

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 - Obrábění, aditivní
technologie a zabezpečování kvality

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Problematika přípravy dat pro reverzní inženýrství

Autor: Bc. Ladislav ČÍŽEK

Vedoucí práce: Ing. Dana KUBÁTOVÁ, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ladislav ČÍŽEK**
Osobní číslo: **S19N0099P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Problematika přípravy dat pro reverzní inženýrství**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

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

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1209-6.
- ROBLIN, Sebastien. Attack of the Loons: America Planned to Strike Germany and Japan with 75,000 Reverse-Engineered Nazi Cruise Missiles. *The National Interest* [online]. 2019-12-14 [cit. 2020-01-08]. Dostupné online.
- <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/senzory/on-cmm/optical-sensors-cmm/zeiss-linescan.html>

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

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Kutlwašer, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

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

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Čížek	Jméno Ladislav		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kubátová, Ph.D.	Jméno Dana		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Problematika přípravy dat pro reverzní inženýrství			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	69	TEXTOVÁ ČÁST	49	GRAFICKÁ ČÁST	20
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce se zaměřuje na problematiku přípravy dat pro reverzní inženýrství. Cílem je zmapovat problematiku práce s optickým senzorem Zeiss LineScan na 3D souřadnicovém měřicím stroji, jeho nastavením a zpracováním naměřených dat. Vyhodnocením realizovaného experimentu bylo zjištěno ideální nastavení za daných podmínek měření.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	reverzní inženýrství, souřadnicový měřicí stroj, skener, měření, mračno bodů

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Čížek	Name Ladislav	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 - Mechining, Additive Technology a And Quality Assurance		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kubátová, Ph.D.	Name Dana	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The issue of data preparation for reverse engineering		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	69	TEXT PART	49	GRAPHICAL PART	20
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis deals with the issue of data preparation for reverse engineering. The aim is to map the issue of working with the Zeiss LineScan optical sensor on a 3D coordinate measuring machine, its setting and processing of measured data. By evaluating the performed experiment, the ideal setting for the given measurements was found.
KEY WORDS	reverse engineering, coordinate measuring machine, scanner, measurement, point cloud

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí diplomové práce paní Ing. Daně Kubátové, Ph.D. za všechny odborné rady, konzultace a poskytnuté informace. Rád bych také poděkoval panu Ing. Janu Kutlwašerovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky.

Na závěr děkuji své rodině a přátelům za plnou podporu během studia.

Obsah

.....	2
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků	11
Seznam rovnic	12
Seznam tabulek	13
Seznam grafů.....	13
1 Úvod a definice cílů	14
1.1 Cíl práce.....	14
1.2 Obsah diplomové práce	14
1.3 Reverzní inženýrství.....	15
1.3.1 Měření	15
1.3.2 Kontaktní skenování.....	15
1.3.3 Druhy kontaktních sond	16
1.3.3.1 Kinematické (spínací) sondy.....	16
1.3.3.2 Tenzometrické sondy	17
1.3.3.3 Piezo sondy	17
1.3.3.4 Optické sondy	18
1.3.4 Bezkontaktní měření	19
1.3.4.1 Aktivní optické metody snímání.....	20
1.3.4.2 Optické laserové snímání.....	21
1.3.4.3 Metoda měření doby letu světla.....	23
1.3.4.4 Snímání pomocí strukturovaného světla.....	24
1.3.4.5 Pasivní optické metody snímání	24
1.3.4.6 Snímání objektivem s pevnou ohniskovou vzdáleností (Focus-variation) .	25
1.3.4.7 Fotogrammetrie.....	26
1.3.5 Neoptické metody	26
1.3.6 Destruktivní metoda snímání	27
1.3.7 Zpracování naměřených dat	28
1.3.7.1 Zpracování mračka bodů a jednotlivých snímků	28
1.3.7.2 Tvorba polygonové sítě.....	29
1.3.7.3 Tvorba základních křivek a ploch.....	30
1.3.7.4 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) plochy	30
2 Rešerše současného stavu.....	31

2.1	Carl Zeiss Prismo 7 Navigator.....	31
2.2	Zeiss LineScan.....	32
2.3	WBScan.....	34
2.3.1	GSL.....	36
2.3.2	QSP.....	36
2.3.3	RSL.....	37
2.4	Software pro vyhodnocení měření.....	38
3	Návrh experimentů.....	39
3.1	Volba měřeného objektu pro experimenty.....	39
3.2	Vlastní skenování měrek.....	41
3.2.1	Skenované oblasti měřky.....	43
3.2.2	Seznam všech provedených nastavení skeneru.....	44
3.3	Vygenerování polygonových sítí.....	46
3.4	Tvorba grafického protokolu o měření.....	49
4	Vyhodnocení experimentů a jejich zhodnocení.....	52
4.1	Zhodnocení experimentů.....	56
4.2	Shrnutí popsaných poznatků.....	63
4.3	Možné ovlivnění experimentu.....	64
5	Závěr.....	67
	Seznam použitých zdrojů.....	68
	PŘÍLOHA č. 1.....	i
	PŘÍLOHA č. 2.....	xiii
	PŘÍLOHA č. 3.....	xxix
	PŘÍLOHA č. 4.....	lix

Přehled použitých zkratk a symbolů

CCD	Charge-coupled device, elektronická součástka snímající informaci o obraze
RE	Reverzní inženýrství
CAD	Computer Aided Design, počítačem podporované projektování
CAM	Computer Aided Manufacturing, počítačem podporovaná výroba
CAE	Computer Aided Engineering, počítačově podporované inženýrství
RSL	Raw Scan Lines, druh skenovaných bodů bez filtru
GSL	Gridded Scan Lines, druh skenovaných bodů s filtrem
QSP	Qualified Scan Lines, druh skenovaných bodů s filtrem a komprimací bodů
STL	Stereolitografie
NURBS	Non-Uniform Rational B-Spline
2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
CNC	Computer Numerical Control,
μm	mikrometr
mm	milimetr
s	sekunda
kHz	kilohertz
lx	lux
mW	miliWatt

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Příklad souřadnicového měřicího stroje [4]</i>	16
<i>Obr. 2: Schéma kinematické sondy [5]</i>	16
<i>Obr. 3: Náčrt tenzometrické sondy [6]</i>	17
<i>Obr. 4: Schéma Piezo sondy [5]</i>	18
<i>Obr. 5: Schéma optické sondy [7]</i>	18
<i>Obr. 6: Snímání vertikálních ploch kontaktní a bezkontaktní metodou [1]</i>	19
<i>Obr. 7: Rozdělení bezkontaktních metod skenování [1]</i>	19
<i>Obr. 8: a) Triangulace za pomoci jednoduché CCD kamery a b) dvojitě CCD kamery [1]</i> ...	20
<i>Obr. 9: Schéma funkce laserového skeneru [2]</i>	21
<i>Obr. 10: Znáznornění zorného pole skeneru [9]</i>	22
<i>Obr. 11: Závislost rozlišení a přesnosti laser skeneru [9]</i>	23
<i>Obr. 12: Metoda měření doby letu světla [12]</i>	23
<i>Obr. 13: Příklad skeneru se strukturovaným světlem [13]</i>	24
<i>Obr. 14: Princip pasivní triangulace [19]</i>	25
<i>Obr. 15: Schéma objektivu s pevnou ohniskovou vzdáleností [14]</i>	26
<i>Obr. 16: Princip funkce CT skeneru [1]</i>	27
<i>Obr. 17: Princip 2D snímku průřezu objektem [1]</i>	28
<i>Obr. 18: Příklad vytvoření polygonové sítě z mračna bodů [15]</i>	29
<i>Obr. 19: Souřadnicový měřicí stroj s optickým senzorem</i>	31
<i>Obr. 20: Rozměry skeneru v mm [20]</i>	32
<i>Obr. 21: Maximální zorné pole skeneru [20]</i>	33
<i>Obr. 22: Výstražná značení na skeneru</i>	34
<i>Obr. 23: Režim zarovnání [20]</i>	35
<i>Obr. 24: Dialogové okno s nastavením laseru a závěrky skeneru</i>	35
<i>Obr. 25: Dialogové okno nastavení metody GSL</i>	36
<i>Obr. 26: Dialogové okno nastavení metody QSP</i>	36
<i>Obr. 27: Dialogové okno nastavení senzoru skeneru.</i>	37
<i>Obr. 28: Grafické znázornění způsobu získávání mračna bodů [23]</i>	37
<i>Obr. 29: Upnutí základní měřky délky 100 mm ve směru osy X</i>	39
<i>Obr. 30: Upnutí základní měřky délky 500 mm ve směru osy X</i>	40
<i>Obr. 31: Vygenerované polygonové modely naskenovaných měrek bez zmatněného povrchu</i>	40
<i>Obr. 32: Fotografie měrek se zmatněným povrchem</i>	41
<i>Obr. 33: Nalezení správné měřicí polohy skeneru</i>	42

<i>Obr. 34: Ovládací panel</i>	42
<i>Obr. 35: Měření měřky 500 mm</i>	43
<i>Obr. 36: Příklad naskenovaných GSL bodů u měřky délky 500 mm</i>	43
<i>Obr. 37: QSP mračno bodů s vynechanými řádky</i>	46
<i>Obr. 38: Příklad výsledku filtrace šumu</i>	46
<i>Obr. 39: Neupravená polygonová síť</i>	47
<i>Obr. 40: Polygonové sítě u hran modelu</i>	47
<i>Obr. 41: Výsledná polygonová síť zobrazená v STL prohlížeči</i>	48
<i>Obr. 42: Výsledný polygonový model měřky délky 500</i>	48
<i>Obr. 43: Příklad vyhodnocení odchylek na lapované straně měřky</i>	49
<i>Obr. 44: Příklad vyhodnocování odchylek na boční straně měřky</i>	50
<i>Obr. 45: Příklad vyhodnocení počátečního zarovnání</i>	50
<i>Obr. 46: Příklad protokolu s 3D porovnáním celkových odchylek</i>	51
<i>Obr. 47: Šířka kroku GSL bodů 1 mm (vlevo) a 0,1 mm (vpravo)</i>	56
<i>Obr. 48: Schopnost různých nastavení zaznamenat detaily povrchu</i>	63
<i>Obr. 49: Celkové porovnání poznatků z experimentů</i>	63
<i>Obr. 50: Přejetí skeneru přes hranu měřky</i>	64
<i>Obr. 51: GSL body (levá strana), RSL body (pravá strana)</i>	64
<i>Obr. 52: Pohled na plochu modelu měřky 500 mm</i>	65
<i>Obr. 53: Pohled na plochu modelu měřky 100 mm</i>	65
<i>Obr. 54: Barevná mapa odchylek na měřce 500 mm bez povlaku</i>	66
<i>Obr. 55: Barevná mapa odchylek na měřce 500 mm s aplikovaným povlakem</i>	66

Seznam rovnic

<i>Rovnice č. 1: Výpočet Z souřadnice z aktivní triangulace</i>	21
<i>Rovnice č. 2: Výpočet X souřadnice z aktivní triangulace</i>	21
<i>Rovnice č. 3: Vzdálenost objektu D z pasivní triangulace</i>	23

Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Základní technické informace souřadnicového měřicího stroje [24]</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 2: Technická data skeneru ZEISS LineScan [20].....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 3: Sada nastavení skeneru pro měрку 100 mm v ose X.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 4: Sada nastavení skeneru pro měрку 100 mm v ose Y.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 5: Sada nastavení skeneru pro měрку 500 mm v ose X.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 6: Sada nastavení skeneru pro měрку 500 mm v ose Y.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7: Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 100 mm v ose X.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 8: Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 100 mm v ose Y.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 9: Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 500 mm v ose X.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 10: Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 500 mm v ose Y.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 11: Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 100 mm v ose X</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 12: Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 100 mm v ose Y.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 13: Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 500 mm v ose X</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 14: Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 500 mm v ose Y.....</i>	<i>56</i>

Seznam grafů

<i>Graf č. 1 : Nastavení č. 8 – GSL body s šířkou kroku 1 mm</i>	<i>57</i>
<i>Graf č. 2: Nastavení č. 7 – GSL body s šířkou kroku 0,5 mm</i>	<i>57</i>
<i>Graf č. 3: Nastavení č. 6 – GSL body s šířkou kroku 0,1 mm</i>	<i>58</i>
<i>Graf č. 4: Nastavení č. 8 – vedlejší GSL body s krokem 1 mm</i>	<i>58</i>
<i>Graf č. 5: Nastavení č. 7 – vedlejší GSL body s krokem 0,5 mm</i>	<i>59</i>
<i>Graf č. 6: Nastavení č. 6 – vedlejší GSL body s krokem 0,1 mm</i>	<i>59</i>
<i>Graf č. 7: Nastavení 11 – QSP body s krokem 0,5 mm a 2D komprimací</i>	<i>60</i>
<i>Graf č. 8: Nastavení č. 15 - RSL body, rychlost 5 %</i>	<i>61</i>
<i>Graf č. 9: Nastavení č. 15 - RSL body, rychlost 5%</i>	<i>61</i>
<i>Graf č. 10: Nastavení skeneru č. 3 – RSL, rychlost 10 %</i>	<i>62</i>
<i>Graf č. 11: Nastavení skeneru č. 3 pro vedlejší odchylky – RSL, rychlost 10 %</i>	<i>62</i>

1 Úvod a definice cílů

Reverzní inženýrství, které může být také definováno jako tvorba modelů z fyzických objektů zájmu, se stává čím dál, tím více využívaným nástrojem v mnoha odvětvích, včetně výrobního průmyslu, automobilového designu a počítačové animace. Začíná být také nedílnou součástí ve zdravotnictví, kde nástroje reverzního inženýrství pomáhají při rekonstrukci a tvorbě náhrad částí lidského těla. Ačkoliv bylo reverzní inženýrství obecně používané k analýze a výrobě už po mnoho let, moderní technologie tento proces usnadňují a dělají ho dostupnějším, zejména při skloubení s aditivními technologiemi. Přestože jsou moderní nástroje reverzního inženýrství obecně prospěšné v mnoha směrech, zkracují např. náklady a čas pro vývoj, je zapotřebí se také zabývat morální a legislativní stránkou věci, zejména při konkurenčním boji společností. [1][2]

1.1 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je zmapování problematiky měření s optickým senzorem Zeiss LineScan. Konkrétně bude pojednáno o práci s nastavením optického senzoru, skenováním zvoleného objektu, zpracováním naměřených hodnot a vyhodnocením těchto náměrů. Výstupem z experimentu bude porovnání jednotlivých možností nastavení způsobu snímání skeneru, popřípadě bude vyhodnocení doplněno o vlivy skenovací strategie na výsledné

1.2 Obsah diplomové práce

V první kapitole bude dále detailněji rozepsána teoretická část, která objasňuje reverzní inženýrství jako takové. Spolu s tím budou podrobněji popsány kroky, které jsou zapotřebí pro zpětné vyhotovení nebo digitalizaci požadovaného objektu v oblasti strojírenství. Prvním z těchto kroků je zjištění tvaru a rozměrů pomocí různých metod měření. Tyto metody budou dále rozděleny a popsány, přičemž bude detailněji vysvětlen princip funkce aktivních optických laserových skenerů, mezi které se řadí výše zmíněný optický senzor. Dále budou popsány úkony v softwarech, které jsou nutné k úspěšné digitalizaci získaných dat.

Druhá kapitola se zabývá použitým vybavením v laboratoři dílenské metrologie, ve které se experiment realizoval. Laboratoř je součástí Regionálního technologického institutu v Plzni a jedním ze zaměření je právě digitalizace komponent a vzorků za účelem tvorby modelů.

Ve třetí kapitole bude popsán postup měření základních měrek, které byly zvoleny jako referenční objekt, na jehož základě byly posuzovány konkrétní nastavení optického senzoru

Čtvrtá a pátá kapitola práce je věnována vyhodnocení experimentů a jejich zhodnocení.

1.3 Reverzní inženýrství

Inženýrství, jako takové, je proces od návrhu až do zhotovení a udržování produktů a služeb. Tento proces lze dále rozdělit na dva typy – dopředné inženýrství a reverzní inženýrství. Proces z pohledu dopředného inženýrství může být chápán jako tradiční způsob výroby produktů a služeb, kdy je prvním krokem návrh a dále následné zhotovení. Naopak reverzní inženýrství skýtá opačný postup a používá se při situacích, kdy např. existuje výrobek, ale nelze dohledat žádná data s ním související (výkres sestavy, výkresy jednotlivých dílů v kusovníku, CAD modely atp.). Také jej lze definovat jako proces získávání CAD modelu z mračna bodů získaných digitalizací (skenováním nebo měřením) existujících dílů či produktů. [1] [2]

Možné využití reverzního inženýrství (dále jen RE):

- *„Původní výrobce zanikl a zákazník potřebuje náhradní díly.*
- *Výrobní dokumentace, nebo CAD data byla ztracena.*
- *Vytváření 3D dat z modelu nebo sochy pro animace ve hrách a filmech, vytvoření kopie uměleckého díla v měřítku atd.*
- *Měření a dokumentace architektonických prvků.*
- *Získávání dat k výrobě chirurgických a dentálních protéz a oblečení na míru.*
- *Rekonstrukce místa činu...“[1]*

Realizace RE v oblasti strojírenství se obecně skládá ze tří kroků – měření, zpracování mračna bodů a zhotovení součásti. [1]

1.3.1 Měření

K získání dat o tvaru součásti lze použít hned několik metod a každá z nich využívá mechanismus nebo fyzikální jev k interakci s povrchem měřeného objektu. V závislosti na vybrané metodě lze rozdělit skenování na: kontaktní, bezkontaktní, nedestruktivní a destruktivní. [1][3]

1.3.2 Kontaktní skenování

Kontaktní měření využívá dotykové sondy k interakci s povrchem měřené součásti. Dotyková sonda je upevněna na hlavici souřadnicového měřicího stroje (příklad souřadnicového měřicího stroje je znázorněn na obrázku č. 1) či měřicího ramena. Vzhledem k tomu, že pro sejmnutí každého bodu musí být pokaždé špička („dotek“) sondy přiblížena k povrchu, aby

došlo k rozpojení kontaktů a zaznamenání bodu, tato metoda může být v závislosti na velikosti výrobku velmi pomalá. Další omezení z pohledu přesnosti a náročnosti může nastat při měření měkkých a pružných materiálů, jako je guma. [1]

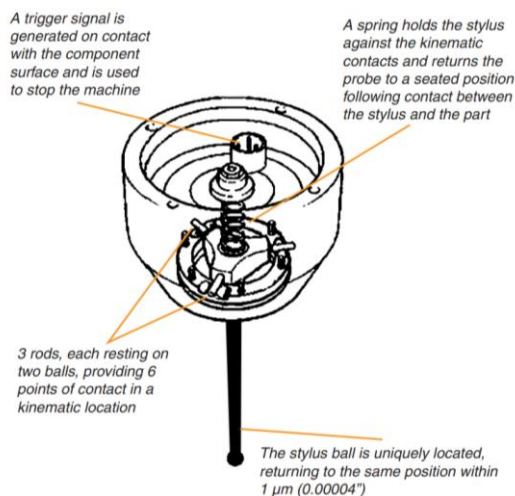


Obr. 1: Příklad souřadnicového měřicího stroje [4]

1.3.3 Druhy kontaktních sond

1.3.3.1 Kinematické (spínací) sondy

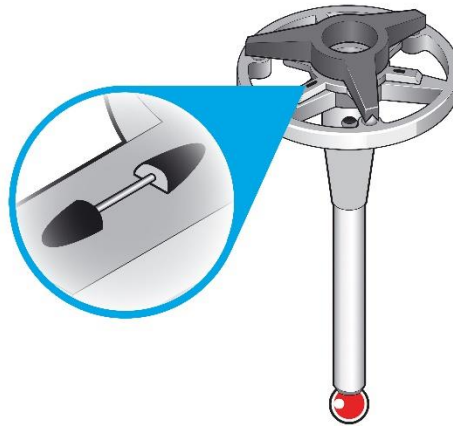
Tento druh sond využívá principu tří tyčí předepnutých pružinou a šesti kuliček k vytvoření elektrického obvodu. Materiál tohoto kinematického mechanismu musí být velmi tvrdý (např. karbid wolframu), aby byla elastická deformace vytvořená v těchto bodech co nejmenší. Každá tyč dosedá mezi dvě kuličky, jak je znázorněno na obrázku č.2, kdy při sejmutí bodu na obrobku dojde k vychýlení dotyku spojeného s tímto mechanismem. [5]



Obr. 2: Schéma kinematické sondy [5]

1.3.3.2 Tenzometrické sondy

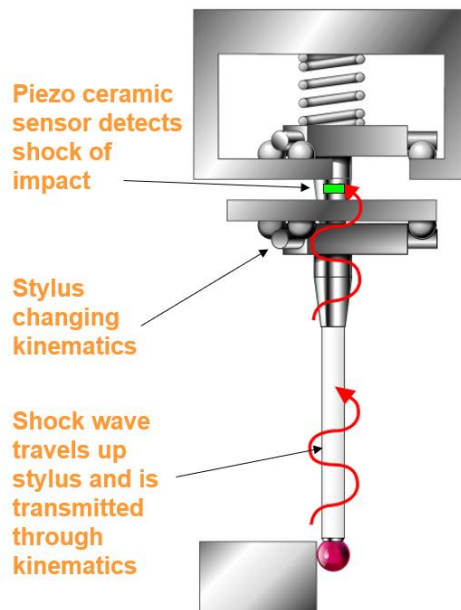
Na rozdíl od kinematických sond, tenzometrické snímače měří velikost síly při měření, čímž je dosaženo křemíkovými tenzometry usazenými na strunách. Tenzometrické sondy stále využívají kinematického mechanismu, který je využit pouze k vrácení doteku do klidové polohy. Princip je znázorněn na obrázku č. 3. Tento druh sond se vyznačuje vyšší citlivostí oproti kinematickým sondám. [5] [6]



Obr. 3: Náčrt tenzometrické sondy [6]

1.3.3.3 Piezo sondy

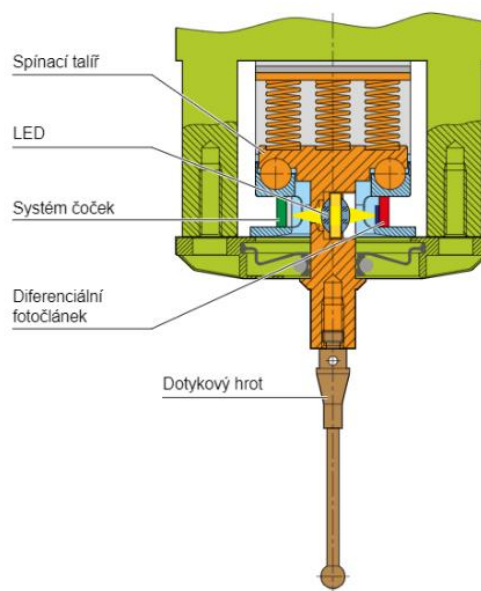
Piezo sonda používá jeden nebo více piezoelektrických snímačů k detekci „nárazu“ doteku o povrch měřené součásti, čímž se generuje elektrický signál. Při dopadu se v těle doteku generuje mechanický pulz, který putuje o vysoké frekvenci a rychlosti ke snímači, proto může sonda reagovat vůči povrchu mnohem rychleji a přesněji než předem zmíněná tenzometrická a kinematická sonda. Zároveň vzrůstá potřeba větší čistoty měřeného povrchu, jelikož nečistoty mezi povrchem součásti a doteku snímače mohou zapříčinit narušení signálu. I v této sondě je zabudovaný kinematický mechanismus, který je použit jak k ustavení dotyku, tak i k případnému potvrzení sejmutého bodu. Schéma piezo sondy je znázorněno na obrázku č. 4. [5]



Obr. 4: Schéma Piezo sondy [5]

1.3.3.4 Optické sondy

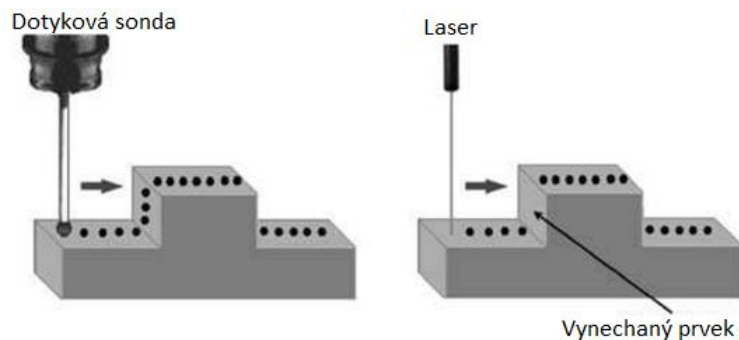
Optické sondy pracují na principu optického paprsku zaostřeného soustavou čoček, který dopadá na diferenciální fotočlánek, vlivem čehož je zaznamenáno vychýlení měřicího doteku. Schéma optické sondy je vykresleno na obrázku č. 5. [7]



Obr. 5: Schéma optické sondy [7]

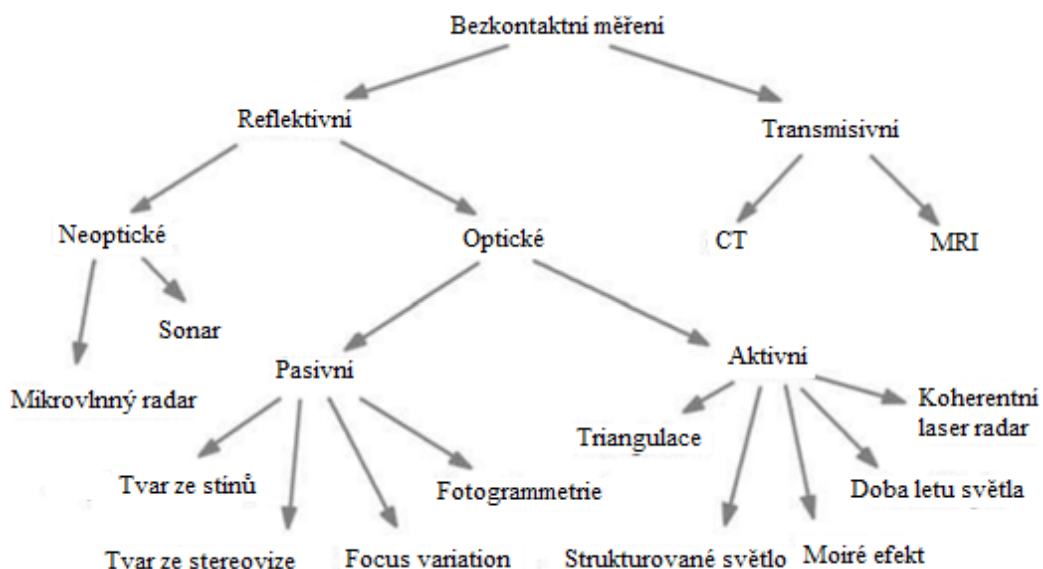
1.3.4 Bezkontaktní měření

Při bezkontaktním měření se získávají data bez fyzického kontaktu s povrchem za pomoci laserů, optických snímačů a CCD senzorů (zkratka z charge-coupled device, tj. zařízení s vázanými náboji používané pro snímání obrazových informací). Výhodou je získání velkého počtu bodů za krátký časový interval, možnost zaznamenávat barvy (vybrané optické skenery) a měření i malých a detailních tvarů, které by bylo obtížné zaznamenat kontaktními sondami. Naopak nevýhodou, u některých systémů, mohou být problémy spojené se skenováním povrchů rovnoběžných s osou laseru (znázorněno na obrázku č 6). Pokud se uskutečňuje měření na dílu s lesklým povrchem, světlo ze zdroje skeneru se může odrážet od povrchu a snížit přesnost snímání. V tomto případě musí být, na povrchy s větší odrazivostí, před měřením aplikován jemný prášek. Obrázek č. 7 popisuje druhy bezkontaktních měření [1]



Obr. 6: Snímání vertikálních ploch kontaktní a bezkontaktní metodou [1]

Principy bezkontaktních měření

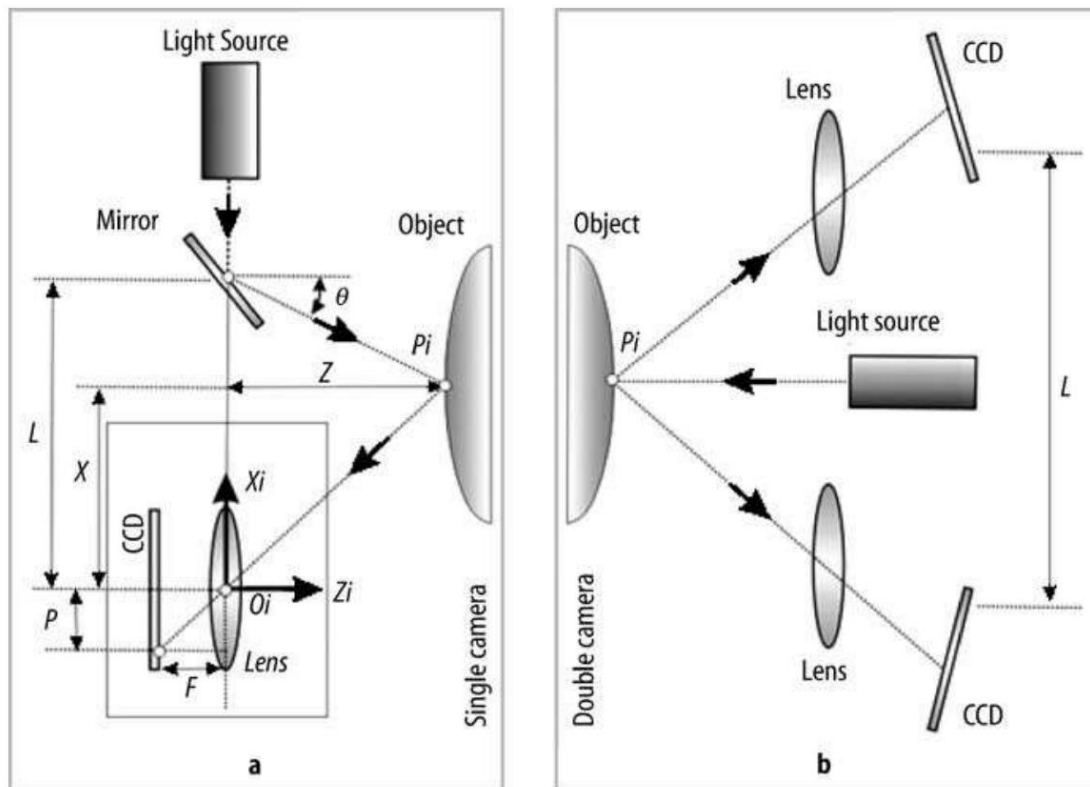


Obr. 7: Rozdělení bezkontaktních metod skenování [1]

1.3.4.1 Aktivní optické metody snímání

Princip aktivní triangulace

Přímá geometrická triangulace se využívá u většiny laserových skenerů a je používána k určení souřadnic bodů měřeného povrchu. Pro výpočet souřadnic jsou použity definované vzdálenosti a úhly mezi zdroji světla a fotocitlivými zařízeními (CCD kamery). [1]



Obr. 8: a) Triangulace za pomoci jednoduché CCD kamery a b) dvojité CCD kamery [1]

Obrázek č. 8 znázorňuje schémata dvou možných variant triangulace při použití jedné CCD kamery a dvou kamer. U systémů s jednou CCD kamerou zdroj světla vyzařuje světelnou linku nebo bod (systémy měřící pouze vzdálenost) pod definovaným úhlem. Pozice tohoto bodu či linky na měřeném povrchu je detekována kamerou, přičemž zdroj světla není, kromě nastavení intenzity, nijak přímo zapojen do měřících funkcí. Jak je znázorněno na obrázku č. 8 a) světelný zdroj s vysokou energií je zaostřen a promítán pod předem stanoveným úhlem (θ) na povrch měřeného objektu. „Jelikož pevná základní délka (L [mm]) mezi zdrojem světla a kamerou je známa z kalibrace pomocí geometrické triangulace ze známého úhlu (θ [°]), ohniskové vzdálenosti kamery (F [mm]), obrazu souřadnice nasvíceného bodu (P [mm]) a

pevné základní délky (L). Pomocí pozice nasvíceného bodu (P_i [mm]) vzhledem k souřadnicovému systému kamery lze dopočítat následovně souřadnice (Z) a (X): [1]

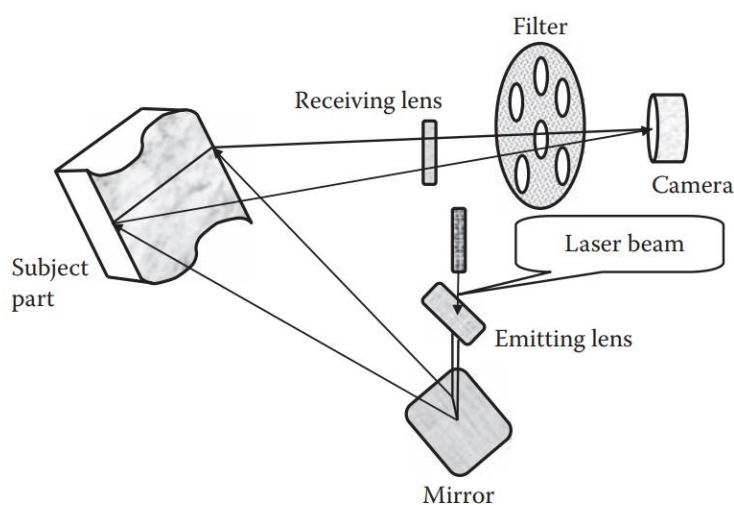
$$Z = \frac{FL}{P + Ftan\theta} \text{ [mm]} \quad (1)$$

$$X = L - Ztan\theta \text{ [mm]} \quad (2)$$

Ačkoliv by zvýšením pevné základní délky (L) bylo možné dosáhnout větší přesnosti při měření, z praktických a konstrukčních důvodů není možné tuto délku měnit vzhledem k hardwarovému složení skenerů. [1]

1.3.4.2 Optické laserové snímání

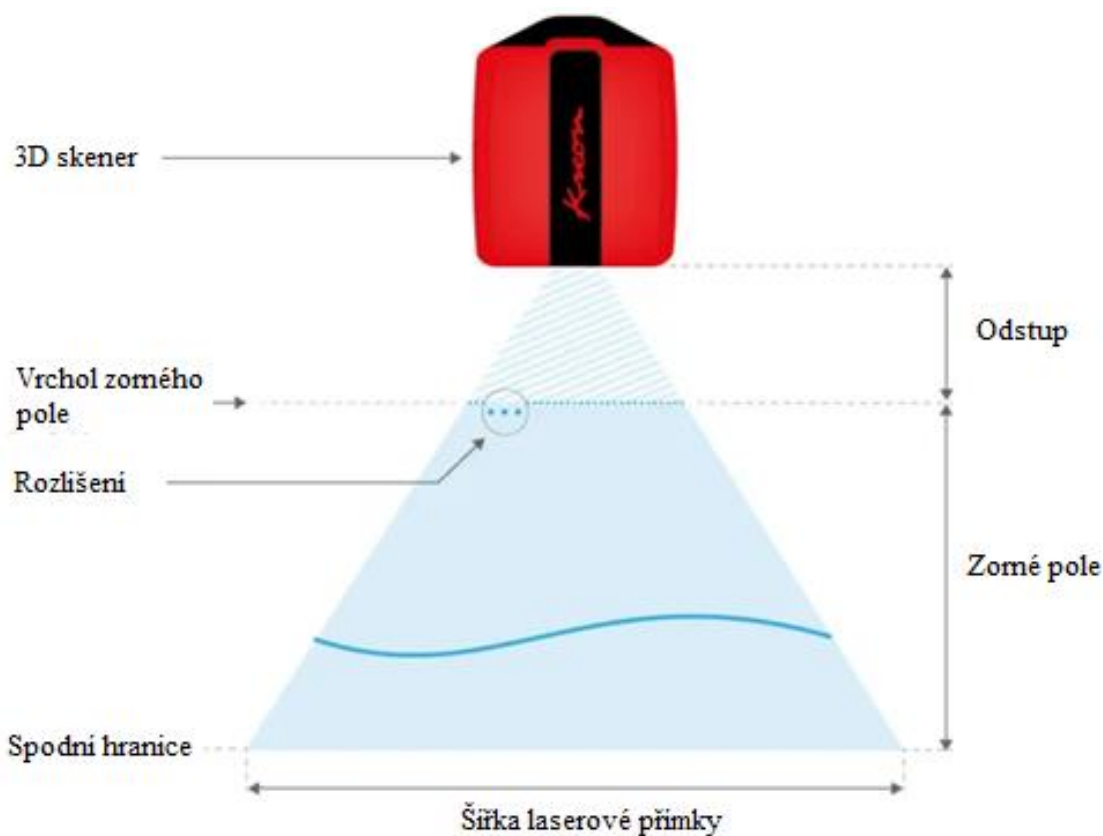
Laserový paprsek je nasvícen skrze vyzařovací čočku a vzniklá světelná linka je promítnuta na povrch měřené součásti, přičemž vzniklý profil snímá kamera. Souřadnice jednotlivých bodů na měřeném povrchu jsou určeny triangulací. Schéma laserového skeneru je znázorněno na obrázku č. 9. Jako tvar promítaného zdroje světla je používán bod či přímka, který je namontován na pohyblivou platformu pro vytváření vícenásobných povrchových skenů. Četnost provedení takového skenu poté určuje detailnost celkového obrazu, a to spolu s rozlišením použité CCD kamery, nastavením šířky snímané oblasti a vzdálenosti skeneru od snímaného povrchu. Podle provedení jsou dodávány jako kompletní systémy, nebo také jako samostatné snímací hlavy pro montáž místo dotykových sond na měřicí ramena, popř. souřadnicové měřicí stroje.[1][2][8]



Obr. 9: Schéma funkce laserového skeneru [2]

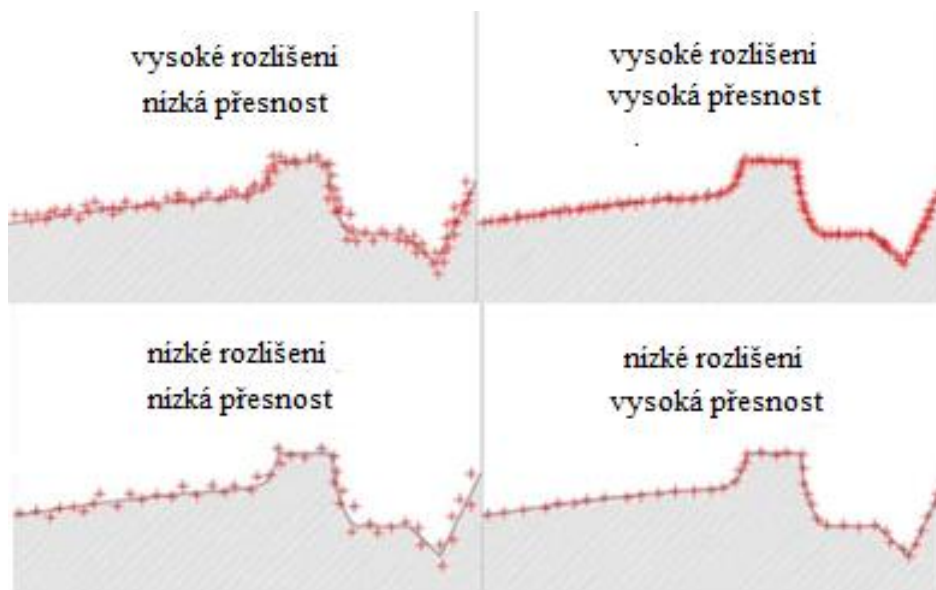
Rozlišení a přesnost optických laserových skenerů

Rozlišení je u tohoto typu skenerů definováno jako nejmenší vzdálenost mezi dvěma body, kterou je skener schopný zaznamenat na promítnuté laserové lince. Nejedná se tedy o přesnost samotného skeneru. Rozlišení je vždy měřeno na vrcholu zorného pole skeneru (nejlepší teoretická hodnota), přičemž této hodnoty není při měření skoro nikdy dosaženo, jak je popsáno na obrázku č. 10. Pokud není při měření použita interpolace (dopočítávání) z naměřených bodů, tak rozlišení skeneru udává v první řadě rozlišení použité CCD kamery a dále pak velikost zorného pole (některé typy skenerů umožňují měnit úhel zorného pole). [9]



Obr. 10: Znáznornění zorného pole skeneru [9]

Jak už bylo zmíněno v předchozím odstavci, rozlišení a přesnost nepředstavují stejnou charakteristiku laser skeneru. Přesností se zde rozumí odchylka nasnímaného bodu v prostoru vůči skutečnému bodu na snímaném objektu. Rozlišení poté definuje hustotu bodů nacházejících se na promítané laserové lince. Ačkoli tyto dvě hodnoty spolu nesouvisí, skener s vysokou přesností může mít malé rozlišení a naopak. Tato skutečnost je zobrazena na obrázku č. 11. [9]



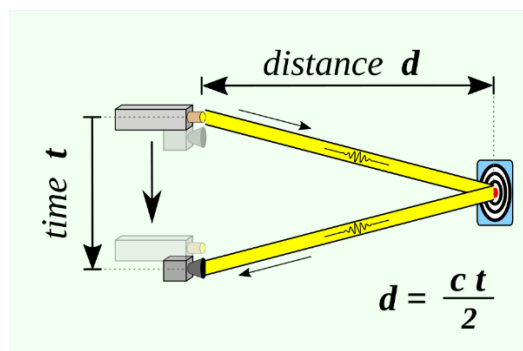
Obr. 11: Závislost rozlišení a přesnosti laser skeneru [9]

1.3.4.3 Metoda měření doby letu světla

Při tomto způsobu získávání informace o poloze bodu je měřen čas t [s], za který se světelný pulz stihne odrazit od povrchu objektu zpět do přijímače skeneru, ze kterého byl zdrojem vyslán. Vzdálenost objektu D od zdroje světla je poté možno vypočítat za pomoci známé rychlosti světla C [m/s]: [1]

$$D = C \times \frac{t}{2} \quad [mm] \quad (3)$$

Při dané rychlosti světla umožňují skenery, využívající tento způsob měření, stovky až tisíce jednotlivých skenů za vteřinu. Přesnost poté závisí na rychlosti přijímače skeneru a době trvání světelného pulzu (jedná se o rozmezí od pár milimetrů až po 2-3 centimetry). Z tohoto důvodu nejsou tyto skenery vhodné pro měření malých a středně velkých objektů. Na obrázku č. 12 je znázorněn princip skeneru využívající metodu měření doby letu světla. [1]



Obr. 12: Metoda měření doby letu světla [12]

1.3.4.4 Snímání pomocí strukturovaného světla

Při tomto způsobu snímání je využito světelného vzoru (tzv. strukturované světlo), který je promítnutý na povrch součásti pod známým úhlem a vzniklý profil je poté nasnímán jednou nebo dvěma kamerami. Podobně jako u laserových skenerů je zde pro výpočet souřadnic použito triangulace. Používaných světelných vzorů může být nespočet od bodu, pruhu, mřížky až po komplexních vzorů. Jelikož je jako zdroj světla použita LED dioda o různých vlnových délkách, lze těmito systémy digitalizovat lidské tělo. Mezi výhody může být uvažováno rychlé získávání dat v rozsahu až několik milionů bodů za vteřinu a možnost přidat k hodnotám souřadnic i informaci o barevné textuře povrchu. Na obrázku č. 13 je znázorněna fotografie skeneru, využívající tuto technologii. [1]



Obr. 13: Příklad skeneru se strukturovaným světlem [13]

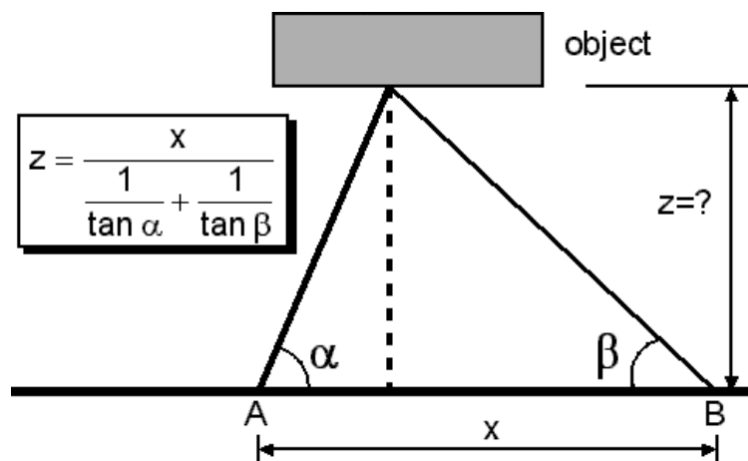
1.3.4.5 Pasivní optické metody snímání

Pasivní metody snímání pracují na základě rekonstrukce 3D modelu měřeného objektu z pořízených snímků. Funkcí jsou podobné metodě snímání pomocí strukturovaného světla (aktivní metody), avšak nepoužívají světelné zdroje promítající na měřený objekt. Výhodou je použití jednoduché elektroniky na úkor přesnosti získaných 3D dat, narozdíl od aktivních metod snímání. Druhy těchto metod jsou znázorněny na obrázku č. 7. Dvě z hlavních metod jsou získávání tvaru ze stínů a ze stereovize. Metoda získávání tvaru ze stínů používá pro skenování 3D obrazu objektu 2D snímek, pomocí kterého jsou obdrženy informace o stínování, z nichž se tvar povrchu vypočítá gradienty. Skenování povrchu za použití tvaru ze stereovize lze považovat za rozšíření předchozí metody. Pro výpočet je použito dvou nebo více snímků z různých úhlů pohledu. Tyto snímky jsou obdrženy ze dvou kamer namířených

tak, aby se jejich zorné úhly protínaly. Tímto lze na obou snímcích nalézt body které odpovídají danému prvku na měřeném objektu a triangulací (pasivní triangulací) je následně změřena vzdálenost pro přesnější výpočet mračna bodů. [1]

Pasivní triangulace

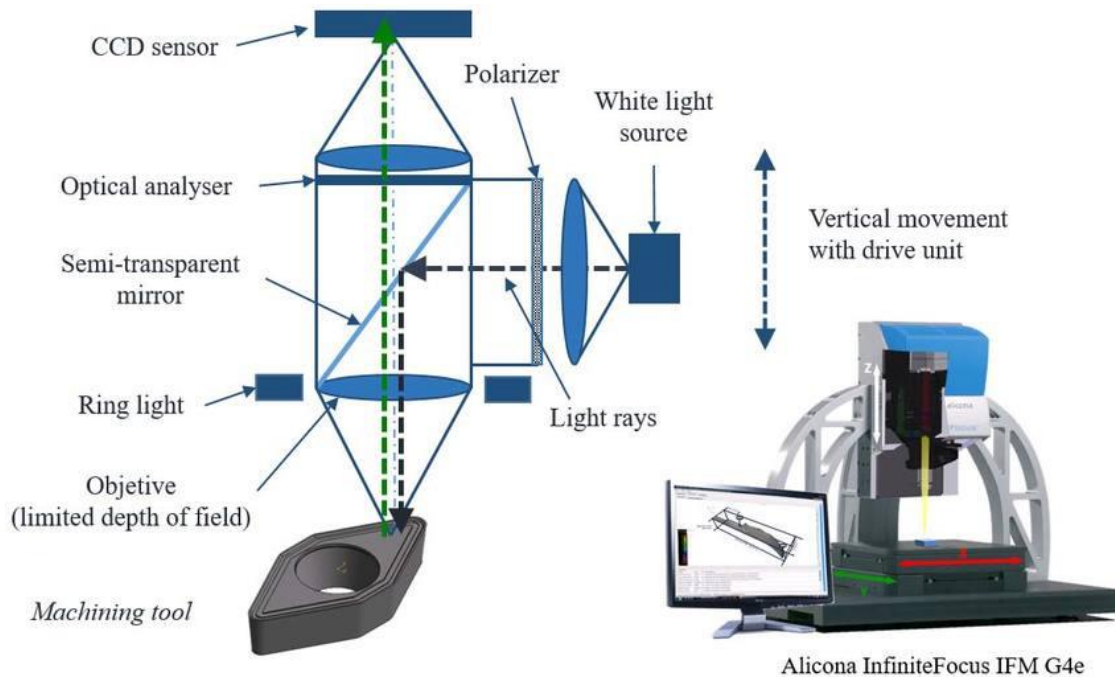
Tento princip měření vzdálenosti spočívá v pozorování stejného bodu ze dvou různých poloh, jak popisuje obrázek č. 14. [19]



Obr. 14: Princip pasivní triangulace [19]

1.3.4.6 Snímání objektivem s pevnou ohniskovou vzdáleností (Focus-variation)

Mezi pasivní optické snímání se dále řadí mikroskopy s funkcí skenování pomocí objektivu s pevnou ohniskovou vzdáleností. Při měření součásti se postupně objektivem zaostří od nejvyššího až po nejnižší možný bod objektu. Kamera průběžně zaznamenává informaci o obrazu, na kterém se vyhodnotí pixely s nejvyšším kontrastem (nejostřejší část obrazu). Na základě tohoto měření je poté sestaven trojrozměrný sken. Touto metodou je často kontrolována mikrogeometrie rezných nástrojů, jejich opotřebení a plošná drsnost povrchů. Schéma objektivu je zobrazeno na obrázku č. 15. [14]



Obr. 15: Schéma objektivu s pevnou ohniskovou vzdáleností [14]

1.3.4.7 Fotogrammetrie

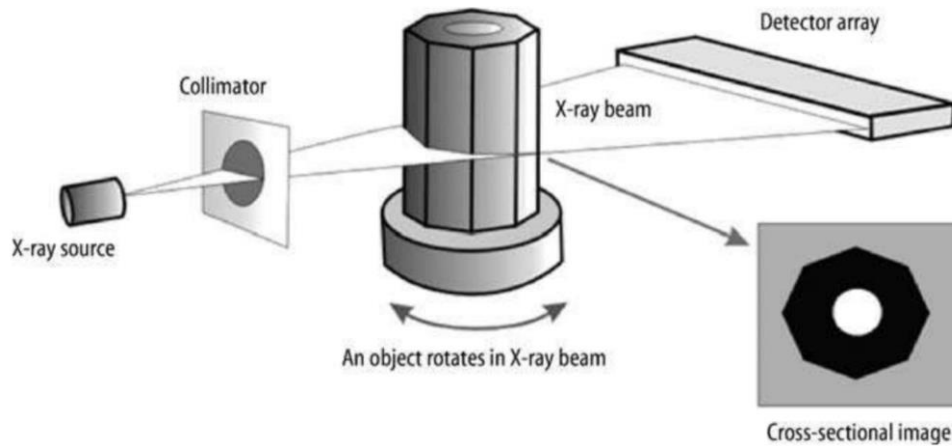
Fotogrammetrie je vědní obor zabývající se získáváním rozměrových informací o objektu zájmu pomocí fotografií. Těto metody je převážně využíváno v geodesii, kde se za pomoci pořízených fotografií mapují objekty a terén. S rostoucí úrovní technologií se lze setkat s tímto způsobem snímání i ve strojírenství. V tomto případě se jedná o vícesnímkovou fotogrammetrii (structure from motion), při níž je z několika úhlů součást nasnímána digitálním fotoaparátem. Software poté vyhodnotí snímky, na kterých nalezne body spojující jednotlivé fotografie a následný dopočet ostatních bodů povrchu pomocí pasivní triangulace. [1][17][18]

1.3.5 Neoptické metody

Rentgenové snímání

Metoda výpočetní tomografie (CT) spočívá v průchodu rentgenových paprsků měřeným objektem. Při měření se jednotlivými rovinami součásti promítne rentgenový paprsek, přičemž je každá rovina nasnímána z více úhlů, jak je znázorněno na obrázku č. 16. Detektory uloženými naproti zdroje záření je pak zaznamenáno množství radiace, která prošla materiálem, v podobě mapy koeficientů útlumu. Z této mapy je pak možné zrekonstruovat průřezový obrázek součásti a dále pak 3D model kombinací těchto průřezů. Výhodou této

technologie je možnost aplikace na široké spektrum materiálů možností změření vnitřní struktury objektu, bez nutnosti jeho poškození. Naopak nevýhodou je vysoká pořizovací cena hardwaru a softwaru. [1]



Obr. 16: Princip funkce CT skeneru [1]

Ultrazvukové snímání

Při použití tohoto způsobu digitalizace je k měřenému povrchu ručně přiblížena sonda, která vyše ultrazvukové vlny, přičemž čidla posleze tento signál zaznamenají pro dekodování prostorových souřadnic bodů. Výhodou ultrazvukového skenování je nízká finanční náročnost, oproti malé přesnosti snímání v rozmezí 0,3 až 0,5 mm. Z tohoto důvodu se tato metoda snímání povrchů ve strojírenství zvláště nepoužívá. Nicméně je ultrazvukové snímání používáno při defektoskopii, a dále pak například pro měření tloušťky vrstev. [10][11]

Radarové snímání

Tato technologie je především používána pro měření velkých objektů na významných vzdálenostech (terén apod.). Data jsou získávána měřením prodlevy mezi vysláním a zpětném odrazení signálu od měřeného povrchu zpátky k přijímači. [1]

