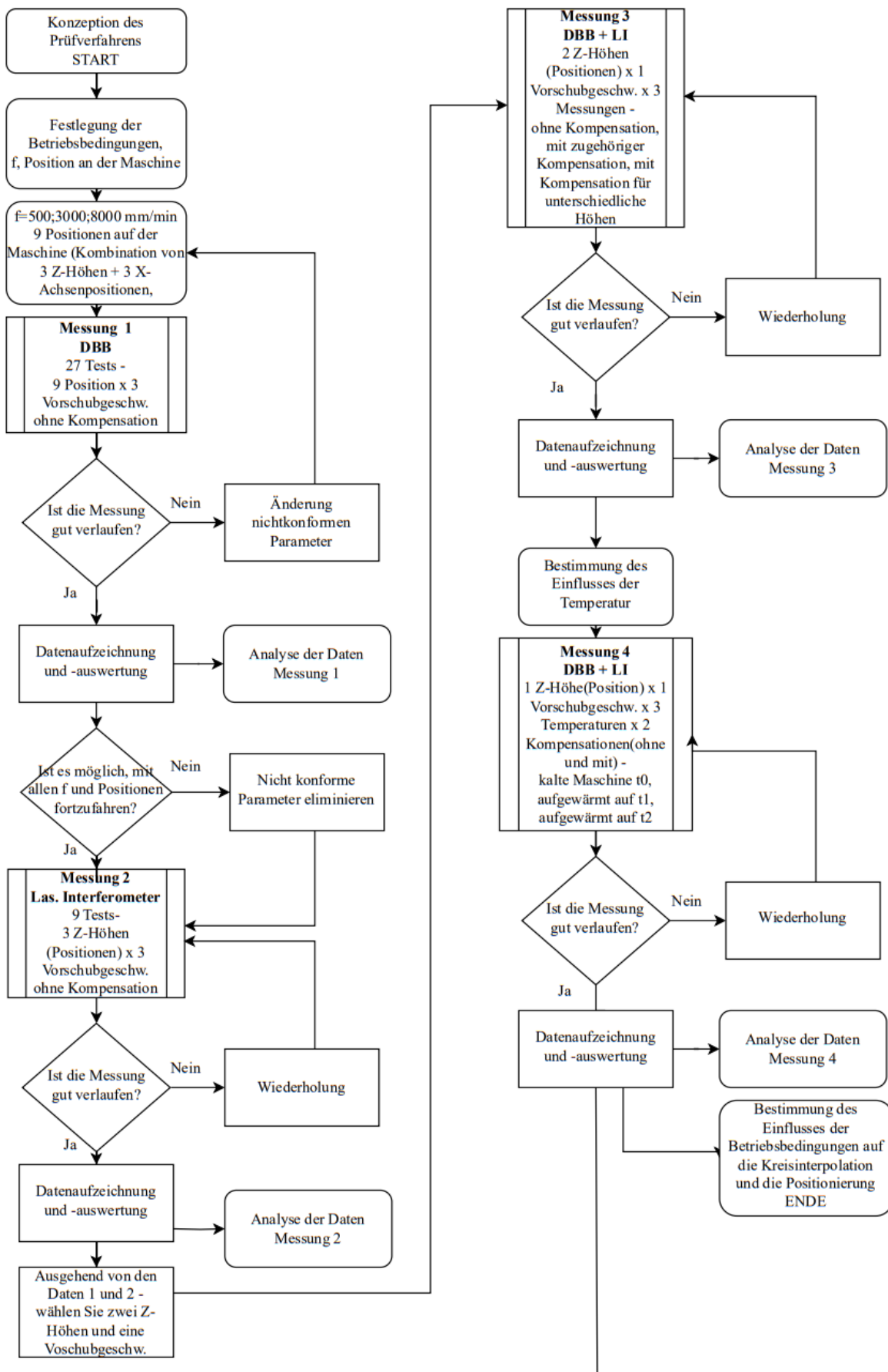
Dann wurden die Auswirkungen der Maschine auf die Kreisinterpolation genauer analysiert. Zu diesen Einflüssen gehören zum Beispiel der relative Messfehler, die Rechtwinkligkeit und die Geradheit. Diese Fehler gehören zu den geometrischen Fehlern der Maschine. Zu den dynamischen Fehlern der Maschine gehören die Servo-Fehlanpassung und die Servo-Verzögerung.

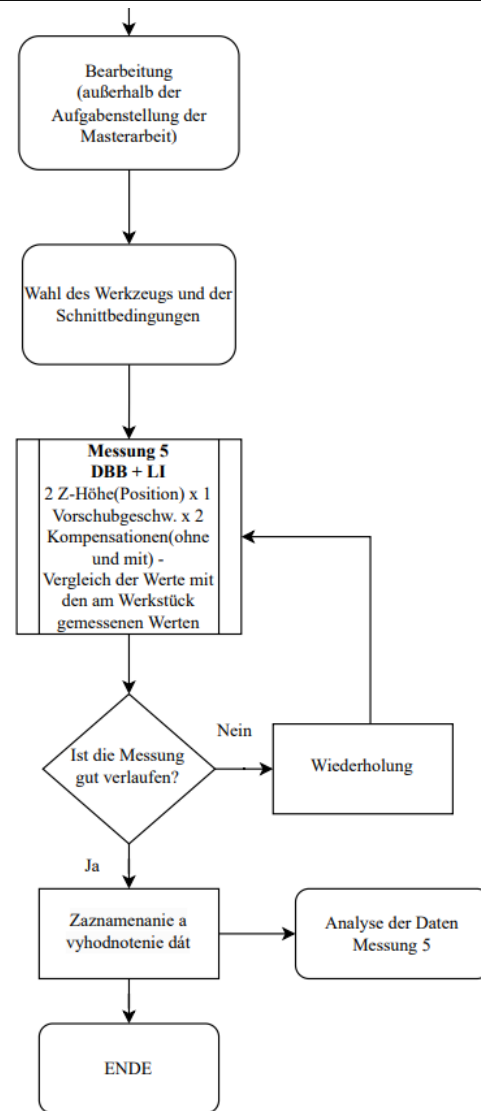
Eine der Unterkapitel befasst sich mit den Auswirkungen der Betriebsbedingungen. Als Beispiele werden hier die Vorschubgeschwindigkeit, die Position auf der Maschine, die von den Maschinenkomponenten erzeugte Wärme und die Schnittbedingungen genannt. Da die Zerspanungsbedingungen für jeden Arbeitsgang unterschiedlich sind, wurden die folgenden als universelle Betriebsbedingungen gewählt: Vorschub, Position und Wärmeentwicklung.

