



**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

**VLIV KONVENČNÍCH KOMPENZACÍ NA  
VOLUMETRICKOU PŘESNOST OBRÁBĚCÍHO STROJE**

IMPACT OF CONVENTIONAL COMPENSATION TO THE VOLUMETRIC ACCURACY OF THE MACHINE TOOL

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Zdeněk Žák

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

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

BRNO 2016



## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Zdeněk Žák
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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:

### Vliv konvenčních kompenzací na volumetrickou přesnost obráběcího stroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je posoudit vliv konvenčních kompenzací na výsledné volumetrické přesnosti obráběcího stroje. Posuzovány budou především ENC a CEC kompenzace na stroji MCV 754 v závislosti na okolních vlivech.

Cíle diplomové práce:

- rešerše v oblasti kompenzací na ŘS Siemens Sinumerik
- rešerše v oblasti měřicí techniky pro kompenzace tříosých obráběcích strojů
- praktická měření a ověření volumetrické přesnosti
- podrobná závěrečná zpráva z provedených měření

Seznam literatury:

WECK, Manfred, BRECHER, Christian. Werkzeugmaschinen : Konstruktion und Berechnung. 2006. überarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.

Marek, Jiří, MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů. 2006. Speciální vydání. Dostupný z WWW: . ISSN 1212-2572.

BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. 1. vyd. [s.l.] : [s.n.], 1986. 145 s. ISBN 55-600-86.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne


L. S.

---

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

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## ABSTRAKT

Diplomová práce řeší vliv konvenčních kompenzací na volumetrickou přesnost CNC obráběcího stroje. Jedná se tedy o praktickou výzkumnou práci, kde jsou v teoretickém úvodu zmíněny požadavky na obráběcí stroje, druhy chyb, které se mohou vyskytovat u tříosé kinematiky, kompenzace pro řídicí systém Siemens Sinumerik 840D sl a přístroje pomocí kterých jsou tyto kompenzace v rámci práce tvořeny a následně ověřeny. V práci je možno vidět naměřené hodnoty a grafy z jednotlivých měření, podrobnou analýzu výsledků a následné vyvození závěru z těchto výsledků.

## KLÍČOVÁ SLOVA


siemens sinumerik 840D sl, kompenzace, ENC a CEC kompenzace, chyby u tříosé kinematiky CNC strojů, požadavky na obráběcí stroje, ballbar, laserinterferometr, lasertracer, zásady zkoušek obráběcích strojů

## ABSTRACT

This thesis solves the impact of conventional compensation to the volumetric accuracy of the CNC machine. It is therefore a practical research work, where are in the theoretical introduction mentioned requirements for machine tools, the types of errors that can occur on three-axis kinematics, compensation for the control system Siemens Sinumerik 840D sl and devices by means of which are these compensation under the work formed and subsequently verified. In this work can be seen the measured values and graphs from each measurements, a detailed analysis of the results and drawing conclusions from these results.


## KEYWORDS

siemens sinumerik 840D sl, compensation, ENC and CEC compensation, errors in three-axis kinematics of CNC machine, the requirements for machine tools, ballbar, laser interferometer, lasertracer, principles of testing machine tools

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŽÁK, Z. *Vliv konvenčních kompenzací na volumetrickou přesnost obráběcího stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 135 s. Vedoucí diplomové práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D..


	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing., Dipl.-Ing Michala Holuba, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....  
Bc. Zdeněk Žák

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 8
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## PODĚKOVÁNÍ

Tato práce vznikla za podpory a na přístrojovém vybavení NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků OP VaVpl v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění MŠMT v rámci účelové podpory programu NPU I.

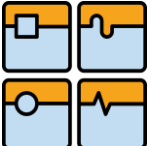
Děkuji tímto mému vedoucímu diplomové práce panu Ing., Dipl.-Ing. Michalu Holubovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a vstřícný přístup při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Markovi za poskytnutí měřicí strategie pro můj experiment a občasnou asistenci při samotném měření a v neposlední řadě bych chtěl poděkovat Ing. Janu Vetiškovi, Ph.D. za dozor při měření v nepřítomnosti vedoucího mé práce.



## OBSAH

Úvod.....	11
1 Teoretická část CNC .....	12
1.1 CNC stroje .....	12
1.1.1 Požadavky na obráběcí stroje .....	13
1.1.2 Chyby kinematiky CNC strojů.....	13
1.2 Kompenzace na CNC strojích.....	14
1.2.1 Řídicí systémy .....	14
1.2.2 Řídicí systém SIEMENS SINUMERIK 840D sl .....	15
1.2.3 Kompenzace na řídicím systému SIEMENS SINUMERIK 840D sl .....	15
1.2.4 ENC a CEC kompenzace .....	15
2 Teoretická část přístroje.....	19
2.1 Laserinterferometr XL-80 (LI).....	19
2.1.1 Možnosti měření [1].....	19
2.1.2 Technické parametry systému [1].....	21
2.1.3 Princip měření lineární vzdálenosti.....	22
2.1.4 Princip měření přímosti.....	22
2.2 Ballbar QC20-W (DBB) .....	23
2.2.1 Obsah soupravy .....	24
2.2.2 Technické parametry [1].....	25
2.2.3 Princip měření .....	25
2.3 LaserTRACER (LT).....	26
2.3.1 Příslušenství .....	27
2.3.2 Technické parametry [3].....	28
2.3.3 Princip měření .....	28
2.4 Zásady zkoušek obráběcích strojů.....	29
2.4.1 ČSN ISO 230-1 [13].....	29
2.4.2 ČSN ISO 230-2 [14].....	31
2.4.3 ČSN ISO 230-4 [15].....	33
3 Experimentální část .....	37
3.1 Stroj použitý pro měření .....	37
3.2 Plán experimentu .....	38
3.3 Postup nastavení měřících programů .....	39
3.3.1 Nastavení Laserinterferometru .....	39
3.3.2 Nastavení Ballbaru .....	41
3.3.3 Nastavení LaserTRACERu.....	43

3.4	Postup měření.....	43
3.4.1	Laserinterferometr .....	43
3.4.2	Ballbar .....	44
3.4.3	LaserTRACER.....	44
4	Experiment.....	46
4.1	Ballbar.....	46
4.2	Blok C1 .....	48
4.2.1	LaserTRACER - model FRB.....	48
4.2.2	LaserTRACER - model RRB .....	52
4.2.3	Vyhodnocení .....	56
4.3	Ballbar.....	64
4.4	Blok C2 .....	69
4.4.1	Laserinterferometr - poloha .....	69
4.4.2	LaserTRACER - model FRB.....	75
4.4.3	LaserTRACER - model RRB .....	79
4.4.4	Vyhodnocení .....	83
4.5	Blok C3 .....	91
4.5.1	Laserinterferometr - přímost.....	91
4.6	Blok C4 .....	98
4.6.1	Laserinterferometr - přímost.....	98
4.6.2	Laserinterferometr - poloha .....	103
4.6.3	LaserTRACER - model FRB.....	109
4.6.4	LaserTRACER - model RRB .....	113
4.6.5	Vyhodnocení .....	117
5	Celkové vyhodnocení.....	125
	Závěr.....	128
	Použité informační zdroje.....	130
	Seznam obrázků .....	131
	Seznam tabulek .....	134

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 11
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## ÚVOD

Práce vznikla za účelem posouzení vlivu konvenčních, především ENC a CEC, kompenzací na volumetrickou přesnost obráběcího stroje, kterým je stroj MCV 754 QUICK od firmy KOVOSVIT MAS, a.s..

Kompenzace jsou softwarové a vymezují geometrické (mechanické) nepřesnosti stroje. Kompenzací je hned několik typů, které budou v práci vyjmenovány a výše zmíněné, ENC a CEC kompenzace, i detailněji popsány. Na základě toho bude zpracována teoretická část, neboli rešerše, v oblasti kompenzací na ŘS Siemens Sinumerik. V této části budou zpracovány i požadavky na CNC obráběcí stroje, chyby kinematiky tříosého stroje (jejich grafické zobrazení a popis), stručný popis ŘS Siemens Sinumerik.

Poté bude následovat další teoretická část, ve které budou popsány měřicí přístroje potřebné pro kompenzace tříosých obráběcích strojů. Jmenovitě se bude jednat o přístroje Ballbar a Laserinterferometr od firmy Renishaw s.r.o. a přístroj LaserTRACER od firmy ETALON AG. Budou popsány jejich možnosti, principy a technické parametry. Součástí této části bude rovněž stručný výpis z norem, které se zabývají zásadami zkoušek obráběcích strojů.

V jedné z hlavních částí bude podrobně popsán experiment. Hlavně tedy použití kombinací kompenzací daných chyb přesnosti. Taktéž bude popsán stroj na kterém měření proběhne, nastavení programového vybavení potřebného pro měření, bodový popis postupu měření s použitými přístroji a v neposlední řadě soupis grafů a naměřených hodnot, získaných dle plánu experimentu. V návazné poslední, nejdůležitější části práce, bude proveden podrobný rozbor jednotlivých výsledků, ze kterého bude vyvozen závěr práce a konečné zhodnocení výsledků.



# 1 TEORETICKÁ ČÁST CNC

## 1.1 CNC STROJE

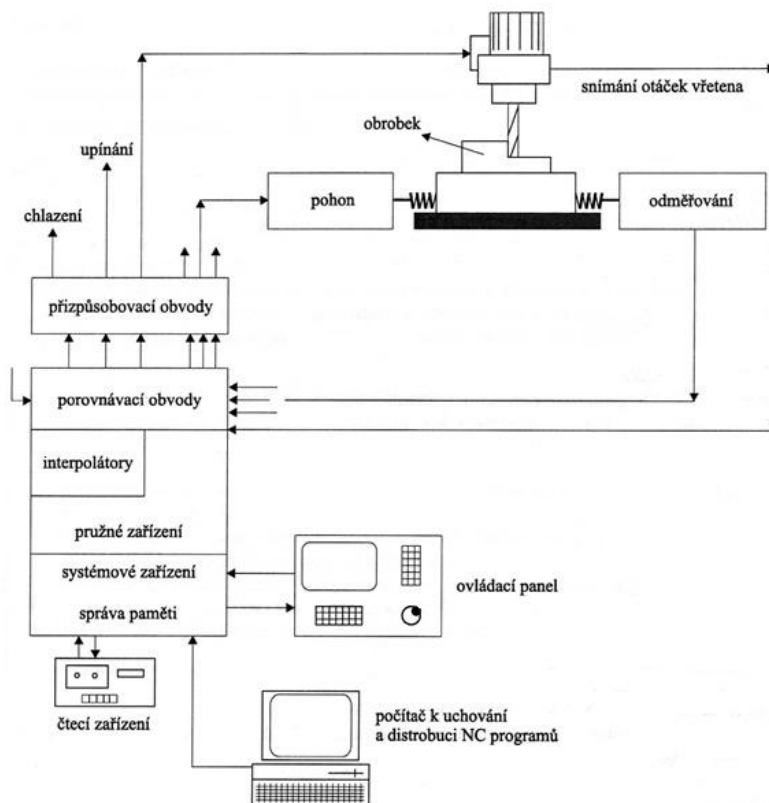
Číslicovým řízením (často označovaným anglickou zkratkou CNC - Computer Numerical Control) rozumíme v širším slova smyslu činnost číslicového počítače pro řízení pohybu nástroje nebo obrobku definovanou rychlostí po dané trajektorii v prostoru nebo rovině. Při číslicovém řízení obráběcích strojů jde konkrétně o řízení procesu obrábění i pomocných funkcí na základě číselných údajů a příkazů. [10]

Všechny informace potřebné pro obrobení součásti jsou zaznamenány ve formě řady numerických znaků. Informacemi potřebnými k obrobení určité součásti jsou [10]:

- informace určující rozměry součásti;
- informace charakterizující různé funkce (posuv, otáčky, ...);
- pomocné informace (zapínání chladicí kapaliny, ...).

CNC obráběcí stroj je tedy obráběcí stroj, který je číslicově řízen a konstrukčně uzpůsoben tak, aby pracoval v automatickém cyklu a měl automatickou výměnu nástrojů, případně obrobků. Číslicově řízené obráběcí stroje starších generací užívaly NC řídicí systémy, zatímco dnes jsou výhradně využívány CNC řídicí systémy. [10]

Stejně jako v minulosti i dnes rozumíme číslicovým řízením (NC - Numerical Control) automatické řízení obráběcího procesu prostřednictvím zařízení, které využívá k činnosti zavedená číselná data. [10]



Obrázek 1 Blokové schéma CNC obráběcího stroje [11]



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

### 1.1.1 POŽADAVKY NA OBRÁBĚCÍ STROJE

Požadavky kladené na CNC obráběcí stroje můžeme posuzovat ze dvou pohledů. Prvním je pohled výrobce, kterého zajímá především ekonomický průběh jeho tvorby. Druhým je pohled zákazníka, kterého zajímají zejména užité vlastnosti, efektivní provoz a konstrukční provedení stroje. [10]

Především [6]:

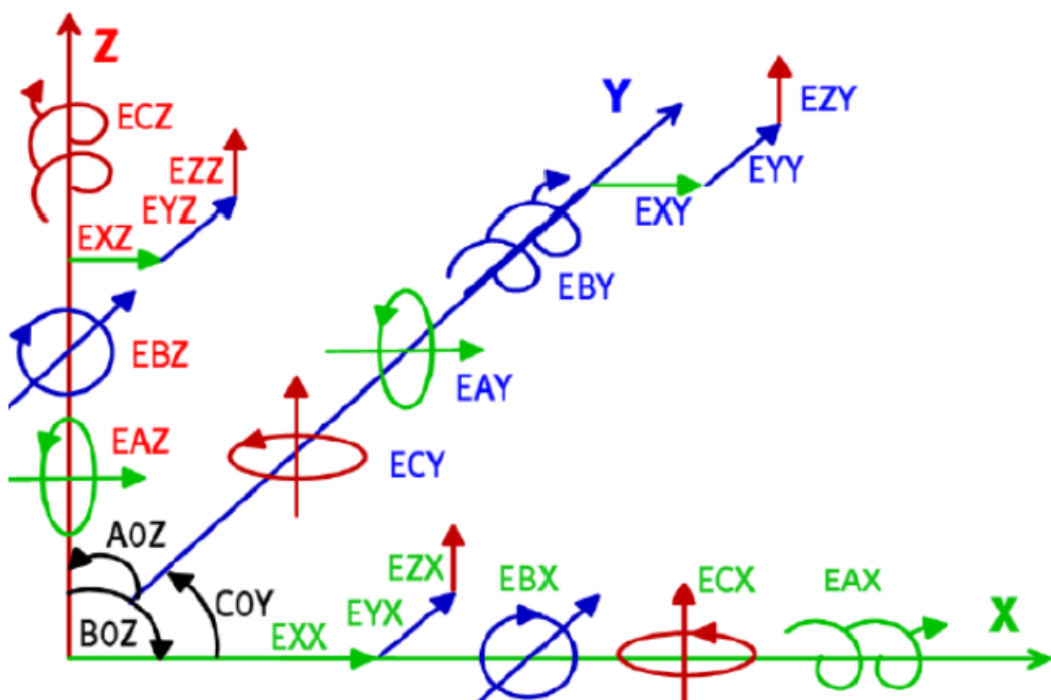
- |  |                              |
|--|------------------------------|
| – produktivita práce                                   | – jakost obrobené plochy     |
| – přesnost obrábění                                    | – spolehlivost, trvanlivost, |
| – ovladatelnost, ergonomie                             | životnost                    |
| – odvod třísek   | – opravitelnost, údržba      |
| – účinnost, energetická náročnost                      | – bezpečnost, ekologie       |
| – pořizovací cena a provozní<br>náklady => efektivnost | – váha, rozměry              |
|  | – design                     |

### 1.1.2 CHYBY KINEMATIKY CNC STROJŮ

Kinematické chyby jsou chyby způsobené geometrickou nepřesností, vyrováním a rozměry součástí stroje. Jsou stálé nebo postupem času pomalu měnící se, např. v důsledku posunu základu stroje, opotřebení nebo stárnutí materiálu. Ale také mohou tyto chyby způsobovat kolize při jeho provozu. [4]

Následující obrázek (Obrázek 2) vyobrazuje chyby, které vznikají na stroji s tříosou kinematikou. Z obrázku je možné vyčíst chyby, které jsou slovně popsány pod ním. Na tříosé kinematice je možno zjistit až 21 chyb.

Chyby se dělí na podle typu na tři druhy: chyby polohování, horizontální a vertikální chyby přímosti a úhlové chyby. [7]



Obrázek 2 Schéma odchylek tříosé kinematiky dle ISO [7]



EXX	Přesnost najetí do polohy v ose X	EXZ	Odchylka přímosti osy X ve směru Z	ECY	Natáčení (yaw) v ose Y, kolem osy Z
EYY	Přesnost najetí do polohy v ose Y	EYZ	Odchylka přímosti osy Y ve směru Z	EAZ	Klopení (pitch) v ose Z, kolem osy X
EZZ	Přesnost najetí do polohy v ose Z	EAX	Naklápění (roll) v ose X, kolem osy X	EBZ	Natáčení (yaw) v ose Z, kolem osy Y
EYX	Odchylka přímosti osy Y ve směru X	EBX	Klopení (pitch) v ose X, kolem osy Y	ECZ	Naklápění (roll) v ose Z, kolem osy Z
EZX	Odchylka přímosti osy Z ve směru X	ECX	Natáčení (yaw) v ose X, kolem osy Z	A0Z	Kolmost v rovině YZ
EXY	Odchylka přímosti osy X ve směru Y	EAY	Klopení (pitch) v ose Y, kolem osy X	B0Z	Kolmost v rovině XZ
EZY	Odchylka přímosti osy Z ve směru Y	EBY	Naklápění (roll) v ose Y, kolem osy Y	C0Y	Kolmost v rovině XY

## 1.2 KOMPENZACE NA CNC STROJÍCH

### 1.2.1 ŘÍDICÍ SYSTÉMY

Řídicí systém je nezbytnou součástí každého CNC stroje. Řídicí systémy CNC strojů umožňují zjistit stav připojených signálů z technologie a zároveň přenášejí elektrické veličiny na technologii.

Řídicí systémy jsou programovatelná zařízení, která ovládají technologický proces. Protože již od průmyslové revoluce na začátku 19. století rostly nároky na kovové výrobky, jasným důsledkem byl také nárůst požadavků na zkvalitnění řídicích systémů.

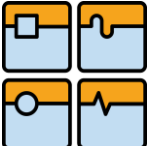
První programy na číslicově řízených NC strojích fungovaly za využití dřerného pásku nebo dřerného štítku. Byly uplatnitelné především ve velkých sériích při výrobě složitých součástí. V osmdesátých letech minulého století s postupujícím vývojem technologií byly NC stroje vybaveny počítačovou jednotkou a staly se z nich CNC stroje.

CNC řídicí systémy se v dnešní době neustále zdokonalují a žádná kovoobráběcí firma se bez nich neobejde. Oproti předchozím vývojovým fázím mají spoustu výhod:

- Jednodušší a rychlejší programování
- Možnost uchování dat pro pozdější použití
- Vyšší produktivita a nižší cena výroby
- Úspora pracovních ploch
- Úspora specializovaných pracovníků

Programy již dokážou například vypočítat potřebný čas na výrobu součástí, díky čemuž je možné dobře plánovat celou výrobu. Ta je mnohem ekonomičtější a časově méně náročná. CNC řídicí deska systémů je obvykle intuitivní a snadno ovladatelná.

[12]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 15
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

### 1.2.2 ŘÍDICÍ SYSTÉM SIEMENS SINUMERIK 840D SL

Nový řídicí systém 840D sl nabízí vysokou modularitu, otevřenost a flexibilitu. Je integrován do pohonného systému Sinamics S120. Spolu s integrovaným PLC systémem S7-300 je tento systém určen pro střední a vysoké nároky. [8]

#### Vlastnosti [8]:

- řídicí systém pro střední až komplexní úlohy
- vysoký výkon a flexibilita
- integrované bezpečnostní funkce pro člověka a stroj Safety integrated
- technologie frézování, soustružení, vrtání, broušení ...
- vysokorychlostní obrábění, obrábění forem

#### Funkce [8]:

- až 6 os s centrální jednotkou NC710.2
- až 31 os při použití NC720.2 nebo 730.2
- při větším počtu os je nutno použít rozšiřující jednotky NX10/15
- škálovatelný systém podle výkonu (HW i SW)

### 1.2.3 KOMPENZACE NA ŘÍDICÍM SYSTÉMU SIEMENS SINUMERIK 840D SL

Přesnost je zhoršena v důsledku odchylek od ideální geometrie a právě kompenzace mají za úkol tyto odchylky eliminovat nebo alespoň minimálně snížit. Na řídicím systému SIEMENS SINUMERIK 840D sl jsou možné tyto následující kompenzace:

- teplotní kompenzace
- kompenzace vůlí
  - mechanické vůle
  - dynamické vůle
- interpolační kompenzace
  - chyby vodícího šroubu a měřícího systému
  - chyby průhybu a kolmosti
- dynamická dopředná kontrola (po korekci chyby)
- kompenzace tření (kompenzace kvadrantové chyby)
  - konvenční kompenzace tření
- elektronické protizávaží

### 1.2.4 ENC A CEC KOMPENZACE

Tyto kompenzace patří mezi interpolační a vychází z anglických slovních spojení ENCODER COMPENSATION (ENC) a CROSS ERROR COMPENSATION (CEC).

#### ENC KOMPENZACE

Jedná se o osové kompenzace, tudíž zpřesnění najetí do polohy a to vymezením chyby odměřování popřípadě hnacího ústrojí.



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

```
CHANDATA (1)
$AA_ENC_COMP[0,0,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,1,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,2,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,3,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,4,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,5,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,6,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,7,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,8,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,9,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,10,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,11,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,12,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,13,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,14,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,15,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,16,AX1]=0
$AA_ENC_COMP[0,17,AX1]=0
$AA_ENC_COMP_STEP[0,AX1]=100
$AA_ENC_COMP_MIN[0,AX1]=0.002
$AA_ENC_COMP_MAX[0,AX1]=702
$AA_ENC_COMP_IS_MODULO[0,AX1]=0
```

Obrázek 3 Ukázka ENC kompenzační tabulky

## Popis:

- $\$AA\_ENC\_COMP[e,N,AXi]=A$ : základní příkaz pro zadávání hodnoty korekce
  - e: číslo tabulky
  - N: číslo bodu měření
  - AXi: název osy, kde *i* je její číselné označení v systému
  - A: hodnota korekce v  $\mu\text{m}$
- $\$AA\_ENC\_COMP\_STEP[e,AXi]=B$ : příkaz pro zadání velikosti kroku mezi jednotlivými body měření
  - e: číslo tabulky
  - AXi: název osy, kde *i* je její číselné označení v systému
  - B: hodnota velikosti kroku v mm
- $\$AA\_ENC\_COMP\_MIN[e,AXi]=C$ : příkaz pro zadání počátečního bodu
  - e: číslo tabulky
  - AXi: název osy, kde *i* je její číselné označení v systému
  - C: počáteční bod na ose v mm
- $\$AA\_ENC\_COMP\_MAX[e,AXi]=D$ : příkaz pro zadání koncového bodu
  - e: číslo tabulky
  - AXi: název osy, kde *i* je její číselné označení v systému
  - D: koncový bod na ose v mm
- $\$AA\_ENC\_COMP\_IS\_MODULO[e,AXi]=E$ : příkaz pro aktivaci modulo funkce
  - e: číslo tabulky
  - AXi: název osy, kde *i* je její číselné označení v systému



- D: může nabývat pouze hodnot 0 (deaktivováno) nebo 1 (aktivováno)

### CEC KOMPENZACE

Tyto kompenzace jsou již složitější. Zde je v závislosti jedna osa na druhé, a proto lze kompenzovat přímost, kolmost. Nicméně lze touto metodou kompenzovat i polohování a to tak, že vstupní i výstupní osa kompenzační tabulky bude stejná.

```

$AN_CEC[9,0]=0.001
$AN_CEC[9,1]=0.001
$AN_CEC[9,2]=0.002
$AN_CEC[9,3]=0.002
$AN_CEC[9,4]=0.001
$AN_CEC[9,5]=0.002
$AN_CEC[9,6]=0.001
$AN_CEC[9,7]=0
$AN_CEC[9,8]=0
$AN_CEC[9,9]=-0.001
$AN_CEC[9,10]=-0.001
$AN_CEC[9,11]=0
$AN_CEC[9,12]=-0.001
$AN_CEC[9,13]=-0.001
$AN_CEC[9,14]=0
$AN_CEC[9,15]=0.001
$AN_CEC[9,16]=0
$AN_CEC_INPUT_AXIS[9]=(AX3)
$AN_CEC_OUTPUT_AXIS[9]=(AX3)
$AN_CEC_STEP[9]=19.5
$AN_CEC_MIN[9]=-316
$AN_CEC_MAX[9]=-4
$AN_CEC_DIRECTION[9]=-1
$AN_CEC_MULT_BY_TABLE[9]=0
$AN_CEC_IS_MODULO[9]=0

```

Obrázek 4 Ukázka CEC kompenzační tabulky

Popis:

- \$AN\_CEC[e,N]=A: základní příkaz pro zadávání hodnoty korekce
  - e: číslo tabulky
  - N: číslo bodu měření
  - A: hodnota korekce v  $\mu\text{m}$
- \$AN\_CEC\_INPUT\_AXIS[e]=(AX<sub>i</sub>): příkaz pro zadání vstupní osy (řídící)
  - e: číslo tabulky
  - AX<sub>i</sub>: název osy, kde *i* je její číselné označení v systému
- \$AN\_CEC\_OUTPUT\_AXIS[e]=(AX<sub>i</sub>): příkaz pro zadání výstupní osy (řízená)
  - e: číslo tabulky
  - AX<sub>i</sub>: název osy, kde *i* je její číselné označení v systému



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

- $\$AN\_CEC\_STEP[e]=A$ : příkaz pro zadání velikosti kroku mezi jednotlivými body měření
  - e: číslo tabulky
  - A: hodnota velikosti kroku v mm
- $\$AN\_CEC\_MIN[e]=B$ : příkaz pro zadání počátečního bodu
  - e: číslo tabulky
  - B: počáteční bod na ose v mm
- $\$AN\_CEC\_MAX[e]=C$ : příkaz pro zadání koncového bodu
  - e: číslo tabulky
  - C: koncový bod na ose v mm
- $\$AN\_CEC\_DIRECTION[e]=D$ : příkaz pro zadání směru pohybu na ose
  - e: číslo tabulky
  - D: může nabývat hodnot 1 (kladný směr) a -1 (záporný směr)
- $\$AN\_CEC\_MULT\_BY\_TABLE[e]=E$ : příkaz pro násobení tabulek
  - e: číslo tabulky
  - E: číslo tabulky pro násobení
- $\$AN\_CEC\_IS\_MODULO[e]=F$ : příkaz pro aktivaci modulo funkce
  - e: číslo tabulky
  - F: může nabývat pouze hodnot 0 (deaktivováno) nebo 1 (aktivováno)



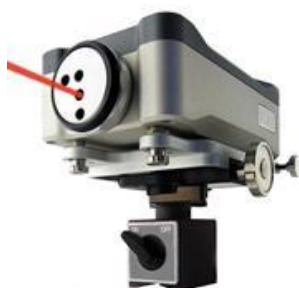
## 2 TEORETICKÁ ČÁST PŘÍSTROJE

V této kapitole popíšete přístroje, které budete využívat pro kompenzování stroje a následně pro ověření a porovnání přesností, při různých kombinacích kompenzací. Jedná se o přístroje od firmy Renishaw, Ballbar QC20-W a Laserinterferometr XL-80 a od firmy Etalon, LaserTRACER.

### 2.1 LASERINTERFEROMETR XL-80 (LI)

Laserový systém XL-80 vyzařuje paprsek o jediném velmi stálém kmitočtu a jmenovité vlnové délce  $0,633 \mu\text{m}$  ( $0,00063 \text{ mm}$ ). V závislosti na typu měření (viz. kapitola 2.1.1) paprsek projde nebo se odrazí od různých zrcátek a poté se zpět do detektoru interferometru vrací dva paprsky, jeden referenční a druhý měřicí. V tu chvíli dochází ke koherenci vln, tzn. že vlny mají stejnou frekvenci, směr kmitání i fázi (nebo fázový rozdíl). Jestliže se rozdíl v délkách dráhy nemění, detektor snímá trvalý signál někde mezi dvěma extrémními hodnotami konstruktivní a destruktivní interference. Jestliže se rozdíl v délce dráhy nemění, detektor snímá signál kolísající mezi extrémními hodnotami konstruktivní a destruktivní interference při každé změně trasy. Tyto změny (proužky) jsou spočteny a použity k výpočtu změny rozdílu mezi dvěma délkami dráhy. Naměřená délka se bude rovnat počtu proužků násobeného přibližně polovinou vlnové délky paprsku  $0,317 \mu\text{m}$  ( $0,000317 \text{ mm}$ ). Je potřeba poznamenat, že vlnová délka laserového paprsku bude záviset na indexu lomu vzduchu, kterým paprsek prochází. Protože se index lomu vzduchu bude měnit v závislosti na teplotě, tlaku a relativní vlhkosti, hodnota vlnové délky použité k výpočtu naměřených hodnot bude vyžadovat kompenzaci v důsledku změn těchto parametrů okolního prostředí. [1]

Hlavními částmi systému je Laserová jednotka XL-80 (Obrázek 5) a Kompenzátor XC-80 se snímači teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu (Obrázek 6).



Obrázek 5 Laserová jednotka XL-80 [1]



Obrázek 6 Kompenzátor XC-80 a snímače [1]

#### 2.1.1 MOŽNOSTI MĚŘENÍ [1]

##### Poloha



##### Parametry

- Rozsah lineárního měření: 0 - 80 m
- Přesnost měření (s kompenzátozem XC-80):  $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$
- Rozlišení:  $0,001 \mu\text{m}$



## Úhel

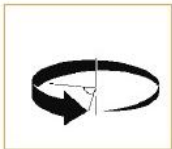


## Parametry

- Rozsah: 0 - 15 m
- Rozsah úhlového měření:  $\pm 175$  mm/m
- Přesnost:  $\pm 0,2\% * \pm 0,5 \pm 0,1M$   $\mu\text{m}/\text{m}$
- Rozlišení: 0,1  $\mu\text{m}/\text{m}$

*Kde  $M$  = měřená vzdálenost v metrech;  
% = procento z vypočteného úhlu; \* S vysoce přesnou úhlovou optikou ( $\pm 0,6\%$  se standardní optikou)*

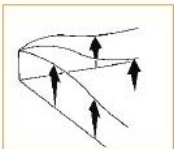
## Rotační osa



## Parametry

- Rozsah: neomezený
- Přesnost indexování (standardní):  $\pm 5$   $\mu\text{m}/\text{m}$
- Opakovatelnost: 1  $\mu\text{m}/\text{m}$
- Maximální rychlost indexovacího stolku: 30 ot/min při kroku měření méně než  $10^\circ$ , 2 ot/min při kroku měření více než  $10^\circ$

## Rovinnost



## Parametry

- Rozsah: 0 - 15 m
- Rozsah měření rovinnosti:  $\pm 1,5$  mm
- Přesnost:  $\pm 0,6\% \pm 0,02 M^2$   $\mu\text{m}$
- Rozlišení: 0,01  $\mu\text{m}$
- Rozteč patek: 50, 100 a 150 mm

*Kde  $M$  = délka diagonály v metrech;  
% = procento z vypočtené rovinnosti*

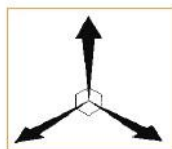
## Přímost



## Parametry

- Rozsah: krátký rozsah 0,1 - 4 m;  
dlouhý rozsah 1 - 30 m
- Rozsah měření přímosti:  $\pm 2,5$  mm
- Přesnost: krátký rozsah  $\pm 0,5\% \pm 0,5 \pm 0,15 M^2$   $\mu\text{m}$ ;  
dlouhý rozsah  $\pm 2,5\% \pm 5 \pm 0,015 M^2$   $\mu\text{m}$ ;
- Rozlišení: krátký rozsah 0,01  $\mu\text{m}$ ;  
dlouhý rozsah 0,1  $\mu\text{m}$

*Kde  $M$  = měřená vzdálenost v metrech;  
% = procento ze zobrazené hodnoty; † závisí na podmínkách prostředí*

**Kolmost****Parametry**

- Rozsah:  $\pm 3/M$  mm/m
- Přesnost: krátký rozsah  
 $\pm 0,5\% \pm 2,5 \pm 0,8 M \mu\text{m}$ ;  
dlouhý rozsah  
 $\pm 0,5\% \pm 2,5 \pm 0,08 M \mu\text{m}$ ;
- Rozlišení: 0,01  $\mu\text{m}/\text{m}$

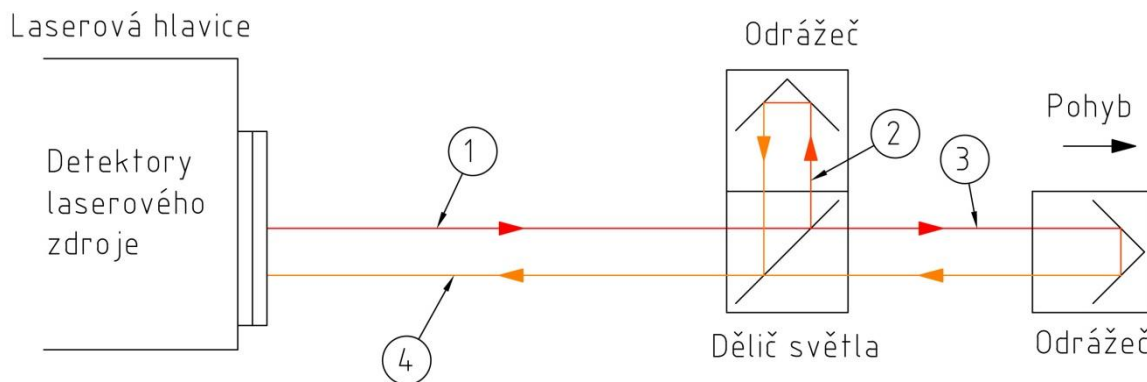
*Kde  $M$  = měřená vzdálenost na delší z měřených os v metrech; % = procento ze zobrazené hodnoty*

**2.1.2 TECHNICKÉ PARAMETRY SYSTÉMU [1]***Tabulka 1 Technické parametry systému Laser Interferometru*

Maximální rychlost snímaného pohybu	4 m/s*	
Frekvence snímání dat	10 Hz - 50 kHz**	
Doba stabilizace	< 6 minut	
Pracovní teplota	0 °C - 40 °C	
Snímače parametrů prostředí		
	Rozsah	Přesnost
Teplota materiálu	0 °C - 55 °C	$\pm 0,1$ °C
Teplota vzduchu	0 °C - 40 °C	$\pm 0,2$ °C
Tlak vzduchu	650 mbar - 1150 mbar	$\pm 1$ mbar
Relativní vlhkost	0 % - 95 % nekondenzující	$\pm 6$ %
<i>*1,6 m/s (při rozlišení obdélníkového výstupního signálu 80 nm), 0,2 m/s (při rozlišení 10 nm); ** 20 MHz v režimu výstupu obdélníkového signálu</i>		



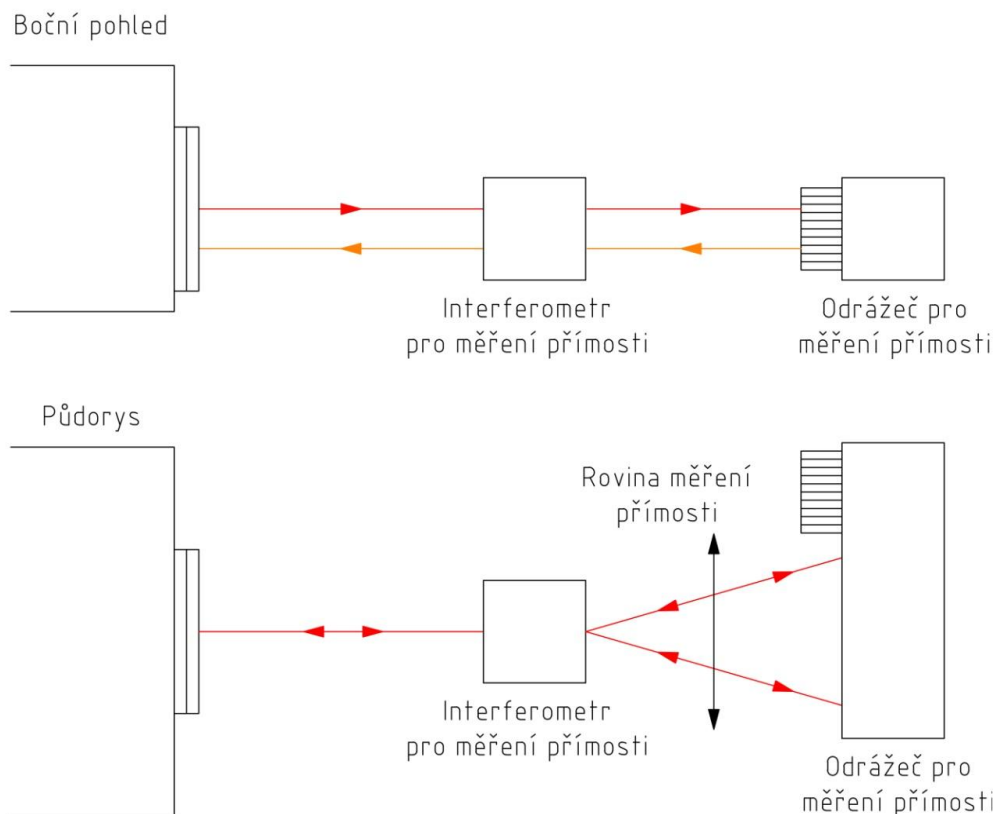
### 2.1.3 PRINCIP MĚŘENÍ LINEÁRNÍ VZDÁLENOSTI



Obrázek 7 Princip Laserinterferometru při měření lineární vzdálenosti

Jeden odrážeč je pevně přichycen k děliči světla, takže tvoří referenční rameno s pevnou délkou. Druhý odrážeč se pohybuje relativně k děliči světla a tvoří měřicí rameno s proměnnou délkou. Laserový systém XL-80 vyzařuje paprsek (1) o jediném velmi stálém kmitočtu a jmenovité vlnové délce  $0,633 \mu\text{m}$  ( $0,00063 \text{ mm}$ ). Když tento paprsek dosáhne polarizačního děliče světla, je rozdělen na dva paprsky – na odražený paprsek (2) a procházející paprsek (3). Tyto dva paprsky cestují ke svým odrážečům a následně jsou odraženy zpět přes dělič světla, takže v detektoru umístěném uvnitř laserové hlavičky vytvoří interferenční obrazec. [1]

### 2.1.4 PRINCIP MĚŘENÍ PŘÍMOSTI



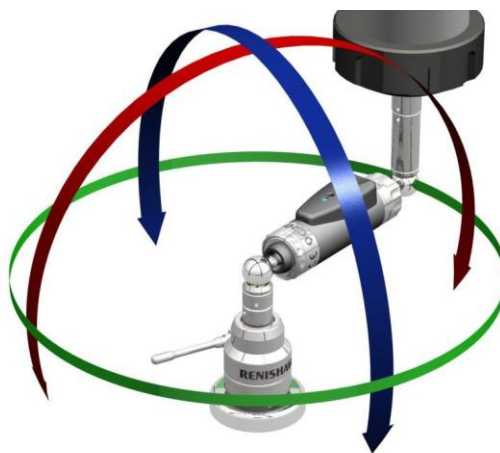
Obrázek 8 Princip Laserinterferometru při měření přímosti



Paprsek vycházející z laseru prochází interferometrem pro měření přímosti, který jej rozdělí na dva paprsky. Ty se rozbíhají pod malým úhlem a jsou nasměrovány do odražeče pro měření přímosti. Paprsky jsou poté odraženy odražečem a vracejí se po nové dráze do interferometru. V interferometru jsou tyto dva paprsky spojeny a jediný paprsek se vrací do vstupního otvoru hlavice. Laser měří přímost tím způsobem, že detekuje odchylku optické dráhy od relativního bočního vychýlení mezi interferometrem a odražečem. Měření přímosti lze provádět ve vodorovné nebo svislé rovině v závislosti na orientaci jak interferometru, tak odražeče. V rovině, ve které neprobíhá měření, optický prvek plní funkci lineárního odražeče. V rovině měření optický prvek plní funkci dvojitého zrcadla. [1]

## 2.2 BALLBAR QC20-W (DBB)

Systém ballbar QC20-W (Obrázek 9) společnosti Renishaw je složen ze samotného ballbaru (v podstatě velmi přesného teleskopického lineárního snímače a dvojice přesných kuliček na obou koncích) a z přesných magnetických držáků, z nichž jeden (nastavitelný) je připevněný ke stolu stroje a druhý k vřetenu stroje nebo tělu vřetena. Za provozu jsou kuličky snímače kinematicky vedeny v magnetických miskách. Díky tomuto uspořádání je ballbar schopen měřit i nepatrné změny poloměru naprogramované kruhové dráhy kolem držáku umístěného na stole stroje. [1]

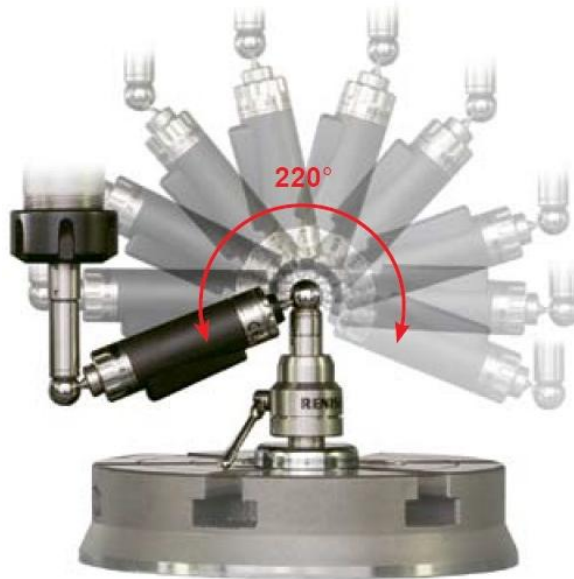


Obrázek 9 Ballbar QC20-W [2]

Běžná souprava QC20-W obsahuje sestavu 100 mm dlouhého ballbaru a prodlužovací nástavce v délkách 50, 150 a 300 mm. Po sestavení ballbaru s různými kombinacemi prodlužovacích nástavců lze provádět testy o poloměru 100, 150, 250, 300, 400, 450, 550 a 600 mm.

Kuličkové držáky nové konstrukce (včetně nového středového otočného čepu a prodlužovacího nástavce nástrojové misky) umožňují provádění testů  $220^\circ$  v rovinách procházejících osou středového otočného čepu (Obrázek 10). To znamená, že systémem ballbar můžete testovat ve třech kolmých rovinách, aniž je nutné přemístit středový upínač, což urychluje testování (jsou-li prováděny testy s poloměrem větším než 150 mm, je požadováno běžné upnutí).

Výsledky lze použít pro novou funkci přehledu volumetrické analýzy se zárukou, že všechna data byla shromážděna okolo stejného bodu. [1]



Obrázek 10 Ballbar QC20-W, rozsah měření [1]

### 2.2.1 OBSAH SOUPRAVY

Běžná souprava QC20-W (Obrázek 11) je dodávána v robustním kufříku, který obsahuje bezdrátový ballbar QC20-W, baterii, magnetický držák na vřeteno a stůl (otočné čepy), prodlužovací nástavce 50 mm, 150 mm a 300 mm pro ballbar ( lze použít různé poloměry testu) a náradí. Software Ballbar 20 a návod jsou dodány na jednom CD spolu s video průvodcem „Začínáme“, obsaženým na samostatném DVD. Součástí soupravy je i kalibrátor pro zdokonalenou analýzu testu. (Umožňuje odečít absolutních hodnot pro chyby měřítka a je vhodný k ověření, zda ballbar odečítá nominálně správně.) Plně sledovatelné kalibrační protokoly pro ballbar a kalibrátor. Souprava obsahuje také ověřovací štítky uvádějící výsledky testů provedených na strojích. [1]



Obrázek 11 Obsah soupravy Ballbar QC20-W [1]





## 2.2.2 TECHNICKÉ PARAMETRY [1]

Tabulka 2 Technické parametry Ballbaru

Rozlišení snímače	0,1 $\mu\text{m}$
Přesnost měření ballbar*	$\pm(0,7 + 0,3\% L)$ $\mu\text{m}$
Rozsah měření softwaru Ballbar	$\pm 1$ mm
Zdvih snímače	-1,25 mm až +1,75 mm
Maximální rychlost snímání	1000 Hz
Dosah přenosu dat (Bluetooth, třída 2)	zpravidla 10 m
Pracovní rozsah teplot	0 °C - 40 °C
Hmotnost systémového kufříku, včetně obsahu soupravy	3,75 kg (přibližně)

\* rovněž se označuje jako „radiální odchylka měření“, platné 15 °C – 25 °C;  
L = délka, na které je chyba měřena, tzn. specifikace při měření chyby 10  $\mu\text{m}$  na stroji  $\pm 0,73$   $\mu\text{m}$   
Specifikace při měření chyby 100  $\mu\text{m}$  na stroji  $\pm 1,00$   $\mu\text{m}$

## 2.2.3 PRINCIP MĚŘENÍ

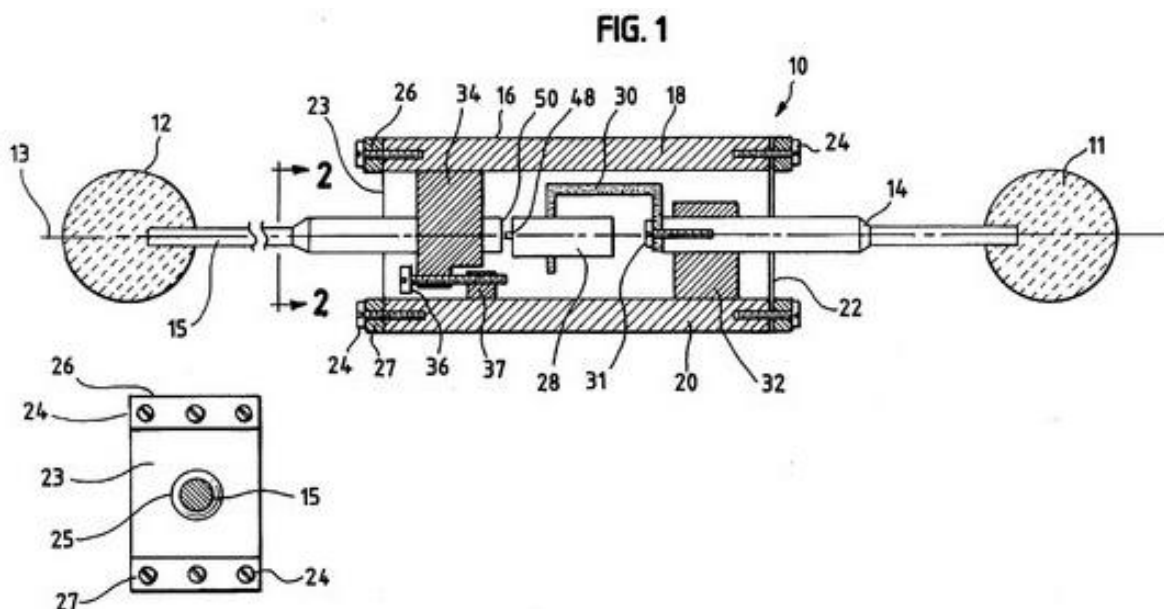


FIG. 2

Obrázek 12 Princip Ballbaru [7]

Princip Ballbaru vychází z amerického patentu US5647136 z roku 1997. Schéma principu je rozkresleno na Obrázku Obrázek 12. V podstatě se jedná o spínač (28), který je pevně spojen s jednou z osově pohyblivých tyčinek (14 a 15), které mají na jednom z jejich konců kuličku (11 a 12) s velmi přesnou kulovitostí. Spínač má daný rozsah ve kterém je schopný měřit (dle parametrů viz. kapitola 2.2.2). Aby nedošlo k poškození spínače, tak je zařízení vybaveno dorazem (36 a 37). Zjednodušeně lze



řící, že se jedná o zařízení, který funguje na principu měření lineární vzdálenosti dvou bodů, které na začátku každého měření určí kalibrace přístroje. Poté již zařízení pouze udává momentální hodnoty vzdálenosti v závislosti na stlačení nebo naopak natažení spínače.