1.3.6 Destruktivní metoda snímání

Tento způsob získávání dat bývá uplatněn u malých a komplexních součástí, přičemž jsou spolu s vnějšími prvky naskenovány i vnitřní plochy. Měřená součást se upne do CNC obráběcího centra a čelní vřetovkou frézou je odebrána vrstva o tloušťce od 0,017 do 0,254 mm. Následně se odkrytý povrch nasnímá CCD kamerou a skenovací software automaticky vyhodnotí hrany obrobku pro přidělení bodů. Zřejmou nevýhodou je zánik měřené součásti a

zároveň výhodou je poměrně přesné zaznamenání vnitřní struktury spolu s možností aplikace na jakýkoliv objekt a materiál, který lze obrábět. [1]

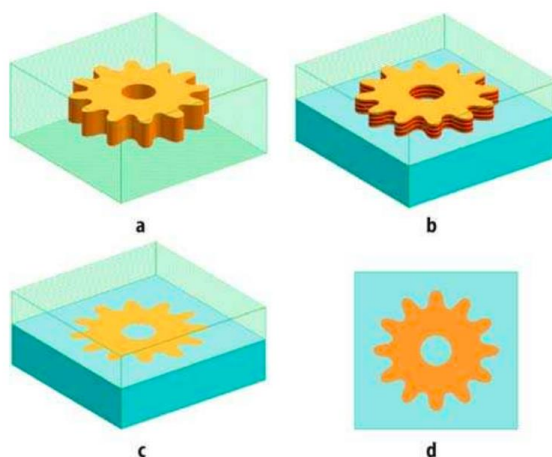
1.3.7 Zpracování naměřených dat

Získaná data z měření je následně zapotřebí zpracovat v počítačových programech. Momentálně neexistuje univerzální software, který by pokryl všechny operace probíhající od naskenování objektu až po vytvoření 3D modelu v potřebném formátu pro CAD (computer-aided Design) a CAM (computer-aided manufacturing) systémy. Obecně lze rozdělit operace nutné k získání digitálního 3D modelu z počátečních naměřených dat do čtyř fází: [1][2]

- „Zpracování mračna bodů a jednotlivých snímků
- Tvorba polygonové sítě
- Tvorba základních křivek a ploch
- NURBS (Non-Uniform Rational Basis Spline) plochy“ [1]

1.3.7.1 Zpracování mračna bodů a jednotlivých snímků

Výstup ze skenování může být v podobě mračna bodů nebo 2D snímků průřezu objektem. Obrázek č. 17 znázorňuje princip získávání 2D snímků průřezu destruktivní metodou. Mračno bodů lze chápat jako shluk naměřených bodů v prostoru. Každý jeden bod nese informaci o své poloze v prostoru (souřadnice x, y, z) a barvě povrchu, pokud skener tuto funkci umožňuje zaznamenat. 2D snímky průřezu objektem jsou získány především destruktivní metodou skenování, výpočetní tomografií (CT) a magnetickou rezonancí.[1][2]

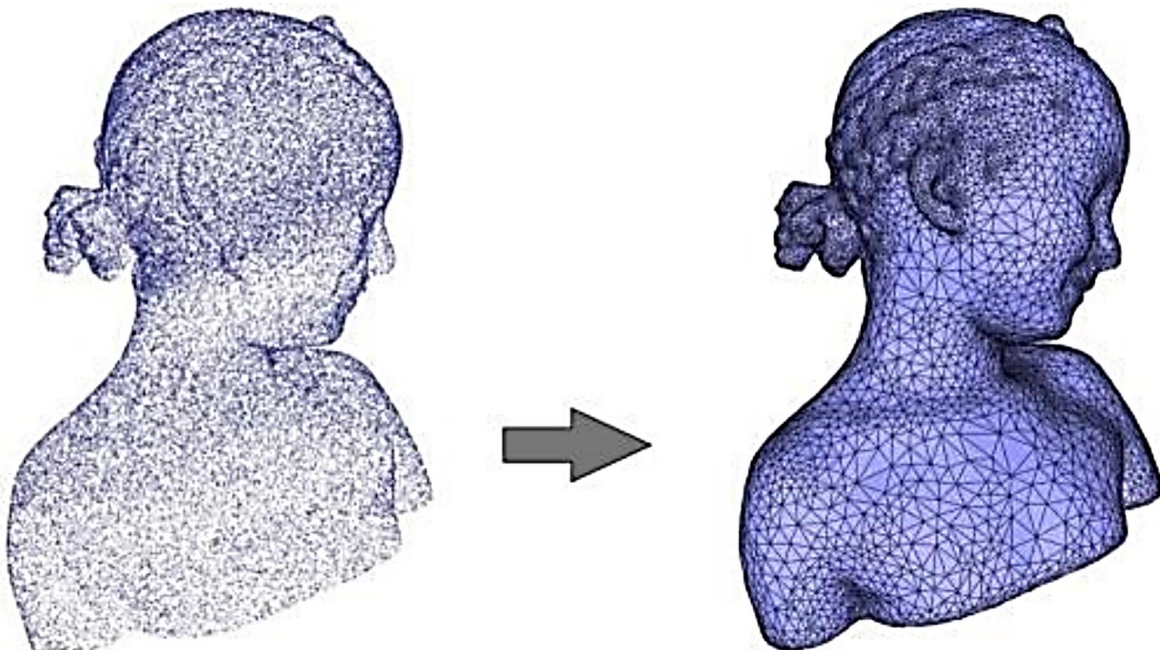


Obr. 17: Princip 2D snímku průřezu objektem [1]

Zejména u mračna bodů je podstatné provést určité operace pro úspěšné uskutečnění dalších fází zpracování. Ačkoliv většina skenerů dovoluje nasnímat objekt z různých úhlů, pro kompletní zaznamenání celého objektu je občas nutné měřenou součást obrátit v upínacím přípravku/svěráku a provést skenování spodní strany. Tímto krokem je obdrženo další mračno bodů, které je posunutě a natočené oproti prvnímu. Důležité je proto provést sloučení a zarovnání mračen bodů tak, aby všechna mračna bodů odpovídala správné orientaci vzhledem k určenému hlavnímu mračnu bodů ve společném souřadnicovém systému. Významným faktorem je také skenovací strategie a nastavení přístroje. Pokud není počet skenů dostatečný k pokrytí celé geometrie objektu, nebo není dosaženo očekávaných tolerancí, je zapotřebí uskutečnit další měření. Před začátkem další fáze lze také upravit mračno bodů některými z nástrojů, které jsou obsaženy v daném softwaru, např. odstranění a redukce nadbytečných bodů, nebo redukce šumu (body nasnímané vlivem vyšší odrazivosti povrchu) [1]

1.3.7.2 Tvorba polygonové sítě

Z patřičně upraveného mračna bodů lze poté zkonstruovat polygonový model. Polygonový model je tvořen polygonovou sítí. Tato síť je tvořena souborem vrcholů, hran a ploch. Ve většině aplikací těchto sítí pro RE je použito ploch skládajících se z trojúhelníků, jak znázorňuje obrázek č. 18. [1][2][16]



Obr. 18: Příklad vytvoření polygonové sítě z mračna bodů [15]

Polygonovou síť lze dále upravovat. Podobně jako u předchozí fáze, je možné síť upravit několika nástroji: redukce šumu, očištění nadbytečných polygonů, decimace, vyplnění otvorů atd. Možnosti úprav sítí se opět liší podle použitého softwaru. Nejčastějším výstupem této fáze je polygonový model uložený ve formátu STL (stereolitografie), který lze využít přímo pro rapid prototyping (3D tisk). [1]

1.3.7.3 Tvorba základních křivek a ploch

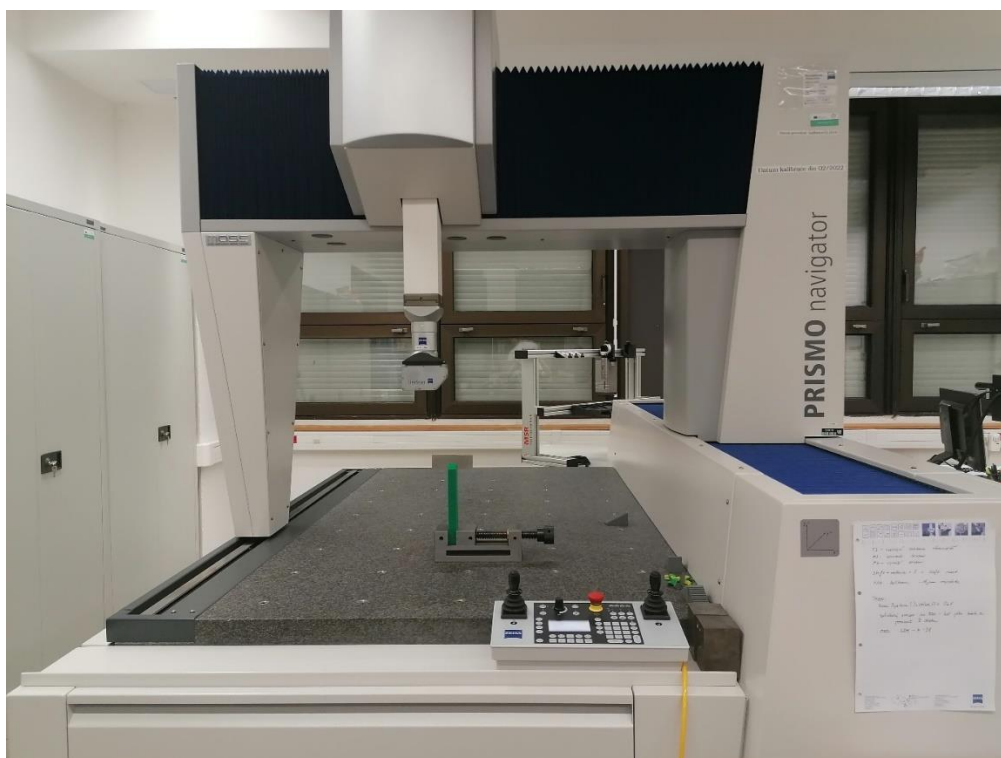
CAD systémy využívají pro tvorbu modelů, a jejich prvků, entity skládající se ze základních geometrických tvarů. Tyto entity lze zkonstruovat přímo z mračna bodů a z polygonových sítí. Nakonec jsou importovány do CAD systémů ke zkonstruování kompletní geometrie. [1]

1.3.7.4 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) plochy

NURBS je druh parametrické reprezentace ploch používaných v softwarovém inženýrství pro systémy CAD, CAM a CAE. Tento druh ploch může být zkonstruován na základě CAD entit získaných ze základních křivek nebo pomocí přirovnání plochy k polygonové síti. Výstupem z této poslední fáze je tedy digitální 3D model naskenovaného objektu, který lze dále upravovat, nebo zhotovit jeho výkres. [1] [2]

2 Rešerše současného stavu

Experiment byl realizovaný v metrologické laboratoři Regionálního technologického institutu v Plzni. Hlavním objektem zkoumání byl optický senzor Zeiss LineScan, který je používán na souřadnicovém měřicím stroji Carl Zeiss Prismo 7 Navigator. Na obrázku č. 19 jsou oba tyto přístroje vyfoceny.



Obr. 19: Souřadnicový měřicí stroj s optickým senzorem

2.1 Carl Zeiss Prismo 7 Navigator

Souřadnicový měřicí stroj portálové konstrukce, který je vybaven otočnou polohovací hlavou VAST XXT s krokem $2,5^\circ$ a možností natáčení ve vodorovné a svislé ose v rozsahu $\pm 180^\circ$. Měřicí software dodávaný ke stroji je CALYPSO. Tabulka č. 1 obsahuje základní informace tohoto stroje. [24]

Tab. 1: Základní technické informace souřadnicového měřicího stroje [24]

Maximální dovolená chyba kontaktního měření délky	$0,9 + L/350 \mu\text{m}$ (L – měřená délka)
Maximální dovolená chyba měření délky při skenování	$\pm 25 + L/350 \mu\text{m}$
Měřicí rozsah v osách X, Y, Z	900 mm, 1200 mm, 650 mm
Rychlost pojezdu v manuálním režimu	až 70 mm/s

2.2 Zeiss LineScan

Tento optický senzor spadá do skupiny bezkontaktních aktivních optických skenerů, využívajících aktivní triangulace k získávání dat o měření, které byly popsány v teoretické části této práce – 1.2.4.2 Optické laserové snímání na straně 14. [20]

„Možná využití skeneru:

- obecné měření rozměrů pro kontrolu kvality,
- měření (porovnání) výrobku vzhledem k jeho CAD modelu,
- reverzní inženýrství povrchu objektů.“ [20]

Konstrukce skeneru:

Skener je konstruovaný pouze pro souřadnicové měřicí stroje značky ZEISS a je dodáváný společně se skenovacím softwarem WBScan a rozhraním pro komunikaci mezi připojenými zařízeními. Přesnost skeneru udávaná výrobcem je $\pm 25 \mu\text{m}$. Ke skeneru je, pro kalibraci jednotlivých definovaných poloh, dodáváná kalibrační koule s matným povrchem. Na obrázku č. 20 jsou poté vyobrazeny základní rozměry skeneru. [20]



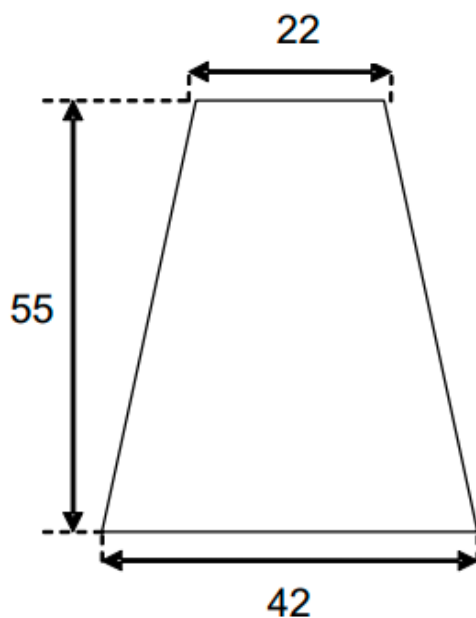
Obr. 20: Rozměry skeneru v mm [20]

Na tabulce č. 1 jsou vypsány základní technická data o skeneru.

Tab. 2: Technická data skeneru ZEISS LineScan [20]

Měřicí rozmezí v ose Z	max. 55 mm
Střed zorného pole od skeneru v ose Z	77 mm
Šířka zorného pole	max. 42 mm
Rozlišení v ose X	max. 1024 bodů na promítnuté lince
Měřicí frekvence	max. 250 000 bodů za vteřinu
Frekvence promítaného profilu	max. 1 kHz
Rozmezí pracovní teploty	18–22 °C
Max. intenzita okolního osvětlení	10 000 lx

Tabulka č. 2 poukazuje na zorné pole skeneru, tedy rozsah rozostřeného laserového paprsku promítnutého do přímky. V tomto rozsahu je skener schopný snímat povrch objektu. Hodnoty maximálního měřicího rozsahu jsou znázorněny na obrázku č. 21. [20]



Obr. 21: Maximální zorné pole skeneru [20]

Skener disponuje polovodičovým laserem o vlnové délce 655 nm. Bezpečnost laseru spadá do třídy 2M, tudíž hrozí poškození zraku při pozorování světelného paprsku skrze optické pomůcky. Na obrázku č. 22 lze vidět výstražné značení na skeneru spolu s rozsvícenými LED diodami indikujícími laser v provozu. [20]



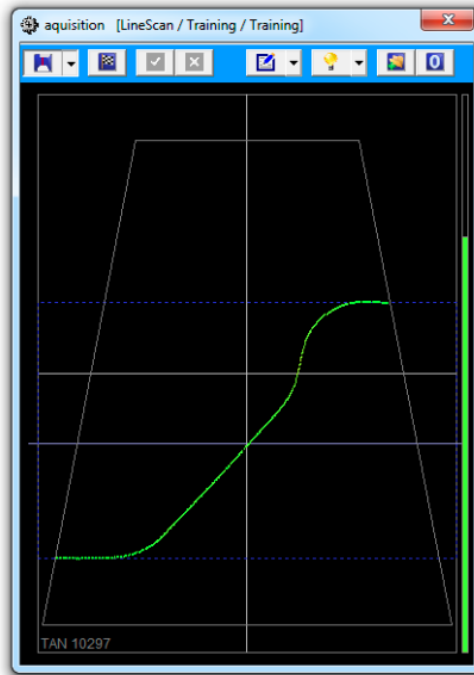
Obr. 22: Výstražná značení na skeneru

2.3 WBScan

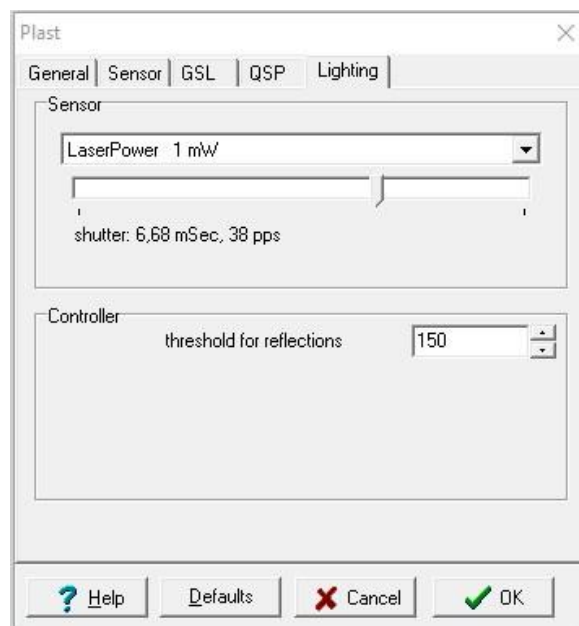
Skenovací software používaný k zaznamenání, vizualizaci a ukládání naměřených dat. Výsledné mračno bodů lze poté uložit ve formátu ASCII a PSL. [20]

Software WBScan dále umožňuje další nastavení týkající se skenování. Jedním z těchto nastavení je výkon laseru. Ten lze nastavit na dvě hodnoty – „1 mW a 15 mW“, přičemž výkon 1 mW je vhodný pro měření světlých a matných povrchů. 15 mW lze poté použít na všechny ostatní povrchy. [20]

Společně s výkonem laseru souvisí rychlost závěrky kamery. Nastavení této rychlosti se provádí před vlastním měřením, kdy se skener připraví do požadované polohy v měřicí vzdálenosti od měřeného povrchu a v režimu zarovnání se závěrka nastaví na hodnotu, při které se promítnutý profil zobrazuje bez chyb v celém rozsahu skeneru. Obrázek č. 23 znázorňuje příklad vyhovujícího nastavení výkonu laseru a rychlosti závěrky v režimu zarovnání. Na obrázku č. 24 je poté zobrazeno dialogové okno nastavení výkonu laseru a závěrky. [20]



Obr. 23: Režim zarovnání [20]



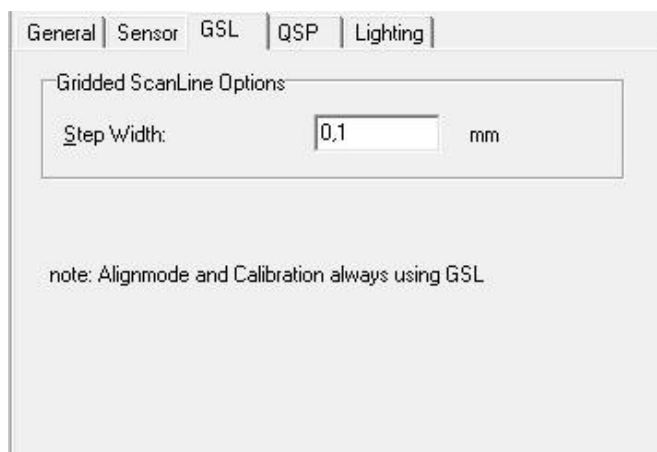
Obr. 24: Dialogové okno s nastavením laseru a závěrky skeneru

Jedním z nejzásadnějších nastaveních lze považovat způsob získávání mračna bodů. WBScan umožňuje snímat mračno bodů třemi druhy:

- „GSL (gridded scan lines),
- QSP (qualified surface points),
- RSL (raw scan lines)“. [20]

2.3.1 GSL

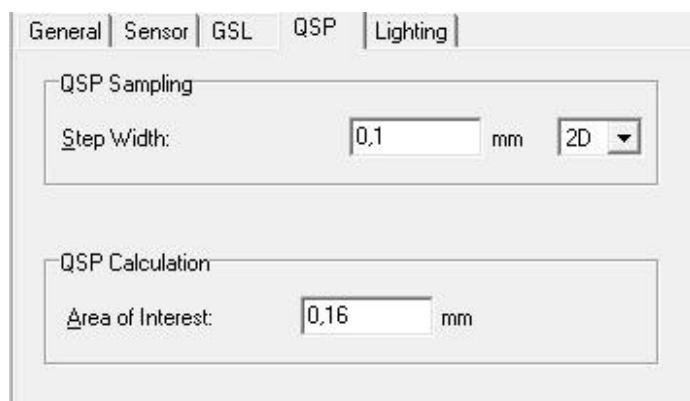
Nekomprimované mračno bodů, které leží na definovatelné mřížce. Velikost mřížky lze nastavit v programu pomocí šířky kroku, která udává vzdálenost bodů na mřížce. Naměřené body, které neleží na mřížce program nezaznamenává. Na obrázku č. 25 je příklad nastavení tohoto druhu snímání, přičemž „Step Width“ odpovídá šířce kroku nastavené na 0,1 mm. [20]



Obr. 25: Dialogové okno nastavení metody GSL

2.3.2 QSP

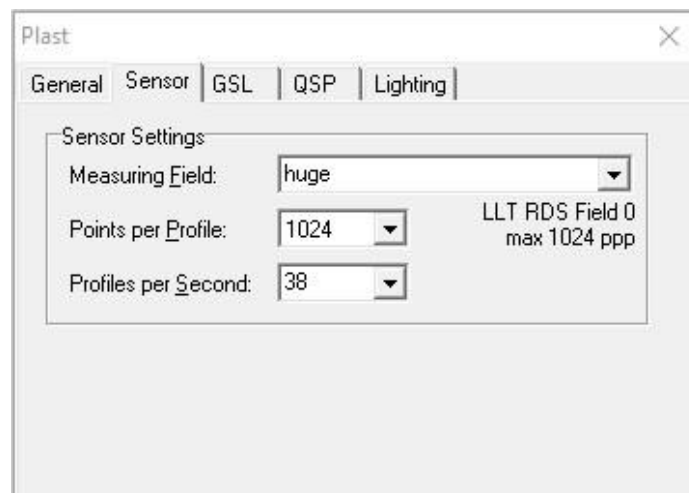
Komprimované (redukované) mračno bodů. Body na definované oblasti jsou zprůměrovány do samostatného bodu za účelem redukce dat. Body jsou zároveň rozmístěny do definované mřížky podobně jako u metody GSL. Obrázek č. 26 odkazuje na možnosti nastavení této metody. Lze si dále zvolit, zda se body mají průměrovat z 2D naskenované plochy, nebo z 3D skenovaného objemu bodů. „Area of Interest“ odpovídá nastavení velikosti oblasti, ze které se budou body průměrovat. [20]



Obr. 26: Dialogové okno nastavení metody QSP

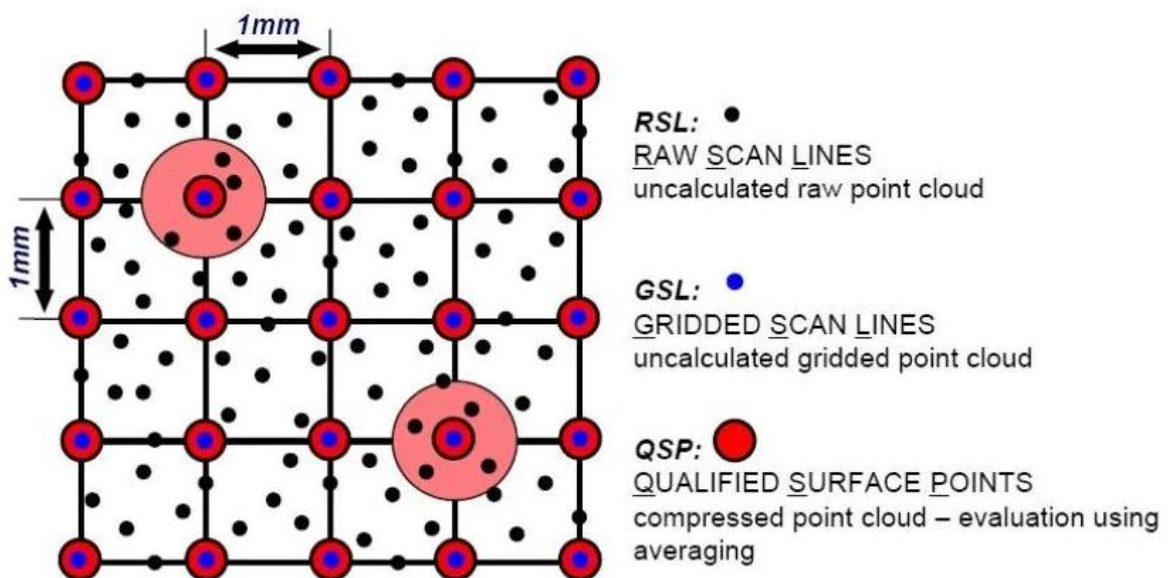
2.3.3 RSL

Tato metoda nepoužívá filtrování ani seskupení bodů do mřížky. Nastavení této metody je závislé přímo na použitém nastavení senzoru skeneru. Na obrázku č. 27 je znázorněno dialogové okno pro nastavení senzoru, které se týká především velikosti snímané oblasti, počtu zaznamenávaných bodů na profilu a množství profilů zaznamenaných za sekundu. Při tomto nastavení ovlivňuje rychlost posuvu skeneru přímo vzdálenost mezi nasnímanými body mračna ve směru měření. [20]



Obr. 27: Dialogové okno nastavení senzoru skeneru.

Princip způsobu zaznamenávání jednotlivých bodů je znázorněn na obrázku č. 28.



Obr. 28: Grafické znázornění způsobu získávání mračna bodů [23]

2.4 Software pro vyhodnocení měření

Pro kompletní řešení úloh reverzního inženýrství disponuje laboratoř také softwarem pro zpracování naskenovaných dat. Jedná se o programy s názvem „Geomagic Design X“ a „Geomagic Control X“.

Geomagic Design X je software vytvořený za účelem přetvoření naskenovaných 3D dat do polygonových sítí a CAD modelů. Naměřené hodnoty, ať už kontaktními či bezkontaktními metodami snímání povrchu objektu, lze zpracovat za pomoci velkého množství nástrojů zabudovaných v tomto programu a výsledné modely vyexportovat ve formátech používaných ve většině parametrických CAD modelářích, jako jsou „NX, SolidEdge, SolidWorks, CATIA, Autodesk Inventor“ a podobně. [21]

Geomagic Control X je software pro měření, validaci a vytváření grafických měřicích protokolů z dat získaných z měření. Naměřené hodnoty, mračna bodů nebo polygonové sítě lze pomocí tohoto programu porovnat s původním CAD modelem s zjistit odchylky zhotovené součásti od modelu. Značnou výhodou toho nástroje pro kontrolu kvality je možnost automatizace zpracování vstupních dat. [22]

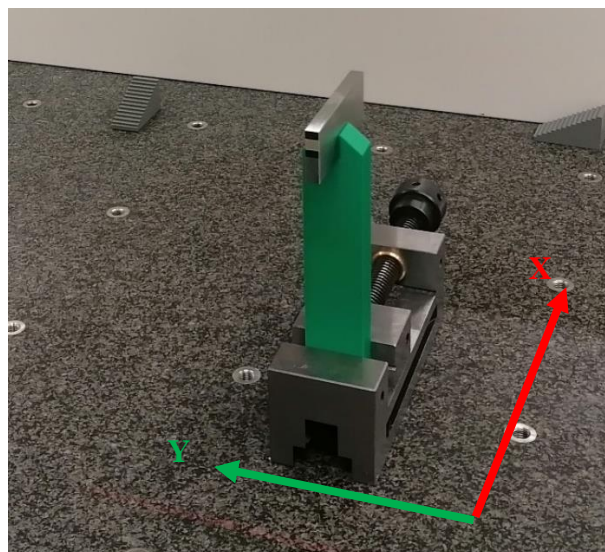
3 Návrh experimentů

Cílem experimentů je zmapování problematiky práce s optickým senzorem Zeiss LineScan, který bude zahrnovat práci s nastavením optického senzoru, skenování zvoleného objektu, zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení těchto hodnot. Výstupem experimentu bude porovnání jednotlivých možností nastavení způsobu snímání skeneru. Konkrétně nastavení týkající se typů mračen bodů RSL, GSL a QSP. Porovnávat se bude odchylka od měřeného objektu pro každý typ mračen bodů, případně bude vyhodnocení doplněno o vlivy skenovací strategie, které mohou zapříčinit nepřesnosti při měření a digitalizaci součástí podobných tvarů.

3.1 Volba měřeného objektu pro experimenty

Jako měřený objekt byly zvoleny dvě základní měřky o délkách 100 a 500 mm. Hlavním prvkem k porovnávání rozdílů typu nastavení skeneru byly zvoleny lapované plochy měrek, tedy jejich funkční plochy. Jako doplňující informaci o přesnosti nastavení skeneru budou stejným způsobem vyhodnoceny boční plochy měrek. Zvolená nastavení skeneru byla měřena pro každou z měrek ve dvou sadách, a to v ose X a Y vůči souřadnému systému souřadnicového měřicího stroje.

Měřky byly ustaveny na granitové desce souřadnicového měřicího stroje pomocí tvarové podpěry vytisknuté na 3D tiskárně. Pro měřku délky 100 mm byl použit jeden tento přípravek upnutý ve svěráku. Na obrázku č. 29 je vyfocena takto upnutá měřka ve směru osy X vůči stroji.



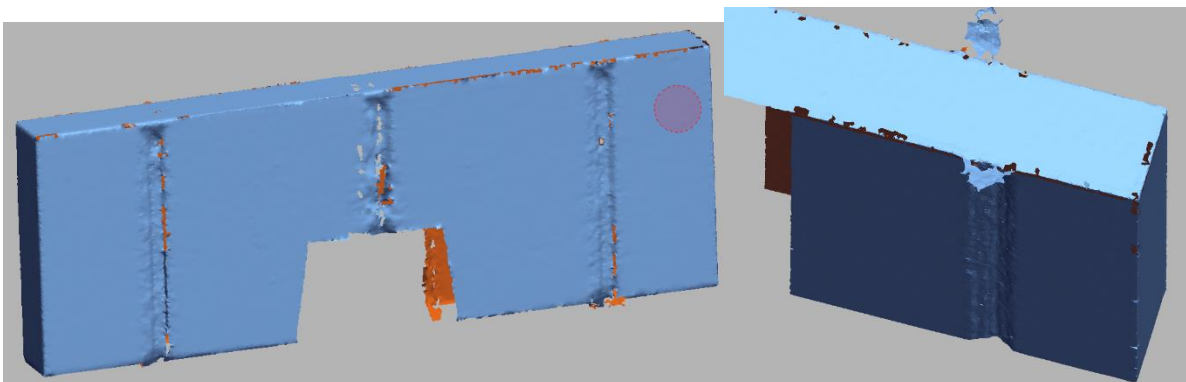
Obr. 29: Upnutí základní měřky délky 100 mm ve směru osy X

Základní měrka délky 500 mm byla podepřena dvěma těmito přípravky, ke kterým byly připevněny hranoly. Obrázek č. 30 znázorňuje fotografii takto upnuté měrky.

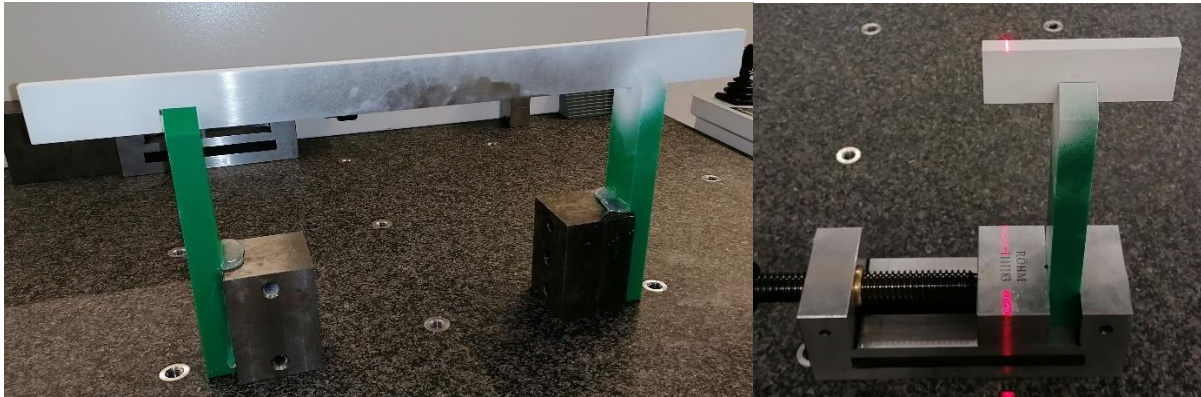


Obr. 30: Upnutí základní měrky délky 500 mm ve směru osy X

Při provádění prvních měření bylo zjištěno, že vysoká odrazivost povrchu vedla k nadměrnému šumu v naskenovaných bodech. Na bočních broušených plochách měrky byl vlivem těchto odlesků zaznamenán neshodný profil, jak je znázorněno na obrázku č. 31. Z tohoto důvodu byl nanesen na obě měrky zmatňující povlak, používaný pro skenování objektů s vysokou odrazivostí nebo transparentností povrchu. Měrky s naneseným zmatňujícím povlakem jsou vyfoceny na obrázku č. 32.



Obr. 31: Vygenerované polygonové modely naskenovaných měrek bez zmatněného povrchu

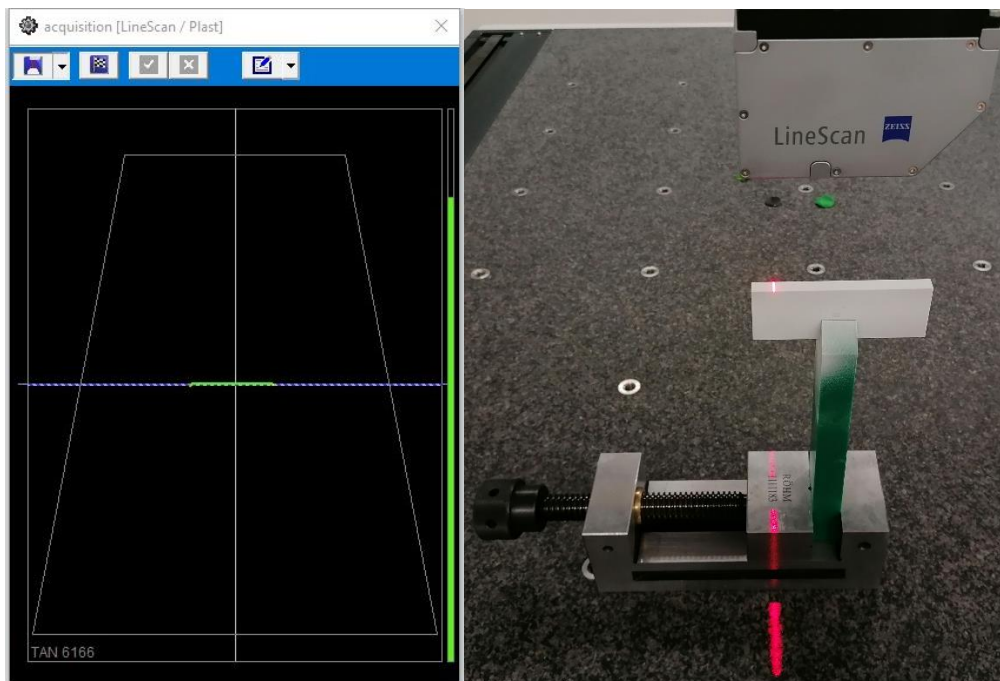


Obr. 32: Fotografie měrek se zmatněným povrchem

3.2 Vlastní skenování měrek

Experiment byl zaměřený primárně na ovlivnění přesnosti skeneru v závislosti na nastaveném druhu mračka bodů. Z tohoto důvodu bylo ostatní nastavení skeneru a souřadnicového měřicího stroje ponecháno stejné. Neměnné nastavení skeneru se týkalo výkonu laseru a senzoru. Nicméně bylo informativně provedeno i několik měření s rozdílnou rychlostí a výkonem laseru.

Souřadnicový měřicí stroj byl před měřením každé plochy měrky nastaven kolmo k této ploše z pohledu směru zorného úhlu skeneru. Pro správné ustavení skeneru vůči měřenému objektu slouží v programu WBScan režim zarovnání, který zobrazuje polohu snímané oblasti v rámci zorného pole skeneru v reálném čase. Všechna provedená měření byla zarovnána na střed zorného pole, jak je znázorněno na obrázku č. 33. Vyobrazená poloha skeneru pro měření horní plochy měrky odpovídala nastavení otočné hlavy souřadnicového měřicího stroje na 0° v horizontálním smyslu otáčení polohovatelné hlavy a 0° ve směru vertikálním. Nastavení polohy skeneru pro jednotlivé měřené plochy měrky bylo prováděno v programu CALYPSO. Všechny polohy využívané v tomto experimentu byly řádně zkalibrovány.



Obr. 33: Nalezení správné měřicí polohy skeneru

Skenovací rychlost byla nastavena potenciometrem na ovládacím panelu stroje. Všechna měření byla prováděna v manuálním režimu stroje, tzn. pohyb os v průběhu skenování byl řízen ručně pomocí pák ovládacího panelu. Omezením maximální rychlosti pohybu stroje bylo dosaženo konstantní rychlosti stroje a zároveň vyloučení možného ovlivnění testu vlivem změny rychlosti při ručním ovládní v průběhu měření. Obrázek č. 34 zobrazuje ovládací panel stroje. Na panelu se nacházejí dvě páky ovládající pohyb stroje, kdy levá páka ovládá pohyb v ose Z a pravá pohyb v osách X a Y.

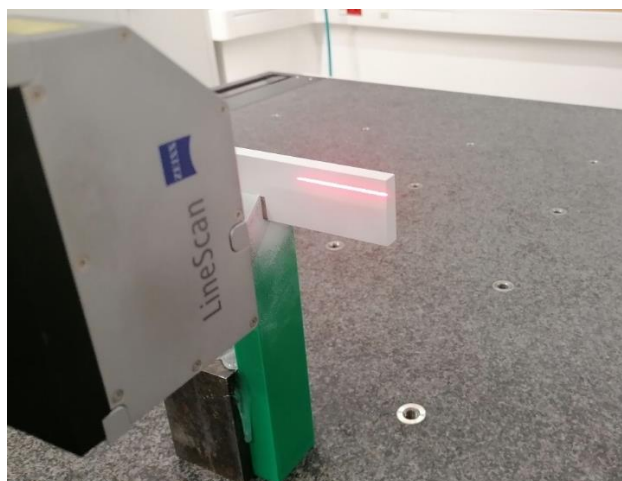


Obr. 34: Ovládací panel

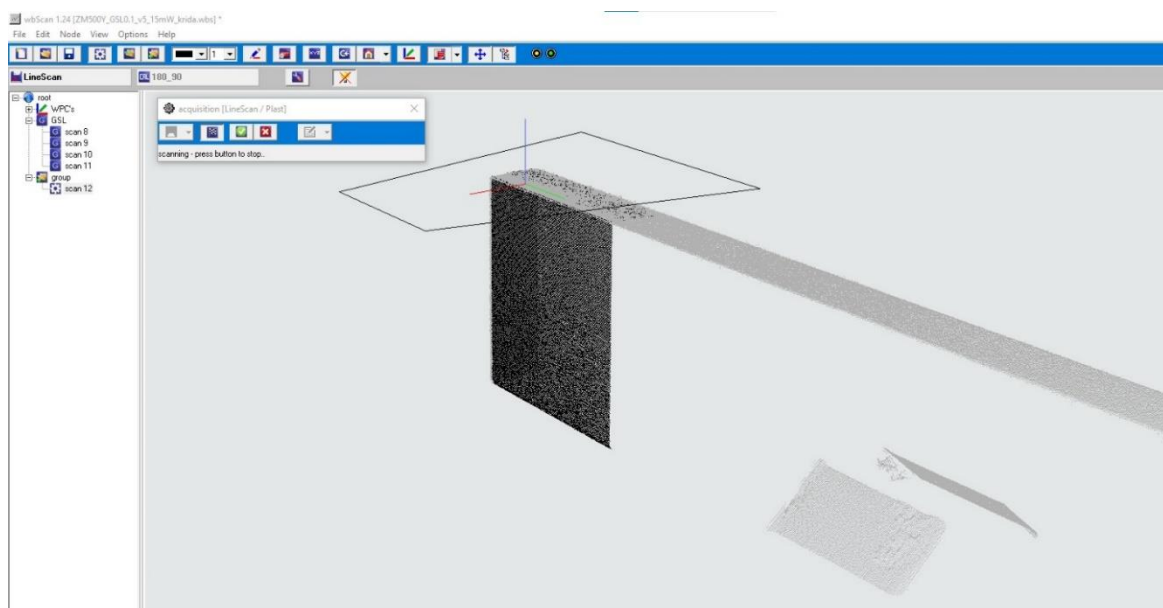
3.2.1 Skenované oblasti měrky

Pro každé nastavení skeneru byla dodržena stejná měřicí strategie. Měrka 100 mm byla naskenována po jejím obvodu spolu s její horní plochou vzhledem k jejímu ustavení. Spodní strana měrky byla vynechána, jelikož by nebylo možné natočit skener do polohy vhodné pro snímání tohoto povrchu a zároveň nebylo nutné získat uzavřenou síť k vyhodnocení experimentu.

Skenovaná oblast měrky 500 mm se stávala z horní strany měrky, lapovaných ploch měrky (tedy ploch o vzdálenosti 500 mm) a u každé ze čtyř hran. Pro získání bodů na povrchu síly (šířky) měrky byly provedeny čtyři měření, každé u hrany plochy. Příklad měření síly měrky je vyfocen na obrázku č. 35. Obrázek č. 36 poté zobrazuje takto naměřená data.



Obr. 35: Měření měrky 500 mm



Obr. 36: Příklad naskenovaných GSL bodů u měrky délky 500 mm

3.2.2 Seznam všech provedených nastavení skeneru

V tabulkách č. 3–6 je vypsáno každé nastavení, kterým byly měřky měřeny. Jedná se o měření s aplikovaným zmatňujícím povrchem. Nastavení senzoru pro všechny měření bylo jednotné, konkrétní hodnoty tohoto nastavení jsou zobrazeny na obrázku č. 27 str. 24.

Tab. 3: Sada nastavení skeneru pro měřku 100 mm v ose X

Základní měřka 100 mm v ose X						
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace
1	RSL	5	1	-	-	-
2	RSL	5	15	-	-	-
3	RSL	10	15	-	-	-
4	GSL	10	15	0,01	-	-
5	GSL	5	15	0,1	-	-
6	GSL	10	15	0,1	-	-
7	GSL	10	15	0,5	-	-
8	GSL	10	15	1	-	-
9	QSP	5	15	0,1	0,16	2D
10	QSP	5	15	0,1	0,16	3D
11	QSP	10	15	0,5	0,25	2D
12	QSP	10	15	0,5	0,25	3D
13	QSP	10	15	1	0,5	2D
14	QSP	10	15	1	0,5	3D

Tab. 4: Sada nastavení skeneru pro měřku 100 mm v ose Y

Základní měřka 100 mm v ose Y						
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace
15	RSL	5	1	-	-	-
16	RSL	5	15	-	-	-
17	RSL	10	15	-	-	-
18	GSL	5	15	0,1	-	-
19	GSL	10	15	0,1	-	-
20	GSL	10	15	0,5	-	-
21	GSL	10	15	1	-	-
22	QSP	5	15	0,1	0,16	2D
23	QSP	5	15	0,1	0,16	3D
24	QSP	10	15	0,5	0,25	2D
25	QSP	10	15	0,5	0,25	3D
26	QSP	10	15	1	0,5	2D
27	QSP	10	15	1	0,5	3D

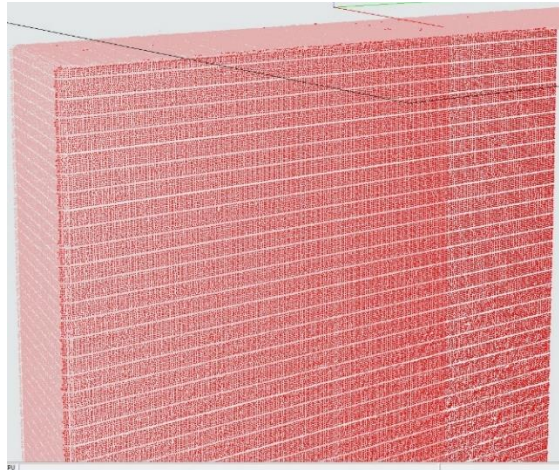
Tab. 5: Sada nastavení skeneru pro měрку 500 mm v ose X

Základní měřka 500 mm v ose X						
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace
28	RSL	5	1	-	-	-
29	RSL	5	15	-	-	-
30	RSL	10	15	-	-	-
31	GSL	3	1	0,1	-	-
32	GSL	5	15	0,1	-	-
33	GSL	10	15	0,1	-	-
34	GSL	10	15	0,5	-	-
35	GSL	10	15	1	-	-
36	QSP	5	15	0,1	0,16	2D
37	QSP	5	15	0,1	0,16	3D
38	QSP	10	15	0,5	0,25	2D
39	QSP	10	15	0,5	0,25	3D
40	QSP	10	15	1	0,5	2D
41	QSP	10	15	1	0,5	3D

Tab. 6: Sada nastavení skeneru pro měрку 500 mm v ose Y

Základní měřka 500 mm v ose Y						
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace
42	RSL	3	1	-	-	-
43	RSL	5	1	-	-	-
44	RSL	5	15	-	-	-
45	RSL	10	15	-	-	-
46	GSL	5	15	0,1	-	-
47	GSL	10	15	0,1	-	-
48	GSL	10	15	0,5	-	-
49	GSL	10	15	1	-	-
50	QSP	3	15	0,1	0,16	2D
51	QSP	3	15	0,1	0,16	3D
52	QSP	5	15	0,1	0,16	2D
53	QSP	5	15	0,1	0,16	3D
54	QSP	10	15	0,5	0,25	2D
55	QSP	10	15	0,5	0,25	3D

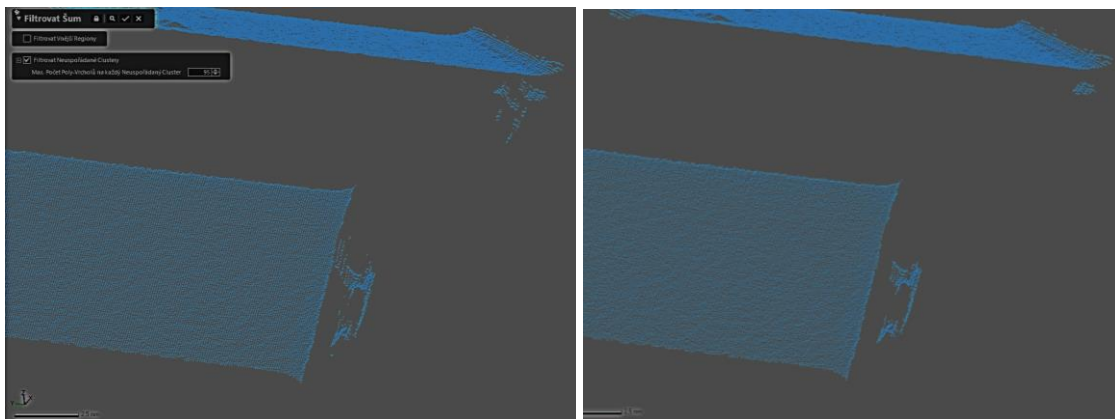
Při provádění experimentu bylo pozorováno, že QSP body s nastavením šířky kroku 0,1 mm mají v pravidelných intervalech vynechané body. Výsledné mračno bodů je vyobrazeno na obrázku č. 37. Z toho důvodu bylo pro měрку délky 500 mm v ose Y provedeno ještě měření s rychlostí 3 %. Tato rychlost už vynechané řádky neobsahovala.



Obr. 37: QSP mračno bodů s vynechanými řádky.

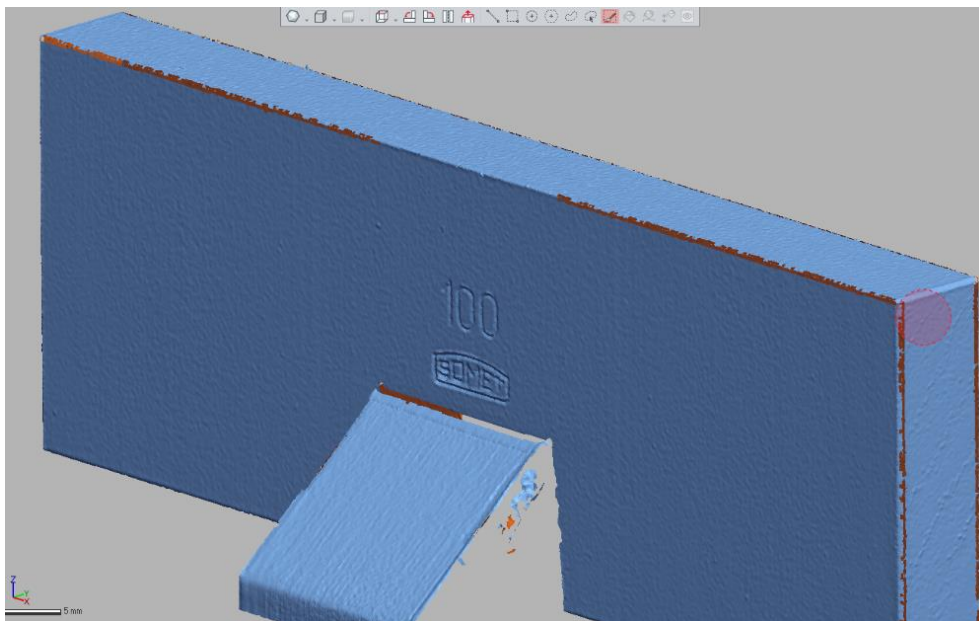
3.3 Vygenerování polygonových sítí

Naměřená mračna bodů byla vyexportována ve WBScan do formátu ASCII, který podporuje Geomagic Design X. Postup zpracování mračna bodů v tomto programu byl pro jednotlivé skeny dodržen stejný. První úprava dat byla redukce šumu v mračnu bodů. Tento nástroj automaticky vybere body, které považuje za vzniklé vlivem odrazivosti povrchu měřeného objektu a nepřesnosti skeneru. Na obrázku č. 38 lze pozorovat body, které byly tímto nástrojem odebrány z mračna bodů. Nicméně bylo zapotřebí odstranit body, které neležely na skenované cestě. Takové body byly vymazány ručně, popřípadě proběhlo odstranění polygonové sítě vzniklé z těchto bodů.

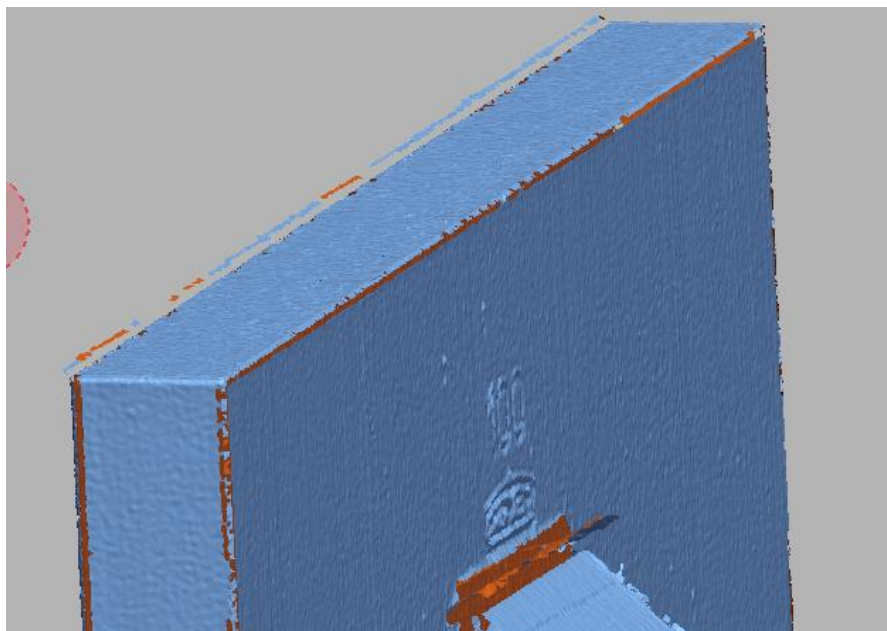


Obr. 38: Příklad výsledku filtrace šumu

Navazujícím krokem bylo z očištěného mračka bodů vytvořit polygonovou síť. Pro všechny naměřená data byl použit stejný parametr výpočtu pro tvorbu této sítě. Jelikož se při skenování horní a boční plochy měrek nacházel v dosahu skeneru i přípravek pro jejich usazení, bylo zapotřebí tyto sítě odstranit, aby nedošlo k zahrnutí těchto ploch v následující rozměrové analýze. Tyto nadbytečné sítě jsou vyobrazeny na obrázku č. 39. Odstranění polygonových sítí proběhlo i na hranách modelu, které byly důsledkem některých nastavení skeneru. Příklad takovýchto polygonových sítí je zobrazen na obrázku č. 40.