Der letzte Teil dieses Kapitels bestand darin, ein DOE - statistisches Versuchsplanung zu entwerfen. Hier wurde erstmals definiert, dass das Experiment eine Art Prozess ist. Ein Prozess ist die Umwandlung von Inputs in Outputs. Der gesamte Prozess wird von Faktoren beeinflusst, die entweder kontrollierbar sind (im Falle dieser Arbeit z. B. Laserstrahlstabilität, DBB-Kalibrierung) oder nicht kontrollierbar sind (z. B. Umgebungstemperatur). Anschließend wurden die Grundprinzipien der Versuchsplanung beschrieben: Randomisierung, Replizierbarkeit und Blocking.

Ein vollfaktorieller Versuchsplan wäre das ideale Experiment, um die Auswirkungen verschiedener Betriebsbedingungen auf die Maschinengenauigkeit zu bewerten. Dieser Versuchsplan wurde hier anhand des Beispiels der Beobachtung von nur drei Faktoren demonstriert. Da dieses Verfahren zu zeitaufwendig ist, wurde Flow-Chart als Versuchsplanmethode gewählt, die im nächsten Abschnitt beschrieben wird

# 10.3 Kapitel 5: KONZEPTION DES PRÜFVERFAHRENS





In diesem Kapitel wird eine Prüfmethode vorgeschlagen. Zu diesem Zweck wurde ein Flussdiagramm erstellt. Aus diesem Flussdiagramm geht hervor, dass 4 grundlegende Messungen vorgeschlagen wurden, die dann in Kapitel 6 näher erläutert werden. Außerhalb der Aufgabestellung der Masterarbeit wird hier auch die Messung 5 (Bearbeitungsprozess) hinzugefügt, bei der die durch LI von der Maschine erhaltenen Daten mit den am Werkstück gemessenen Daten verglichen werden.

## 10.4 Kapitel 6: ANALYSE DER MESSERGEBNISSE

### 10.4.1 Messung 1

Die erste Messung wurde mit DBB durchgeführt. Die Aufgabe bestand darin, die von der DBB messbaren Fehlereigenschaften wie Positionsfehler, Kreisform usw. zu bestimmen. Diese Messung wurde in 9 Positionen (an verschiedenen X- und Z-Koordinaten) und bei drei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten (500, 3000, 8000 mm/min) durchgeführt. Der Radius des DBB wurde auf 150 mm eingestellt.

Eine gekürzte deutsche Version der Messergebnisse findet sich in Tabelle 25.

	Position	Temperatur an der Linearskala				Vorschubgeschw.	Positionstoleranz ( $\mu\text{m}$ )	Kreisformabweichung ( $\mu\text{m}$ )	Rel. Massfehler ( $\mu\text{m}$ )
		X-	Y-	X+	Y+	f (mm/min)			
Test 1	X = 397	20,05	19,90	20,27	19,68	500	19,3	7,8	9,4
	Y = 254	19,98	19,82	20,15	19,62	3000	17,6	8,8	9,5
	Z = -460	20,03	19,82	20,24	19,70	8000	17,6	9,7	8,8
Test 2	X = 397	20,19	19,99	20,33	19,98	500	21,5	9,0	11,4
	Y = 254	20,31	19,96	20,38	19,93	3000	21,4	9,8	11,3
	Z = -405	20,17	19,91	20,33	19,82	8000	19,3	10,8	10,6
Test 3	X = 397	20,47	20,06	20,41	19,91	500	27,5	9,7	12,3
	Y = 254	20,42	19,99	20,55	19,90	3000	27,1	10,6	12,7
	Z = -350	20,39	19,96	20,49	19,86	8000	24,3	11,7	11,7
Test 4	X = 600	20,37	20,50	20,42	20,13	500	22,1	8,8	10,9
	Y = 254	20,56	20,16	20,74	20,00	3000	22,6	9,6	11,4
	Z = -460	20,49	20,04	20,62	19,92	8000	20,4	10,0	10,9
Test 5	X = 600	20,37	20,27	20,58	19,98	500	24,1	8,8	10,6
	Y = 254	20,59	20,39	20,46	20,27	3000	24,4	9,6	11,4
	Z = -406	20,59	20,30	20,57	20,09	8000	22,0	10,0	10,6
Test 6	X = 600	20,47	20,37	20,46	20,19	500	28,2	10,1	14,4
	Y = 254	20,47	20,18	20,53	19,99	3000	27,9	11,3	13,8
	Z = -350	20,43	20,25	20,55	20,15	8000	25,8	11,8	13,1
Test 7	X = 152	20,38	20,39	20,51	20,20	500	22,5	8,0	9,7
	Y = 254	20,56	20,30	20,64	20,23	3000	22,7	9,0	9,6
	Z = -460	20,52	20,34	20,61	20,21	8000	21,1	10,1	9,2
Test 8	X = 152	20,60	20,22	20,78	20,09	500	25,0	9,0	11,1
	Y = 254	20,60	20,42	20,62	20,26	3000	25,6	9,8	11,3
	Z = -406	20,56	20,29	20,69	20,11	8000	23,4	10,6	11,0
Test 9	X = 152	20,63	20,29	20,81	20,18	500	28,0	9,1	11,7
	Y = 254	20,88	20,30	20,76	20,37	3000	28,3	10,0	11,9
	Z = -351	20,47	20,42	20,75	20,21	8000	26,0	11,0	11,6

Tab. 25 Messergebnisse - Messung 1

Nach den Ergebnissen in Tabelle 25 gilt folgende Teilanalyse:

Die Positionstoleranz verschlechtert sich bei allen Vorschubgeschwindigkeiten in der Richtung von der Mitte des Arbeitsraums zu den außen X-Koordinaten und mit zunehmender Z - Höhe. Die Vorschubgeschwindigkeit spielt dabei keine wesentliche Rolle.

Die resultierende Genauigkeit der Kreisform wird bereits durch den Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst. Auch hier besteht ein Zusammenhang mit der Position, an der die Prüfung stattgefunden hat. Mit zunehmender Z-Höhe sehen wir wieder eine Verschlechterung des Messwertes. Bei einer Position in der X-Achse ist der Fehler bei niedrigen X-Koordinaten am geringsten und nimmt dann zu.

Dynamische Fehler (wie die Servoverzögerung) treten nur bei maximaler Vorschubgeschwindigkeit auf und sind unabhängig von der Position.

## 10.4.2 Messung 2

Für die zweite Messung wurde das Laserinterferometer XL-80 verwendet, mit dem die X-Achse in drei verschiedenen Höhen gemessen werden sollte. Die gesamte Messung wurde ohne Kompensation durchgeführt. Die Position der Z-Achse war die gleiche wie bei der ersten Messung (Z=-460; -405; -350). Die Vorschubgeschwindigkeiten waren ebenfalls dieselben (f=500;3000;8000mm/min).