### 2.3 LASERTRACER (LTC)

Jedná se o laserový systém, který slouží ke kalibraci obráběcích strojů a také souřadnicových měřicích strojů. LaserTRACER byl vyvinut společností ETALON AG ve spolupráci se spolkovým úřadem PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) a Národní fyzikální laboratoří (NPL) ve Velké Británii. Základním komponentem přístroje LaserTRACER je laserový interferometr s nanometrovým rozlišením, který automaticky sleduje odražeč a takto měří vzdálenost. Odražeč je umístěn ve vřetenu obráběcího stroje nebo uchycen ve snímací hlavě souřadnicového měřicího stroje. Kalibrování strojů projede dráhu navrženou příslušným softwarem. Poté je vygenerována korekční mapa a korekce jsou přímo uloženy do řídicí jednotky kalibrování obráběcího stroje. Velkým přínosem systému ETALON je možnost provádění prostorové kalibrace obráběcích strojů plně ve 3D, což se v dnešní době stává nutností. Systém toto umožňuje jako jediný na trhu, stejně jako přímé zadávání korekcí do řídicích systémů obráběcích strojů mnoha světových výrobců. Kalibrační postup je v souladu s normami ISO 230-2/4/6. Zde je potřeba zdůraznit zejména možnost provedení kruhového testu dle ISO 230-4 a kalibrace otočné osy. Standardem je kalibrace souřadnicových měřicích strojů dle ISO 10360-2. Dále je možné pracovat v souladu s normami VDI/VDE 2617 a VDI/VDE 3441. [3]

Kalibrační systém ETALON je možné dodat ve dvou provedeních. První je systém pro kalibraci menších strojů LaserTRACER-MT (Obrázek 13 a Obrázek 14) s pracovním rozsahem 0,3 m - 1 m. Druhé provedení (se kterým bude prováděno měření) s označením LaserTRACER (Obrázek 15 a Obrázek 16) disponuje větším pracovním rozsahem v rozmezí 0,2 m - 15 m s prostorovou přesností  $U(k=2) = 0,2 \mu\text{m} + 0,3 \mu\text{m}/\text{m}$ . Tento systém je tedy navržen pro kalibraci strojů s větším pracovním rozsahem. Protože je v průběhu kalibrace LaserTRACER přemísťován, je velikost kalibrování stroje v podstatě neomezena. Ke kompenzaci teplotních vlivů může být systém vybaven bezdrátovými teploměry napojenými přímo na řídicí systém LaserTRACERu. [3]



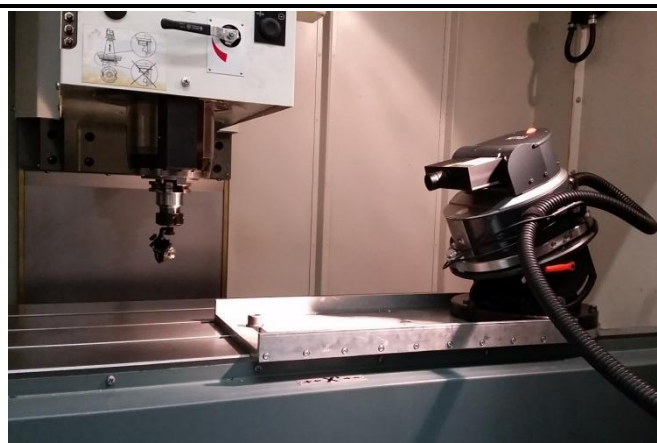
Obrázek 13 Laser TRACER - MT [4]



Obrázek 14 Laser TRACER - MT při práci [4]



Obrázek 15 Laser TRACER



Obrázek 16 Laser TRACER při práci

K dispozici je několik softwarových balíčků, které mohou být k systému dodány. Software TRAC-CAL slouží k provedení kalibrace včetně zadání korekcí přímo do řízení kalibrovaného obráběcího stroje. Po zadání potřebných informací software sám navrhne postup kalibrace, vygeneruje kalibrační mapu a zanesse korekce do řízení obráběcího stroje. Software TRAC-CHECK slouží ke zjištění aktuálního stavu kalibrovaného stroje. Umožňuje taktéž provedení kruhového testu. [3]

### 2.3.1 PŘÍSLUŠENSTVÍ

Základní příslušenství pro měření s Laser TRACERem je následující:



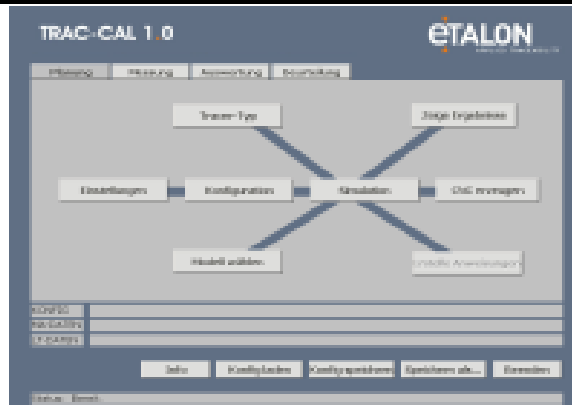
Obrázek 17 Teplotní sada TESTO



Obrázek 18 Reflektor 160°



Obrázek 19 Naklápeční stativ



Obrázek 20 Software TRAC-CAL

### 2.3.2 TECHNICKÉ PARAMETRY [3]

Tabulka 3 Technické parametry LaserTRACERu

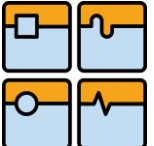
Nejistoty měření v prostoru (95%):	0,2 $\mu\text{m}$ + 0,3 $\mu\text{m}/\text{m}$
Rozlišení:	0,001 $\mu\text{m}$
Rozsah měření:	0,2 - 15 m
Úhlový rozsah osy azimutu:	-200° až 200°
Úhlový rozsah elevační osy:	-18° až 85°
Hmotnost:	12 kg
Třída laseru:	2 M

### 2.3.3 PRINCIP MĚŘENÍ

LaserTRACER je v podstatě založen na dvou principech. Prvním z nich je princip laserinterferometrie, měření lineární vzdálenosti (viz. kapitola 0) a druhým je trilaterace. Trilaterace je princip GPS, proto bude tento pojem vysvětlen pomocí principu GPS.

#### TRILATERACE

Trilaterace je způsob výpočtu polohy na principu kreslení průsečíků kružnic nebo koulí. Při znalosti vzdálenosti od jedné měřicí pozice se předpokládá, že měřený bod se nachází v místě povrchu koule. Pokud k tomu přidáme vzdálenost od druhé měřicí pozice, poloha měřeného bodu se zredukuje na kružnici, která je průnikem těchto dvou koulí. Koule, vytvořená z místa třetí měřicí pozice, vymeze pouze dvě možné polohy měřeného bodu. Jedna z nich se nachází mimo měřicí prostor stroje a pro měření je tedy nepoužitelná. Druhá poloha je zaznamenána a zpracována. Tohoto principu využívají GPS přístroje pro zaznamenání polohy na povrchu Země. [9]

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 29
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## 2.4 ZÁSADY ZKOUŠEK OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

Zásady zkoušek obráběcích strojů vychází z normy ČSN ISO 230. Tato norma je rozdělena do několika následujících částí:

- ISO 230-1 Geometrická přesnost strojů pracující bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění
- ISO 230-2 Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v osách číslíkově řízených obráběcích strojů
- ISO 230-3 Vyhodnocení tepelných vlivů
- ISO 230-4 Zkoušky kruhové interpolace u číslíkově řízených obráběcích strojů
- ISO 230-5 Stanovení emise hluku
- ISO 230-6 Určení přesnosti polohy na diagonálách tělesa a stěn
- ISO 230-7 Osa rotace – určení metod a zkoušení
- ISO 230-10 Určení měřicích vlastností snímacích systémů číslíkově řízených obráběcích strojů

Vzhledem k dalšímu postupu této práce, je při jejím zpracování využito norem ČSN ISO 230-1, ČSN ISO 230-2 a ČSN ISO 230-4, které budou v této kapitole stručně popsány. Bude se jednat pouze o základní informace, nikoliv o jejich přepis.

### 2.4.1 ČSN ISO 230-1 [13]

Jedná se o základní normu pro vyhodnocování geometrické přesnosti strojů.

Z této normy budou použity především podmínky a přípravné činnosti, které musí být před samotnou zkouškou dodrženy.

#### USTAVENÍ STROJE PŘED ZKOUŠKOU

Před započítím zkoušky obráběcího stroje je nutno stroj upevnit na vhodný základ a vyrovnat jej do vodorovné polohy podle návodu výrobce.

Cílem vyrovnání do vodorovné polohy je získat staticky stabilní polohu stroje, která usnadní následná měření, zejména měření vztahující se k přímosti některých částí.

#### STAV STROJE PŘED ZKOUŠKOU

Zkoušky se zásadně provádějí na kompletně dokončeném stroji, demontáž některých částí může být provedena jen ve výjimečných případech v souladu s instrukcemi výrobce (např. demontáž stolu, aby bylo možno měřit vodící plochy).

#### TEPLOTNÍ STAV NĚKTERÝCH ČÁSTÍ PŘED ZKOUŠKOU

Záměrem je měřit přesnost stroje za podmínek pokud možno velmi blízkých jeho normálním pracovním podmínkám pokud jde o mazání a ohřátí. V průběhu geometrických a praktických zkoušek musí být části, jako je vřeteno, které se snadno zahřívají a v důsledku toho mění polohu nebo tvar, zahřáty na správnou teplotu při běhu stroje naprázdno v souladu s podmínkami používání a instrukcemi výrobce.

Zvláštní podmínky mohou být uplatněny u strojů vysoké přesnosti a u některých číslíkově řízených strojů, u kterých změny teploty výrazně ovlivňují přesnost.



Je nutno uvažovat, nakolik se mění rozměry stroje v průběhu normálního pracovního cyklu při změně z teploty prostředí na pracovní teplotu. Přípravný postup ohřívání stroje a teplota prostředí, při které má být stroj zkoušen, mají být dohodnuty mezi výrobcem a uživatelem.

Hlavními oblastmi, kde tepelné deformace mohou způsobovat potíže, jsou:

- a) deformace konstrukce stroje (včetně vřetena), zejména v hlavních osových rovinách;
- b) pohony posuvů a systémy nastavování polohy se zpětnou vazbou, které jsou důležité v případě, že přesnost nastavení polohy závisí na vodícím šroubu.

### ČINNOST A ZATÍŽENÍ

Geometrické zkoušky musí být prováděny buď na stroji v klidu nebo při jeho chodu naprázdno. Určí-li výrobce, např. u těžkých výkonných strojů, musí být stroj zatížen jedním nebo více zkušebními obrobky.

### GEOMETRICKÉ ZKOUŠKY

Geometrické zkoušky, týkající se přímosti, jsou tyto:

- přímost čáry v rovině nebo prostoru
- přímost součásti
- přímost pohybu

Více bude rozebrána přímost čáry v rovině nebo prostoru.

### PŘÍMOST ČÁRY V ROVINĚ (OBRÁZEK 21)

Čára ležící v rovině je považována za přímou v určené délce, pokud všechny její body leží mezi dvěma přímkami, rovnoběžnými s hlavním směrem čáry, jejichž vzdálenost je rovna toleranci.

Hlavní směr čáry, respektive reprezentativní přímka, musí být určen tak, aby byla minimalizována úchylná přímost. Může však být určena následujícími běžnými metodami:

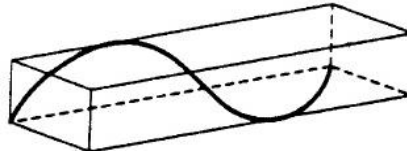
- buď dvěma body vhodně zvolenými blízko konců měřené čáry (ve většině případů části čáry těsně u konců nelze brát v úvahu, neboť velmi často obsahují malé nezávažné místní vady)
- nebo výpočtem ze zaznamenaných bodů (např. metodou nejmenších čtverců)



Obrázek 21 Přímost čáry v rovině [13]

**PŘÍMOST ČÁRY V PROSTORU (OBRÁZEK 22)**

Čára ležící v prostoru je považována za přímou v určené délce, pokud každý z jejich průmětů do dvou určených, vzájemně kolmých rovin, rovnoběžných s hlavním směrem čáry, je přímý.



Obrázek 22 Přímost čáry v prostoru [13]

**2.4.2 ČSN ISO 230-2 [14]**

Jedná se o normu udávající podmínky a postup vyhodnocení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v ose stroje.

**ZKUŠEBNÍ PODMÍNKY****PROSTŘEDÍ**

Doporučuje se, aby dodavatel/výrobce předložil pokyn týkající se charakteru teplotního prostředí, které je pro splnění specifikované přesnosti stroje akceptovatelné.

Ideálně se všechna měření rozměrů provádějí za podmínek, kdy jak měřicí přístroje, tak měřený subjekt jsou umístěny v prostředí s teplotou 20°C. Jsou-li měření prováděna při jiných teplotách než 20°C, je nutné pro opravu výsledků na teplotu 20°C použít korekci jmenovitého diferenciálního tepelného roztažení mezi systémem nastavování polohy v ose a měřicím zařízením. To vyžaduje měření teploty reprezentativního části systému nastavování polohy stroje a teploty reprezentativní části měřicího zařízení.

Je však nutno upozornit na to, že jakýkoliv rozdíl teploty od 20°C může způsobit další nejistotu související s nejistotou skutečného koeficientu (skutečných koeficientů) roztažnosti použitého (použitých) pro kompensaci.

Stroj a, je-li to důležité, měřicí přístroje musí být ve zkušebním prostředí dostatečně dlouho (přednostně přes noc), aby před měřením dosáhly tepelně stabilních podmínek. Stroj a měřicí přístroje musí být chráněny před průvanem a vnějším zářením, jako jsou např. sluneční paprsky, tepelné zářiče atd..

**ZKOUŠENÝ STROJ**

Stroj musí být kompletně smontován a plně funkční. Před začátkem měření přesnosti a opakovatelnosti musí být uspokojivě dokončeno nutné vyrovnání stroje na základě a geometrické zkoušky.

Jsou-li při zkušebním cyklu použity vestavěné kompenzační programy, musí to být ve zkušebním protokolu uvedeno.

Všechna měření musí být provedena na nezatíženém stroji, to znamená bez obrobku.

**OHŘÁTÍ**

Aby byl stroj měřen za normálních pracovních podmínek, musí měření předcházet vhodný ohřívací postup.

Nejsou-li žádné takové podmínky určeny, musí být připravené pohyby omezeny pouze na takové, které jsou nutné pro seřízení měřicího zařízení.

Nestabilní teplotní podmínky se projeví jako řízený nárůst úchylek mezi následnými najetími do určité zadané polohy. Tyto trendy by měly být ohřátím stroje minimalizovány.

**DEFINICE A ZNAČKY**

Z normy nebudou uváděny všechny definice a značky, ale pouze ty, které jsou důležité. Nejdůležitější jsou především: Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze, Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose a Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose. Nicméně, pro výpočet těchto parametrů je nutné uvést i následující: Zadaná poloha, Průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze, Průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze, Necitlivost v poloze, odhad jednostranné standardní nejistoty nastavení polohy v poloze a Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze.

**Zadaná poloha**

$P_i$  ( $i=1$  až  $m$ ): poloha, do které je programován pohyb nastavované části. Index  $i$  udává jednu určitou polohu ze všech zadaných poloh v dané ose.

**Průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze**

$\bar{x}_i \uparrow$  nebo  $\bar{x}_i \downarrow$  : aritmetický průměr polohových úchylek, zjištěných při sérii  $n$  najetí do polohy  $P_i$  v jednom smyslu.

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \quad \text{a} \quad x_{ij} \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow$$

**Průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze**

$\bar{x}_i$  : aritmetický průměr průměrných jednostranných polohových úchylek,  $\bar{x}_i \uparrow$  a  $\bar{x}_i \downarrow$ , zjištěných při najíždění do polohy  $P_i$  v obou směslech.

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2}$$

**Necitlivost v poloze**

$B_i$ : rozdíl mezi průměrnými jednostrannými polohovými úchylkami, zjištěnými při najíždění do polohy  $P_i$  v obou směslech.

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow$$



**Odhad jednostranné standardní nejistoty nastavení polohy v poloze**

$s_i \uparrow$  nebo  $s_i \downarrow$  : odhad standardní nejistoty polohových úchylek zjištěných při sérii  $n$  najetí do polohy  $P_i$  v jednom smyslu.

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2} \quad \text{a} \quad s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2}$$

**Jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze**

$R_i \uparrow$  nebo  $R_i \downarrow$  : rozsah odvozený z rozšířené nejistoty jednostranných polohových úchylek v poloze při použití koeficientu rozšíření 2.

$$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow \quad \text{a} \quad R_i \downarrow = 4s_i \downarrow$$

**Dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze**

$$R_i = \text{největší z hodnot} [2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow]$$

**Dvoustranná systematická polohová úchylka v ose**

$E$ : rozdíl mezi největší a nejmenší algebraickou hodnotou průměrných jednostranných polohových úchylek při nastavování polohy v obou směrech  $\bar{x}_i \uparrow$  a  $\bar{x}_i \downarrow$ , které byly zjištěny v kterékoliv poloze v dané ose.

$$E = \max[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow]$$

**Dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose**

$A$ : rozsah odvozený ze spojení dvoustranných systematických úchylek a odhadu standardní nejistoty při dvoustranném nastavování polohy při použití koeficientu rozšíření 2.

$$A = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow]$$

**2.4.3 ČSN ISO 230-4 [15]**

Jedná se o normu upravující zkoušení kruhové interpolace u strojů.

**PODMÍNKY ZKOUŠEK****Zkušební prostředí**

Pokud je možné řídit teplotu prostředí, musí být nastavena na 20°C. Jinak musí být výstup měřicího přístroje a jmenovité odečítání stroje nastaveny tak, aby dávaly výsledky opravené na 20°C (jen pro měření radiální odchylky).

**Zkoušený stroj**

Stroj musí být kompletně smontován a plně funkční. Všechny nezbytné vyrovnání stroje a funkční zkoušky musí být dokončeny před započítáním zkoušek.



Všechny zkoušky kruhové interpolace musí být provedeny při nezatíženém stroji, tj. bez obrobku.

### Ohřátí stroje

Zkouškám musí předcházet vhodný ohřívací postup stroje specifikovaný výrobcem stroje a/nebo dohodnutý mezi dodavatelem/výrobcem a uživatelem.

Pokud nejsou specifikovány žádné podmínky, musí být pohyby přecházející zkoušce omezeny pouze na pohyby nutné pro seřízení měřicího přístroje.

### Parametry zkoušky

- a) průměr (nebo poloměr) jmenovité dráhy;
- b) rychlost výsledného posuvu;
- c) smysl pohybu - ve směru nebo proti směru pohybu (hodinových ručiček);
- d) souřadné osy, ve kterých je vykonáván pohyb pro docílení skutečné dráhy;
- e) umístění měřicího přístroje v pracovním prostoru obráběcího stroje;
- f) teplota (teplota prostředí, teplota měřicího přístroje, teplota stroje) a součinitel roztažnosti (obráběcího stroje, měřicího přístroje) použítá pouze pro kompenzaci měření průměrné dvousměrné radiální odchylky  $D$  a radiální odchylky  $F$ ;
- g) způsob sběru dat (rozsah dráhy, pokud je jiný než  $360^\circ$ , počáteční a konečný bod skutečného pohybu, počet měřicích bodů v případě číslcového sběru dat a zdali byl použit proces filtrace dat či ne);
- h) jakýkoliv způsob kompenzace použitý v průběhu zkušebního cyklu;
- i) poloha saní nebo pohyblivých částí v osách, které nejsou zkoušeny.

### Kalibrace měřicího přístroje

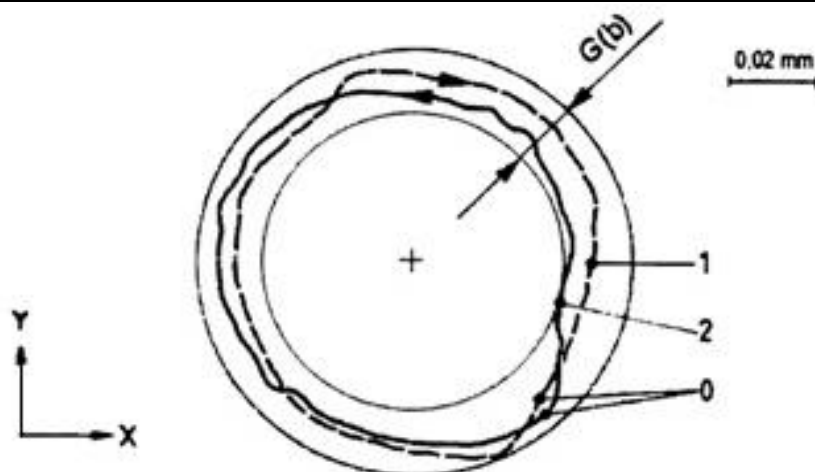
Pro kontrolu průměrné dvousměrné radiální odchylky  $D$  a radiální odchylka  $F$  musí být znám referenční rozměr zkušebního přístroje.

### TERMÍNY A DEFINICE

#### Dvousměrná odchylka kruhovitosti $G(b)$ (Obrázek 23)

Minimální radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic (kružnice minimální zóny) ohraničující dvě skutečné dráhy, kde jedna dráha je tvořena pohybem ve směru hodinových ručiček a druhá dráha pohybem proti směru hodinových ručiček.

Poznámka: Dvousměrná odchylka kruhovitosti  $G(b)$  je vyhodnocena jako maximální radiální rozsah odchylky kolem středu kružnice vytvořené ze dvou skutečných drah metodou nejmenších čtverců. Kružnice vytvořená ze dvou skutečných drah metodou nejmenších čtverců je vypočtena ze dvou drah, tj. ve směru a protisměru hodinových ručiček.

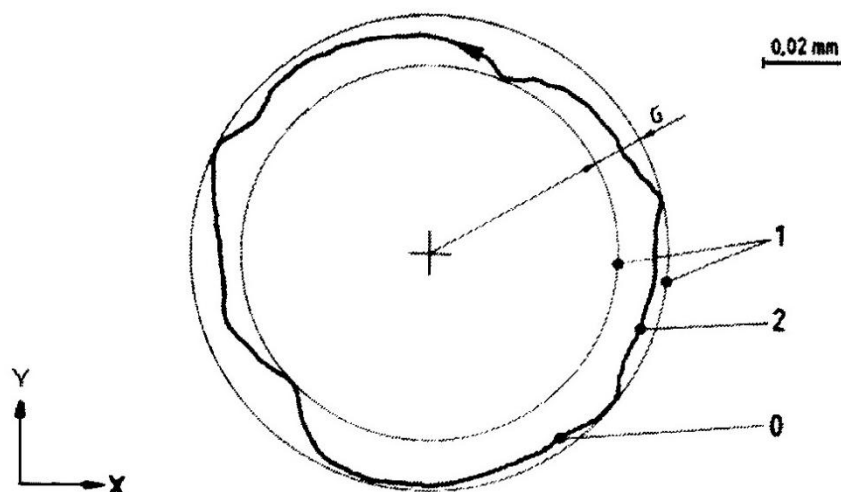
Obrázek 23 Vyhodnocení dvousměrné odchyly kruhovitosti  $G(b)$  [15]**Legenda:**

- + střed kružnice vytvořené metodou nejmenších čtverců ze dvou skutečných drah
- 0 počáteční bod
- 1 skutečná dráha, ve směru pohybu hodinových ručiček
- 2 skutečná dráha, proti směru pohybu hodinových ručiček

dvousměrná odchylna kruhovitosti  $G(b)_{XY} = 0,015 \text{ mm}$

**Odchylna kruhovitosti G (Obrázek 24)**

Minimální radiální vzdálenost dvou soustředných kružnic (kružnice minimální zóny) ohraničující skutečnou dráhu ve směru nebo proti směru pohybu hodinových ručiček vrstevnicové dráhy a která může být vyhodnocena jako maximální radiální rozsah okolo kružnice vytvořené metodou nejmenších čtverců.



Obrázek 24 Vyhodnocení odchyly kruhovitosti G [15]

**Legenda:**

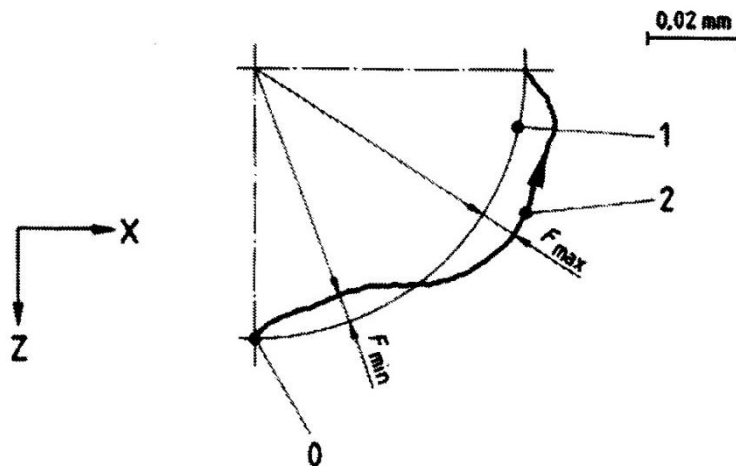
- + střed kružnice vytvořené metodou nejmenších čtverců ze dvou skutečných drah
- 0 počáteční bod
- 1 kružnice minimální zóny
- 2 skutečná dráha

odchylka kruhovitosti  $G_{XY} = 0,012 \text{ mm}$

**Radiální odchylka F (Obrázek 25)**

odchylka mezi skutečnou dráhou a jmenovitou dráhou, přičemž střed jmenovité dráhy se zjistí:

- buď ze středění měřicích přístrojů na obráběcím stroji, nebo
- nebo ze středící analýzy nejmenších čtverců, pouze pro celou kružnici



Obrázek 25 Vyhodnocení radiální odchylky F 130[15]

**Průměrná dvousměrná radiální odchylka D**

Odchylka mezi poloměrem jmenovité dráhy a poloměrem kružnice vytvořené metodou nejmenších čtverců dvou úplných kružnic skutečných drah, kde jedna dráha je provedena pohybem ve směru hodinových ručiček a druhá pohybem proti směru hodinových ručiček



### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 STROJ POUŽITÝ PRO MĚŘENÍ

Jako zařízení pro posuzování kompenzací byl použit stroj MCV 754 QUICK (Obrázek 26) od firmy KOVOSVIT MAS. Jedná se o tříosý vertikální frézovací centrum. Na stroji je nainstalován řídicí systém SIEMENS SINUMERIK 840D sl. Na všech osách je použito lineární a valivé vedení s přímým odměřováním. [5]



Obrázek 26 Vertikální frézovací centrum MCV 754 QUICK [5]

#### TECHNICKÉ PARAMETRY [5]

Tabulka 4 Technické parametry stroje měřeného v experimentu

Rozsah osy X/Y/Z:	754/500/550 mm
Max. plocha stolu:	1000 x 500 mm
Max. zatížení stolu:	400 kg
Max. otáčky vřetene:	10 000 min <sup>-1</sup>
Řídicí systém:	SIEMENS Sinumerik 840D SL



### 3.2 PLÁN EXPERIMENTU

Experiment je rozdělen do čtyř bloků (C1 - C4), viz. Obrázek 27. Pro správnou orientaci v něm a vysvětlení zkratk bude v této části kapitoly každý blok podrobně popsán.

Úplně na začátku je třeba říci, že experiment začíná na stroji, na kterém jsou vypnuty všechny kompenzace. Kompenzace polohy (ENC 0), kompenzace průhybové (CEC 0) a volumetrické kompenzace (VCS 0). Tento stav byl měřen Ballbarem (DBB 1), aby bylo možné následně porovnávat zlepšení nebo případné zhoršení stavu stroje.

Blok C1 je tvořen kalibrací pouze pomocí LaserTRACERu. Toto měření se sestává ze dvou modelů. Model FRB (Full Rigid Body) a model RRB (Reduced Rigid Body). U obou modelů vždy proběhlo nejprve kalibrační měření, ze kterých byly vytvořeny tabulky volumetrické kompenzace (pro FRB to bude tabulka VCS 18\_1 a pro RRB tabulka VCS 19\_1) a následně byly ověřeny verifikačním měřením pomocí LaserTRACERu. Tabulka VCS 18\_1 byla ještě následně proměřena Ballbarem (DBB 2) a tabulka VCS 19\_1 také (DBB 3).

Po naměření bloku C1, kde byly tvořeny volumetrické kompenzace (VCS), byly opět vypnuty (VCS 0) a stroj byl uveden do původního stavu. Vzhledem k časovému rozestupu byl tento stav opět naměřen pomocí Ballbaru (DBB 4), aby byla předvedena časová stálost stavu stroje.

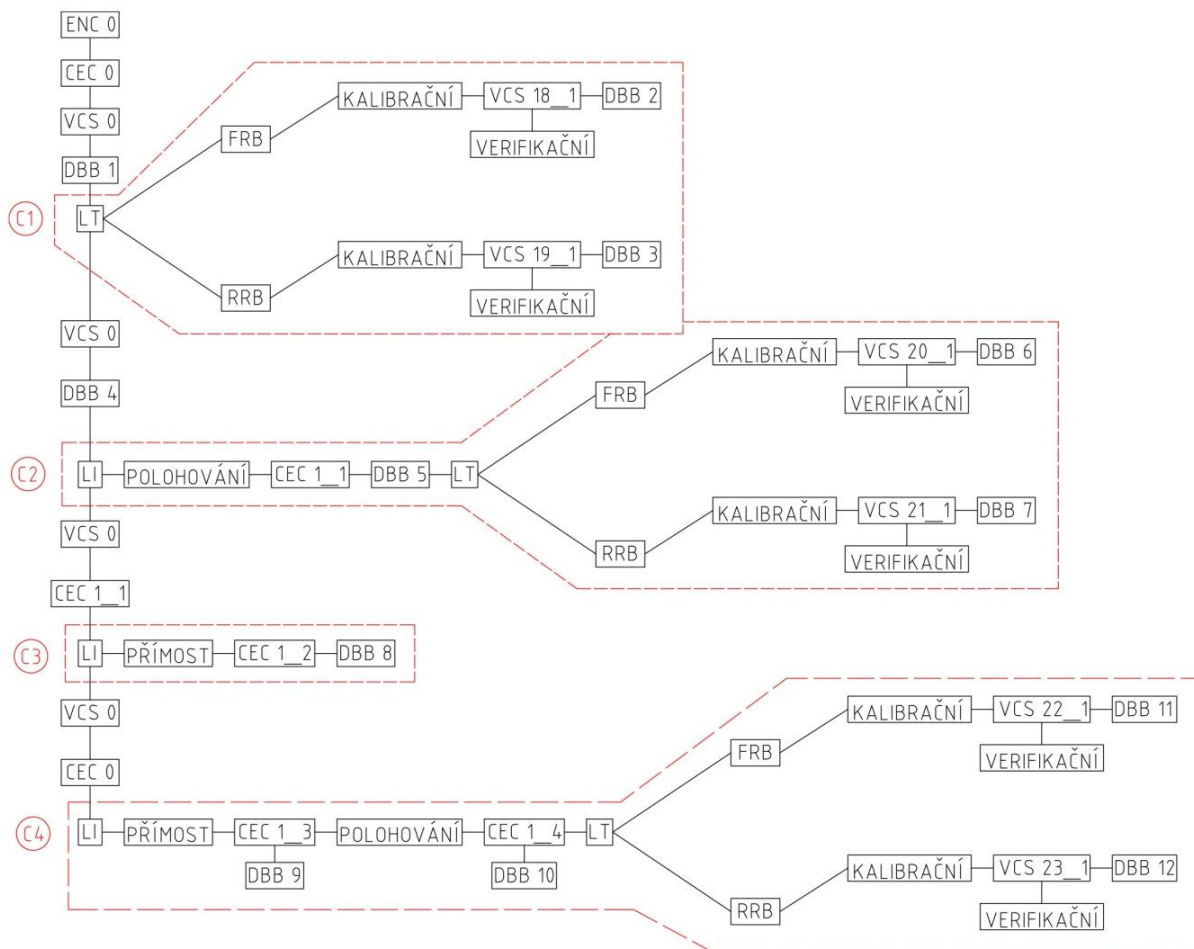
V bloku C2, který začíná na stroji s vypnutými kompenzacemi (CEC 0 a VCS 0). Nejprve proběhlo kalibrační měření polohy v ose pomocí Laserinterferometru, ze kterého byly vytvořeny kompenzační tabulky (CEC 1\_1), které byly následně ověřeny verifikačním měřením. To se zopakovalo pro všechny tři osy. Tento stav byl ještě navíc změřen i Ballbarem (DBB 5). Po zavedení kompenzací polohy, byl stroj měřen LaserTRACERem. Opět jako v bloku 1, byly měřeny dva modely (FRB i RRB) a to jak kalibrační tak i verifikační měření. Z modelu FRB vznikla kompenzační tabulka VCS 20\_1, která byla ověřena Ballbarem (DBB 6) a z modelu RRB tabulka VCS 21\_1, která byla ověřena Ballbarem (DBB 7).

Po naměření bloku C2, byly vypnuty volumetrické kompenzace (VCS 0) a zůstala zapnutá jen tabulka polohové kompenzace CEC 1\_1 (tento typ kompenzace je standardní pro tabulku ENC, nicméně při nastavení totožné osy vstupní (řídící) i výstupní (řízené), lze použít i tabulku CEC). Na tuto kompenzaci byl aplikován blok C3, ve kterém proběhlo měření přímosti pomocí Laserinterferometru. Opět měření kalibrační, ze kterého vznikla kompenzační tabulka CEC 1\_2 a pak i verifikační, aby byla ověřena správnost zavedení tabulky. Celé toto měření bylo znovu proměřeno i Ballbarem (DBB 8).

Po bloku C3 byly znovu vypnuty všechny kompenzace (CEC 0 a VCS 0). Nyní byla naměřena přímost pomocí Laserinterferometru (pouze kalibrační měření) a vytvořena kompenzační tabulka CEC 1\_3, která byla následně naměřena pomocí Ballbaru (DBB 9). Na kompenzační tabulku přímosti (CEC 1\_3) bylo aplikováno měření polohy pomocí Laserinterferometru, zde bylo měření jak kalibrační tak verifikační. Z kalibračního měření vznikla kompenzační tabulka CEC 1\_4, která byla následně ověřena Laserinterferometrem a opět naměřena Ballbarem (DBB 10). V závěru



tohoto bloku bylo opět provedeno měření pomocí LaserTRACERu, tak jako v bloku C1 a C2. Z modelu FRB vznikla tabulka VCS 22\_1, která byla ověřena verifikačním měřením a Ballbarem (DBB 11) a z RRB vznikla tabulka VCS 23\_1, která byla taktéž ověřena verifikačním měřením a Ballbarem (DBB 12).



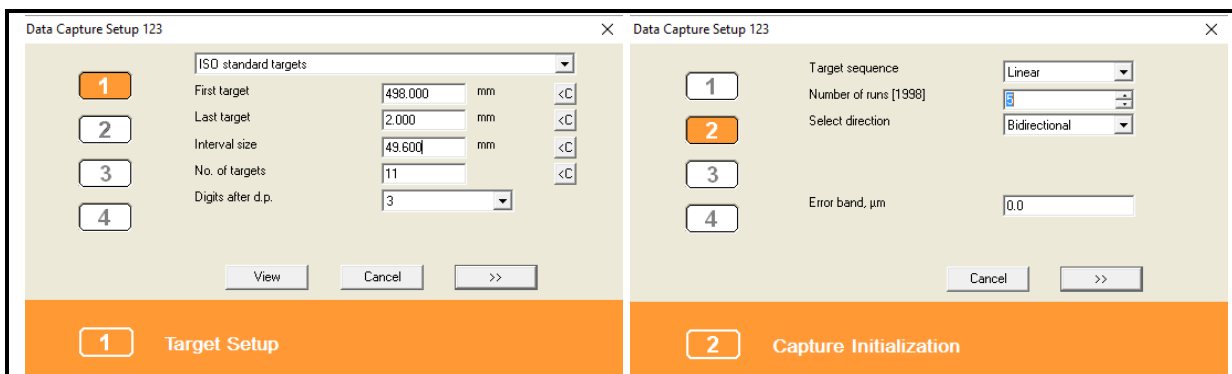
Obrázek 27 Plán experimentu

### 3.3 POSTUP NASTAVENÍ MĚŘÍCÍCH PROGRAMŮ

#### 3.3.1 NASTAVENÍ LASERINTERFEROMETRU

Po zapnutí programu Renishaw LaserXL naskočí obrazovka (Obrázek 28). V prvním kroku je nutné vybrat rozsah měření, který se nastavuje Počátečním bodem měření (First target) a Koncovým bodem měření (Last target). Pak je nutné vybrat buď interval mezi jednotlivými body měření (Interval size) nebo počtem bodů ve kterých se bude měřit (No. of targets).

Po stisknutí tlačítka ">>" naskočí obrazovka (Obrázek 29), kde je nutné nastavit typ měření (Target sequence), počet běhů měření (Number of runs (1998)) a vybrat směr měření (Select direction). Lze měřit buď jednostranně nebo dvoustranně.

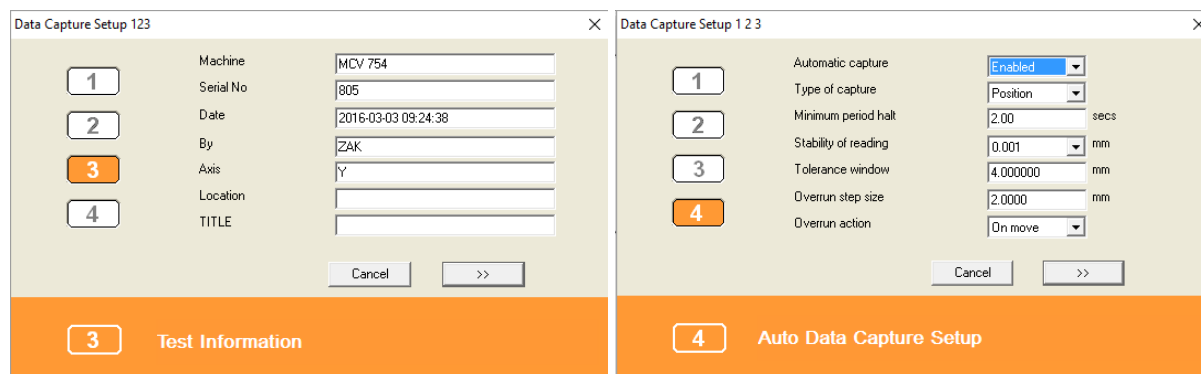


Obrázek 28 Nastavení programu pro Laserinterferometr 1

Obrázek 29 Nastavení programu pro Laserinterferometr 2

Po stisknutí tlačítka ">>" naskočí obrazovka (Obrázek 30), zde se nastavují informace o stroji. Pro lepší orientaci je žádoucí tuto tabulku vyplnit co nejvíce.

Po stisknutí tlačítka ">>" naskočí obrazovka (Obrázek 31), kde se nastavuje, aby program zapisoval hodnoty sám. Automatický zápis (Automatic capture) musí být nastavený jako "Enabled", dále se zvolí typ zápisu (Type of capture) jako Pozice (position), minimální čas pro zápis (Minimum period halt), stabilita čtení hodnot (Stability of reading), toleranční okno pro zápis dané hodnoty (Tolerance window), přeběh v koncových bodech (Overrun step size).



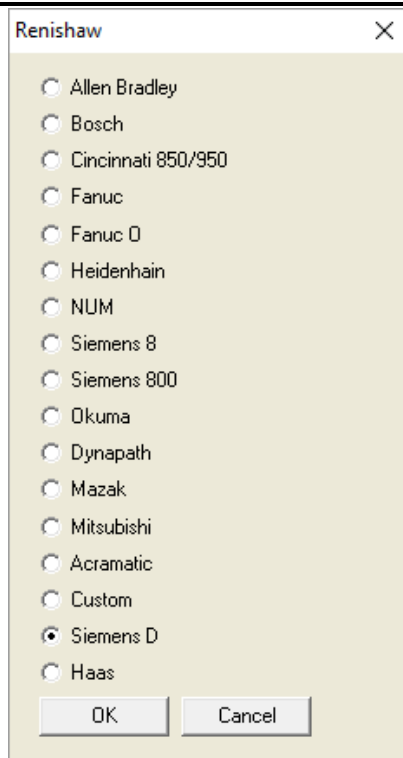
Obrázek 30 Nastavení programu pro Laserinterferometr 3

Obrázek 31 Nastavení programu pro Laserinterferometr 4

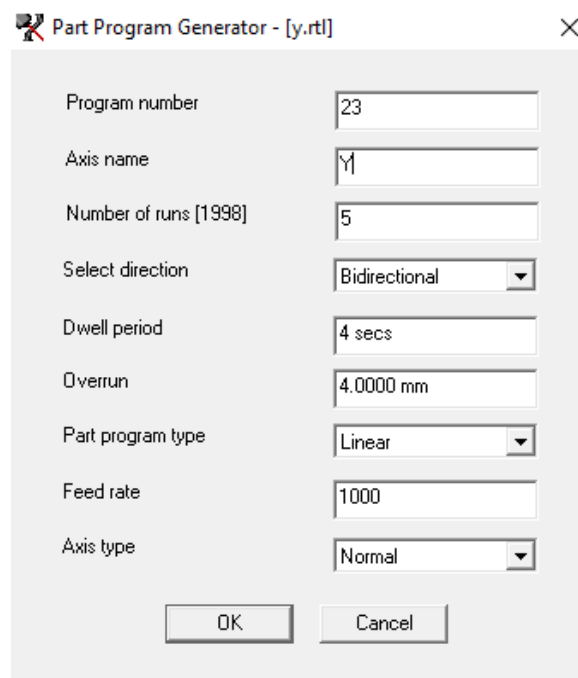
Nyní už je potřeba jen nastavit a vygenerovat NC program. Nejprve je nutné vybrat typ řídicího systému stroje. V našem případě Siemens D, tak jako je na obrázku Obrázek 32.

Nyní je již nutné nastavit parametry programu (Obrázek 33). Název osy (Axis name), počet běhů (Number of runs (1998)) se musí shodovat s předchozím nastavením a taktéž i volba směru (Select direction). Po tomto nastavení se již vygeneruje program, který lze nahrát do stroje a spustit. Toto nastavení se zopakuje postupně pro všechny tři měřené osy.





Obrázek 32 Nastavení programu pro Laserinterferometr 5



Obrázek 33 Nastavení programu pro Laserinterferometr 6

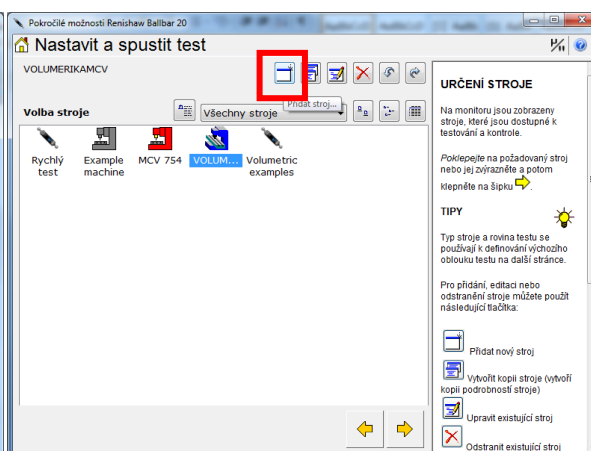
### 3.3.2 NASTAVENÍ BALLBARU

Na obrázku Obrázek 34 je úvodní strana programu pro systém Ballbar. Pro nastavení je třeba zvolit volbu 1 Nastavit a spustit test.

Po předchozí volbě se okno přepne na následující (Obrázek 35). Zde je nutné pro lepší řazení a rozlišení vložit nový stroj. Vložení proběhne po kliknutí na ikonu "Přidat stroj", která je na obrázku zvýrazněná červeným rámečkem.



Obrázek 34 Nastavení programu pro Ballbar 1

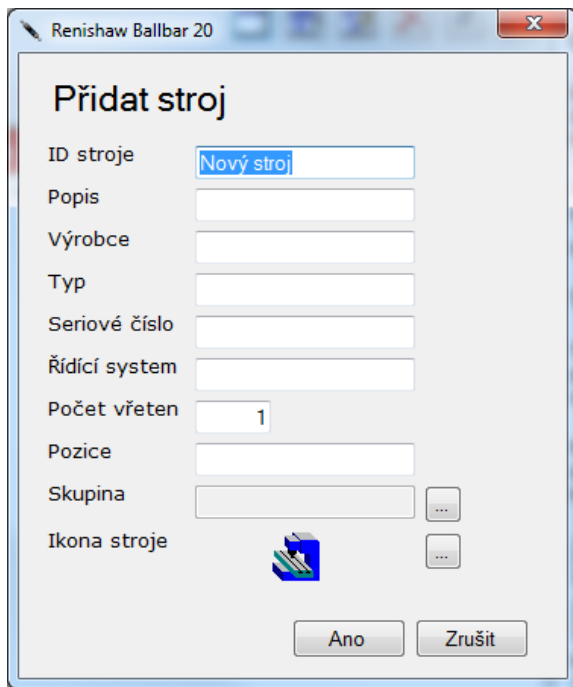


Obrázek 35 Nastavení programu pro Ballbar 2

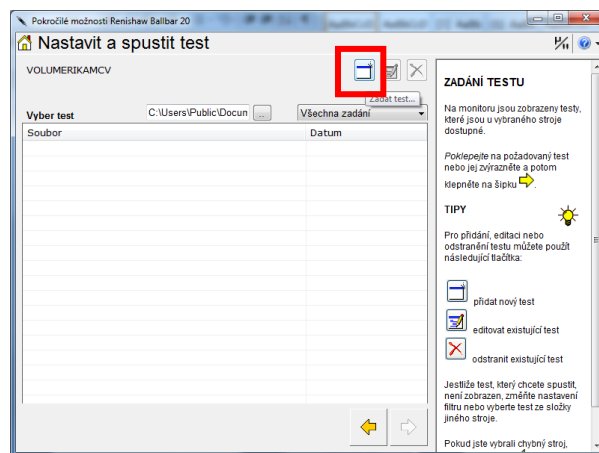


Po zvolení "Přidat stroj", naskočí tabulka na obrázku Obrázek 36. Zde je potřeba vyplnit co nejvíce informací o stroji, aby ho bylo možné i po určité době co nejjednodušeji identifikovat.

Po přidání stroje se dvojklikem otevře a naskočí okno na obrázku Obrázek 37. Zde je nutné vytvořit nový test a to pomocí ikony "Zadat test", která je na obrázku zvýrazněná červeným rámečkem.