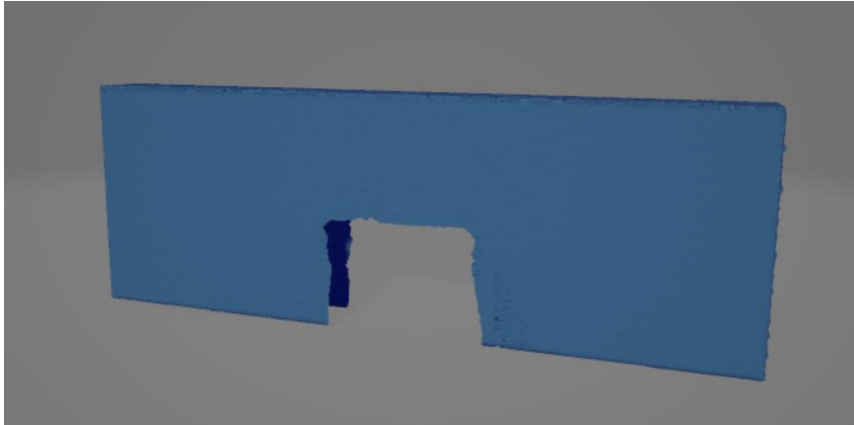


Obr. 39: Neupravená polygonová síť



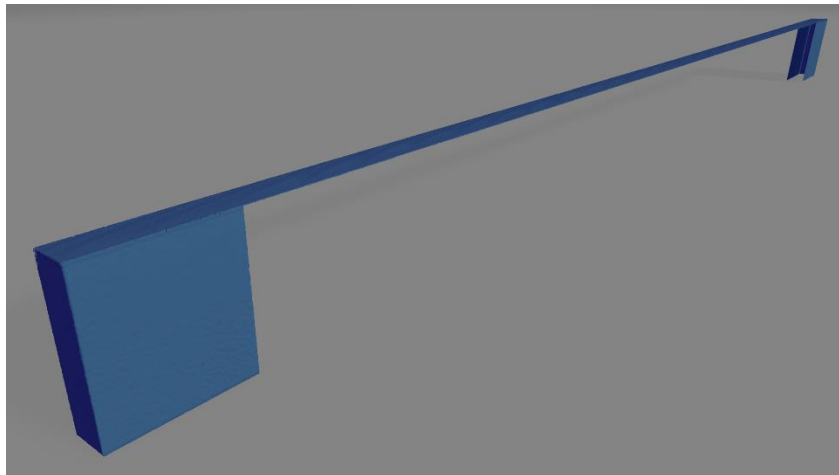
Obr. 40: Polygonové sítě u hran modelu

Zpracovaný polygonový model, očištěný o neuspořádané sítě, byl poté vyexportován do souboru ve formátu STL. Výhodou tohoto formátu je široká kompatibilita s ostatními programy, které dokážou takovýto model zobrazit. Na následujícím obrázku č. 41 je vyobrazen výsledný model uložený ve formátu STL, který je zobrazený ve volně dostupném programu 3D prohlížeč od společnosti Microsoft Corporation.



Obr. 41: Výsledná polygonová síť zobrazená v STL prohlížeči

Stejný postup byl dodržen pro data získaná ze skenování měrky délky 100 mm. Na obrázku č. 42 je uveden příklad výsledné polygonové sítě této měrky.

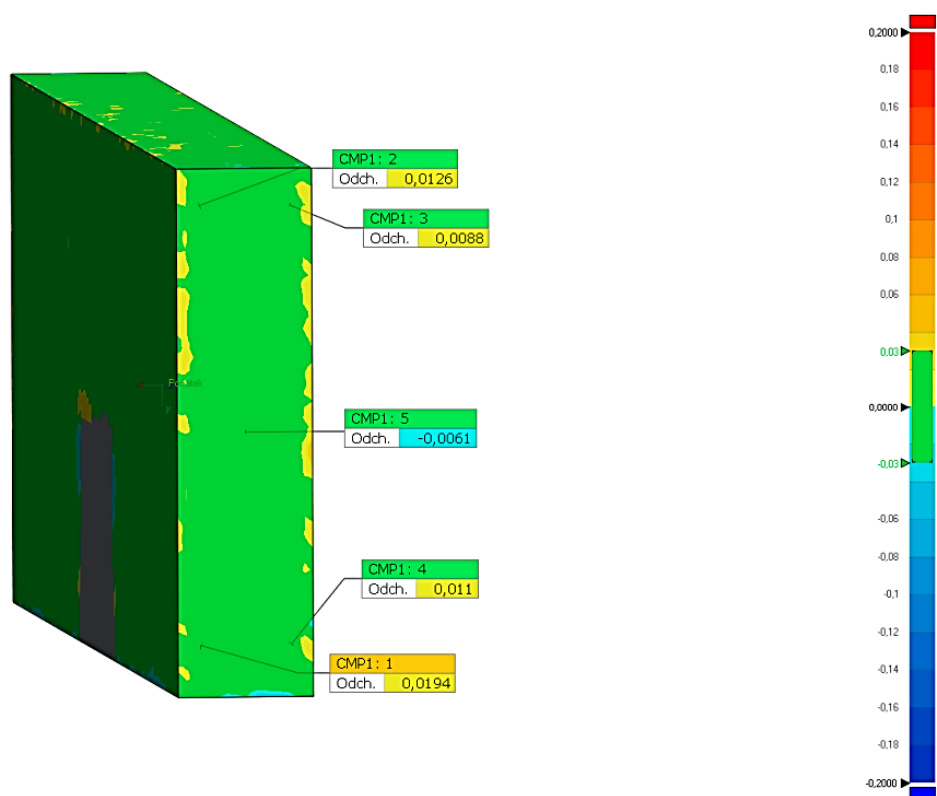


Obr. 42: Výsledný polygonový model měrky délky 500

Posledním krokem, k dokončení experimentu, bylo porovnání takto naskenovaných a upravených modelů vůči CAD modelu měřené koncové měrky. Pro tvorbu CAD modelů měrek byl použit software SolidWorks.

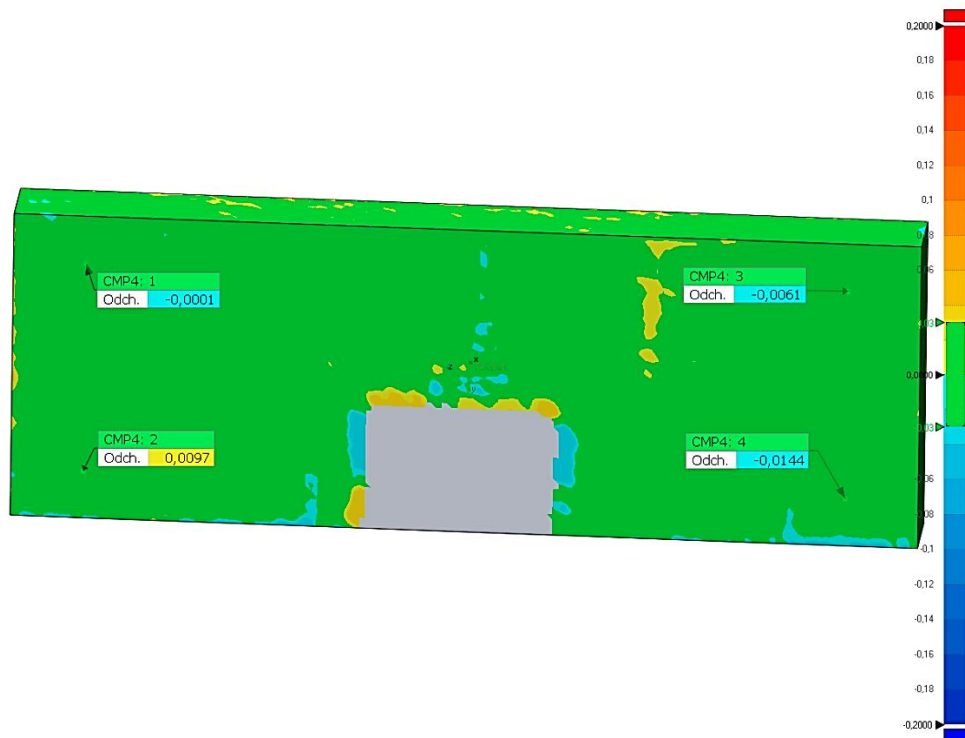
3.4 Tvorba grafického protokolu o měření

Laboratoř má k dispozici software pro vyhodnocování měřených dat s názvem Geomagic Control X, který je používán k tvorbě grafických protokolů měření. Tvorba takového protokolu o měření byla uskutečněna následujícím způsobem. Vytvořený CAD model měřené měřky byl nastaven v programu jako referenční. Následně byl nahraný konkrétní polygonový model a funkcí automatického zarovnání k referenčnímu modelu připojen. Zarovnáním vznikla barevná mapa zobrazující odchylky od referenčních dat. Tolerance pro vyhodnocení odchylky od modelu byla zvolena $\pm 0,03$ mm, jelikož byl na měřky aplikován zmatňující povlak. Volbou konkrétního rozmístění bodů na modelu měřky následovalo získání hodnoty odchylky v daném místě. Vyhodnocovány byly celkem čtyři plochy. Hlavním ukazatelem přesnosti naměřených dat bylo určeno pět bodů na každé z lapovaných ploch měřky. Rozmístění daných bodů je ukázáno na obrázku č. 43.



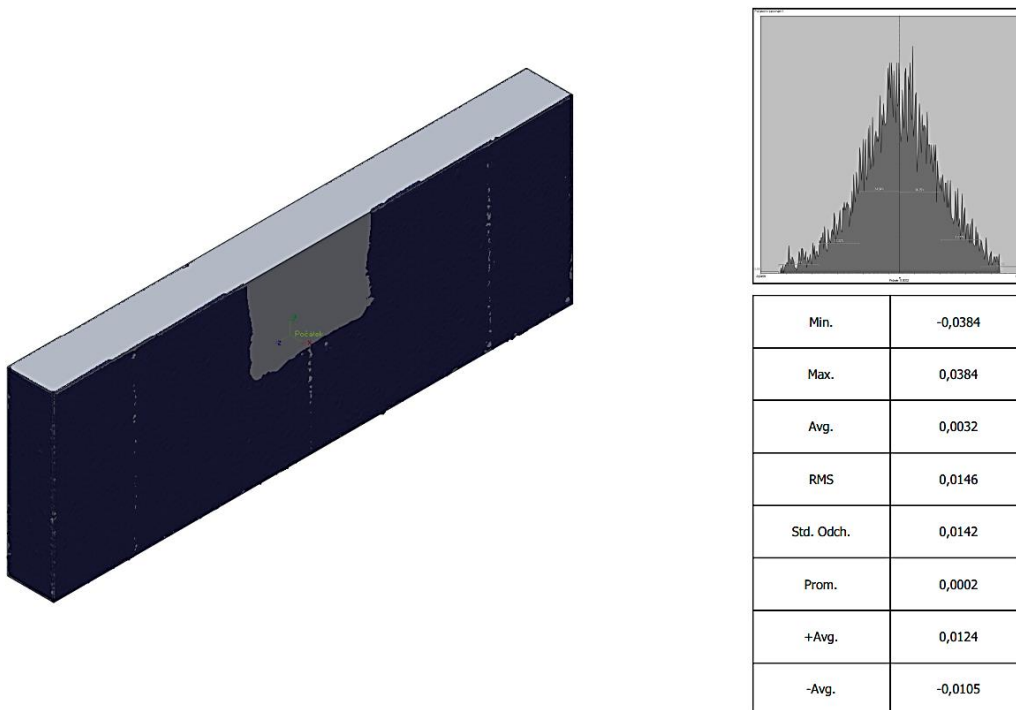
Obr. 43: Příklad vyhodnocení odchylek na lapované straně měřky

Vedlejším ukazatelem přesnosti byly zvoleny dvě boční strany měřky, konkrétně čtyři body na každé straně poblíž rohů. Obrázek č. 44 zobrazuje konkrétní umístění těchto bodů.



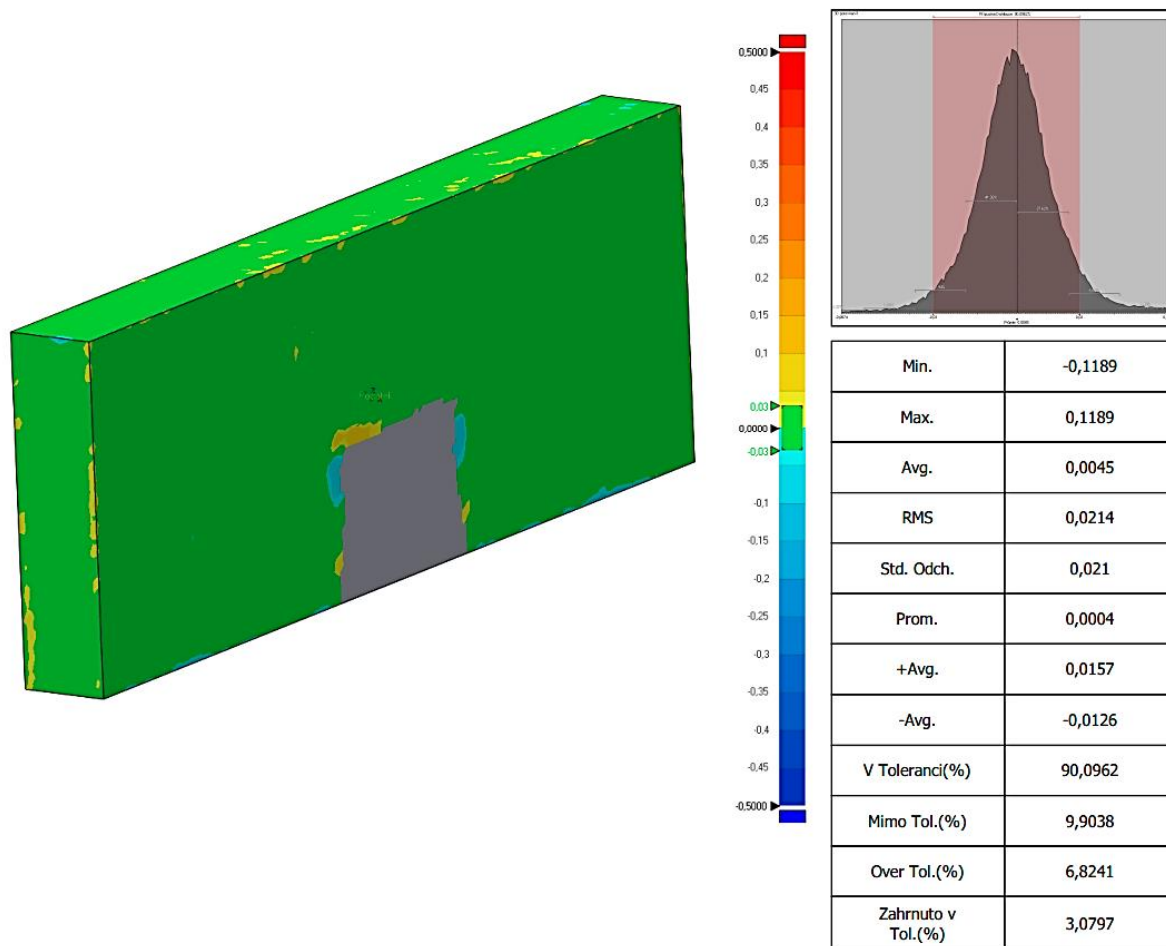
Obr. 44: Příklad vyhodnocování odchylek na boční straně měřky

Protokol také obsahoval výsledek automatického zarovnání, ve kterém je pomocí histogramu vykreslena úspěšnost počátečního zarovnání. Příklad vyhodnocení zarovnání v protokolu je zobrazen na obrázku č. 45.



Obr. 45: Příklad vyhodnocení počátečního zarovnání

Podobným způsobem je v protokolu vyhodnoceno i celkové 3D porovnání naměřených hodnot s CAD modelem. Příklad výsledného 3D porovnání i s histogramem odchylek je zobrazen na obrázku č. 46.



Obr. 46: Příklad protokolu s 3D porovnáním celkových odchylek

Výstupem z tohoto experimentu bylo ve výsledku 55 grafických protokolů o měření. Z každého protokolu bylo tedy získáno 10 hodnot pro odchylku lapovaných ploch a 8 hodnot pro odchylku bočních ploch, které byly dále vyhodnoceny v další části práce. Příklad grafického protokolu měření je připojen v příloze č. 4.

4 Vyhodnocení experimentů a jejich zhodnocení

Výstupem pro vyhodnocení každého nastavení skeneru byly dva grafy popisující odchylky naměřených hodnot. Hlavním hlediskem pro porovnávání úspěšnosti nastavení byly body získané z funkčních ploch měřky, které mají stanovenou přesnost. Doplňující informací poté byly body získané porovnáváním vedlejších ploch měřky. Polohy těchto bodů byly popsány v části 3.4 *Tvorba grafického protokolu o měření* na straně 42. Ačkoliv je udávána přesnost skeneru $\pm 0,025$ mm, z důvodu nanesení zmatňujícího povlaku na povrch měřky byly jednotlivá nastavení vyhodnoceny jako úspěšná, pokud odchylky nepřesáhly hodnot nad $\pm 0,03$ mm. Odchylky byly použity pro konstrukci grafů, ze kterých bylo každé nastavení porovnáno. Následující tabulky č. 7 až 14 udávají seznam nastavení skeneru se zjištěnou maximální a minimální odchylkou bodů. Každé nastavení je vyhodnoceno následujícím způsobem:

- Vyhovující výsledek měření,
- Danou toleranci přesáhl jeden nebo dva body v řádech mikrometrů,
- Nevyhovující odchylky z měření.

Vyhodnocení nastavení skeneru pro hlavní a vedlejší body

Tab. 7: Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 100 mm v ose X

Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 100 mm v ose X								
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace	Odchylky [mm]	
							Min.	Max.
1	RSL	5	1	-	-	-	0,0051	0,0224
2	RSL	5	15	-	-	-	-0,0017	0,0417
3	RSL	10	15	-	-	-	-0,0154	0,0211
4	GSL	10	15	0,01	-	-	-0,0068	0,0229
5	GSL	5	15	0,1	-	-	-0,0070	0,0240
6	GSL	10	15	0,1	-	-	-0,0081	0,0251
7	GSL	10	15	0,5	-	-	-0,0674	0,0719
8	GSL	10	15	1	-	-	-0,4003	0,0633
9	QSP	5	15	0,1	0,16	2D	-0,0014	0,0278
10	QSP	5	15	0,1	0,16	3D	-0,0100	0,0209
11	QSP	10	15	0,5	0,25	2D	-0,0154	0,0110
12	QSP	10	15	0,5	0,25	3D	-0,0037	0,0454
13	QSP	10	15	1	0,5	2D	-0,0965	0,0900
14	QSP	10	15	1	0,5	3D	-0,1143	0,0275

Tab. 8: Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 100 mm v ose Y

Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 100 mm v ose Y								
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace	Odchyly [mm]	
							Min.	Max.
15	RSL	5	1	-	-	-	0,0194	0,0326
16	RSL	5	15	-	-	-	0,0045	0,0240
17	RSL	10	15	-	-	-	-0,0132	0,0338
18	GSL	5	15	0,1	-	-	-0,0192	0,0252
19	GSL	10	15	0,1	-	-	0,0106	-0,0252
20	GSL	10	15	0,5	-	-	-0,0262	0,0876
21	GSL	10	15	1	-	-	-0,0760	0,0378
22	QSP	5	15	0,1	0,16	2D	-0,0098	0,0145
23	QSP	5	15	0,1	0,16	3D	0,0290	-0,0069
24	QSP	10	15	0,5	0,25	2D	-0,0037	0,0454
25	QSP	10	15	0,5	0,25	3D	-0,0361	0,0175
26	QSP	10	15	1	0,5	2D	-0,2503	0,0390
27	QSP	10	15	1	0,5	3D	-0,0574	0,0134

Tab. 9: Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 500 mm v ose X

Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 500 mm v ose X								
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace	Odchyly [mm]	
							Min.	Max.
28	RSL	5	1	-	-	-	0,0190	0,0453
29	RSL	5	15	-	-	-	-0,0148	0,0303
30	RSL	10	15	-	-	-	0,0139	0,0438
31	GSL	3	1	0,1	-	-	0,0084	0,0431
32	GSL	5	15	0,1	-	-	-0,0166	0,0344
33	GSL	10	15	0,1	-	-	0,0010	0,0226
34	GSL	10	15	0,5	-	-	-0,0500	0,0631
35	GSL	10	15	1	-	-	-0,411	0,1492
36	QSP	5	15	0,1	0,16	2D	-0,0066	0,0324
37	QSP	5	15	0,1	0,16	3D	0,0000	0,0313
38	QSP	10	15	0,5	0,25	2D	0,0029	0,0707
39	QSP	10	15	0,5	0,25	3D	-0,0042	0,0664
40	QSP	10	15	1	0,5	2D	-0,1872	0,0804
41	QSP	10	15	1	0,5	3D	-0,0768	0,1290

Tab. 10: Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 500 mm v ose Y

Vyhodnocení nastavení pro hlavní body měřky 500 mm v ose Y								
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace	Odchylky [mm]	
							Min.	Max.
42	RSL	3	1	-	-	-	0,0074	0,0449
43	RSL	5	1	-	-	-	0,0121	0,0425
44	RSL	5	15	-	-	-	-0,0112	0,0303
45	RSL	10	15	-	-	-	-0,0022	0,0288
46	GSL	5	15	0,1	-	-	-0,0086	0,0169
47	GSL	10	15	0,1	-	-	-0,0146	0,0189
48	GSL	10	15	0,5	-	-	0,0090	0,0638
49	GSL	10	15	1	-	-	-0,0442	0,1038
50	QSP	3	15	0,1	0,16	2D	0,0135	0,0364
51	QSP	3	15	0,1	0,16	3D	0,0098	0,0389
52	QSP	5	15	0,1	0,16	2D	-0,0058	0,0296
53	QSP	5	15	0,1	0,16	3D	-0,0043	0,0297
54	QSP	10	15	0,5	0,25	2D	-0,0485	0,0419
55	QSP	10	15	0,5	0,25	3D	-0,0106	0,0779

Tab. 11: Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 100 mm v ose X

Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 100 mm v ose X								
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace	Odchylky [mm]	
							Min.	Max.
1	RSL	5	1	-	-	-	0,0134	0,0356
2	RSL	5	15	-	-	-	-0,0209	0,0034
3	RSL	10	15	-	-	-	0,0096	0,0220
4	GSL	10	15	0,01	-	-	-0,0118	0,0108
5	GSL	5	15	0,1	-	-	-0,0188	0,0036
6	GSL	10	15	0,1	-	-	-0,0144	0,0097
7	GSL	10	15	0,5	-	-	-0,0164	0,0171
8	GSL	10	15	1	-	-	-0,0177	0,0332
9	QSP	5	15	0,1	0,16	2D	0,0093	0,0347
10	QSP	5	15	0,1	0,16	3D	-0,0025	0,0374
11	QSP	10	15	0,5	0,25	2D	-0,0106	0,0129
12	QSP	10	15	0,5	0,25	3D	-0,0123	0,0075
13	QSP	10	15	1	0,5	2D	-0,0024	0,0126
14	QSP	10	15	1	0,5	3D	-0,0163	0,0304

Tab. 12: Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 100 mm v ose Y

Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 100 mm v ose Y								
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace	Odchylky [mm]	
							Min.	Max.
15	RSL	5	1	-	-	-	0,0182	0,0351
16	RSL	5	15	-	-	-	-0,0095	0,0140
17	RSL	10	15	-	-	-	-0,0152	0,0063
18	GSL	5	15	0,1	-	-	-0,0074	0,0168
19	GSL	10	15	0,1	-	-	-0,0002	0,0149
20	GSL	10	15	0,5	-	-	-0,0032	0,0128
21	GSL	10	15	1	-	-	-0,0121	0,0128
22	QSP	5	15	0,1	0,16	2D	-0,0140	0,0019
23	QSP	5	15	0,1	0,16	3D	-0,0026	0,0361
24	QSP	10	15	0,5	0,25	2D	-0,0123	0,0075
25	QSP	10	15	0,5	0,25	3D	-0,0184	0,0043
26	QSP	10	15	1	0,5	2D	-0,0043	0,0193
27	QSP	10	15	1	0,5	3D	-0,0187	-0,0069

Tab. 13: Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 500 mm v ose X

Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 500 mm v ose X								
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace	Odchylky	
							Min.	Max.
28	RSL	5	1	-	-	-	0,0023	0,0425
29	RSL	5	15	-	-	-	-0,0223	0,0211
30	RSL	10	15	-	-	-	-0,0214	0,0341
31	GSL	3	1	0,1	-	-	-0,0020	0,0413
32	GSL	5	15	0,1	-	-	-0,0235	0,0235
33	GSL	10	15	0,1	-	-	-0,0170	0,0201
34	GSL	10	15	0,5	-	-	-0,0306	0,0234
35	GSL	10	15	1	-	-	-0,4661	0,0600
36	QSP	5	15	0,1	0,16	2D	-0,0216	0,0298
37	QSP	5	15	0,1	0,16	3D	-0,0203	0,0266
38	QSP	10	15	0,5	0,25	2D	-0,0104	0,0367
39	QSP	10	15	0,5	0,25	3D	-0,0201	0,0218
40	QSP	10	15	1	0,5	2D	-0,0068	0,0683
41	QSP	10	15	1	0,5	3D	-0,2097	0,0753

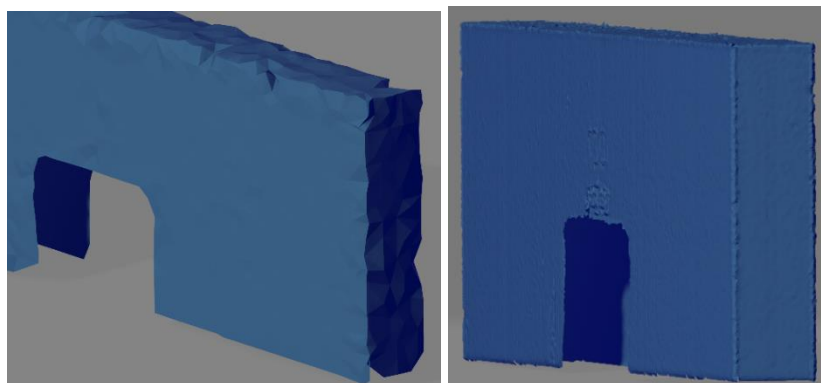
Tab. 14: Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 500 mm v ose Y

Vyhodnocení nastavení pro vedlejší body měřky 500 mm v ose Y								
Č.	Body	Rychlost [%]	Výkon laseru [mW]	Šířka kroku [mm]	Oblast komprimace [mm]	Prostor komprimace	Odchylky [mm]	
							Min.	Max.
42	RSL	3	1	-	-	-	0,0067	0,0391
43	RSL	5	1	-	-	-	0,0113	0,0440
44	RSL	5	15	-	-	-	-0,0138	0,0229
45	RSL	10	15	-	-	-	-0,0151	0,0324
46	GSL	5	15	0,1	-	-	-0,0139	0,0297
47	GSL	10	15	0,1	-	-	-0,0189	0,0199
48	GSL	10	15	0,5	-	-	-0,0175	0,0370
49	GSL	10	15	1	-	-	-0,0450	0,0989
50	QSP	3	15	0,1	0,16	2D	0,0008	0,0414
51	QSP	3	15	0,1	0,16	3D	0,0038	0,0478
52	QSP	5	15	0,1	0,16	2D	-0,0204	0,0377
53	QSP	5	15	0,1	0,16	3D	-0,0147	0,0299
54	QSP	10	15	0,5	0,25	2D	-0,0121	0,0274
55	QSP	10	15	0,5	0,25	3D	-0,0063	0,0356

Grafy, které nebudou zobrazeny ve zhodnocení, lze najít v příloze č.1(RSL), č.2 (GSL) a č.3.

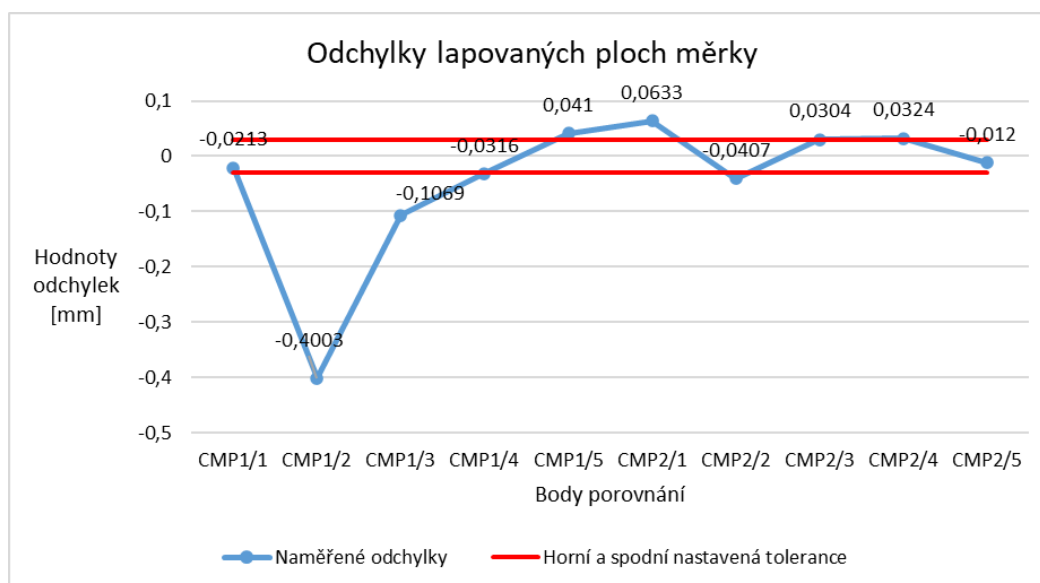
4.1 Zhodnocení experimentů

Z vyhodnocených grafů je patrné, že nejstabilnější výsledky byly obdrženy z GSL bodů s šířkou kroku 0,1 mm a výkonem laseru 15 mW s rychlostí měření 10 % (graf č. 3). Obecně lze konstatovat, že čím vyšší byla nastavená šířka kroku u bodů GSL a QSP, tím nestabilnější byly odchylky. Tento jev lze pozorovat už na samotném polygonovém modelu měrek, jak je znázorněno na obrázku č. 47.

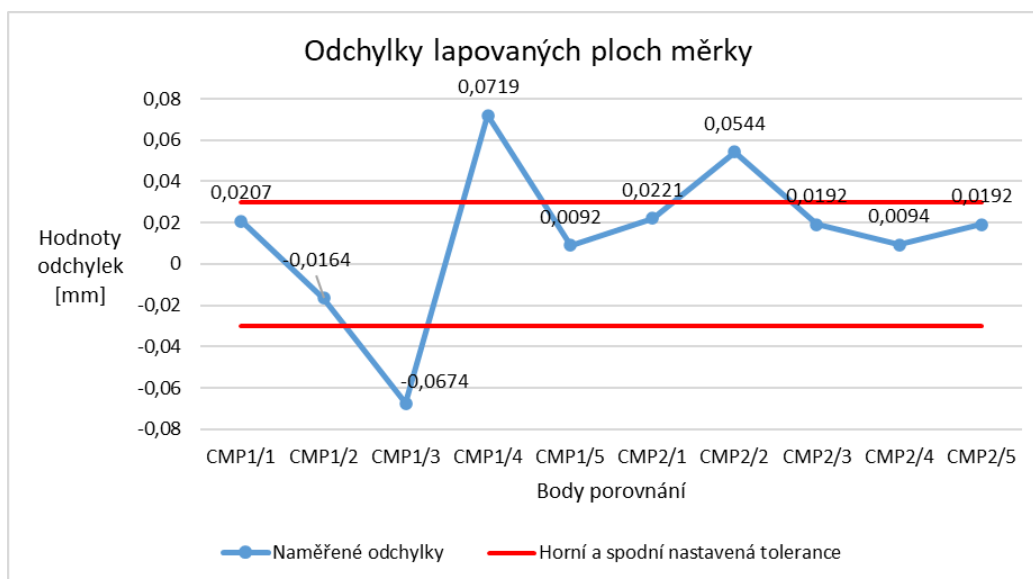


Obr. 47: Šířka kroku GSL bodů 1 mm (vlevo) a 0,1 mm (vpravo)

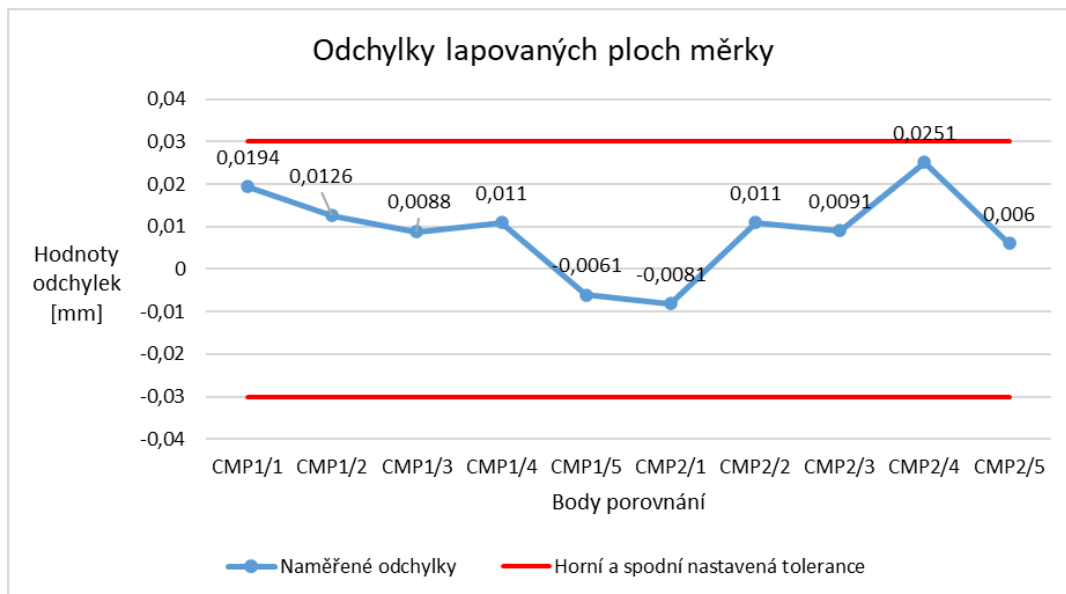
Grafy č. 1–3 porovnávají výsledné odchytky hlavních (lapovaných) ploch měrky pro nastavení č. 6–8.



Graf č. 1 : Nastavení č. 8 – GSL body s šířkou kroku 1 mm

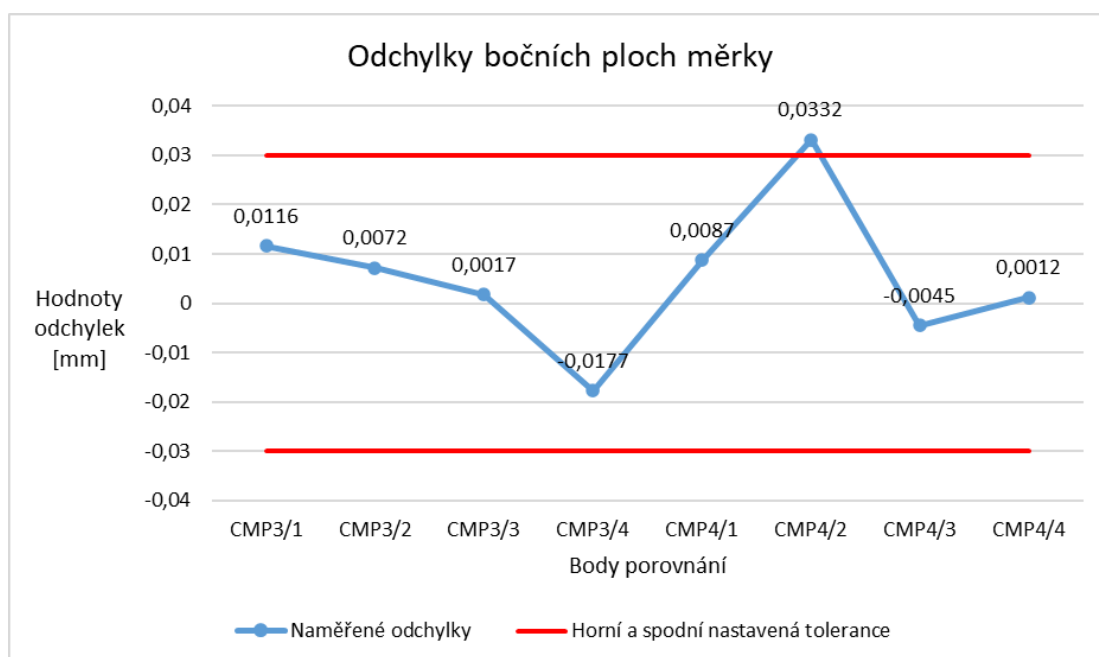


Graf č. 2: Nastavení č. 7 – GSL body s šířkou kroku 0,5 mm

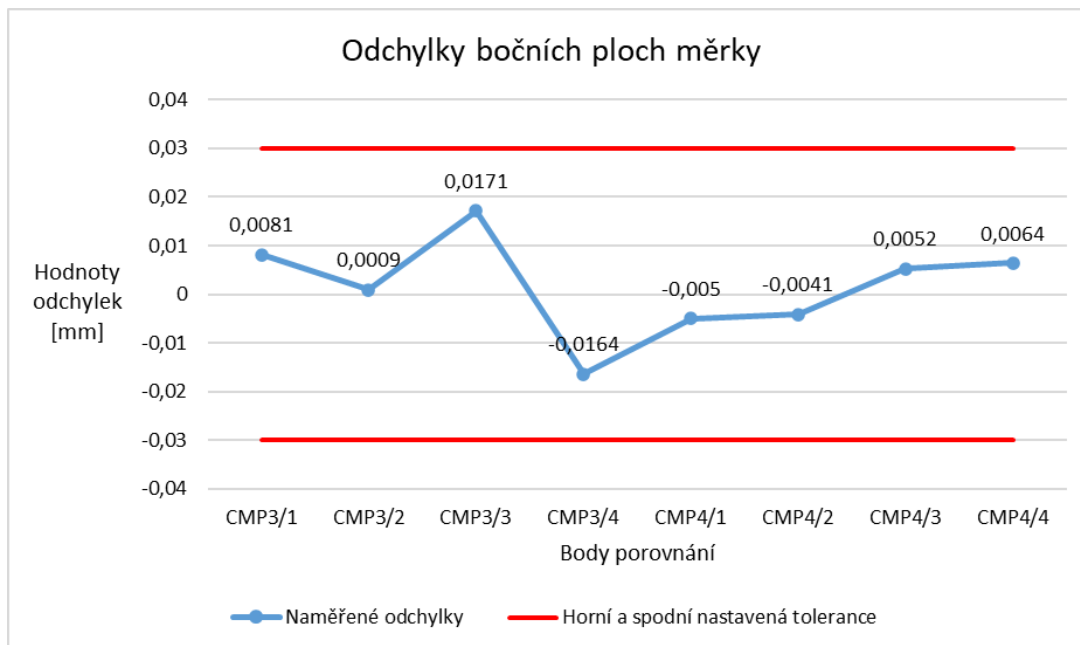


Graf č. 3: Nastavení č. 6 – GSL body s šířkou kroku 0,1 mm

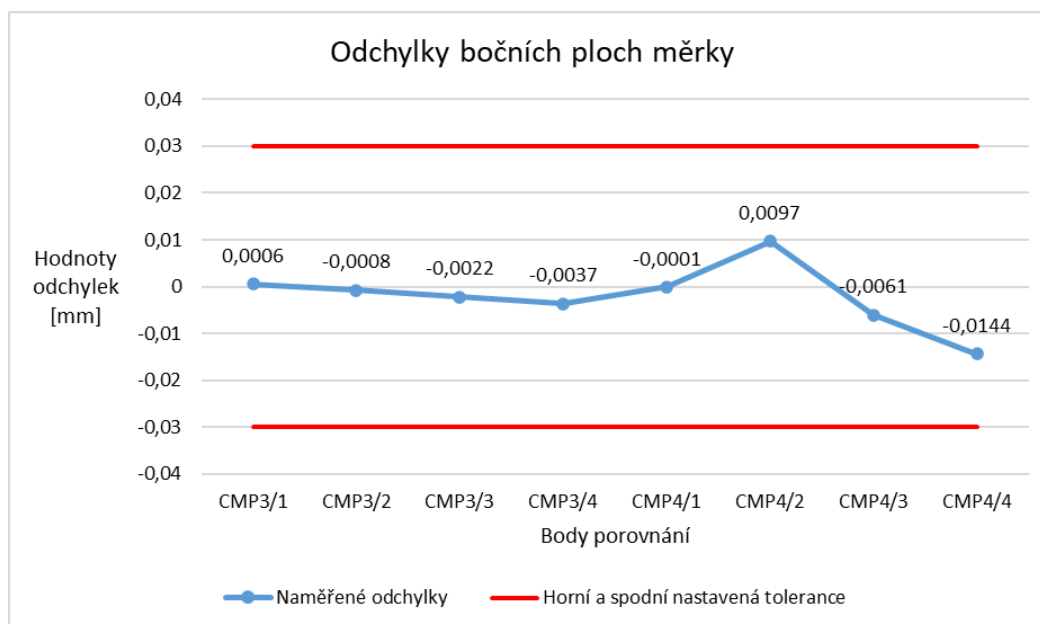
Kvalitnějšího polygonového modelu, z bodů s šířkou kroku 0,5 až 1 mm, by bylo možné docílit jiným nastavením výpočtu sítě v Geomagic Design X. Nicméně pro potřeby tohoto experimentu bylo zvolené jednotné nastavení s vysokou mírou zachování geometrie z nasnímaných bodů. Z tohoto důvodu byly odchylky vedlejších bodů lépe centrovány a s menším rozptylem, jelikož se nacházely dále od snímané hrany měrky. Grafy č. 4–6 vykreslují výše zmíněnou problematiku a lze pozorovat změnu v rozptylu naměřených bodů oproti grafům č 1–3.



Graf č. 4: Nastavení č. 8 – vedlejší GSL body s krokem 1 mm



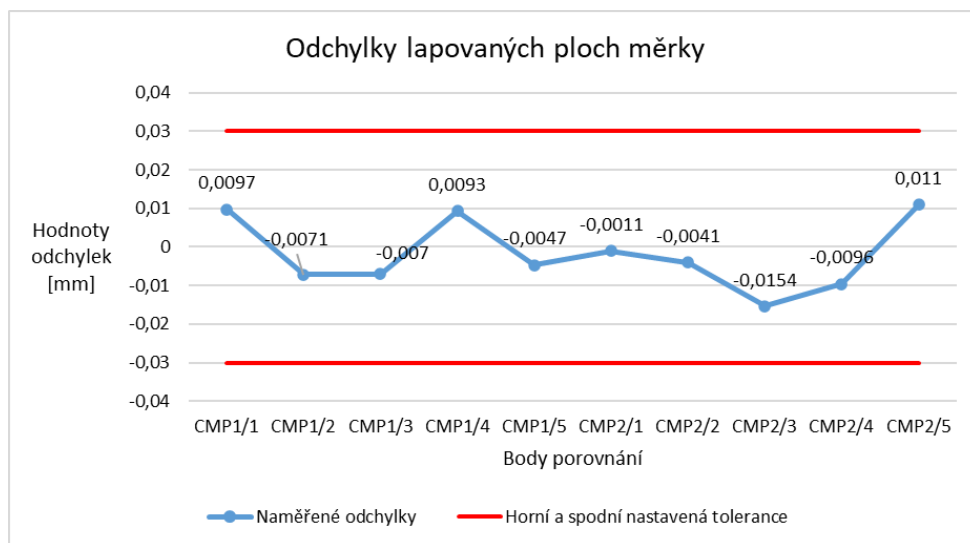
Graf č. 5: Nastavení č. 7 – vedlejší GSL body s krokem 0,5 mm



Graf č. 6: Nastavení č. 6 – vedlejší GSL body s krokem 0,1 mm

QSP body vykazovaly menší stabilitu (oproti GSL bodům), při stejné šířce kroku 0,1 mm, v závislosti na měření měrek v obou osách. Porovnáním výsledků pro měrky obou délek je patrná celková vyšší přesnost bodů pro měrku délky 100 mm, což mohl být projev samotné přesnosti měření. QSP body bylo možné také rozdělit podle nastavení oblasti komprimace. Výsledné odchylky z 2D a 3D komprimace ale neukázaly výrazné změny v přesnosti, co se týče nastavení kroku 0,1 mm. Nicméně při nastavení kroku na 0,5 mm a 2D komprimace dosáhly QSP body vyšší přesnosti, než GSL body s nastavením 0,5 mm.

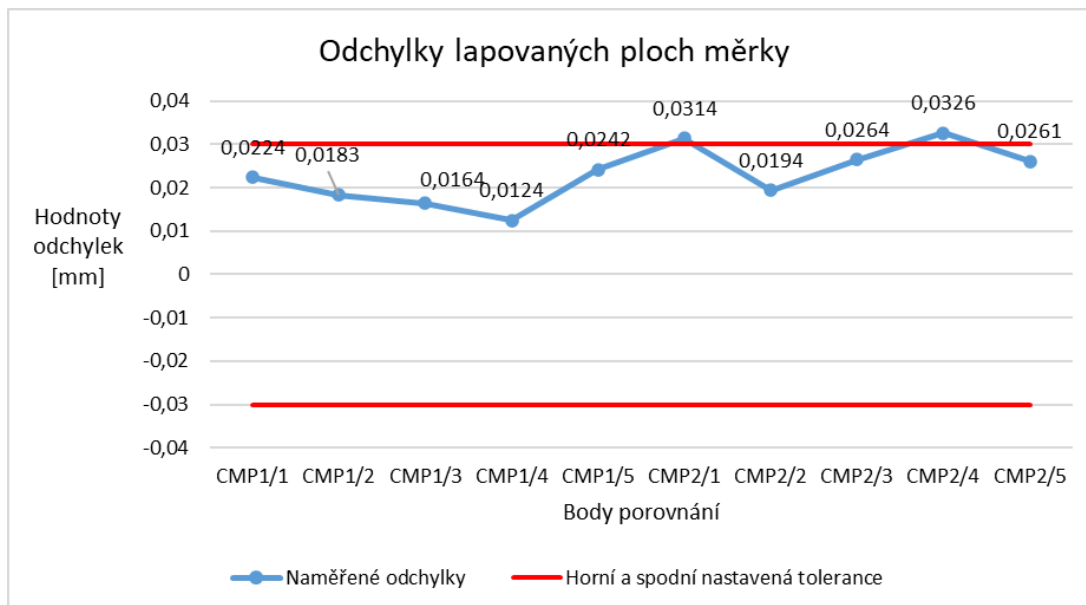
Na grafu č. 7 jsou zobrazeny odchylky popisovaných QSP bodů s krokem 0,5 a 2D komprimací, které lze porovnat s GSL body z grafu č. 2.



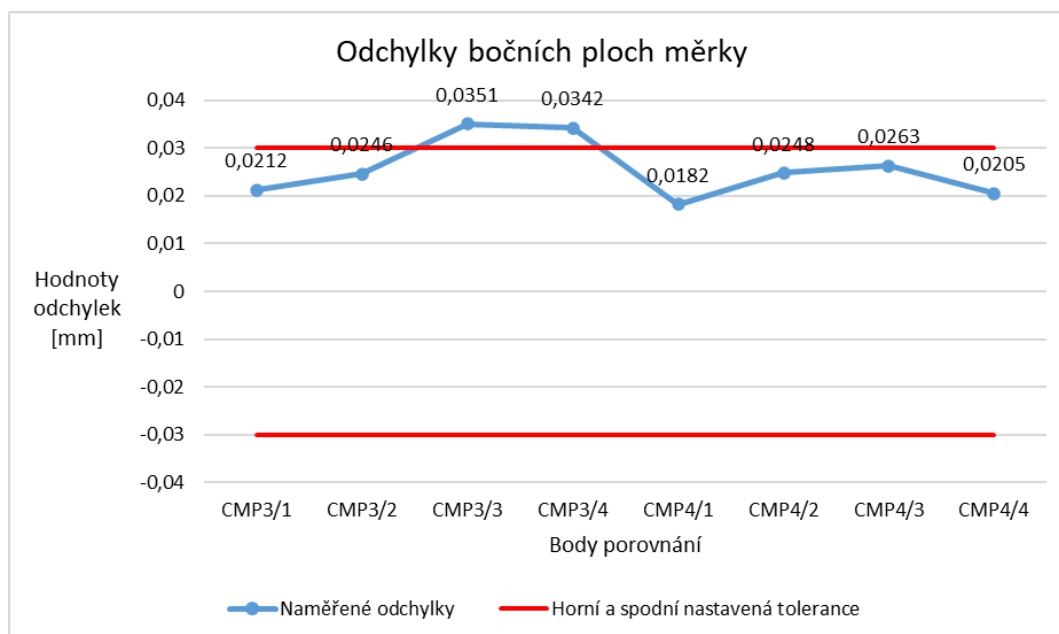
Graf č. 7: Nastavení 11 – QSP body s krokem 0,5 mm a 2D komprimací

Experiment také poukázal na vliv měřicí rychlosti vůči kvalitě získaných dat. Použitá rychlost měření 10 % se projevila jako ideální pro většinu nastavení, kromě QSP bodů. QSP body s danou šířkou kroku 0,1 mm musejí mít dostatečný počet bodů pro komprimaci dat. Z tohoto důvodu byla zvolena rychlost měření 5 %, která se prokázala jako dostačující.

RSL body vykazovaly obecně menší rozptyl odchylek při nižších rychlostech měření. Výsledné body však byly centrované k horní stanovené hranici tolerance. Některá nastavení RSL bodů byla vyhodnocena jako nevyhovující, ačkoliv naměřené odchylky měly malý rozptyl, ale svým centrováním překročily danou toleranci. Graf č. 8 a 9 zobrazuje takto vyhodnocené odchylky z nastavení skeneru č. 15 s rychlostí měření 5 %.

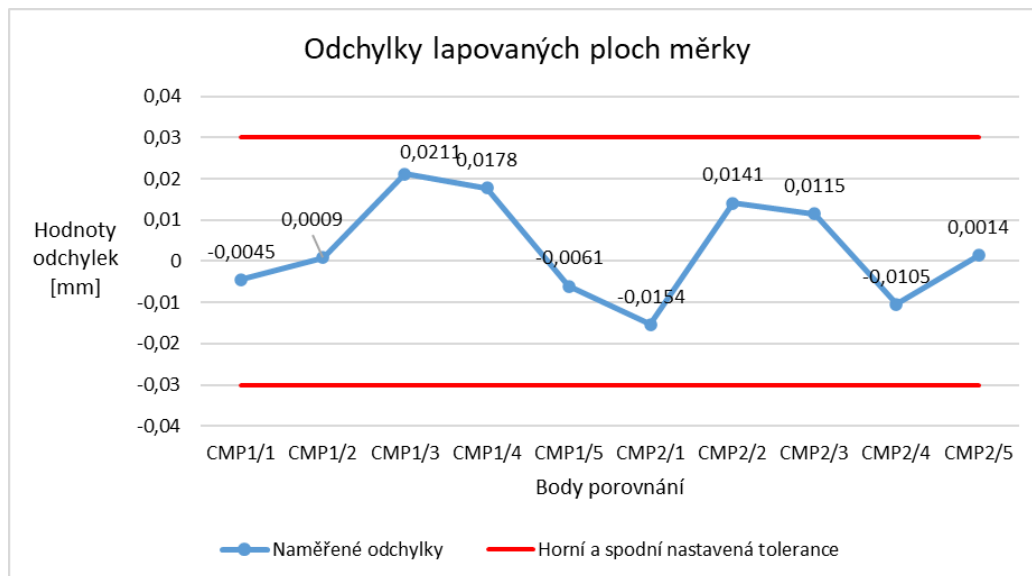


Graf č. 8: Nastavení č. 15 - RSL body, rychlost 5 %

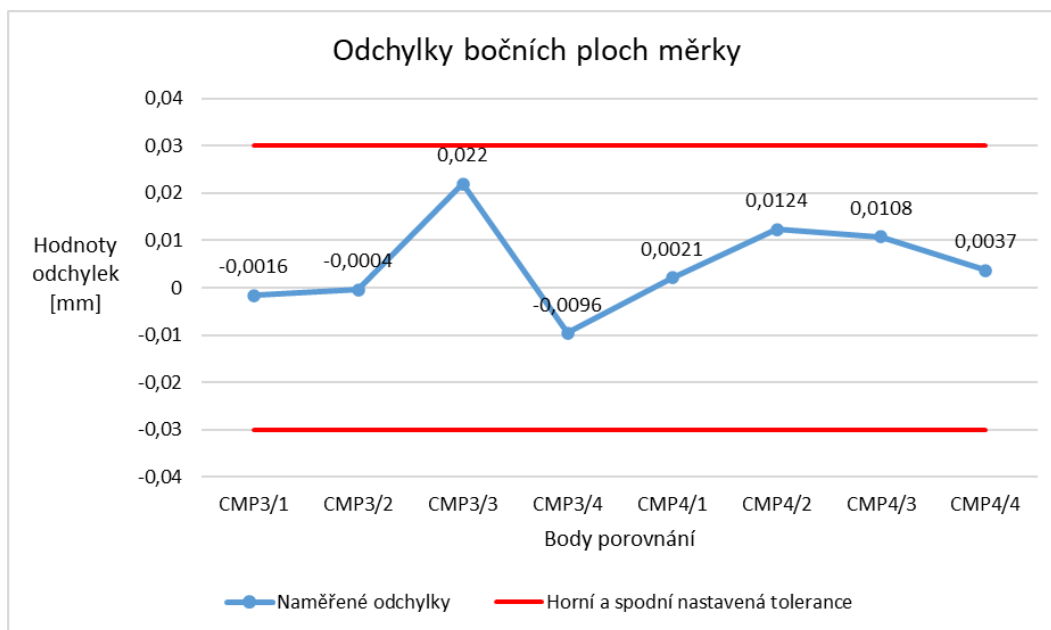


Graf č. 9: Nastavení č. 15 - RSL body, rychlost 5%

Grafy č. 10 a 11 poté popisují výsledné hodnoty získané RSL body s rychlostí měření 10 %.