Eine gekürzte deutsche Version der Messergebnisse findet sich in Tabelle 26

		Position 1			Position 2			Position 3		
Position		Z=-460			Z=-405			Z=-350		
	Vorschubgeschw. f (mm/min)	500	3000	8000	500	3000	8000	500	3000	8000
Temperatur (°C)	Linearskala X-	19,7	19,6	19,7	19,7	19,6	19,6	19,8	19,9	19,9
	Linearskala X+	19,5	19,6	19,6	19,7	19,7	19,6	20,0	20,1	20,2
	Positionierfehler (µm)	24,6	23,6	23,5	27,7	27,4	27,1	31,5	31,0	33,1
	Reproduzierbarkeit d. Pos. (µm)	1,9	1,1	0,9	1,2	0,8	0,8	0,8	0,9	3,3
	Systemat. Positionierfehler (µm)	23,6	23,3	23,1	27,4	27,0	26,9	31,1	30,8	32,5
	Reversal (µm)	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	2,7
	Mean reversal (µm)	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	2,0
	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehler (µm)	23,3	23,0	22,9	27,2	26,8	26,6	31,0	30,5	31,9

Tab. 26 Messergebnisse - Messung 2

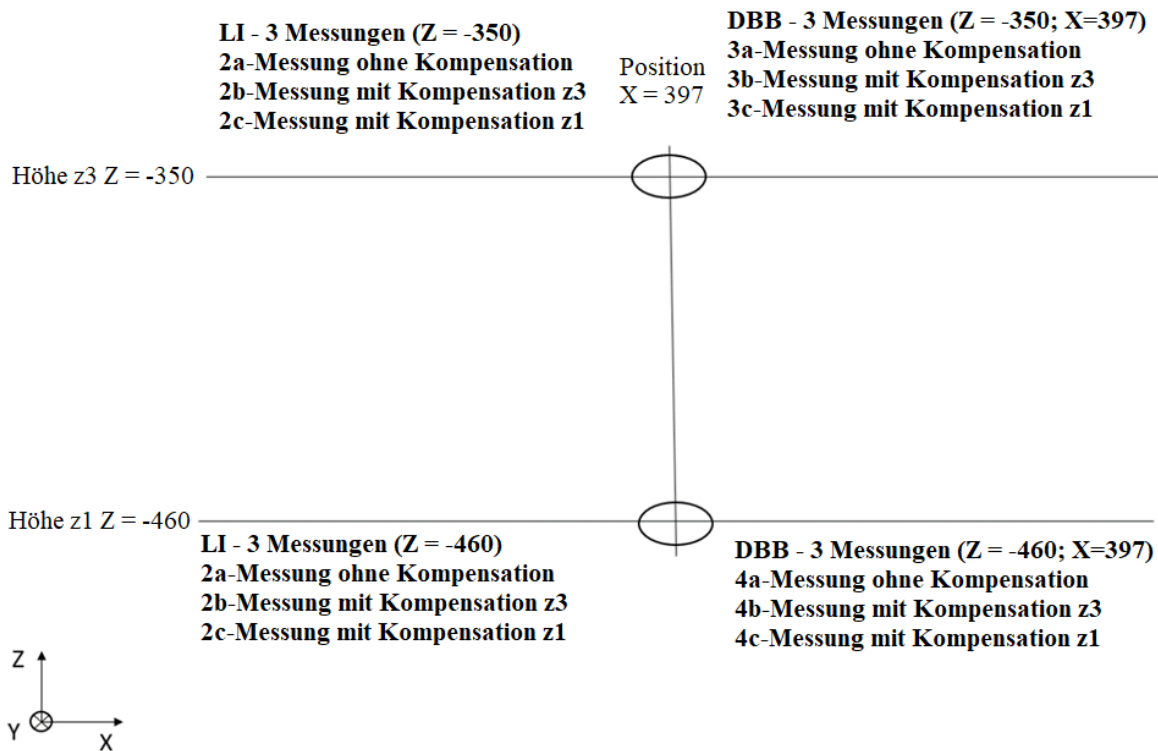
Nach den Ergebnissen in Tabelle 26 gilt folgende Teilanalyse:

Die Fehler nehmen mit zunehmender Höhe und Geschwindigkeit der Z-Achse direkt proportional ab. Zum Beispiel beträgt der bidirektionale Positionierfehler ist 23,3 µm bei der niedrigsten Höhe (Z=460) und der langsamsten Geschwindigkeit (f=500mm/min). Dieser Fehler wird noch größer, bei der zweiten Position und der gleichen Geschwindigkeit beträgt er 27,2 µm und bei der höchsten Position bereits 31,1 µm. Die Änderung der Positionshöhe hat eine größere Auswirkung als die Änderung der Geschwindigkeit, die innerhalb des statistischen Fehlers liegt.

Eine weitere wichtige Beobachtung ist, dass bei maximaler Höhe und Geschwindigkeit die LI-Baugruppe nicht genug Steifigkeit hat und darum deutlich verschlechtern sich die Reproduzierbarkeit, reversal und mean reversal.

### 10.4.3 Messung 3

Für die dritte Messung wurden sowohl LI als auch DBB verwendet. Die LI-Messungen wurden bei  $Z=-460$  und  $Z=-350$  (wie bei den vorherigen Tests) durchgeführt. Zu Beginn erfolgte die Messung ohne Kompensation. Anhand der Ergebnisse wurde eine Kompensationstabelle erstellt. Anschließend wurde eine Messung mit Kompensation für eine bestimmte Höhe durchgeführt. Dann wurde in der zweiten Höhe gemessen, wobei die Messung wiederum ohne Kompensation, dann mit Kompensation für diese Höhe und dann mit Kompensation von einer anderen Höhe aus erfolgte. Schließlich wurde die erste Höhe erneut mit der "falschen" Kompensation gemessen. (Abbildung 52)



Obr. 52 Skizze – Messung 3

Die Messergebnisse findet sich in der Tabelle 27.