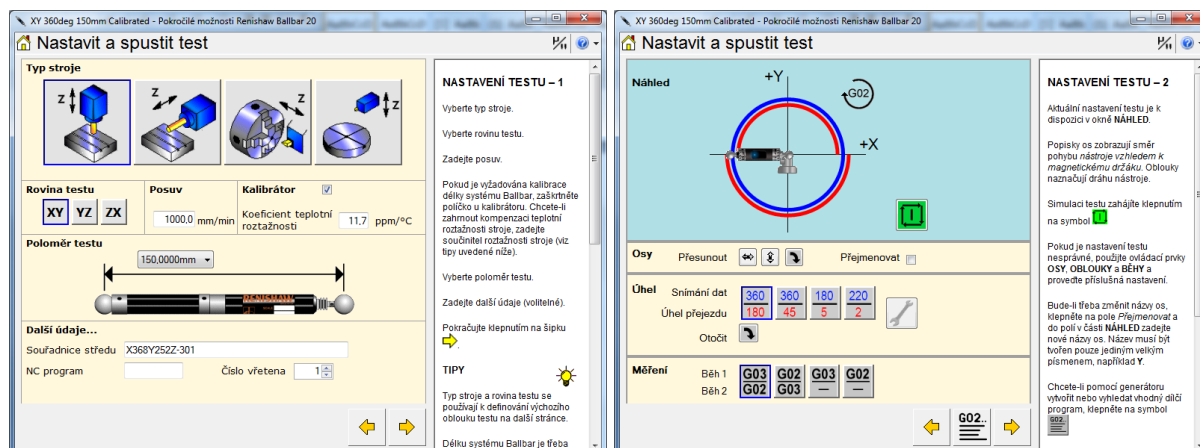
Obrázek 36 Nastavení programu pro Ballbar 3



Obrázek 37 Nastavení programu pro Ballbar 4

Po vytvoření testu naskočí okno na obrázku Obrázek 38. Zde je potřeba nastavit rovinu měření, velikost posuvu, poloměr testu a souřadnici středu měření.

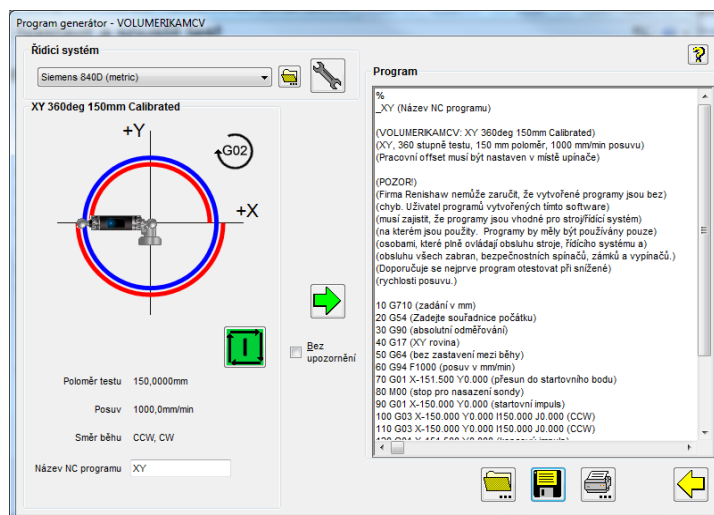
Po přejítí k dalšímu oknu pomocí žluté šipky vpravo, naskočí okno (Obrázek 39), kde je možné zvolit orientaci os souřadného systému, úhel snímání dat, úhel přejezdu a orientaci běhů měření.



Obrázek 38 Nastavení programu pro Ballbar 5 Obrázek 39 Nastavení programu pro Ballbar 6



Pro tvorbu NC programu je nutné kliknout na ikonu "G02", tím se zobrazí nabídka dle obrázku Obrázek 40. Zde je nutné vybrat typ řídicího systému a vložit název NC programu. Pak stačí pouze kliknout na zelenou šipku vpravo a NC program je vytvořen. Nyní již stačí program pouze uložit a je možné ho vložit do stroje.



Obrázek 40 Nastavení programu pro Ballbar 7

### 3.3.3 NASTAVENÍ LASERTRACERU

Postup nastavení měřicího programu není součástí této diplomové práce, protože byl vytvořen na základě loňské diplomové práce: "Pracovní přesnost obráběcího stroje MCV 754" jejímž autorem je pan Bc. Roman Kaňa a za pomoci Ing. Tomáše Marka, který jej vytvořil v rámci své dizertační práce.

## 3.4 POSTUP MĚŘENÍ

Před každým měřením je nutné uvést stroj dle správného postupu do provozu a nechat jej zahřát. Nejprve je nutné zapnout elektrické obvody, přívod vzduchu. Po načtení systému se musí odblokovat pohony vypínačem "centrální STOP" a stisknout softwarový reset. Nyní je nutné zreferovat osy, aby stroj správně odměřoval.

Po tomto je nutné nechat stroj zahřát pomocí zahřívacího cyklu. Ten je vytvořen tak, aby se stůl i vřeteno pohybovali v celé délce pojezdových os a došlo tím k zahřátí pohonů a stykových ploch pohyblivých částí. Toto zahřátí je nutné proto, aby se při měření, díky právě zvyšování teploty stroje, neměnila jeho geometrie. Tento cyklus by měl dle teploty okolí trvat zpravidla 20 až 30 minut.

### 3.4.1 LASERINTERFEROMETR

1. připevnění laserové jednotky na stojan
2. zapojení jednotky do elektrické sítě a zapnout (laser se musí zahřát)
3. připevnění kompenzační jednotky na držák
4. zapojení dvou čidel (materiálové a vzduchové) do kompenzační jednotky
5. propojení obou jednotek (každé zvlášť) s notebookem pomocí USB kabelů
6. zatímco se jednotka zahřívá je nutné ji vyrovnat podle bublinkové libely do vodorovné polohy



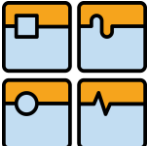
7. zvolit a nastavit zrcátka dle typu měření, v závislosti na typu upnutí k vřetenu zastavit jeho otáčení
8. zapnutí a nastavení měřicího programu dle kapitoly 3.3.1
9. po zahřátí je nutné seřídít směr paprsku tak, aby v celém rozsahu měření měl vracející se paprsek ideálně stejný výkon, ale přitom není důležité, aby byl signál maximální (stav vracejícího se paprsku je vidět buď v měřicím programu nebo přímo na laserové jednotce za pomoci led diod na její horní části)
10. po správném seřizení a výběru daného NC programu (program generuje software pro měření) je možné začít měřit

### 3.4.2 BALLBAR

1. vložení baterie do Ballbaru
2. sestavení do požadované délky poloměru
3. odložení Ballbaru na Zerodurovou desku (později využito na kalibraci)
4. upnutí magnetického držáku do vřetene (opět se musí zastavit otáčení vřetene)
5. nastavení stolu do předem dané polohy (z důvodu opakovatelnosti musí být všechny měření prováděny ve stejné poloze)
6. připevnění stativu ke stolu stroje
7. přichycení nastavitelného magnetického držáku ke stativu
8. co nejlepší vystředění magnetických držáku vůči sobě pomocí referenční kuličky (nastavitelný magnetický držák je pohyblivý ve všech osách) a zaaretování v dané poloze
9. nutnost posunutí nulového bodu stroje do zaaretované polohy z předchozího bodu
10. zvolení NC programu měření vybrané roviny (vždy musí probíhat při stejné rychlosti posuvu), program generuje software pro měření
11. odjetí tohoto programu naprázdno kvůli zjištění správnosti běhu, aby nedošlo k poškození Ballbaru
12. po zapnutí a nastavení programu pro měření dle kapitoly 1.1.1 je nutné provést kalibraci Ballbaru
13. spuštění NC programu, najede do polohy pro zavedení Ballbaru
14. po zavedení Ballbaru spustit měření a následně spustit NC program (vždy s posuvem 100%, aby byla zachována opakovatelnost měření)

### 3.4.3 LASERTRACER

1. umístění řídicí jednotky na stůl, co nejbližší notebooku s měřicím softwarem
2. zapojení přívodního kabelu LaserTRACERu do řídicí jednotky
3. zapojení triggeru z řídicí jednotky do stroje
4. připojení ovladače do řídicí jednotky
5. zapnout řídicí jednotku, nechat zreferovat LaserTRACER a nechat zahřívát laserový paprsek
6. umístění LaserTRACERu do prostoru stroje na pozici dle plánu (strategie) měření
7. umístění reflektoru do vřetene stroje (opět dle strategie a opět se musí zastavit otáčení vřetene)
8. přibližné změření vzdálenosti středu reflektoru od středu referenční koule v LaserTRACERu

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 45
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

9. nastavení hodnoty z předchozího bodu na ovladači
10. zalogování LaserTRACERu (pomocí joysticku na ovladači najet laserem do středu reflektoru)
11. výběr NC programu pro danou pozici (dle pozice umístění z bodu 6)
12. po zapnutí a nastavení programu, spustit NC program a současně i měření
13. během celého měření je nutné kontrolovat běh stroje, aby nedošlo ke kolizi a zničení měřícího zařízení

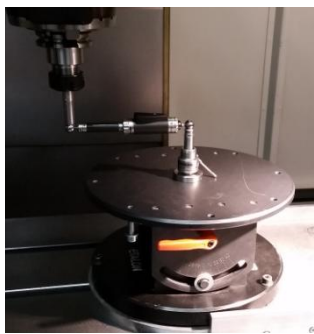


## 4 EXPERIMENT

Všechna měření probíhají dle kapitoly 3.2.

### 4.1 BALLBAR

Úplně na začátku je třeba říci, že experiment začíná na stroji, na kterém jsou vypnuty všechny kompenzace. Kompenzace polohy, kompenzace průhybové a volumetrické kompenzace. Tento stav byl měřen DBB, aby bylo možné následně porovnávat zlepšení nebo případné zhoršení stavu stroje. Výsledky měření (grafy a tabulky s hodnotami) jsou vyobrazeny v této kapitole. Fotky z praktického měření na obrázcích: Obrázek 41 a Obrázek 42.



Obrázek 41 Ballbar - počáteční pozice měření

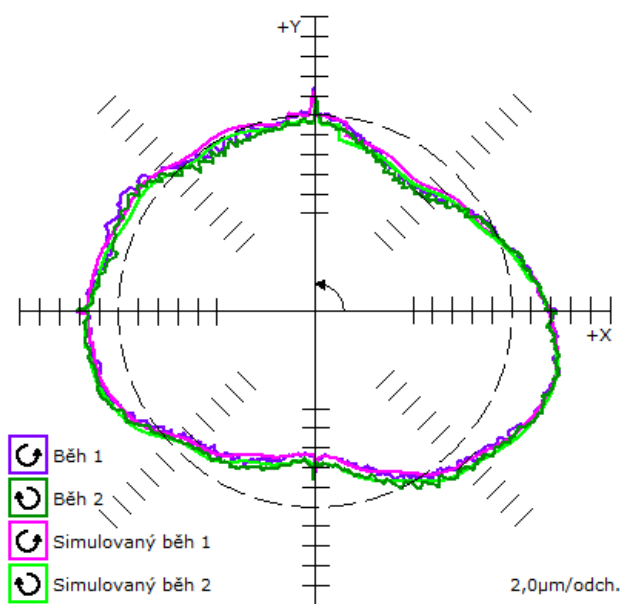


Obrázek 42 Ballbar - ustavování

### Rovina X-Y

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 43.

Tabulka 5 Naměřené hodnoty, rovina X-Y



Obrázek 43 Ballbar, rovina X-Y

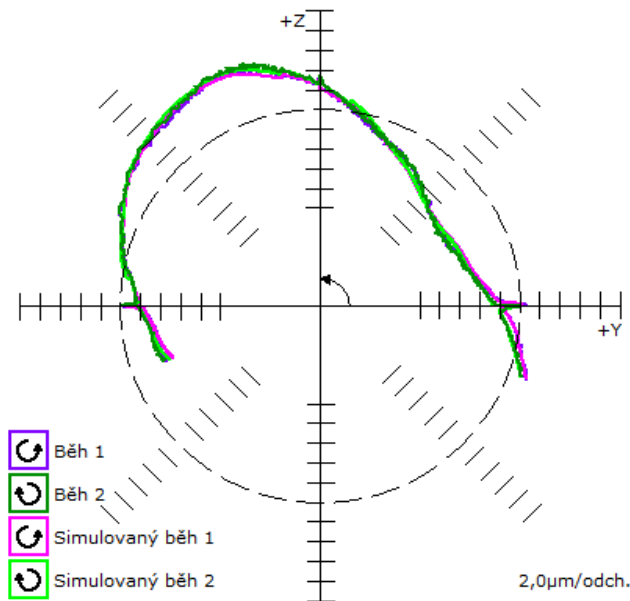
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,1
←	-0,3
Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	0,1
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	0,6
←	0
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	-0,2
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	20,9
Přímocharost X [ $\mu\text{m}$ ]	-5,7
Přímocharost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-0,7
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	12,7
Chyba odměřování X [ppm]	33,2
Chyba odměřování Y [ppm]	-9,1
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	27
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	11,1



### Rovina Y-Z

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 44.

Tabulka 6 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z



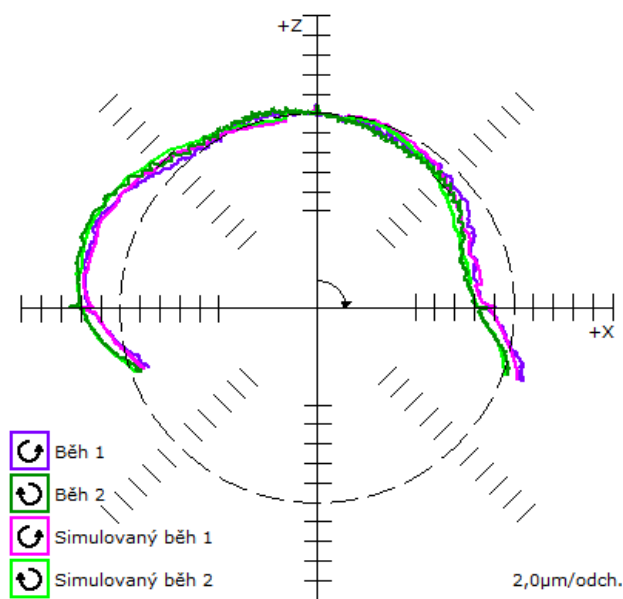
Obrázek 44 Ballbar, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0,1
←	0
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,2
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0,5
←	0,3
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	0,3
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	62,9
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-1,5
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	-0,1
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-8,1
Chyba odměřování Y [ppm]	-3
Chyba odměřování Z [ppm]	24
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	27,5
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	12,2

### Rovina Z-X

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 45.

Tabulka 7 Naměřené hodnoty, rovina Z-X



Obrázek 45 Ballbar, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,1
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,3
←	-0,3
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	0,1
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,1
←	0,3
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	50,7
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	11,2
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	0,1
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-0,8
Chyba odměřování Z [ppm]	34,1
Chyba odměřování X [ppm]	36,8
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	45,8
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	9,9

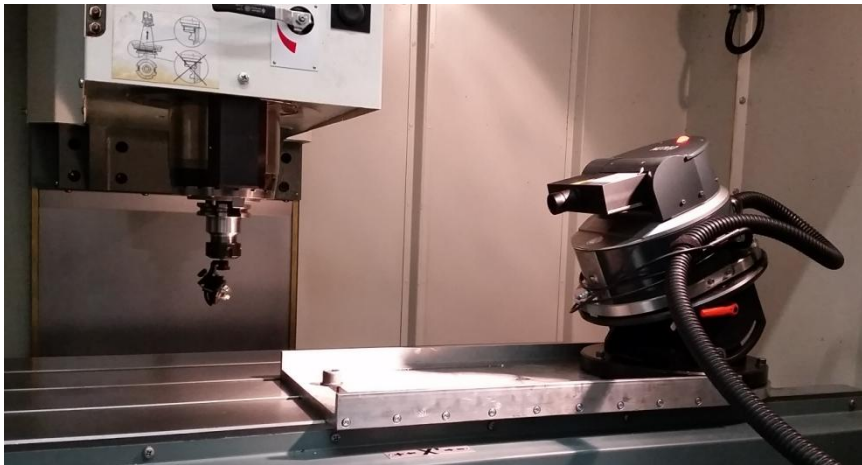


## 4.2 BLOK C1

Blok C1 je tvořen kalibrací pouze pomocí LTc. Toto měření se sestává ze dvou modelů. Model FRB (Full Rigid Body) a model RRB (Reduced Rigid Body). U obou modelů vždy proběhlo nejprve kalibrační měření, ze kterých byly vytvořeny tabulky volumetrické kompenzace a následně byly ověřeny verifikačním měřením, opět pomocí LTc. Oba modely byly po zavedení tabulek volumetrické kompenzace naměřeny rovněž i DBB. Výsledky měření (grafy a tabulky s hodnotami) z měření LTc i DBB jsou vyobrazeny v této kapitole.

### 4.2.1 LASERTRACER - MODEL FRB

Fotka z praktického měření na obrázku: Obrázek 46.



Obrázek 46 LT - měření

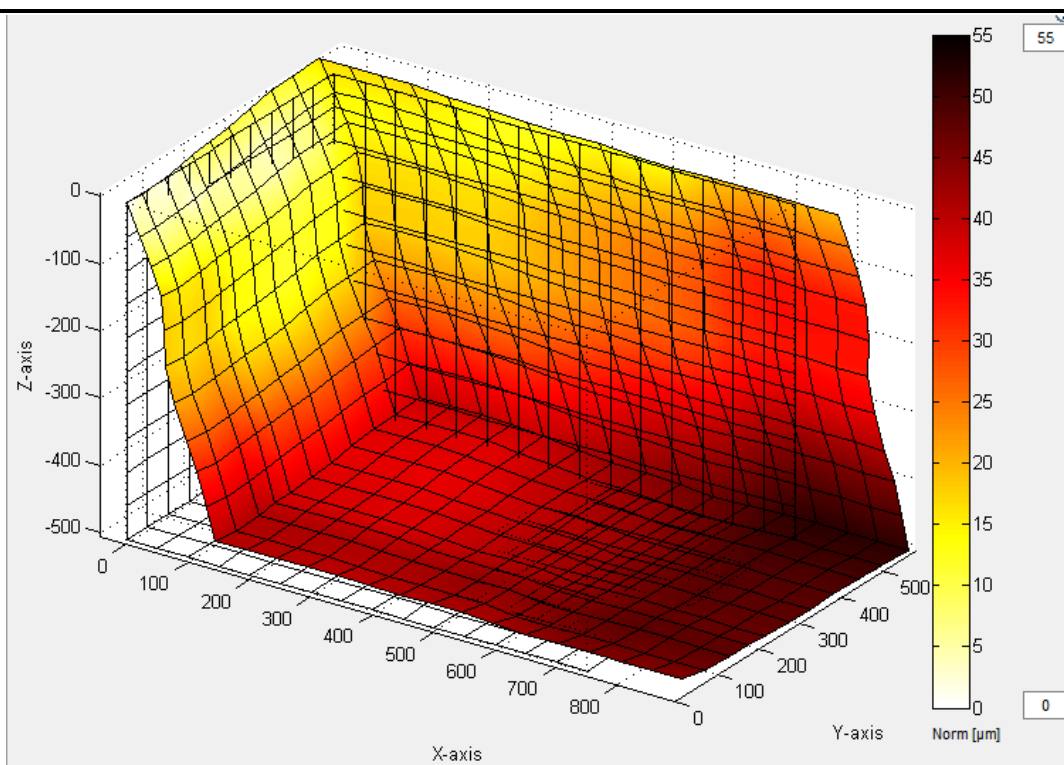
## KALIBRACE

Graf prostorové odchylky je vidět na obrázku: Obrázek 47.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, kalibrace

	chyby	$U_{\max}$ (95%)		chyby	$U_{\max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	19,7	0,3	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	12,7	1,7
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	18,8	0,7	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	11,6	0,4
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	5,9	0,9	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	39,5	3,6
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	4,2	0,6	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	2,6	6
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	1,1	0,3	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	63,2	8,7
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	1,9	0,2	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	10,7	3,1
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	3,1	0,5	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	28	1,9
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	7,3	0,6	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-73,7	3,2
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	2,3	0,6	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	32,6	1,5
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	12,6	2			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	26,8	0,6	Prostorová odchylka min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	24,4	0,5	Prostorová odchylka max. [ $\mu\text{m}$ ]		52





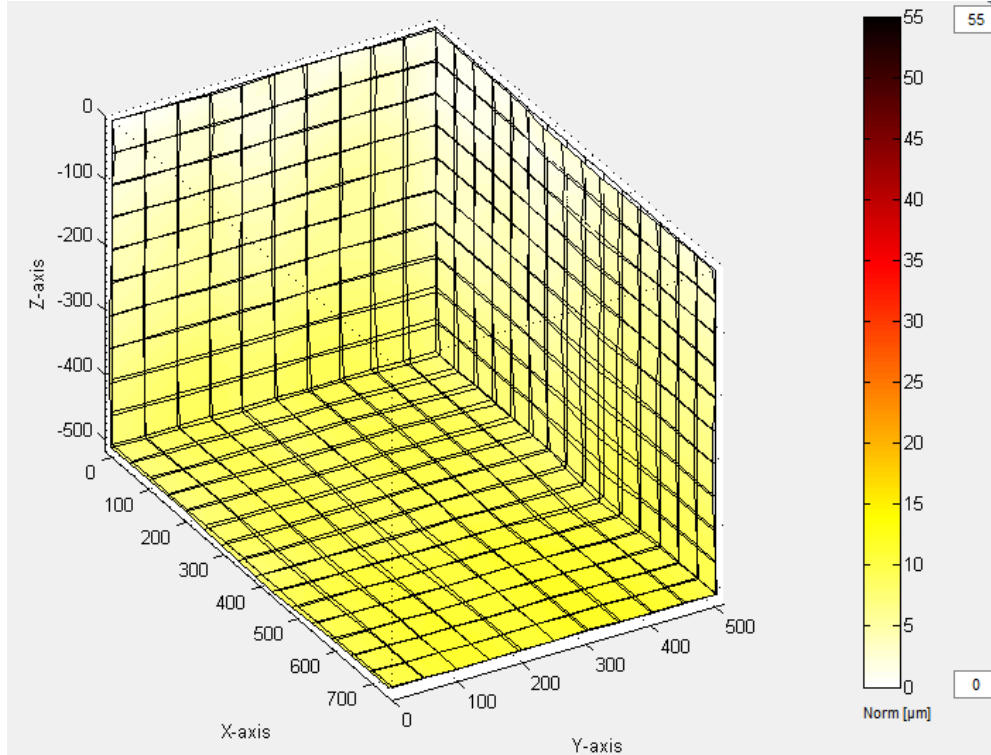
Obrázek 47 Graf prostorové odchyly, model FRB, kalibrace

### VERIFIKACE

Graf prostorové odchyly je vidět na obrázku: Obrázek 48.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, verifikace

	chyby	$U_{max}$ (95%)		chyby	$U_{max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	2,2	0,2	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	10,6	2,6
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	3,9	1,1	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	3,3	0,4
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	4,8	0,9	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	40,2	6,4
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	2,6	0,8	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	36,4	6,9
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	1,1	0,6	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	34,3	11,4
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	1,7	0,2	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	27,9	3,6
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	1,2	0,5	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	-1,6	1,6
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	1,1	1	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	10,4	3,4
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	1,8	0,6	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	4,3	1,6
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	6	2,1			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	3,2	0,4	Prostorová odchylyka min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	2,5	0,4	Prostorová odchylyka max. [ $\mu\text{m}$ ]		12



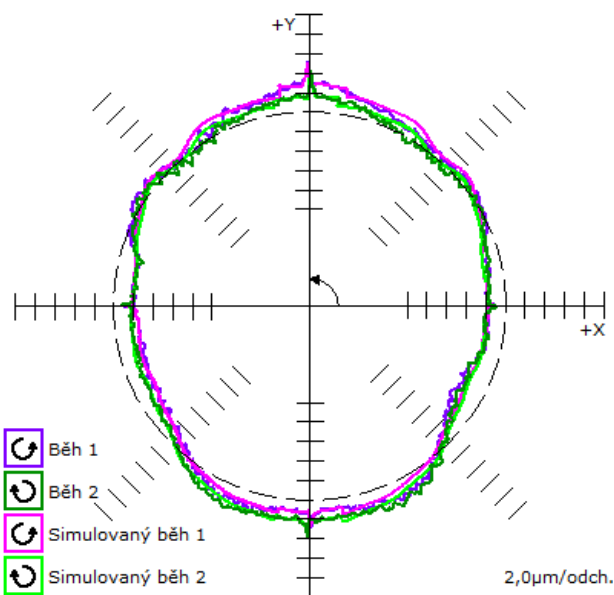
Obrázek 48 Graf prostorové odchytky, model FRB, verifikace

**BALLBAR**

**Rovina X-Y**

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 49.

Tabulka 10 Naměřené hodnoty, rovina X-Y



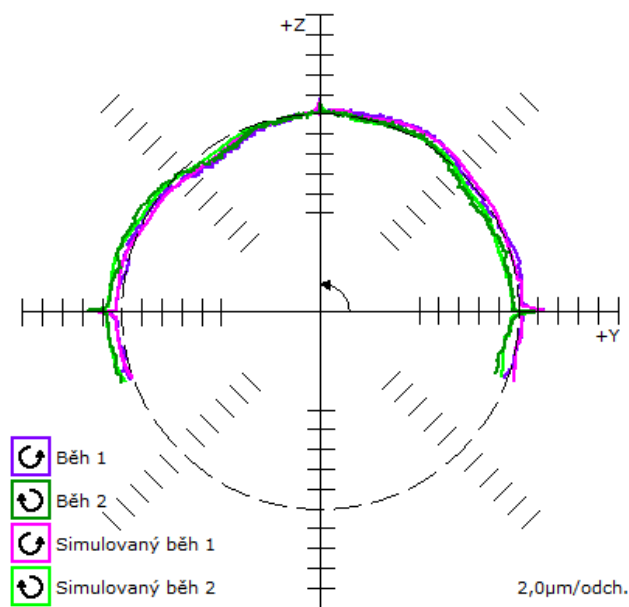
Obrázek 49 Ballbar, rovina X-Y

Mrtvý chod X [μm] →	-0,3
←	-0,3
Mrtvý chod Y [μm] ↑	-0,1
↓	0
Příčná vůle X [μm] →	-0,1
←	-0,2
Příčná vůle Y [μm] ↑	-0,5
↓	0
Kolmost [μm/m]	-0,2
Přímocířarost X [μm]	2,8
Přímocířarost Y [μm]	0
Relativní ch. odměřování [μm]	-7,8
Chyba odměřování X [ppm]	-14,9
Chyba odměřování Y [ppm]	11,1
Tolerance polohy [μm]	12,7
Kruhovitost [μm]	8,3



### Rovina Y-Z

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 50.



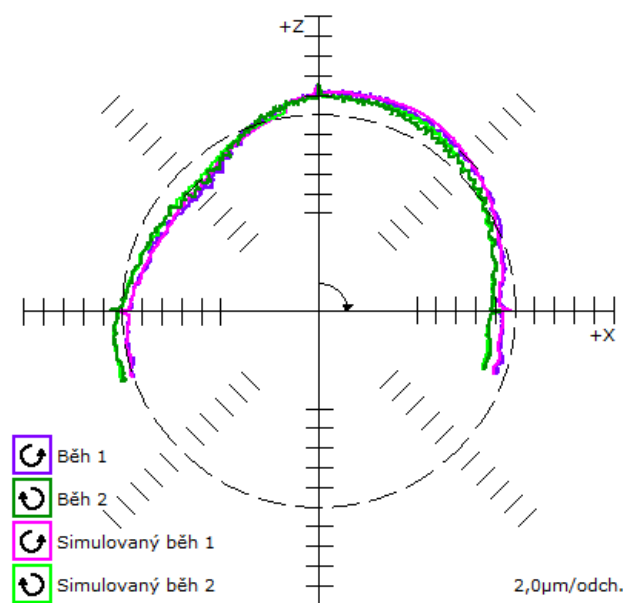
Obrázek 50 Ballbar, rovina Y-Z

Tabulka 11 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,1
←	-0,1
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,5
←	0
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	0,2
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	1,1
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-0,5
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	2,7
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	0,9
Chyba odměřování Y [ppm]	5,7
Chyba odměřování Z [ppm]	2,6
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	7
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	5,2

### Rovina Z-X

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 51.



Obrázek 51 Ballbar, rovina Z-X

Tabulka 12 Naměřené hodnoty, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,1
←	-0,2
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,2
↓	0
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,3
←	-0,1
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-17,2
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	2,6
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	-1,8
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	4,1
Chyba odměřování Z [ppm]	-3,2
Chyba odměřování X [ppm]	-16,8
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	15,9
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	6,6



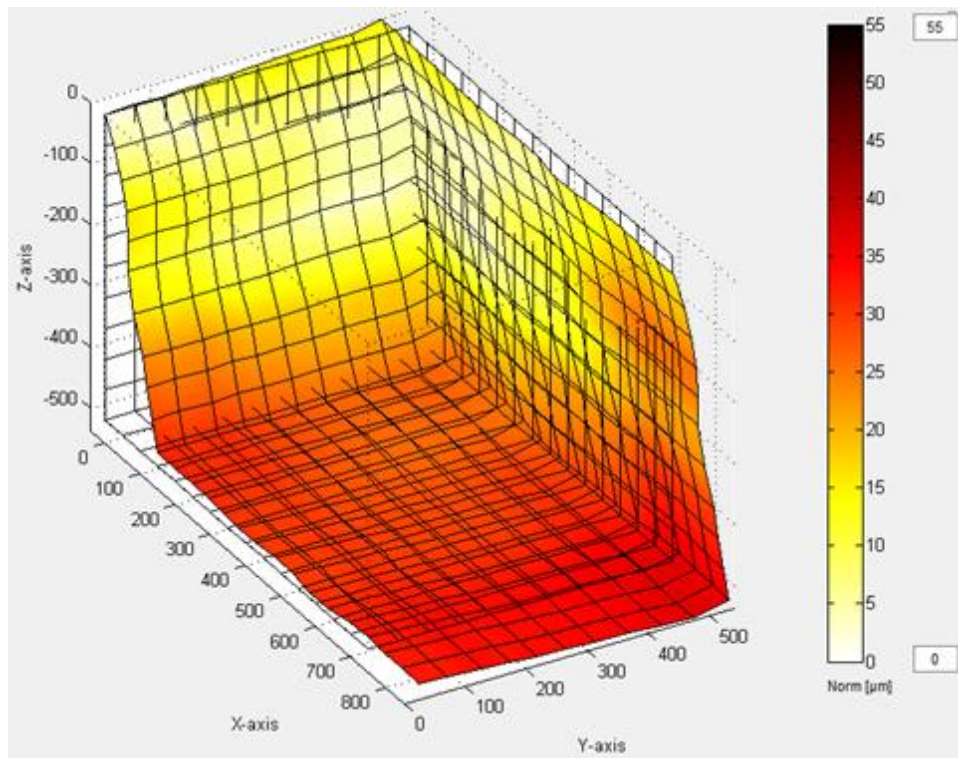
#### 4.2.2 LASERTRACER - MODEL RRB

##### KALIBRACE

Graf prostorové odchyly je vidět na obrázku: Obrázek 52.

Tabulka 13 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, kalibrace

	chyby	$U_{\max}$ (95%)		chyby	$U_{\max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	15,7	0,2	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	23,6	1,3
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	12,4	0,5	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	12,1	0,4
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	12,8	0,7	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	4,6	0,5	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	2,3	0,4	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	2,3	0,2	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	4,5	0,4	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	26,5	0,3
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	9,5	0,2	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-58,8	0,4
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	2,2	0,2	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	23,5	0,4
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	8,5	1,7			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	28,2	0,4	Prostorová odchylyka min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	23,4	0,4	Prostorová odchylyka max. [ $\mu\text{m}$ ]		37



Obrázek 52 Graf prostorové odchyly, model RRB, kalibrace

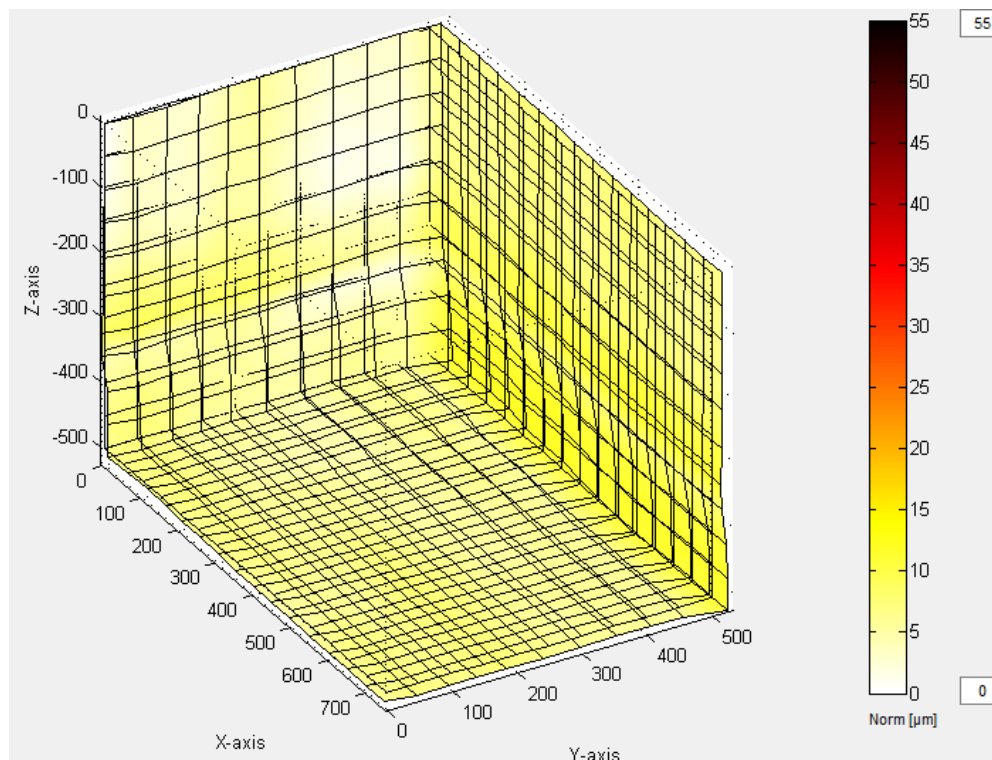


**VERIFIKACE**

Graf prostorové odchyly je vidět na obrázku: Obrázek 53.

*Tabulka 14 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, verifikace*

	chyby	$U_{max}$ (95%)		chyby	$U_{max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	1,1	0,2	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	8,4	1,3
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	12,8	0,4	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	9,3	0,5
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	8,4	0,7	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	1,4	0,4	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	1,7	0,4	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	2,5	0,1	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	4,1	0,3	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	1	0,6
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	0,4	0,1	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	2,8	0,6
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	2,9	0,1	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	5	0,6
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	10,6	1,8			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	1,9	0,4	Prostorová odchylnka min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	3,1	0,4	Prostorová odchylnka max. [ $\mu\text{m}$ ]		12

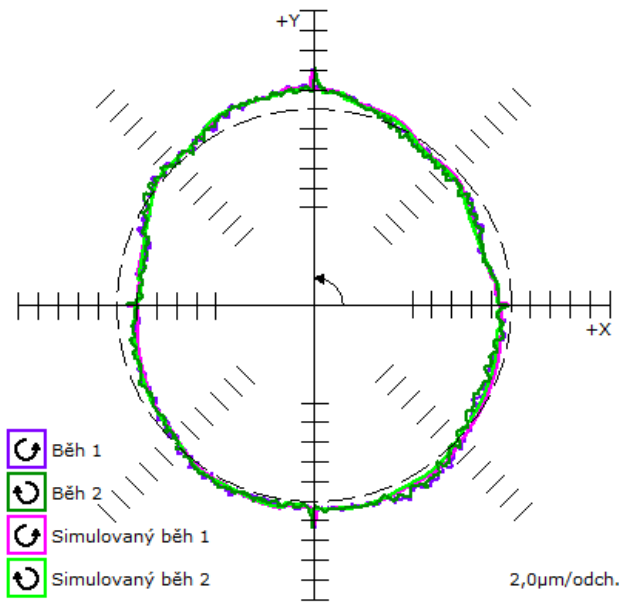


*Obrázek 53 Graf prostorové odchyly, model RRB, verifikace*

**BALLBAR****Rovina X-Y**

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 54.

Tabulka 15 Naměřené hodnoty, rovina X-Y



Obrázek 54 Ballbar, rovina X-Y

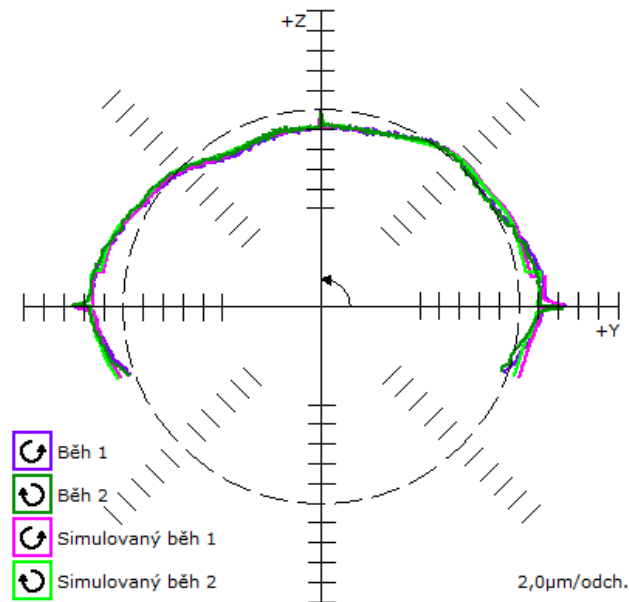
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,1
←	-0,2
Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	-0,1
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,6
←	0,1
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	0,4
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	6,3
Přímocharost X [ $\mu\text{m}$ ]	-0,9
Přímocharost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-0,8
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-5,9
Chyba odměřování X [ppm]	12,6
Chyba odměřování Y [ppm]	32,1
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	21,3
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	6,8



### Rovina Y-Z

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 55.

Tabulka 16 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z



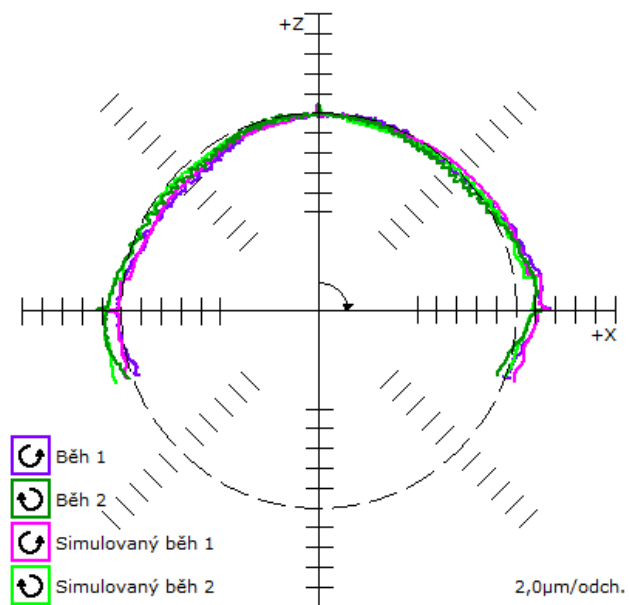
Obrázek 55 Ballbar, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0
←	0
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0
←	0,2
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,1
↓	0,2
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	0,3
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0,3
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	2,6
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	7,8
Chyba odměřování Y [ppm]	28,5
Chyba odměřování Z [ppm]	2,5
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	18
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	7,7

### Rovina Z-X

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 56.

Tabulka 17 Naměřené hodnoty, rovina Z-X



Obrázek 56 Ballbar, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,1
←	-0,2
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,2
↓	-0,2
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,3
←	0,2
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-11,9
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	-2
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	-1,3
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-3,3
Chyba odměřování Z [ppm]	-1,9
Chyba odměřování X [ppm]	9,3
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	10,4
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	5,4



### 4.2.3 VYHODNOCENÍ

#### LTC

Pro model FRB je vidět porovnání kalibrace a verifikace v tabulce: Tabulka 18 a následně na obrázku: Obrázek 57. V tabulce je ještě uvedeno absolutní a procentuální zlepšení/zhoršení chyby.

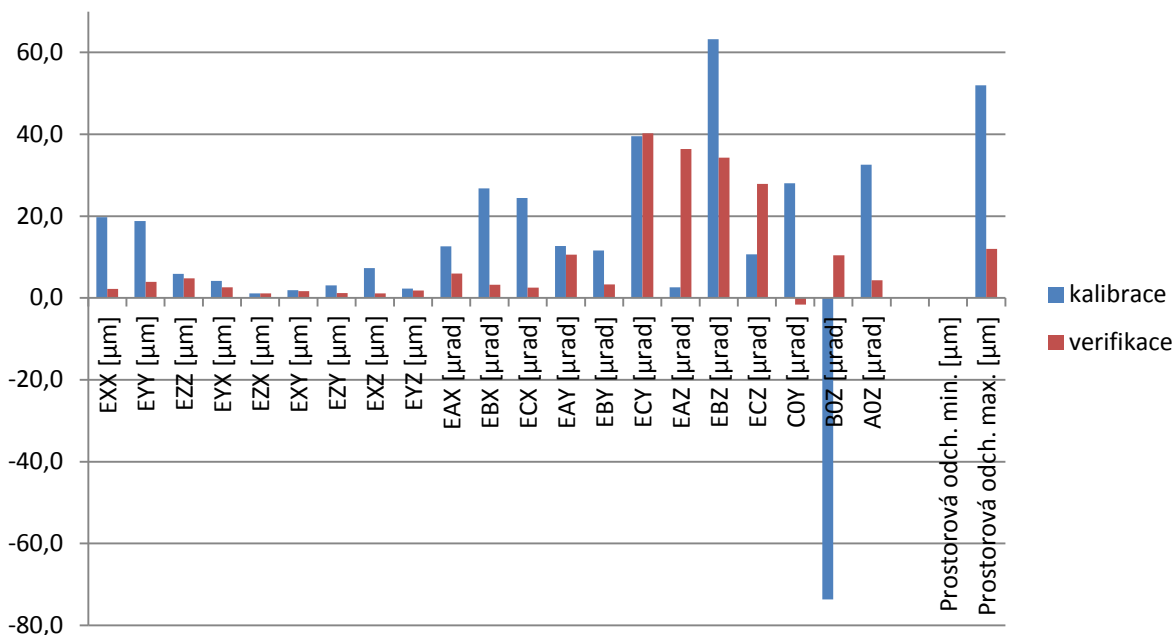
Tabulka 18 Chyby modelu FRB

	kalibrace [ $\mu\text{m}$ ]	verifikace [ $\mu\text{m}$ ]	zlepšení/zhoršení chyb	
			absolutní [ $\mu\text{m}$ ]	procentuální [%]
EXX	19,7	2,2	17,5	88,8
EYY	18,8	3,9	14,9	79,3
EZZ	5,9	4,8	1,1	18,6
EYX	4,2	2,6	1,6	38,1
EZX	1,1	1,1	0,0	0,0
EXY	1,9	1,7	0,2	10,5
EZY	3,1	1,2	1,9	61,3
EXZ	7,3	1,1	6,2	84,9
EYZ	2,3	1,8	0,5	21,7
	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[%]
EAX	12,6	6,0	6,6	52,4
EBX	26,8	3,2	23,6	88,1
ECX	24,4	2,5	21,9	89,8
EAY	12,7	10,6	2,1	16,5
EBY	11,6	3,3	8,3	71,6
<b>ECY</b>	<b>39,5</b>	<b>40,2</b>	<b>-0,7</b>	<b>-1,8</b>
<b>EAZ</b>	<b>2,6</b>	<b>36,4</b>	<b>-33,8</b>	<b>-1300,0</b>
EBZ	63,2	34,3	28,9	45,7
<b>ECZ</b>	<b>10,7</b>	<b>27,9</b>	<b>-17,2</b>	<b>-160,7</b>
C0Y	28,0	-1,6	26,4	94,3
B0Z	-73,7	10,4	63,3	85,9
A0Z	32,6	4,3	28,3	86,8
	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[%]
Prostorová odchylka min.	0,0	0,0	0,0	0,0
Prostorová odchylka max.	52,0	12,0	40,0	76,9





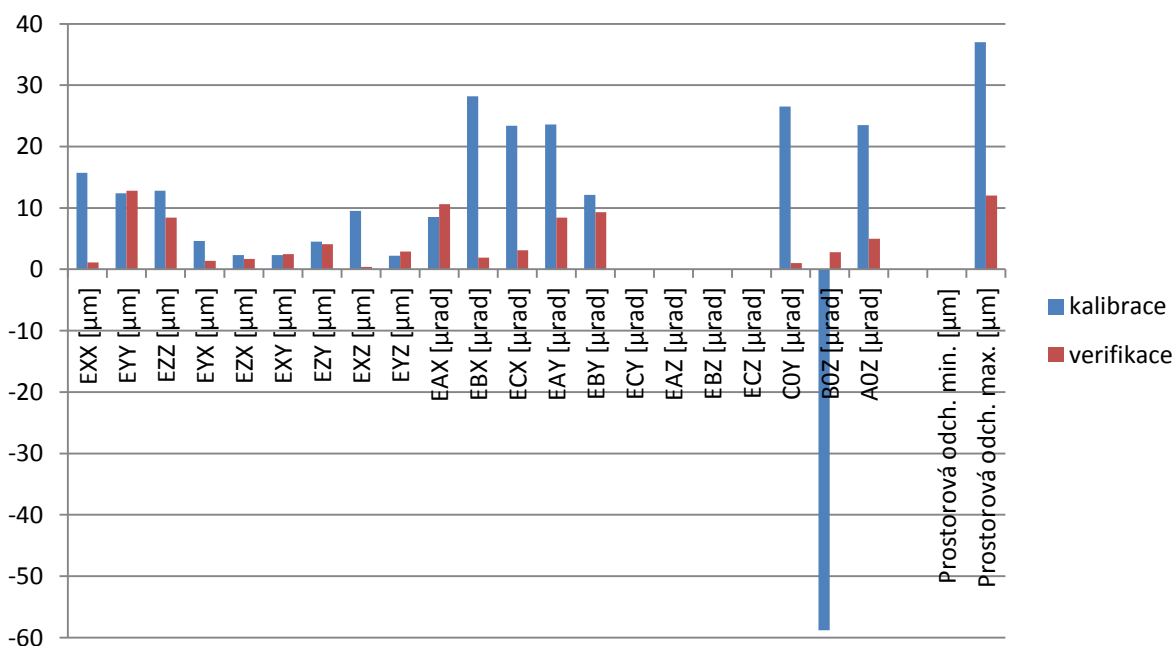
## DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obrázek 57 Graf chyb modelu FRB

U většiny chyb došlo k výraznému zlepšení, jen u chyb ECY, EAZ a ECZ došlo ke zhoršení. U chyby ECY je toto zhoršení zanedbatelné, ale u ostatních dvou, kde došlo ke zhoršení, je toto zhoršení podstatné. Nicméně se jedná pouze o dvě chyby z celkových 21 chyb, kde došlo k takovému zhoršení.

Pro model RRB je vidět porovnání kalibrace a verifikace v tabulce: Tabulka 19 a následně na obrázku: Obrázek 58. V tabulce je ještě uvedeno absolutní a procentuální zlepšení/zhoršení chyby.



Obrázek 58 Graf chyb modelu RRB



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 19 Chyby modelu RRB

	kalibrace [ $\mu\text{m}$ ]	verifikace [ $\mu\text{m}$ ]	zlepšení/zhoršení chyb	
			absolutní [ $\mu\text{m}$ ]	procentuální [%]
EXX	15,7	1,1	14,6	93,0
EYY	12,4	12,8	-0,4	-3,2
EZZ	12,8	8,4	4,4	34,4
EYX	4,6	1,4	3,2	69,6
EZX	2,3	1,7	0,6	26,1
EXY	2,3	2,5	-0,2	-8,7
EZY	4,5	4,1	0,4	8,9
EXZ	9,5	0,4	9,1	95,8
EYZ	2,2	2,9	-0,7	-31,8
	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[%]
EAX	8,5	10,6	-2,1	-24,7
EBX	28,2	1,9	26,3	93,3
ECX	23,4	3,1	20,3	86,8
EAY	23,6	8,4	15,2	64,4
EBY	12,1	9,3	2,8	23,1
ECY	-	-	-	-
EAZ	-	-	-	-
EBZ	-	-	-	-
ECZ	-	-	-	-
C0Y	26,5	1,0	25,5	96,2
B0Z	-58,8	2,8	56,0	95,2
A0Z	23,5	5,0	18,5	78,7
	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[%]
Prostorová odchylka min.	0,0	0,0	0,0	0,0
Prostorová odchylka max.	37,0	12,0	25,0	67,6

U většiny chyb došlo k výraznému zlepšení, jen u chyb EYY, EXY, EYZ a EAX došlo ke zhoršení, procentuálně to může vypadat, že zhoršení je markantní, ale při pohledu na absolutní hodnoty je vidět, že se nejedná o nikterak velké zhoršení.