Graf č. 10: Nastavení skeneru č. 3 – RSL, rychlost 10 %



Graf č. 11: Nastavení skeneru č. 3 pro vedlejší odchylky – RSL, rychlost 10 %

Výkon laseru, který byl u RSL bodů nastaven i na druhou hodnotu 1 mW, kromě redukce šumu v okolí držáku měrky, snížil přesnost měření. Nastavení výkonu laseru na 1 mW u RSL bodů mělo negativní vliv na výsledné hodnoty, ačkoliv by toto nastavení mělo být dostatečné na světlé a matné povrchy. Lze tedy usoudit, že při tomto měřeném objektu a podmínkách měření umožňuje výkon laseru 15mW stabilnější odchylky.

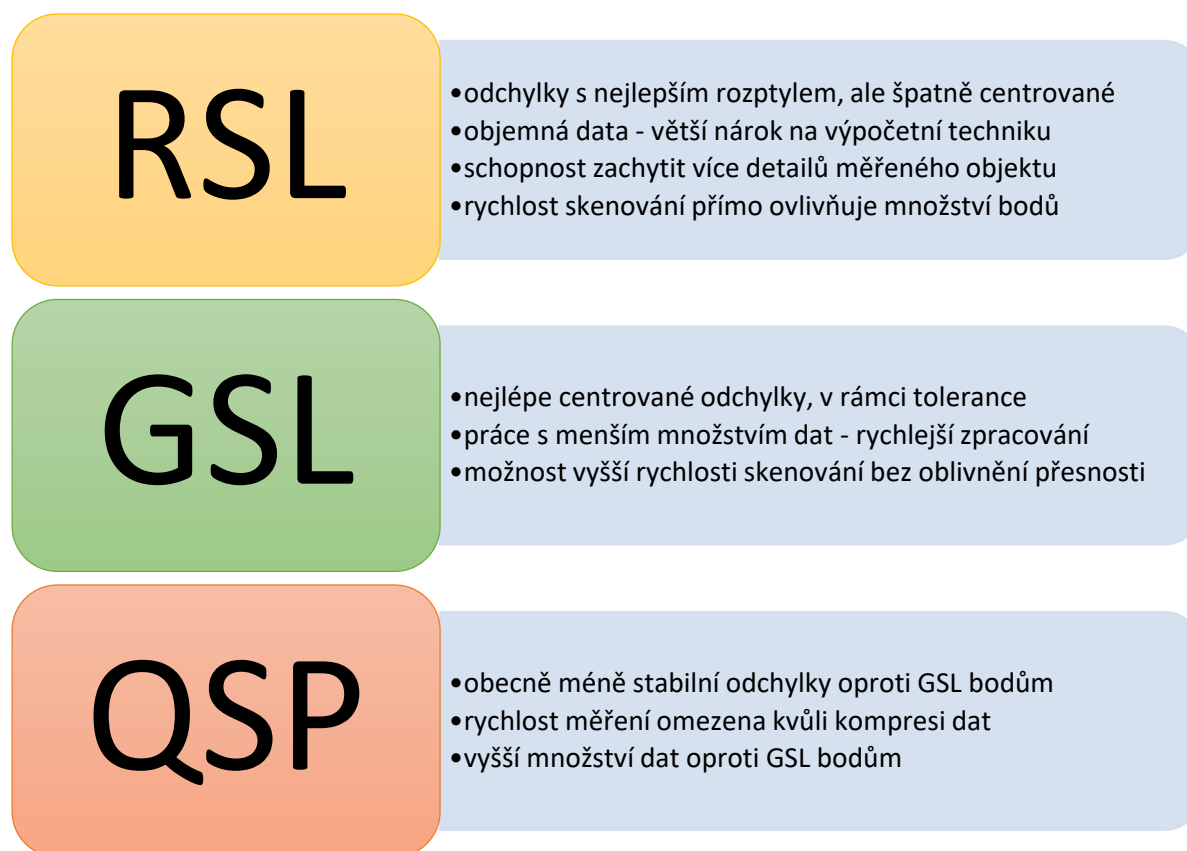
Množství RSL bodů lze ovlivnit přímo rychlostí měření. Oproti GSL a QSP bodům, které omezují počet bodů podle nastavení šířky kroku. RSL body tedy mohou při nižší rychlosti zaznamenat více bodů, tzn. více detailů povrchu. Nevýhodou je získání velkého objemu dat a delšího času zpracování mračna bodů. Na obrázku č. je nasnímané označení měřky pomocí RSL bodů s rychlostí 5 %, GSL body s šířkou kroku 0,1 mm a rychlostí 10 % a QSP body s šířkou kroku 0,1 mm a rychlostí 5 %.



Obr. 48: Schopnost různých nastavení zaznamenat detaily povrchu

4.2 Shrnutí popsaných poznatků

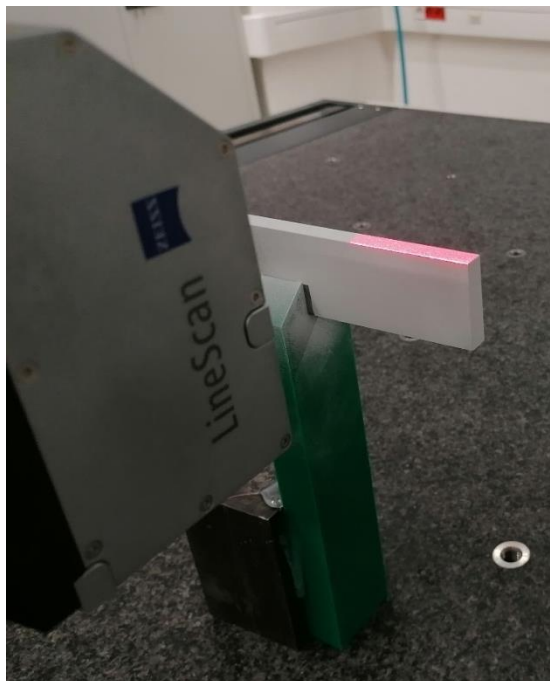
Výše zmíněná vyhodnocení jsou shrnuta na obrázku č. 49.



Obr. 49: Celkové porovnání poznatků z experimentů

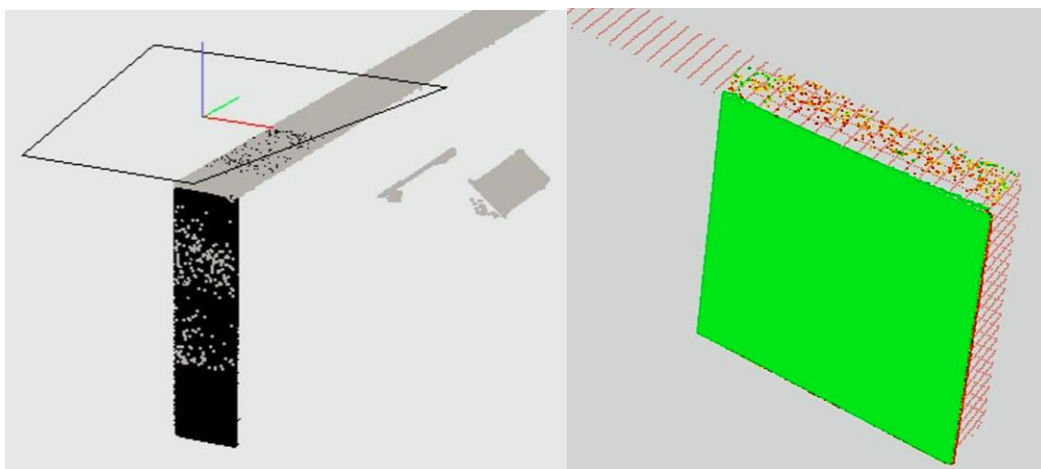
4.3 Možné ovlivnění experimentu

Během provádění experimentů bylo pozorováno, že při přejetí skeneru přes konec měřené oblasti byly senzorem zaznamenány body na ploše kolmé k měřené oblasti. Po získání mračna bodů z této kolmé plochy byl zjištěn rozdíl v návaznosti těchto bodů. Tyto body neležely ve stejné rovině, oproti řádně získanému mračnu bodů, kdy byl skener kolmo k měřené oblasti. Obrázek č. 50 poukazuje na výše popsanou problematiku.



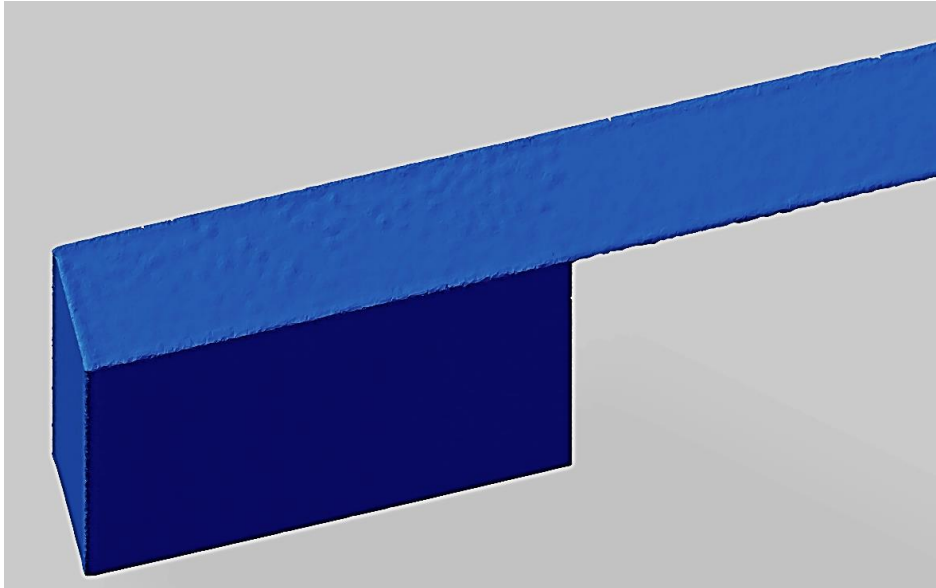
Obr. 50: Přejetí skeneru přes hranu měřky

Obrázek č. 51 zobrazuje výsledné mračno bodů s šumem získaným při tomto způsobu měření. Vlevo je vyobrazen GSL typ mračna bodů a vpravo RSL body zobrazené ve WBScan.

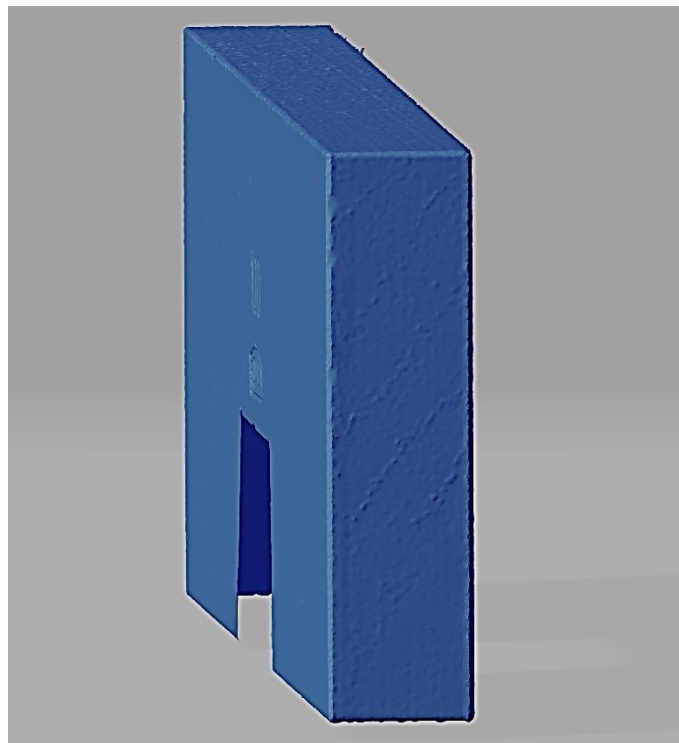


Obr. 51: GSL body (levá strana), RSL body (pravá strana)

Výsledný povrch polygonového modelu obsahoval viditelnou změnu struktury oproti oblastem tohoto modelu, kde nedošlo k šumu z předchozího měření. Obrázek č. 52 zobrazuje tento jev na modelu měrky 500 mm, na jejímž modelu lze pozorovat výsledné ovlivnění. Na obrázku č 53. je poté zobrazen model měrky 100 mm. Jedním z možných řešení by mohla být změna úhlu skeneru při měření těchto ploch.

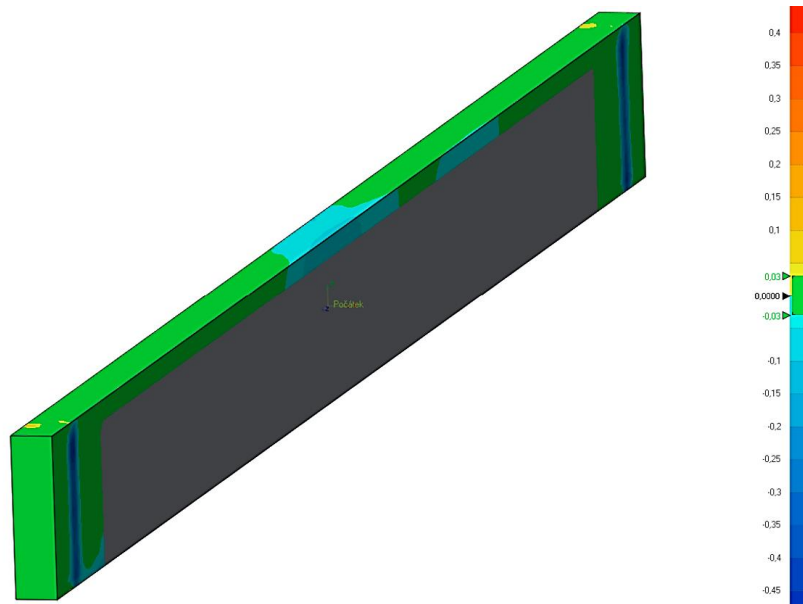


Obr. 52: Pohled na plochu modelu měrky 500 mm

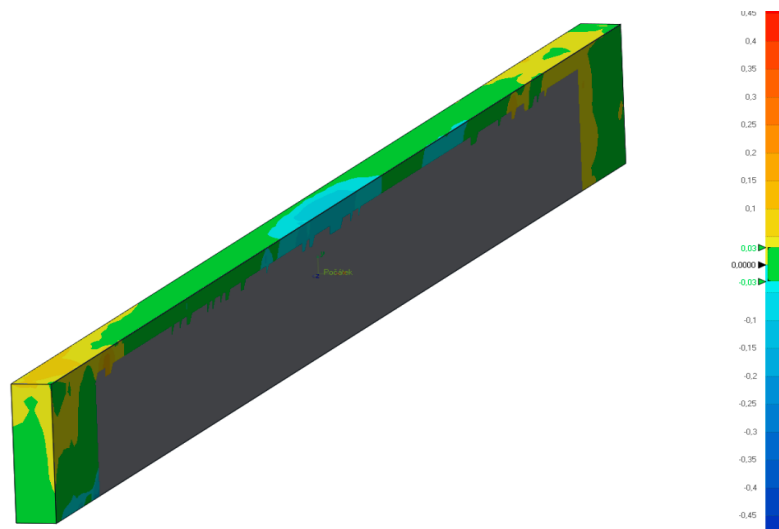


Obr. 53: Pohled na plochu modelu měrky 100 mm

Další možné ovlivnění experimentu bylo zaznamenáno při vyhodnocování skenů pro základní měrku 500 mm. Barevná mapa odchylek vyznačila přibližně v prostředku měrky průhyb v jednotkách setin milimetru. Jelikož se tento průhyb na měrce zobrazoval na všech vyhodnocených protokolech, byla vyloučena případná nepřesnost vzniklá při provádění jednotlivých měření. Porovnání výsledků měření před aplikací zmatňujícího povlaku s výsledky měření měrky po nanesení povlaku, které je znázorněno na obrázcích č. 54 a č. 55, vyloučilo nerovnoměrné nanesení tohoto povlaku na povrch měrky. Výslednou příčinou mohl být průhyb měrky v držácích nebo deformace měrky před měřením. Možným vysvětlením může být také vyšší odchylka rovinnosti této plochy vzniklá při výrobě, jelikož se nejedná o funkční plochu měrky.



Obr. 54: Barevná mapa odchylek na měrce 500 mm bez povlaku



Obr. 55: Barevná mapa odchylek na měrce 500 mm s aplikovaným povlakem

5 Závěr

V úvodu práce je zahrnut teoretický základ, který pojednává o RE jako takovém, a dále rozvíjí základní kroky potřebné pro získání podkladů pro digitalizaci, či výrobu požadovaného objektu. Pozornost je věnována zejména optickým laserovým skenerům na principu aktivní triangulace, který využívá optický senzor použitý při experimentech.

Pro získání přehledu o pracovišti a použitých pomůckách, bylo v rešerši současného stavu pojednáno o souřadnicovém měřicím stroji **Carl Zeiss Prismo 7 Navigator**, se kterým je používán, pro digitalizaci komponent a vzorků, optický senzor **Zeiss LineScan**. Software, dodávaný výrobcem pro tento senzor, umožňuje získávání mračna bodů třemi hlavními způsoby: **RSL** (měřené body, přímo zaznamenané skenerem, bez dalších úprav), **GSL** (body zredukované a seskupené do mřížky o daném kroku) a **QSP** (komprimované a seskupené body do dané mřížky). Dále je popsán software používaný za účelem úpravy naměřených dat, tvorby jejich 3D modelů a případného vyhodnocení pomocí grafických protokolů o měření.

Ve třetí kapitole byly popsány experimenty ohledně těchto nastavení skeneru. Cílem těchto experimentů bylo popsat problematiku práce s daným senzorem, které se odvíjely od způsobů nastavení senzoru a podmínek měření. Jako referenční objekt byly zvoleny základní měřky o délkách **100 mm** a **500 mm**. Sérií měření těchto měrek byly získána potřebná data pro vyhodnocení jednotlivých nastavení senzoru. Jednotnou úpravou mračen bodů byly poté získány polygonové modely, pomocí kterých bylo získáno **55** grafických protokolů o měření. Každý z protokolů poté obsahoval odchylky, které byly použity pro evaluaci způsobů nastavení skeneru.

Vyhodnocením těchto odchylek každého nastavení skeneru byly, ve čtvrté kapitole této práce, splněny zadané cíle. Jako nejvhodnějším nastavením pro měření tvarově obdobných objektů jsou vyhodnoceny **GSL** body s nastavením kroku **0,1 mm**, které vykazovaly stabilní odchylky v rámci zvolené tolerance $\pm 0,03 \text{ mm}$ a všech variací měření. **RSL** a **QSP** body naopak prokázaly menší stabilitu odchylek napříč měřeními. Snížením rychlosti měření se následně u těchto bodů promítlo v lepším rozptylu odchylek, zároveň s jejich centrováním blíže horní hranici tolerance. Obecně všechny odchylky vykazovaly centrování blíže horní toleranci, což mohlo být ovlivněno zmatňujícím povlakem na měrkách. Poznatky a data z této diplomové práce budou dále sloužit jako základ pro návrh a realizaci následujících experimentů, díky kterým se podrobněji zmapuje problematika práce s tímto optickým senzorem.

Seznam použitých zdrojů

- [1] RAJA, Vinesh a Kiran J. FERNANDES. *Reverse engineering: an industrial perspective*. London: Springer. Series in advanced manufacturing (Springer), 2008. ISBN 978-1-84628-856-2.
- [2] WANG, Wego. *Reverse engineering: Technology of reinvention*. Crc Press, 2010. ISBN 978-1-4398-0631-9.
- [3] VARADY, Tamas; MARTIN, Ralph R.; COX, Jordan. *Reverse engineering of geometric models—an introduction*. *Computer-aided design*, 1997, 29.4: 255-268.
- [4] ZEISS CONTURA - Spolehlivé zajištění kvality. [online]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/portalove-souradnicove-merici-stroje/contura-2019.html>
- [5] Spínací dotekové sondy. [online]. Copyright © [cit. 27.05.2022]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/spinaci-dotekove-sondy--6652>
- [6] Technologie obrobkových sond. [online]. Copyright © [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/technologie-obrobkovych-sond--32933>
- [7] Home - HEIDENHAIN [online]. Copyright ©Z [cit. 19.01.2022]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/1113984-26_Touch_Probes_en_web.pdf
- [8] VAN GESTEL, Nick, et al. *A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs*. *Optics and lasers in engineering*, 2009, 47.3-4: 336-342.
- [9] 3D Laser Line Scanner Resolution Explained – Metrology and Quality News - Online Magazine. *Metrology and Quality News - Online Magazine – Latest Dimensional Metrology, Inspection and Quality News* [online] [cit. 21.05.2022]. Dostupné z: <https://metrology.news/3d-laser-line-scanner-resolution-explained/>
- [10] Digitalizace - její princip a rozdělení | *MM Průmyslové spektrum*. *MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah* | *MM Průmyslové spektrum* [online]. Copyright © 2001 [cit. 24.01.2022]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni>
- [11] YAO, C. W. An ultrasonic method for 3D reconstruction of surface topography. *Journal of Physics Communications*, 2018, 2.5: 055034.
- [12] Time-of-flight camera - Wikipedia. [online] [cit. 11.05.2022]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_camera
- [13] Skenery se strukturovaným světlem | *Hexagon Manufacturing Intelligence*. *Hexagon Manufacturing Intelligence* | Hexagon MI [online]. Copyright © 2022 [cit. 26.04.2022]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/products/structured-light-scanners>
- [14] Focus-Variation Technique in Comparison – Metrology and Quality News - Online Magazine. *Metrology and Quality News - Online Magazine – Latest Dimensional Metrology,*

Inspection and Quality News [online] [cit. 1.05.2022]. Dostupné z:
<https://metrology.news/focus-variation-technique-in-comparison/>

[15] AFROSE, Zinat. *Adaptive Methods for Point Cloud and Mesh Processing*. Old Dominion University, 2018.

[16] Polygonová síť – *Wikipedie*. [online]. [cit. 14.04.2022] Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Polygonov%C3%A1_s%C3%AD%C5%A5

[17] SCHONBERGER, Johannes L.; FRAHM, Jan-Michael. *Structure-from-motion revisited*. In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016. p. 4104-4113.

[18] Photogrammetry – *Wikipedia*. [online]. [cit. 20.05.2022] Dostupné z:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Photogrammetry>

[19] LANGE, Robert. 3D time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology. 2000.

[20] DR. WOLF&BECK GMBH. *Operating Instructions LineScan*. Wangen / Germany, 2013.

[21] Geomagic Design X – 3D Skenování | 3DSCAN. *3D Skenování | 3DSCAN* [online]. [cit. 01.05.2022] Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/software/reverzni-inzenyrstvi/geomagic-design-x/>

[22] Geomagic Control – 3D Skenování | 3DSCAN. *3D Skenování | 3DSCAN* [online]. [cit. 3.04.2022] Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/software/kontrola-kvality/geomagic-control-x/>

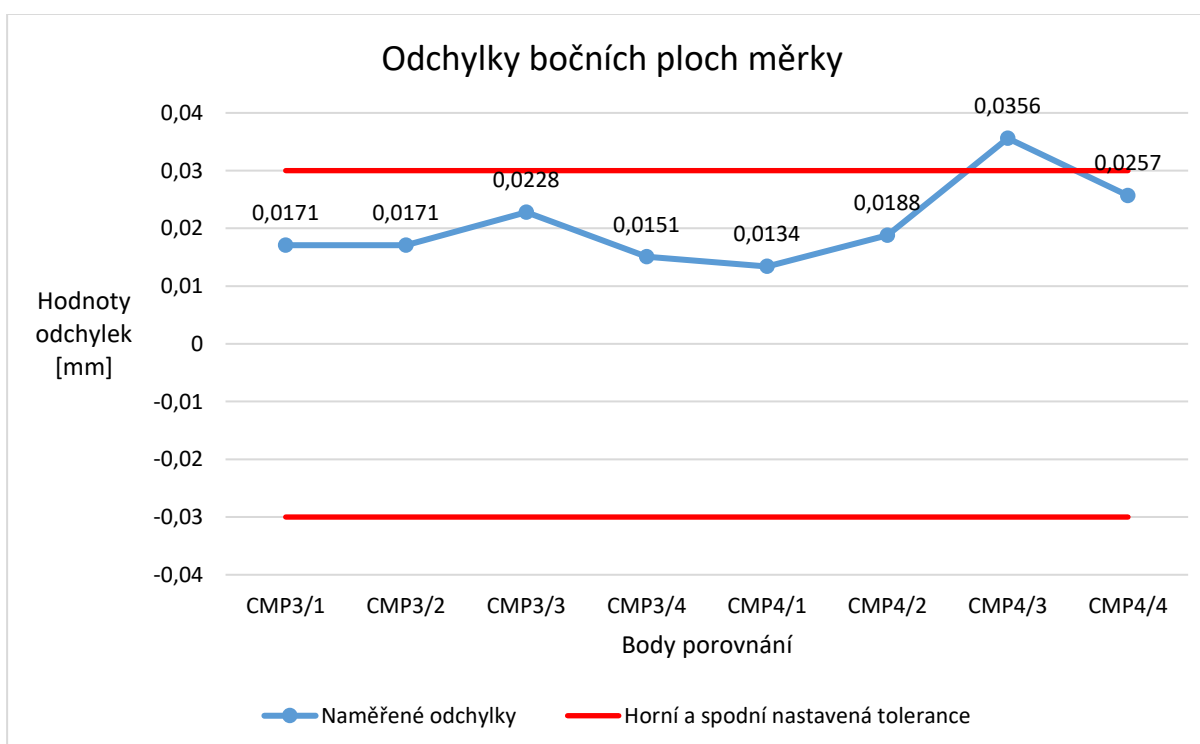
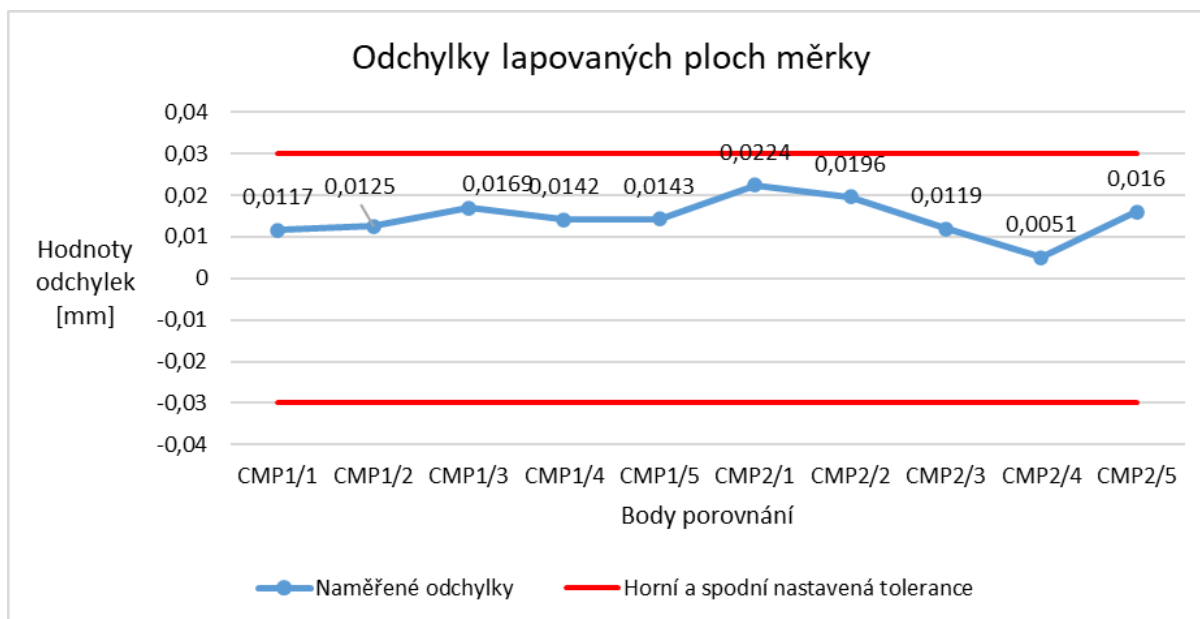
[23] I++ 2.0 DME Scanning (扫描测量) _Jianhongwei810的技术博客_51CTO博客. 51CTO博客-程序员及网络/运维工程师的技术博客-程序员创作平台与程序员学习社区 [online]. Copyright © 2005 [cit. 20.04.2022]. Dostupné z:
https://blog.51cto.com/u_14941238/2930230

[24] ZEISS PRISMO CMM – For all measuring tasks. 301 Moved Permanently [online]. [cit. 10.05.2022] Dostupné z: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines/bridge-type-cmms/prismo.html>

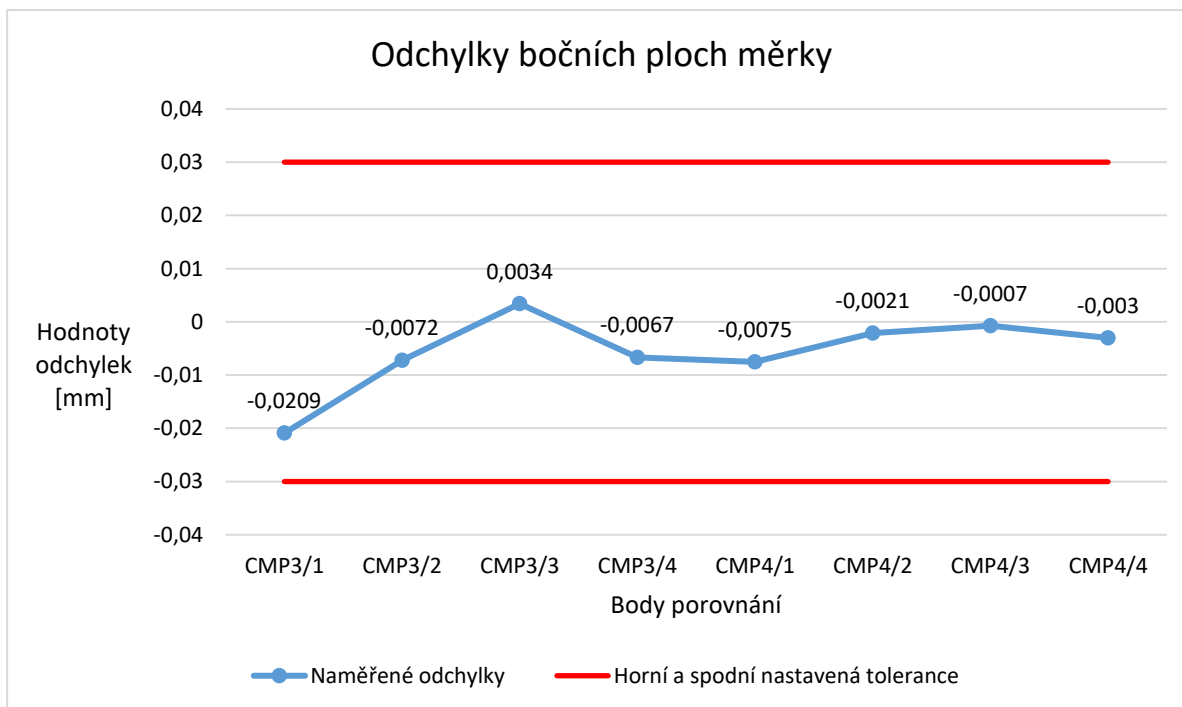
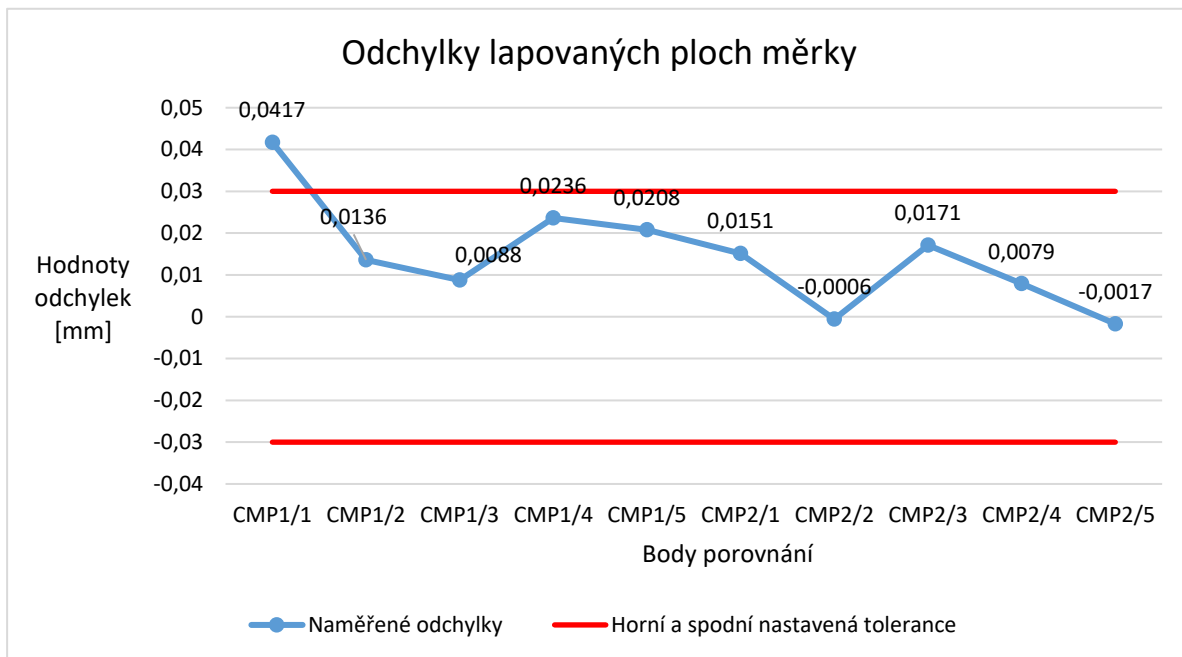
PŘÍLOHA č. 1

Sestavené grafy RSL bodů z protokolů o měření

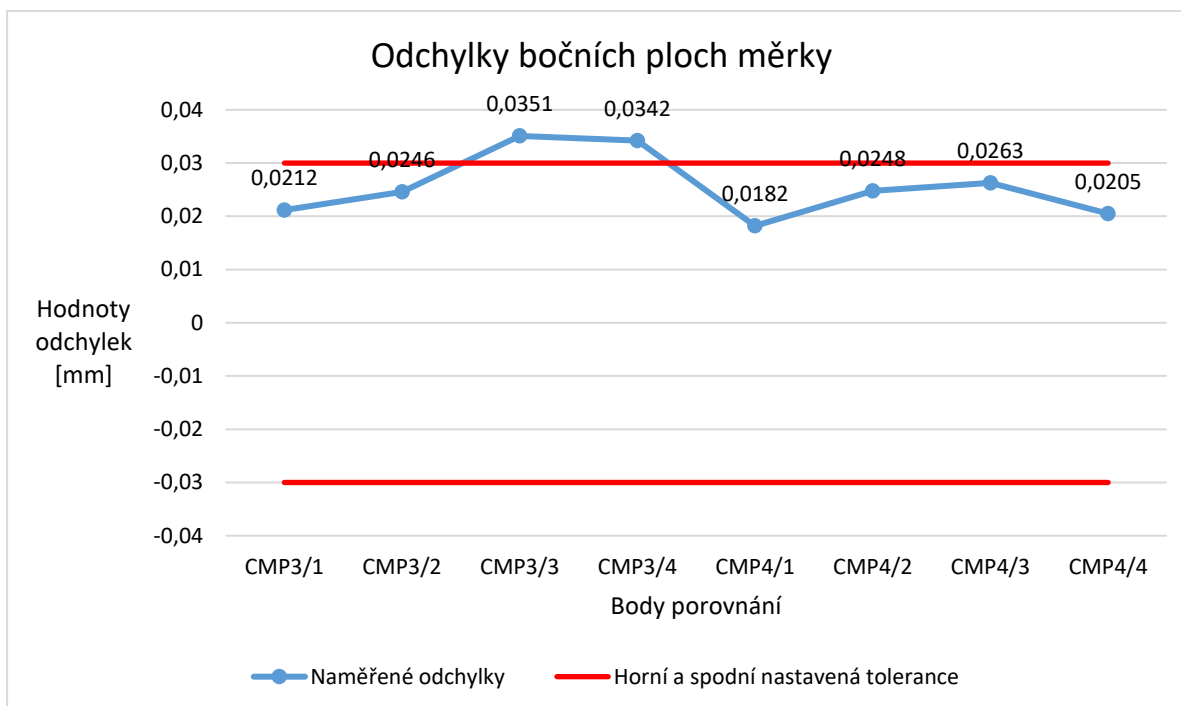
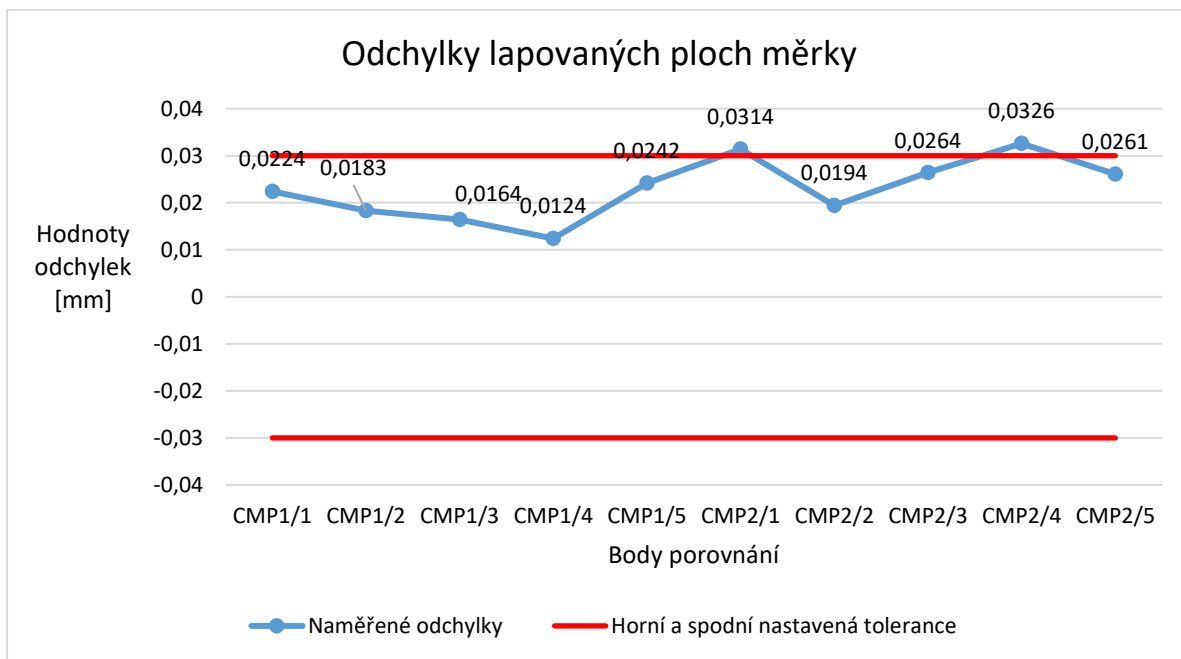
Nastavení skeneru č.1



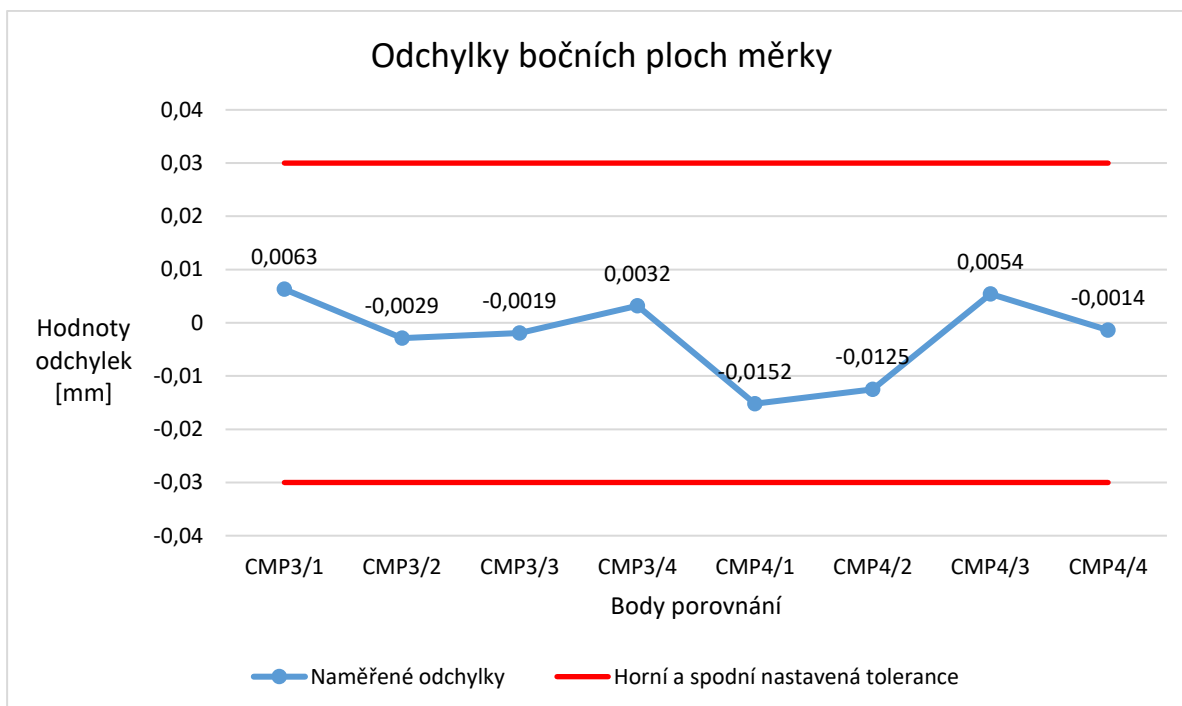
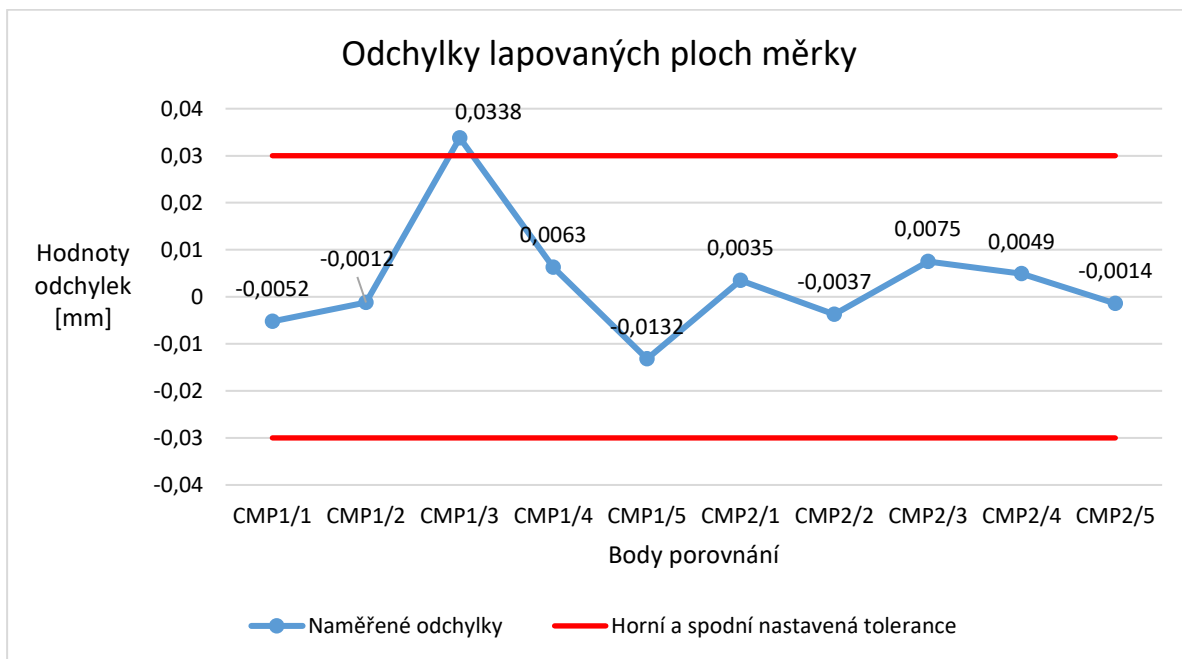
Nastavení skeneru č. 2



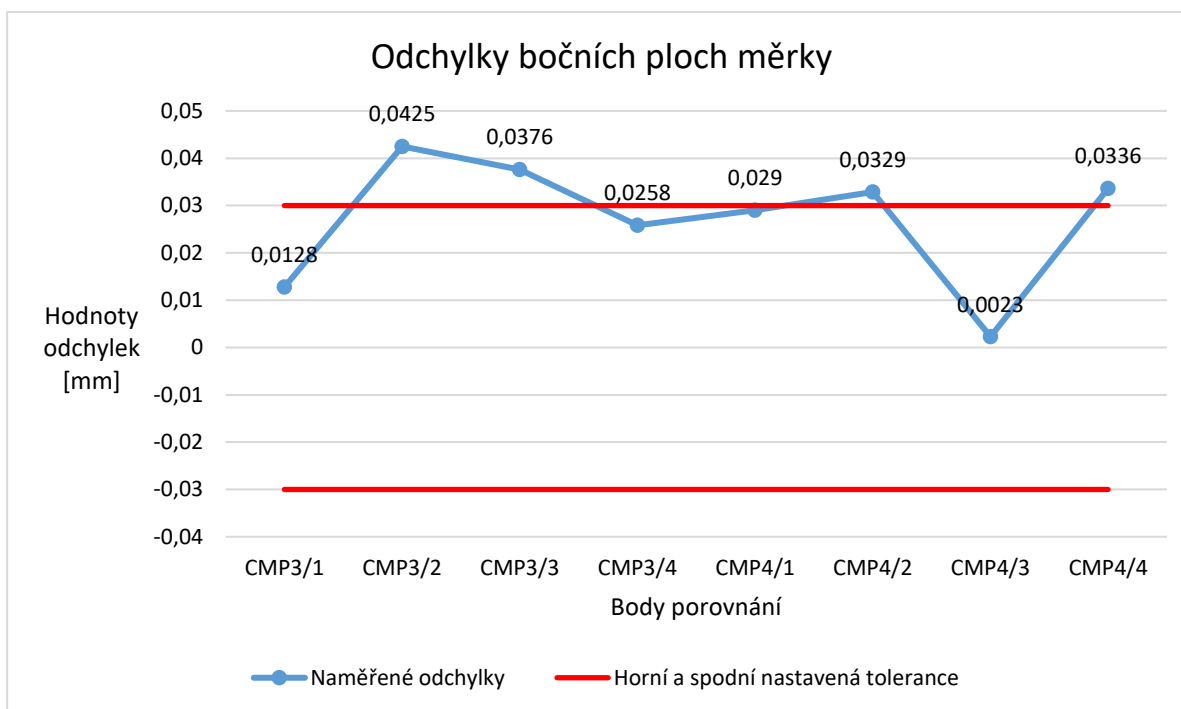
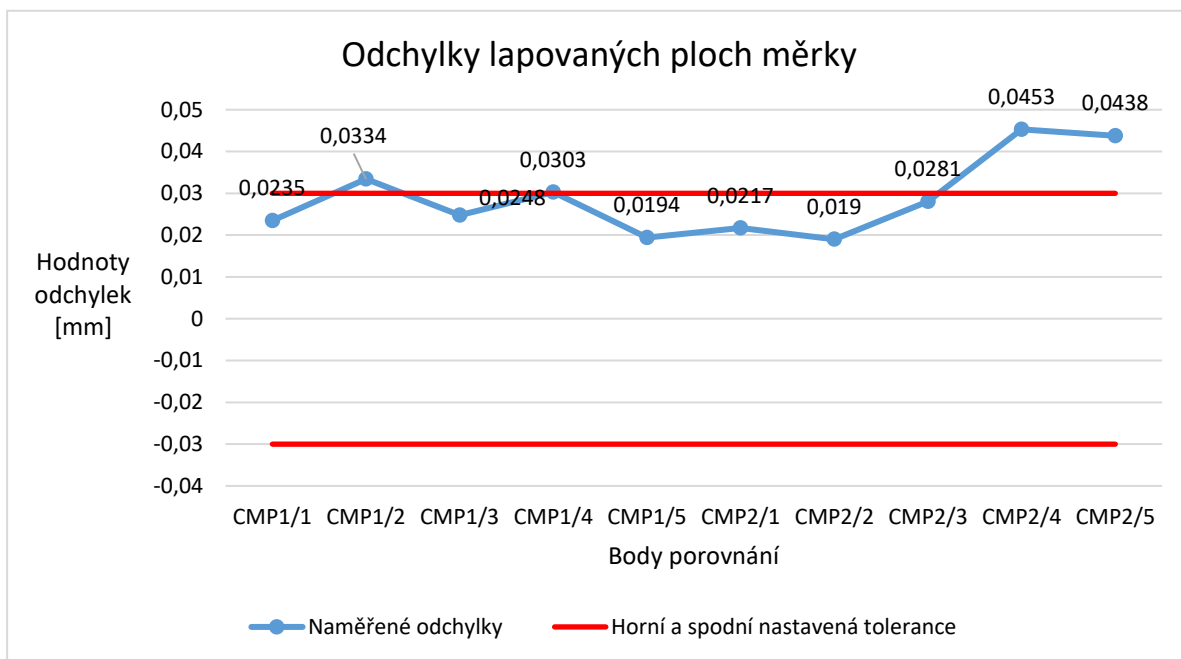
Nastavení skeneru č. 16



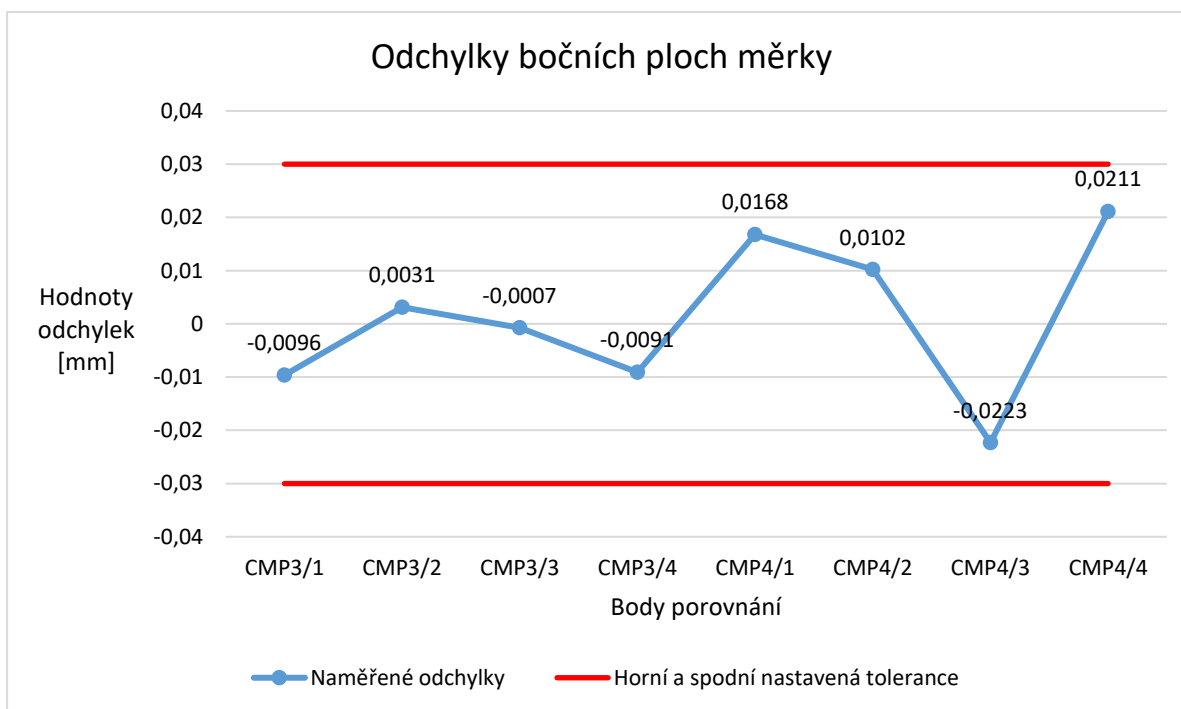
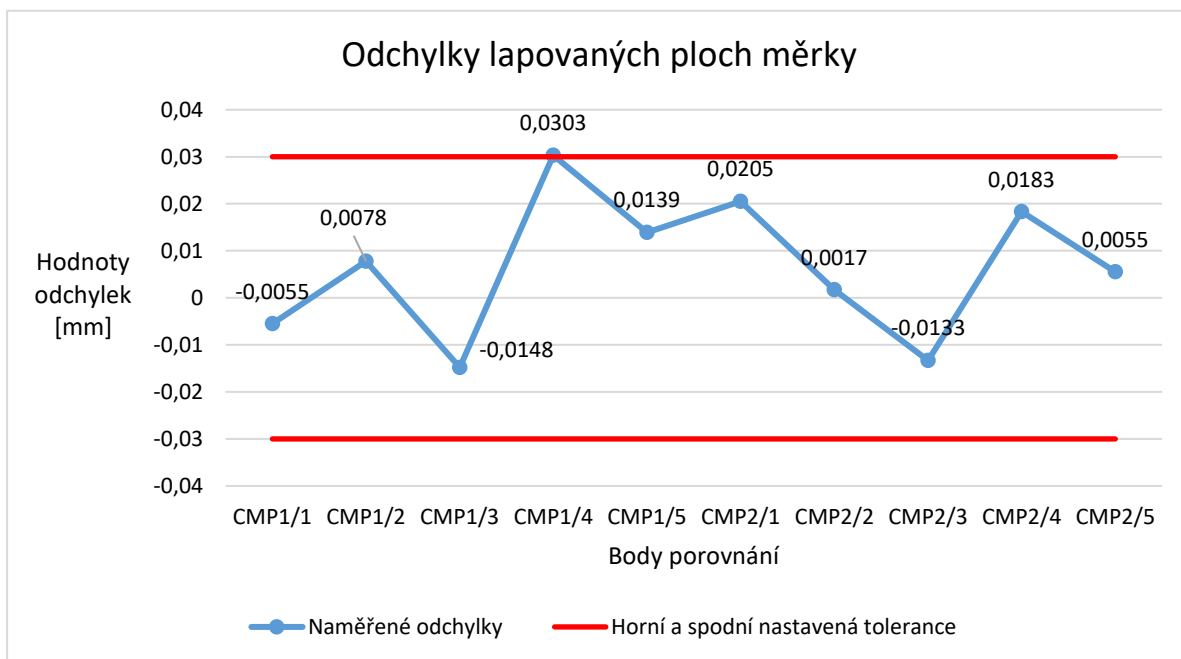
Nastavení skeneru č. 17