		Höhe z3			Höhe z1		
		Z = -350			Z = -460		
		3000			3000		
Kompensationen		nein	z3 (richtige Komp.)	z1 (falsche Komp.)	nie	z3 (falsche Komp.)	z1 (richtige Komp.)
Temperatur (°C)	Linearskala X-	20,48	20,64	20,61	20,50	20,56	20,68
	Linearskala X+	20,39	20,55	20,68	20,56	20,58	20,76
Position	Positionierfehler ( $\mu\text{m}$ )	29,5	1,4	7,7	21,4	7,6	1,4
	Reproduzierbarkeit d. Pos. ( $\mu\text{m}$ )	2,5	1,0	1,4	0,9	0,8	1,0
	Systemat. Positionierfehler ( $\mu\text{m}$ )	28,3	1,1	6,9	21,1	7,3	1,0
	Reversal ( $\mu\text{m}$ )	0,5	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3
	Mean reversal ( $\mu\text{m}$ )	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehler ( $\mu\text{m}$ )	28,0	0,9	6,6	20,9	7,1	0,8

Tab. 27 Ergebnisse - Messung 3 (LI)



Die aus dieser Messung gewonnenen Daten in Tabelle 15 zeigen uns, dass die aktivierte Kompensation einen erheblichen Einfluss auf die Verbesserung der Positionsfehler hat. Bei der Auswertung der Daten, die ohne eingeschaltete Kompensation gewonnen wurden, ist der Bereich des bidirektionalen Positionsfehlers bis zu 20-mal größer als bei Verwendung der korrekten Kompensation. Wird jedoch in einer bestimmten Höhe die Kompensation aus einer anderen Höhe verwendet, ist der Positionsfehler zwar kleiner als ohne Kompensation, aber immer noch erheblich (um einen Faktor von mehreren).

Die Ergebnisse der Messungen mit DBB sind in Tabelle 28 aufgeführt.

		Höhe z3			Höhe z1		
Position		X = 397	Y = 254	Z = -350	X = 397	Y = 254	Z = -460
Vorschubgeschw. f (mm/min)		3000			3000		
Kompensationen		bez	z3 (správna komp.)	z1 (nesprávna komp.)	bez	z3 (nesprávna komp.)	z1 (správna komp.)
Temperatur (°C)	Linearskala X-	20,62	20,60	20,61	20,85	20,73	20,70
	Linearskala Y-	20,51	20,51	20,46	20,38	20,39	20,48
	Linearskala X+	20,68	20,79	20,71	20,73	20,71	20,73
	Linearskala Y+	20,33	20,22	20,28	20,28	20,27	20,34
	Positionstoleranz (µm)	22,4	12,9	14,1	19,4	17,3	14,7
	Kreisformabweichung (µm)	11,7	9,3	9,3	10,1	7,8	8,0
	Rel. Massfehler (µm)	13,3	2,8	4,6	12,0	1,6	2,8
	Rechtwinkligkeit (µm/m)	6,8	6,9	6,8	9,4	9,1	9,4
	Geradheit X (µm/m)	-4,0	-3,7	-3,5	-2,4	-2,5	-2,3
	Zyklischer Abstand X (µm)	↑0,9 ↓1,2	↑0,9 ↓1,3	↑0,9 ↓1,3	↑0,9 ↓1,4	↑0,9 ↓1,3	↑0,9 ↓1,4
Quadraten-Übergang Y (µm)	↑ 3,8 ↓2,7	↑ 3,9 ↓2,7	↑ 3,8 ↓3,1	↑4,0 ↓2,9	↑ 3,6 ↓2,8	↑ 3,7 ↓2,7	
Quadraten-Übergang X (µm)	→1,3 ←1,3	→0,1 ←1,4	→1,3 ←1,2	→2,2 ←1,7	→2,0 ←1,6	→2,3 ←1,7	

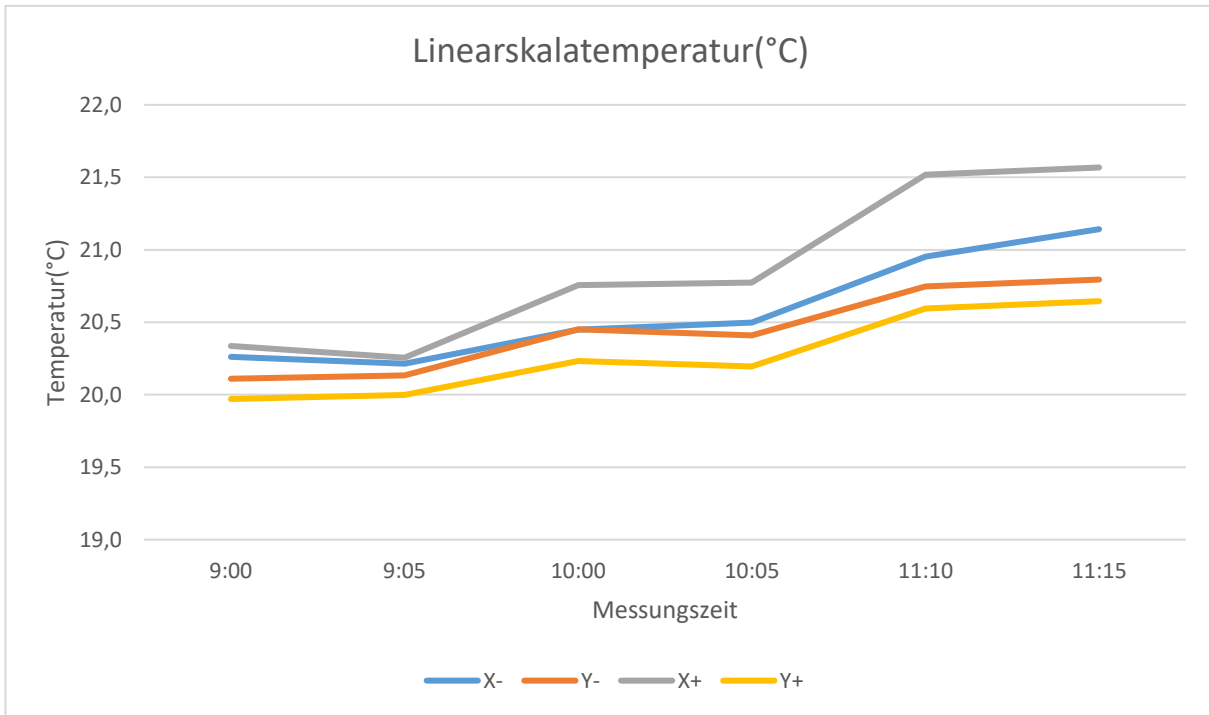
Tab. 28 Ergebnisse - Messung 3 (DBB)

Bei der Messung mit dem DBB ist der Effekt ähnlich wie bei den mit LI gemessenen Daten, d.h. ohne Kompensation sind die Fehler am größten, mit falscher Kompensation kleiner und die beste sind die Ergebnisse mit korrekter Kompensation. Die resultierende Genauigkeit wird am meisten beeinflusst durch die Verwendung der Kompensation selbst. Die resultierende Kreisform ist mit beide Kompensationen dieselbe, weil die "richtige" oder falsche" Kompensation innerhalb der Messunsicherheit des DBB ist. Der größte Einfluss auf die resultierende Kreisform ohne die Kompensation hat der relative Messfehler. Bei richtiger Kompensation ist es dagegen die Y-Servoverzögerung (Quadraten - Übergang). Dieses Verfahren ist ähnlich für beide Z-Achsen-Höhen.