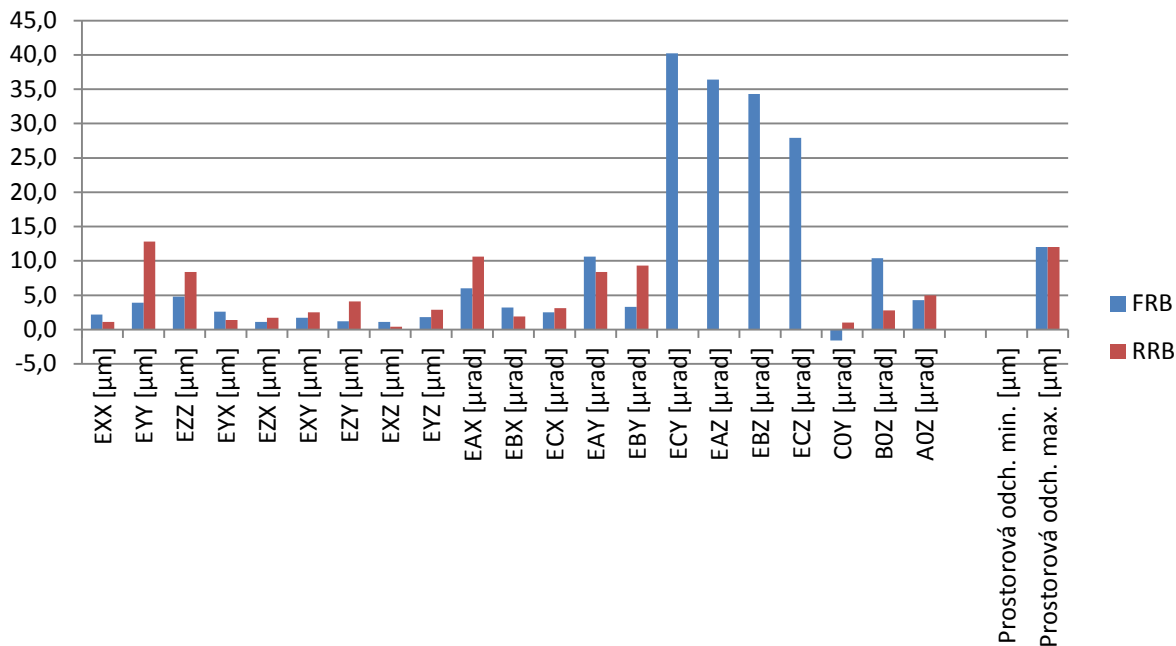


Nyní je nutno porovnat oba modely po verifikaci ještě mezi sebou, aby bylo vidět, který z modelů má lepší vliv na jednotlivé chyby. Porovnání je vidět v tabulce: Tabulka 20 a na obrázku: Obrázek 59. V tabulce je ještě uvedeno absolutní a procentuální zlepšení/zhoršení chyby.

Jako výchozí hodnota pro výpočet procentuální chyby je brána hodnota od modelu FRB a to z důvodu, že model FRB měří všech 21 chyb, které počítá z hodnot, které naměří z více bodů, tím získá více hodnot pro výpočet, a proto by měl být přesnější. To je vidět i v následující tabulce.

Tabulka 20 Porovnání chyb FRB a RRB

	FRB [μm]	RRB [μm]	zlepšení/zhoršení chyb	
			absolutní [μm]	procentuální [%]
EXX	2,2	1,1	1,1	50,0
EYY	3,9	12,8	-8,9	-228,2
EZZ	4,8	8,4	-3,6	-75,0
EYX	2,6	1,4	1,2	46,2
EZX	1,1	1,7	-0,6	-54,5
EXY	1,7	2,5	-0,8	-47,1
EZY	1,2	4,1	-2,9	-241,7
EXZ	1,1	0,4	0,7	63,6
EYZ	1,8	2,9	-1,1	-61,1
	[μrad]	[μrad]	[μrad]	[%]
EAX	6,0	10,6	-4,6	-76,7
EBX	3,2	1,9	1,3	40,6
ECX	2,5	3,1	-0,6	-24,0
EAY	10,6	8,4	2,2	20,8
EBY	3,3	9,3	-6,0	-181,8
ECY	40,2	-	-	-
EAZ	36,4	-	-	-
EBZ	34,3	-	-	-
ECZ	27,9	-	-	-
C0Y	-1,6	1,0	0,6	37,5
B0Z	10,4	2,8	7,6	73,1
A0Z	4,3	5,0	-0,7	-16,3
	[μm]	[μm]	[μm]	[%]
Prostorová odchylka min.	0,0	0,0	0,0	0,0
Prostorová odchylka max.	12,0	12,0	0,0	0,0



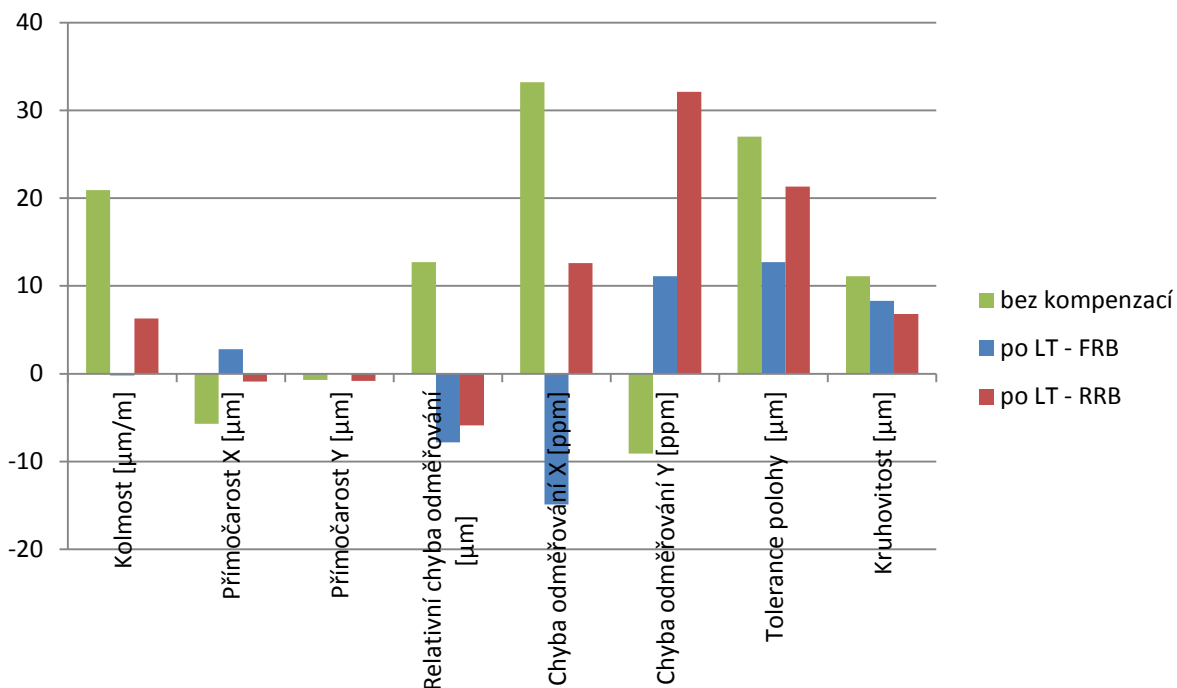
Obrázek 59 Graf porovnání chyb FRB a RRB

Většina chyb po modelu FRB má nižší hodnoty. V případech, kdy jsou chyby větší, jde o pouze malé chyby. Nicméně oba modely mají stejnou maximální prostorovou odchylku. Z důvodu, že model FRB má po kalibraci, při měření pomocí LTc, menší chyby je vhodné vyhodnotit pro tuto konfiguraci měření, model FRB jako vhodnější pro kalibraci tohoto stroje.

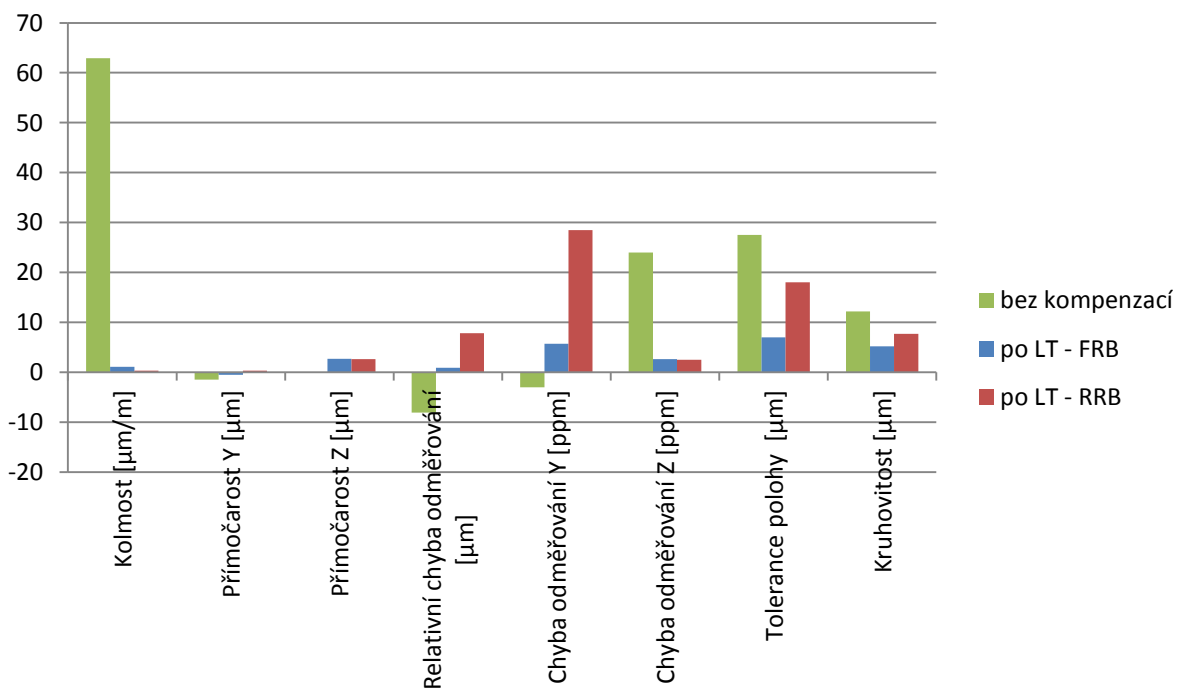
### DBB

Ověření proběhlo i pomocí DBB. Z grafů je jasné, že stav oproti stavu stroje bez kompenzací je podstatně lepší, a proto je zbytečné vyhodnocovat DBB v tabulce vůči počátečnímu stavu a bude dostačující, když v tabulce bude mezi sebou vyhodnocen pouze stav po měření modelu FRB a RRB. Vůči počátečnímu stavu pak bude vyhodnocen jen ten DBB, který je měřen po modelu, který bude vykazovat lepší vliv na chyby stroje.

Porovnání modelů FRB a RRB je možné vidět v tabulce: Tabulka 21 a na obrázcích: Obrázek 60 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina XY pro rovina XY, Obrázek 61 pro rovina YZ a Obrázek 62 pro rovina ZX.



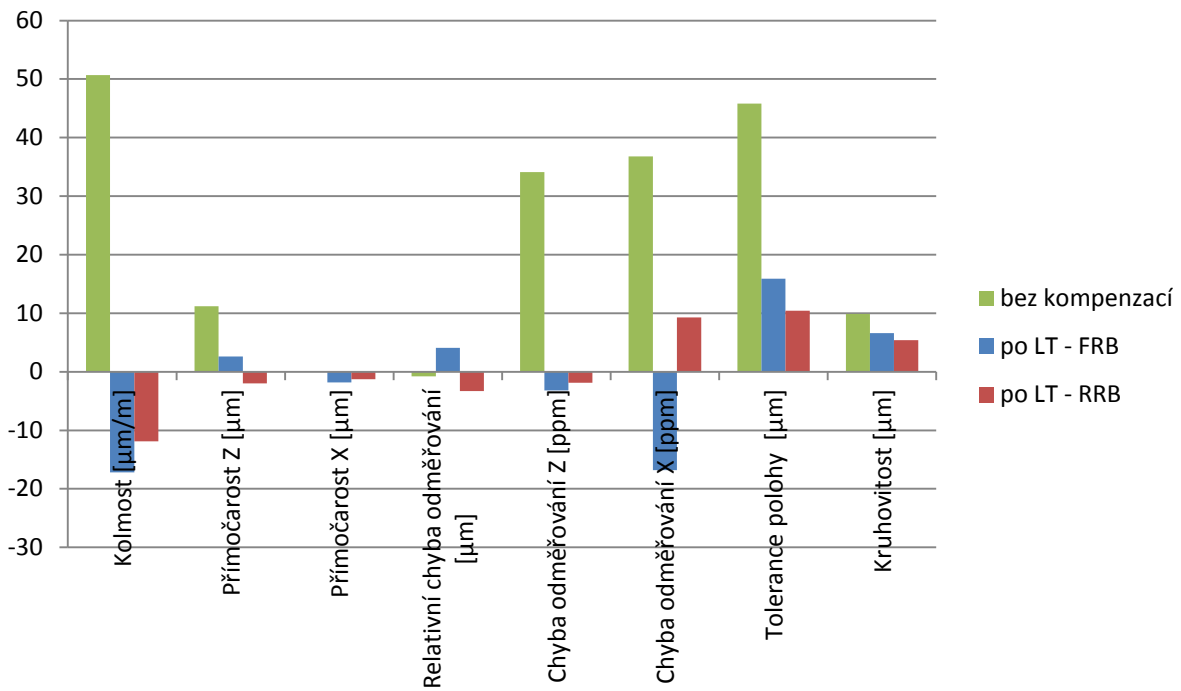
Obrázek 60 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina XY



Obrázek 61 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina YZ



DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obrázek 62 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina ZX



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 21 DBB - porovnání modelů FRB a RRB

X-Y	po LT - FRB		po LT - RRB		zlepšení/zhoršení chyb	
	DBB 2		DBB 3		absolutní	procentuální
Kolmost	-0,2	μm/m	6,3	μm/m	-6,1	-3050,0
Přímočarost X	2,8	μm	-0,9	μm	1,9	67,9
Přímočarost Y	0,0	μm	-0,8	μm	-0,8	-
Relativní chyba odměřování	-7,8	μm	-5,9	μm	1,9	24,4
Chyba odměřování X	-14,9	ppm	12,6	ppm	2,3	15,4
Chyba odměřování Y	11,1	ppm	32,1	ppm	-21,0	-189,2
Tolerance polohy	12,7	μm	21,3	μm	-8,6	-67,7
Kruhovitost	8,3	μm	6,8	μm	1,5	18,1
<b>Y-Z</b>						
Kolmost	1,1	μm/m	0,3	μm/m	0,8	72,7
Přímočarost Y	-0,5	μm	0,3	μm	0,2	40,0
Přímočarost Z	2,7	μm	2,6	μm	0,1	3,7
Relativní chyba odměřování	0,9	μm	7,8	μm	-6,9	-766,7
Chyba odměřování Y	5,7	ppm	28,5	ppm	-22,8	-400,0
Chyba odměřování Z	2,6	ppm	2,5	ppm	0,1	3,8
Tolerance polohy	7,0	μm	18,0	μm	-11,0	-157,1
Kruhovitost	5,2	μm	7,7	μm	-2,5	-48,1
<b>Z-X</b>						
Kolmost	-17,2	μm/m	-11,9	μm/m	5,3	30,8
Přímočarost Z	2,6	μm	-2,0	μm	0,6	23,1
Přímočarost X	-1,8	μm	-1,3	μm	0,5	27,8
Relativní chyba odměřování	4,1	μm	-3,3	μm	0,8	19,5
Chyba odměřování Z	-3,2	ppm	-1,9	ppm	1,3	40,6
Chyba odměřování X	-16,8	ppm	9,3	ppm	7,5	44,6
Tolerance polohy	15,9	μm	10,4	μm	5,5	34,6
Kruhovitost	6,6	μm	5,4	μm	1,2	18,2

Primárně je nutné se dívat na hodnoty kolmosti a kruhovitosti, a to ve všech třech rovinách. Na první pohled by se mohlo zdát, že z hlediska DBB by měl být vhodnější model RRB, ale při důkladném projití výše zmíněných parametrů je vidět, že je vhodnější model FRB. V případě, že je horší, tak se jedná pouze o malé rozdíly hodnot, ale když vykazuje lepší hodnoty, tak je rozdíl podstatnější. Proto v kombinaci s předchozím vyhodnocením měření LTc, je žádoucí posoudit model FRB jako vhodnější. Proto bude v celkovém zhodnocení posouzen DBB, který byl měřen po kalibraci pomocí tohoto modelu. Jedná se o DBB 2.

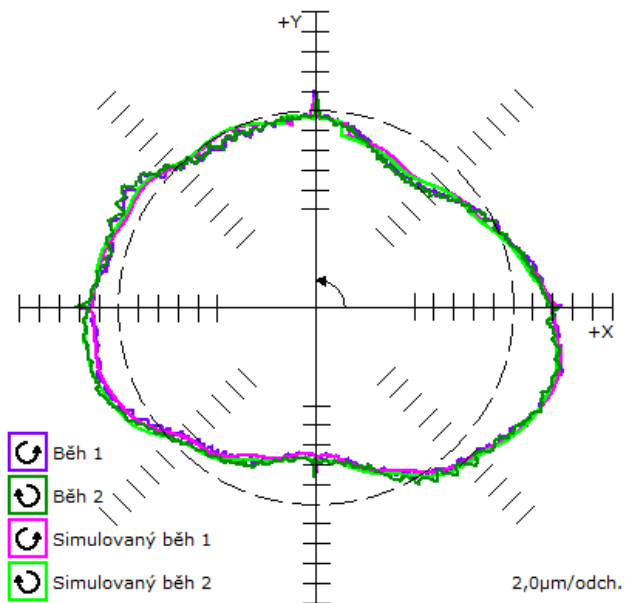


### 4.3 BALLBAR

#### Rovina X-Y

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 63.

Tabulka 22 Naměřené hodnoty, rovina X-Y



Obrázek 63 Ballbar, rovina X-Y

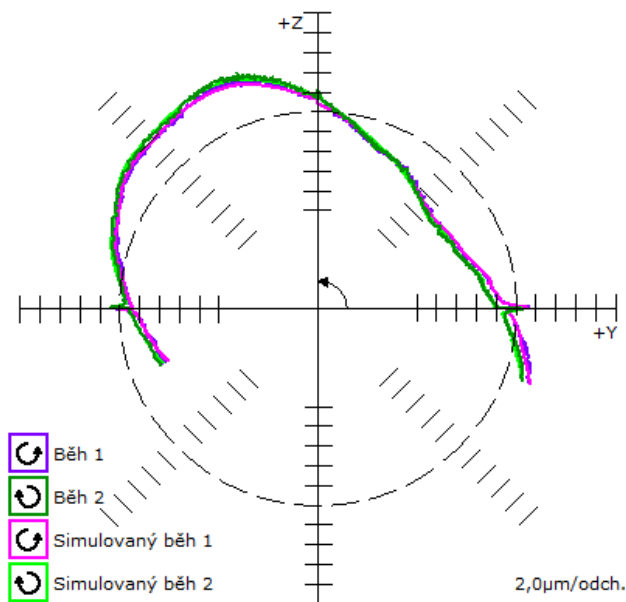
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	0
←	-0,3
Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,1
↓	0
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	0,5
←	-0,2
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,5
↓	0,2
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	19,3
Přímocharost X [ $\mu\text{m}$ ]	-5,6
Přímocharost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-1,1
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	12,9
Chyba odměřování X [ppm]	20
Chyba odměřování Y [ppm]	-23
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	24,8
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	11





### Rovina Y-Z

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 64.



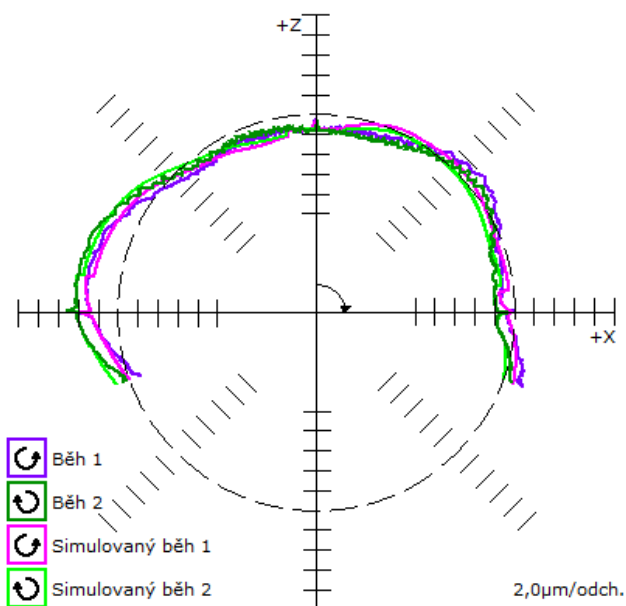
Obrázek 64 Ballbar, rovina Y-Z

Tabulka 23 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0,1
←	0
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0,3
←	0,3
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	0,3
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	61
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-1,1
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	-0,1
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-4,7
Chyba odměřování Y [ppm]	-13,5
Chyba odměřování Z [ppm]	2,2
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	37,6
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	11,1

### Rovina Z-X

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 65.



Obrázek 65 Ballbar, rovina Z-X

Tabulka 24 Naměřené hodnoty, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,1
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,4
←	-0,3
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,1
↓	-0,3
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,2
←	0,1
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	18,1
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	7,8
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	1,2
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-5
Chyba odměřování Z [ppm]	10,5
Chyba odměřování X [ppm]	27
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	25,5
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	7,3



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**VYHODNOCENÍ**

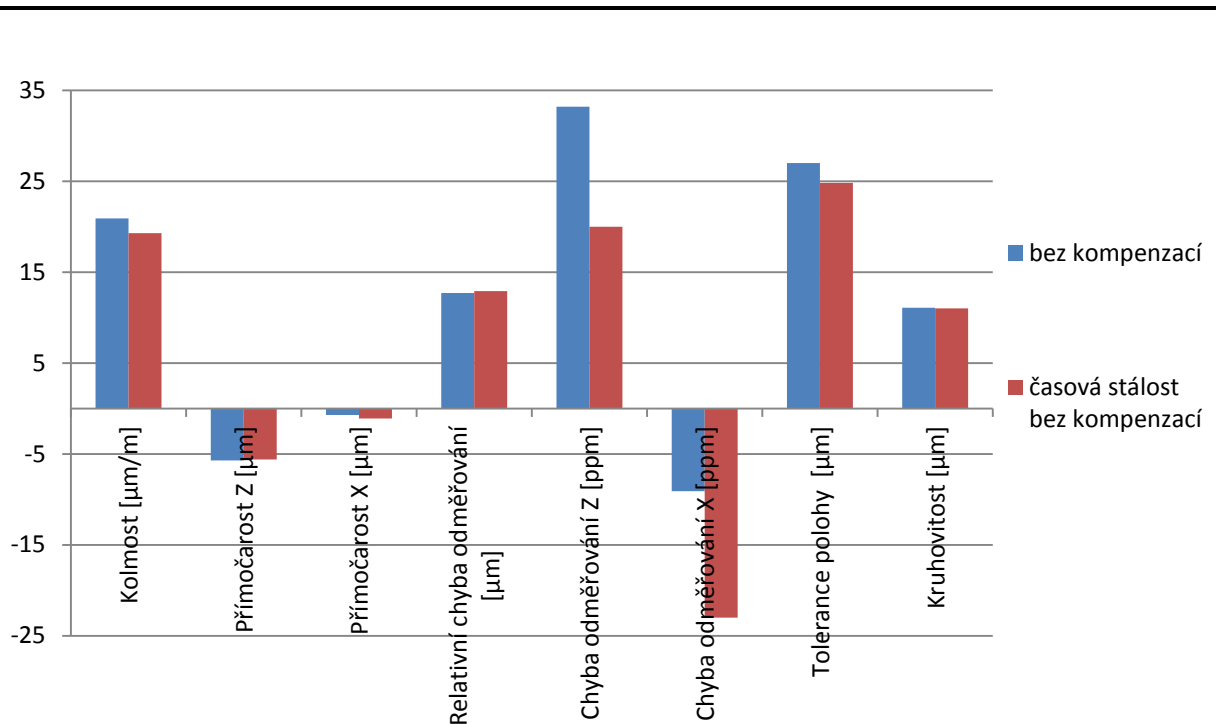
V této části jde jen o to, porovnat stav stroje bez kompenzací v určitém časovém rozestupu. Stroj by měl mít stálou přesnost. Toto porovnání je vidět v tabulce: Tabulka 25 a na obrázcích: Obrázek 66 pro rovinu XY, Obrázek 67 pro rovinu YZ a Obrázek 68 pro rovinu ZX.

Tabulka 25 Časová stálost stroje

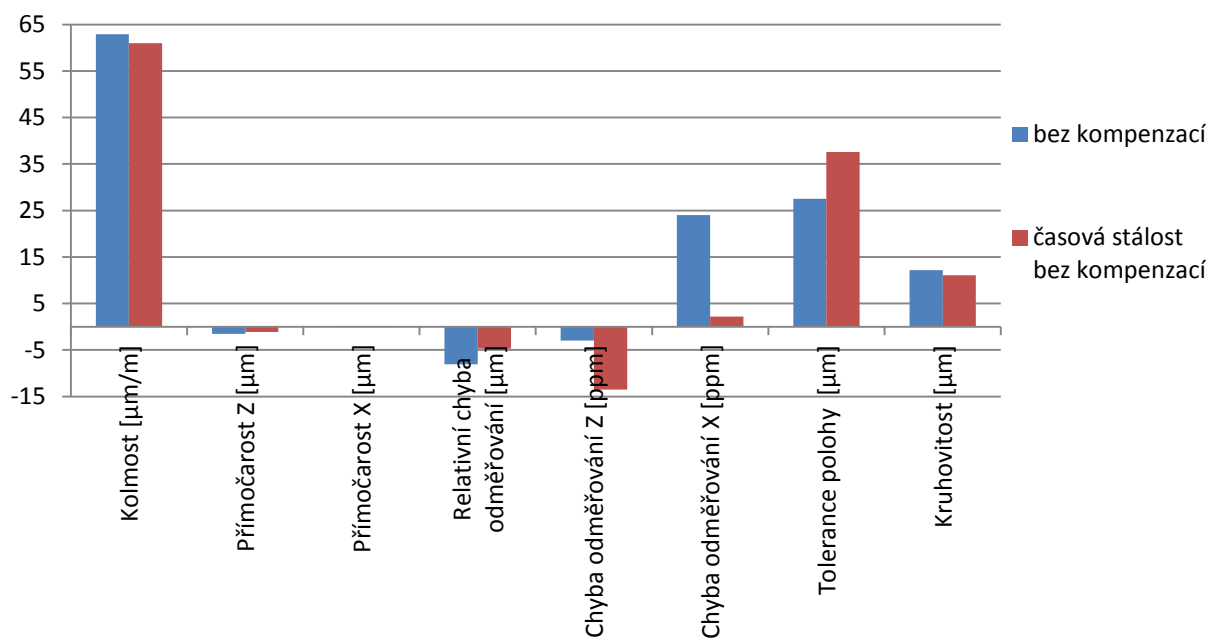
	DBB 1		DBB 4		zlepšení/zhoršení chyb	
					absolutní	procentuální
<b>X-Y</b>						
Kolmost	20,9	μm/m	19,3	μm/m	1,6	7,7
Přímočarost X	-5,7	μm	-5,6	μm	0,1	1,8
Přímočarost Y	-0,7	μm	-1,1	μm	-0,4	-57,1
Relativní chyba odměřování	12,7	μm	12,9	μm	-0,2	-1,6
Chyba odměřování X	33,2	ppm	20	ppm	13,2	39,8
Chyba odměřování Y	-9,1	ppm	-23	ppm	-13,9	-152,7
Tolerance polohy	27	μm	24,8	μm	2,2	8,1
Kruhovitost	11,1	μm	11	μm	0,1	0,9
<b>Y-Z</b>						
Kolmost	62,9	μm/m	61	μm/m	1,9	3,0
Přímočarost Y	-1,5	μm	-1,1	μm	0,4	26,7
Přímočarost Z	-0,1	μm	-0,1	μm	0,0	0,0
Relativní chyba odměřování	-8,1	μm	-4,7	μm	3,4	42,0
Chyba odměřování Y	-3	ppm	-13,5	ppm	-10,5	-350,0
Chyba odměřování Z	24	ppm	2,2	ppm	21,8	90,8
Tolerance polohy	27,5	μm	37,6	μm	-10,1	-36,7
Kruhovitost	12,2	μm	11,1	μm	1,1	9,0
<b>Z-X</b>						
Kolmost	50,7	μm/m	18,1	μm/m	32,6	64,3
Přímočarost Z	11,2	μm	7,8	μm	3,4	30,4
Přímočarost X	0,1	μm	1,2	μm	-1,1	-1100,0
Relativní chyba odměřování	-0,8	μm	-5	μm	-4,2	-525,0
Chyba odměřování Z	34,1	ppm	10,5	ppm	23,6	69,2
Chyba odměřování X [ppm]	36,8	ppm	27	ppm	9,8	26,6
Tolerance polohy [μm]	45,8	μm	25,5	μm	20,3	44,3
Kruhovitost [μm]	9,9	μm	7,3	μm	2,6	26,3



DIPLOMOVÁ PRÁCE



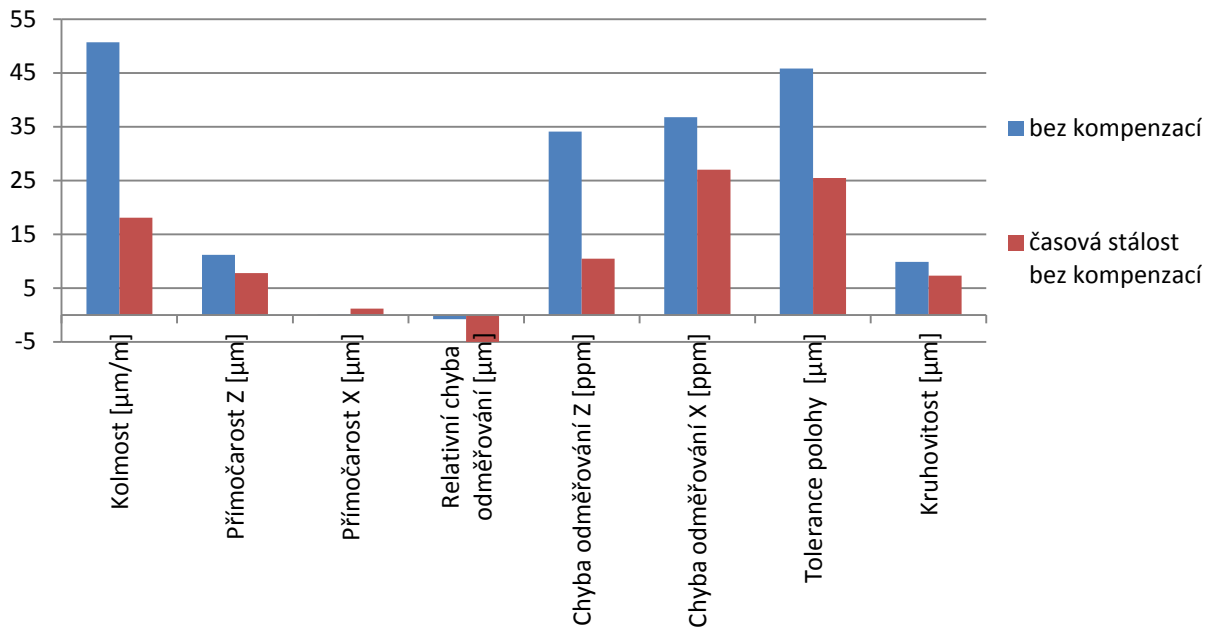
Obrázek 66 Časová stálost DBB - rovina XY



Obrázek 67 Časová stálost DBB - rovina YZ



## DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obrázek 68 Časová stálost DBB - rovina ZX

Opět je nutné podívat se hlavně na parametry kolmost a kruhovitost. Zde je vidět, že se přesnost stroje s časovým rozestupem nemění. Jen u roviny ZX se snížila kolmost, ale to může být způsobeno tím, že mohl být na stroji zásobník nástrojů jinak naplněný a to mohlo změnit tuto hodnotu.



#### 4.4 BLOK C2

V bloku C2, který začíná na stroji s vypnutými kompenzacemi nejprve proběhlo kalibrační měření polohy v ose pomocí LI, ze kterého byly vytvořeny kompenzační tabulky, které byly následně ověřeny verifikačním měřením. To se zopakovalo pro všechny tři osy. Tento stav byl ještě navíc změřen i DBB. Po zavedení kompenzační polohy, byl stroj měřen LTc. Opět jako v bloku 1, byly měřeny dva modely (FRB i RRB) a to jak kalibrační tak i verifikační měření. Z obou modelů vznikly kompenzační tabulky, které byly opět měřeny jak pomocí LTc, tak i DBB.

##### 4.4.1 LASERINTERFEROMETR - POLOHA

Fotka z praktického měření na obrázku: Obrázek 69.



Obrázek 69 LI - měření

#### KALIBRACE

##### Osa X

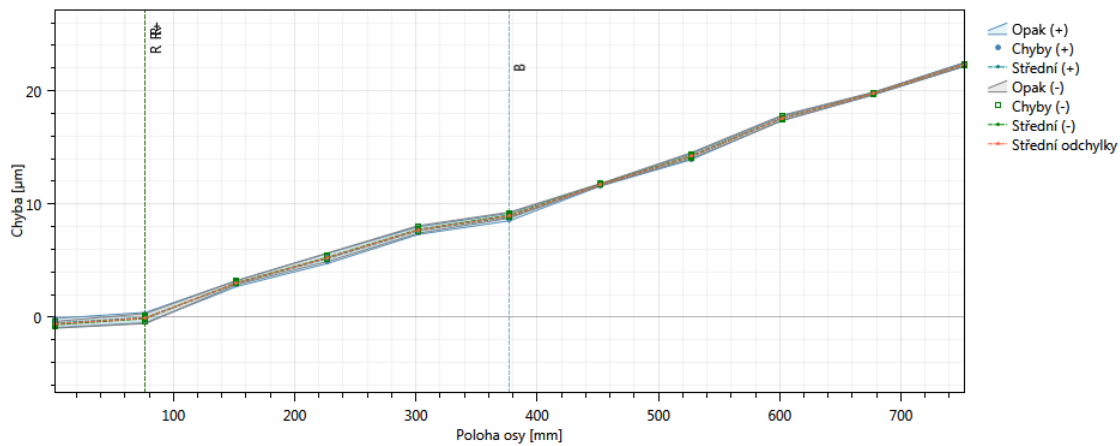
Graf přesnosti najetí do polohy osy X je vidět na obrázku: Obrázek 70.

Tabulka 26 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa X

EXX (A [ $\mu\text{m}$ ])	23,5
EXX (R [ $\mu\text{m}$ ])	1
EXX (E [ $\mu\text{m}$ ])	23



DIPLOMOVÁ PRÁCE



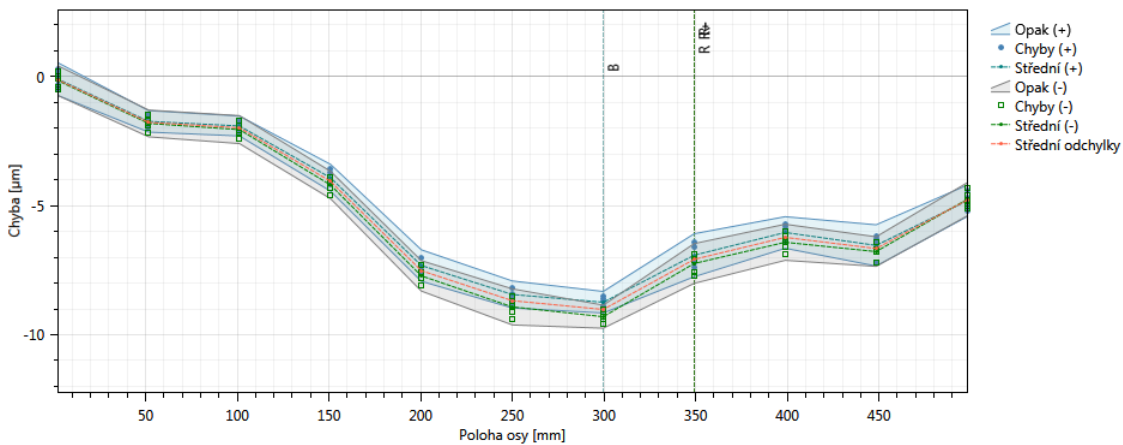
Obrázek 70 LI - polohování, kalibrace, osa X

**Osa Y**

Graf přesnosti najetí do polohy osy Y je vidět na obrázku: Obrázek 71.

Tabulka 27 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Y

EYY (A [ $\mu\text{m}$ ])	10,3
EYY (R [ $\mu\text{m}$ ])	1,9
EYY (E [ $\mu\text{m}$ ])	9,2



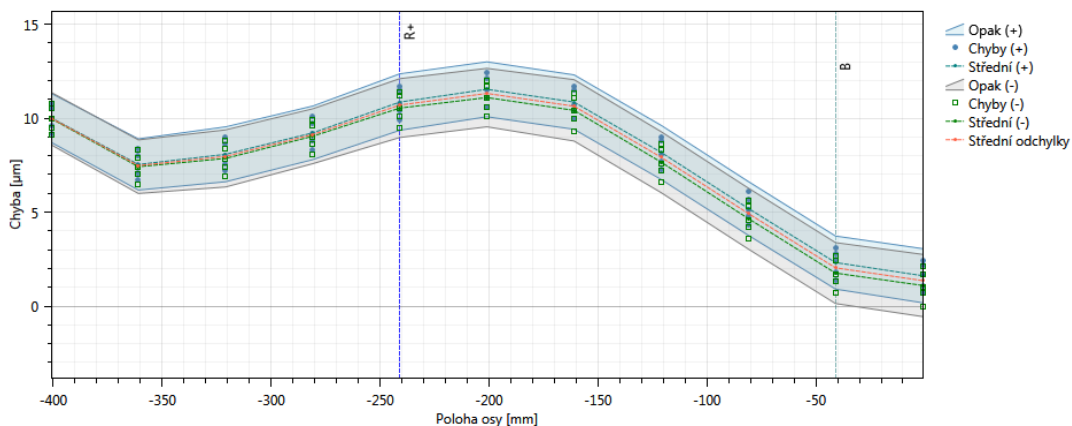
Obrázek 71 LI - polohování, kalibrace, osa Y

**Osa Z**

Graf přesnosti najetí do polohy osy Z je vidět na obrázku: Obrázek 72.

Tabulka 28 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Z

EZZ (A [ $\mu\text{m}$ ])	13,6
EZZ (R [ $\mu\text{m}$ ])	3,6
EZZ (E [ $\mu\text{m}$ ])	10,4



Obrázek 72 LI - polohování, kalibrace, osa Z

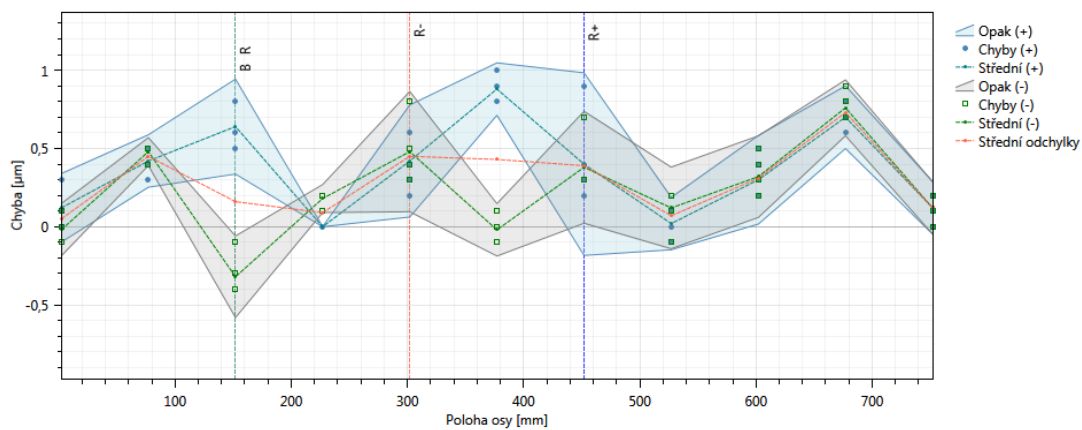
### VERIFIKACE

#### Osa X

Graf přesnosti najetí do polohy osy X je vidět na obrázku: Obrázek 73.

Tabulka 29 Naměřené hodnoty, verifikace, osa X

EXX (A [ $\mu\text{m}$ ])	1,6
EXX (R [ $\mu\text{m}$ ])	1,5
EXX (E [ $\mu\text{m}$ ])	1,2



Obrázek 73 LI - polohování, verifikace, osa X

#### Osa Y

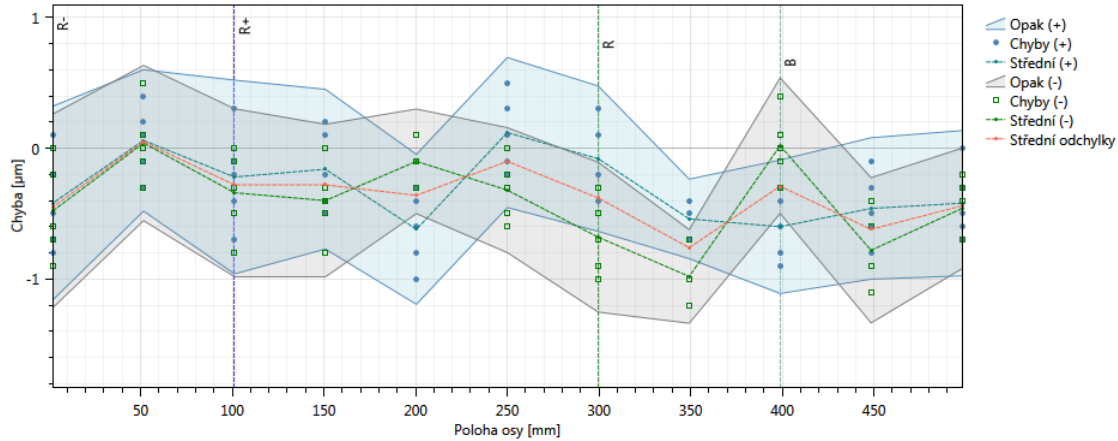
Graf přesnosti najetí do polohy osy Y je vidět na obrázku: Obrázek 74.

Tabulka 30 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Y

EYY (A [ $\mu\text{m}$ ])	2
EYY (R [ $\mu\text{m}$ ])	1,7
EYY (E [ $\mu\text{m}$ ])	1,1



DIPLOMOVÁ PRÁCE



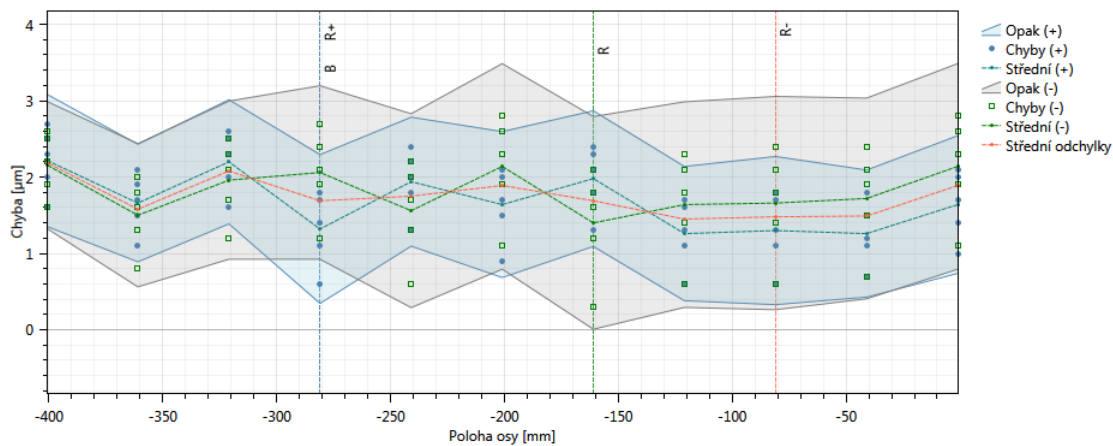
Obrázek 74 LI - polohování, verifikace, osa Y

**Osa Z**

Graf přesnosti najetí do polohy osy Z je vidět na obrázku: Obrázek 75.

Tabulka 31 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Z

EZZ (A [ $\mu\text{m}$ ])	3,5
EZZ (R [ $\mu\text{m}$ ])	2,9
EZZ (E [ $\mu\text{m}$ ])	1

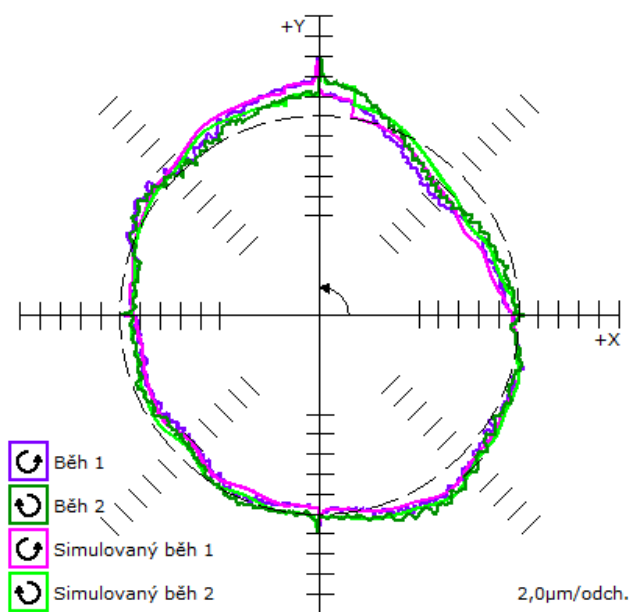


Obrázek 75 LI - polohování, verifikace, osa Z



**BALLBAR****Rovina X-Y**

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 76.



Obrázek 76 Ballbar, rovina X-Y

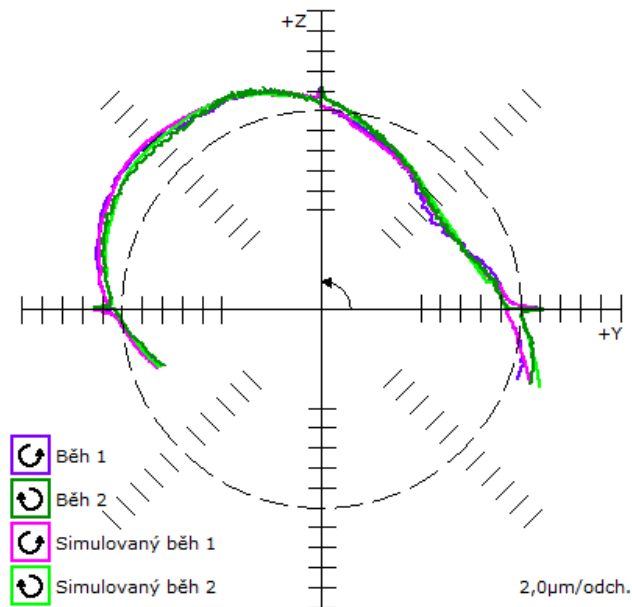
Tabulka 32 Naměřené hodnoty, rovina X-Y

Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,5
←	-0,4
Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	1,3
↓	0,1
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,1
←	0,6
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,1
↓	0,1
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	19,6
Přímocharost X [ $\mu\text{m}$ ]	-2,4
Přímocharost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-0,3
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-4,4
Chyba odměřování X [ppm]	-28,9
Chyba odměřování Y [ppm]	-14,1
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	23,5
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	9,4



### Rovina Y-Z

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 77.