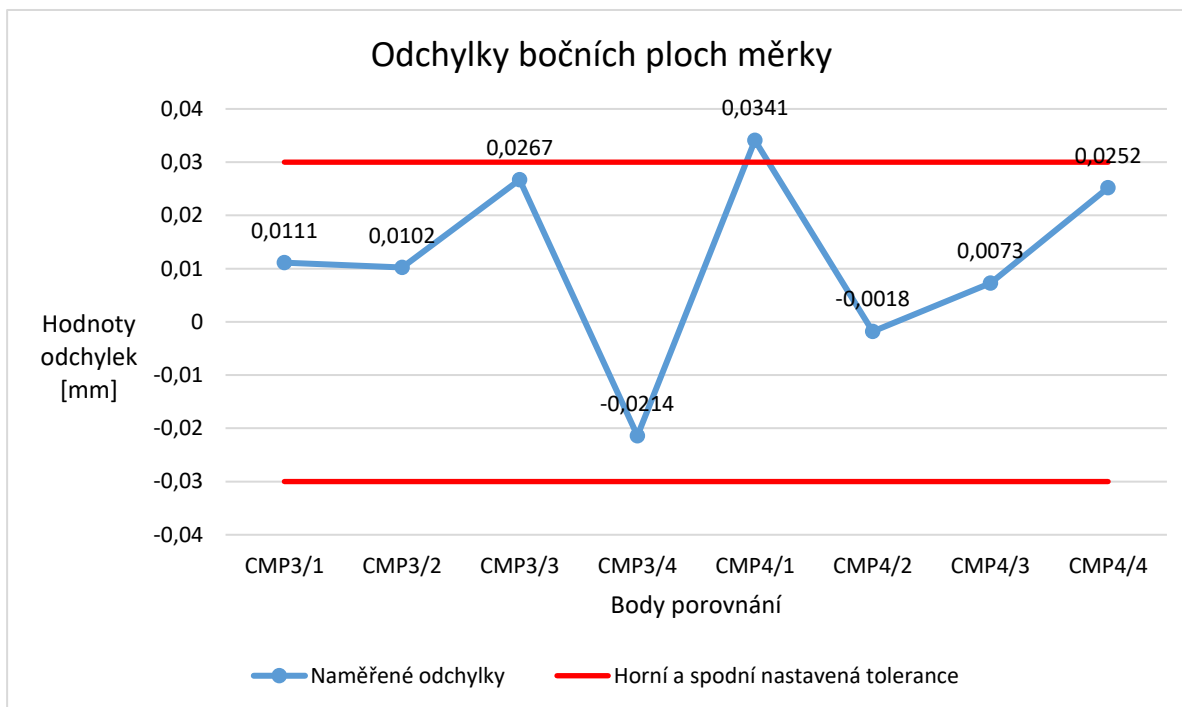
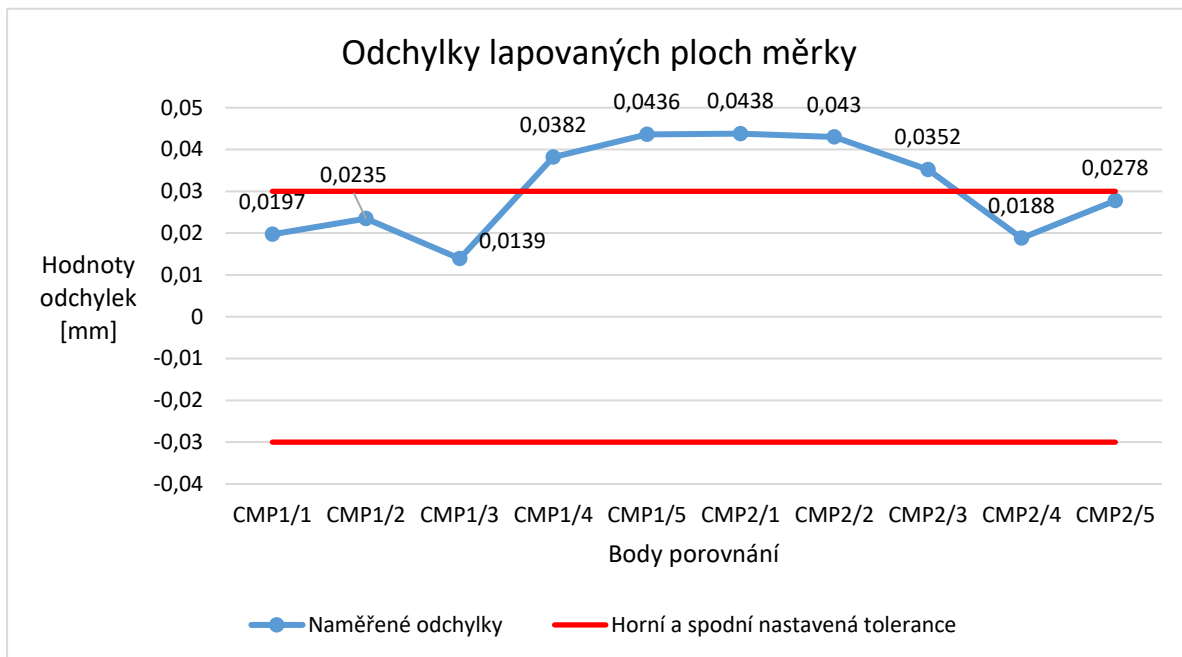
Nastavení skeneru č. 28



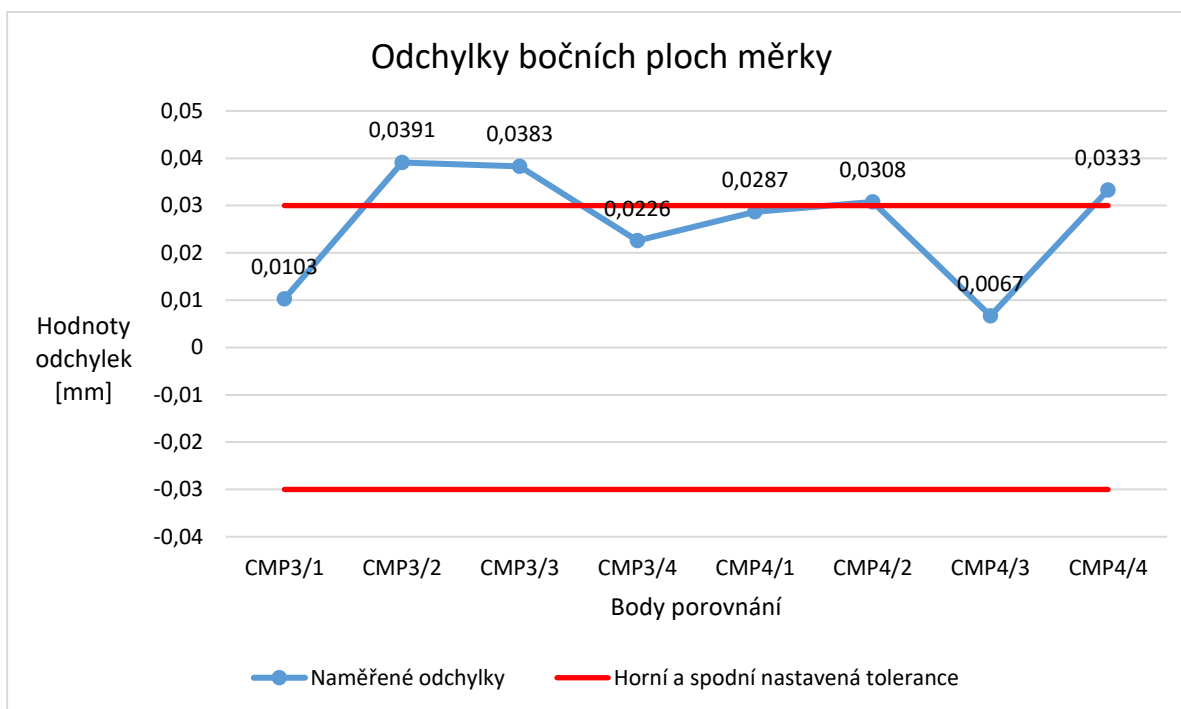
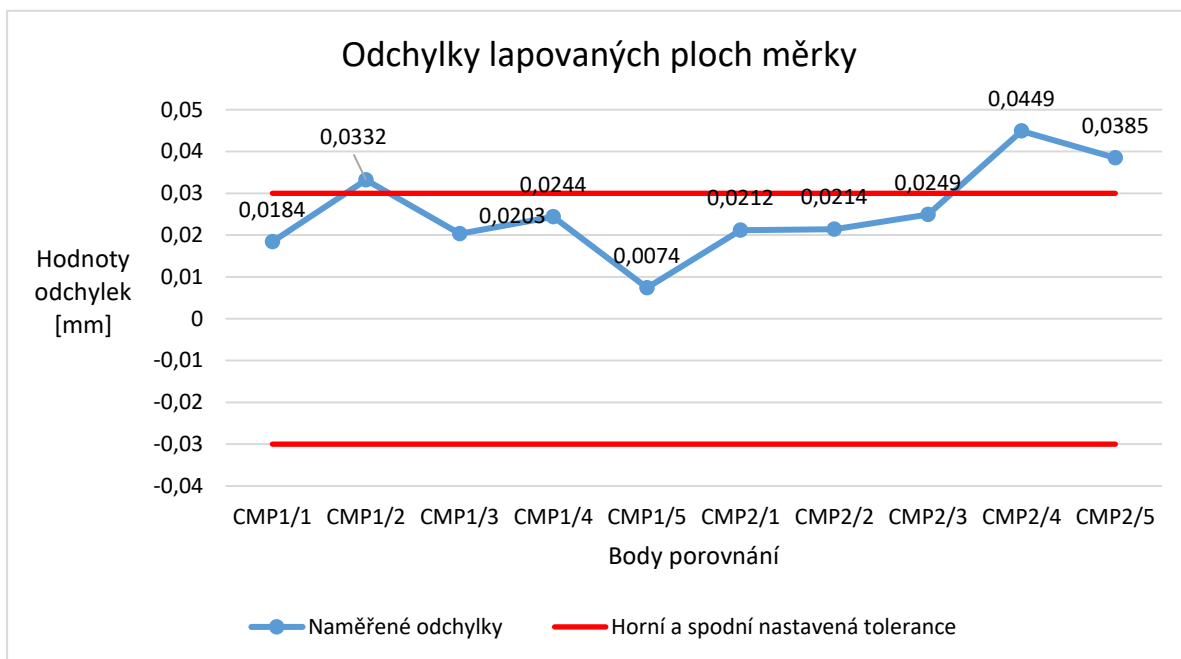
Nastavení skeneru č. 29



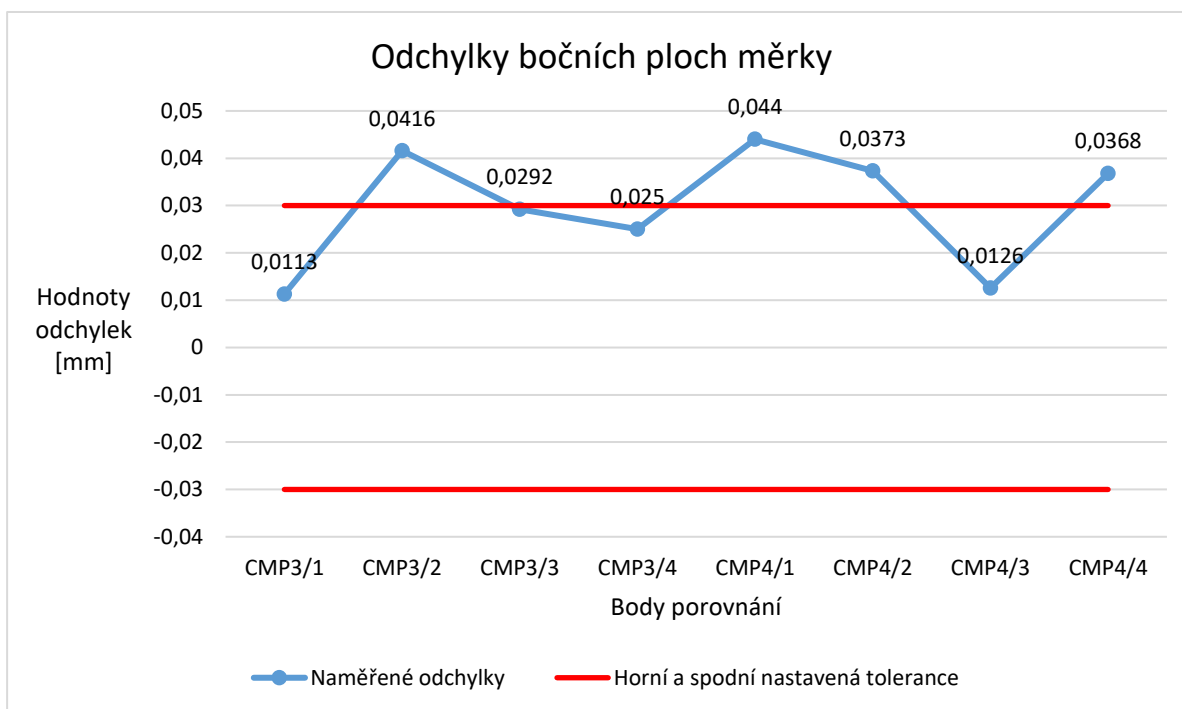
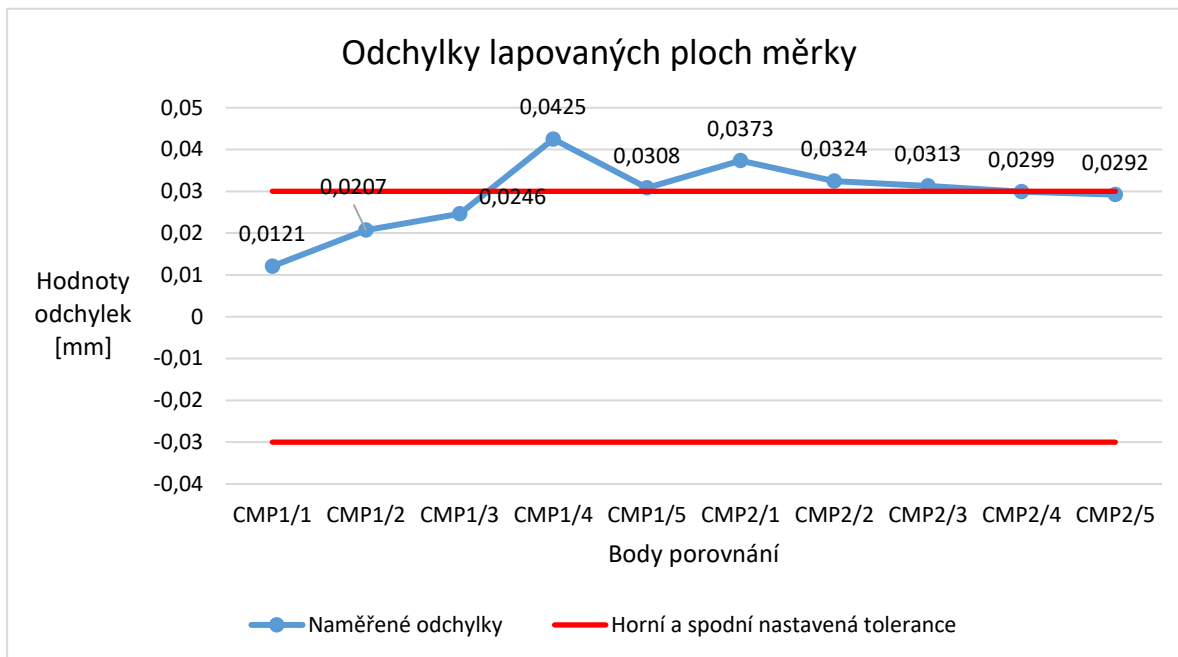
Nastavení skeneru č. 30



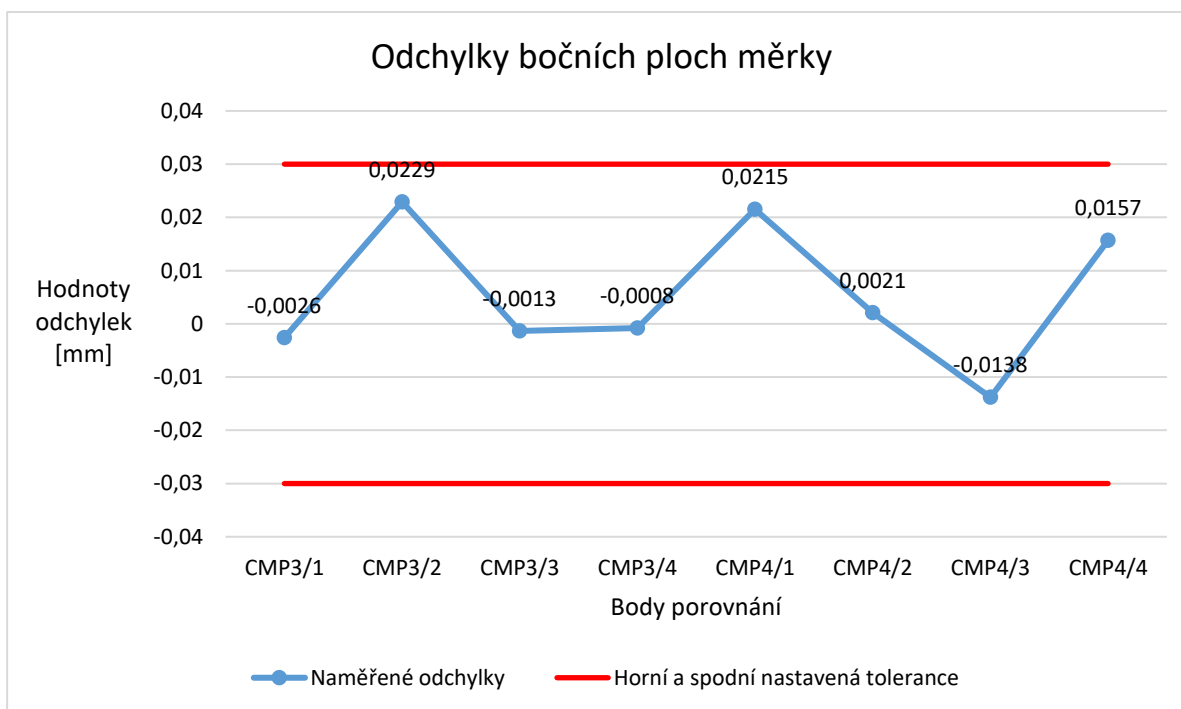
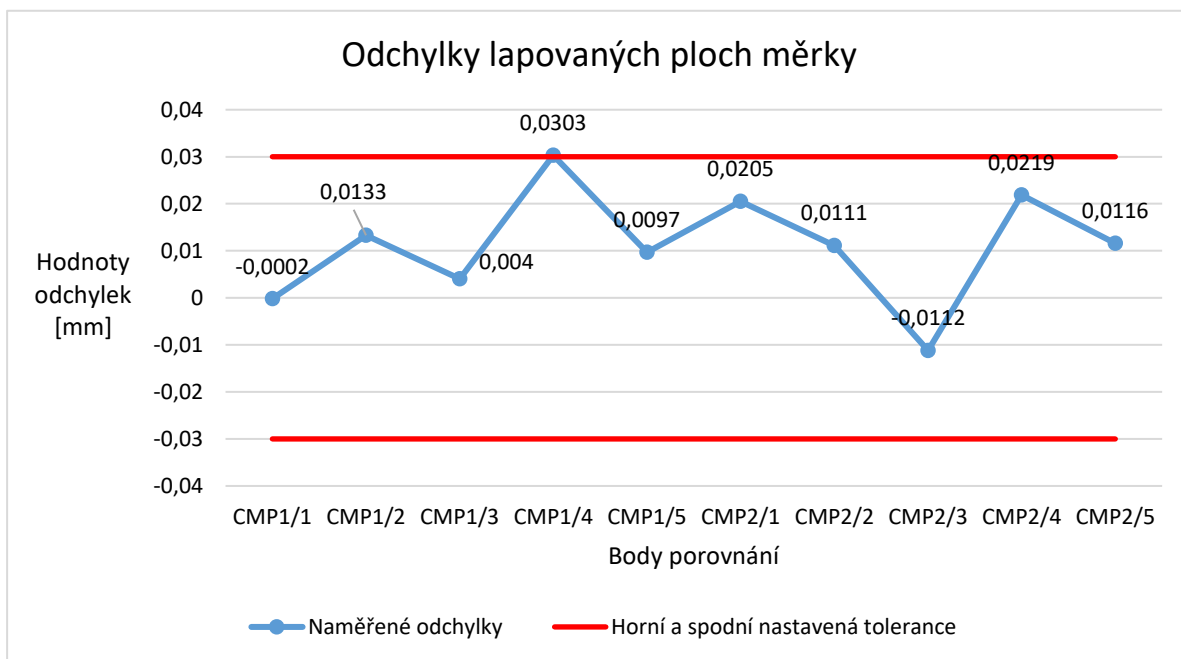
Nastavení skeneru č. 42



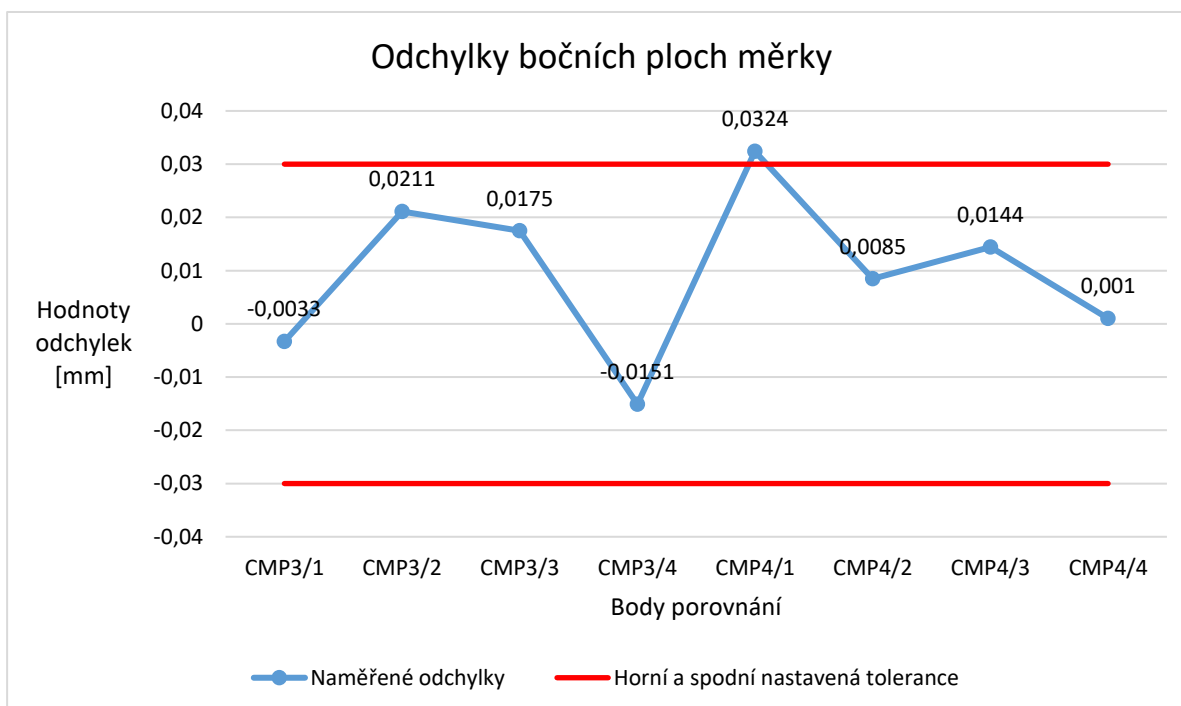
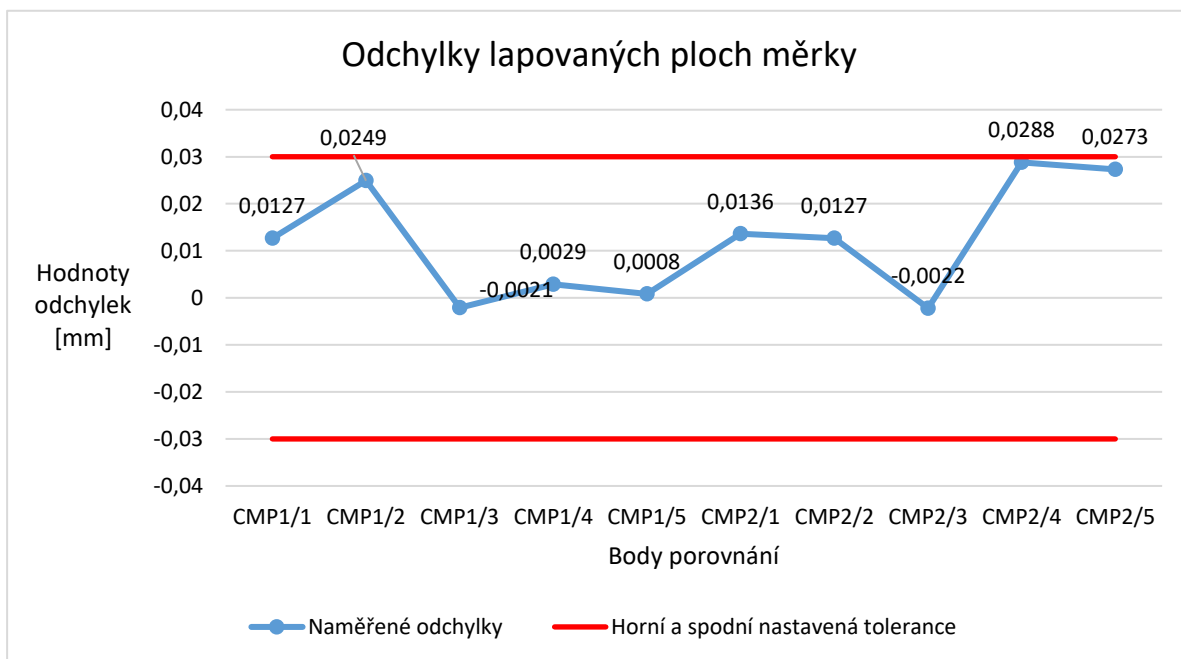
Nastavení skeneru č. 43



Nastavení skeneru č. 44



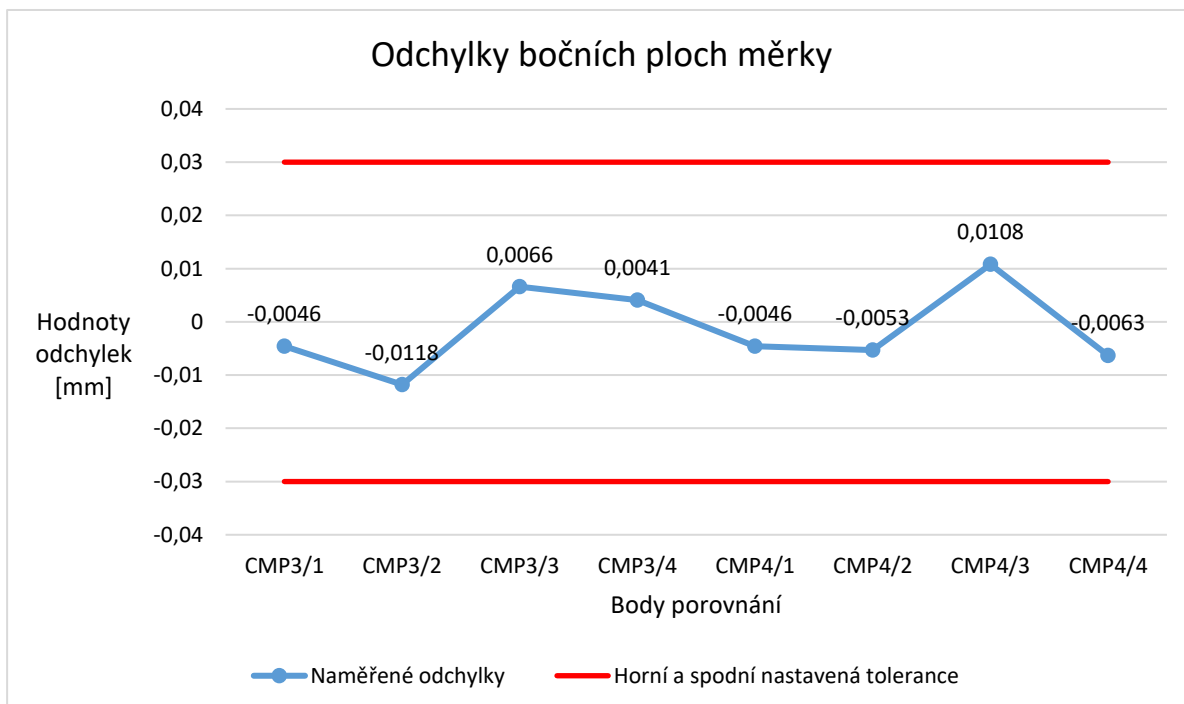
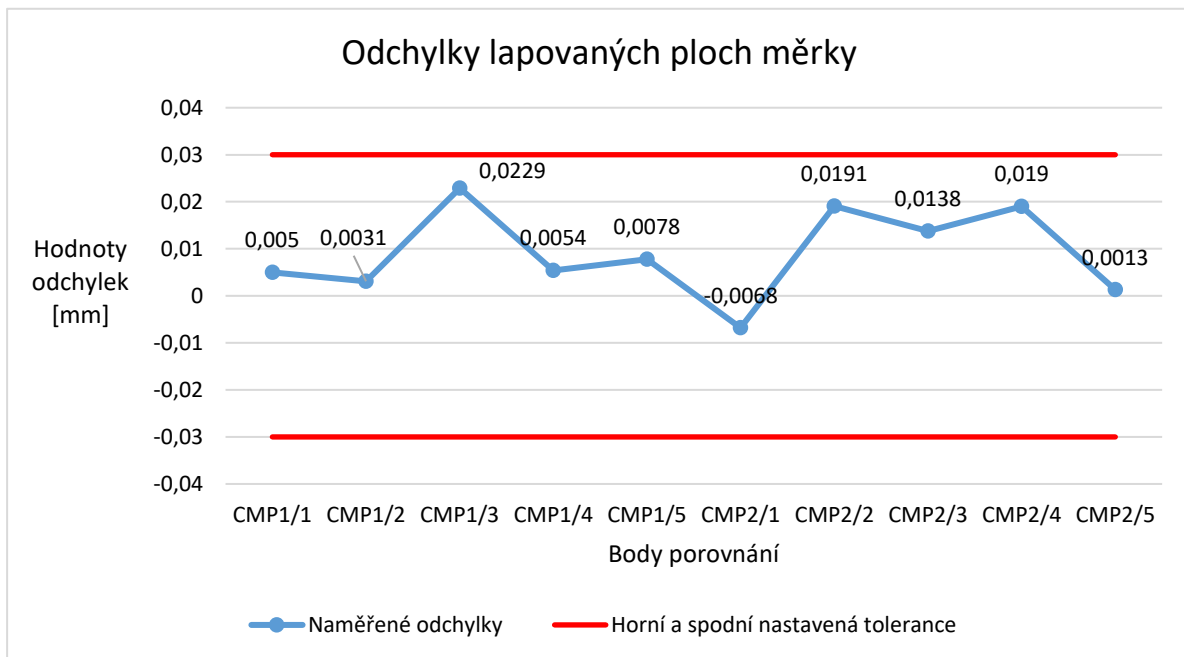
Nastavení skeneru č. 45



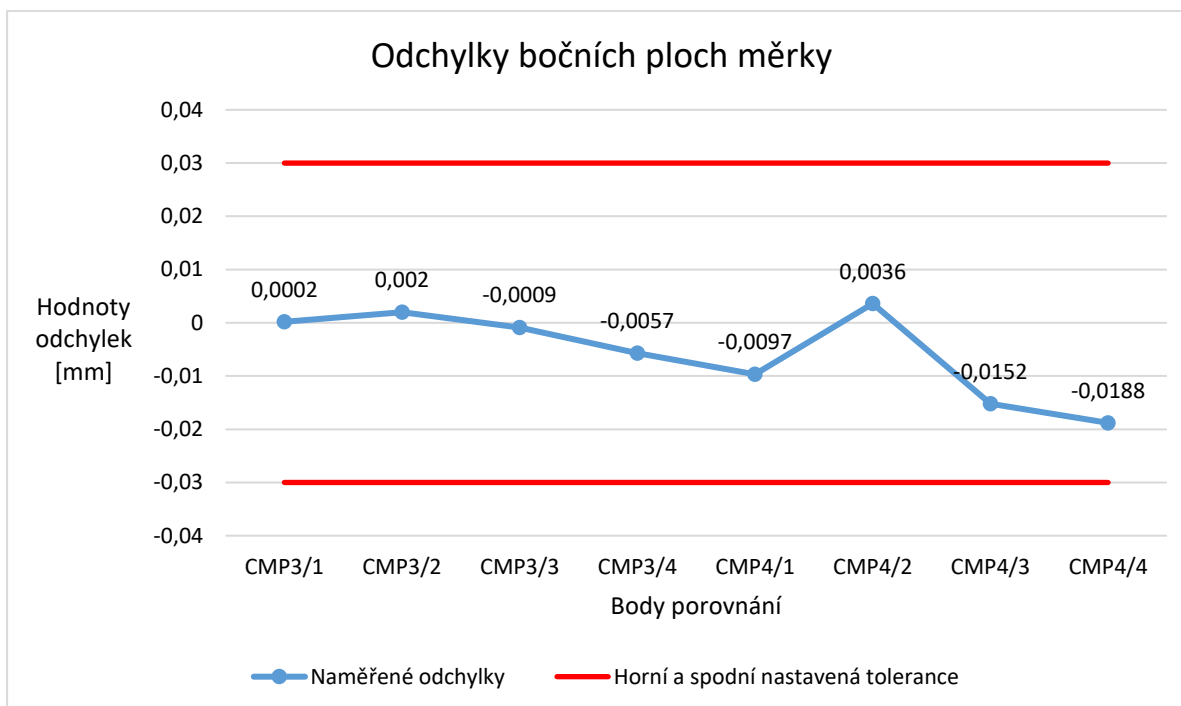
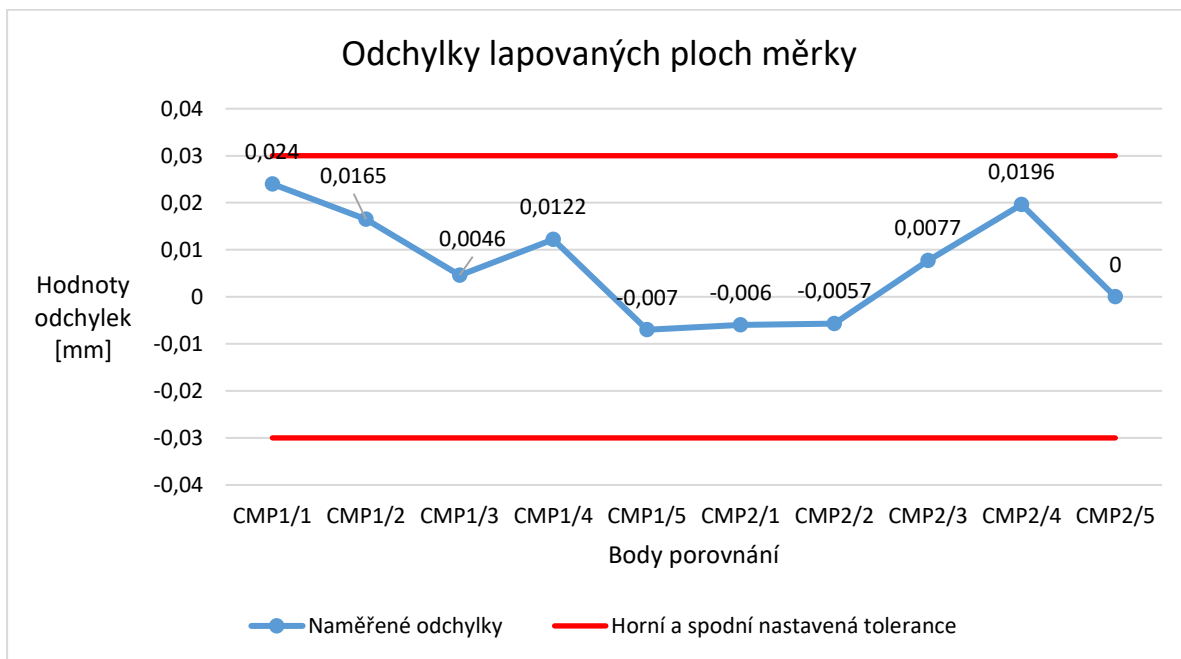
PŘÍLOHA č. 2

Sestavené grafy GSL bodů z protokolů o měření

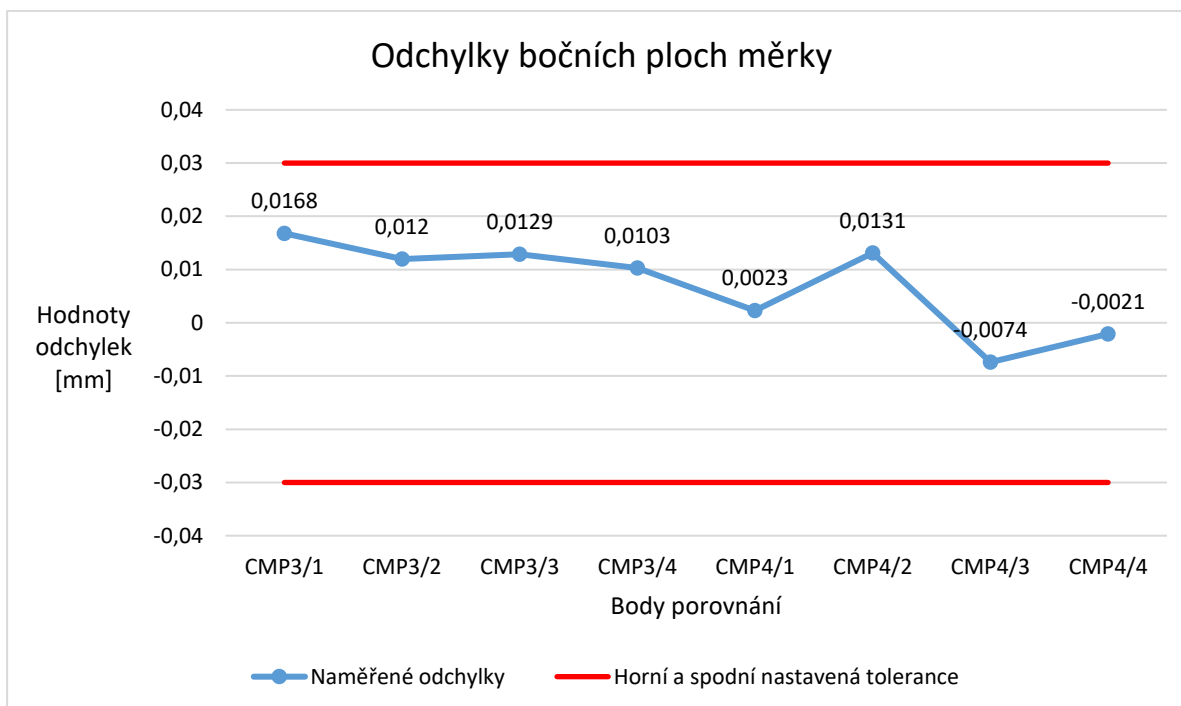
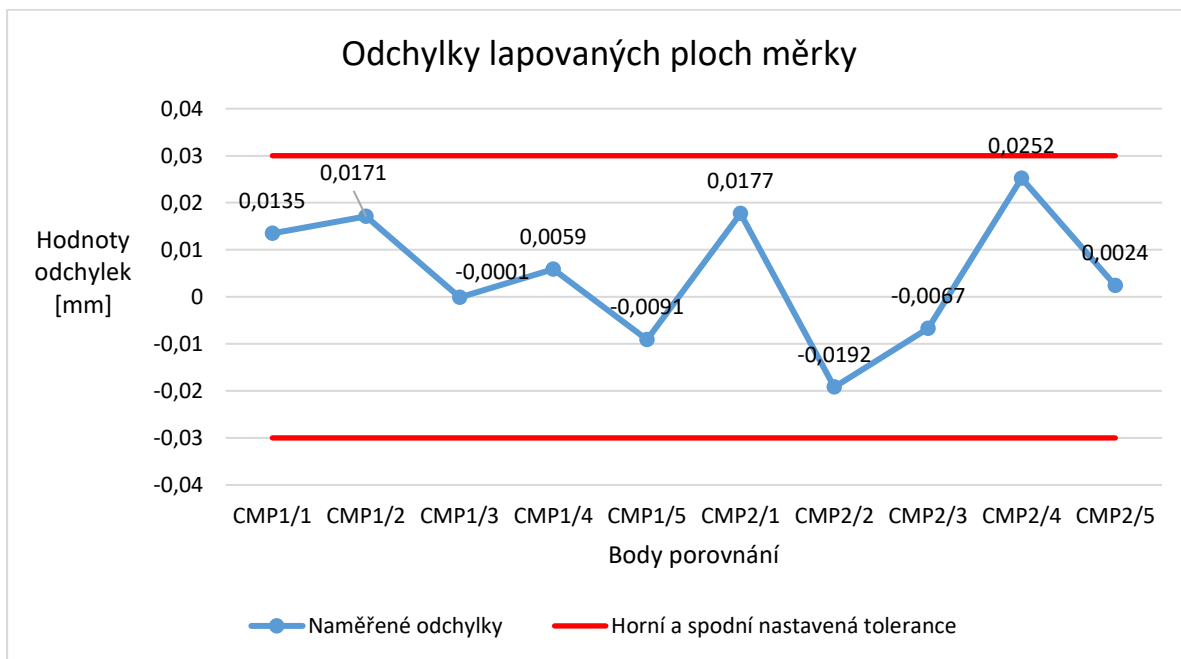
Nastavení skeneru č. 4



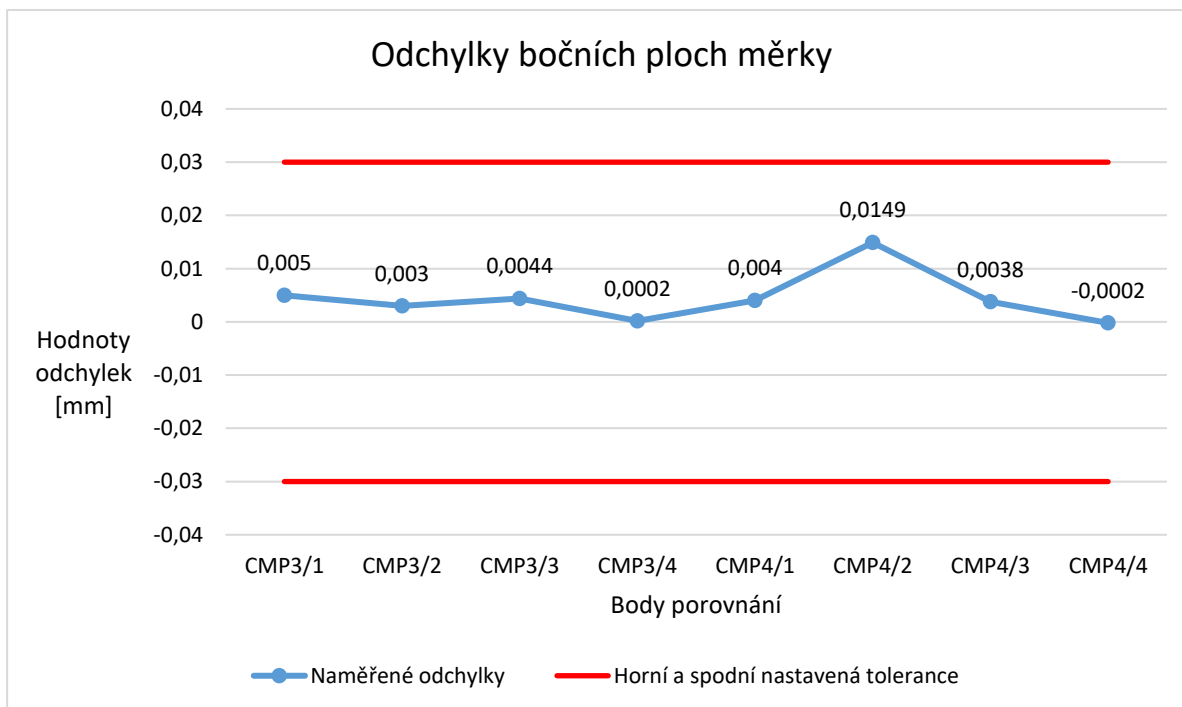
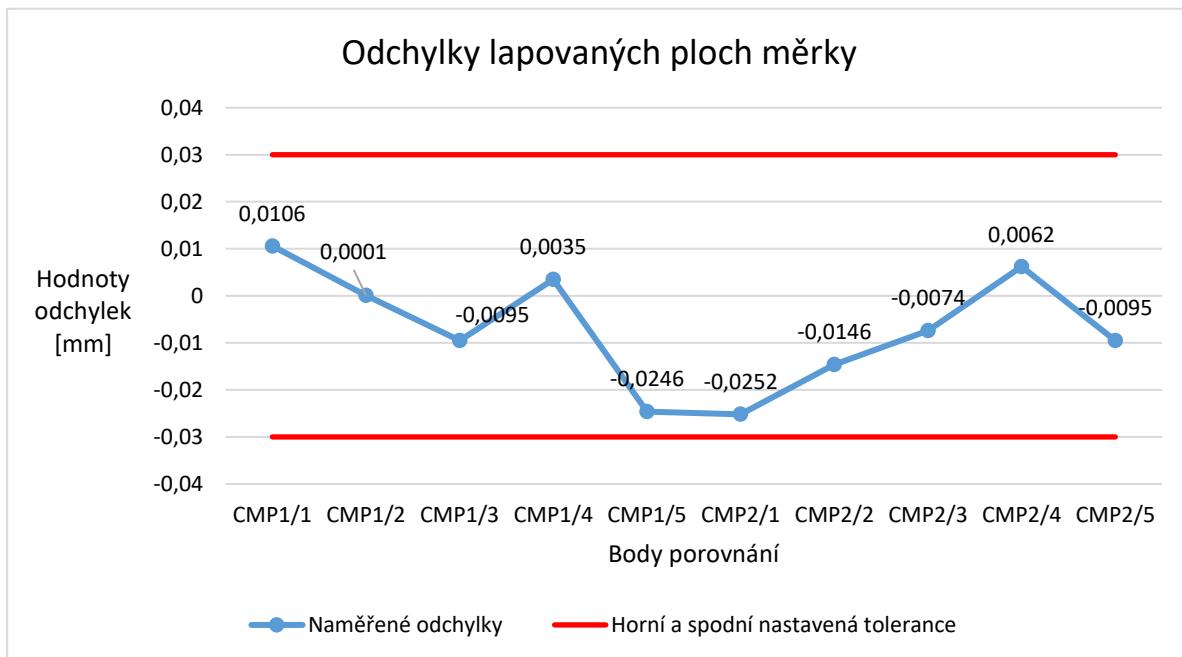
Nastavení skeneru č. 5



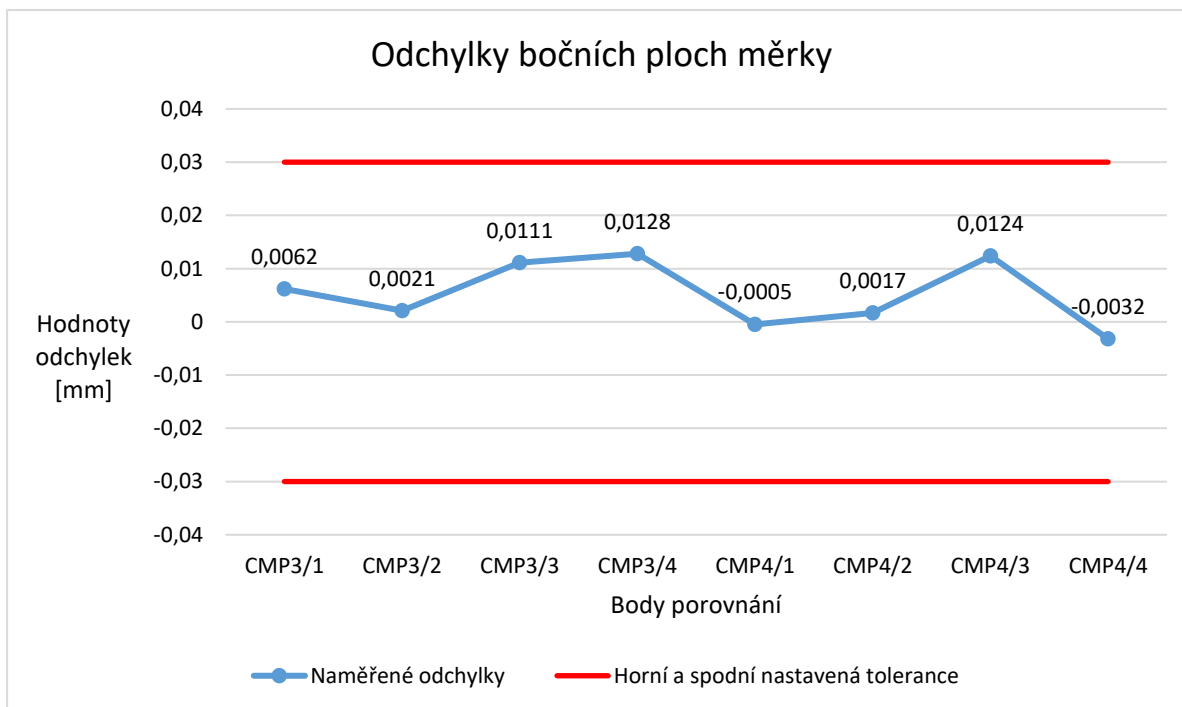
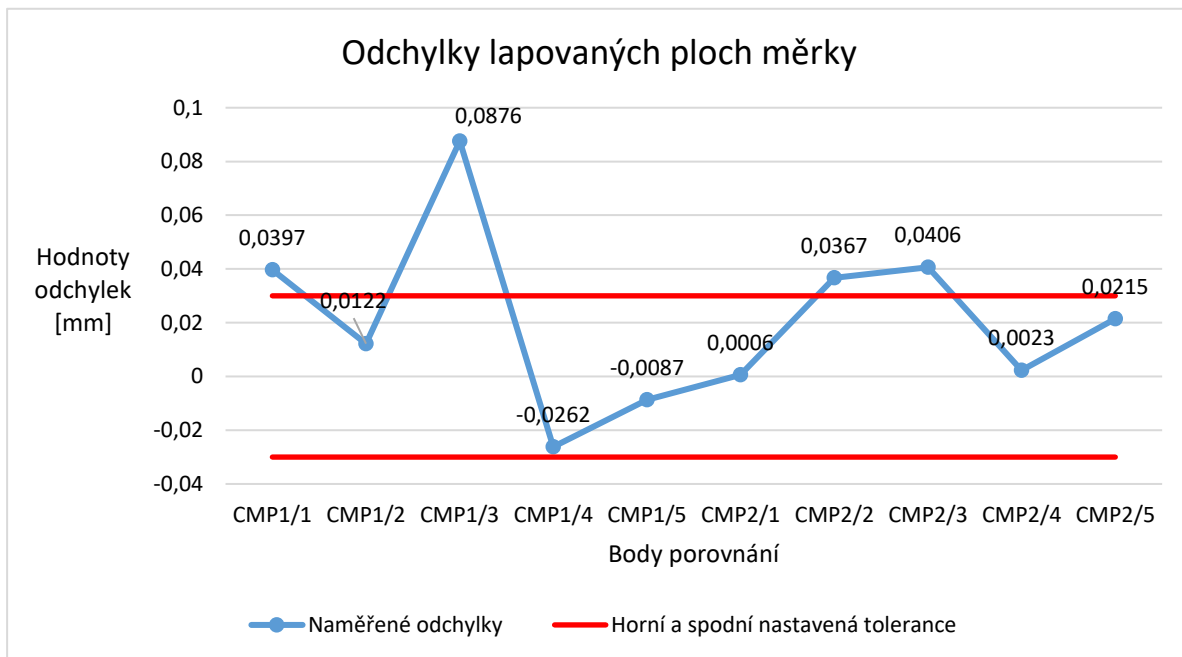
Nastavení skeneru č. 18