#### 10.4.4 Messung 4

Der Zweck der 4. Messung bestand darin, die Auswirkung von Temperaturänderungen auf die resultierende Positionierungsgenauigkeit und Kreisform zu bewerten. Es wurden drei Messreihen durchgeführt, wiederum sowohl mit LI als auch mit DBB. Bei diesen Messungen wurde nur in einer Höhe gemessen, (z1= -460), mit einer Vorschubgeschwindigkeit von f = 3000mm/min und einmal mit und einmal ohne Positionskompensation.

Die erste Messung erfolgte an der "kalten" Maschine, d. h. ohne vorheriges Aufheizen. Diese Messung wird mit der Temperatur t0 bezeichnet. Nach der Messung wurde das Aufwärmprogramm des Lineals eingeschaltet, das etwa 40 Minuten lang lief. Danach folgte eine zweite Messung bei der Temperatur t1. Der gesamte Vorgang wurde noch einmal wiederholt, das Aufwärmprogramm lief etwa 1 Stunde lang und die letzte Messung wurde bei der Temperatur t2 durchgeführt (Abbildung 53).



Obr. 53 Linearskalatemperatur - Mess. 4

		Messung t0		Messung t1		Messung t2		
Höhe		Z = -460		Z = -460		Z = -460		
Vorschubgeschw. f (mm/min)		3000		3000		3000		
Kompensationen		nein	ja	nein	ja	nein	ja	
Temperatur (°C)	Linearskala X-	20,12	20,18	20,55	20,64	20,85	20,93	
	Linearskala X+	20,25	20,26	20,61	20,81	21,34	21,31	
Position	Positionierfehler (µm)	22,7	1,7	21,3	1,4	20,5	1,3	
	Reproduzierbarkeit d. Pos. (µm)	0,7	0,9	0,7	1,2	0,7	0,8	
	Systemat. Positionierfehler (µm)	22,3	1,4	21,0	1,0	20,1	0,8	
	Reversal (µm)	0,3	0,0	0,2	0,3	0,2	0,2	
	Mean reversal (µm)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	
	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehler (µm)		22,1	1,2	20,8	0,9	19,9	0,7

Tab. 29 Ergebnisse - Messung 4 (LI)

Die Daten (Tabelle 29) zeigen, dass sich die Auswirkungen auf die Positioniergenauigkeit ohne Kompensation paradoxerweise mit steigender Temperatur verbessern. Dies liegt jedoch daran, dass alle Kompensationen in positiver Richtung eingegeben wurden. Da sich die Maschinenteile bei Erwärmung verlängern, "kompensierte" sich die Maschine selbst durch diese leichte Erwärmung. Leider war es nicht möglich, eine Messung bei einer größeren Temperaturspanne vorzunehmen, welche die Auswirkungen einer sehr hohen oder sehr niedrigen Temperatur besser gezeigt hätte.

Bei eingeschalteter Kompensation zeigt die Auswirkung der Temperatur auf die Positioniergenauigkeit (Positionsfehler, Wiederholbarkeit) nur eine minimale Änderung im

Zehntelmikrometerbereich. Diese Daten können nicht als bedeutsam angesehen werden, da die Messunsicherheit bei LI größer ist als die Änderungen.

		Messung t0		Messung t1		Messung t2	
Temperatur (°C)	Position	X = 397	Z = -460	X = 397	Z = -460	X = 397	Z = -460
	Vorschubgeschw. f (mm/min)	3000		3000		3000	
	Kompensationen	nein	ja	nein	ja	nein	ja
	Linearskala X-	20,26	20,21	20,45	20,50	20,95	21,14
	Linearskala Y-	20,11	20,13	20,45	20,41	20,75	20,79
	Linearskala X+	20,34	20,26	20,76	20,77	21,52	21,57
	Linearskala Y+	19,97	20,00	20,23	20,20	20,60	20,65
	Positionstoleranz (µm)	18,7	12,6	20,7	9,8	22,9	9,7
	Kreisformabweichung (µm)	11,3	8,5	10,7	7,3	10,6	6,6
	Rel. Massfehler (µm)	11,4	3,8	11,5	3,0	11,9	3,3
	Rechtwinkligkeit (µm/m)	7,7	9,1	8,8	9,1	9,1	9,3
	Geradheit X (µm/m)	-2,1	-2,2	-2,6	-2,5	-2,4	-2,4
	Zyklischer Abstand X (µm)	↑1,1 ↓1,6	↑1,1 ↓1,6	↑1,0 ↓1,3	↑1,0 ↓1,4	↑1,0 ↓1,4	↑0,9 ↓1,5
	Quadraten-Übergang Y (µm)	↑3,9 ↓3,3	↑3,5 ↓3,3	↑3,6 ↓2,9	↑3,6 ↓3,4	↑3,4 ↓3,0	↑3,3 ↓3,2
Quadraten-Übergang X (µm)	→1,8 ←1,9	→1,6 ←1,9	→1,5 ←1,6	→2,0 ←1,9	→2,2 ←1,8	→2,1 ←2,0	

Tab. 30 Ergebnisse - Messung 4 (DBB)

Bei der Messung mit DBB (tab. 30) ohne eingeschaltete Kompensation zeigt sich die Auswirkung der Temperatur auf die Genauigkeit der Kreisform in ähnlicher Weise, so dass sich die Maschine bei steigender Temperatur wieder selbst "kompensiert". Mit eingeschalteter Kompensation sind die Veränderungen wiederum minimal, d.h. ihr Einfluss kann unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten nicht genau bestimmt werden.

## 10.5 Kapitel 7: BEWERTUNG DER ERZIELTEN ERGEBNISSE

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse zusammen.

### Messung 1:

Die Positionstoleranz verschlechtert sich insbesondere mit der Position auf der Maschine. In der X-Achse hat die Mitte des Tisches die beste Positionstoleranz für die unkompenzierte Maschine und verschlechtert sich bei steigenden und fallenden Werten von X um etwa 14 %. Allerdings hat die Z-Koordinate und damit die Höhe im Arbeitsraum einen größeren Einfluss. Hier verschlechtert sich die Messgröße um bis zu ca. 22%. Die Vorschubgeschwindigkeit hat keinen eindeutigen Einfluss auf die Positionstoleranz (die Messergebnisse liegen innerhalb der DBB-Unsicherheit).

Die Kreisform folgt einem ähnlichen Muster und ist daher in der Mitte des Tisches, auf der minimalen Höhe, am besten. Im Gegensatz zur Positionstoleranz hat hier auch die Vorschubgeschwindigkeit einen signifikanten Einfluss. Bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten wirken sich auch dynamische Fehler (Antriebsverzögerung) aus.