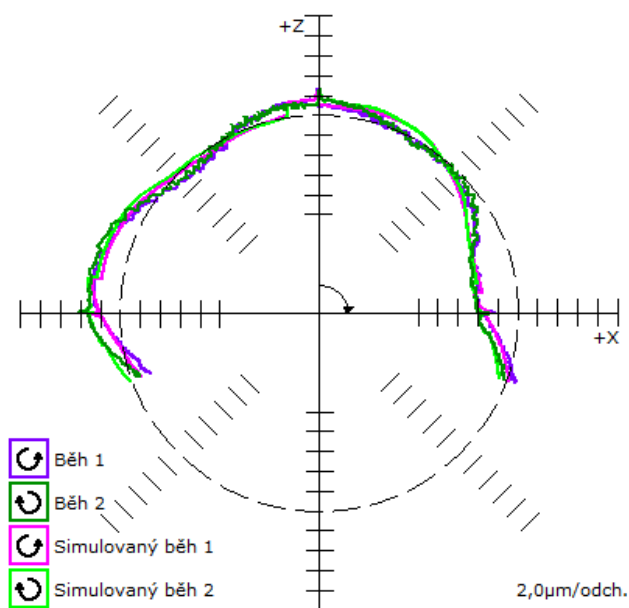
Obrázek 77 Ballbar, rovina Y-Z

Tabulka 33 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	1,2
←	0,1
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,2
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0,7
←	-0,1
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	0,2
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	65,9
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-1,2
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	3,9
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-1,1
Chyba odměřování Y [ppm]	-9
Chyba odměřování Z [ppm]	-5,5
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	40,9
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	10,5

### Rovina Z-X

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 78.



Obrázek 78 Ballbar, rovina Z-X

Tabulka 34 Naměřené hodnoty, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,3
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,2
←	-0,3
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,6
↓	0
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	0
←	-0,1
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	31,1
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	10,4
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	-0,9
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	2
Chyba odměřování Z [ppm]	-14,8
Chyba odměřování X [ppm]	-21,6
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	31,4
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	8,7



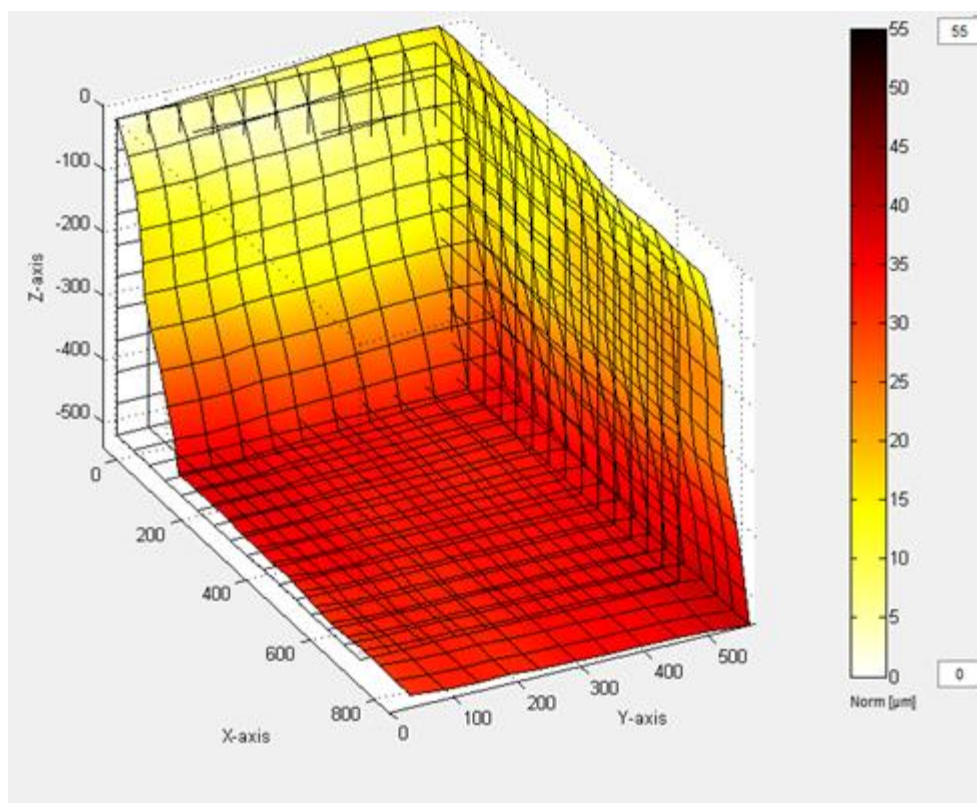
#### 4.4.2 LASERTRACER - MODEL FRB

##### KALIBRACE

Graf prostorové odchyly je vidět na obrázku: Obrázek 79.

Tabulka 35 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, kalibrace

	chyby	$U_{\max}$ (95%)		chyby	$U_{\max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	8	0,3	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	15,1	1,4
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	13,4	0,7	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	11,6	0,4
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	10,2	1	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	48,8	5,5
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	3,4	0,5	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	1,4	9,4
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	1,1	0,3	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	43,7	12,8
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	1,8	0,2	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	0,6	5,2
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	2,8	0,3	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	27,6	1,6
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	7	0,9	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-62,3	3,8
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	3,2	0,8	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	33,8	1,7
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	7,8	1,7			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	27	0,4	Prostorová odchylnka min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	25,7	0,5	Prostorová odchylnka max. [ $\mu\text{m}$ ]		39



Obrázek 79 Graf prostorové odchyly, model FRB, kalibrace

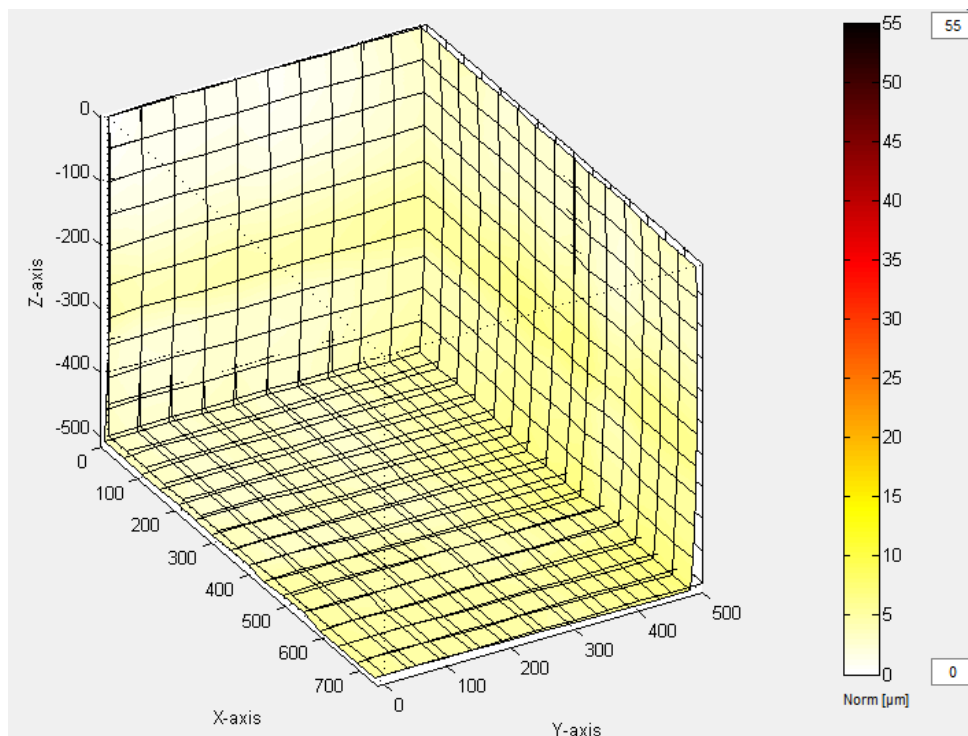


## VERIFIKACE

Graf prostorové odchyly je vidět na obrázku: Obrázek 80.

Tabulka 36 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, verifikace

	chyby	$U_{\max}$ (95%)		chyby	$U_{\max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	3,2	0,3	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	3,9	1,5
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	3,5	0,6	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	1,2	0,3
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	4,7	0,6	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	7,6	5,2
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	2,8	0,6	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	7,5	7,4
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	1,6	0,3	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	33,1	15,1
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	0,8	0,2	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	11,8	5,3
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	1,2	0,3	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	-1,5	1
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	1,3	1,1	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	0,4	4,4
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	1,4	0,7	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-3,2	0,9
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	7	1,5			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	4,6	0,5	Prostorová odchylka min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	2,2	0,5	Prostorová odchylka max. [ $\mu\text{m}$ ]		7

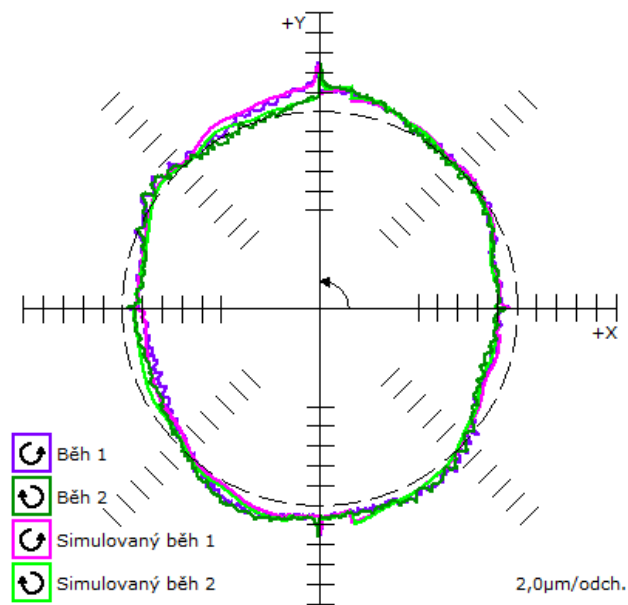


Obrázek 80 Graf prostorové odchyly, model FRB, verifikace

**BALLBAR****Rovina X-Y**

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 81.

Tabulka 37 Naměřené hodnoty, rovina X-Y



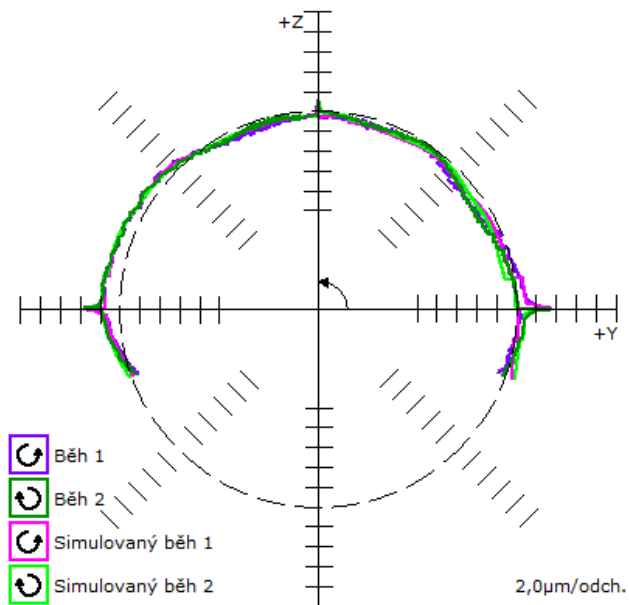
Obrázek 81 Ballbar, rovina X-Y

Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,3
←	-0,6
Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	1,1
↓	0
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,9
←	0,2
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,4
↓	0,4
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	1,6
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	1,7
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0,4
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-6,5
Chyba odměřování X [ppm]	-2
Chyba odměřování Y [ppm]	19,8
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	13,2
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	7,8



### Rovina Y-Z

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 82.



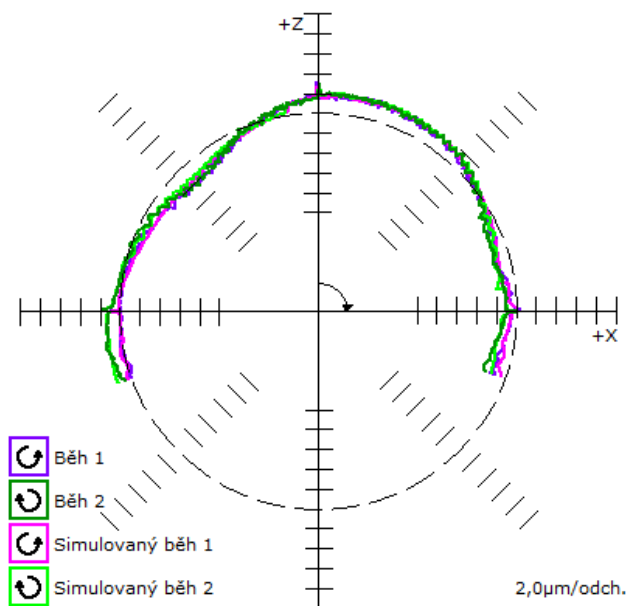
Obrázek 82 Ballbar, rovina Y-Z

Tabulka 38 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	1
←	0,1
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,1
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0,3
←	-0,1
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,3
↓	0,1
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	14,4
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-0,3
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	2,9
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	2,7
Chyba odměřování Y [ppm]	20,2
Chyba odměřování Z [ppm]	11,3
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	16,8
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	5,3

### Rovina Z-X

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 83.



Obrázek 83 Ballbar, rovina Z-X

Tabulka 39 Naměřené hodnoty, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,2
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,3
←	-0,4
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,3
↓	-0,1
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	0
←	0,1
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-7,3
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	3,9
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	-1,7
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	2,4
Chyba odměřování Z [ppm]	5,1
Chyba odměřování X [ppm]	-3,1
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	10,1
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	5,7



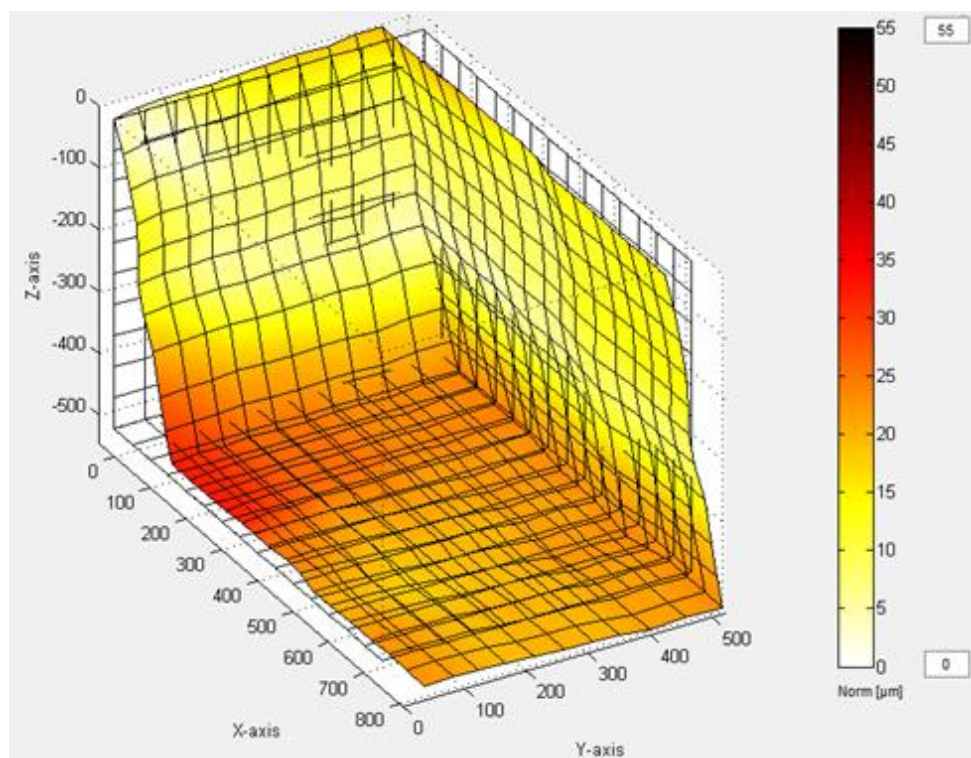
#### 4.4.3 LASERTRACER - MODEL RRB

##### KALIBRACE

Graf prostorové odchyšky je vidět na obrázku: Obrázek 84.

Tabulka 40 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, kalibrace

	chyby	$U_{\max}$ (95%)		chyby	$U_{\max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	5,4	0,2	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	19,5	1
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	15,8	0,4	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	13,3	0,4
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	10,6	0,7	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	5,6	0,4	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	4,5	0,3	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	5,8	0,1	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	3,5	0,2	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	23,3	0,5
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	9,4	0,2	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-54,4	0,4
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	1,9	0,2	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	30,5	0,3
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	15,2	1,3			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	27,7	0,5	Prostorová odchyška min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	21,9	0,4	Prostorová odchyška max. [ $\mu\text{m}$ ]		33



Obrázek 84 Graf prostorové odchyšky, model RRB, kalibrace

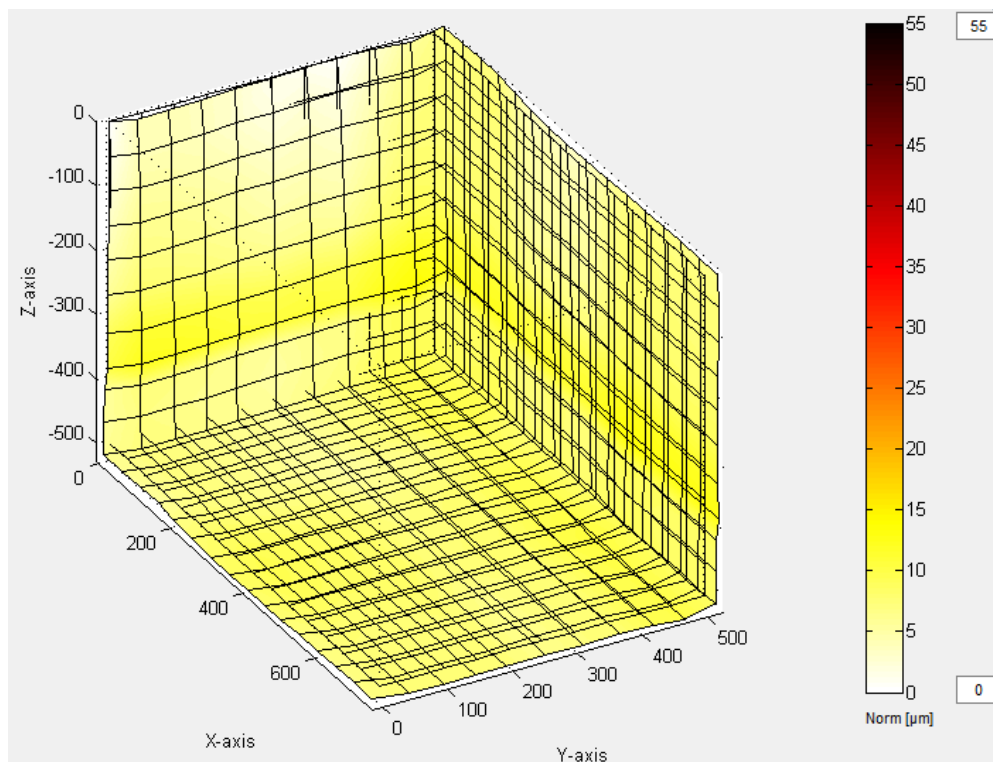


## VERIFIKACE

Graf prostorové odchyly je vidět na obrázku: Obrázek 85.

Tabulka 41 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, verifikace

	chyby	$U_{\max}$ (95%)		chyby	$U_{\max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	2,4	0,2	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	19,5	1,3
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	10,1	0,5	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	3,5	0,4
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	10,5	0,6	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	3,6	0,4	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	2,6	0,3	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	2,1	0,1	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	3	0,3	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	4,4	0,4
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	1,5	0,2	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-1,6	0,3
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	0,9	0,2	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-6,7	0,4
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	8,3	1,1			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	2,5	0,4	Prostorová odchylna min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	5,9	0,3	Prostorová odchylna max. [ $\mu\text{m}$ ]		14



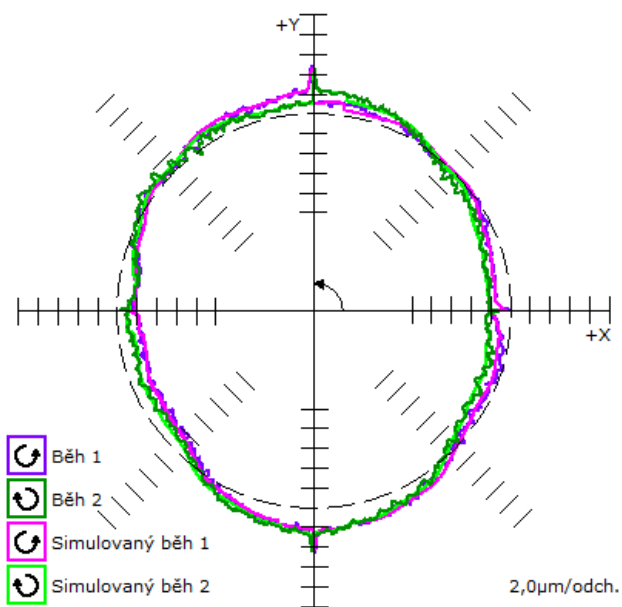
Obrázek 85 Graf prostorové odchyly, model RRB, verifikace



**BALLBAR****Rovina X-Y**

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 86.

Tabulka 42 Naměřené hodnoty, rovina X-Y



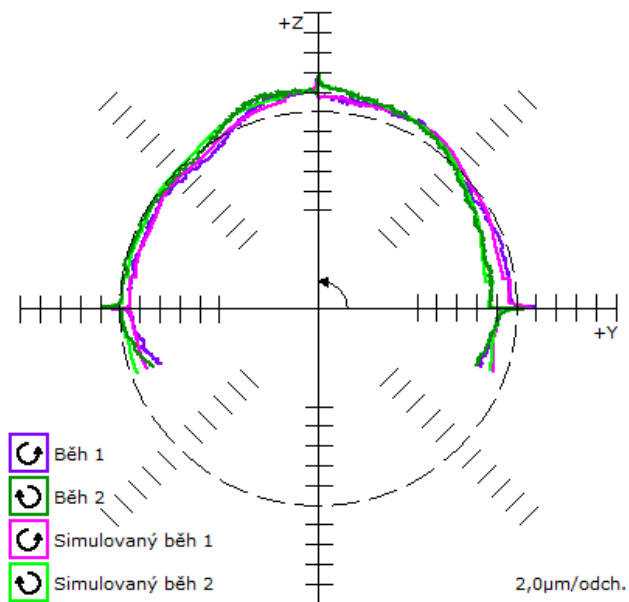
Obrázek 86 Ballbar, rovina X-Y

Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,2
←	-0,5
Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	1,4
↓	0
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,4
←	0,5
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	0,5
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	5,4
Přímočarost X [ $\mu\text{m}$ ]	1,9
Přímočarost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0,2
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-7,4
Chyba odměřování X [ppm]	11,8
Chyba odměřování Y [ppm]	36,6
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	23,9
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	7,4



### Rovina Y-Z

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 87.



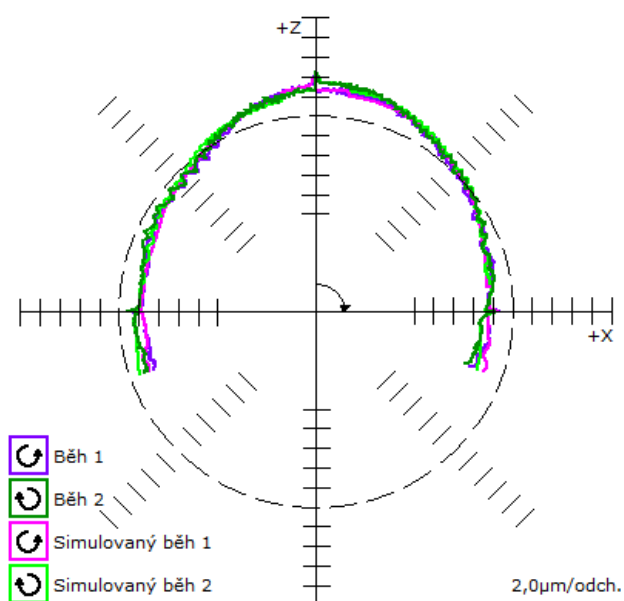
Obrázek 87 Ballbar, rovina Y-Z

Tabulka 43 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	1,3
←	0,1
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,5
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0,4
←	0,2
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	0,4
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	2,5
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	2,3
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-6,5
Chyba odměřování Y [ppm]	40,8
Chyba odměřování Z [ppm]	62,3
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	35,5
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	6,8

### Rovina Z-X

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 88.



Obrázek 88 Ballbar, rovina Z-X

Tabulka 44 Naměřené hodnoty, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,3
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,4
←	-0,4
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,2
↓	0
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	0,1
←	-0,1
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-5,4
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	1
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	0
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	9,6
Chyba odměřování Z [ppm]	50,2
Chyba odměřování X [ppm]	18,2
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	23,2
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	8,6



#### 4.4.4 VYHODNOCENÍ

##### LTc

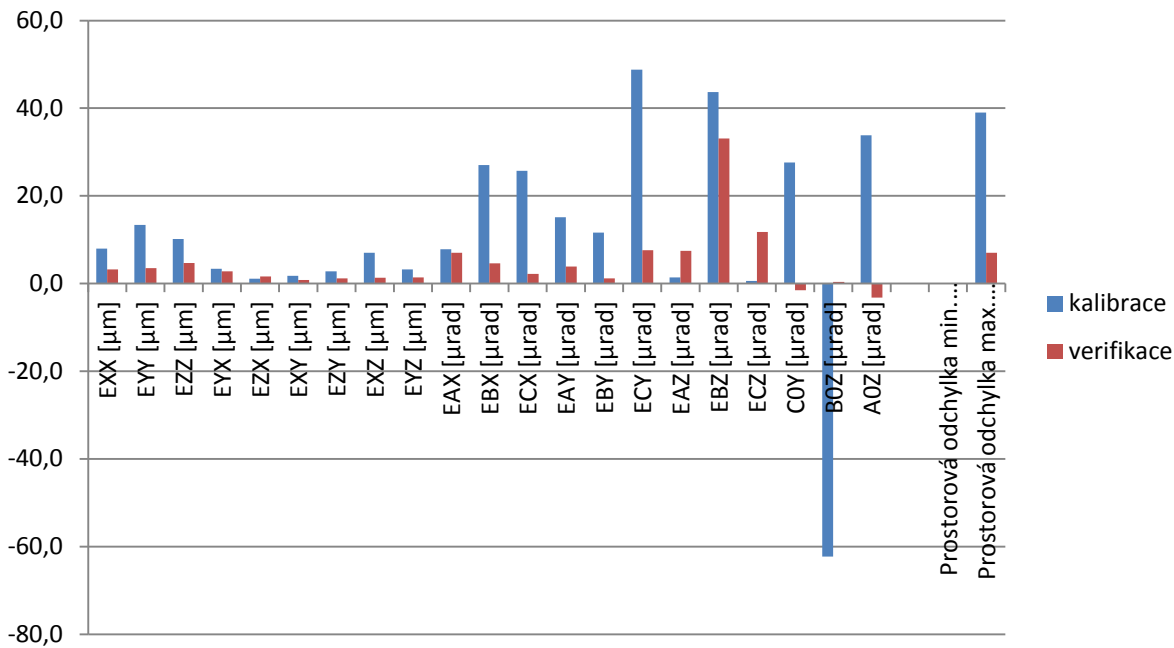
Pro model FRB je vidět porovnání kalibrace a verifikace v tabulce: Tabulka 45 a následně na obrázku: Obrázek 89. V tabulce je ještě uvedeno absolutní a procentuální zlepšení/zhoršení chyby.

Tabulka 45 Chyby modelu FRB

	kalibrace [ $\mu\text{m}$ ]	verifikace [ $\mu\text{m}$ ]	zlepšení/zhoršení chyb	
			absolutní [ $\mu\text{m}$ ]	procentuální [%]
EXX	8,0	3,2	4,8	60,0
EYY	13,4	3,5	9,9	73,9
EZZ	10,2	4,7	5,5	53,9
EYX	3,4	2,8	0,6	17,6
<b>EZX</b>	<b>1,1</b>	<b>1,6</b>	<b>-0,5</b>	<b>-45,5</b>
EXY	1,8	0,8	1,0	55,6
EZY	2,8	1,2	1,6	57,1
EXZ	7,0	1,3	5,7	81,4
EYZ	3,2	1,4	1,8	56,3
	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[%]
EAX	7,8	7,0	0,8	10,3
EBX	27,0	4,6	22,4	83,0
ECX	25,7	2,2	23,5	91,4
EAY	15,1	3,9	11,2	74,2
EBY	11,6	1,2	10,4	89,7
ECY	48,8	7,6	41,2	84,4
<b>EAZ</b>	<b>1,4</b>	<b>7,5</b>	<b>-6,1</b>	<b>-435,7</b>
EBZ	43,7	33,1	10,6	24,3
<b>ECZ</b>	<b>0,6</b>	<b>11,8</b>	<b>-11,2</b>	<b>-1866,7</b>
C0Y	27,6	-1,5	26,1	94,6
B0Z	-62,3	0,4	61,9	99,4
A0Z	33,8	-3,2	30,6	90,5
	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[%]
Prostorová odchylka min.	0,0	0,0	0,0	0,0
Prostorová odchylka max.	39,0	7,0	32,0	82,1



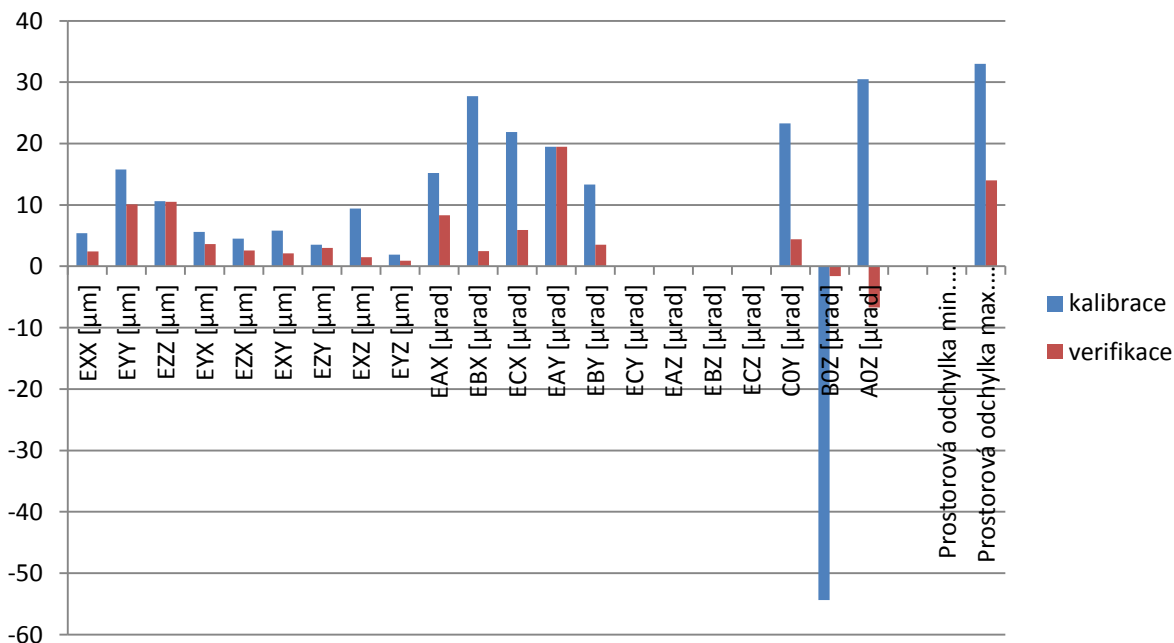
## DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obrázek 89 Graf chyb modelu FRB

U většiny chyb došlo k výraznému zlepšení, jen u chyb EZX, EAZ a ECZ došlo ke zhoršení. U chyby EZX je toto zhoršení zanedbatelné, ale u ostatních dvou, kde došlo ke zhoršení, je toto zhoršení podstatné. Nicméně se jedná pouze o dvě chyby z celkových 21 chyb, kde došlo k takovému zhoršení.

Pro model RRB je vidět porovnání kalibrace a verifikace v tabulce: Tabulka 46 a následně na obrázku: Obrázek 90. V tabulce je ještě uvedeno absolutní a procentuální zlepšení/zhoršení chyby.



Obrázek 90 Graf chyb modelu RRB



Tabulka 46 Chyby modelu RRB

	kalibrace [ $\mu\text{m}$ ]	verifikace [ $\mu\text{m}$ ]	zlepšení/zhoršení chyb	
			absolutní [ $\mu\text{m}$ ]	procentuální [%]
EXX	5,4	2,4	3,0	55,6
EYY	15,8	10,1	5,7	36,1
EZZ	10,6	10,5	0,1	0,9
EYX	5,6	3,6	2,0	35,7
EZX	4,5	2,6	1,9	42,2
EXY	5,8	2,1	3,7	63,8
EZY	3,5	3,0	0,5	14,3
EXZ	9,4	1,5	7,9	84,0
EYZ	1,9	0,9	1,0	52,6
	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[%]
EAX	15,2	8,3	6,9	45,4
EBX	27,7	2,5	25,2	91,0
ECX	21,9	5,9	16,0	73,1
EAY	19,5	19,5	0,0	0,0
EBY	13,3	3,5	9,8	73,7
ECY	-	-	-	-
EAZ	-	-	-	-
EBZ	-	-	-	-
ECZ	-	-	-	-
C0Y	23,3	4,4	18,9	81,1
B0Z	-54,4	-1,6	52,8	97,1
A0Z	30,5	-6,7	23,8	78,0
	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[%]
Prostorová odchylka min.	0,0	0,0	0,0	0,0
Prostorová odchylka max.	33,0	14,0	19,0	57,6

U všech chyb došlo ke zlepšení, jen u chyby EZZ nedošlo k téměř žádnému zlepšení a EAY nedošlo k téměř žádnému zlepšení.



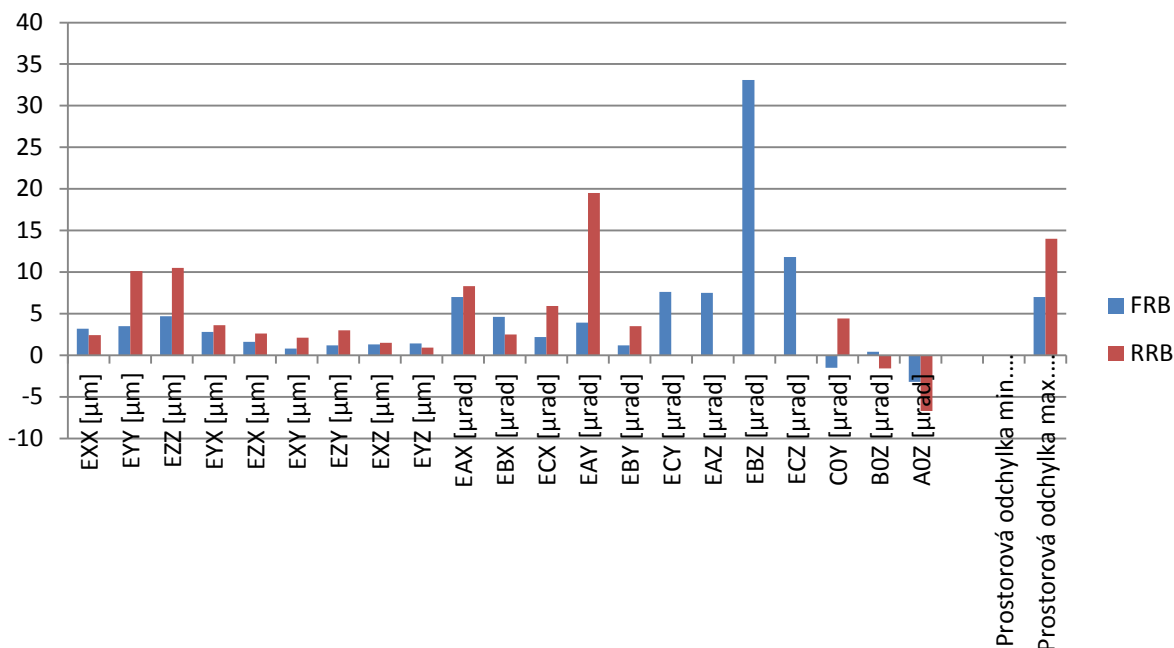
## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Nyní je nutno porovnat oba modely po verifikaci ještě mezi sebou, aby bylo vidět, který z modelů má lepší vliv na jednotlivé chyby. Porovnání je vidět v tabulce: Tabulka 47 a na obrázku: Obrázek 91. V tabulce je ještě uvedeno absolutní a procentuální zlepšení/zhoršení chyby.

Jako výchozí hodnota pro výpočet procentuální chyby je brána hodnota od modelu FRB a to z důvodu, že model FRB měří všech 21 chyb, které počítá z hodnot, které naměří z více bodů, tím získá více hodnot pro výpočet, a proto by měl být přesnější. To je vidět i v následující tabulce.

Tabulka 47 Porovnání chyb FRB a RRB

	FRB [μm]	RRB [μm]	zlepšení/zhoršení chyb	
			absolutní [μm]	procentuální [%]
EXX	3,2	2,4	0,8	25,0
EYY	3,5	10,1	-6,6	-188,6
EZZ	4,7	10,5	-5,8	-123,4
EYX	2,8	3,6	-0,8	-28,6
EZX	1,6	2,6	-1,0	-62,5
EXY	0,8	2,1	-1,3	-162,5
EZY	1,2	3,0	-1,8	-150,0
EXZ	1,3	1,5	-0,2	-15,4
EYZ	1,4	0,9	0,5	35,7
	[μrad]	[μrad]	[μrad]	[%]
EAX	7,0	8,3	-1,3	-18,6
EBX	4,6	2,5	2,1	45,7
ECX	2,2	5,9	-3,7	-168,2
EAY	3,9	19,5	-15,6	-400,0
EBY	1,2	3,5	-2,3	-191,7
ECY	7,6	-	-	-
EAZ	7,5	-	-	-
EBZ	33,1	-	-	-
ECZ	11,8	-	-	-
C0Y	-1,5	4,4	-2,9	-193,3
B0Z	0,4	-1,6	-1,2	-300,0
A0Z	-3,2	-6,7	-3,5	-109,4
	[μm]	[μm]	[μm]	[%]
Prostorová odchylka min.	0,0	0,0	0,0	0,0
Prostorová odchylka max.	7,0	14,0	-7,0	-100,0



Obrázek 91 Graf porovnání chyb FRB a RRB

Většina chyb po modelu FRB má nižší hodnoty. V případech, kdy jsou chyby větší, jde o pouze malé chyby. Zde má model FRB poloviční maximální prostorovou odchylku. Z důvodu, že model FRB má po kalibraci, při měření pomocí LTc, menší chyby a výše zmíněnou maximální prostorovou odchylku je vhodné vyhodnotit pro tuto konfiguraci měření, model FRB jako vhodnější pro kalibraci tohoto stroje.

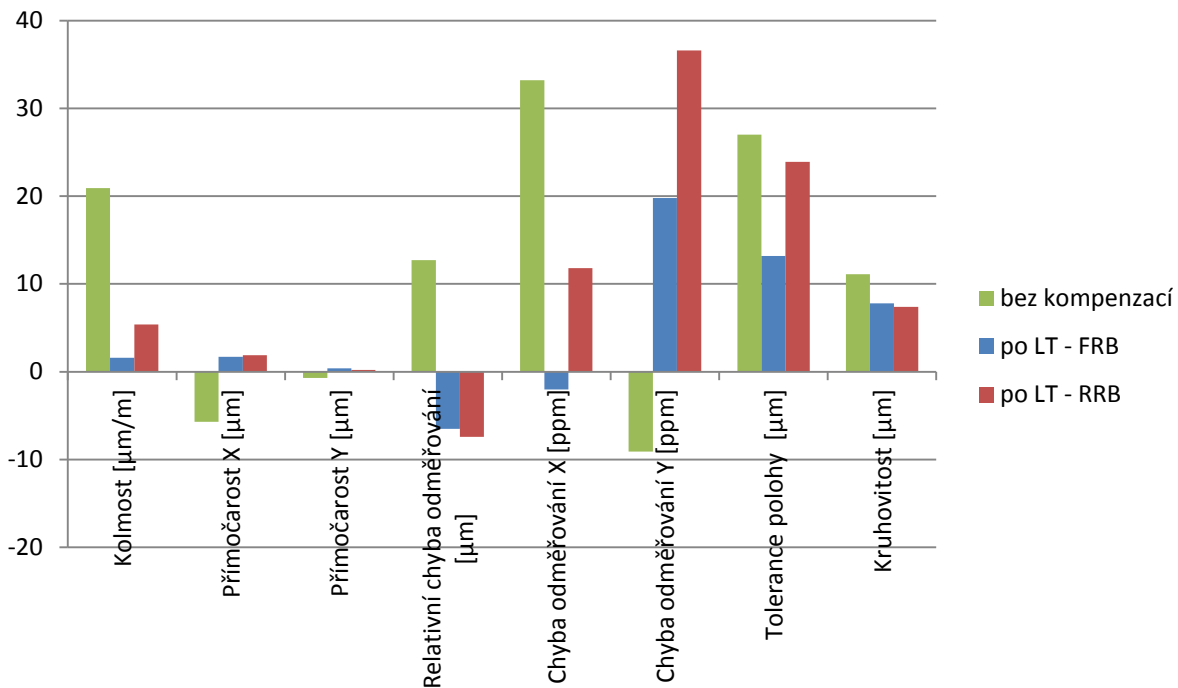
### DBB

Ověření proběhlo i pomocí DBB. Z grafů je jasné, že stav oproti stavu stroje bez kompenzací je podstatně lepší, a proto je zbytečné vyhodnocovat DBB v tabulce vůči počátečnímu stavu a bude dostačující, když v tabulce bude mezi sebou vyhodnocen pouze stav po měření modelů FRB a RRB. Vůči počátečnímu stavu pak bude vyhodnocen jen ten DBB, který je měřen po modelu, který bude vykazovat lepší vliv na chyby stroje.

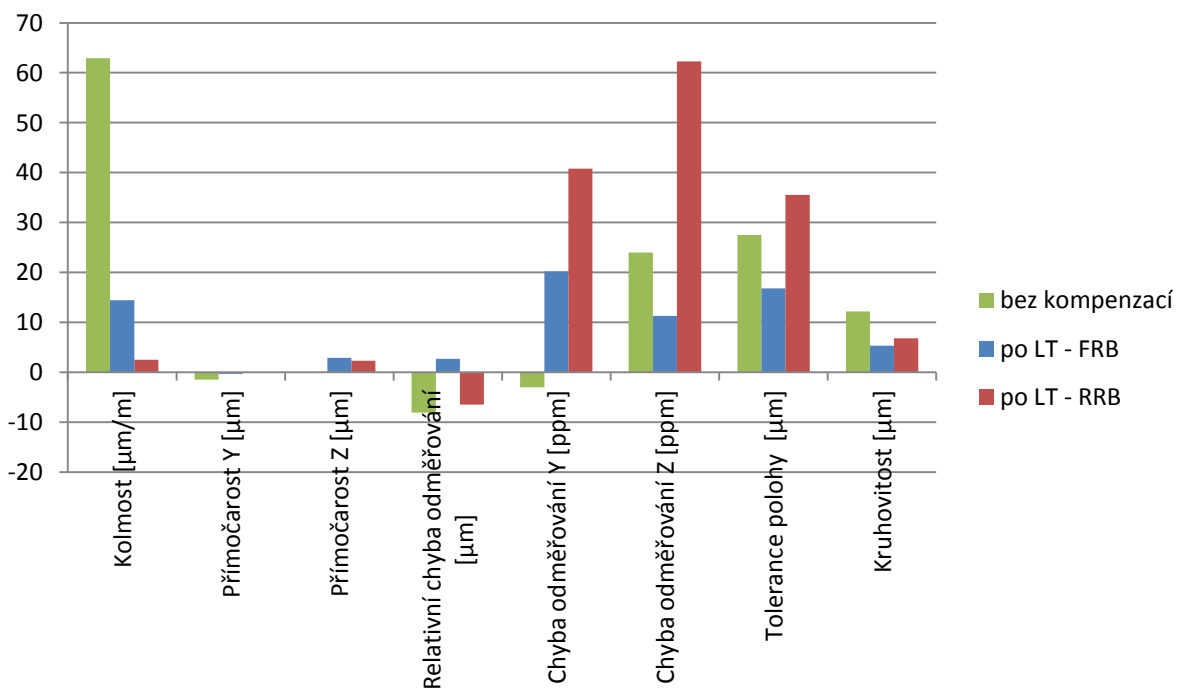
Porovnání modelů FRB a RRB je možné vidět v tabulce: Tabulka 48 a na obrázcích: Obrázek 92 pro rovinu XY, Obrázek 93 pro rovinu YZ a Obrázek 94 pro rovinu ZX.



DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obrázek 92 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina XY

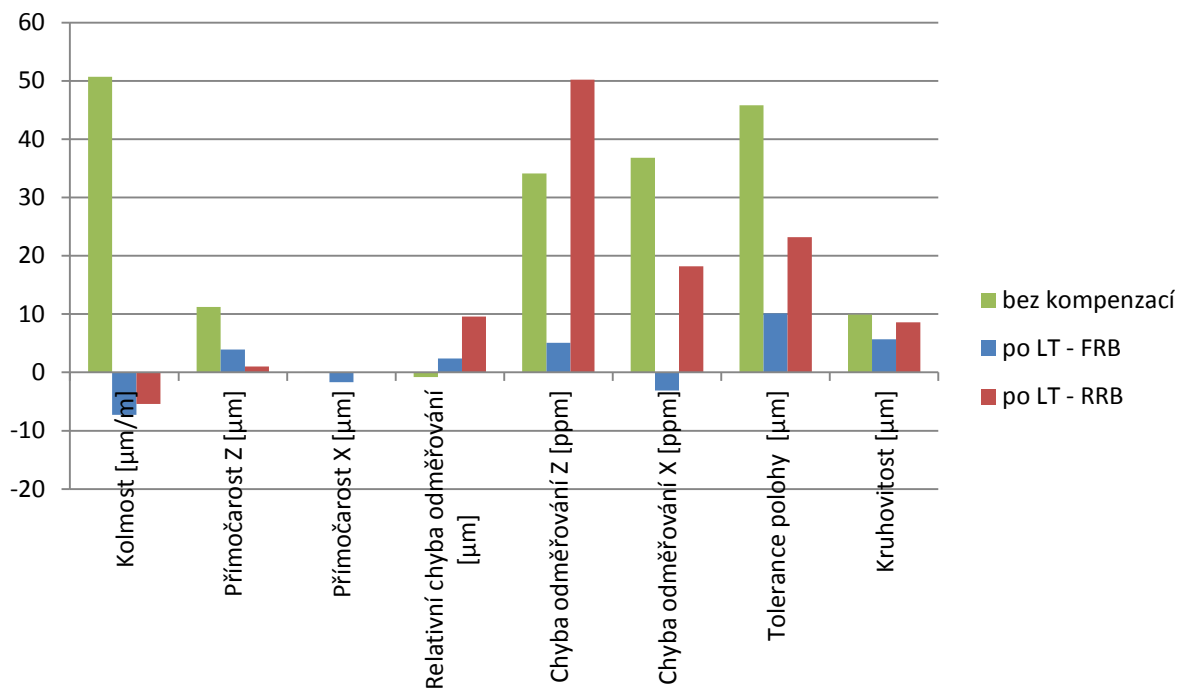


Obrázek 93 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina YZ





DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obrázek 94 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina ZX



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 48 DBB - porovnání modelů FRB a RRB

X-Y	po LT - FRB		po LT - RRB		zlepšení/zhoršení chyb	
	DBB 6		DBB 7		absolutní	procentuální
Kolmost	1,6	μm/m	5,4	μm/m	-3,8	-237,5
Přímočarost X	1,7	μm	1,9	μm	-0,2	-11,8
Přímočarost Y	0,4	μm	0,2	μm	0,2	50,0
Relativní chyba odměřování	-6,5	μm	-7,4	μm	-0,9	-13,8
Chyba odměřování X	-2,0	ppm	11,8	ppm	-9,8	-490,0
Chyba odměřování Y	19,8	ppm	36,6	ppm	-16,8	-84,8
Tolerance polohy	13,2	μm	23,9	μm	-10,7	-81,1
Kruhovitost	7,8	μm	7,4	μm	0,4	5,1
<b>Y-Z</b>						
Kolmost	14,4	μm/m	2,5	μm/m	11,9	82,6
Přímočarost Y	-0,3	μm	0,0	μm	0,3	100,0
Přímočarost Z	2,9	μm	2,3	μm	0,6	20,7
Relativní chyba odměřování	2,7	μm	-6,5	μm	-3,8	-140,7
Chyba odměřování Y	20,2	ppm	40,8	ppm	-20,6	-102,0
Chyba odměřování Z	11,3	ppm	62,3	ppm	-51,0	-451,3
Tolerance polohy	16,8	μm	35,5	μm	-18,7	-111,3
Kruhovitost	5,3	μm	6,8	μm	-1,5	-28,3
<b>Z-X</b>						
Kolmost	-7,3	μm/m	-5,4	μm/m	1,9	26,0
Přímočarost Z	3,9	μm	1,0	μm	2,9	74,4
Přímočarost X	-1,7	μm	0,0	μm	1,7	100,0
Relativní chyba odměřování	2,4	μm	9,6	μm	-7,2	-300,0
Chyba odměřování Z	5,1	ppm	50,2	ppm	-45,1	-884,3
Chyba odměřování X	-3,1	ppm	18,2	ppm	-15,1	-487,1
Tolerance polohy	10,1	μm	23,2	μm	-13,1	-129,7
Kruhovitost	5,7	μm	8,6	μm	-2,9	-50,9

Primárně je nutné se dívat na hodnoty kolmosti a kruhovitosti, a to ve všech třech rovinách. Při důkladném projití výše zmíněných parametrů je vidět, že je vhodnější model FRB. V případě, že je horší, tak se jedná pouze o malé rozdíly hodnot, ale když vykazuje lepší hodnoty, tak je rozdíl podstatnější. Jen tedy v případě chyby kolmosti v rovině Y-Z, tam je podstatně lepší model RRB. Nicméně z předchozího vyhodnocení LTc, má model FRB poloviční maximální prostorovou odchylku, proto v kombinaci s tímto vyhodnocením, je žádoucí posoudit model FRB jako vhodnější. Proto bude v celkovém zhodnocení posouzen DBB, který byl měřen po kalibraci pomocí tohoto modelu. Jedná se o DBB 6.