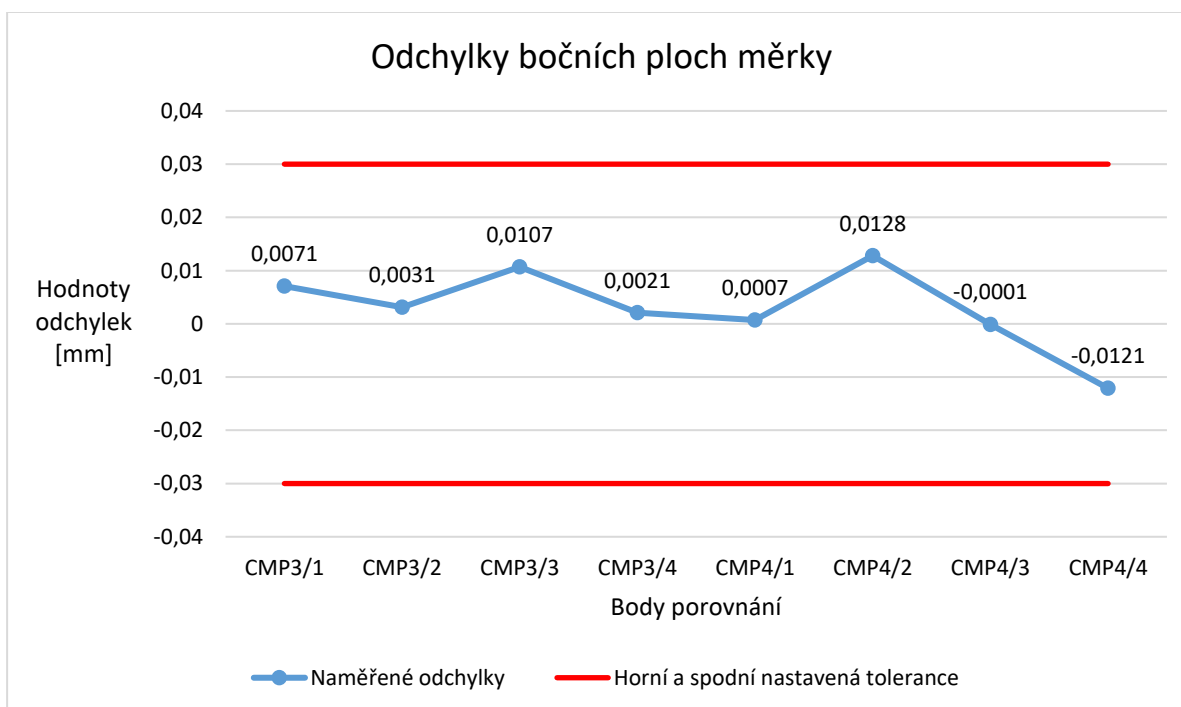
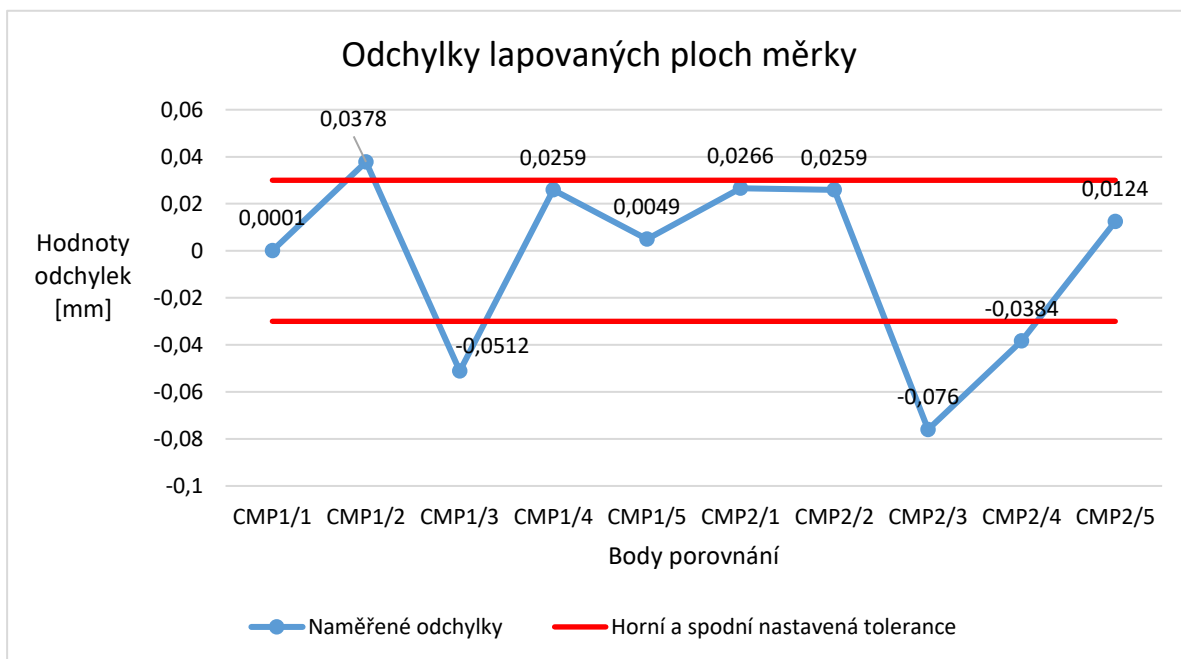
Nastavení skeneru č. 19



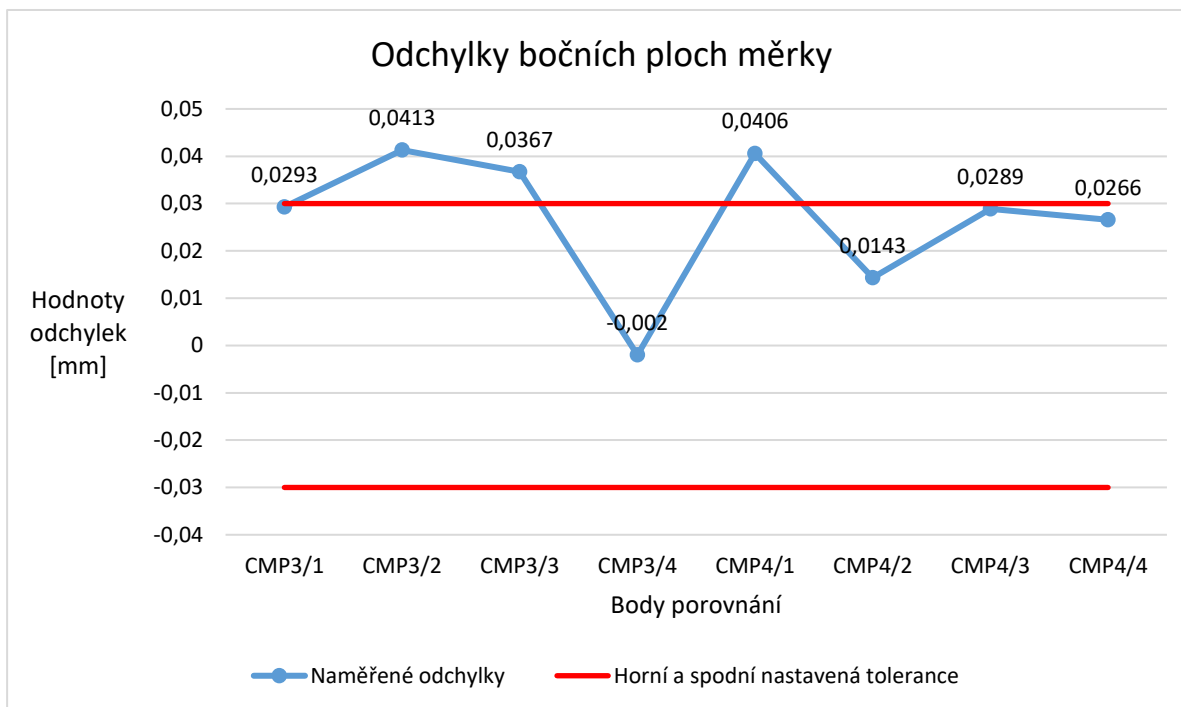
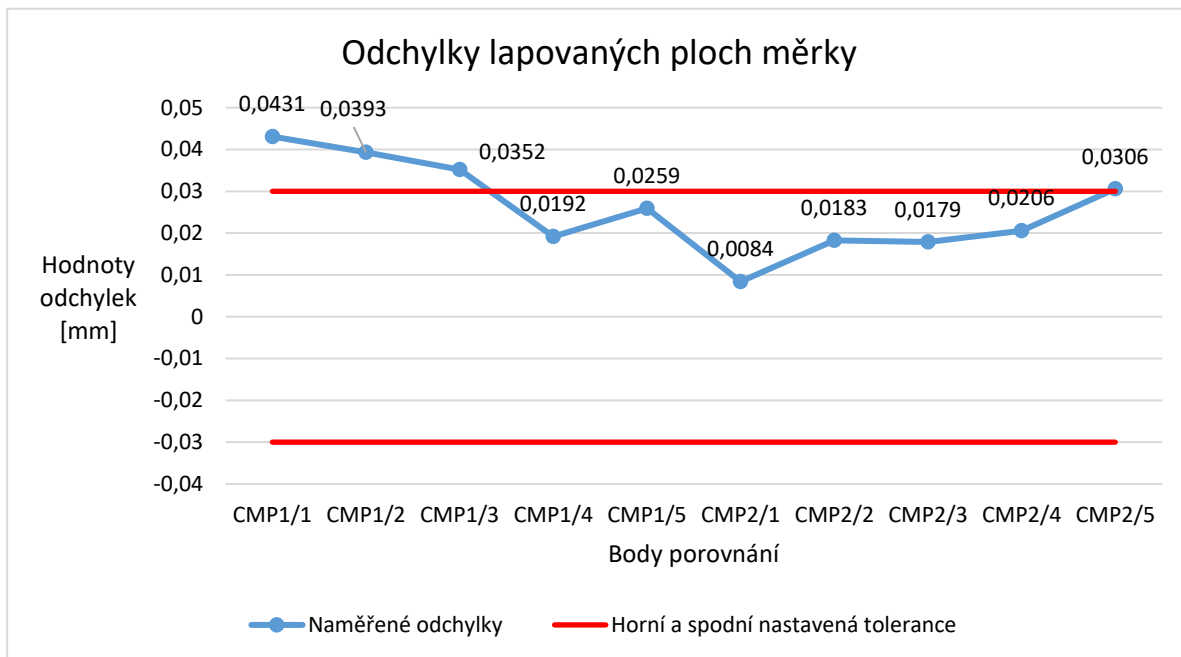
Nastavení skeneru č. 20



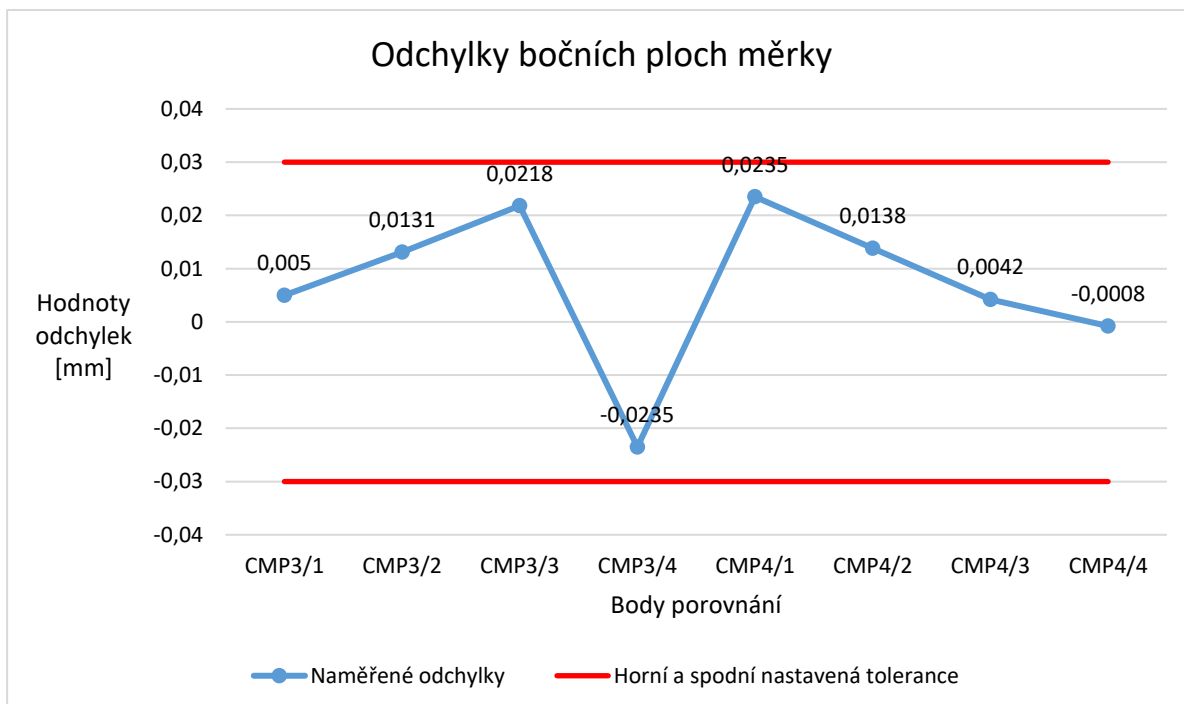
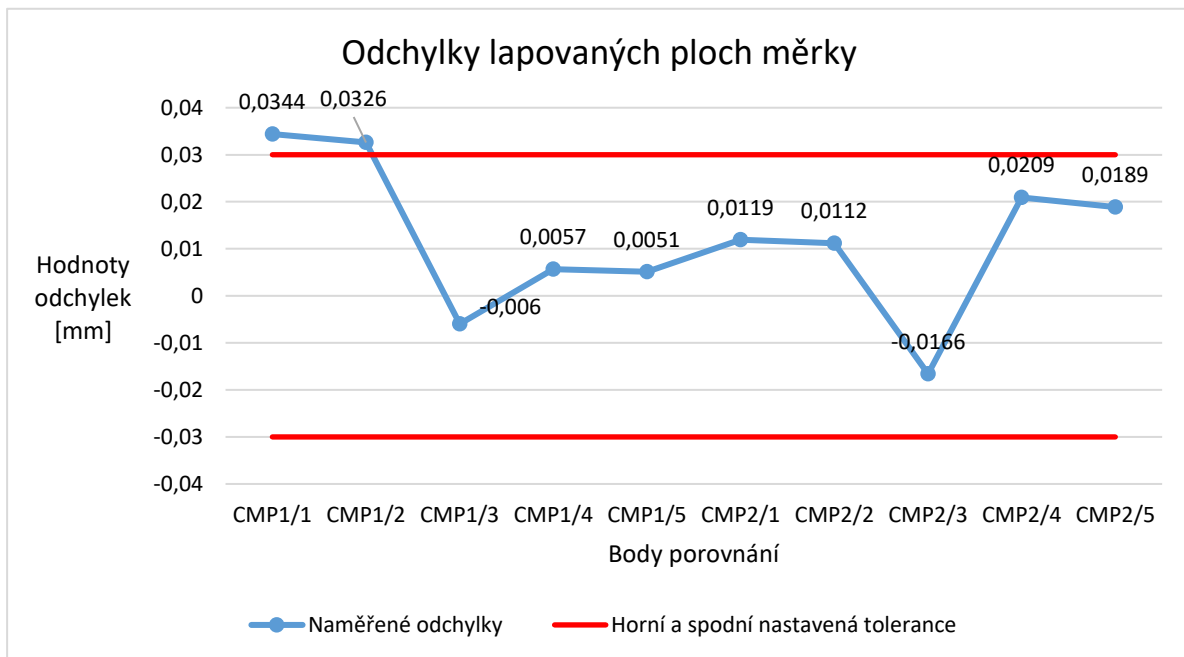
Nastavení skeneru č. 21



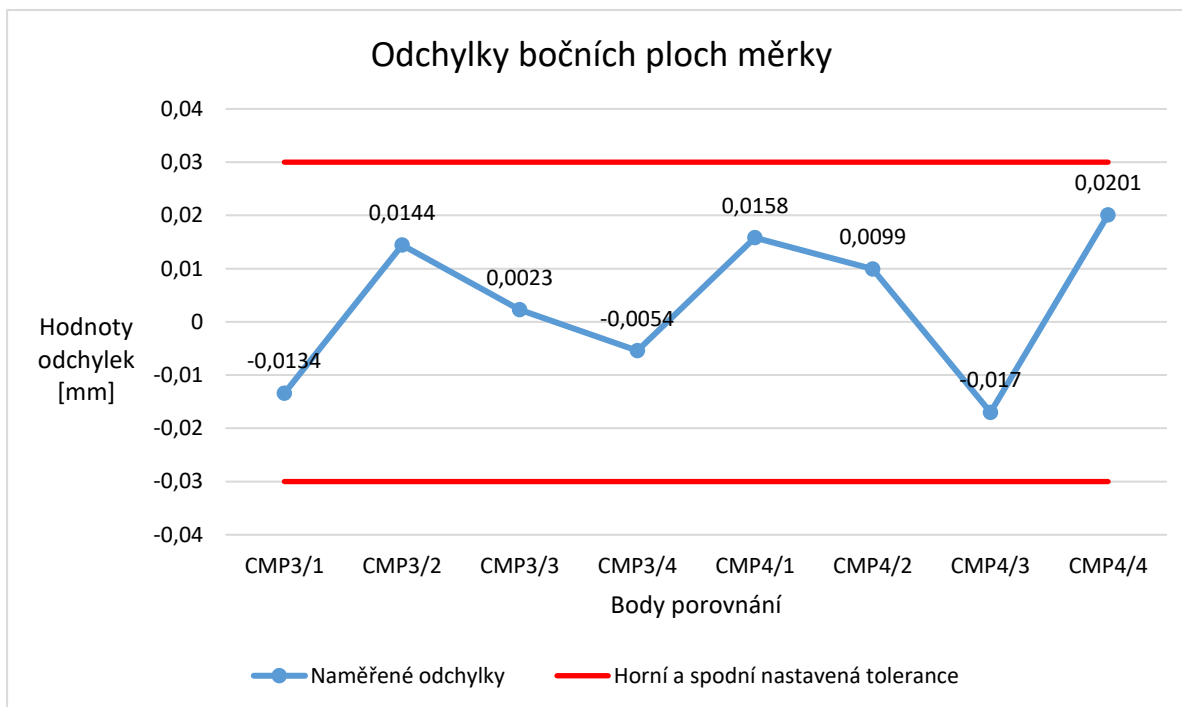
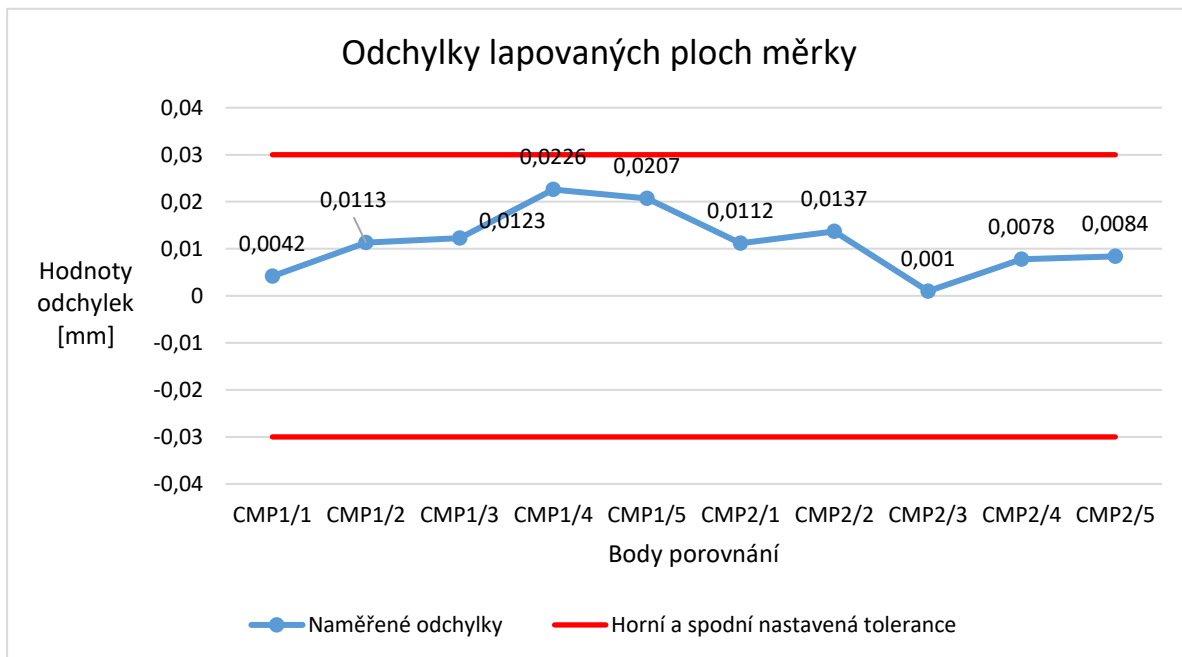
Nastavení skeneru č. 31



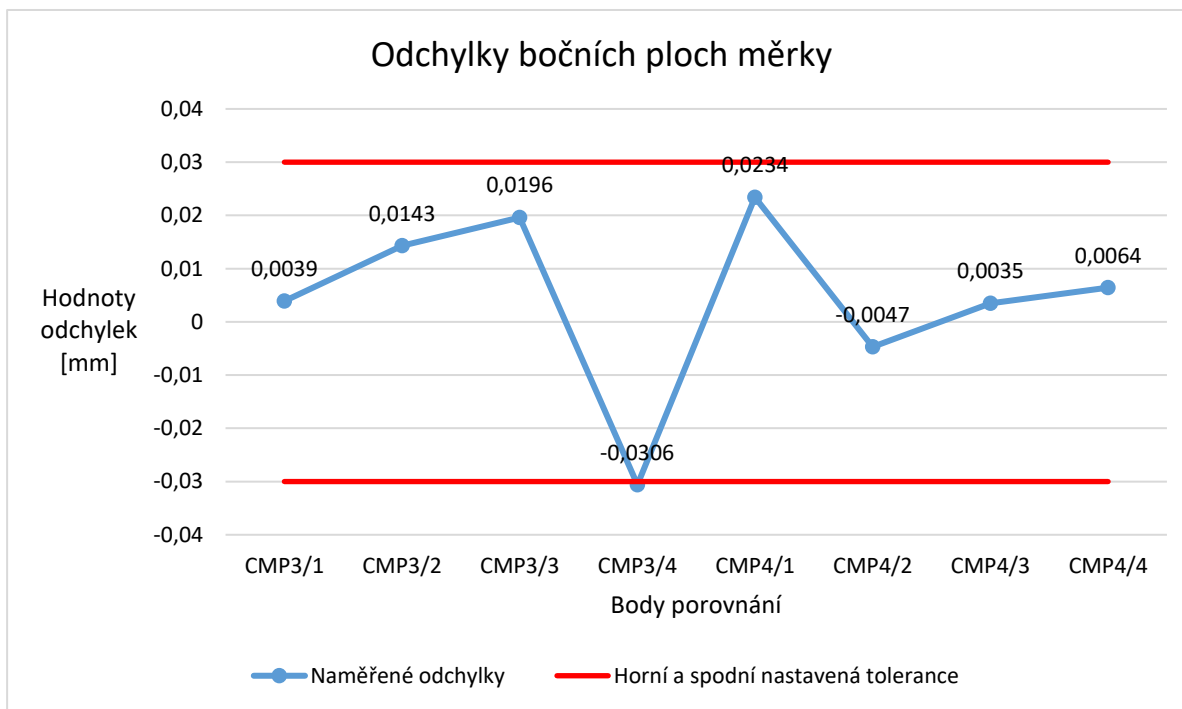
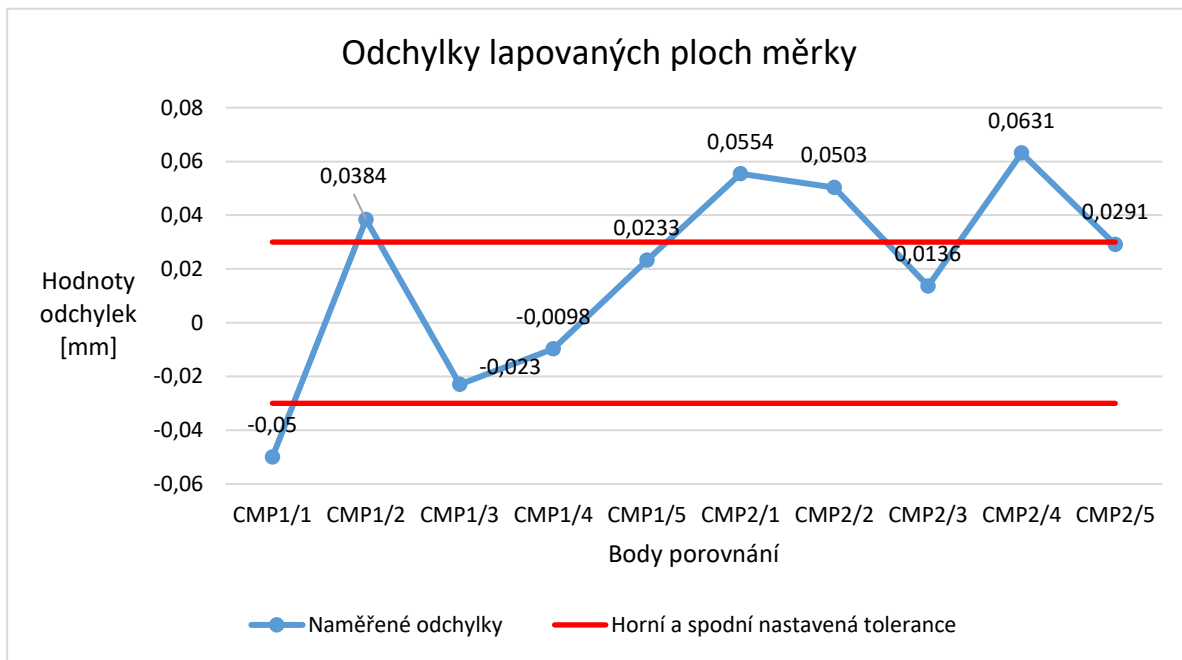
Nastavení skeneru č. 32



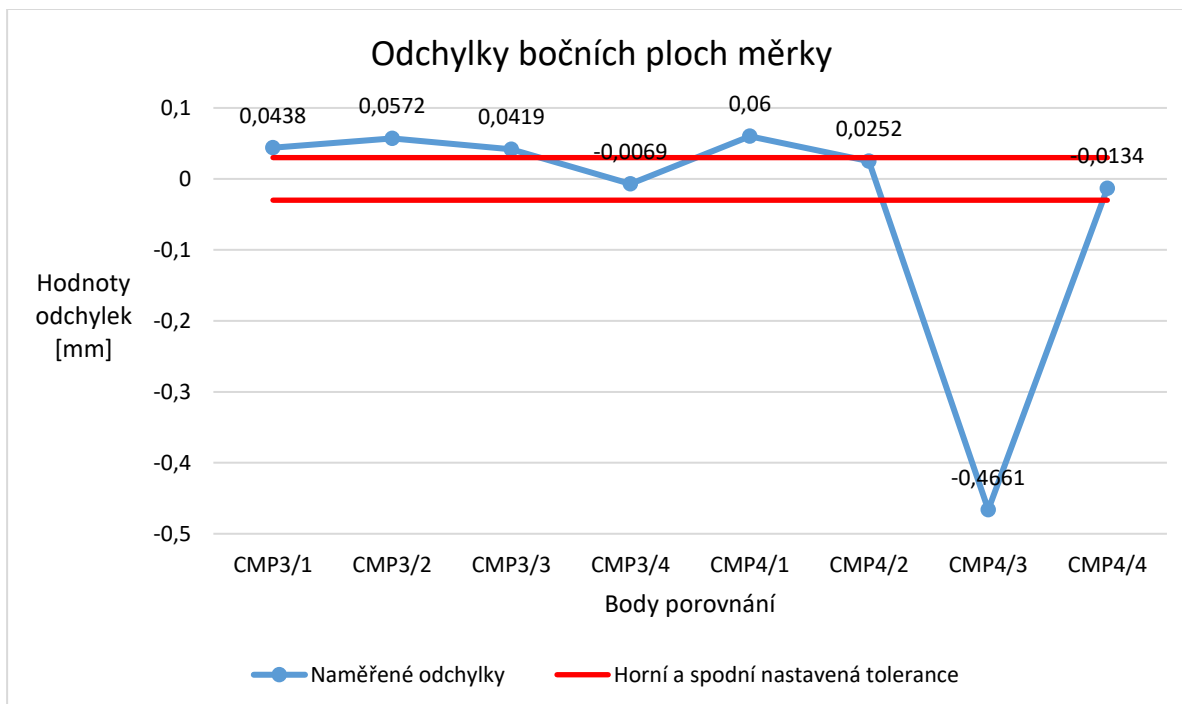
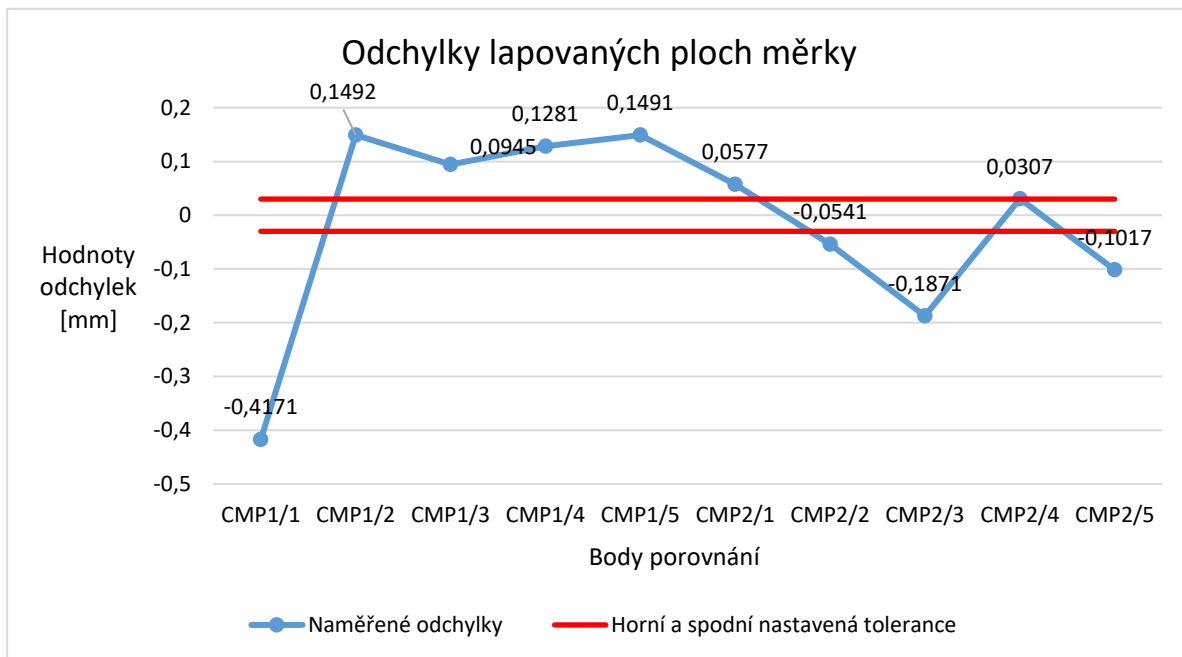
Nastavení skeneru č. 33



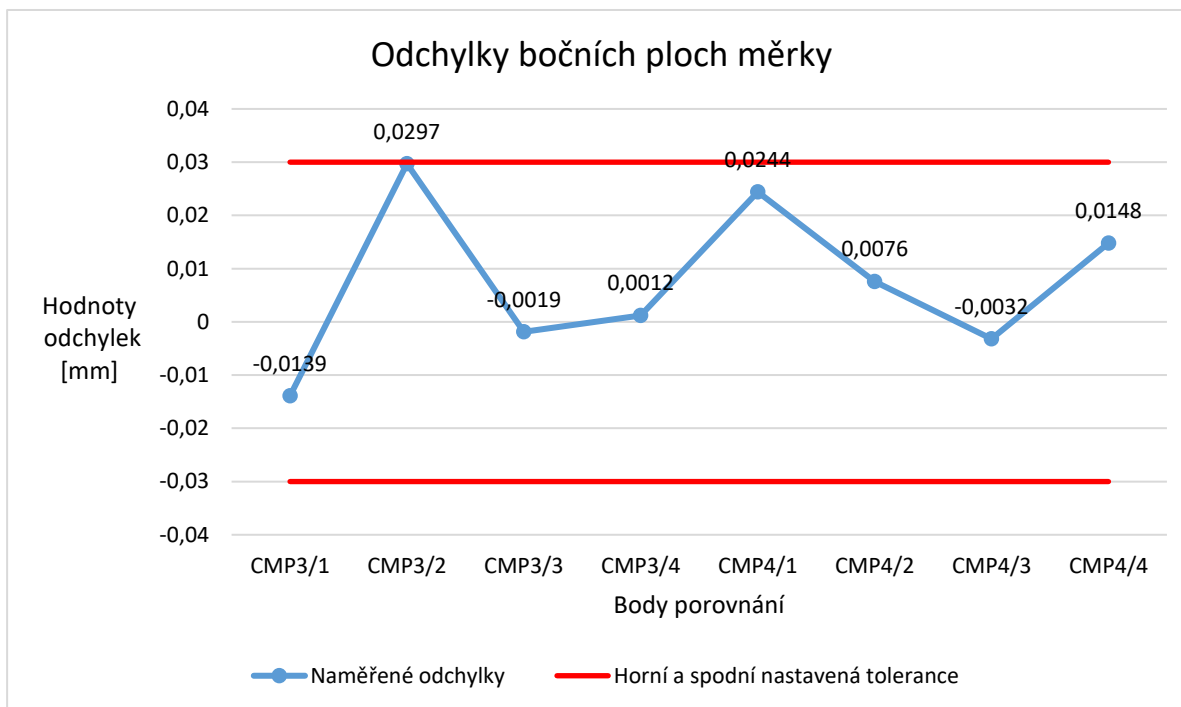
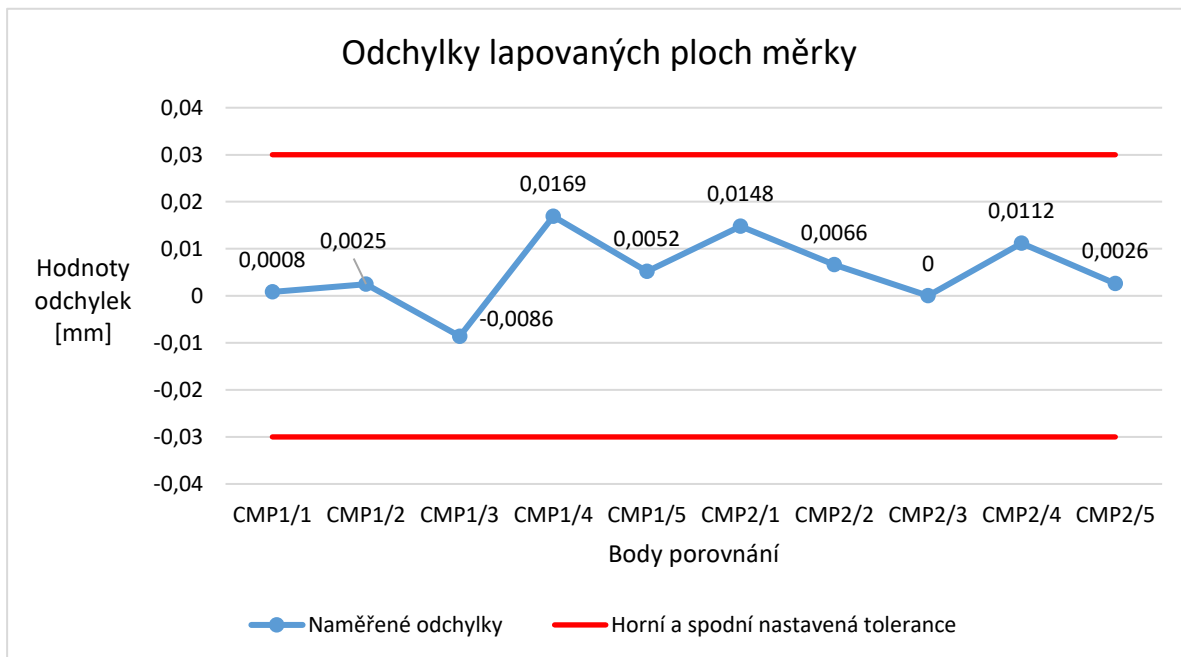
Nastavení skeneru č. 34



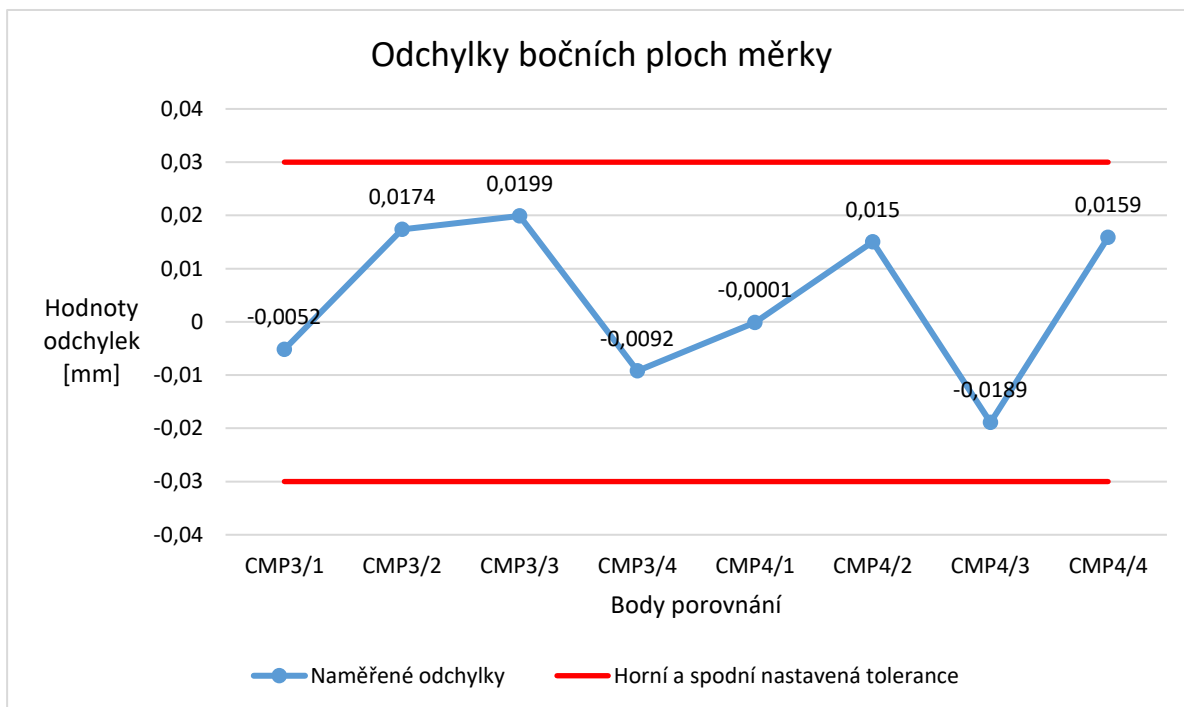
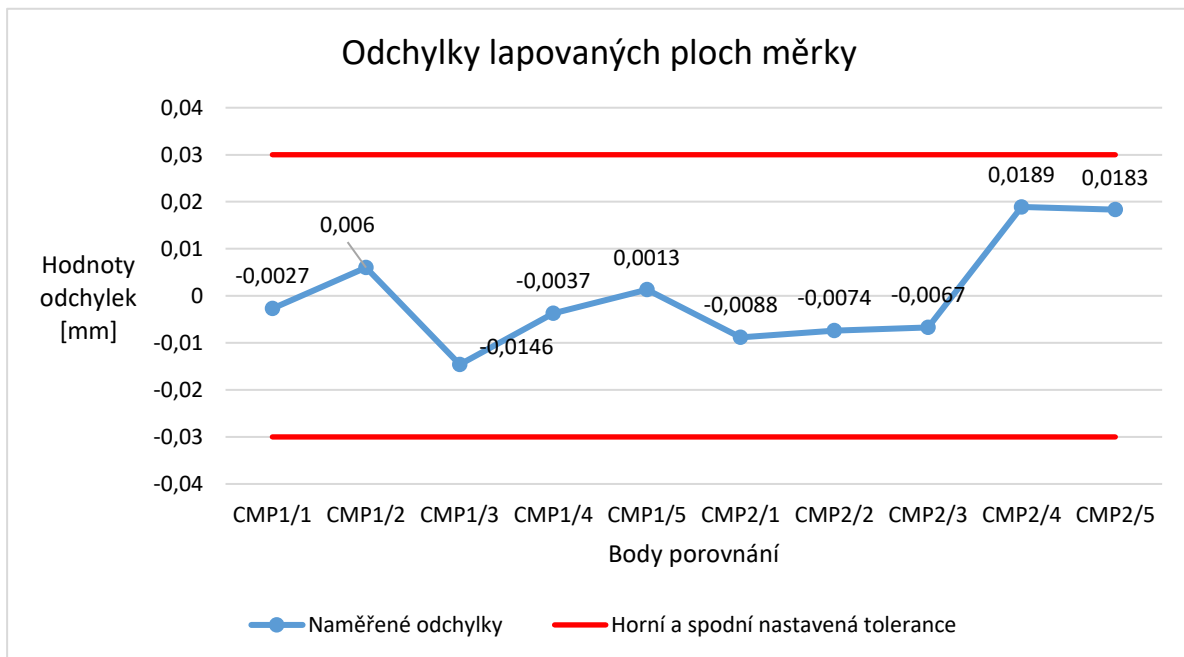
Nastavení skeneru č. 35



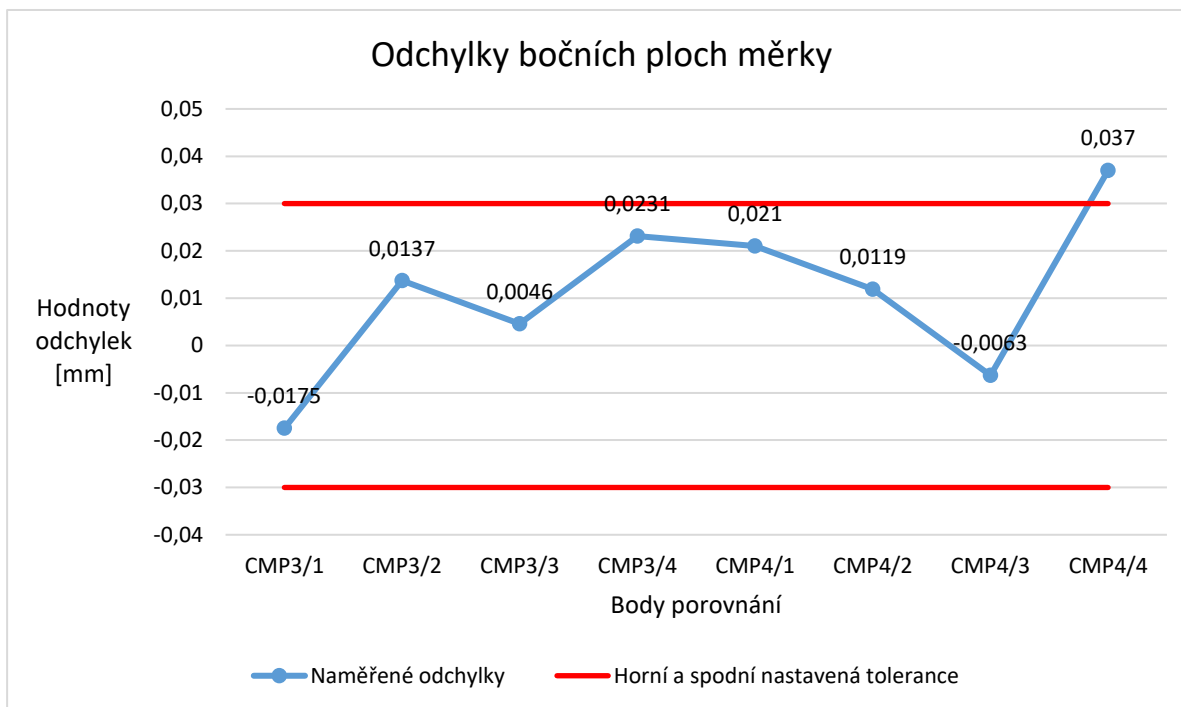
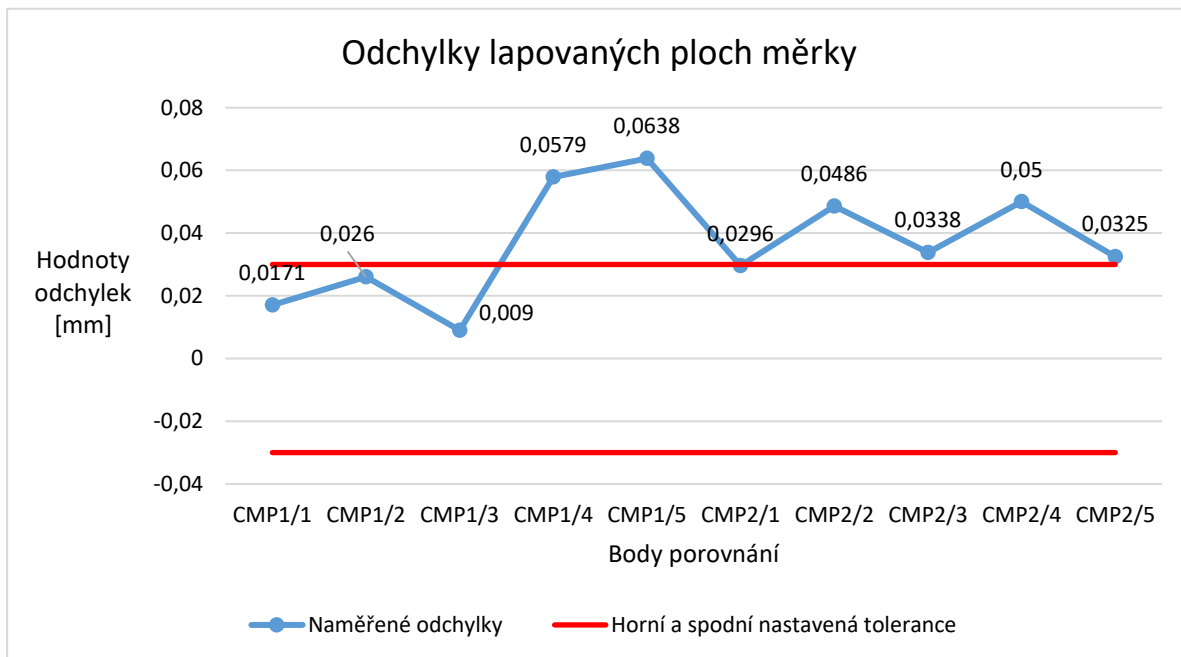
Nastavení skeneru č. 46



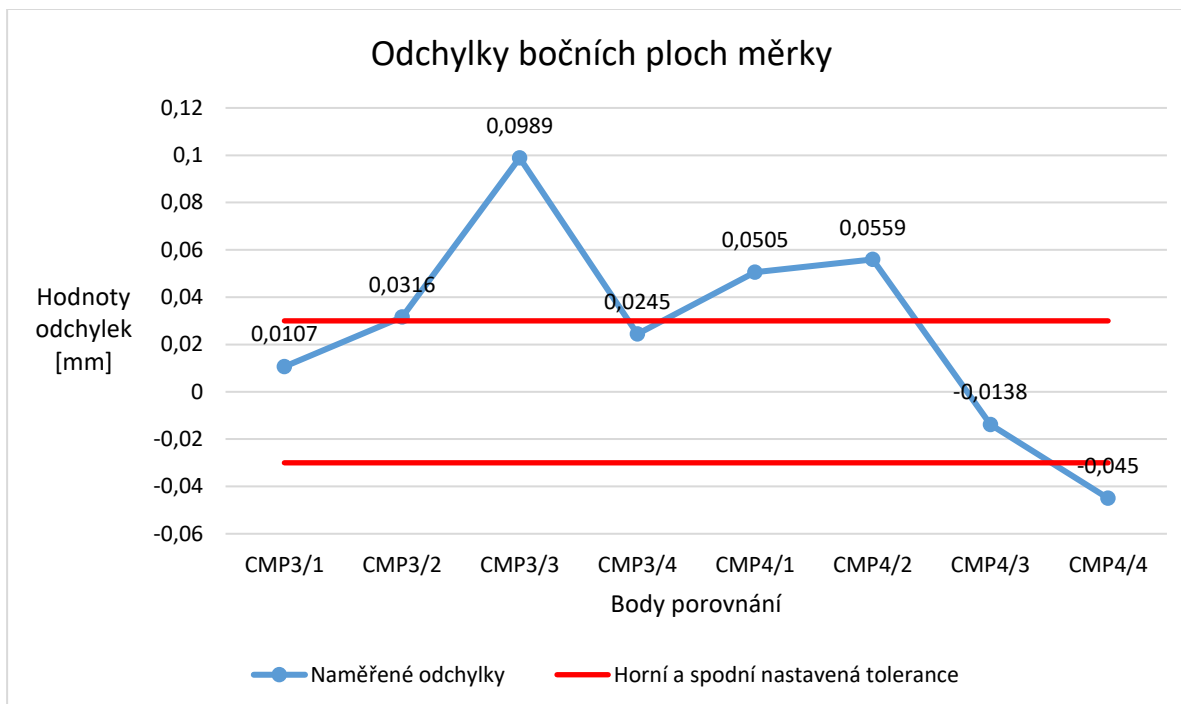
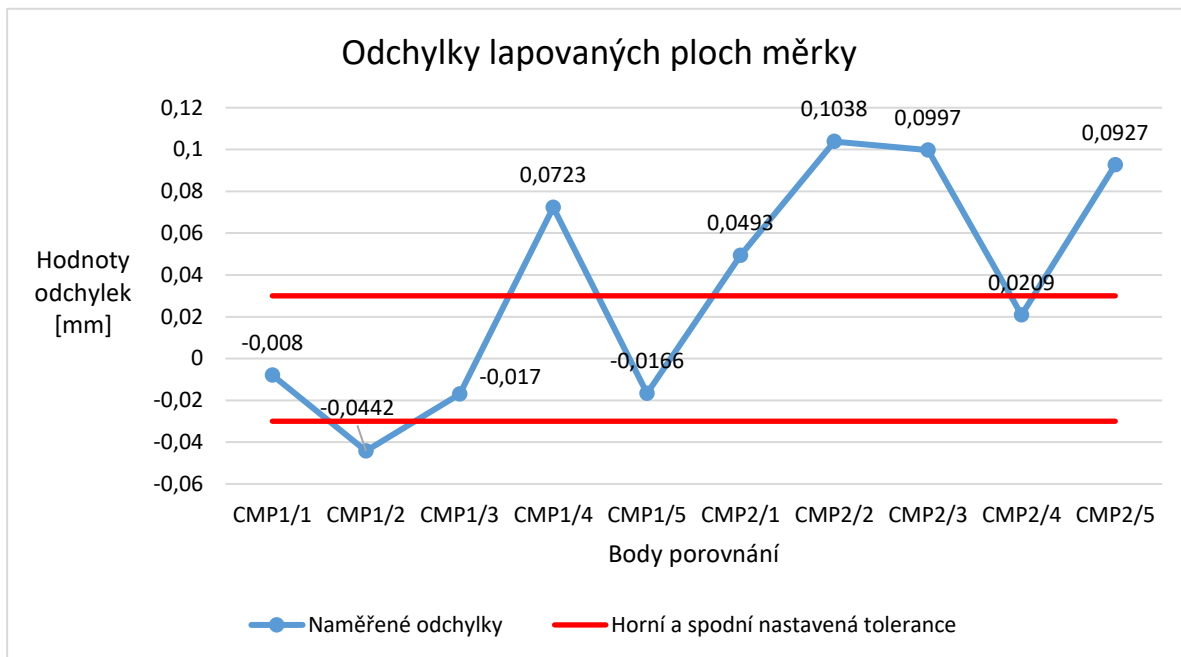
Nastavení skeneru č. 47