### Messung 2:

Der bidirektionale Positionierungsfehler ist für eine gegebene Position innerhalb der Unsicherheit der LI-Messung gleich, und daraus kann geschlossen werden, dass die Vorschubgeschwindigkeit hier keine bedeutende Rolle spielt. Im Gegensatz dazu verschlechtert sich dieser Parameter beim Wechsel der Höhe von z1 auf z2 und dann auf z3 (zweimal 60 mm) um 14 % bzw. 12 %.

Die Reproduzierbarkeit ist für alle Höhen und Geschwindigkeiten innerhalb der Messunsicherheit gleich, außer für die maximale Höhe (z3) und Geschwindigkeit ( $f=8000\text{mm/min}$ ). Bei der Kombination von z3 und max f kommt es zu einem drastischen Anstieg, der vermutlich auf die mangelnde Steifigkeit der LI-Baugruppe und die angeregten Frequenzen zurückzuführen ist.

### Messung 3:

Die Ergebnisse dieser Messung zeigen, wie wichtig die Verwendung einer Positionskompensation ist. Bei Verwendung der richtigen Kompensation für eine gegebene Höhe verbessert sich der Wert des bidirektionalen Positionsfehlers um das bis zu 20-mal. Bei falscher Kompensation liegt der Unterschied zwischen der gewünschten und der tatsächlichen Position in der Größenordnung von  $\mu\text{m}$  pro Meter kompensierter Länge.

Die Kreisform ist bei Verwendung der Kompensation aus jeder Höhe gleich. Auch hier liegen die gemessenen Unterschiede nur innerhalb der DBB-Unsicherheit.

### Messung 4:

Der Einfluss der Temperatur wurde nur für die niedrigste Höhe und die mittlere Geschwindigkeit  $f = 3000\text{mm/min}$  ermittelt. Innerhalb der Messung betrug der Temperaturanstieg nur  $1,5^\circ\text{C}$ . Dieser minimale Anstieg führte dazu, dass die nicht kompensierte Maschine unter dem Einfluss der Temperatur zu "kompensieren" begann. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass die zuvor gemessenen Kompensationen immer als positive Werte eingegeben wurden (die Maschine erreichte nicht die gewünschte Position), und somit verlängerte sich die Maschine mit der Erwärmung der einzelnen Komponenten und "kompensierte" sich selbst - was sowohl die Positionsgenauigkeit als auch die Kreisform verbesserte.

## 11 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] HIRSCH, Andreas. *Werkzeugmaschinen: Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*. 3.vyd. Chemnitz: Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-14248-3.
- [2] KOČMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005. 270 s., ISBN 80-214-3068-0
- [3] SCHRUPPEN, SCHLICHTEN, PROFITIEREN.: GARANT TwinCut – einzigartig effizient mit nur einem Fräskörper für zwei Plattentypen. *Hoffmann Group* [online]. München, 2016 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: [https://www.hoffmann-group.com/medias/sys\\_master/images/images/hff/hf3/8926850580510/Innovation-GARANT-TwinCut-04727DE-KW1603DE.pdf?attachment=true](https://www.hoffmann-group.com/medias/sys_master/images/images/hff/hf3/8926850580510/Innovation-GARANT-TwinCut-04727DE-KW1603DE.pdf?attachment=true)
- [4] Spanende Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen: Einführung und Überblick. *IPA Fraunhofer* [online]. 2012 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: [https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Publikationen/Studien/Spanende\\_Bearbeitung\\_von\\_Leichtbauwerkstoffen.pdf](https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Publikationen/Studien/Spanende_Bearbeitung_von_Leichtbauwerkstoffen.pdf)
- [5] MU, Martin. *STAINLESS STEEL VS ALUMINUM: WHICH IS BETTER FOR YOUR CNC MACHINING PROJECT* [online]. Shenzhen [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://www.ddprototype.com/stainless-steel-vs-aluminum-which-is-better-for-your-cnc-machining-project>
- [6] HERMAWAN, Ade. *The Effect of Material Heat Treatment on Hardness and Corrosion Rate in 319 as Aluminum Alloy* [online]. Jakarta, 2019 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: doi:10.9790/1813-0803026976
- [7] MÁČALA, D. *Volumetrická přesnost obráběcích strojů*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2019, 117 s. Vedoucí diplomové práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.
- [8] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [9] JELÍNEK, A. *Monitorování výrobní přesnosti*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125219>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Michal Holub.
- [10] HOLUB, M. *Geometric Accuracy of Machine Tools*. V: *Measurement in Machining and Tribology*. Springer, Cham, 2019. s. 89-112. ISBN: 978-3-030-03821-2.
- [11] HOLUB, Michal, Petr BLECHA, Frantisek BRADAC a Roman KANA. VOLUMETRIC COMPENSATION OF THREEAXIS VERTICAL MACHINING CENTRE. *MM Science Journal*. 2015, **2015**(03), 677-681. ISSN 18031269. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2015\_10\_201534
- [12] *Physik: Wärmelehre* [online]. Berlin: Springer, 2009 [cit. 2023-03-17]. ISBN 978-3-540-89101-7. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-89101-7\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-89101-7_5)

- [13] CHEN, Tsung-Chia. *Analysis of the Real-time Compensation for Thermal Error at CNC Milling Machine* [online]. 2016 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/20167104004
- [14] OKAFOR, A.C. a Yalcin ERTEKIN. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2000 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: doi:10.1016/S0890-6955(99)00105-4
- [15] *5530 Laser Calibration System: Verify Machine Performance with the World Standard for Laser-based Metrology* [online]. USA, 2008 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01910/technical-overviews/5989-9354.pdf>
- [16] *Brochure: XL-80 laser measurement system* [online]. 2015 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/--94419>
- [17] *Interferometry a vlastnosti laserového zařízení* [online]. Praha, 2007 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: [http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP\\_03.pdf](http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_03.pdf)
- [18] VIROSTKOVÁ, Kristina. Lasery a přesnost v CNC obráběcích strojích. In: *Stavba a provoz CNC obráběcích strojů* [online]. [cit. 2023-04-18]. ISBN 978-80-907452-4-7. Dostupné z: <https://www.os.fme.vutbr.cz/StavbaAProvoz/ev-1/Kapitola8/LaseryPresnostCnc>
- [19] KOČÍ, R. *Nejistoty interferometrických měření*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 82s. Vedoucí diplomové práce byla Ing. Marie Havlíková, Ph.D.
- [20] KÖNING, R. A method for the in situ determination of Abbe errors and their correction. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18.2: 476.
- [21] *XL-80 +/- 0.5ppm uncertainty breakdown* [online]. 2013 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/aplikacni-poznamky-ke-kalibraci--38647>
- [22] *Diagnostický systém ballbar QC20-W – popis a specifikace* [online]. 2012 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: [http://www.gemacnc.cz/files/container/L-8014-1617-02-C\\_QC20-W\\_CS.pdf](http://www.gemacnc.cz/files/container/L-8014-1617-02-C_QC20-W_CS.pdf)
- [23] *QC20 ballbar error budget and uncertainty calculations* [online]. 2022 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/download/error-budget-and-uncertainty-calculations-qc20-w-ballbar--109457?userLanguage=cz&>
- [24] ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích stroju: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích stroju*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [25] DRBÚL, Mário, Michal ŠAJGALÍK, Ján ŠEMCER, Tatiana CZÁNOVÁ, Lenka PETŘKOVSKÁ a Lenka ČEPOVÁ. *Strojárska metrológia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania* [online]. In: Žilina, 2014 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/064/docs/metrologie.pdf>