## 4.5 BLOK C3

Po naměření bloku C2, byly vypnuty volumetrické kompenzace a zůstala zapnutá jen tabulka polohové kompenzace. Na tuto kompenzaci byl aplikován blok C3, ve kterém proběhlo měření přímosti pomocí LI. Opět měření kalibrační, ze kterého vznikla kompenzační tabulka a pak i verifikační, aby byla ověřena správnost zavedení tabulky. Celé toto měření bylo znovu proměřeno i DBB.

### 4.5.1 LASERINTERFEROMETR - PŘÍMOST

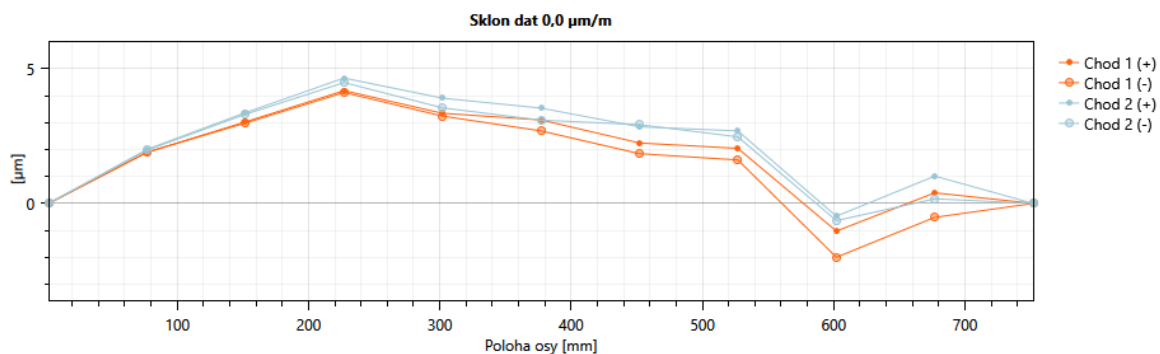
#### KALIBRACE

#### Osa X

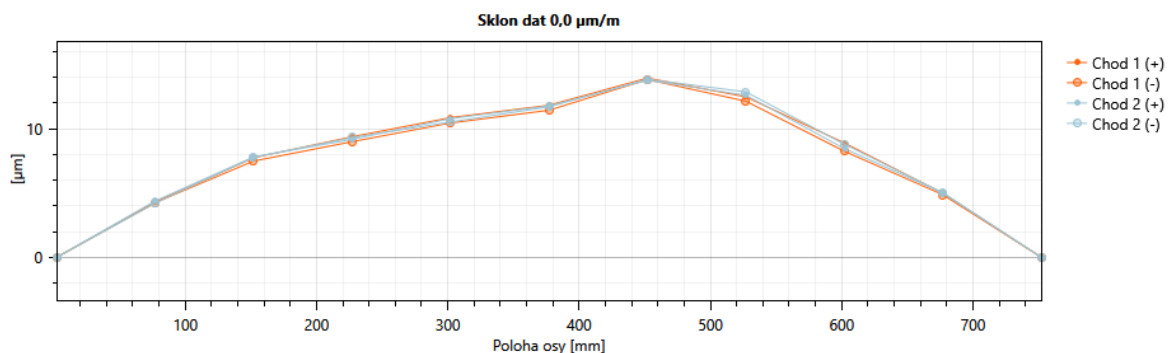
Graf přímosti osy X je vidět na obrázcích: Obrázek 95 pro chybu EYX a Obrázek 96 pro chybu EZX.

Tabulka 49 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa X

EYX [ $\mu\text{m}$ ]	6,7
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	14



Obrázek 95 LI - přímost po poloze, kalibrace, chyba EYX



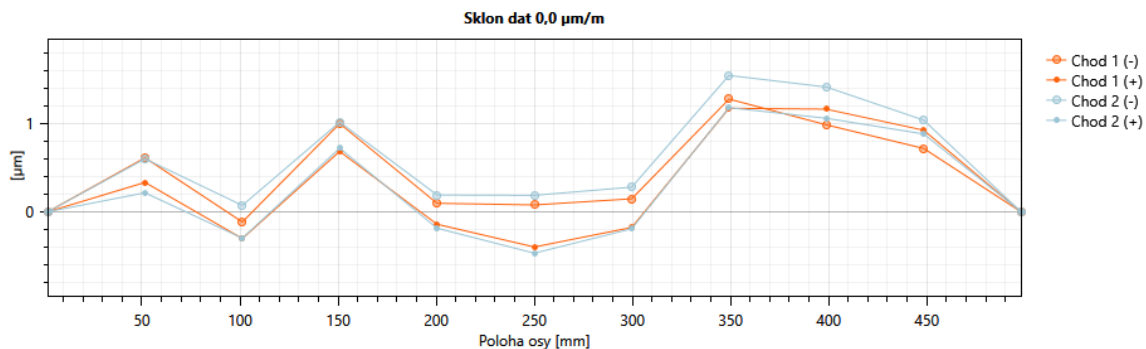
Obrázek 96 LI - přímost po poloze, kalibrace, chyba EZX

**Osa Y**

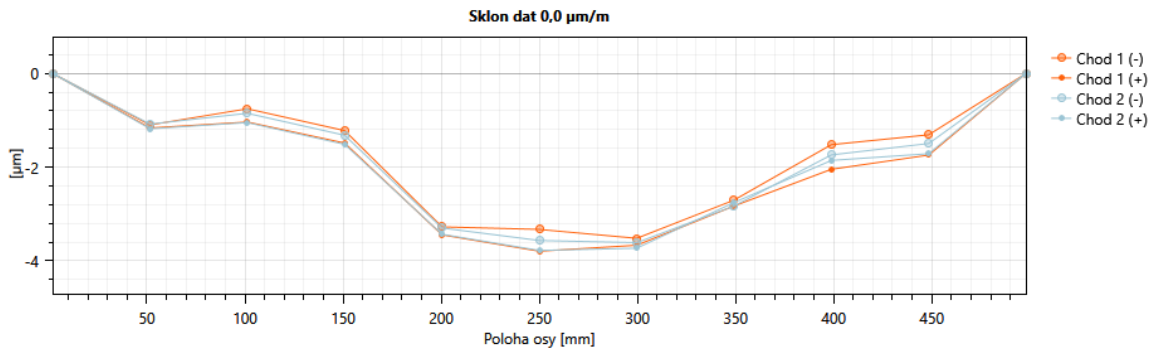
Graf přímosti osy Y je vidět na obrázcích: Obrázek 97 pro chybu EXY a Obrázek 98 pro chybu EZY.

Tabulka 50 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Y

EXY [ $\mu\text{m}$ ]	2
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	3,8



Obrázek 97 LI - přímost, kalibrace po poloze, chyba EXY



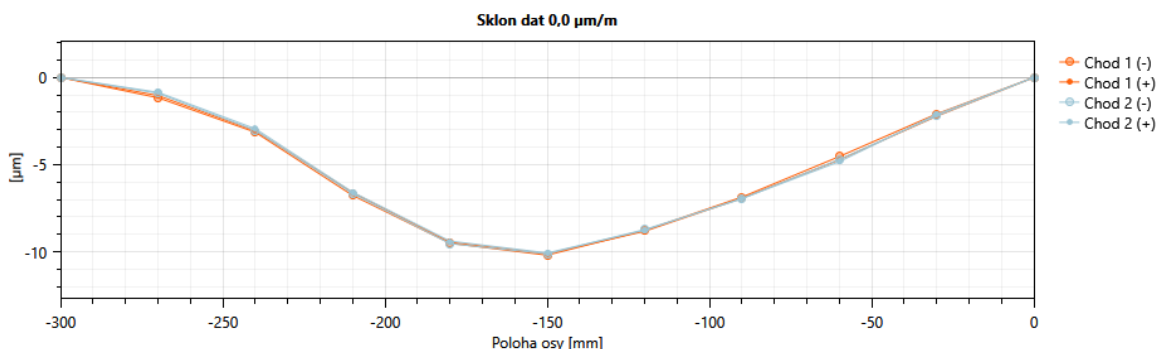
Obrázek 98 LI - přímost, kalibrace po poloze, chyba EZY

**Osa Z**

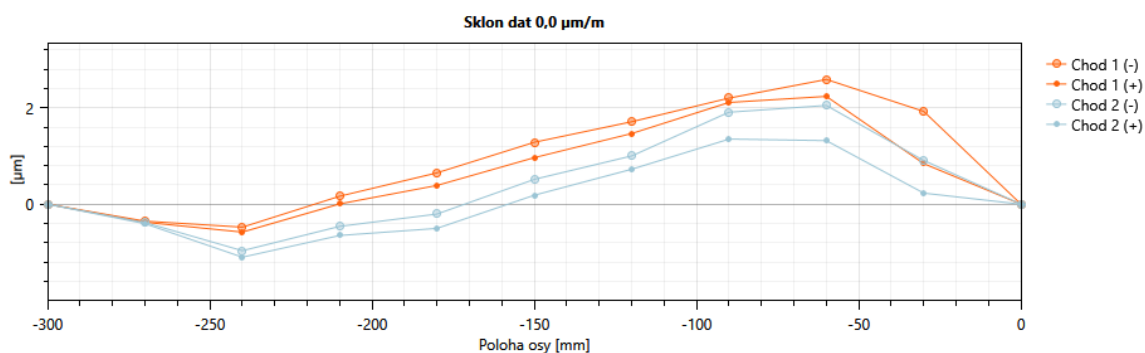
Graf přímosti osy Z je vidět na obrázcích: Obrázek 99 pro chybu EXZ a Obrázek 100 pro chybu EYZ.

Tabulka 51 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Z

EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	10,2
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	3,7



Obrázek 99 LI - přímost po poloze, kalibrace, chyba EXZ



Obrázek 100 LI - přímost po poloze, kalibrace, chyba EYZ

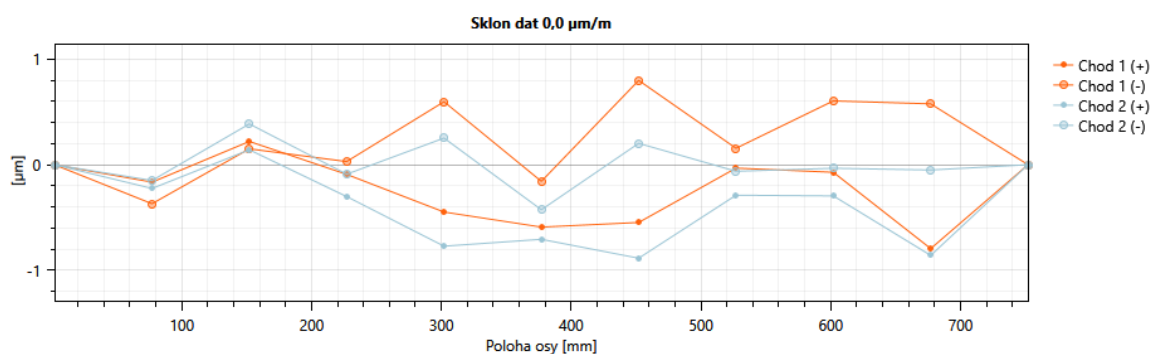
## VERIFIKACE

### Osa X

Graf přímosti osy X je vidět na obrázcích: Obrázek 101 po chybu EYX a Obrázek 102 EZX.

Tabulka 52 Naměřené hodnoty, verifikace, osa X

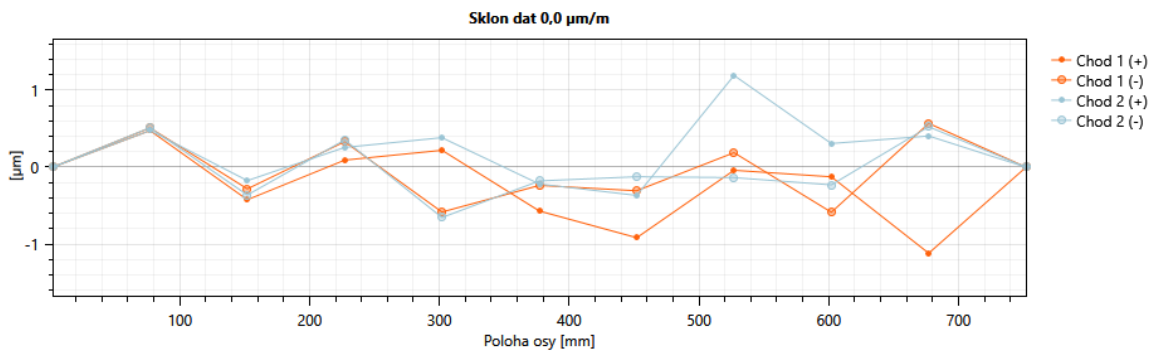
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	1,7
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	2,3



Obrázek 101 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EYX



## DIPLOMOVÁ PRÁCE



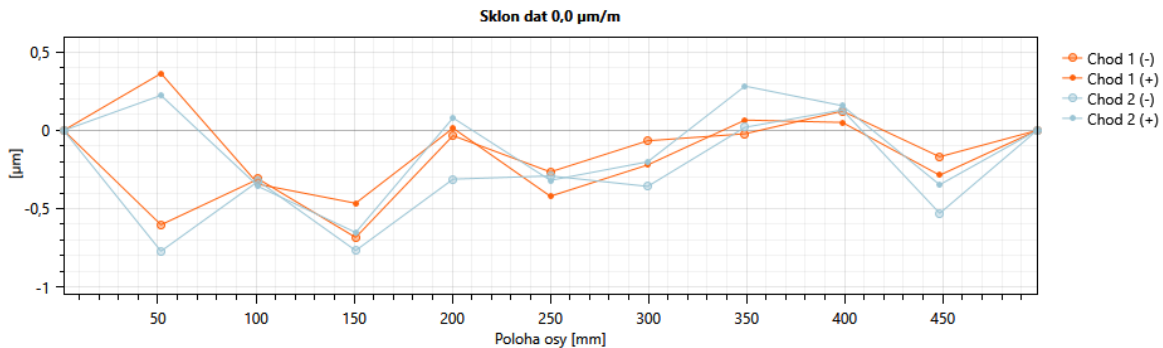
Obrázek 102 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EZX

## Osa Y

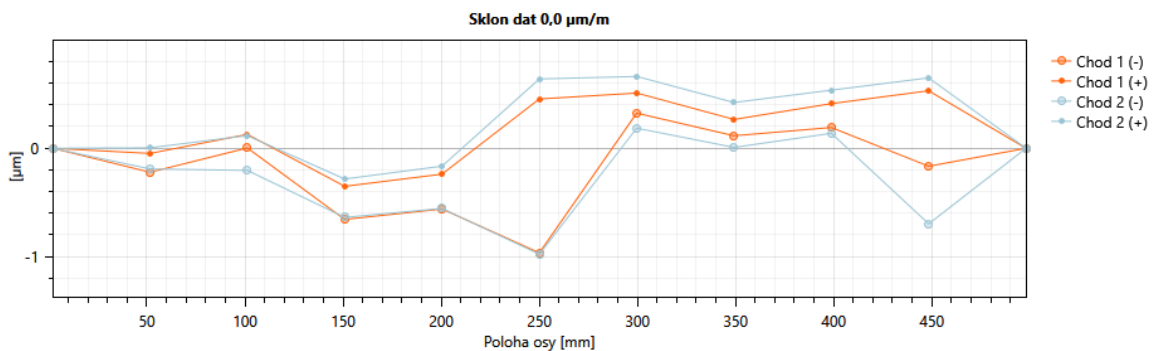
Graf přímosti osy Y je vidět na obrázcích: Obrázek 103 pro chybu EXY a Obrázek 104 pro chybu EZY.

Tabulka 53 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Y

EXY [ $\mu\text{m}$ ]	1,1
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	1,6



Obrázek 103 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EXY



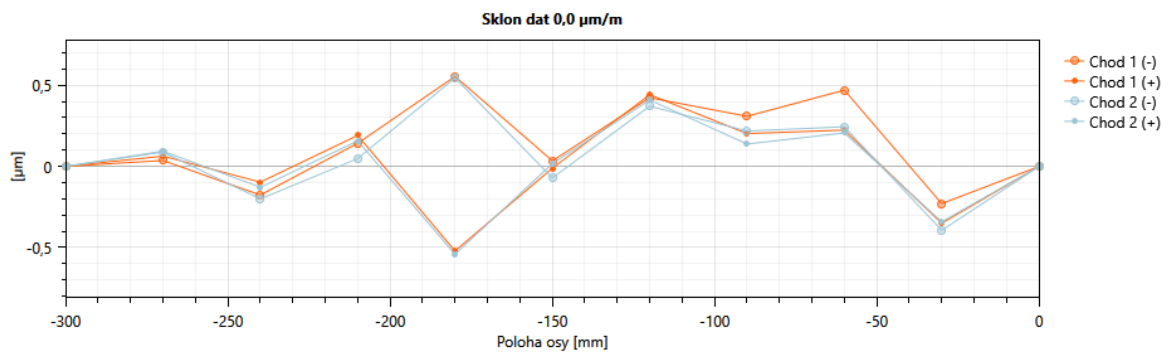
Obrázek 104 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EZY

**Osa Z**

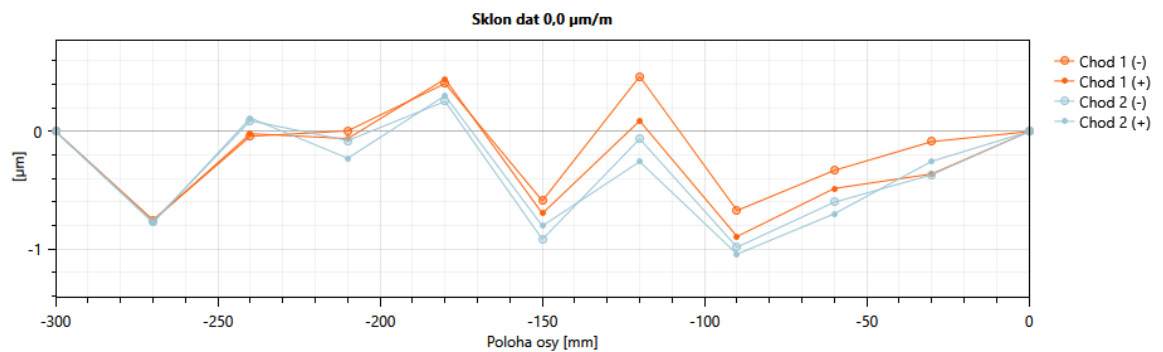
Graf přímosti osy Z je vidět na obrázcích: Obrázek 105 pro chybu EXZ a Obrázek 106 pro chybu EYZ.

Tabulka 54 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Z

EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	1,1
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	1,5



Obrázek 105 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EXZ

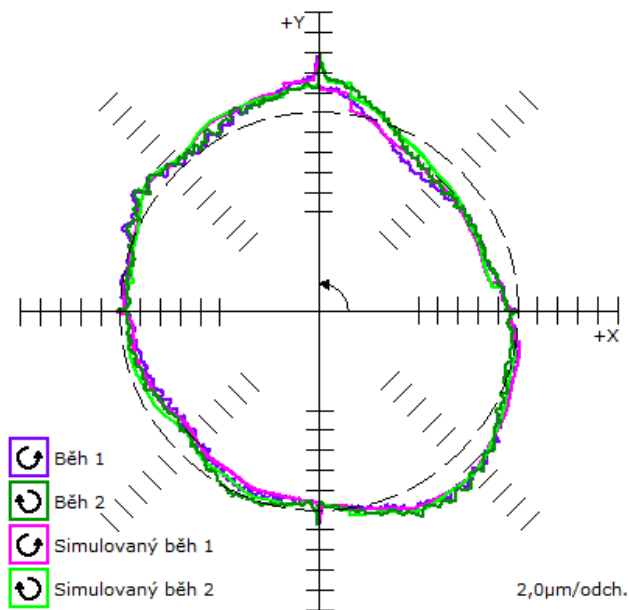


Obrázek 106 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EYZ

**BALLBAR****Rovina X-Y**

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 107.

Tabulka 55 Naměřené hodnoty, rovina X-Y



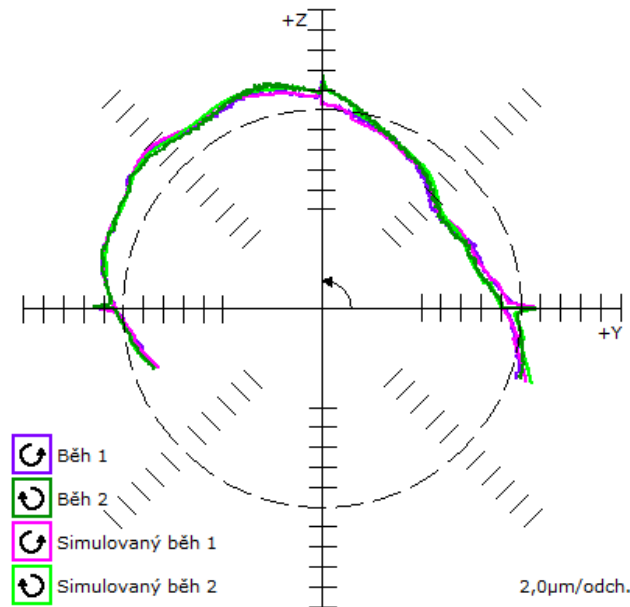
Obrázek 107 Ballbar, rovina X-Y

Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,2
←	-0,6
Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	1
↓	0,1
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	0,6
←	1,4
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,4
↓	0,1
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	24,5
Přímocharost X [ $\mu\text{m}$ ]	-1,9
Přímocharost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0,8
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-3,4
Chyba odměřování X [ppm]	14,1
Chyba odměřování Y [ppm]	25,4
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	23,7
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	9



**Rovina Y-Z**

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 108.



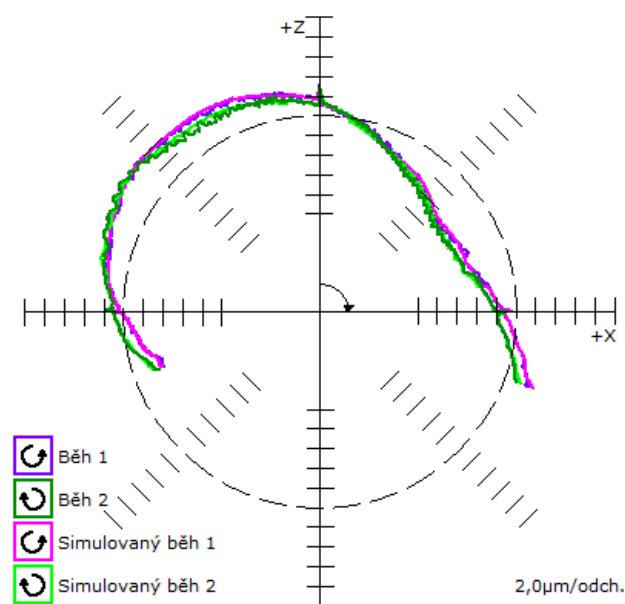
Obrázek 108 Ballbar, rovina Y-Z

Tabulka 56 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	1,1
←	0,4
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0,1
←	0,2
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,7
↓	0,2
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	56,9
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-1,6
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	4,6
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-2,2
Chyba odměřování Y [ppm]	28,7
Chyba odměřování Z [ppm]	36
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	42,2
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	8,8

**Rovina Z-X**

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 109.



Obrázek 109 Ballbar, rovina Z-X

Tabulka 57 Naměřené hodnoty, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,5
←	-0,4
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,4
↓	-0,2
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,9
←	-0,3
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	64,4
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	5,1
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	-1,3
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	2,5
Chyba odměřování Z [ppm]	24,8
Chyba odměřování X [ppm]	16,5
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	42,5
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	10



## 4.6 BLOK C4

Po bloku C3 byly znovu vypnuty všechny kompenzace. Nyní byla naměřena přímost pomocí LI (pouze kalibrační měření) a vytvořena kompenzační tabulka, která byla následně naměřena pomocí DBB. Na kompenzační tabulku přímosti bylo aplikováno měření polohy pomocí LI, zde bylo měření jak kalibrační tak verifikační. Z kalibračního měření vznikla kompenzační tabulka, která byla následně ověřena LI a opět naměřena i DBB. V závěru tohoto bloku bylo opět provedeno měření pomocí LTc, tak jako v bloku C1 a C2. Opět z obou modelů vznikly volumetrické tabulky, které byly ověřeny verifikačním měřením LTc a i DBB.

### 4.6.1 LASERINTERFEROMETR - PŘÍMOST

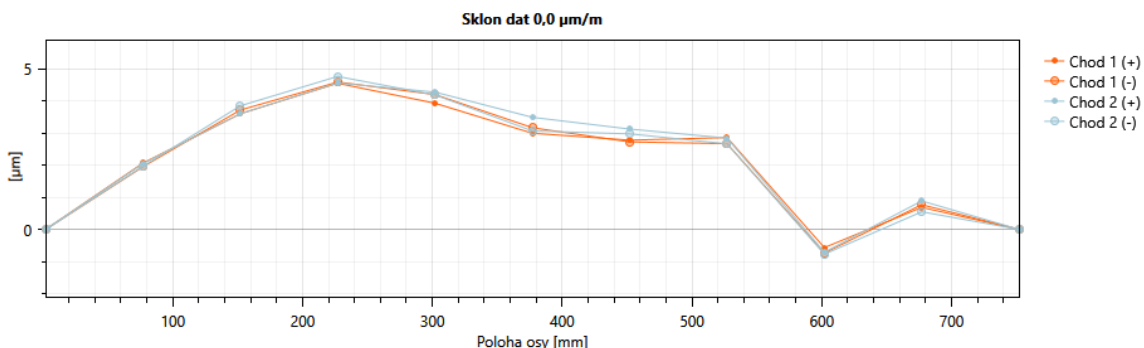
#### KALIBRACE

#### Osa X

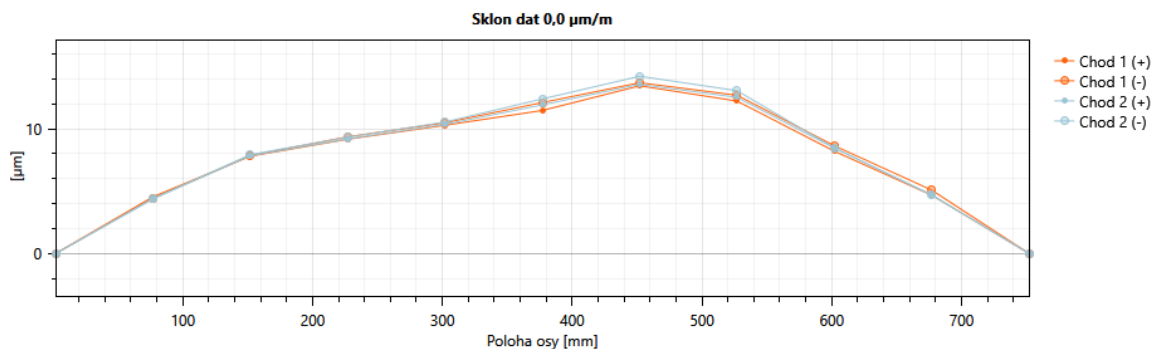
Graf přímosti osy X je vidět na obrázcích: Obrázek 110 pro chybu EYX a Obrázek 111 pro chybu EZX.

Tabulka 58 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa X

EYX [ $\mu\text{m}$ ]	5,5
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	14,2



Obrázek 110 LI - přímost, kalibrace, chyba EYX



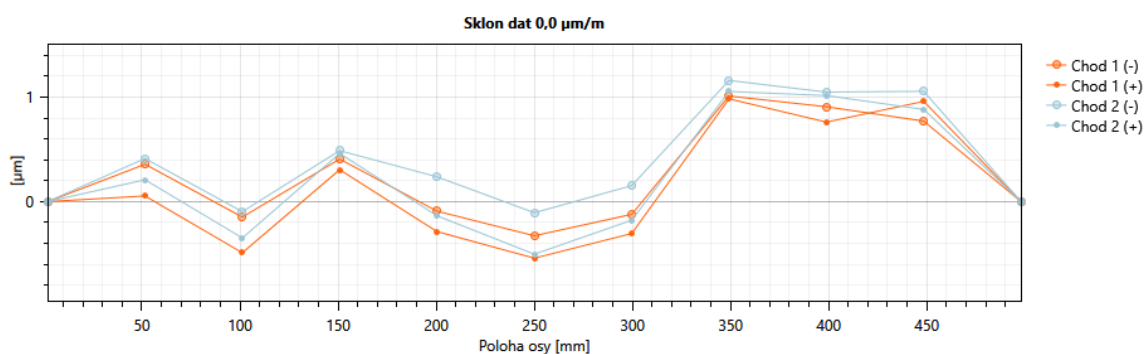
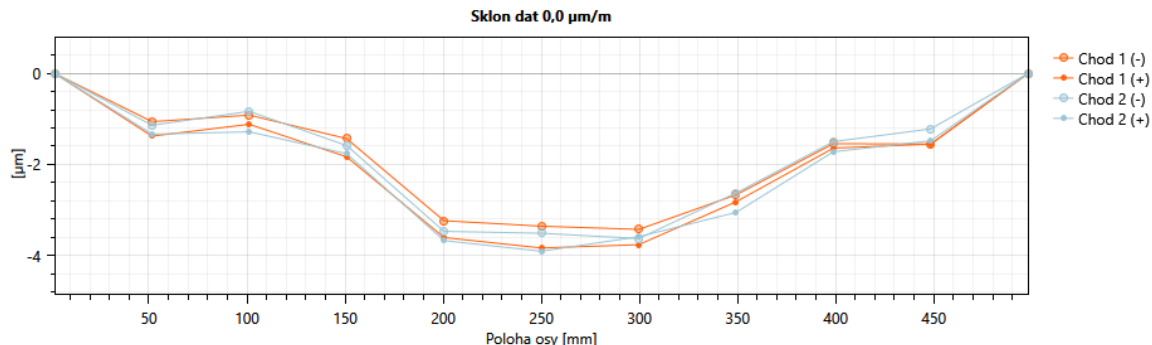
Obrázek 111 LI - přímost, kalibrace, chyba EZX

**Osa Y**

Graf přímosti osy Y je vidět na obrázcích: Obrázek 112 pro chybu EXY a Obrázek 113 pro chybu EZY.

*Tabulka 59 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Y*

EXY [ $\mu\text{m}$ ]	1,7
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	3,9

*Obrázek 112 LI - přímost, kalibrace, chyba EXY**Obrázek 113 LI - přímost, kalibrace, chyba EZY***Osa Z**

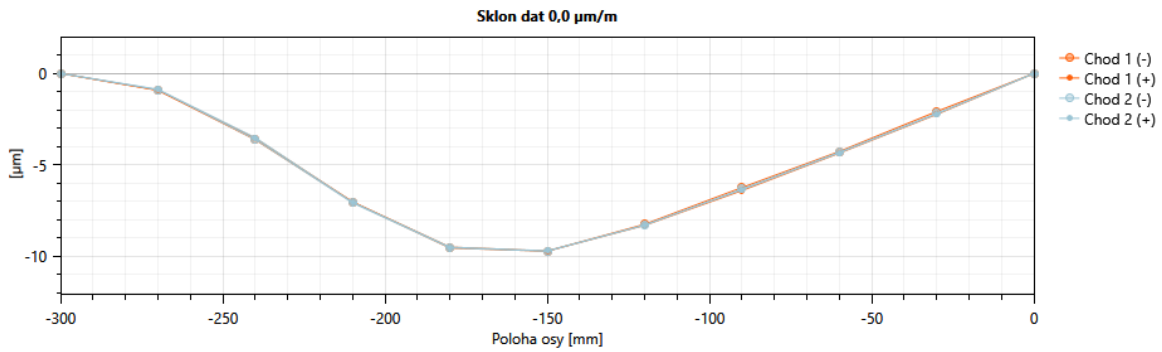
Graf přímosti osy Z je vidět na obrázcích: Obrázek 114 pro chybu EXZ a Obrázek 115 pro chybu EYZ.

*Tabulka 60 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Z*

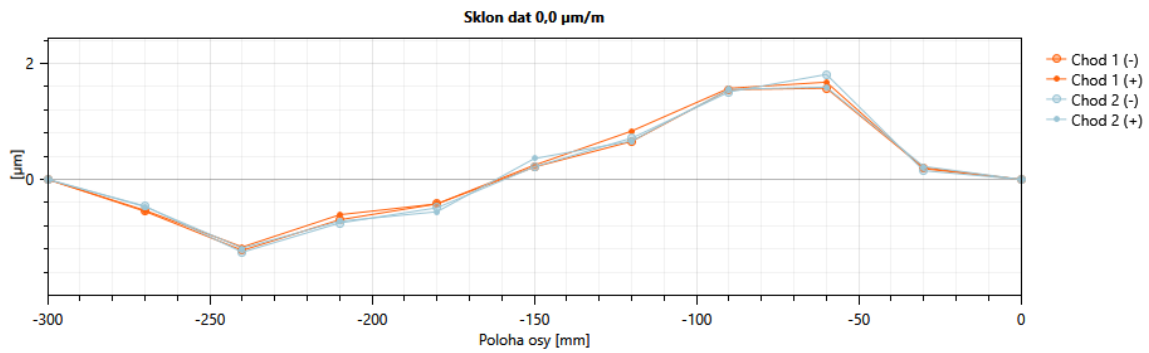
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	9,7
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	3,1



DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obrázek 114 LI - přímost, kalibrace, chyba EXZ

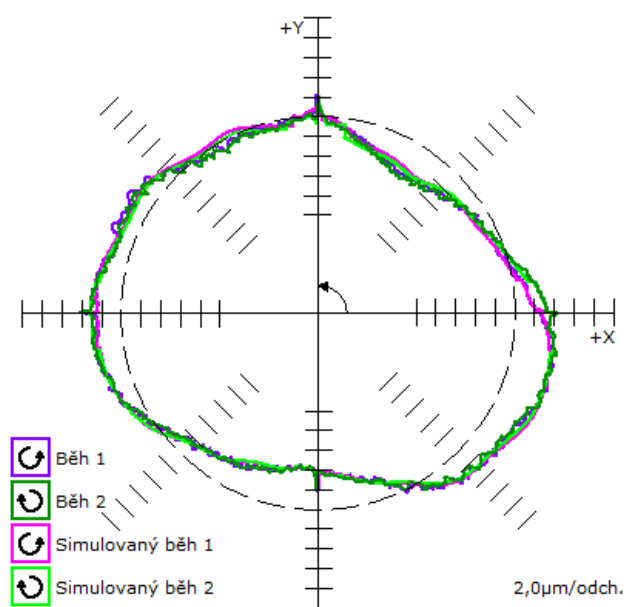


Obrázek 115 LI - přímost, kalibrace, chyba EYZ

**BALLBAR****Rovina X-Y**

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 116.

Tabulka 61 Naměřené hodnoty, rovina X-Y



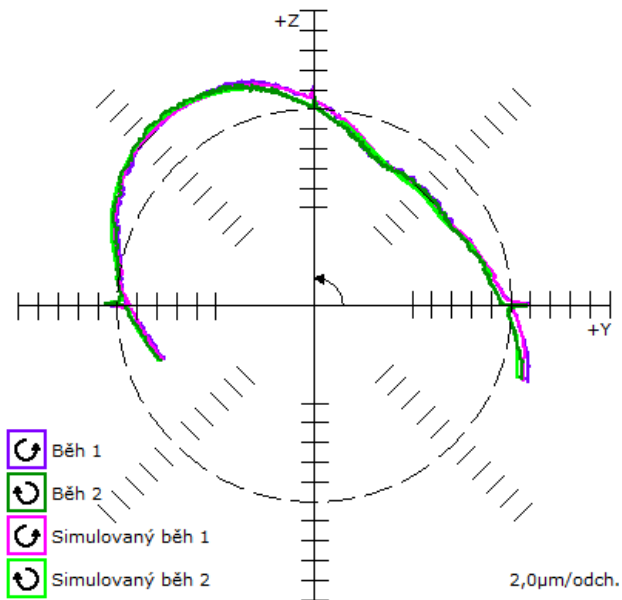
Obrázek 116 Ballbar, rovina X-Y

Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,4
←	0
Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	0,1
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-1,4
←	-0,6
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,5
↓	0,6
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	22,8
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	-4,5
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0,2
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	10,3
Chyba odměřování X [ppm]	43,5
Chyba odměřování Y [ppm]	9
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	31,5
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	9,1



### Rovina Y-Z

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 117.



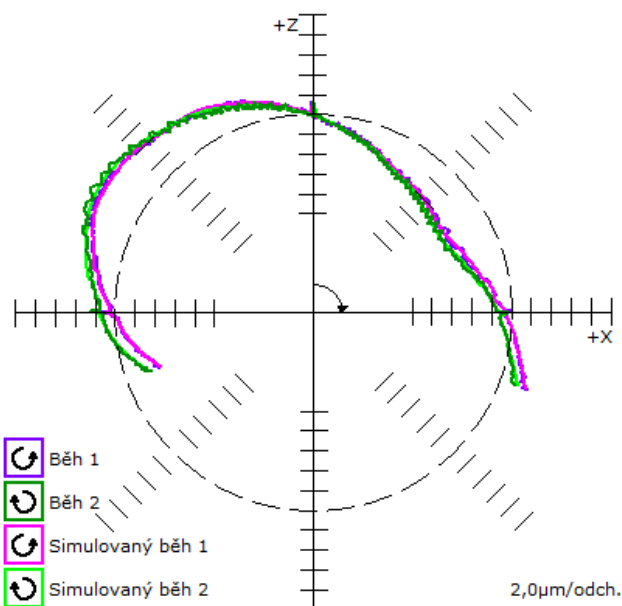
Obrázek 117 Ballbar, rovina Y-Z

Tabulka 62 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0
←	-0,1
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,1
←	0,2
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-1,1
↓	0,2
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	51,5
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0,1
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	-2,5
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-2,6
Chyba odměřování Y [ppm]	15,6
Chyba odměřování Z [ppm]	24,4
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	34,3
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	9,2

### Rovina Z-X

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 118.



Obrázek 118 Ballbar, rovina Z-X

Tabulka 63 Naměřené hodnoty, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,2
←	-0,3
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	-0,3
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,8
←	-0,1
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	69
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	4,8
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	0,1
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-0,2
Chyba odměřování Z [ppm]	47,5
Chyba odměřování X [ppm]	48
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	54,9
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	11,1



#### 4.6.2 LASERINTERFEROMETR - POLOHA

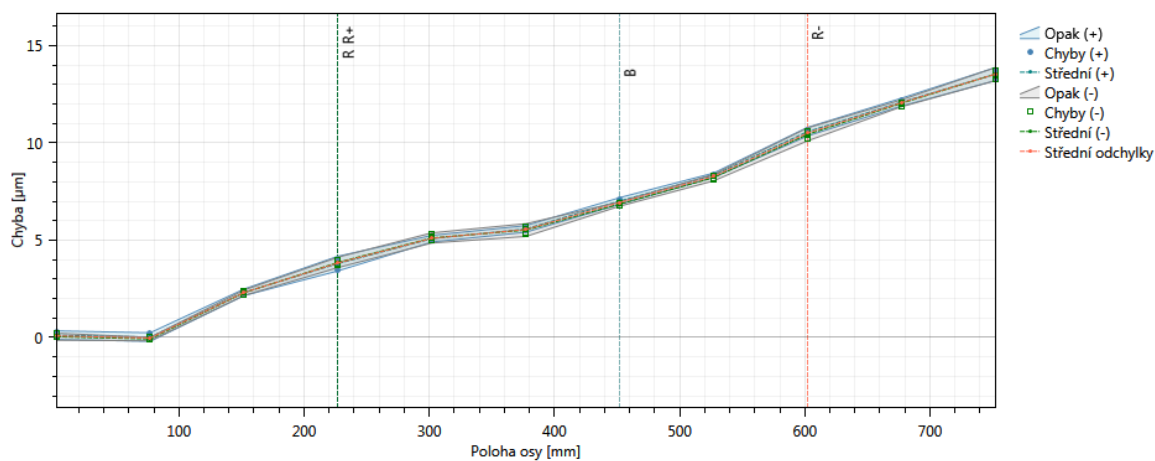
##### KALIBRACE

##### Osa X

Graf přesnosti najetí do polohy osy X je vidět na obrázku: Obrázek 119.

Tabulka 64 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa X

EXX (A [ $\mu\text{m}$ ])	14,1
EXX (R [ $\mu\text{m}$ ])	0,7
EXX (E [ $\mu\text{m}$ ])	13,6



Obrázek 119 LI - polohování po přímosti, kalibrace, osa X

##### Osa Y

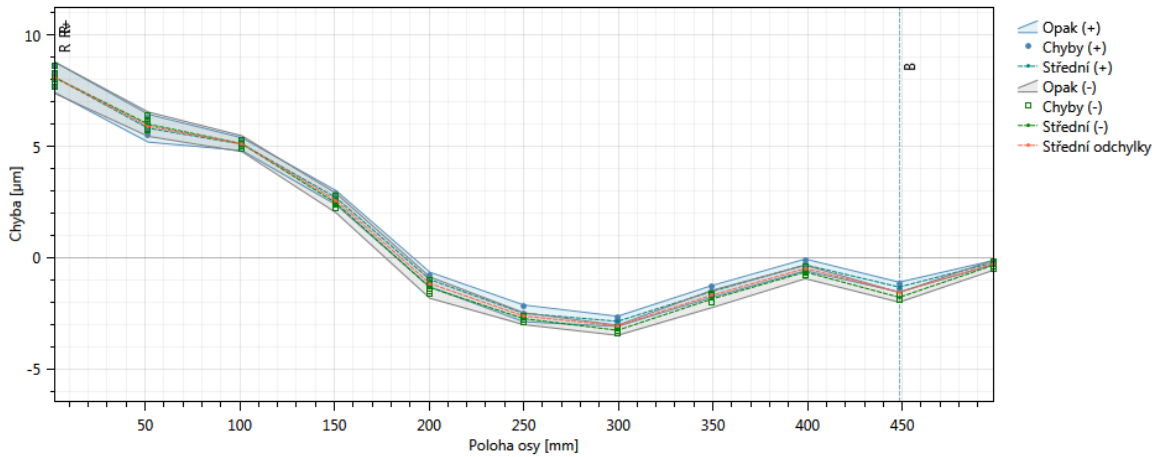
Graf přesnosti najetí do polohy osy Y je vidět na obrázku: Obrázek 120.

Tabulka 65 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Y

EYY (A [ $\mu\text{m}$ ])	12,3
EYY (R [ $\mu\text{m}$ ])	1,4
EYY (E [ $\mu\text{m}$ ])	11,4



# DIPLOMOVÁ PRÁCE



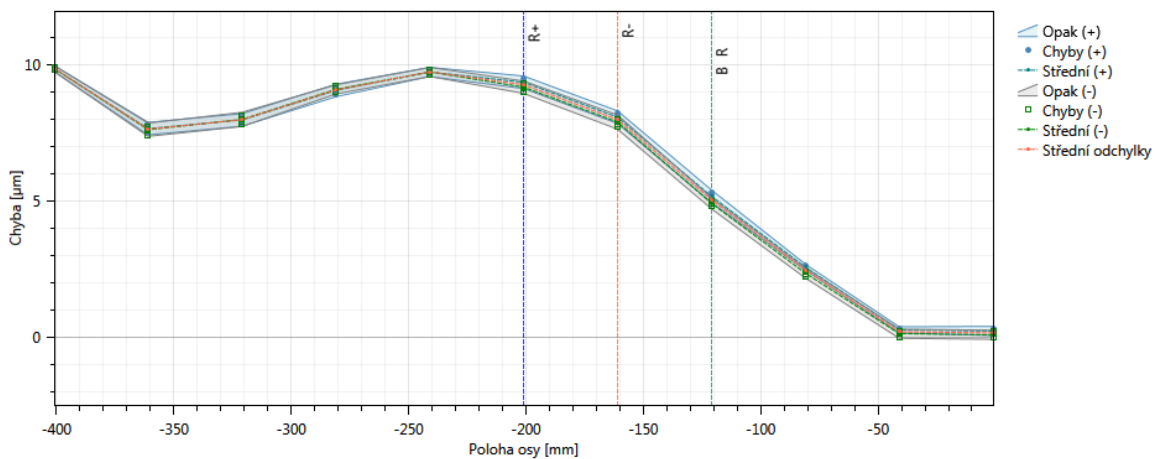
Obrázek 120 LI - polohování po přímosti, kalibrace, osa Y

## Osa Z

Graf přesnosti najetí do polohy osy Z je vidět na obrázku: Obrázek 121.

Tabulka 66 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Z

EZZ (A [ $\mu\text{m}$ ])	10
EZZ (R [ $\mu\text{m}$ ])	0,7
EZZ (E [ $\mu\text{m}$ ])	9,8



Obrázek 121 LI - polohování po přímosti, kalibrace, osa Z





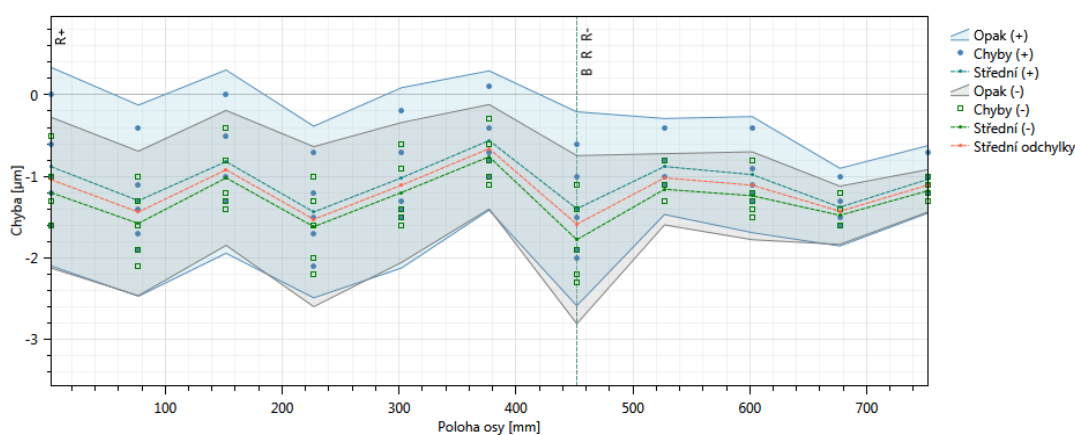
## VERIFIKACE

## Osa X

Graf přesnosti najetí do polohy osy X je vidět na obrázku: Obrázek 122.