Nastavení skeneru č. 48



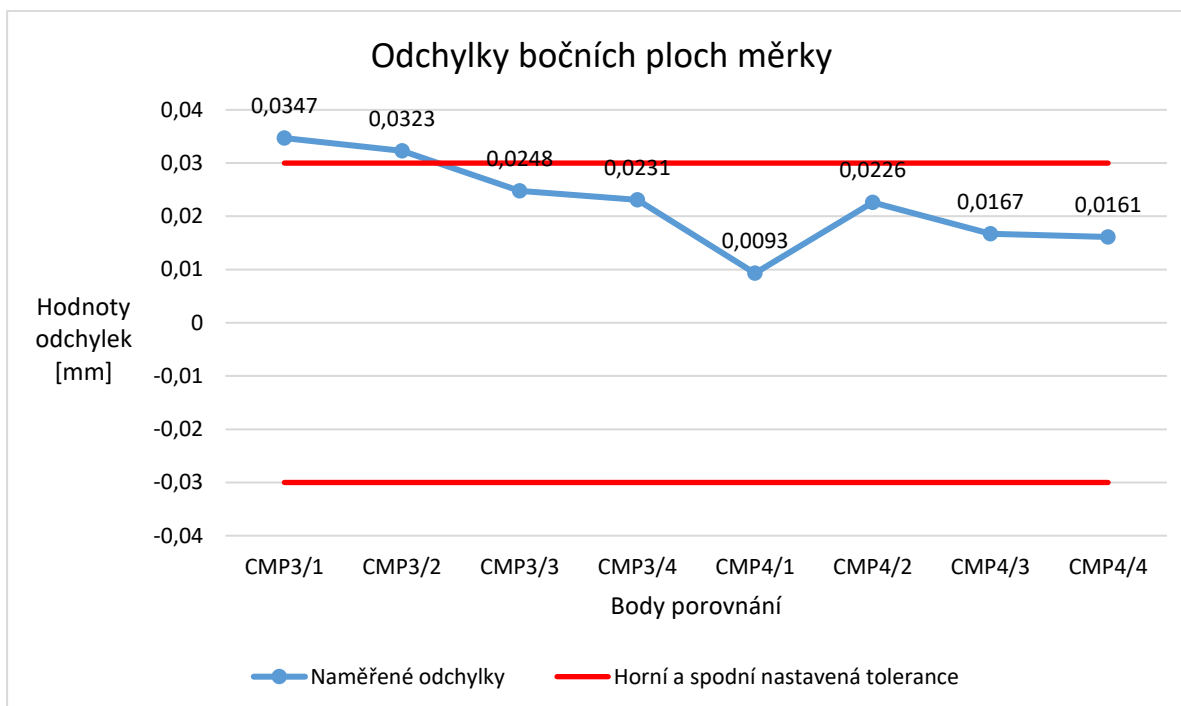
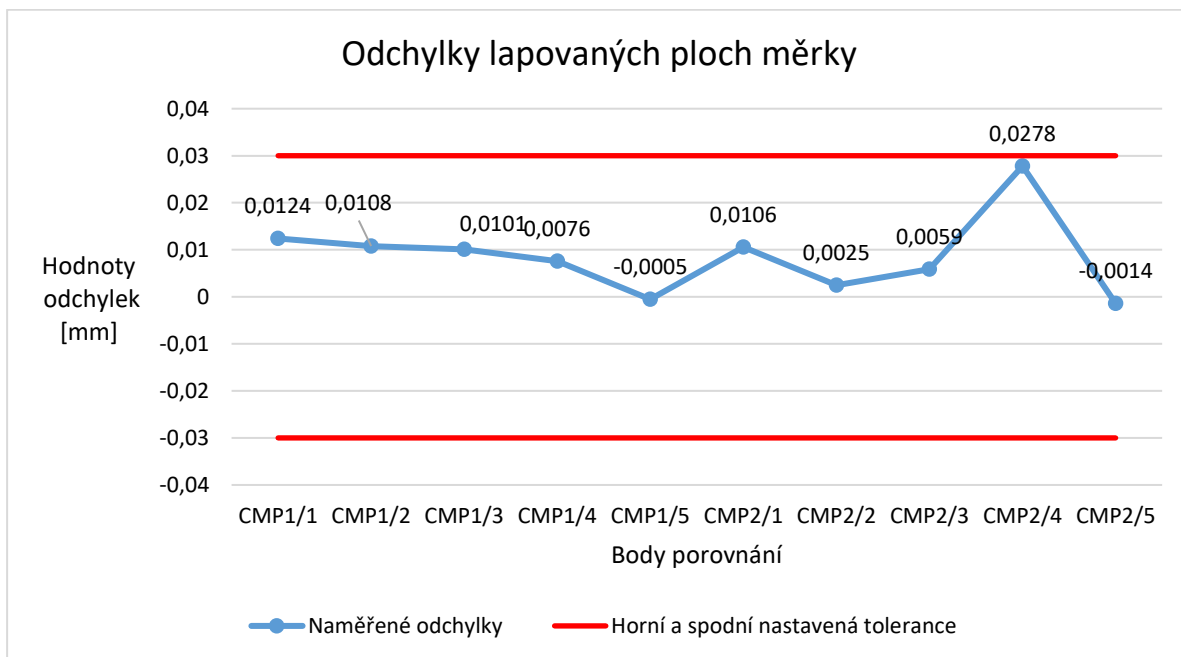
Nastavení skeneru č. 49



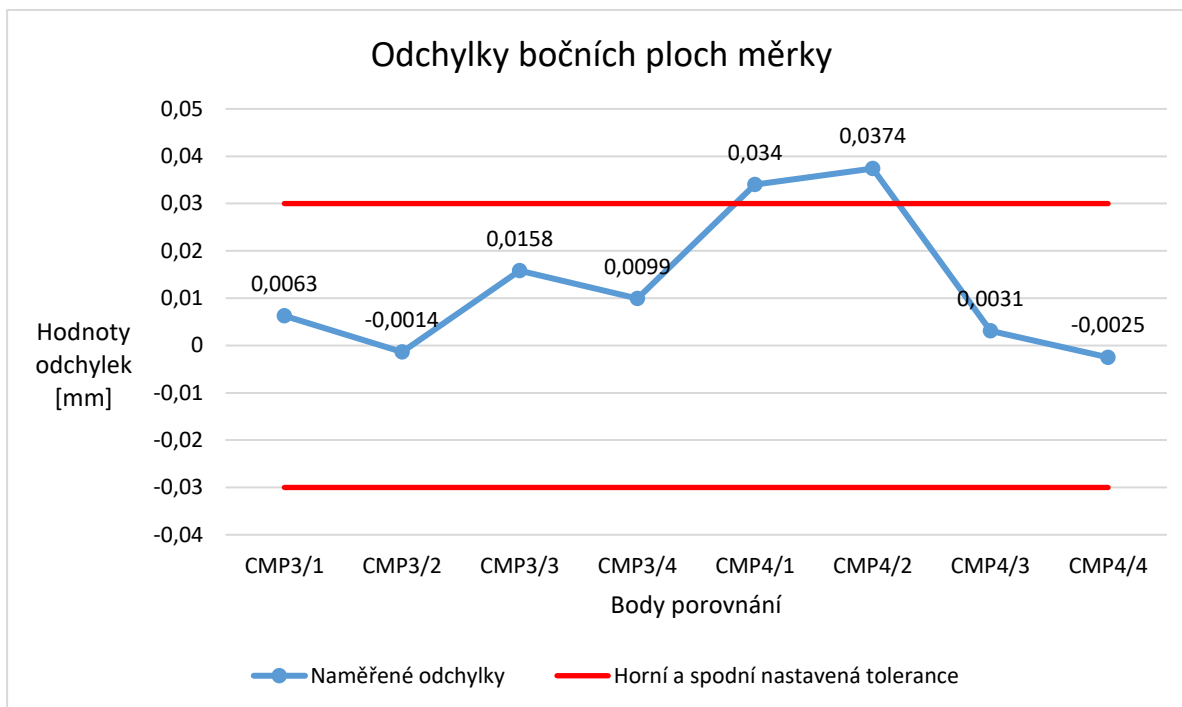
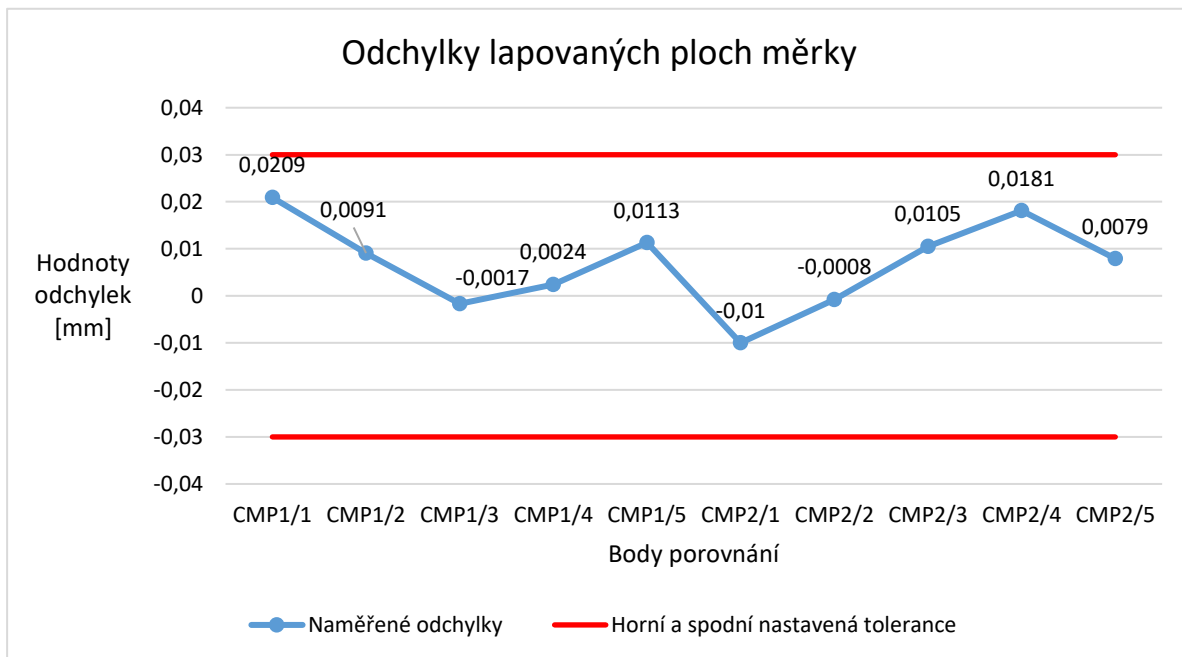
PŘÍLOHA č. 3

Sestavené grafy QSP bodů z protokolů o měření

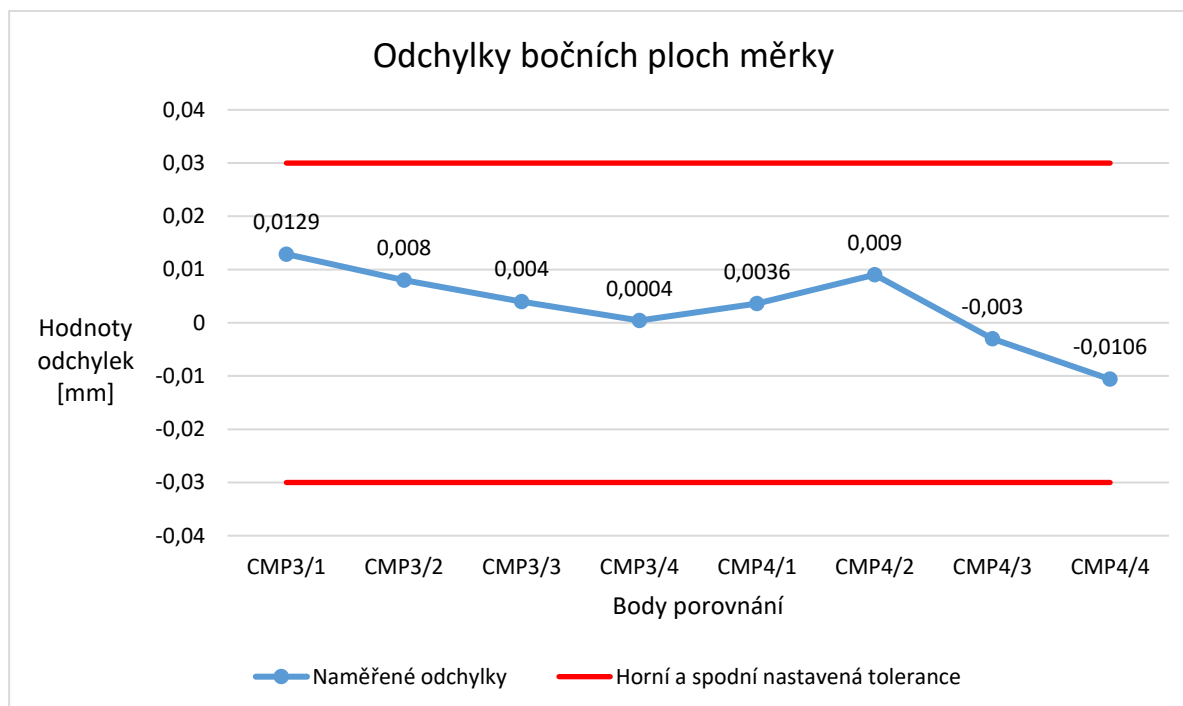
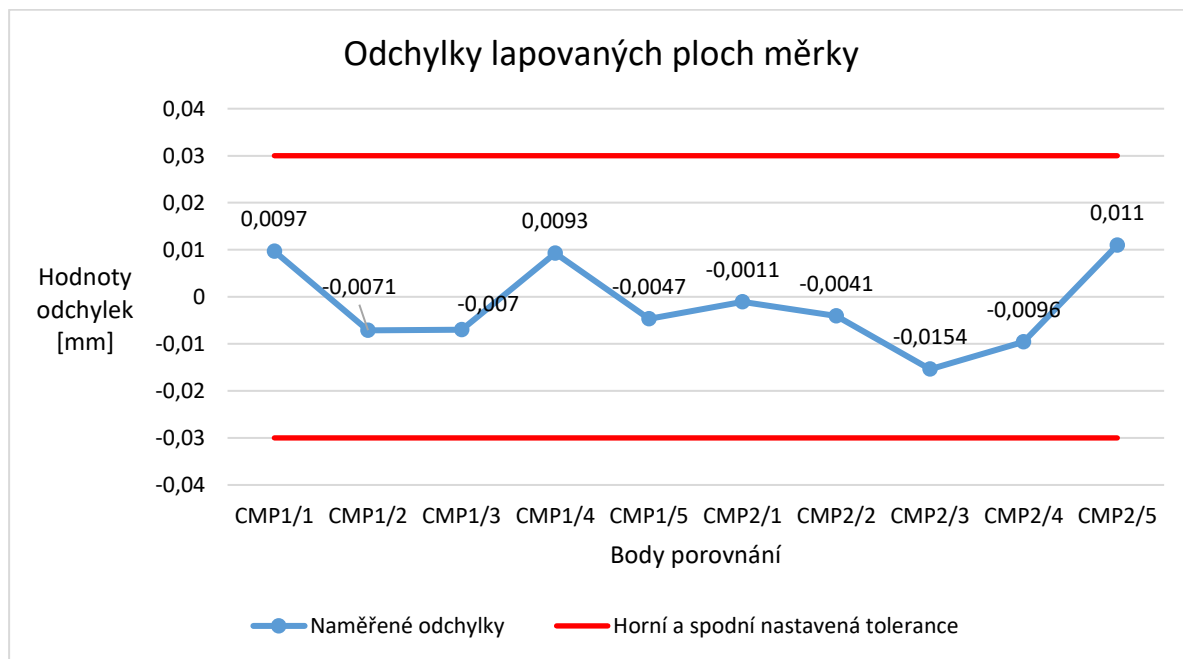
Nastavení skeneru č. 9



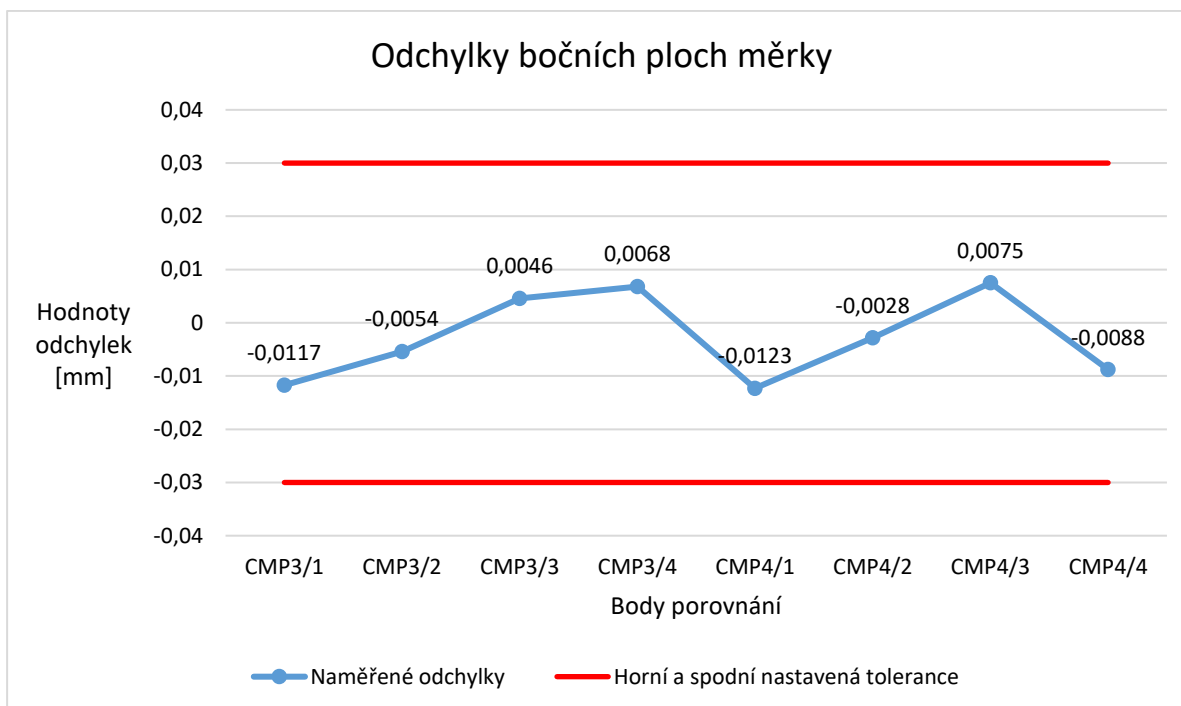
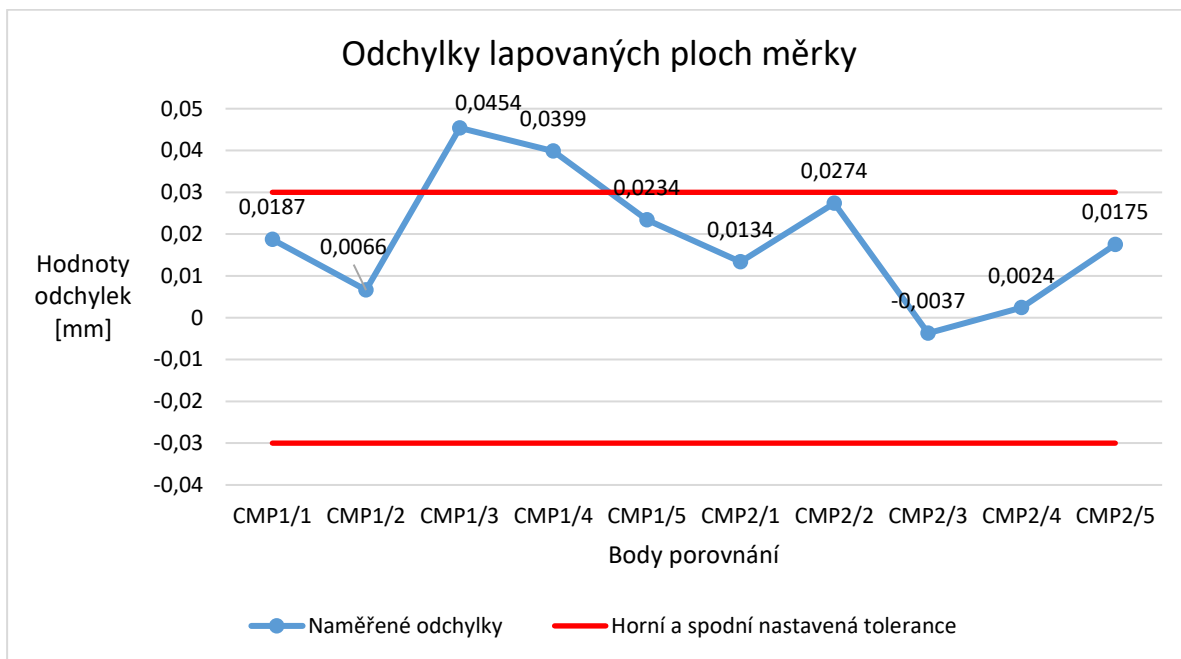
Nastavení skeneru č. 10



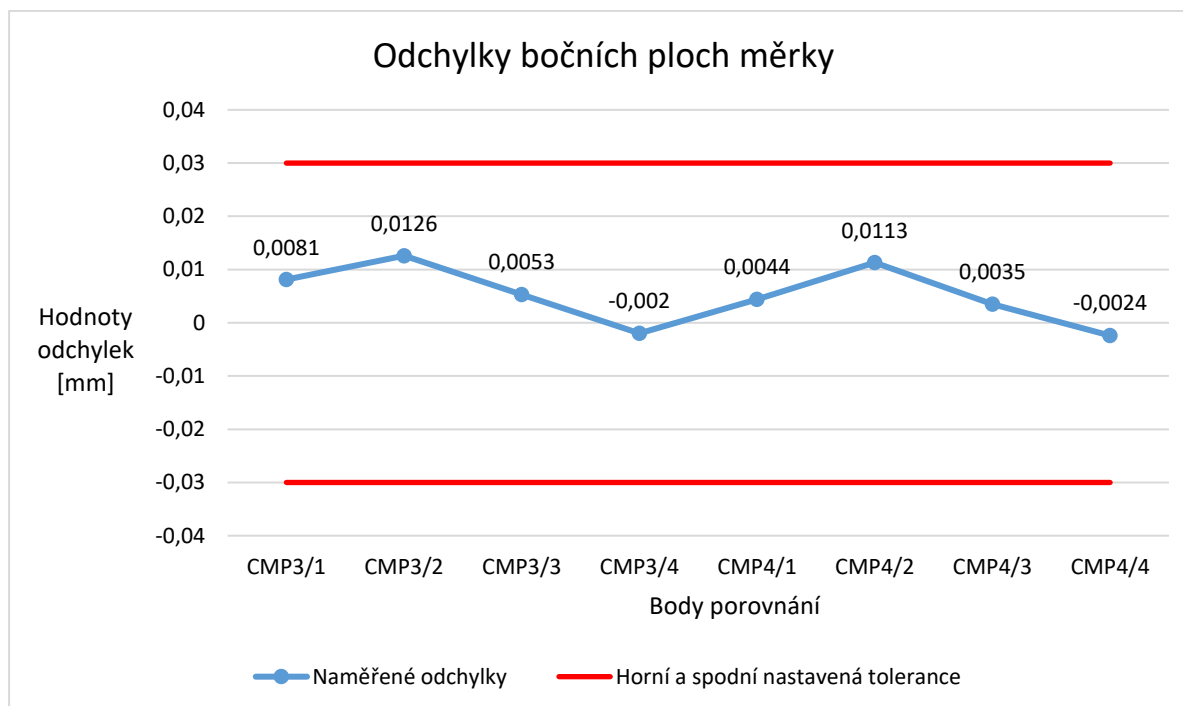
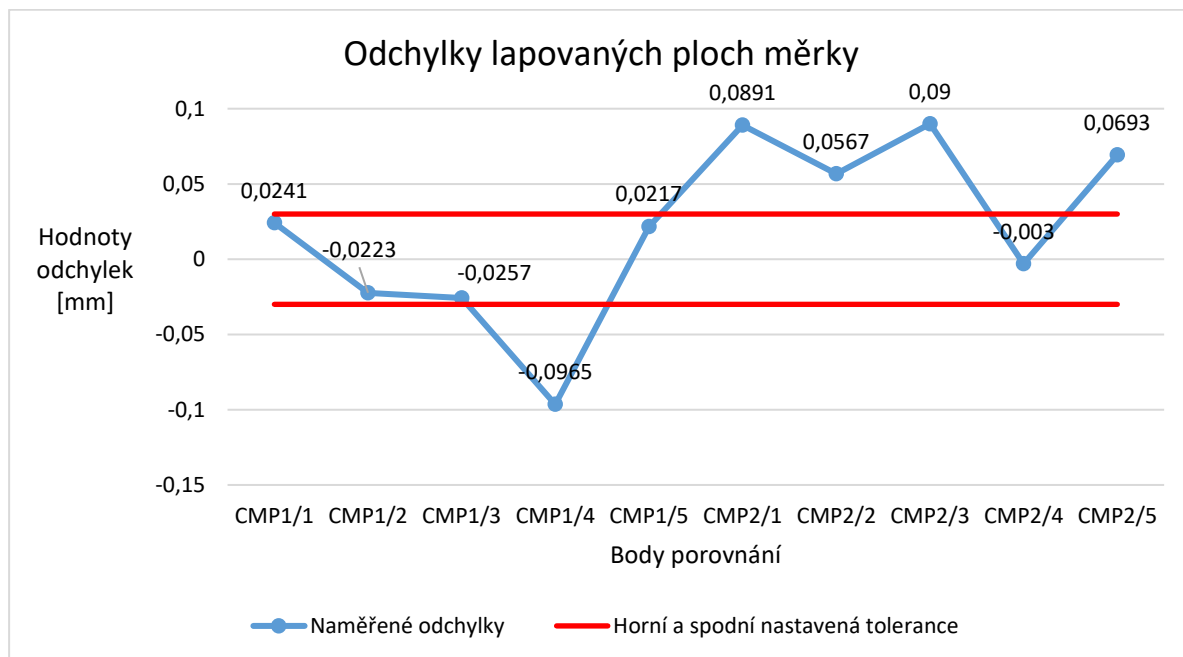
Nastavení skeneru č. 11



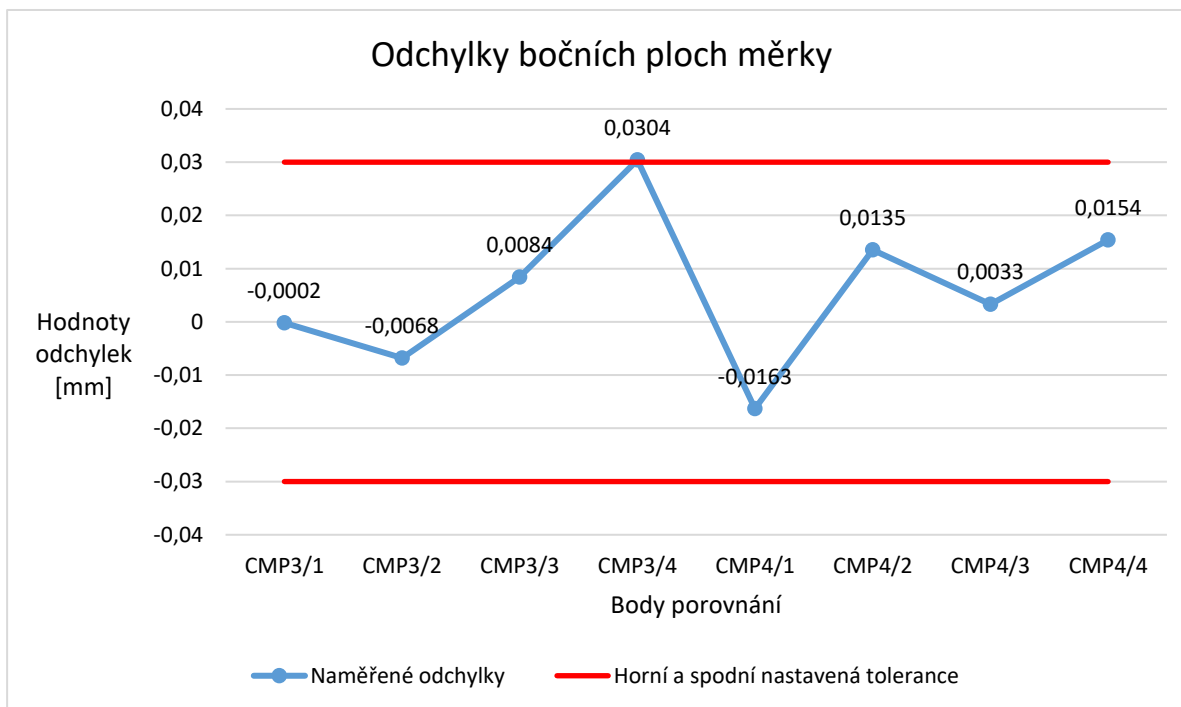
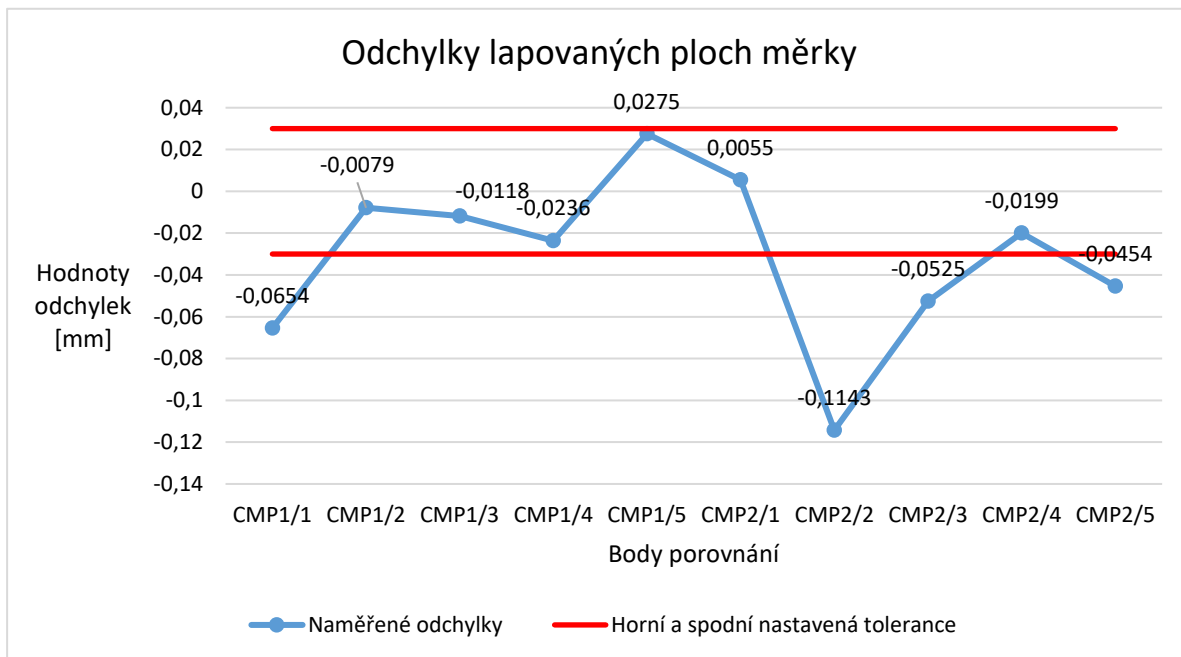
Nastavení skeneru č. 12



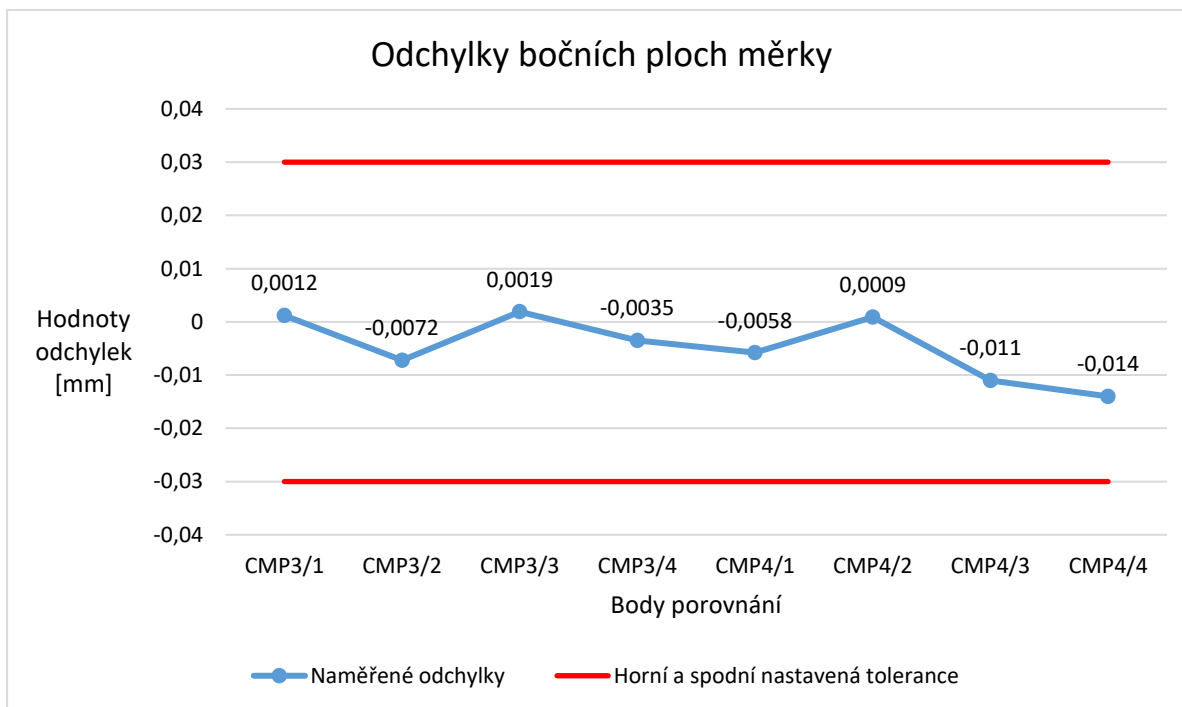
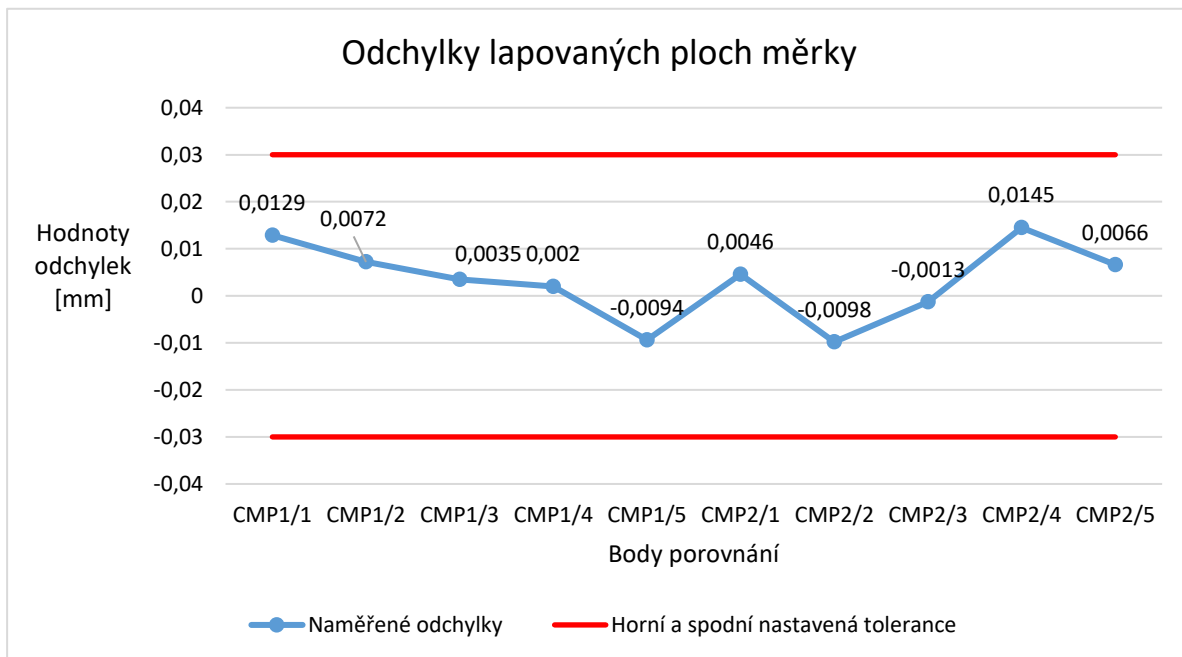
Nastavení skeneru č.13



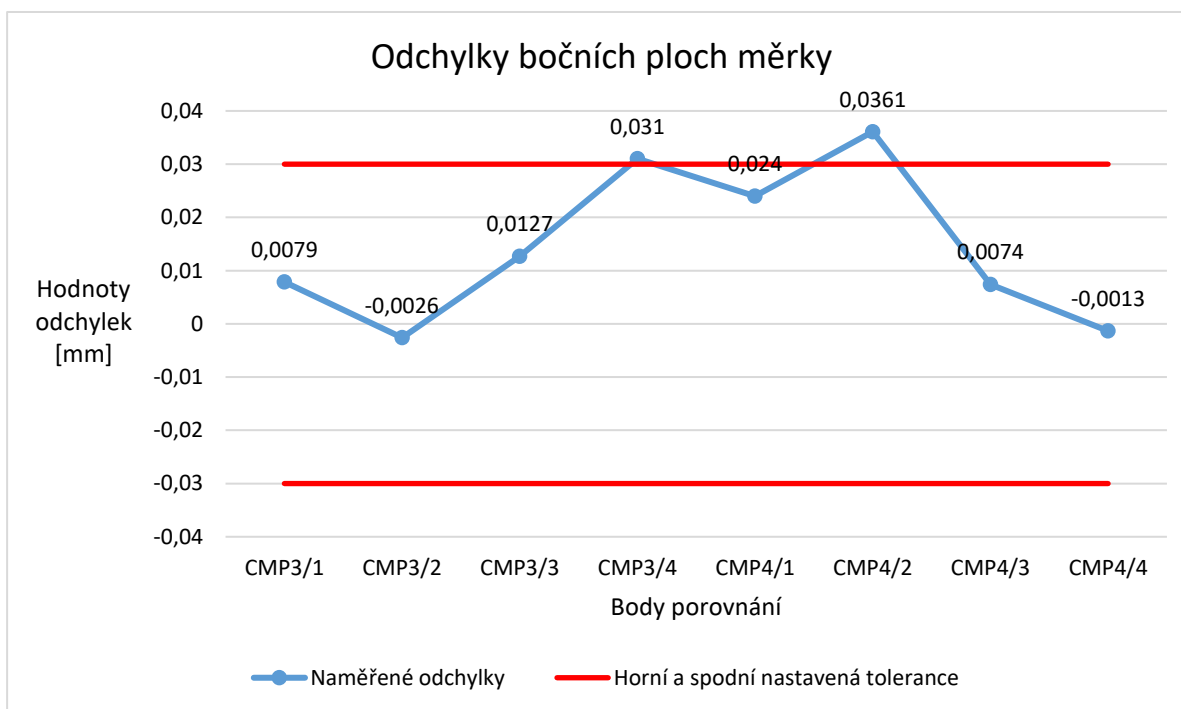
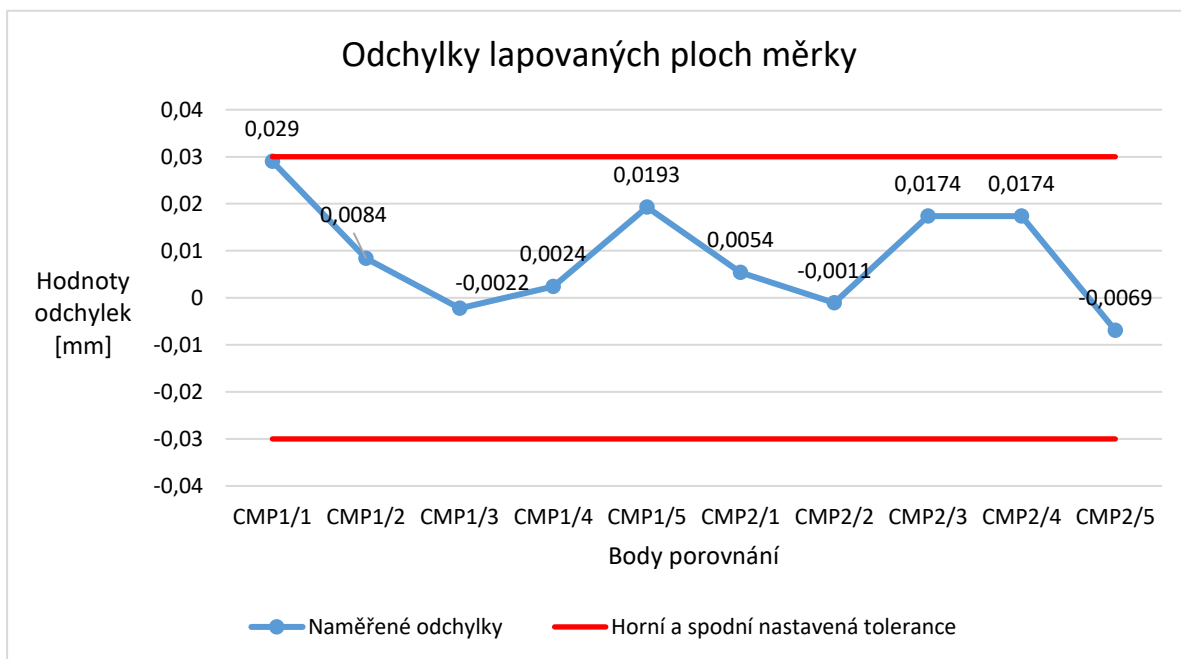
Nastavení skeneru č.14



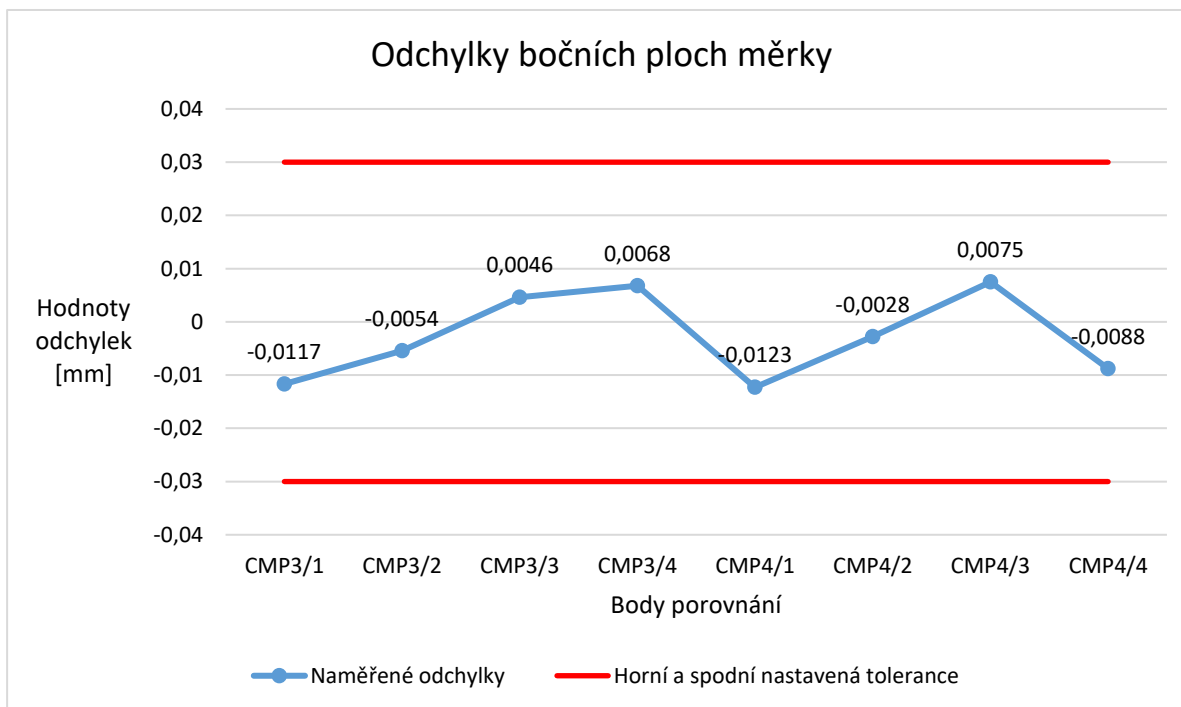
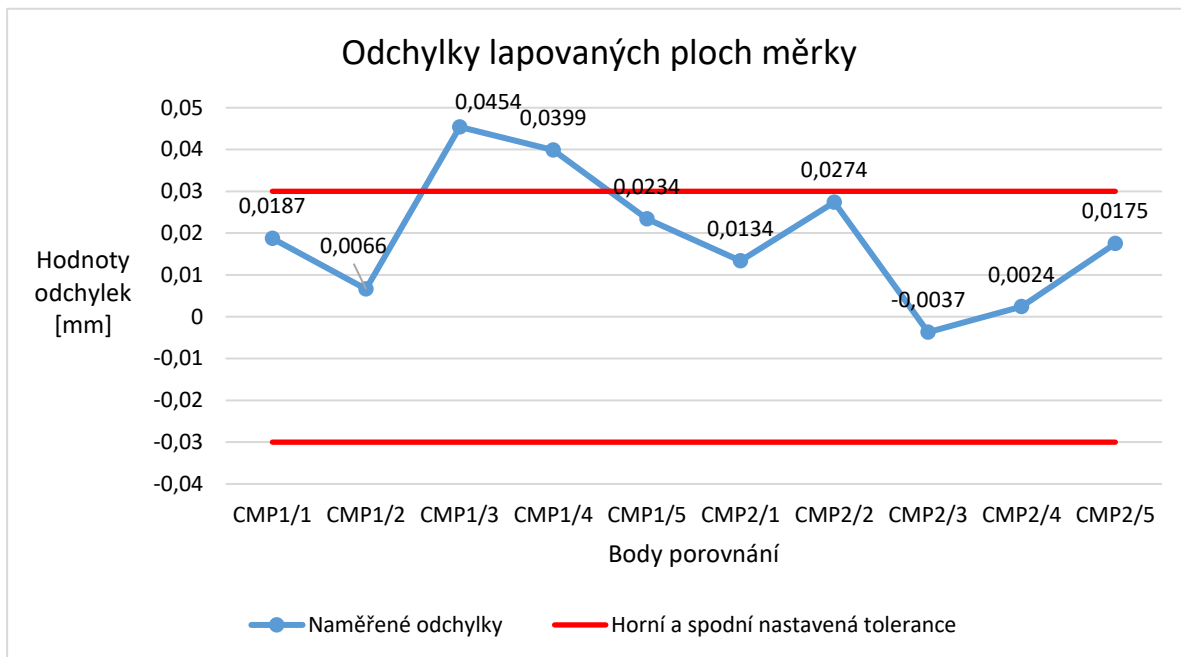
Nastavení skeneru č. 22



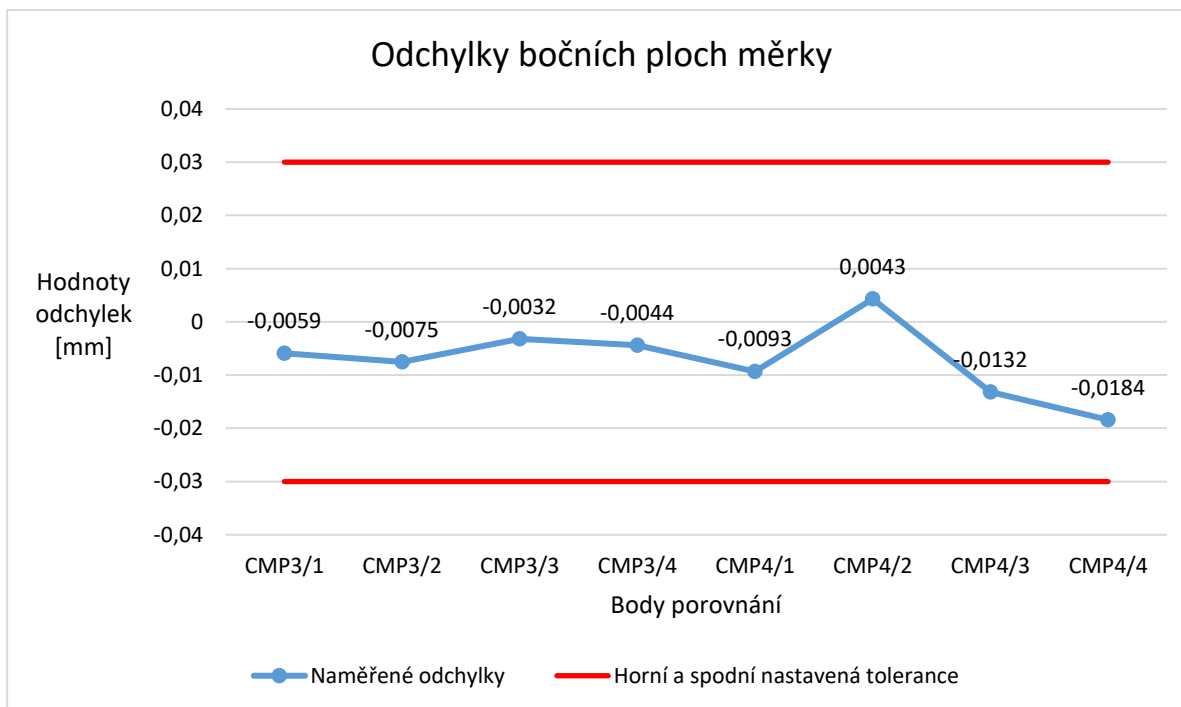
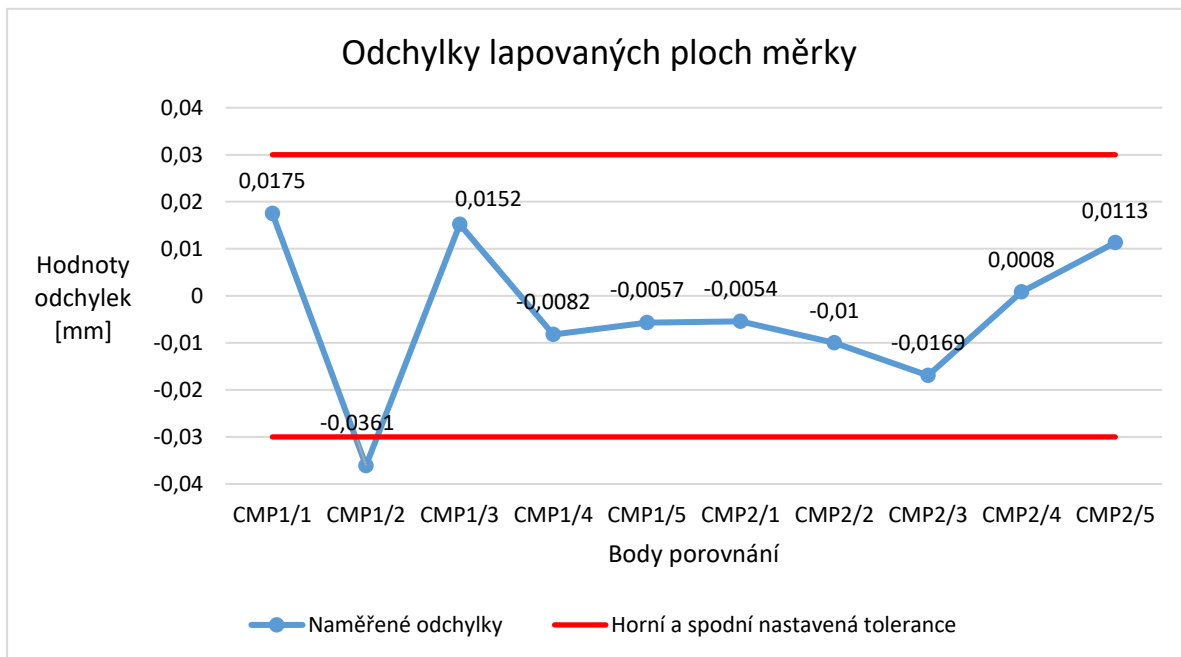
Nastavení skeneru č. 23