- [26] HOLUB, Michal a Robert JANKOVYCH. *Experimental Study of the Volumetric Error Effect on the Resulting Working Accuracy—Roundness* [online]. 2020 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/98211/Holub\\_Jankovych\\_Vetiska\\_et\\_al\\_\\_Experimental\\_Study\\_of\\_the\\_Volumetric\\_Error\\_Efect\\_on\\_the\\_Resulting\\_Working\\_AccuracyRoundness\\_\\_%282020%29\\_PUBV\\_342817.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/98211/Holub_Jankovych_Vetiska_et_al__Experimental_Study_of_the_Volumetric_Error_Efect_on_the_Resulting_Working_AccuracyRoundness__%282020%29_PUBV_342817.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)
- [27] ČSN ISO 230-2. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízeních osách*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [28] *QC20-W ballbar training course manual*. Gloucestershire UK, 2013. Dostupné také z: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/Manual-QC20-ballbar-system-English--124307?lang=English>
- [29] JIJU, Anthony. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. 2. Edinburg: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-08-099417-8.
- [30] MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiments*. 5th ed. New York: Wiley, 2001. ISBN 04-713-1649-0.
- [31] Leon RV, Shoemaker A, Tsui K-L. *Discussion on planning for a designed industrial experiment*. *Technometrics*. 1993;35(1):21–24
- [32] VAVŘÍK, Ivan a Petr BLECHA. *Jakost II: Metody a nástroje zabezpečování jakosti*. Brno, 1998.

# 12 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, TABULIEK A OBRÁZKOV

## 12.1 Zoznam skratiek

CNC	číslicovo riadený stroj
OS	obrábací stroj
IT	international tolerance
HB	tvrdosť podľa Brinella
ISO	Medzinárodná organizácia pre normalizáciu (norma)
VDI	Verein deutscher Ingenieure (norma)
ČSN	česká technická norma
LI	laserový interferometer
DBB	Double Ballbar
JUS	jednouúčelový stroj
f	rýchlosť posuvu

## 12.2 Zoznam tabuliek

Tab. 1 Porovnanie hrubovania a dokončovania.....	24
Tab. 2 Vybrané materiálové charakteristiky .....	24
Tab. 3 Technické parametre MCV 754 Quick.....	26
Tab. 4 Popis geometrických chýb .....	30
Tab. 5 Technické parametre XL-80 [16] .....	35
Tab. 6 Neistota merania pomocou XC-80 .....	36
Tab. 7 Výsledná neistota merania LI ako celku.....	36
Tab. 8 Technické parametre Ballbaru .....	37
Tab. 9 Výsledná neistota merania s DBB QC-20W .....	37
Tab. 10 Kruhovitosť – porovnanie.....	39
Tab. 11 Polohovanie – na stroji vs. chyba na obrobku .....	40
Tab. 12 Úplne faktorový plán skúšky .....	45
Tab. 13 Výsledky merania č.1 .....	51
Tab. 14 Výsledky merania č.2 .....	57
Tab. 15 Výsledky merania č.3 (LI).....	60
Tab. 16 Výsledky merania č.3 (DBB) .....	62
Tab. 17 Výsledky merania č.4 (LI).....	64
Tab. 18 Výsledky meranie č.4 (DBB) .....	64
Tab. 19 Rezné parametre - meranie 5 .....	67
Tab. 20 Namerané hodnoty - JUS.....	69
Tab. 21 Rozdiel nameraný na obrobku - JUS.....	69
Tab. 22 Rozdiel nameraný na obrobku - CMM.....	70
Tab. 23 Vergleich zwischen Schruppen und Schlichten.....	72
Tab. 24 Technische Parameter – MCV 754 QUICK.....	72
Tab. 25 Messergebnisse - Messung 1 .....	78



Tab. 26 Messergebnisse - Messung 2 .....	79
Tab. 27 Ergebnisse - Messung 3 (LI).....	80
Tab. 28 Ergebnisse - Messung 3 (DBB) .....	81
Tab. 29 Ergebnisse - Messung 4 (LI).....	82
Tab. 30 Ergebnisse - Messung 4 (DBB) .....	83

### 12.3 Zoznam obrázkov

Obr. 1 Rozdelenie obrábacích strojov [1] .....	23
Obr. 2 Hliníkové a ocelové obrobky .....	25
Obr. 3 Stroj MCV 754 QUICK v laboratóriu UVSSR.....	26
Obr. 4 Presnosť polohovania.....	28
Obr. 5 Kruhovitost' podľa ISO .....	28
Obr. 6 Volumetrická presnosť [11] .....	29
Obr. 7 Pôsobenie teplotných dilatácií[13].....	29
Obr. 8 Geometrické chyby [10] .....	30
Obr. 9 Michelsonov interferometer [17] .....	32
Obr. 10 Kosínusová chyba [18] .....	33
Obr. 11 Chyba Abbého aberácie [19] .....	34
Obr. 12 Chyba mŕtvej dráhy [18].....	34
Obr. 13 Laser interferometer XL-80 [16] .....	35
Obr. 14 Ballbar QC20-W[22] .....	36
Obr. 15 Kruhovitost' na stroji [24] .....	38
Obr. 16 Meranie kruhomerom zobrazené v reze obrobku[26].....	38
Obr. 17 Náčrt obrábaného dielu .....	40
Obr. 18 Ishikawa diagram .....	41
Obr. 19 Teploty na stroji .....	43
Obr. 20 Proces .....	44
Obr. 21 Polohy jednotlivých testov – meranie 1 .....	49
Obr. 22 Teplota pravítok v priebehu merania 1 .....	50
Obr. 23 Proces merania s DBB .....	50
Obr. 24 Tolerancia polohy ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve $f= 500$ ).....	52
Obr. 25 Tolerancia polohy ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve $f= 3000$ ) .....	52
Obr. 26 Tolerancia polohy ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve $f= 8000$ ) .....	53
Obr. 27 Kruhovitost' ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve $f= 500$ ).....	53
Obr. 28 Kruhovitost' ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve $f= 3000$ ).....	54
Obr. 29 Kruhovitost' ( $\mu\text{m}$ ) (pri posuve $f= 8000$ ).....	54
Obr. 30 Omeškanie serva Y ( $\mu\text{m}$ ) (pri $f= 500$ ).....	55
Obr. 31 Omeškanie serva Y ( $\mu\text{m}$ ) (pri $f= 3000$ ).....	55
Obr. 32 Omeškanie serva Y ( $\mu\text{m}$ ) (pri $f= 8000$ ).....	55
Obr. 33 Teplota pravítka X – meranie 2 .....	56
Obr. 34 Teplota okolia z kompenzátora XC – meranie 2 .....	56
Obr. 35 Proces merania s LI.....	57
Obr. 36 Obojsmerná chyba polohovania osi X – meranie 2 .....	58
Obr. 37 Opakovateľnosť – meranie 2 .....	58
Obr. 38 Náčrt merania č.3 .....	59
Obr. 39 Teplota pravítka X – meranie 3 .....	59