Tabulka 67 Naměřené hodnoty, verifikace, osa X

EXX (A [ $\mu\text{m}$ ])	3,2
EXX (R [ $\mu\text{m}$ ])	2,6
EXX (E [ $\mu\text{m}$ ])	1,2



Obrázek 122 LI - polohování po přímosti, verifikace, osa X

## Osa Y

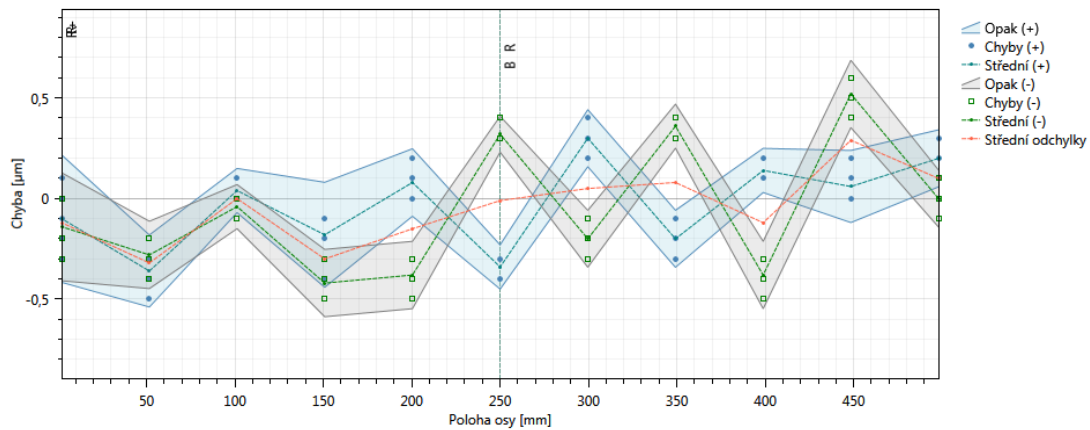
Graf přesnosti najetí do polohy osy Y je vidět na obrázku Obrázek 123.

Tabulka 68 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Y

EYY (A [ $\mu\text{m}$ ])	1,3
EYY (R [ $\mu\text{m}$ ])	0,9
EYY (E [ $\mu\text{m}$ ])	0,9



# DIPLOMOVÁ PRÁCE



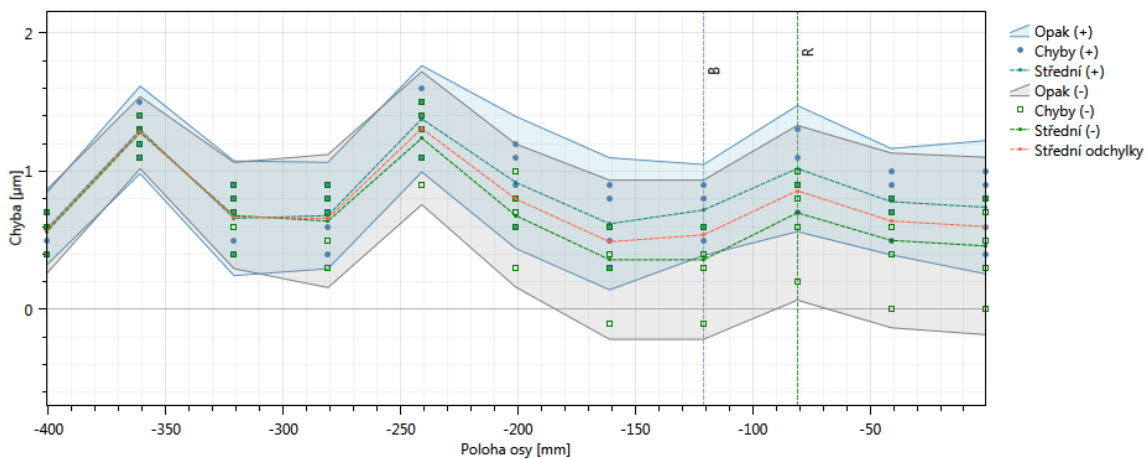
Obrázek 123 LI - polohování po přímosti, verifikace, osa Y

## Osa Z

Graf přesnosti najetí do polohy osy Z je vidět na obrázku Obrázek 124.

Tabulka 69 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Z

EZZ (A [ $\mu\text{m}$ ])	2
EZZ (R [ $\mu\text{m}$ ])	1,4
EZZ (E [ $\mu\text{m}$ ])	1

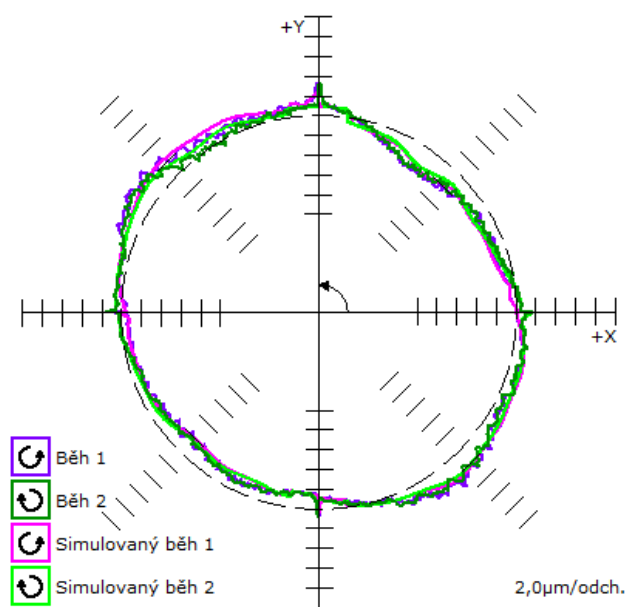


Obrázek 124 LI - polohování po přímosti, verifikace, osa Z

**BALLBAR****Rovina X-Y**

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 125.

Tabulka 70 Naměřené hodnoty, rovina X-Y

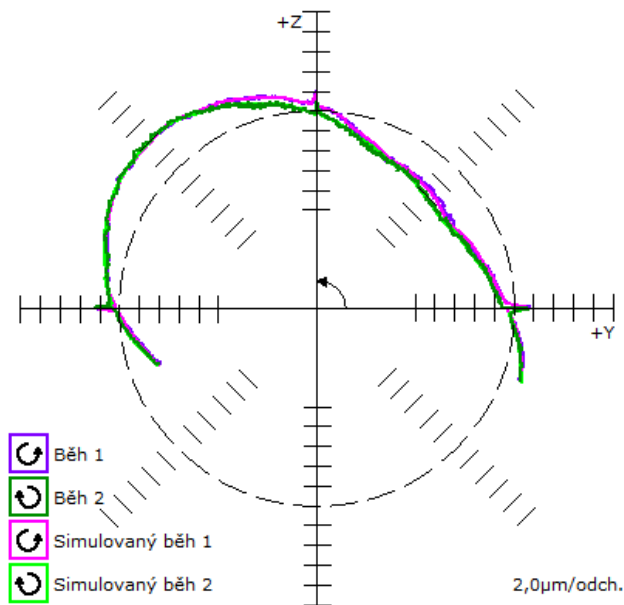


Obrázek 125 Ballbar, rovina X-Y

Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	0
←	0,1
Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	-0,1
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,6
←	-1,5
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,6
↓	0,5
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	22,6
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	-0,7
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0,1
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	1,1
Chyba odměřování X [ppm]	30,7
Chyba odměřování Y [ppm]	26,9
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	28,3
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	6,1

**Rovina Y-Z**

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 126.



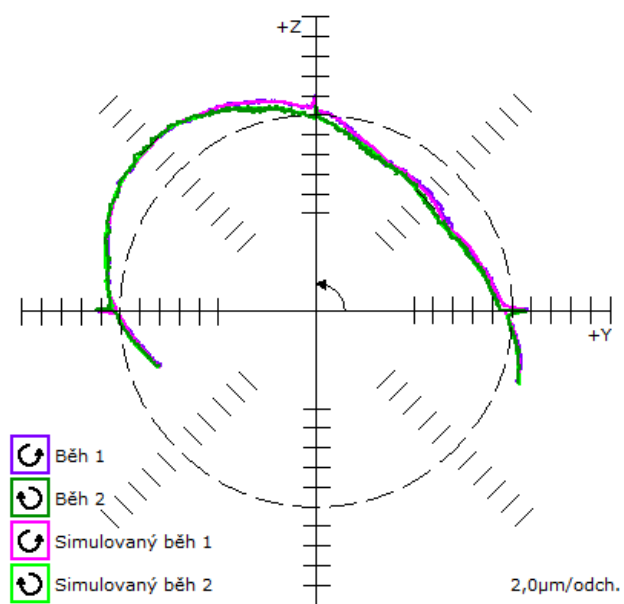
Obrázek 126 Ballbar, rovina Y-Z

Tabulka 71 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0,1
←	-0,2
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,3
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,4
←	-0,1
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,6
↓	0
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	56,5
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0,3
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	1,8
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-0,9
Chyba odměřování Y [ppm]	31,6
Chyba odměřování Z [ppm]	34,4
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	41,5
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	8,9

**Rovina Z-X**

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 127.



Obrázek 127 Ballbar, rovina Z-X

Tabulka 72 Naměřené hodnoty, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,2
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,4
←	-0,3
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	-0,2
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,6
←	0,1
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	69,4
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	4,8
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	-1,1
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	2,7
Chyba odměřování Z [ppm]	42,8
Chyba odměřování X [ppm]	33,6
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	50,4
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	11,3



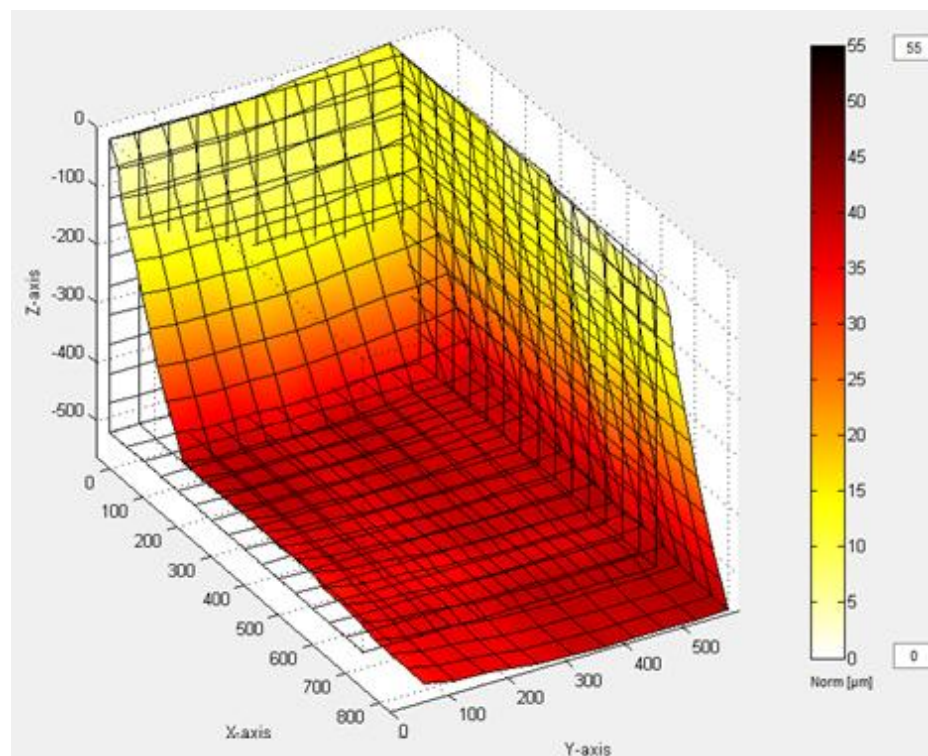
### 4.6.3 LASERTRACER - MODEL FRB

#### KALIBRACE

Graf prostorové odchyly je vidět na obrázku: Obrázek 128.

Tabulka 73 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, kalibrace

	chyby	$U_{\max}$ (95%)		chyby	$U_{\max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	9,9	0,3	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	19,5	3,4
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	9,1	1,2	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	14,2	0,8
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	13,2	1,2	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	23,2	12,3
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	7,8	0,9	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	61,6	11,9
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	4,7	0,4	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	38,4	23,2
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	1,8	0,3	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	24,1	6,4
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	5,3	0,5	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	26,7	1,4
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	6	1,5	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-47,6	6,6
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	2,7	1,2	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	56,4	4
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	20,2	2,5			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	23,6	0,6	Prostorová odchylka min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	21,4	0,8	Prostorová odchylka max. [ $\mu\text{m}$ ]		42



Obrázek 128 Graf prostorové odchyly, model FRB, kalibrace

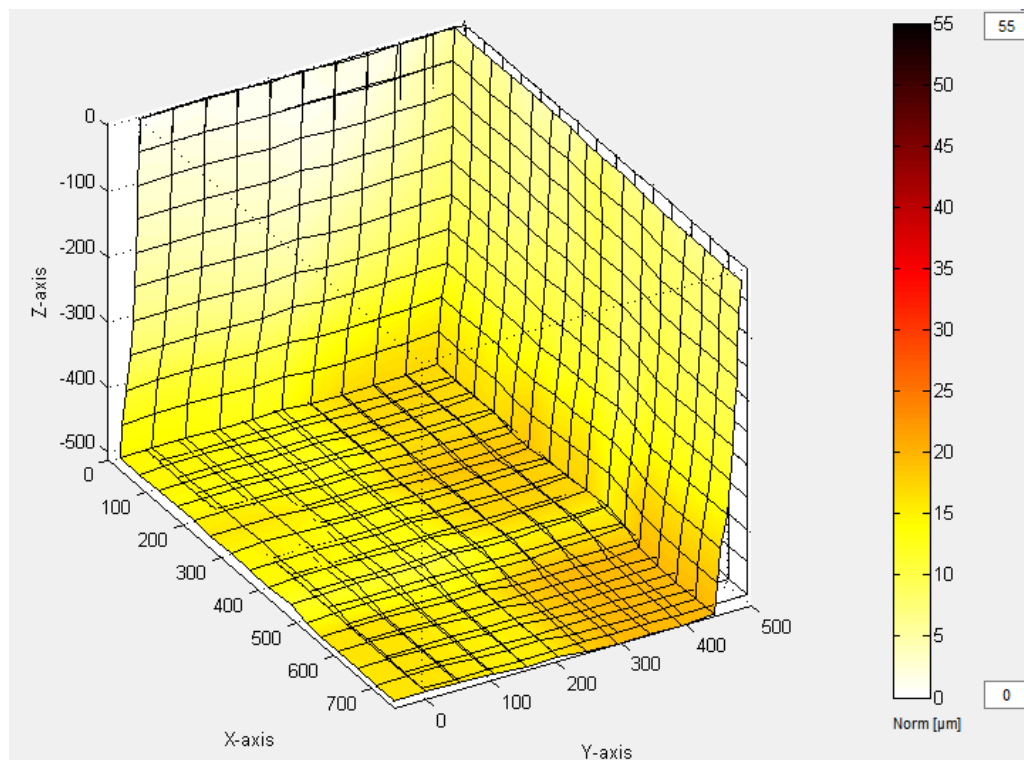


## VERIFIKACE

Graf prostorové odchyly je vidět na obrázku: Obrázek 129.

Tabulka 74 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, verifikace

	chyby	$U_{\max}$ (95%)		chyby	$U_{\max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	1,6	0,2	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	10,8	1,2
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	6,6	0,7	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	3,5	0,3
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	1,1	1,2	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	20,6	3,8
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	3,9	0,6	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	30,3	7,7
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	4,1	0,3	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	40,7	10,3
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	0,7	0,1	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	16	4,3
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	2,2	0,3	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	1,4	2
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	0,7	0,6	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-11,7	3,4
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	2,6	0,7	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-26,3	1,7
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	12,2	1,6			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	8,5	0,5	Prostorová odchyly min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	5,8	0,4	Prostorová odchyly max. [ $\mu\text{m}$ ]		20

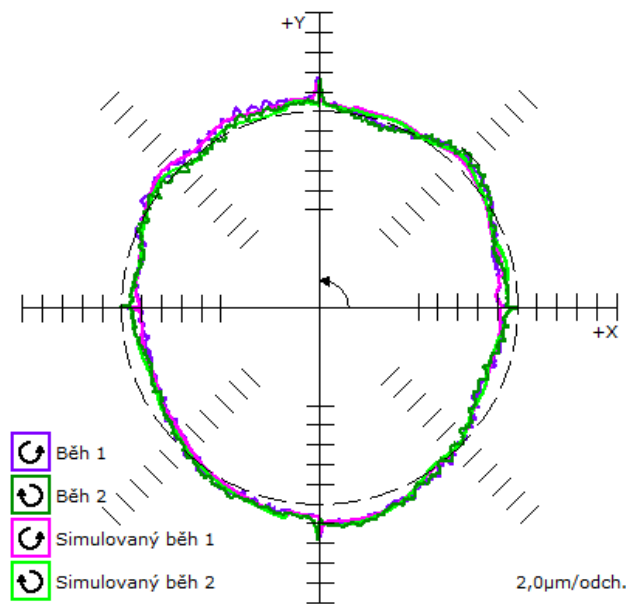


Obrázek 129 Graf prostorové odchyly, model FRB, verifikace

**BALLBAR****Rovina X-Y**

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 130.

Tabulka 75 Naměřené hodnoty, rovina X-Y



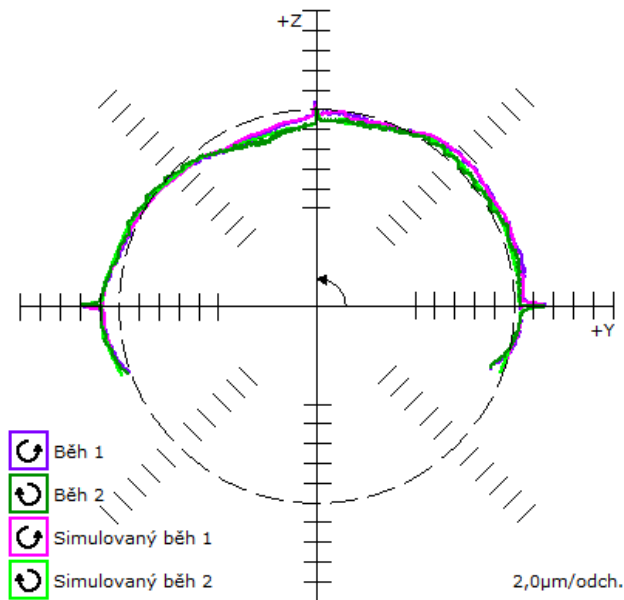
Obrázek 130 Ballbar, rovina X-Y

Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,1
←	0,1
Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,1
↓	-0,1
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,7
←	-1,5
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,5
↓	0,5
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	0,6
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	2,8
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0,3
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-4,9
Chyba odměřování X [ppm]	13,2
Chyba odměřování Y [ppm]	29,6
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	20,8
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	6,2



### Rovina Y-Z

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 131.



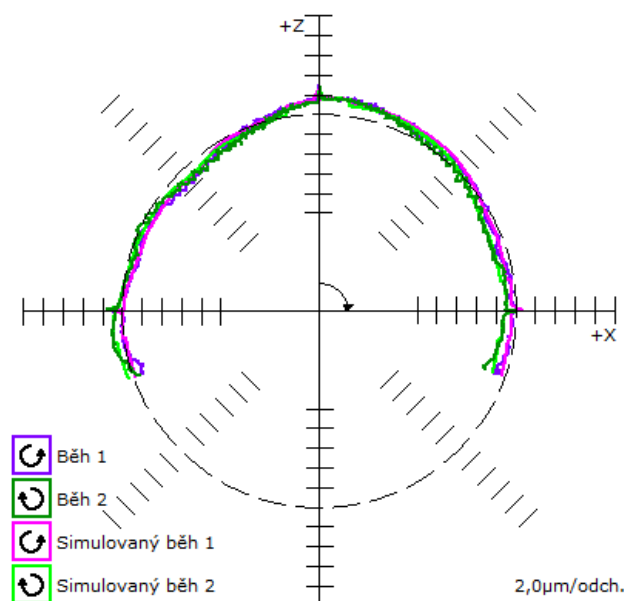
Obrázek 131 Ballbar, rovina Y-Z

Tabulka 76 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0
←	-0,1
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,2
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,5
←	-0,1
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,6
↓	0
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-5,9
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0,8
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	1,9
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	3,6
Chyba odměřování Y [ppm]	30,6
Chyba odměřování Z [ppm]	18,7
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	20,7
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	6,4

### Rovina Z-X

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 132.



Obrázek 132 Ballbar, rovina Z-X

Tabulka 77 Naměřené hodnoty, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,3
←	-0,4
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,1
↓	0
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,7
←	0
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-2,7
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	2,4
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	-1,4
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	2
Chyba odměřování Z [ppm]	20,1
Chyba odměřování X [ppm]	13,3
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	12,9
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	5,3





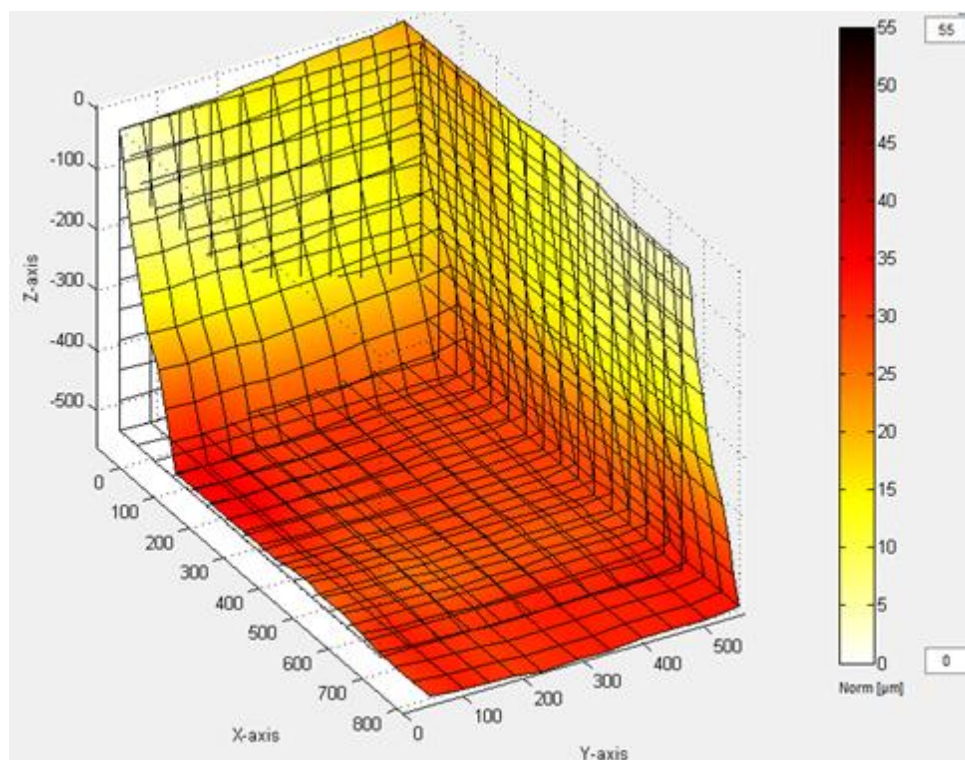
#### 4.6.4 LASERTRACER - MODEL RRB

##### KALIBRACE

Graf prostorové odchyly je vidět na obrázku: Obrázek 133.

Tabulka 78 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, kalibrace

	chyby	$U_{\max}$ (95%)		chyby	$U_{\max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	9,7	0,2	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	18,5	1,3
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	13,1	0,5	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	13,2	13,2
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	15,9	0,6	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	3,8	0,5	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	5,8	0,3	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	1,6	0,2	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	4,9	0,3	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	43,7	0,6
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	5,1	0,1	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-51,6	0,6
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	1,6	0,2	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	32,4	0,3
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	11,2	1,2			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	26,7	0,4	Prostorová odchylyka min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	26,1	0,3	Prostorová odchylyka max. [ $\mu\text{m}$ ]		35



Obrázek 133 Graf prostorové odchyly, model RRB, kalibrace

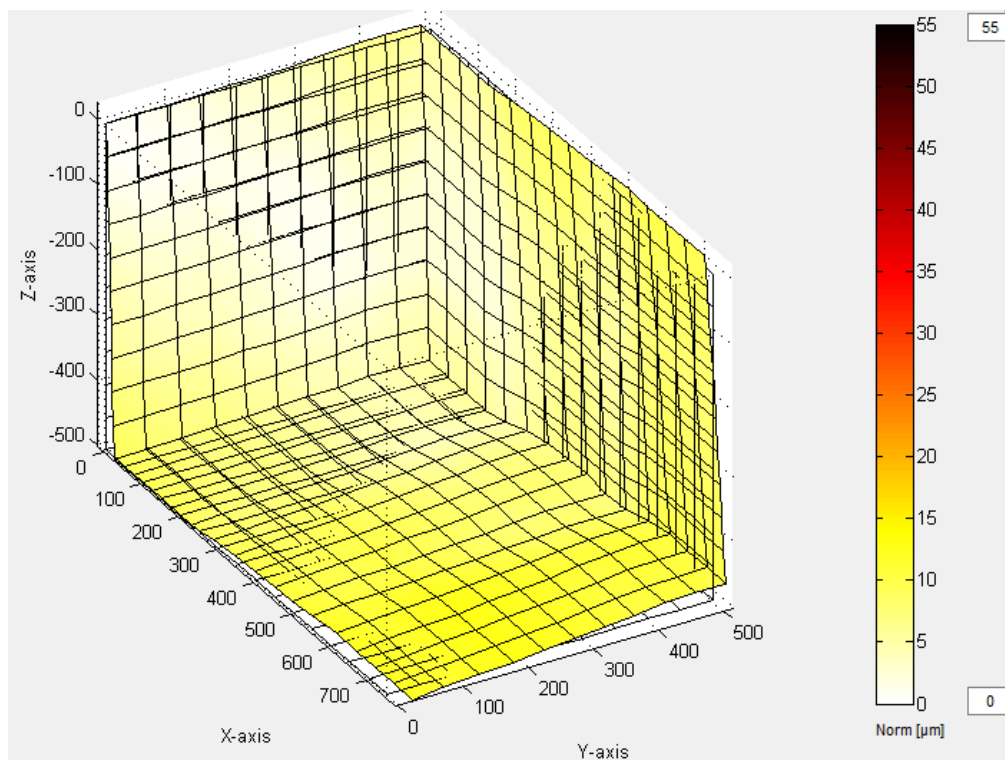


## VERIFIKACE

Graf prostorové odchyly je vidět na obrázku: Obrázek 134.

Tabulka 79 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, verifikace

	chyby	$U_{\max}$ (95%)		chyby	$U_{\max}$ (95%)
EXX [ $\mu\text{m}$ ]	2,9	0,2	EAY [ $\mu\text{rad}$ ]	11,5	1,2
EYY [ $\mu\text{m}$ ]	4,6	0,4	EBY [ $\mu\text{rad}$ ]	3,8	0,4
EZZ [ $\mu\text{m}$ ]	0,8	0,7	ECY [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EYX [ $\mu\text{m}$ ]	4,3	0,5	EAZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZX [ $\mu\text{m}$ ]	3,9	0,3	EBZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EXY [ $\mu\text{m}$ ]	0,6	0,2	ECZ [ $\mu\text{rad}$ ]	-	-
EZY [ $\mu\text{m}$ ]	1,6	0,3	C0Y [ $\mu\text{rad}$ ]	9,7	0,4
EXZ [ $\mu\text{m}$ ]	0,8	0,1	B0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-18,4	0,4
EYZ [ $\mu\text{m}$ ]	1,1	0,1	A0Z [ $\mu\text{rad}$ ]	-1,6	0,4
EAX [ $\mu\text{rad}$ ]	18,4	1,3			
EBX [ $\mu\text{rad}$ ]	4,9	0,4	Prostorová odchylyka min. [ $\mu\text{m}$ ]		0
ECX [ $\mu\text{rad}$ ]	4,8	0,3	Prostorová odchylyka max. [ $\mu\text{m}$ ]		13

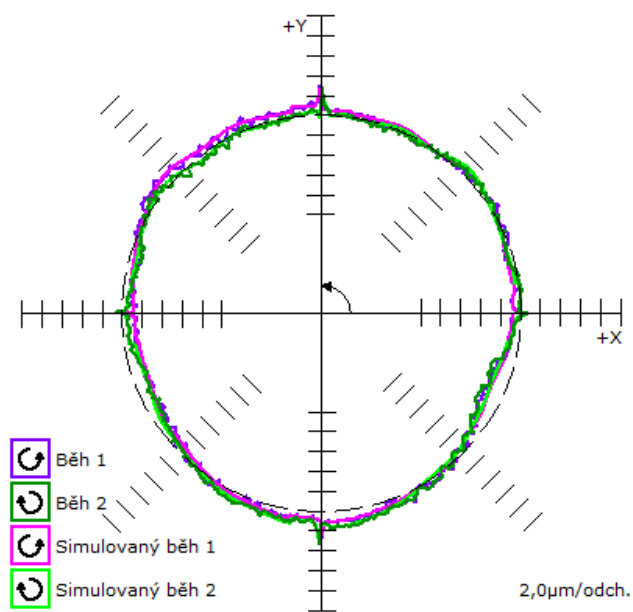


Obrázek 134 Graf prostorové odchyly, model RRB, verifikace

**BALLBAR****Rovina X-Y**

Graf kruhové interpolace roviny X-Y je vidět na obrázku: Obrázek 135.

Tabulka 80 Naměřené hodnoty, rovina X-Y



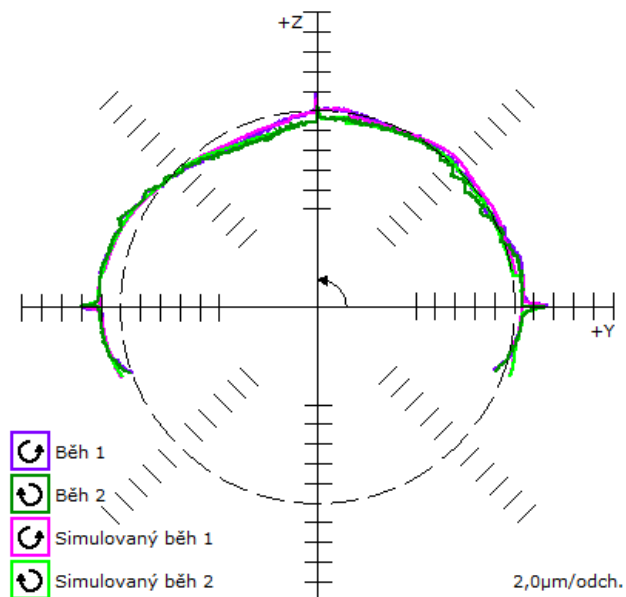
Obrázek 135 Ballbar, rovina X-Y

Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	0
←	0,1
Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	-0,1
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,4
←	-1,3
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,4
↓	0,7
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-0,3
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	2,7
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-0,1
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-2,9
Chyba odměřování X [ppm]	13
Chyba odměřování Y [ppm]	22,6
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	16,9
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	5,7



### Rovina Y-Z

Graf kruhové interpolace roviny Y-Z je vidět na obrázku: Obrázek 136.



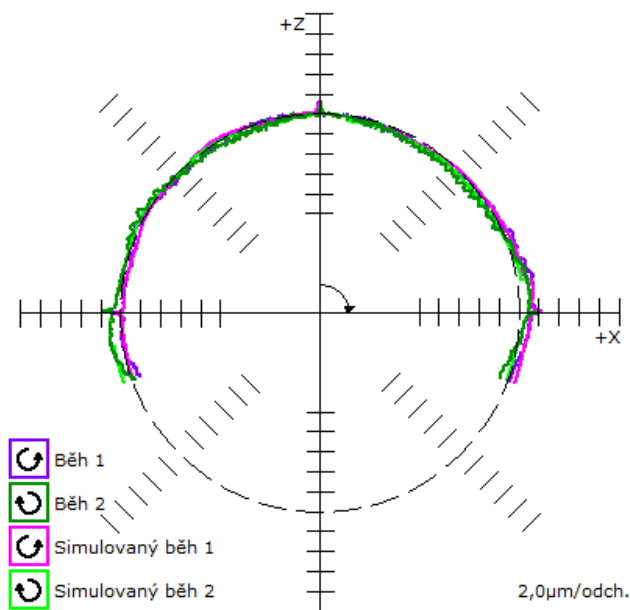
Obrázek 136 Ballbar, rovina Y-Z

Tabulka 81 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z

Mrtvý chod Y [ $\mu\text{m}$ ] →	0,1
←	-0,3
Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,1
↓	-
Příčná vůle Y [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,5
←	-0,1
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	-0,7
↓	0
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	5
Přímocířnost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-0,1
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	3,6
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	4,6
Chyba odměřování Y [ppm]	24
Chyba odměřování Z [ppm]	8,7
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	16,9
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	6,6

### Rovina Z-X

Graf kruhové interpolace roviny Z-X je vidět na obrázku: Obrázek 137.



Obrázek 137 Ballbar, rovina Z-X

Tabulka 82 Naměřené hodnoty, rovina Z-X

Mrtvý chod Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0,2
↓	-
Mrtvý chod X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,1
←	-0,3
Příčná vůle Z [ $\mu\text{m}$ ] ↑	0
↓	-0,1
Příčná vůle X [ $\mu\text{m}$ ] →	-0,7
←	-0,3
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-1,4
Přímocířnost Z [ $\mu\text{m}$ ]	-1,1
Přímocířnost X [ $\mu\text{m}$ ]	-0,5
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-1,6
Chyba odměřování Z [ppm]	9,5
Chyba odměřování X [ppm]	14,9
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	10,3
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	3,4



#### 4.6.5 VYHODNOCENÍ

##### LTc

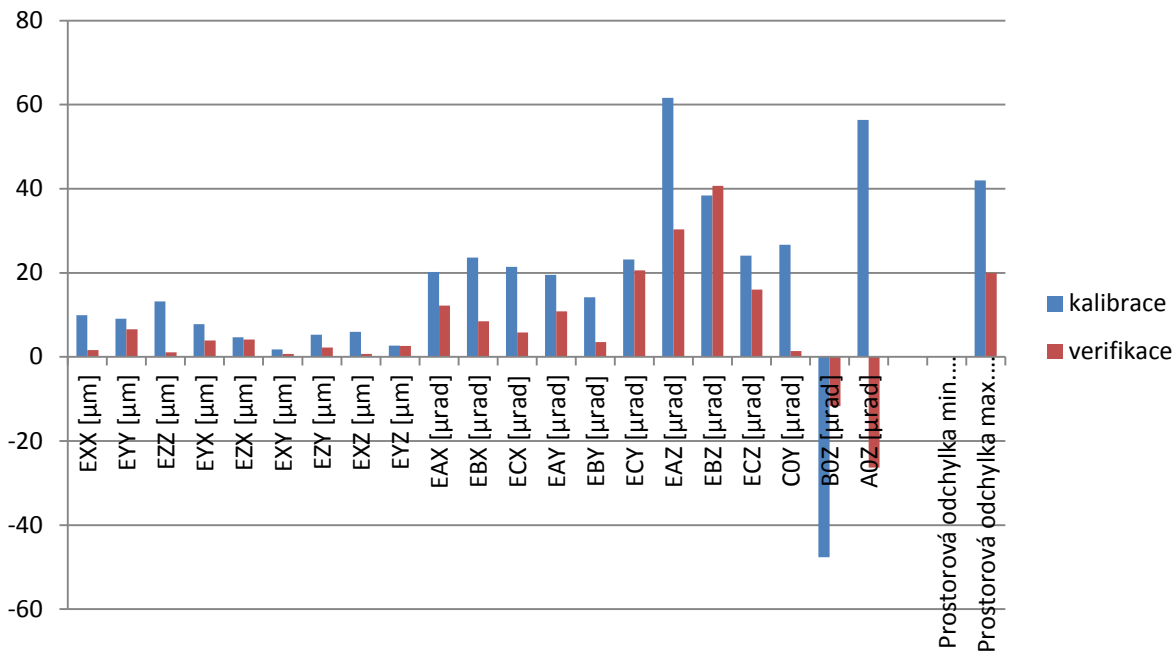
Pro model FRB je vidět porovnání kalibrace a verifikace v tabulce: Tabulka 83 a následně na obrázku: Obrázek 138. V tabulce je ještě uvedeno absolutní a procentuální zlepšení/zhoršení chyby.

Tabulka 83 Chyby modelu FRB

	kalibrace [ $\mu\text{m}$ ]	verifikace [ $\mu\text{m}$ ]	zlepšení/zhoršení chyb	
			absolutní [ $\mu\text{m}$ ]	procentuální [%]
EXX	9,9	1,6	8,3	83,8
EYY	9,1	6,6	2,5	27,5
EZZ	13,2	1,1	12,1	91,7
EYX	7,8	3,9	3,9	50,0
EZX	4,7	4,1	0,6	12,8
EXY	1,8	0,7	1,1	61,1
EZY	5,3	2,2	3,1	58,5
EXZ	6,0	0,7	5,3	88,3
EYZ	2,7	2,6	0,1	3,7
	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[%]
EAX	20,2	12,2	8,0	39,6
EBX	23,6	8,5	15,1	64,0
ECX	21,4	5,8	15,6	72,9
EAY	19,5	10,8	8,7	44,6
EBY	14,2	3,5	10,7	75,4
ECY	23,2	20,6	2,6	11,2
EAZ	61,6	30,3	31,3	50,8
<b>EBZ</b>	<b>38,4</b>	<b>40,7</b>	<b>-2,3</b>	<b>-6,0</b>
ECZ	24,1	16,0	8,1	33,6
C0Y	26,7	1,4	25,3	94,8
B0Z	-47,6	-11,7	35,9	75,4
A0Z	56,4	-26,3	30,1	53,4
	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[%]
Prostorová odchylka min.	0,0	0,0	0,0	0,0
Prostorová odchylka max.	42,0	20,0	22,0	52,4



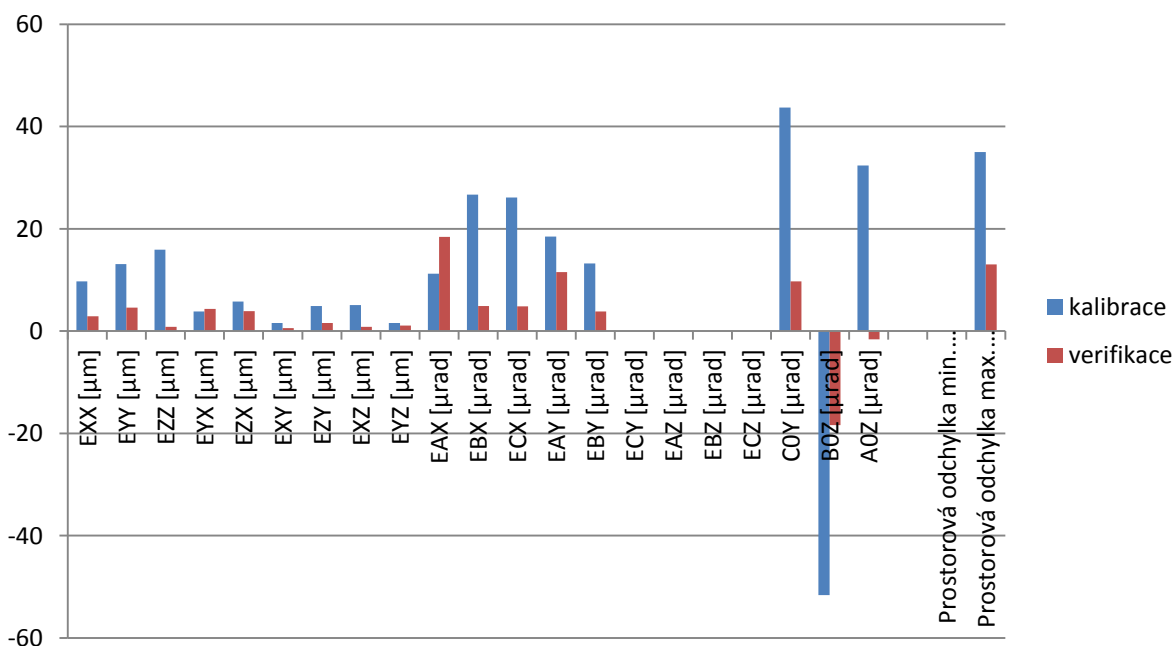
## DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obrázek 138 Graf chyb modelu FRB

U většiny chyb došlo k výraznému zlepšení, jen u chyby EBZ došlo ke zhoršení. Toto zhoršení je zanedbatelné.

Pro model RRB je vidět porovnání kalibrace a verifikace v tabulce: Tabulka 84 a následně na obrázku: Obrázek 139. V tabulce je ještě uvedeno absolutní a procentuální zlepšení/zhoršení chyby.



Obrázek 139 Graf chyb modelu RRB



Tabulka 84 Chyby modelu RRB

	kalibrace [ $\mu\text{m}$ ]	verifikace [ $\mu\text{m}$ ]	zlepšení/zhoršení chyb	
			absolutní [ $\mu\text{m}$ ]	procentuální [%]
EXX	9,7	2,9	6,8	70,1
EYY	13,1	4,6	8,5	64,9
EZZ	15,9	0,8	15,1	95,0
<b>EYX</b>	<b>3,8</b>	<b>4,3</b>	<b>-0,5</b>	<b>-13,2</b>
EZX	5,8	3,9	1,9	32,8
EXY	1,6	0,6	1,0	62,5
EZY	4,9	1,6	3,3	67,3
EXZ	5,1	0,8	4,3	84,3
EYZ	1,6	1,1	0,5	31,3
	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[ $\mu\text{rad}$ ]	[%]
<b>EAX</b>	<b>11,2</b>	<b>18,4</b>	<b>-7,2</b>	<b>-64,3</b>
EBX	26,7	4,9	21,8	81,6
ECX	26,1	4,8	21,3	81,6
EAY	18,5	11,5	7,0	37,8
EBY	13,2	3,8	9,4	71,2
ECY	-	-	-	-
EAZ	-	-	-	-
EBZ	-	-	-	-
ECZ	-	-	-	-
C0Y	43,7	9,7	34,0	77,8
B0Z	-51,6	-18,4	33,2	64,3
A0Z	32,4	-1,6	30,8	95,1
	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[%]
Prostorová odchylka min.	0,0	0,0	0,0	0,0
Prostorová odchylka max.	35,0	13,0	22,0	62,9

U všech chyb došlo ke zlepšení, jen u chyb EYX a EAX došlo ke zhoršení. U chyby EYX je toto zhoršení nepatrné, ale u chyby EAX je toto zhoršení již větší.



DIPLOMOVÁ PRÁCE

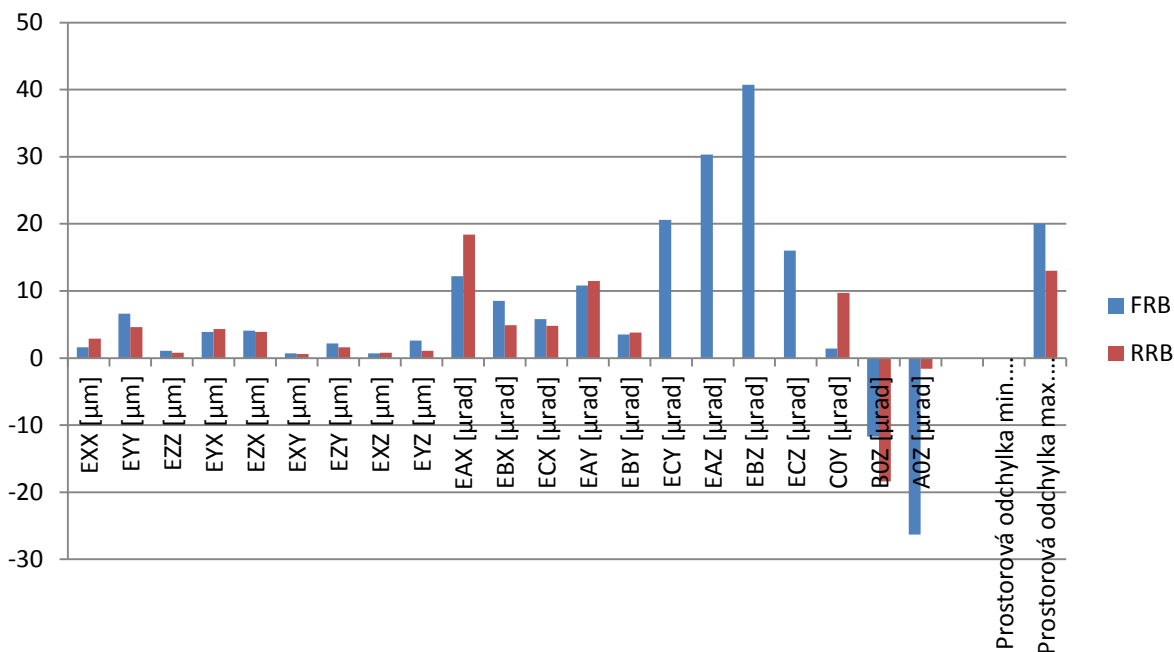
Nyní je nutno porovnat oba modely po verifikaci ještě mezi sebou, aby bylo vidět, který z modelů má lepší vliv na jednotlivé chyby. Porovnání je vidět v tabulce: Tabulka 85 a na obrázku: Obrázek 140. V tabulce je ještě uvedeno absolutní a procentuální zlepšení/zhoršení chyby.

Jako výchozí hodnota pro výpočet procentuální chyby je brána hodnota od modelu FRB a to z důvodu, že model FRB měří všech 21 chyb, které počítá z hodnot, které naměří z více bodů, tím získá více hodnot pro výpočet, a proto by měl být přesnější.

Tabulka 85 Porovnání chyb FRB a RRB

	FRB [μm]	RRB [μm]	zlepšení/zhoršení chyb	
			absolutní [μm]	procentuální [%]
<b>EXX</b>	<b>1,6</b>	<b>2,9</b>	<b>-1,3</b>	<b>-81,3</b>
EYY	6,6	4,6	2,0	30,3
EZZ	1,1	0,8	0,3	27,3
<b>EYX</b>	<b>3,9</b>	<b>4,3</b>	<b>-0,4</b>	<b>-10,3</b>
EZX	4,1	3,9	0,2	4,9
EXY	0,7	0,6	0,1	14,3
EZY	2,2	1,6	0,6	27,3
<b>EXZ</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>-0,1</b>	<b>-14,3</b>
EYZ	2,6	1,1	1,5	57,7
	[μrad]	[μrad]	[μrad]	[%]
<b>EAX</b>	<b>12,2</b>	<b>18,4</b>	<b>-6,2</b>	<b>-50,8</b>
EBX	8,5	4,9	3,6	42,4
ECX	5,8	4,8	1,0	17,2
<b>EAY</b>	<b>10,8</b>	<b>11,5</b>	<b>-0,7</b>	<b>-6,5</b>
<b>EBY</b>	<b>3,5</b>	<b>3,8</b>	<b>-0,3</b>	<b>-8,6</b>
ECY	20,6	-	-	-
EAZ	30,3	-	-	-
EBZ	40,7	-	-	-
ECZ	16,0	-	-	-
<b>C0Y</b>	<b>1,4</b>	<b>9,7</b>	<b>-8,3</b>	<b>-592,9</b>
<b>B0Z</b>	<b>-11,7</b>	<b>-18,4</b>	<b>-6,7</b>	<b>-57,3</b>
A0Z	-26,3	-1,6	24,7	93,9
	[μm]	[μm]	[μm]	[%]
Prostorová odchylna min.	0,0	0,0	0,0	0,0
Prostorová odchylna max.	20,0	13,0	7,0	35,0





Obrázek 140 Graf porovnání chyb FRB a RRB

Většina chyb po modelu FRB má pro tuto konfiguraci vyšší hodnoty. V případech, kdy jsou chyby nižší, jde o pouze malé rozdíly. Jen co se týče kolmostí COY a B0Z a chyby EAX jsou rozdíly větší. Zde má model RRB téměř poloviční maximální prostorovou odchylku. Z důvodu, že model RRB má po kalibraci, při měření pomocí LTc, menší chyby a výše zmíněnou maximální prostorovou odchylku je vhodné vyhodnotit pro tuto konfiguraci měření, model RRB jako vhodnější pro kalibraci tohoto stroje.

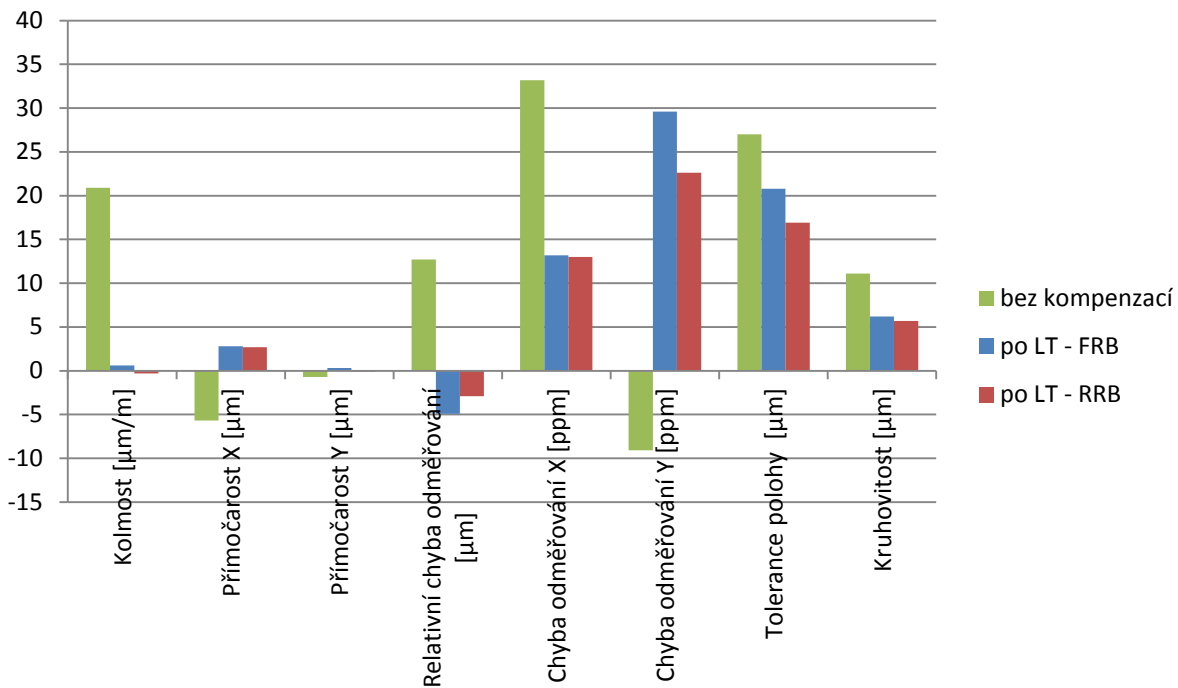
### DBB

Ověření proběhlo i pomocí DBB. Z grafů je jasné, že stav oproti stavu stroje bez kompenzací je podstatně lepší, a proto je zbytečné vyhodnocovat DBB v tabulce vůči počátečnímu stavu a bude dostačující, když v tabulce bude mezi sebou vyhodnocen pouze stav po měření modelu FRB a RRB. Vůči počátečnímu stavu pak bude vyhodnocen jen ten DBB, který je měřen po modelu, který bude vykazovat lepší vliv na chyby stroje.

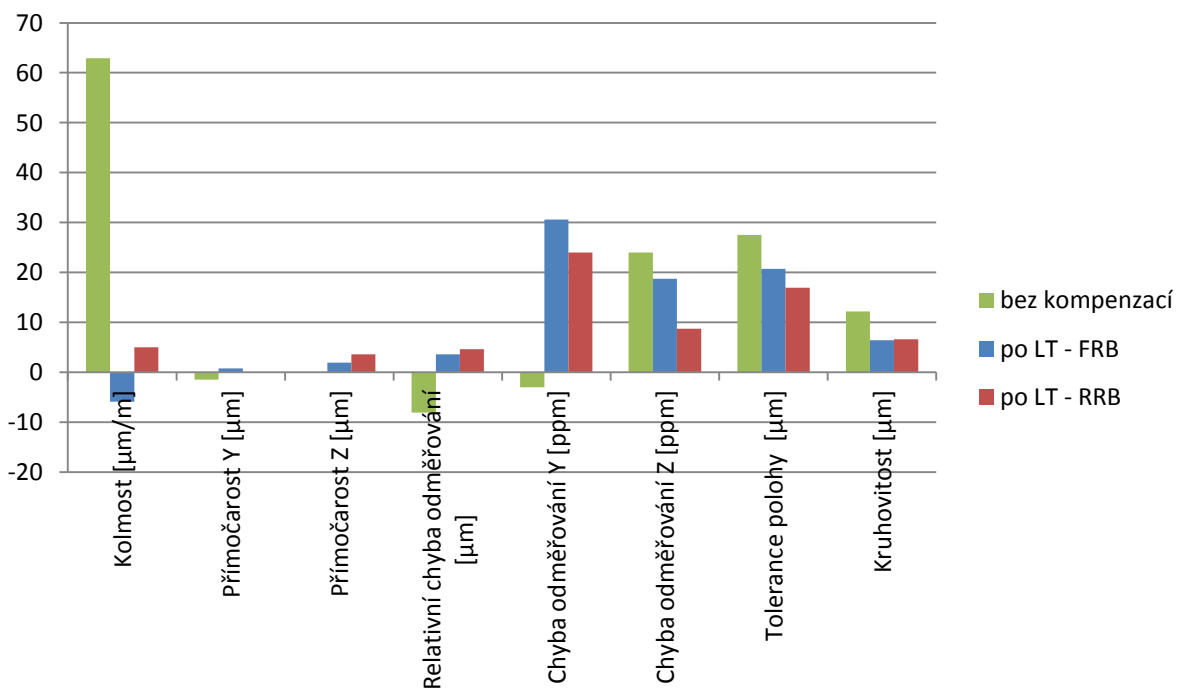
Porovnání modelů FRB a RRB je možné vidět v tabulce: Tabulka 86 a na obrázcích: Obrázek 141 pro rovinu XY, Obrázek 142 pro rovinu YZ a Obrázek 143 pro rovinu ZX.



# DIPLOMOVÁ PRÁCE



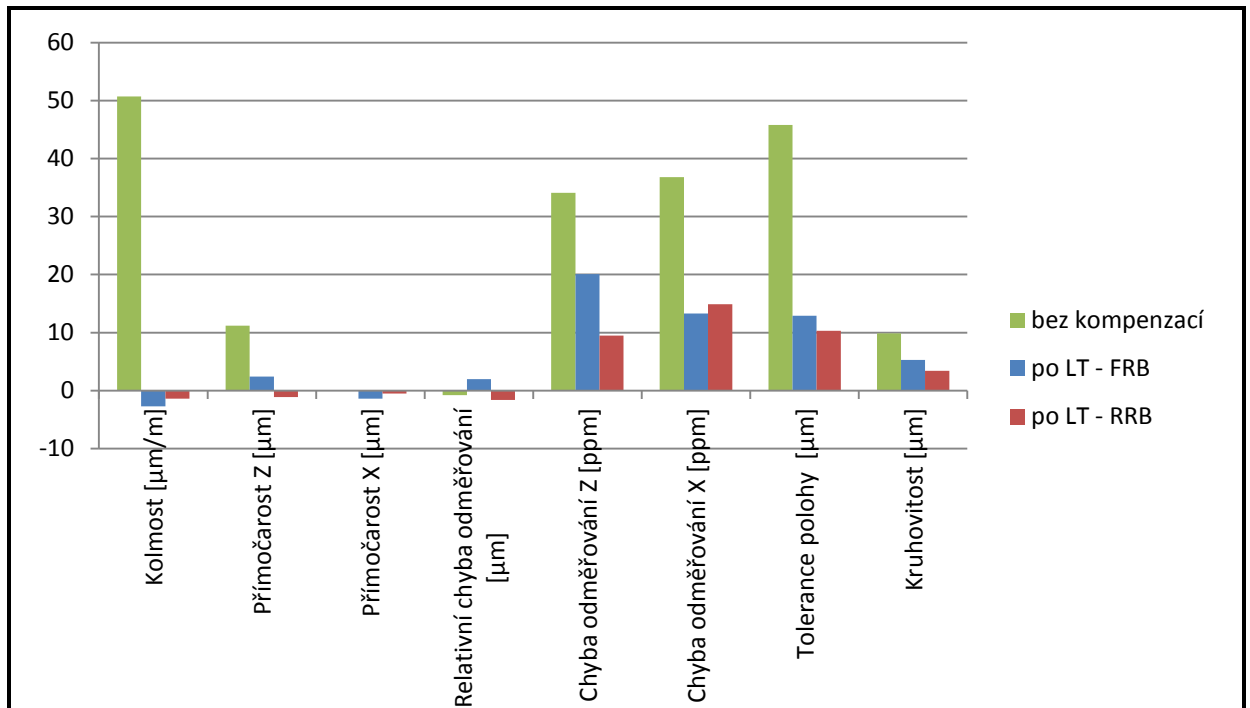
Obrázek 141 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina XY



Obrázek 142 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina YZ



DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obrázek 143 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina ZX



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 86 DBB - porovnání modelů FRB a RRB

X-Y	po LT - FRB		po LT - RRB		zlepšení/zhoršení chyb	
	DBB 11		DBB 12		absolutní	procentuální
Kolmost	0,6	μm/m	-0,3	μm/m	0,3	50,0
Přímočarost X	2,8	μm	2,7	μm	0,1	3,6
Přímočarost Y	0,3	μm	-0,1	μm	0,2	66,7
Relativní chyba odměřování	-4,9	μm	-2,9	μm	2,0	40,8
Chyba odměřování X	13,2	ppm	13,0	ppm	0,2	1,5
Chyba odměřování Y	29,6	ppm	22,6	ppm	7,0	23,6
Tolerance polohy	20,8	μm	16,9	μm	3,9	18,8
Kruhovitost	6,2	μm	5,7	μm	0,5	8,1
<b>Y-Z</b>						
Kolmost	-5,9	μm/m	5,0	μm/m	0,9	15,3
Přímočarost Y	0,8	μm	-0,1	μm	0,7	87,5
Přímočarost Z	1,9	μm	3,6	μm	-1,7	-89,5
Relativní chyba odměřování	3,6	μm	4,6	μm	-1,0	-27,8
Chyba odměřování Y	30,6	ppm	24,0	ppm	6,6	21,6
Chyba odměřování Z	18,7	ppm	8,7	ppm	10,0	53,5
Tolerance polohy	20,7	μm	16,9	μm	3,8	18,4
Kruhovitost	6,4	μm	6,6	μm	-0,2	-3,1
<b>Z-X</b>						
Kolmost	-2,7	μm/m	-1,4	μm/m	1,3	48,1
Přímočarost Z	2,4	μm	-1,1	μm	1,3	54,2
Přímočarost X	-1,4	μm	-0,5	μm	0,9	64,3
Relativní chyba odměřování	2,0	μm	-1,6	μm	0,4	20,0
Chyba odměřování Z	20,1	ppm	9,5	ppm	10,6	52,7
Chyba odměřování X	13,3	ppm	14,9	ppm	-1,6	-12,0
Tolerance polohy	12,9	μm	10,3	μm	2,6	20,2
Kruhovitost	5,3	μm	3,4	μm	1,9	35,8

Primárně je nutné se dívat na hodnoty kolmosti a kruhovitosti, a to ve všech třech rovinách. Na první pohled je vidět, že model RRB má v této konfiguraci lepší výsledky. Pouze na pár výjimek, kde je horší, ale jen lehce. Tím se potvrzuje předchozí vyhodnocení pomocí LTc. Model RRB je pro tuto konfiguraci lepší a tudíž bude v celkovém vyhodnocení brát v potaz DBB 12.

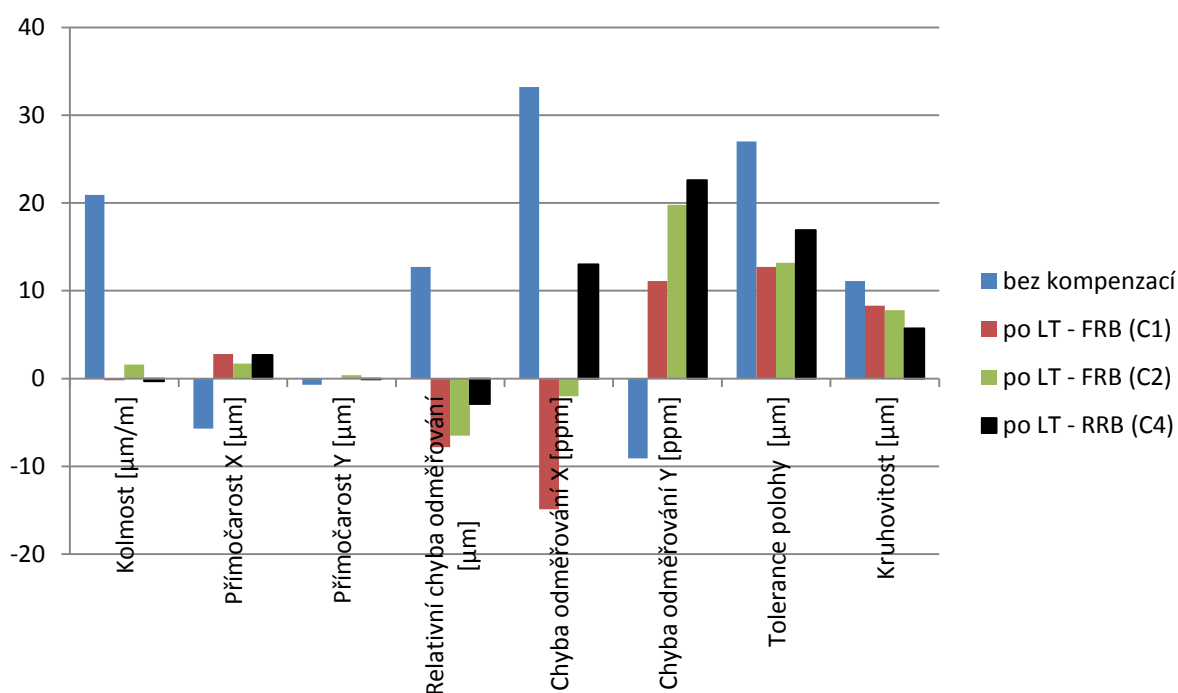


## 5 CELKOVÉ VYHODNOCENÍ

Z vyhodnocení všech bloků měření vychází nejlépe z bloku C1 měření LTc model FRB, proto bude vyhodnocen DBB 2. Z bloku C2 vychází nejlepší výsledek opět po měření LTc model FRB, tudíž DBB 6. Blok C3 není potřeba dávat do celkového vyhodnocení, protože v něm chybí LTc, respektive jakákoliv kalibrace kolmostí, kterou v ostatních blocích nahrazuje právě LTc. A nakonec z bloku C4 bude vyhodnocen DBB 12, který je po měření LTc modelu RRB. V grafech budou opět uvedeny i hodnoty pro stroj bez kompenzací, aby bylo vidět jaké je zlepšení. Pro rovinu XY jsou hodnoty v tabulce: Tabulka 87 a graf na obrázku: Obrázek 144.

Tabulka 87 DBB - hodnoty pro rovinu XY

X-Y	po LT - FRB (C1)	po LT - FRB (C2)	po LT - RRB (C4)
	DBB 2	DBB 6	DBB 12
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-0,2	1,6	-0,3
Přímočarost X [ $\mu\text{m}$ ]	2,8	1,7	2,7
Přímočarost Y [ $\mu\text{m}$ ]	0	0,4	-0,1
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	-7,8	-6,5	-2,9
Chyba odměřování X [ppm]	-14,9	-2	13
Chyba odměřování Y [ppm]	11,1	19,8	22,6
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	12,7	13,2	16,9
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	8,3	7,8	5,7



Obrázek 144 Graf DBB - rovina XY

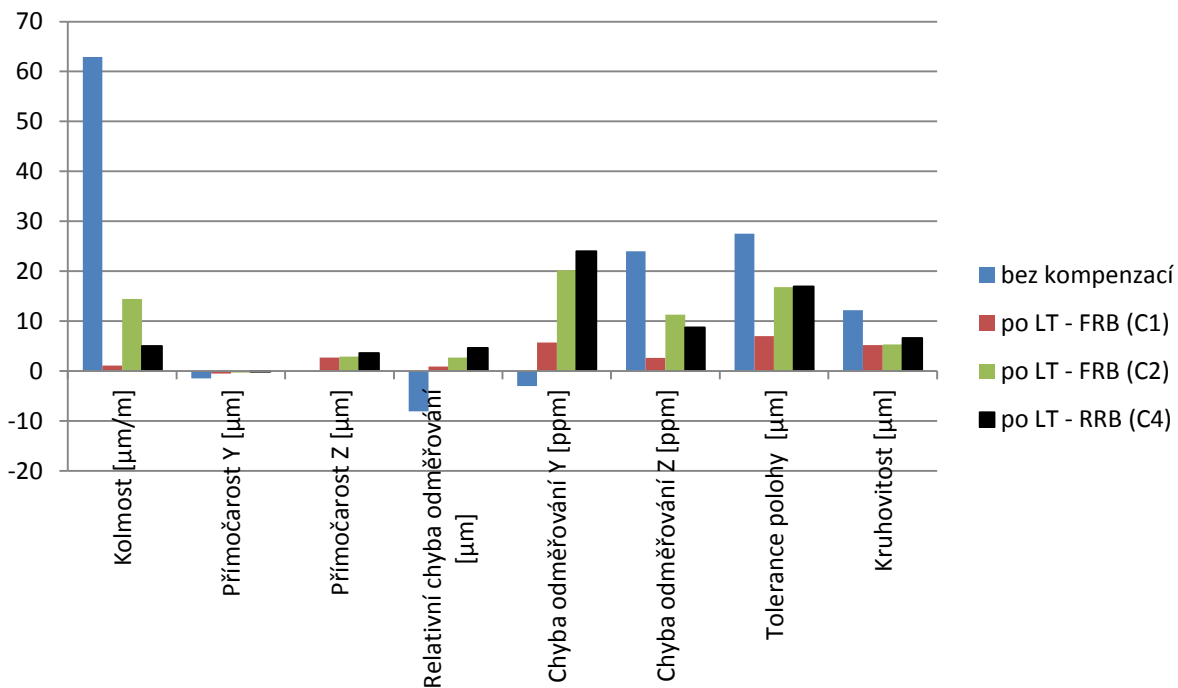


DIPLOMOVÁ PRÁCE

Pro rovinu YZ jsou hodnoty v tabulce: Tabulka 88 a graf na obrázku: Obrázek 145.

Tabulka 88 DBB - hodnoty pro rovinu YZ

	po LT - FRB (C1)	po LT - FRB (C2)	po LT - RRB (C4)
	DBB 2	DBB 6	DBB 12
<b>Y-Z</b>			
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	1,1	14,4	5
Přímochařost Y [ $\mu\text{m}$ ]	-0,5	-0,3	-0,1
Přímochařost Z [ $\mu\text{m}$ ]	2,7	2,9	3,6
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	0,9	2,7	4,6
Chyba odměřování Y [ppm]	5,7	20,2	24
Chyba odměřování Z [ppm]	2,6	11,3	8,7
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	7	16,8	16,9
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	5,2	5,3	6,6



Obrázek 145 Graf DBB - rovina YZ

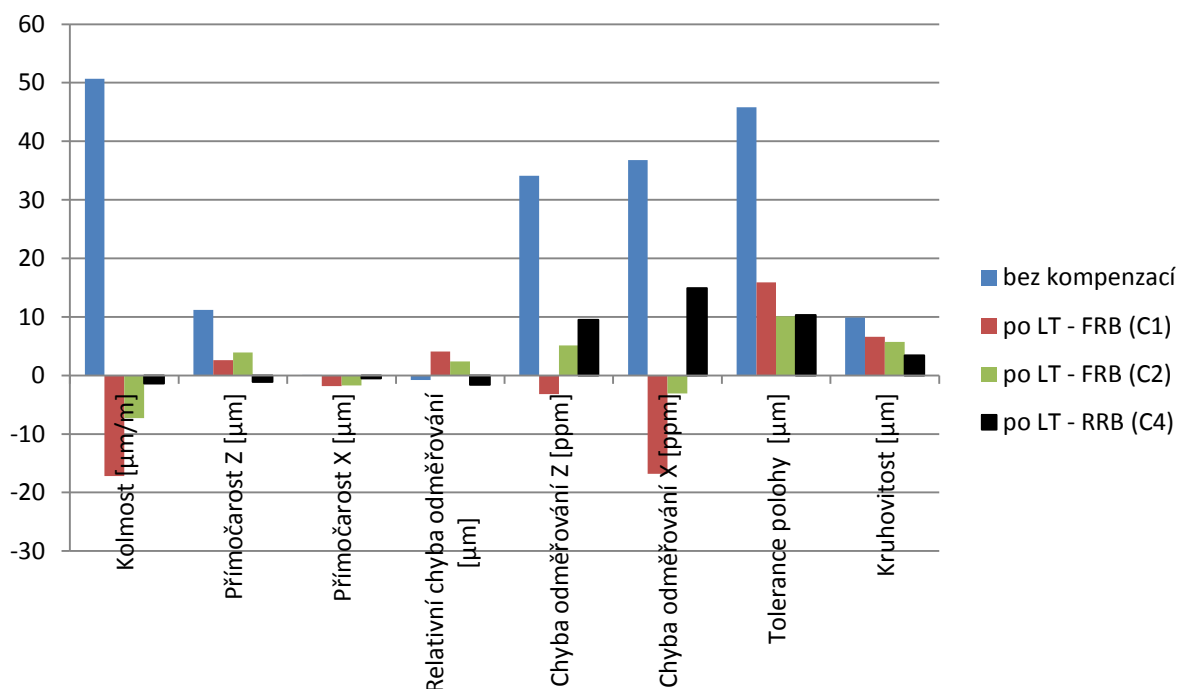


## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Pro rovinu XY jsou hodnoty v tabulce: Tabulka 89 DBB - hodnoty pro rovinu ZX a graf na obrázku: Obrázek 146.

Tabulka 89 DBB - hodnoty pro rovinu ZX

Z-X	po LT - FRB (C1)	po LT - FRB (C2)	po LT - RRB (C4)
	DBB 2	DBB 6	DBB 12
Kolmost [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	-17,2	-7,3	-1,4
Přímočarost Z [ $\mu\text{m}$ ]	2,6	3,9	-1,1
Přímočarost X [ $\mu\text{m}$ ]	-1,8	-1,7	-0,5
Relativní ch. odměřování [ $\mu\text{m}$ ]	4,1	2,4	-1,6
Chyba odměřování Z [ppm]	-3,2	5,1	9,5
Chyba odměřování X [ppm]	-16,8	-3,1	14,9
Tolerance polohy [ $\mu\text{m}$ ]	15,9	10,1	10,3
Kruhovitost [ $\mu\text{m}$ ]	6,6	5,7	3,4
Prostorová odch. max. [ $\mu\text{m}$ ]	12,0	7,0	13,0



Obrázek 146 Graf DBB - rovina ZX

Z hodnot je na první pohled zřejmé, že nejhůře vychází DBB 2, což je konfigurace měření bloku C1. Z hlediska maximální prostorové odchylky nejlépe vychází měření DBB 6, což je konfigurace měření blok C2, ale při porovnání ostatních parametrů vychází i přes nejvyšší maximální prostorovou odchylku DBB12, tedy blok C4, jako nejlepší konfigurace z hlediska přesnosti stroje.



## ZÁVĚR

Cílem práce bylo posoudit vliv konvenčních kompenzací na výsledné volumetrické přesnosti obráběcího stroje, a to na stroji MCV 754. Šlo tedy o to navrhnout a zpracovat experiment a vyzkoušet různé kombinace možných softwarových kompenzací využívaných na CNC obráběcích strojích a posoudit, jestli je daná kombinace přínosná. Závěrem měla vyjít nejvhodnější kombinace co se týká výsledné přesnosti a s přibývajícími zkušenostmi při měření i časová náročnost měření a zavádění kompenzací.

Prvním cílem práce měla být rešerše v oblasti kompenzací na ŘS Siemens Sinumerik. Toto bylo zpracováno v kapitole 1, společně s vymezením požadavků na obráběcí stroje, schématem chyb tříosé kinematiky CNC strojů a stručným popisem řídicího systému Siemens Sinumerik 840D sl, který je použit na stroji, na kterém byl proveden experiment. Především byly v této kapitole popsány příkazy kompenzací ENC a CEC. Další typy existujících kompenzací tohoto systému, byly pouze zmíněny.

Druhým cílem měla být rešerše v oblasti měřicí techniky pro kompenzace tříosých obráběcích strojů. Tato část rešerše byla zpracována v kapitole 2. Byly zde popsány přístroje využitě dále v experimentu. Jedná se o přístroje Laserinterferometr a Ballbar, oba od firmy Renishaw a přístroj LaserTRACER od firmy etalon. U všech přístrojů byl stručně popsán princip jejich měření, technické parametry a příslušenství. Na závěr této kapitoly byl uveden výťah z norem určujících zásady zkoušek obráběcích strojů.


Třetím, stěžejním cílem diplomové práce, bylo praktické měření a ověření volumetrické přesnosti stroje. Tato část je nejrozšířenější z celé práce, a proto je rozdělena do dvou kapitol. V kapitole 3 se nachází základní informace pro provedení experimentu. Nejdůležitější částí je především plán experimentu, který se nachází v kapitole 3.2. Je zde nastíněn celý postup, podle kterého probíhalo měření, kombinace kompenzací, jejich zavádění a ověřování. Byl zde také stručně popsán stroj zvolený pro experiment, postup měření s jednotlivými přístroji a nastavení programů potřebných pro sběr jednotlivých dat.

Hlavním cílem a úkolem předložené diplomové práce, bylo vypracovat podrobnou závěrečnou zprávu z provedených měření. Jednotlivé dílčí měření byly vyhodnoceny v každém bloku měření zvlášť a dle tohoto vyhodnocení byly vybrány jednotlivé konfigurace z každého bloku, které vykazovaly nejlepší výsledky, pro závěrečné vyhodnocení, které je možné vidět v kapitole 5. Jako hlavní parametry pro vyhodnocení jsou brány: maximální prostorová odchylka z LTC, kolmosti a kruhovitosti všech rovin z DBB.

Z bloku C1 bylo vybráno, jako nejlepší možná varianta měření, měření LTc, model FRB. Tento model vykazoval maximální prostorovou odchylku 12  $\mu\text{m}$ , v rovině XY kolmost: -0,2  $\mu\text{m}/\text{m}$  a kruhovitost: 8,3  $\mu\text{m}$ , v rovině YZ kolmost: 1,1  $\mu\text{m}/\text{m}$  a kruhovitost: 5,2  $\mu\text{m}$  a v rovině ZX kolmost: -17,2  $\mu\text{m}$  a kruhovitost: 6,6  $\mu\text{m}$ .

Z bloku C2, tj. po CEC kompenzací polohy CEC 1\_1, jako nejlepší možná varianta měření, měření LTc, model FRB. Tento model vykazoval maximální prostorovou



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 129
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

odchylku 7  $\mu\text{m}$ , v rovině XY kolmost: 1,6  $\mu\text{m}/\text{m}$  a kruhovitost: 7,8  $\mu\text{m}$ , v rovině YZ kolmost: 14,4  $\mu\text{m}/\text{m}$  a kruhovitost: 5,3  $\mu\text{m}$  a v rovině ZX kolmost: -7,3  $\mu\text{m}$  a kruhovitost: 5,7  $\mu\text{m}$ .

Blok C3, kompenzace přímosti CEC 1\_2 po kompenzaci polohy CEC 1\_1, byl z důvodu neměření kolmostí z celkového vyhodnocení rovnou vyřazen. U ostatních bloků nebyly kolmosti sice měřeny přímo, ale toto měření nahradil LTc, který především kompenzuje právě kolmosti. Jeho hodnoty dosahovaly až téměř hodnot stroje bez kompenzací, některé byly dokonce vyšší. V rovině XY kolmost: 24,5  $\mu\text{m}/\text{m}$  a kruhovitost: 9  $\mu\text{m}$ , v rovině YZ kolmost: 56,9  $\mu\text{m}/\text{m}$  a kruhovitost: 8,8  $\mu\text{m}$  a v rovině ZX kolmost: 64,4  $\mu\text{m}$  a kruhovitost: 10  $\mu\text{m}$ .


Blok C4, složený s kompenzace přímosti CEC 1\_3 a následné kompenzace polohy CEC 1\_4, vyšel nejlépe po následné kompenzaci LTc, modelem RRB. Tento model vykazoval maximální prostorovou odchylku 13  $\mu\text{m}$ , v rovině XY kolmost: -0,3  $\mu\text{m}/\text{m}$  a kruhovitost: 5,7  $\mu\text{m}$ , v rovině YZ kolmost: 5  $\mu\text{m}/\text{m}$  a kruhovitost: 6,6  $\mu\text{m}$  a v rovině ZX kolmost: -1,4  $\mu\text{m}$  a kruhovitost: 3,4  $\mu\text{m}$ .

Z těchto hodnot je patrné, že tyto tři bloky jsou téměř srovnatelné, až na neznatelné rozdíly. Nejhůře je na tom však blok C1. Blok C2 sice vykazuje nejlepší maximální prostorovou odchylku, ale v každém z dalších parametrů je téměř vždy horší, než blok C4. Z hlediska přesnosti vychází nejlépe blok C4.

Nicméně je nutné vzít v potaz ještě jedno velmi důležité kritérium kalibrace strojů a to je čas. Z hlediska času je to právě blok C4, který vychází nejhůře a je časově nejnáročnější. Na druhou stranu blok C1, který, co se týká přesnosti vychází nejhůře, tak z časového hlediska je na tom nejlépe. Při opětovném pohledu na vycházející hodnoty a zkušenosti s časovou náročností jednotlivých kompenzací, vychází nejlépe blok C2. Je to tedy nejprve vytvoření polohových kompenzací a následné nasazení volumetrické kompenzace pomocí modelu FRB, který měří a kompenzuje všech 21 možných chyb tříosé kinematiky stroje.

Vždy je tedy velmi důležité si předem jasně stanovit, jaké jsou ideální časové možnosti (tedy odstávka stroje) a jaká je na stroji vyžadována přesnost a podle toho zvolit nejhodnější postup zavedení kompenzací.

V rámci diplomové práce byl kompenzován stroj MCV 754 QUICK od firmy KOVOSVIT MAS, a.s.. Jedná se o malé tříosé obráběcí centrum. Dá se předpokládat, že s rostoucím počtem os a pracovním prostorem obráběcího stroje budou výsledné poměry volumetrické kompenzace ku standardní geometrické kompenzaci ještě markantnější.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 130
	<b>DIPLOMOVÁ PRÁCE</b>	

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Renishaw* [online]. [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz>.
- [2] KAŇA, R. Pracovní přesnost obráběcího stroje MCV 754. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing., Dipl.-Ing. Michal Holub Ph.D.
- [3] *PRIMA BILAVČÍK, s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/lasertracer>.
- [4] *Etalon AG* [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: <http://www.etalon-ag.com/>.
- [5] *KOVOSVIT MAS, a.s.* [online]. 2016 [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <http://www.kovosvit.cz>.
- [6] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. 2. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1991.
- [7] HOLUB, Michal, Josef KNOBLOCH a Jiří PERNIKÁŘ. *GTS - Testování obráběcích strojů* [Podklady k výuce]. Brno: VUT, 2015.
- [8] *SIEMENS* [online]. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.siemens.cz>.
- [9] MALÝ, P. Měření geometrické přesnosti obráběcích strojů zařízením Laser Tracer. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Knobloch, MSc.
- [10] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1
- [11] KLÍMA, Zdeněk. Řídicí systém MIKROPROG ve výuce na SŠ [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2016-04-16]. Master's thesis. University of Ostrava, Pedagogical Faculty. Thesis supervisor Ing. Pavel Dostál, Ph.D.
- [12] Řídicí systémy CNC strojů. Poznejte jejich historii!. *Řídicí systémy CNC strojů. Poznejte jejich historii!* [online]. FANUC Czech, 2014 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://factoryautomation.cz/ridici-systemy-cnc-stroju>
- [13] ČSN ISO 230-1. Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [14] ČSN ISO 230-2. Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [15] ČSN ISO 230-4. Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Blokové schéma CNC obráběcího stroje [11] .....	12
Obrázek 2 Schéma odchylek tříosé kinematiky dle ISO [7].....	13
Obrázek 3 Ukázka ENC kompenzační tabulky.....	16
Obrázek 4 Ukázka CEC kompenzační tabulky.....	17
Obrázek 5 Laserová jednotka XL-80 [1].....	19
Obrázek 6 Kompenzátor XC-80 a snímače [1].....	19
Obrázek 7 Princip Laserinterferometru při měření lineární vzdálenosti .....	22
Obrázek 8 Princip Laserinterferometru při měření přímosti.....	22
Obrázek 9 Ballbar QC20-W [2].....	23
Obrázek 10 Ballbar QC20-W, rozsah měření [1].....	24
Obrázek 11 Obsah soupravy Ballbar QC20-W [1].....	24
Obrázek 12 Princip Ballbaru [7].....	25
Obrázek 13 Laser TRACER - MT [4].....	26
Obrázek 14 Laser TRACER - MT při práci [4].....	26
Obrázek 15 Laser TRACER .....	27
Obrázek 16 Laser TRACER při práci .....	27
Obrázek 17 Teplotní sada TESTO .....	27
Obrázek 18 Reflektor 160° .....	27
Obrázek 19 Naklápěcí stativ .....	28
Obrázek 20 Software TRAC-CAL.....	28
Obrázek 21 Přímost čáry v rovině [13] .....	30
Obrázek 22 Přímost čáry v prostoru [13].....	31
Obrázek 23 Vyhodnocení dvousměrné odchylky kruhovitosti G(b) [15] .....	35
Obrázek 24 Vyhodnocení odchylky kruhovitosti G [15] .....	35
Obrázek 25 Vyhodnocení radiální odchylky F 130[15].....	36
Obrázek 26 Vertikální frézovací centrum MCV 754 QUICK [5] .....	37
Obrázek 27 Plán experimentu.....	39
Obrázek 28 Nastavení programu pro Laserinterferometr 1 .....	40
Obrázek 29 Nastavení programu pro Laserinterferometr 2 .....	40
Obrázek 30 Nastavení programu pro Laserinterferometr 3 .....	40
Obrázek 31 Nastavení programu pro Laserinterferometr 4 .....	40
Obrázek 32 Nastavení programu pro Laserinterferometr 5 .....	41
Obrázek 33 Nastavení programu pro Laserinterferometr 6 .....	41
Obrázek 34 Nastavení programu pro Ballbar 1 .....	41
Obrázek 35 Nastavení programu pro Ballbar 2 .....	41
Obrázek 36 Nastavení programu pro Ballbar 3 .....	42
Obrázek 37 Nastavení programu pro Ballbar 4 .....	42
Obrázek 38 Nastavení programu pro Ballbar 5 .....	42
Obrázek 39 Nastavení programu pro Ballbar 6 .....	42
Obrázek 40 Nastavení programu pro Ballbar 7 .....	43
Obrázek 41 Ballbar - počáteční pozice měření .....	46
Obrázek 42 Ballbar - ustavování .....	46
Obrázek 43 Ballbar, rovina X-Y .....	46
Obrázek 44 Ballbar, rovina Y-Z .....	47
Obrázek 45 Ballbar, rovina Z-X .....	47
Obrázek 46 LT - měření .....	48
Obrázek 47 Graf prostorové odchylky, model FRB, kalibrace.....	49
Obrázek 48 Graf prostorové odchylky, model FRB, verifikace.....	50

Obrázek 49 Ballbar, rovina X-Y.....	50
Obrázek 50 Ballbar, rovina Y-Z.....	51
Obrázek 51 Ballbar, rovina Z-X.....	51
Obrázek 52 Graf prostorové odchytky, model RRB, kalibrace .....	52
Obrázek 53 Graf prostorové odchytky, model RRB, verifikace .....	53
Obrázek 54 Ballbar, rovina X-Y.....	54
Obrázek 55 Ballbar, rovina Y-Z.....	55
Obrázek 56 Ballbar, rovina Z-X.....	55
Obrázek 57 Graf chyb modelu FRB .....	57
Obrázek 58 Graf chyb modelu RRB.....	57
Obrázek 59 Graf porovnání chyb FRB a RRB .....	60
Obrázek 60 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina XY .....	61
Obrázek 61 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina YZ .....	61
Obrázek 62 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina ZX .....	62
Obrázek 63 Ballbar, rovina X-Y.....	64
Obrázek 64 Ballbar, rovina Y-Z.....	65
Obrázek 65 Ballbar, rovina Z-X.....	65
Obrázek 66 Časová stálost DBB - rovina XY .....	67
Obrázek 67 Časová stálost DBB - rovina YZ .....	67
Obrázek 68 Časová stálost DBB - rovina ZX .....	68
Obrázek 69 LI - měření .....	69
Obrázek 70 LI - polohování, kalibrace, osa X .....	70
Obrázek 71 LI - polohování, kalibrace, osa Y .....	70
Obrázek 72 LI - polohování, kalibrace, osa Z.....	71
Obrázek 73 LI - polohování, verifikace, osa X.....	71
Obrázek 74 LI - polohování, verifikace, osa Y.....	72
Obrázek 75 LI - polohování, verifikace, osa Z.....	72
Obrázek 76 Ballbar, rovina X-Y.....	73
Obrázek 77 Ballbar, rovina Y-Z.....	74
Obrázek 78 Ballbar, rovina Z-X.....	74
Obrázek 79 Graf prostorové odchytky, model FRB, kalibrace.....	75
Obrázek 80 Graf prostorové odchytky, model FRB, verifikace .....	76
Obrázek 81 Ballbar, rovina X-Y.....	77
Obrázek 82 Ballbar, rovina Y-Z.....	78
Obrázek 83 Ballbar, rovina Z-X.....	78
Obrázek 84 Graf prostorové odchytky, model RRB, kalibrace .....	79
Obrázek 85 Graf prostorové odchytky, model RRB, verifikace .....	80
Obrázek 86 Ballbar, rovina X-Y.....	81
Obrázek 87 Ballbar, rovina Y-Z.....	82
Obrázek 88 Ballbar, rovina Z-X.....	82
Obrázek 89 Graf chyb modelu FRB .....	84
Obrázek 90 Graf chyb modelu RRB.....	84
Obrázek 91 Graf porovnání chyb FRB a RRB .....	87
Obrázek 92 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina XY .....	88
Obrázek 93 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina YZ .....	88
Obrázek 94 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina ZX .....	89
Obrázek 95 LI - přímost po poloze, kalibrace, chyba EYX.....	91
Obrázek 96 LI - přímost po poloze, kalibrace, chyba EZX.....	91
Obrázek 97 LI - přímost, kalibrace po poloze, chyba EXY .....	92

Obrázek 98 LI - přímost, kalibrace po poloze, chyba EZY .....	92
Obrázek 99 LI - přímost po poloze, kalibrace, chyba EXZ .....	93
Obrázek 100 LI - přímost po poloze, kalibrace, chyba EYZ .....	93
Obrázek 101 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EYX .....	93
Obrázek 102 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EZX .....	94
Obrázek 103 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EXY .....	94
Obrázek 104 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EYZ .....	94
Obrázek 105 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EXZ .....	95
Obrázek 106 LI - přímost po poloze, verifikace, chyba EYZ .....	95
Obrázek 107 Ballbar, rovina X-Y .....	96
Obrázek 108 Ballbar, rovina Y-Z .....	97
Obrázek 109 Ballbar, rovina Z-X .....	97
Obrázek 110 LI - přímost, kalibrace, chyba EYX .....	98
Obrázek 111 LI - přímost, kalibrace, chyba EZX .....	98
Obrázek 112 LI - přímost, kalibrace, chyba EXY .....	99
Obrázek 113 LI - přímost, kalibrace, chyba EYZ .....	99
Obrázek 114 LI - přímost, kalibrace, chyba EXZ .....	100
Obrázek 115 LI - přímost, kalibrace, chyba EYZ .....	100
Obrázek 116 Ballbar, rovina X-Y .....	101
Obrázek 117 Ballbar, rovina Y-Z .....	102
Obrázek 118 Ballbar, rovina Z-X .....	102
Obrázek 119 LI - polohování po přímosti, kalibrace, osa X .....	103
Obrázek 120 LI - polohování po přímosti, kalibrace, osa Y .....	104
Obrázek 121 LI - polohování po přímosti, kalibrace, osa Z .....	104
Obrázek 122 LI - polohování po přímosti, verifikace, osa X .....	105
Obrázek 123 LI - polohování po přímosti, verifikace, osa Y .....	106
Obrázek 124 LI - polohování po přímosti, verifikace, osa Z .....	106
Obrázek 125 Ballbar, rovina X-Y .....	107
Obrázek 126 Ballbar, rovina Y-Z .....	108
Obrázek 127 Ballbar, rovina Z-X .....	108
Obrázek 128 Graf prostorové odchytky, model FRB, kalibrace .....	109
Obrázek 129 Graf prostorové odchytky, model FRB, verifikace .....	110
Obrázek 130 Ballbar, rovina X-Y .....	111
Obrázek 131 Ballbar, rovina Y-Z .....	112
Obrázek 132 Ballbar, rovina Z-X .....	112
Obrázek 133 Graf prostorové odchytky, model RRB, kalibrace .....	113
Obrázek 134 Graf prostorové odchytky, model RRB, verifikace .....	114
Obrázek 135 Ballbar, rovina X-Y .....	115
Obrázek 136 Ballbar, rovina Y-Z .....	116
Obrázek 137 Ballbar, rovina Z-X .....	116
Obrázek 138 Graf chyb modelu FRB .....	118
Obrázek 139 Graf chyb modelu RRB .....	118
Obrázek 140 Graf porovnání chyb FRB a RRB .....	121
Obrázek 141 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina XY .....	122
Obrázek 142 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina YZ .....	122
Obrázek 143 DBB - porovnání modelů FRB a RRB - rovina ZX .....	123
Obrázek 144 Graf DBB - rovina XY .....	125
Obrázek 145 Graf DBB - rovina YZ .....	126
Obrázek 146 Graf DBB - rovina ZX .....	127

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Technické parametry systému Laser Interferometru .....	21
Tabulka 2 Technické parametry Ballbaru .....	25
Tabulka 3 Technické parametry LaserTRACERu .....	28
Tabulka 4 Technické parametry stroje měřeného v experimentu .....	37
Tabulka 5 Naměřené hodnoty, rovina X-Y .....	46
Tabulka 6 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z .....	47
Tabulka 7 Naměřené hodnoty, rovina Z-X .....	47
Tabulka 8 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, kalibrace .....	48
Tabulka 9 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, verifikace .....	49
Tabulka 10 Naměřené hodnoty, rovina X-Y .....	50
Tabulka 11 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z .....	51
Tabulka 12 Naměřené hodnoty, rovina Z-X .....	51
Tabulka 13 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, kalibrace .....	52
Tabulka 14 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, verifikace .....	53
Tabulka 15 Naměřené hodnoty, rovina X-Y .....	54
Tabulka 16 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z .....	55
Tabulka 17 Naměřené hodnoty, rovina Z-X .....	55
Tabulka 18 Chyby modelu FRB .....	56
Tabulka 19 Chyby modelu RRB .....	58
Tabulka 20 Porovnání chyb FRB a RRB .....	59
Tabulka 21 DBB - porovnání modelů FRB a RRB .....	63
Tabulka 22 Naměřené hodnoty, rovina X-Y .....	64
Tabulka 23 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z .....	65
Tabulka 24 Naměřené hodnoty, rovina Z-X .....	65
Tabulka 25 Časová stálost stroje .....	66
Tabulka 26 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa X .....	69
Tabulka 27 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Y .....	70
Tabulka 28 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Z .....	70
Tabulka 29 Naměřené hodnoty, verifikace, osa X .....	71
Tabulka 30 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Y .....	71
Tabulka 31 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Z .....	72
Tabulka 32 Naměřené hodnoty, rovina X-Y .....	73
Tabulka 33 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z .....	74
Tabulka 34 Naměřené hodnoty, rovina Z-X .....	74
Tabulka 35 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, kalibrace .....	75
Tabulka 36 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, verifikace .....	76
Tabulka 37 Naměřené hodnoty, rovina X-Y .....	77
Tabulka 38 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z .....	78
Tabulka 39 Naměřené hodnoty, rovina Z-X .....	78
Tabulka 40 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, kalibrace .....	79
Tabulka 41 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, verifikace .....	80
Tabulka 42 Naměřené hodnoty, rovina X-Y .....	81
Tabulka 43 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z .....	82
Tabulka 44 Naměřené hodnoty, rovina Z-X .....	82
Tabulka 45 Chyby modelu FRB .....	83
Tabulka 46 Chyby modelu RRB .....	85
Tabulka 47 Porovnání chyb FRB a RRB .....	86
Tabulka 48 DBB - porovnání modelů FRB a RRB .....	90

Tabulka 49 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa X.....	91
Tabulka 50 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Y.....	92
Tabulka 51 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Z.....	92
Tabulka 52 Naměřené hodnoty, verifikace, osa X.....	93
Tabulka 53 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Y.....	94
Tabulka 54 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Z.....	95
Tabulka 55 Naměřené hodnoty, rovina X-Y.....	96
Tabulka 56 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z.....	97
Tabulka 57 Naměřené hodnoty, rovina Z-X.....	97
Tabulka 58 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa X.....	98
Tabulka 59 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Y.....	99
Tabulka 60 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Z.....	99
Tabulka 61 Naměřené hodnoty, rovina X-Y.....	101
Tabulka 62 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z.....	102
Tabulka 63 Naměřené hodnoty, rovina Z-X.....	102
Tabulka 64 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa X.....	103
Tabulka 65 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Y.....	103
Tabulka 66 Naměřené hodnoty, kalibrace, osa Z.....	104
Tabulka 67 Naměřené hodnoty, verifikace, osa X.....	105
Tabulka 68 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Y.....	105
Tabulka 69 Naměřené hodnoty, verifikace, osa Z.....	106
Tabulka 70 Naměřené hodnoty, rovina X-Y.....	107
Tabulka 71 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z.....	108
Tabulka 72 Naměřené hodnoty, rovina Z-X.....	108
Tabulka 73 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, kalibrace.....	109
Tabulka 74 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model FRB, verifikace.....	110
Tabulka 75 Naměřené hodnoty, rovina X-Y.....	111
Tabulka 76 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z.....	112
Tabulka 77 Naměřené hodnoty, rovina Z-X.....	112
Tabulka 78 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, kalibrace.....	113
Tabulka 79 Naměřené hodnoty jednotlivých chyb, model RRB, verifikace.....	114
Tabulka 80 Naměřené hodnoty, rovina X-Y.....	115
Tabulka 81 Naměřené hodnoty, rovina Y-Z.....	116
Tabulka 82 Naměřené hodnoty, rovina Z-X.....	116
Tabulka 83 Chyby modelu FRB.....	117
Tabulka 84 Chyby modelu RRB.....	119
Tabulka 85 Porovnání chyb FRB a RRB.....	120
Tabulka 86 DBB - porovnání modelů FRB a RRB.....	124
Tabulka 87 DBB - hodnoty pro rovinu XY.....	125
Tabulka 88 DBB - hodnoty pro rovinu YZ.....	126
Tabulka 89 DBB - hodnoty pro rovinu ZX.....	127