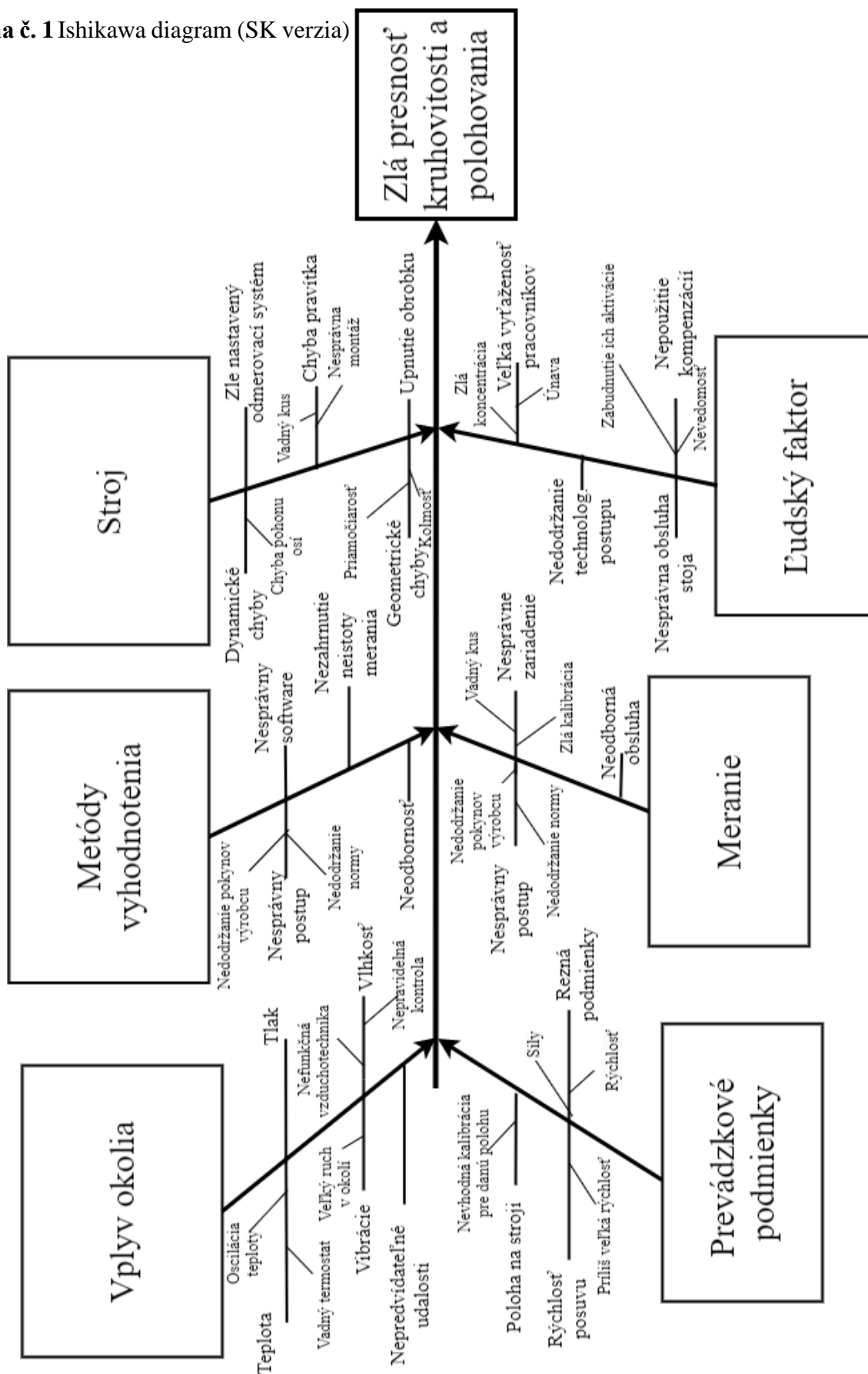
Obr. 40 Teplota okolia z kompenzátora XC – meranie 3 .....	60
Obr. 41 Priebeh rozsahu str. obojsmernej odchýlky umiestnenia pri použití nesprávnej kompenzácie vo výške Z1 .....	61
Obr. 42 Priebeh rozsahu str. obojsmernej odchýlky umiestnenia pri použití nesprávnej kompenzácie vo výške Z3 .....	61
Obr. 43 Kruhovitost' ( $\mu\text{m}$ ) – rôzne kompenzácie – meranie 3.....	62
Obr. 44 Teplota pravítok X a Y – meranie.4 .....	63
Obr. 45 Teplota okolia – meranie.4 .....	63
Obr. 46 Obrobok - meranie č.5 .....	67
Obr. 47 Upnutie obrobku "dole" a "hore" .....	68
Obr. 48 Jednoučelový merací stroj s označenými senzormi.....	68
Obr. 49 Meranie na súradnicovom meracom stroji .....	69
Obr. 50 Geometrische Fehler [10] .....	73
Obr. 51 Ishikawa-Diagramm .....	74
Obr. 52 Skizze – Messung 3 .....	80
Obr. 53 Linearskalatemperatur - Mess. 4 .....	82

## 13 ZOZNAM PRÍLOH

<b>Príloha č. 1</b> Ishikawa diagram (SK verzia) .....	92
<b>Príloha č. 2</b> Ishikawa-diagram (DE verzia) .....	93

# PRÍLOHY

Príloha č. 1 Ishikawa diagram (SK verzia)



Príloha č. 2 Ishikawa-diagram (DE verzia)