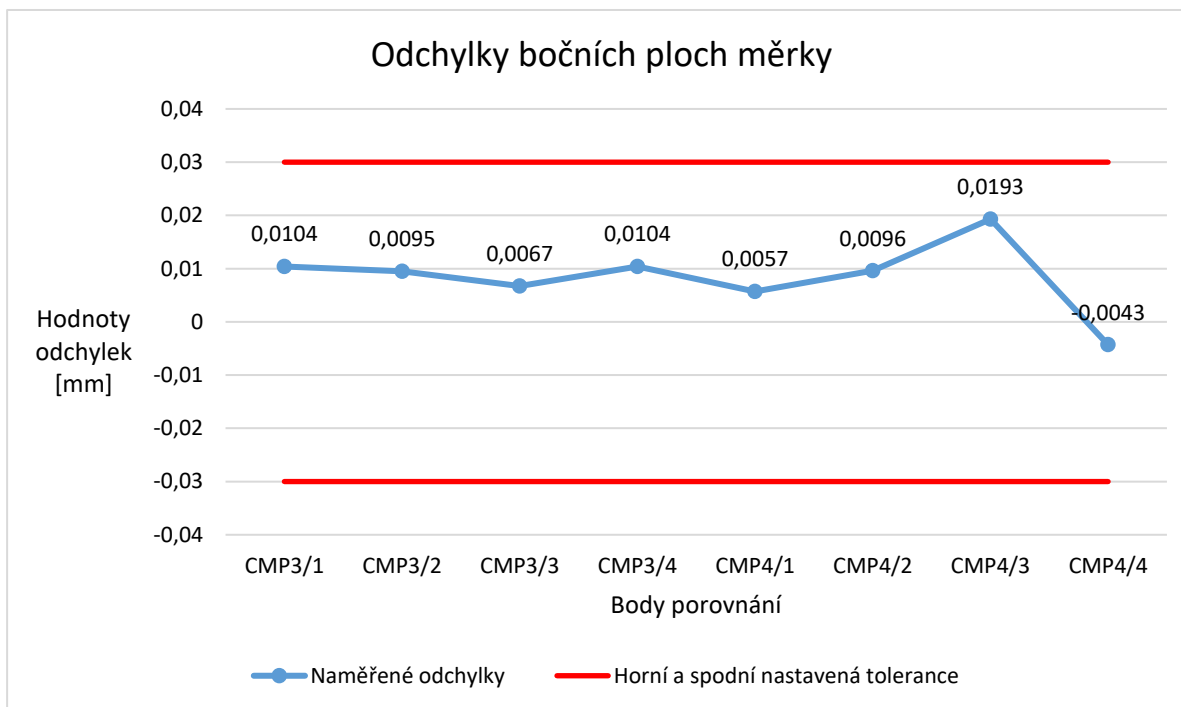
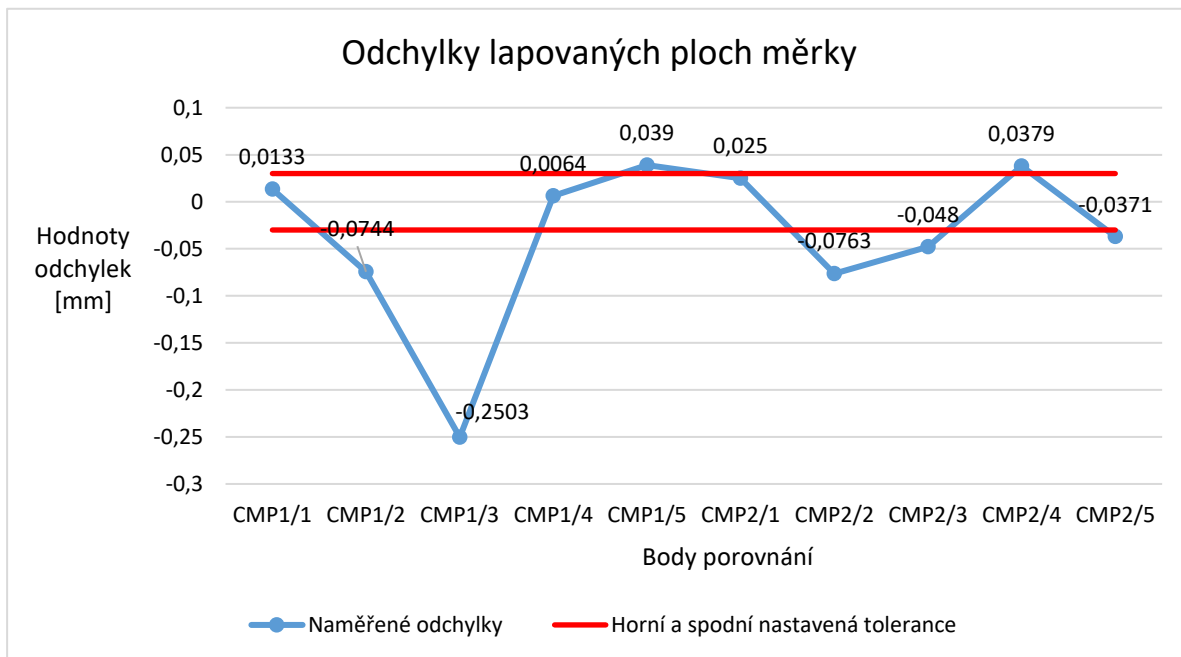
Nastavení skeneru č. 24



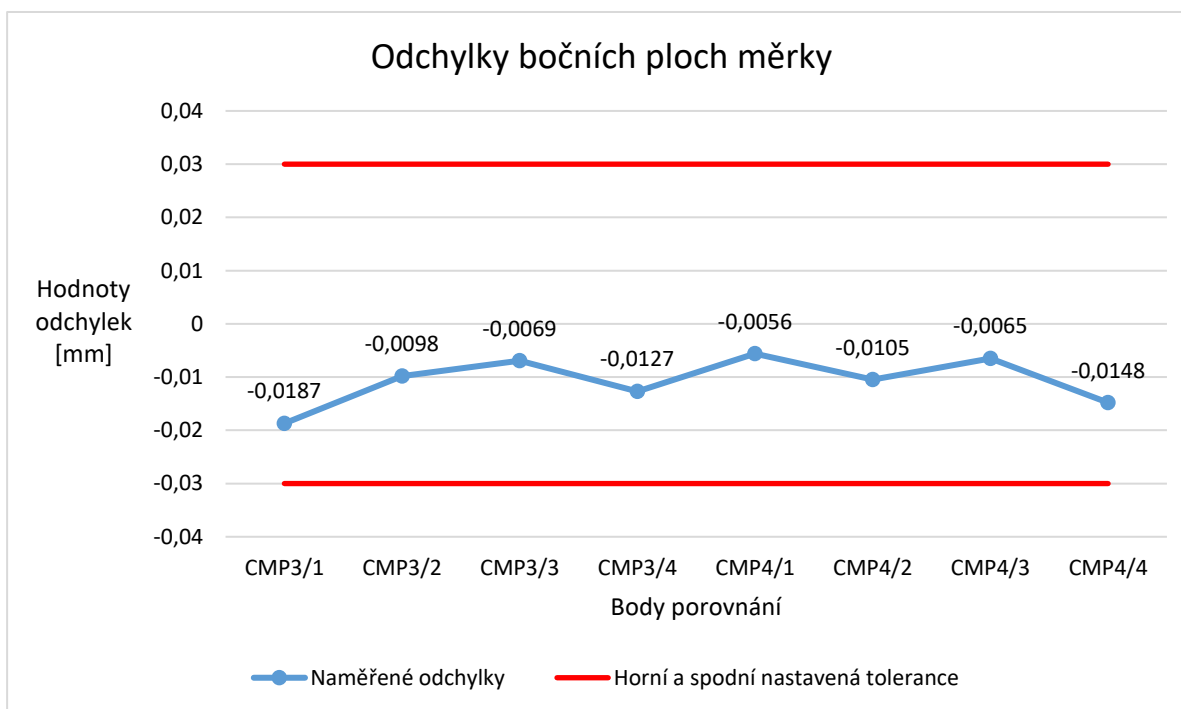
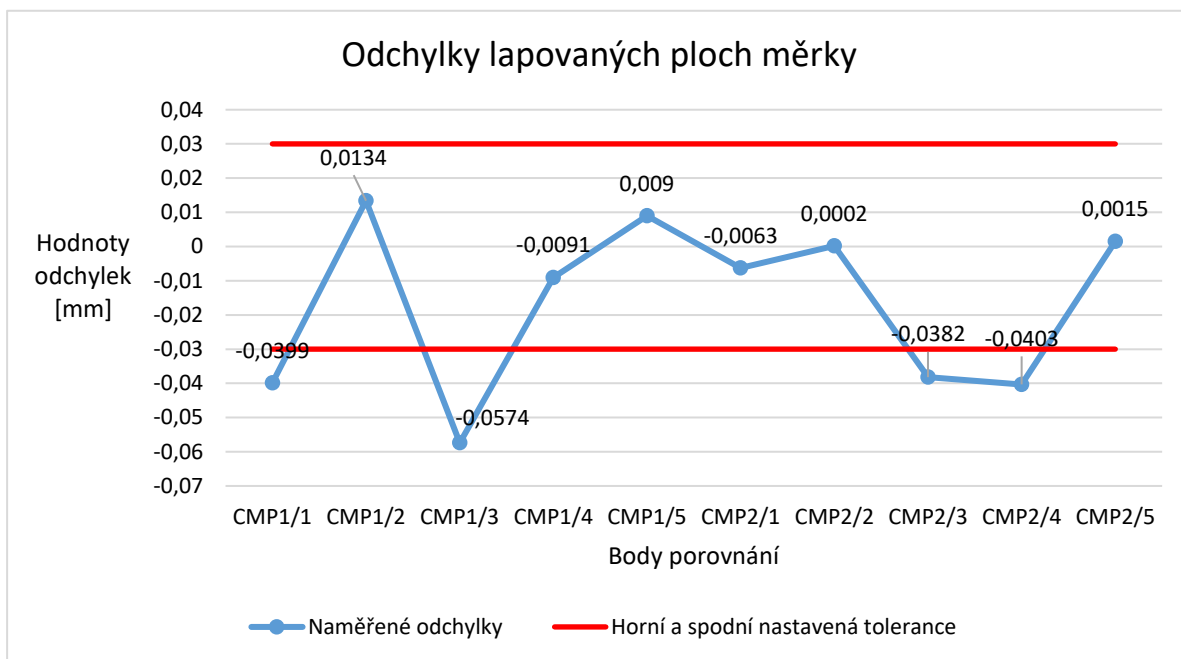
Nastavení skeneru č. 25



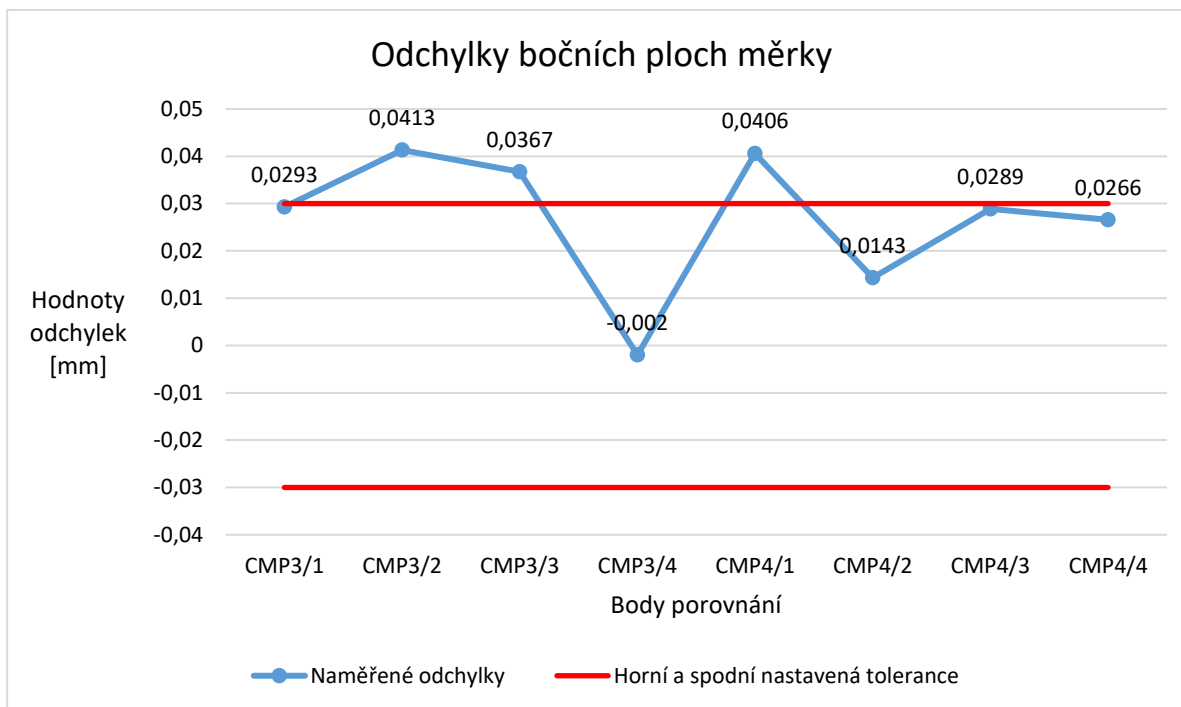
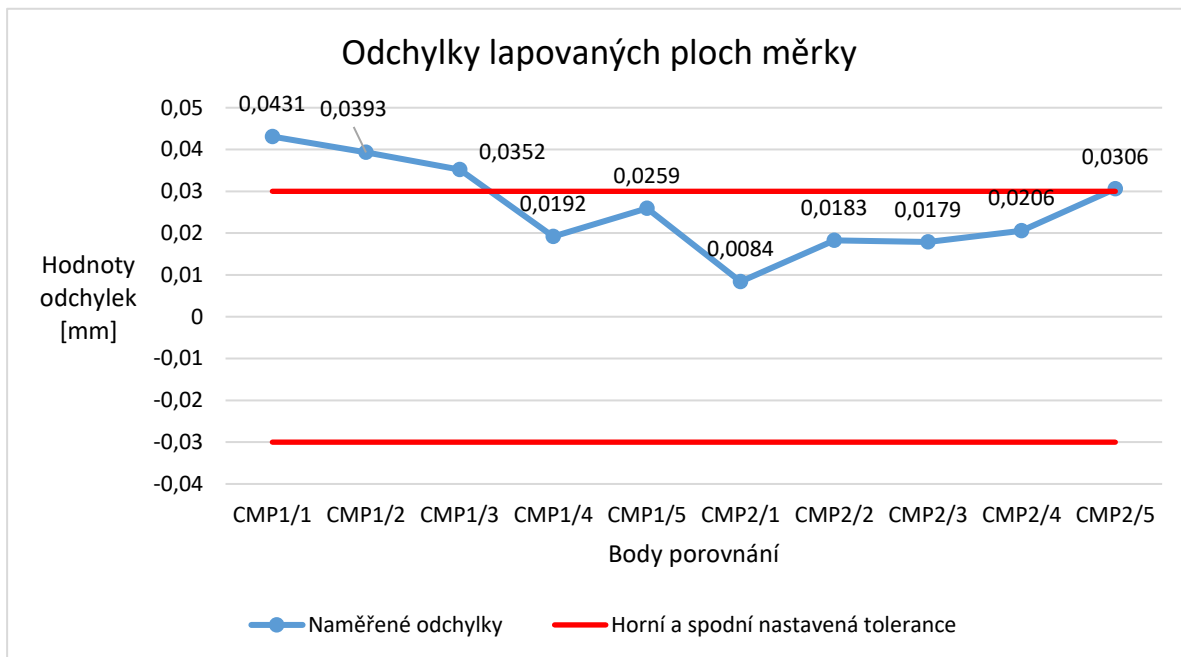
Nastavení skeneru č. 26



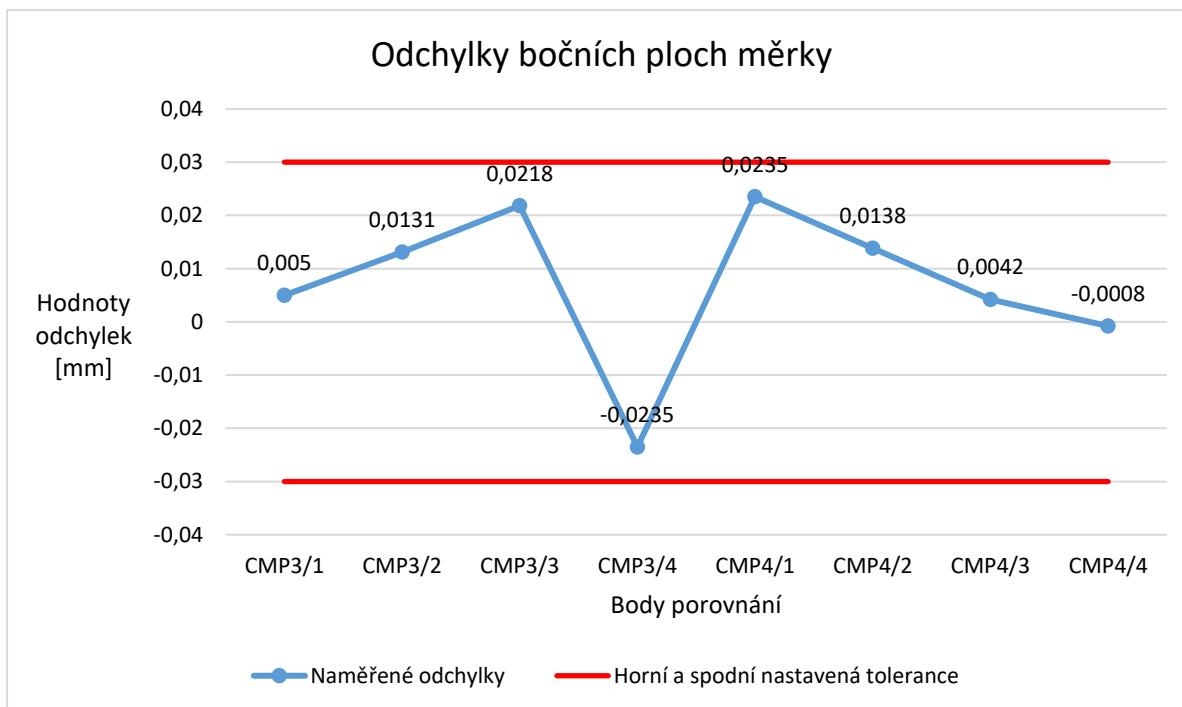
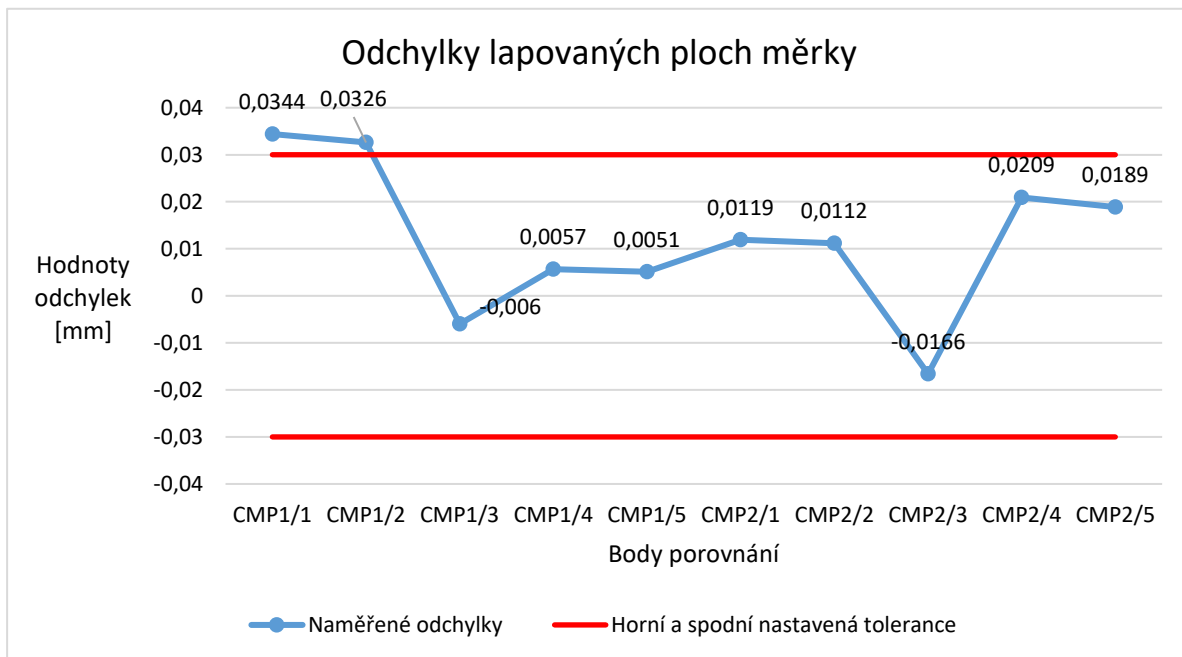
Nastavení skeneru č. 27



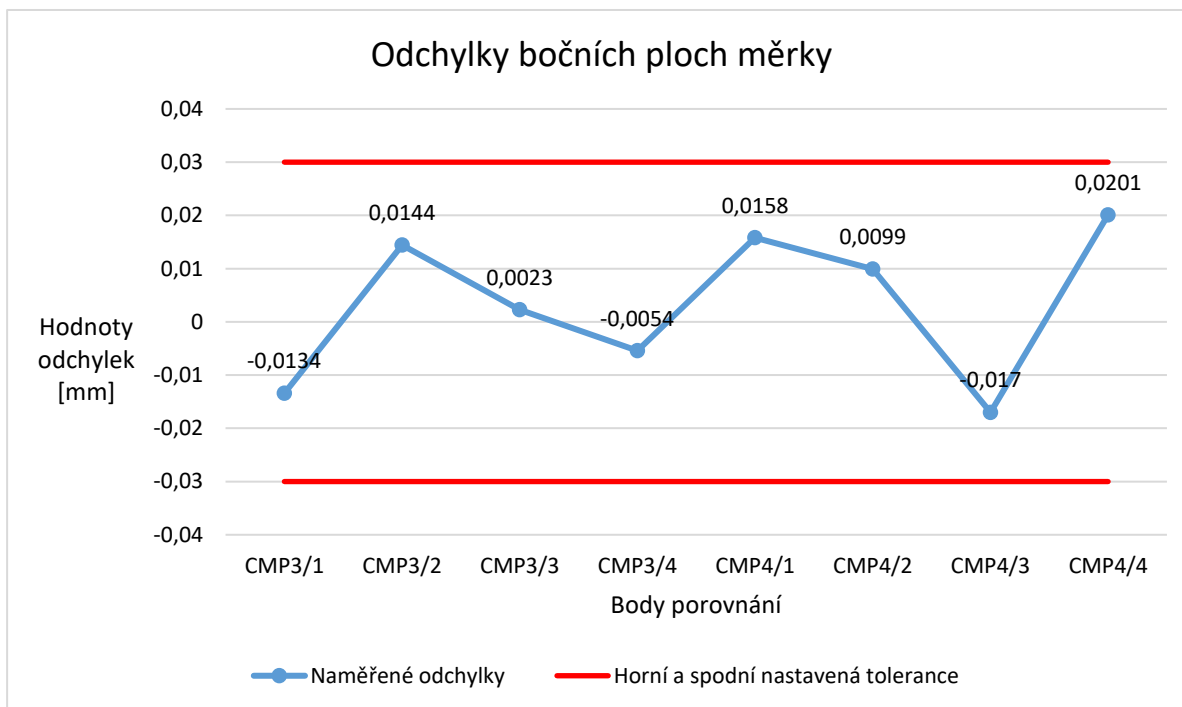
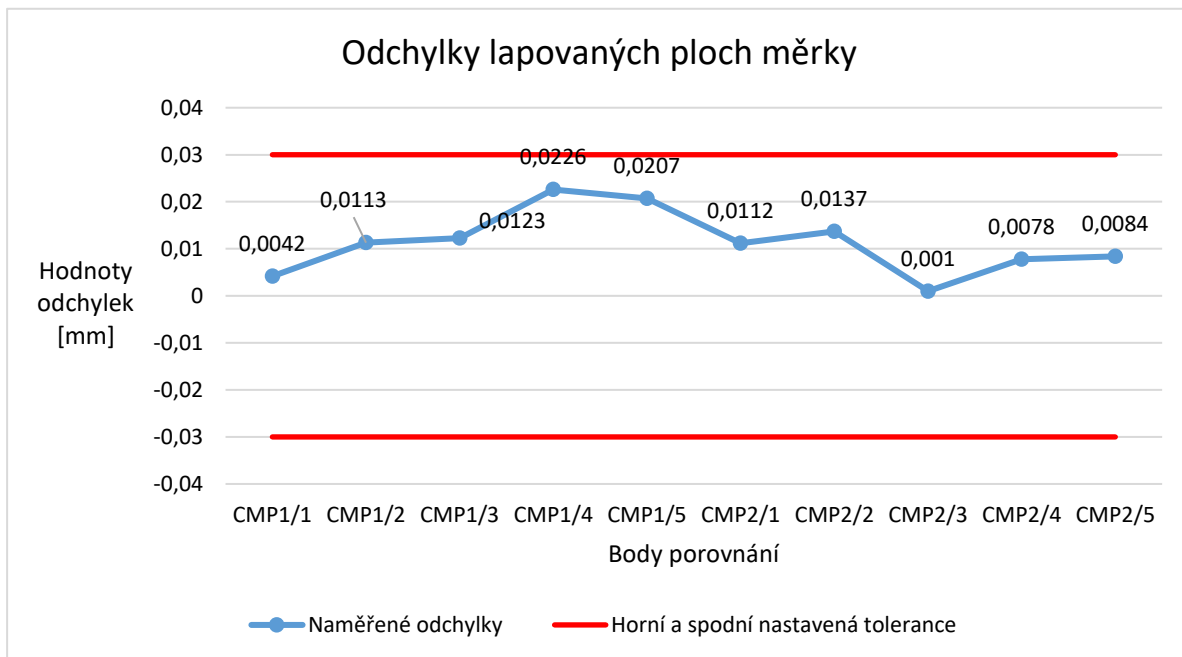
Nastavení skeneru č. 31



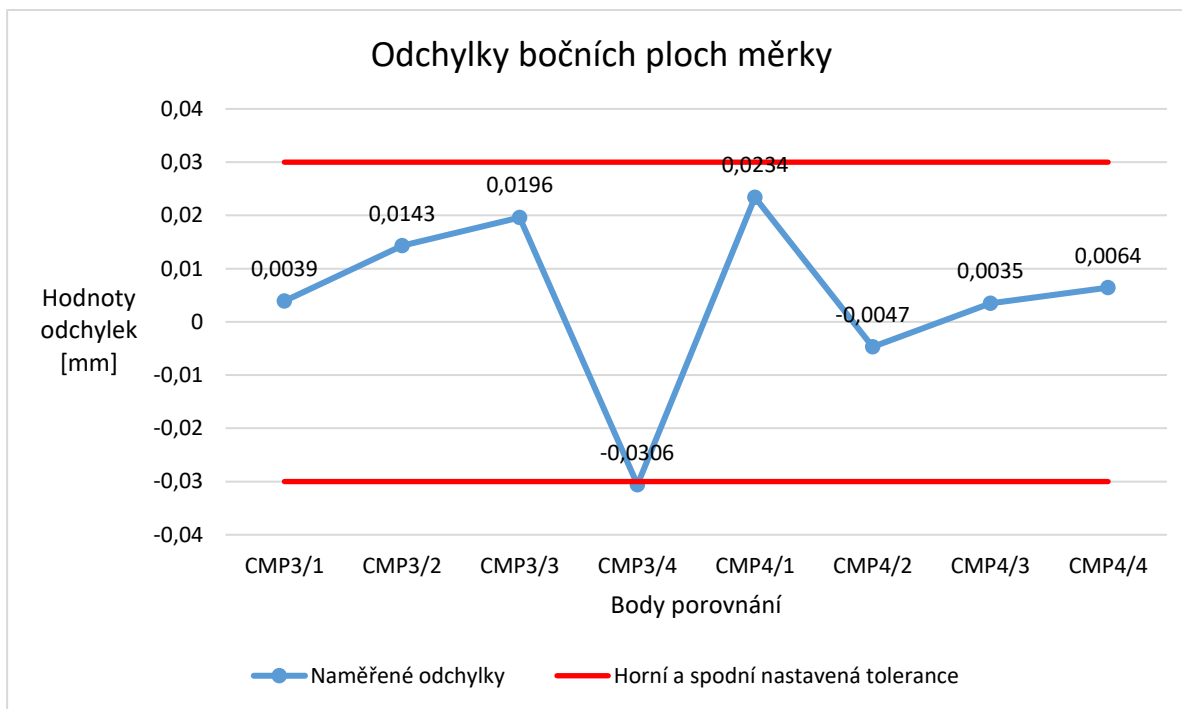
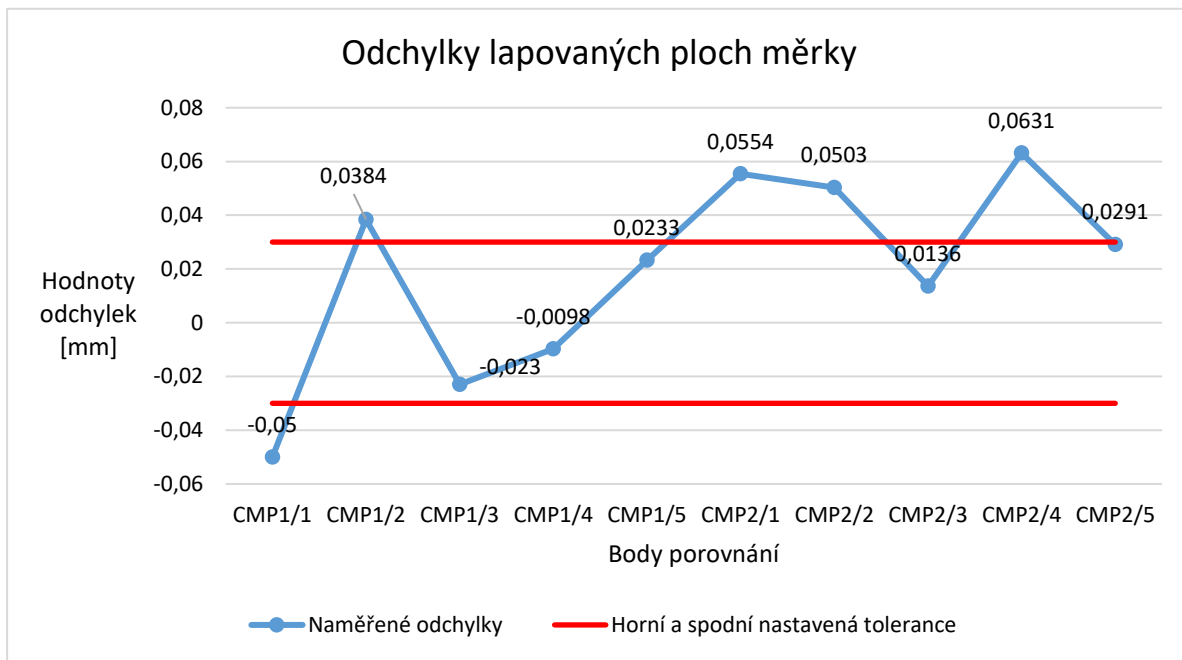
Nastavení skeneru č. 32



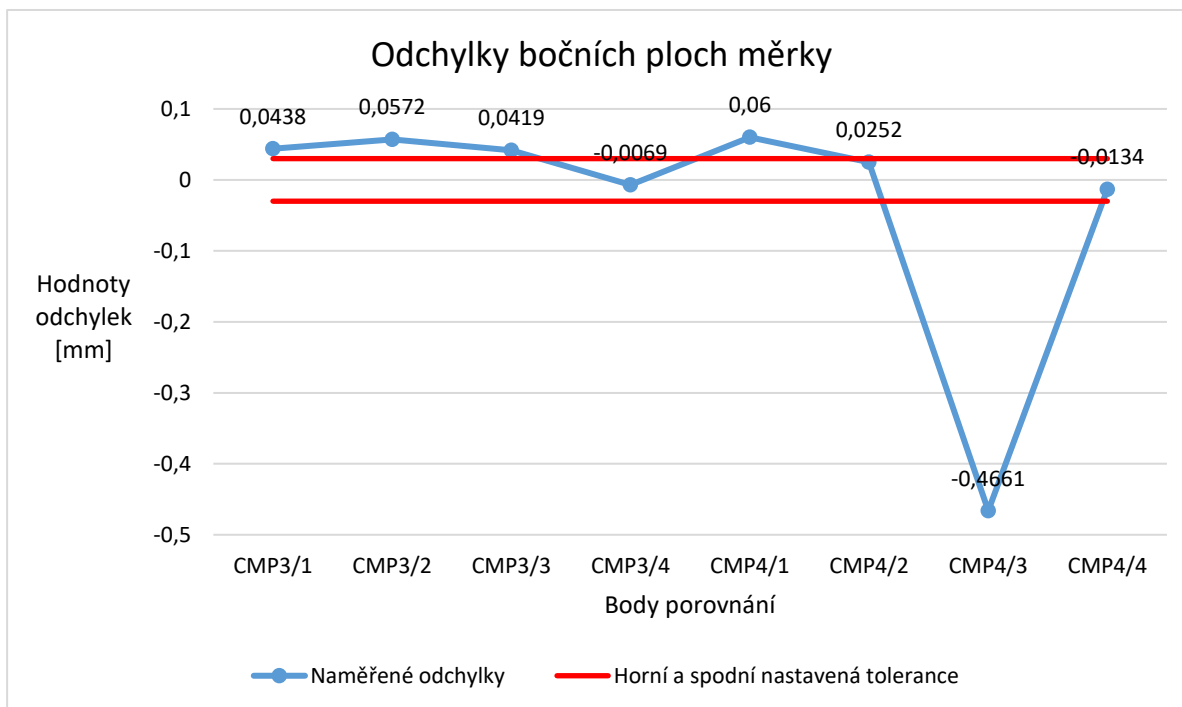
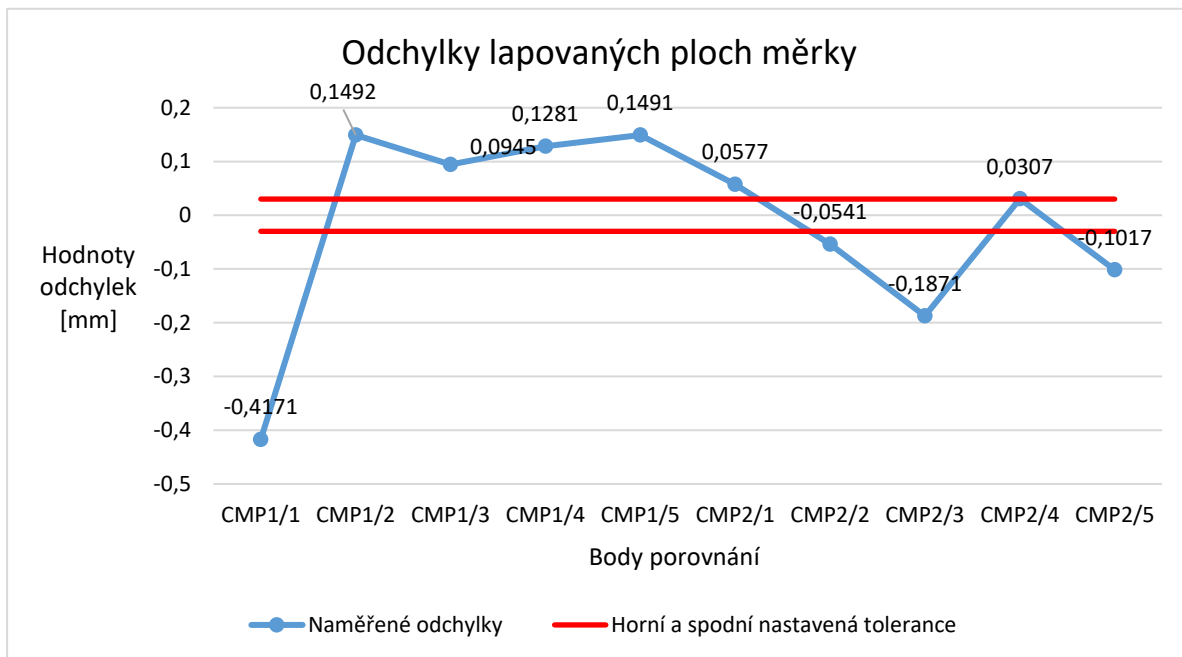
Nastavení skeneru č. 33



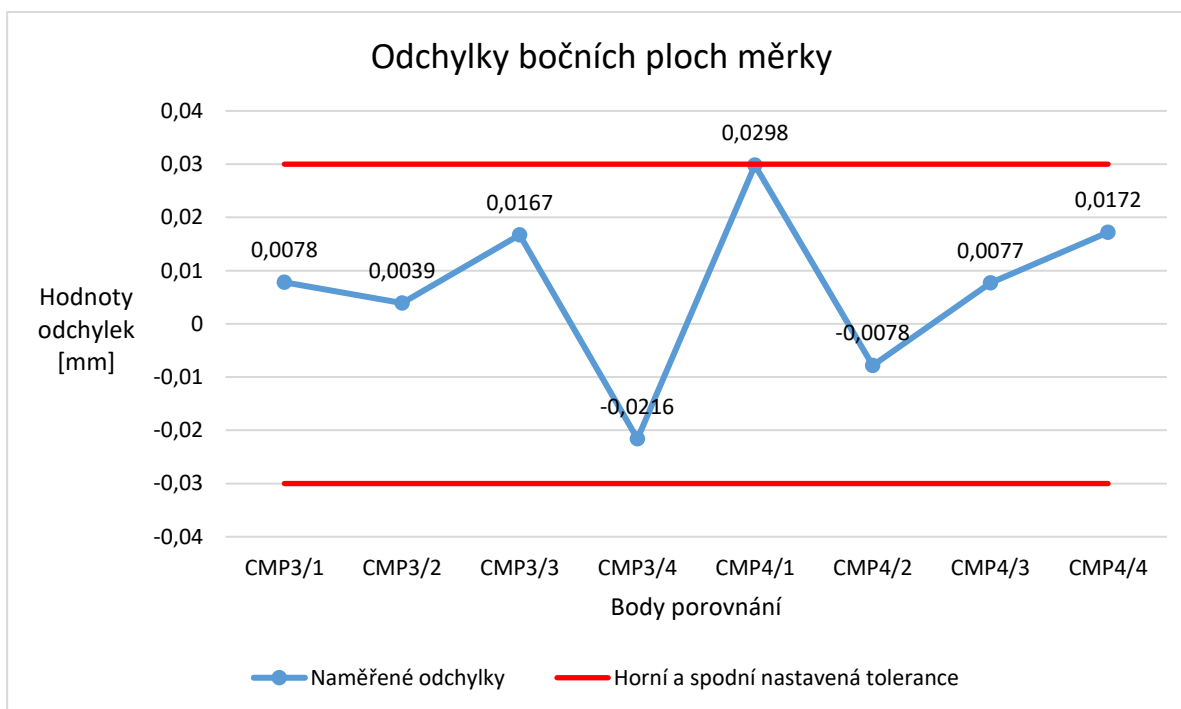
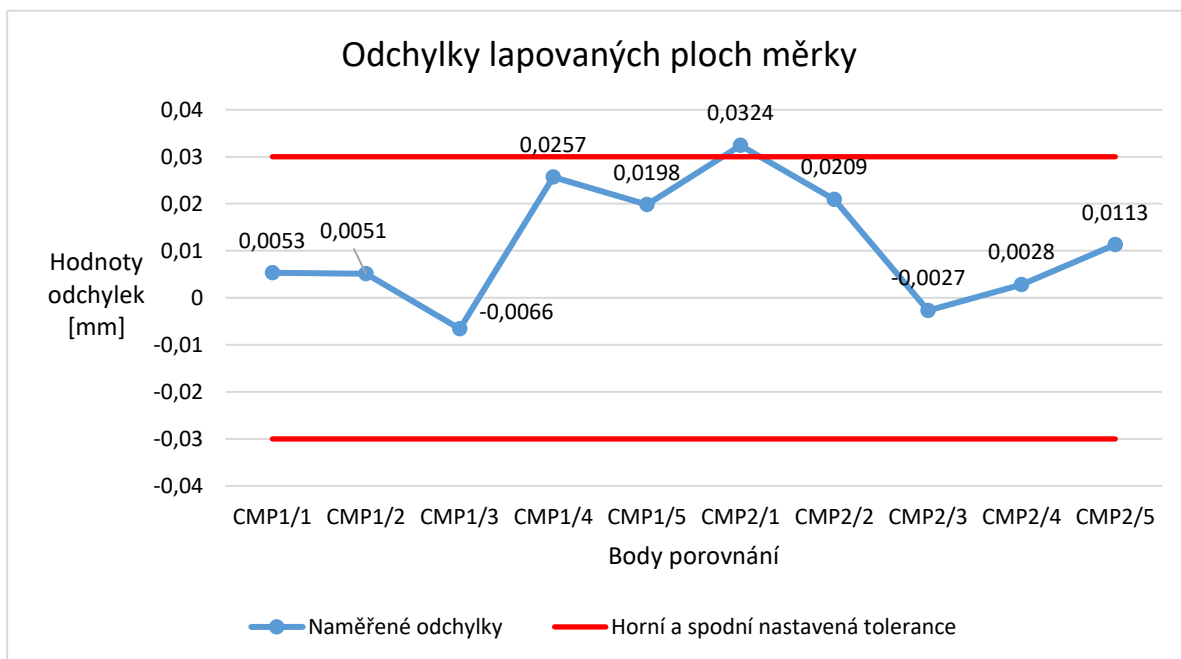
Nastavení skeneru č. 34



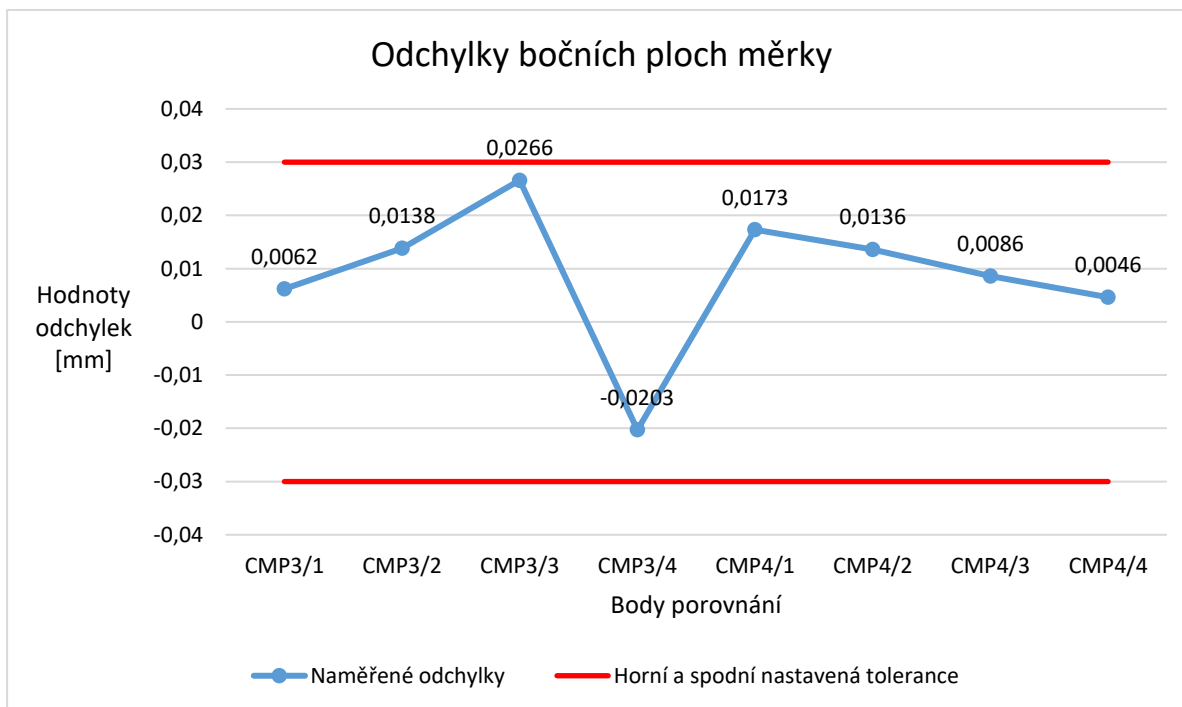
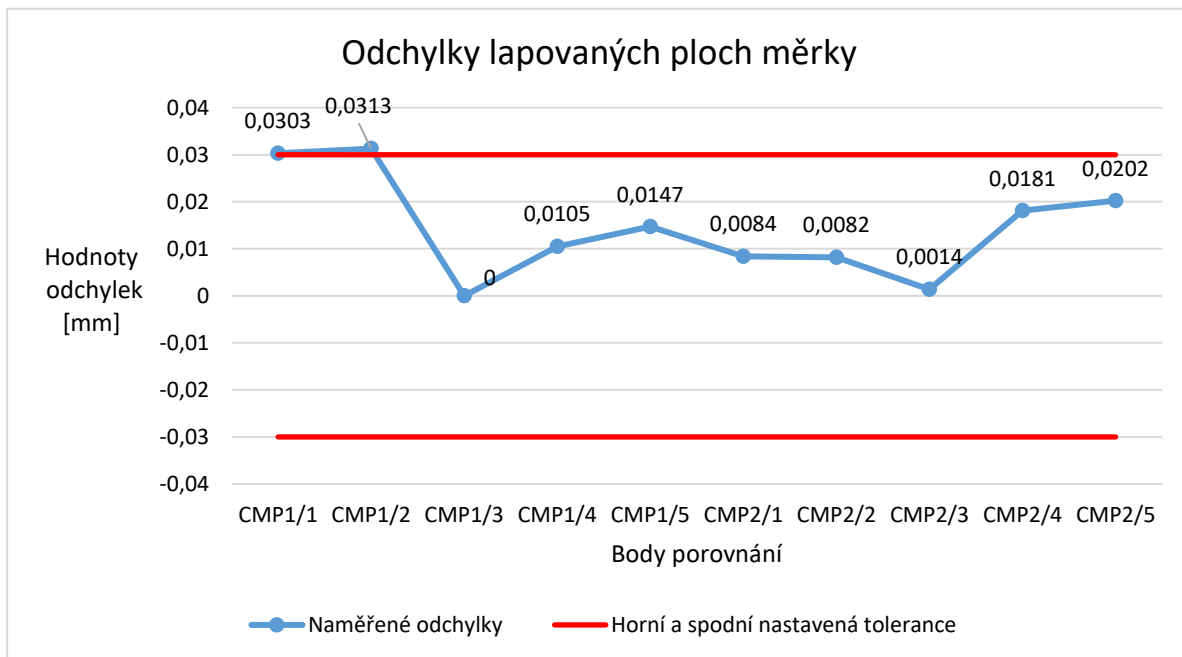
Nastavení skeneru č. 35



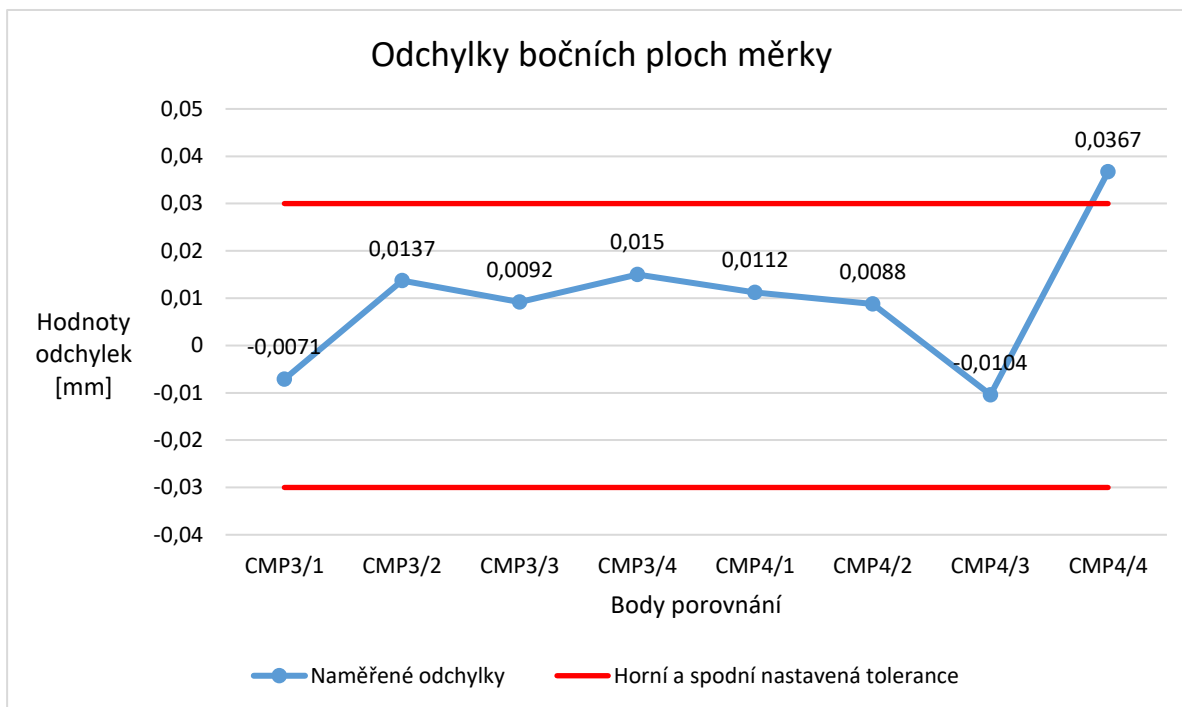
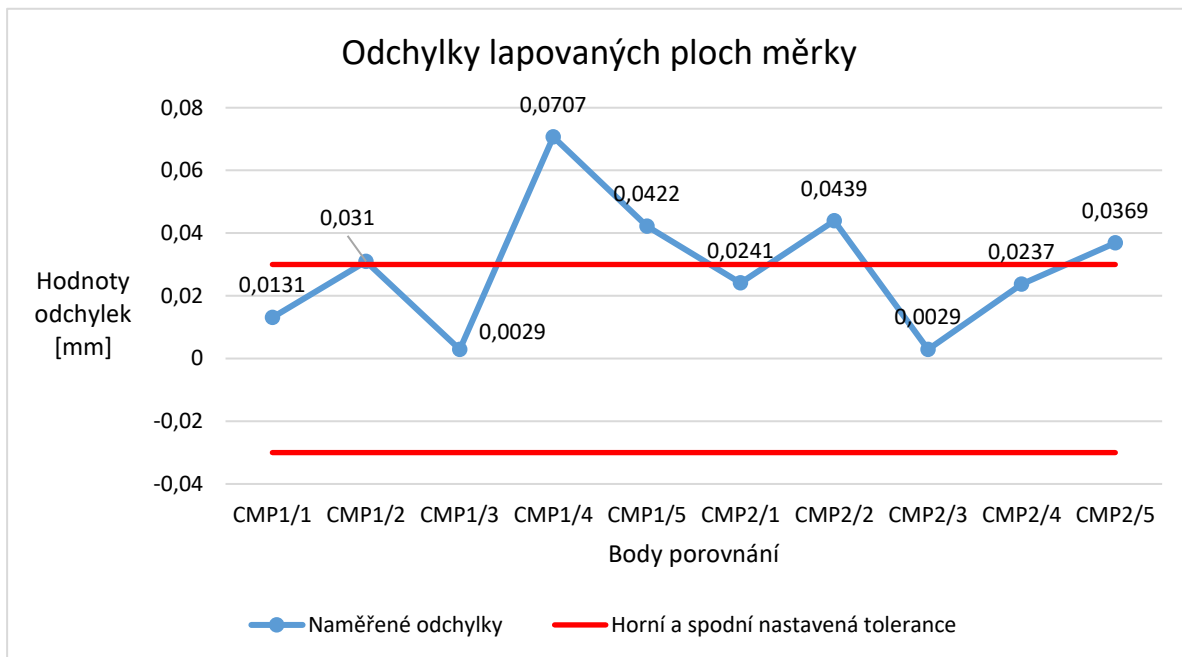
Nastavení skeneru č. 36



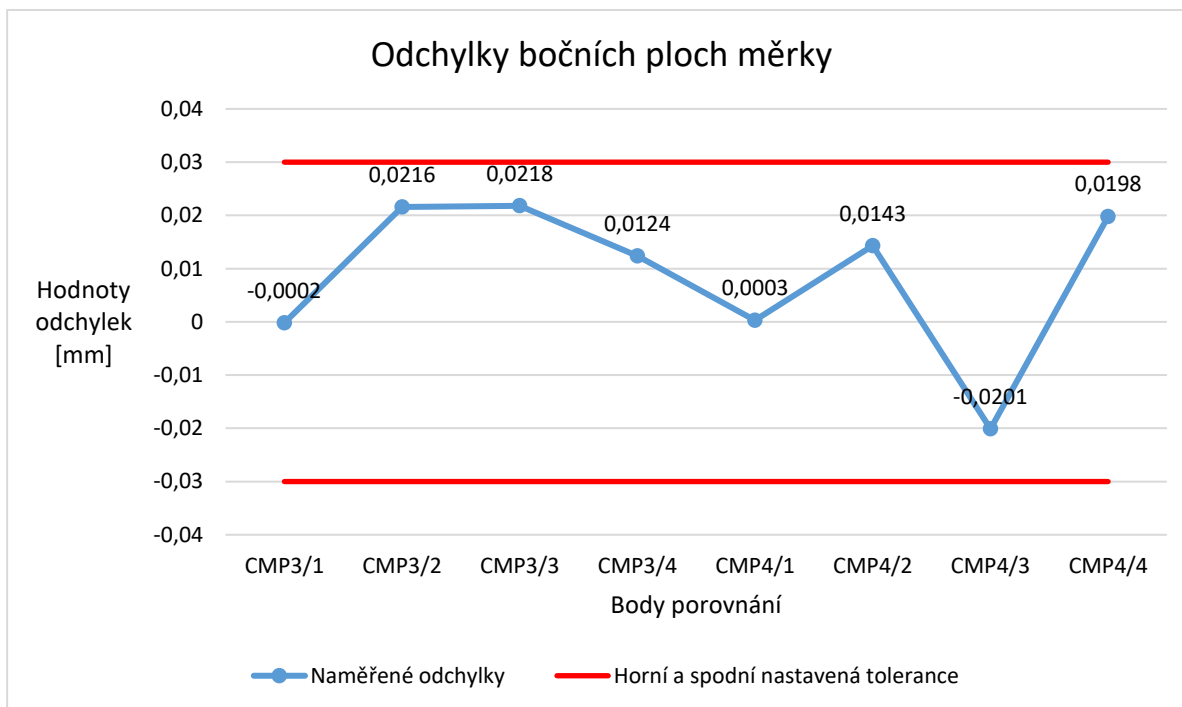
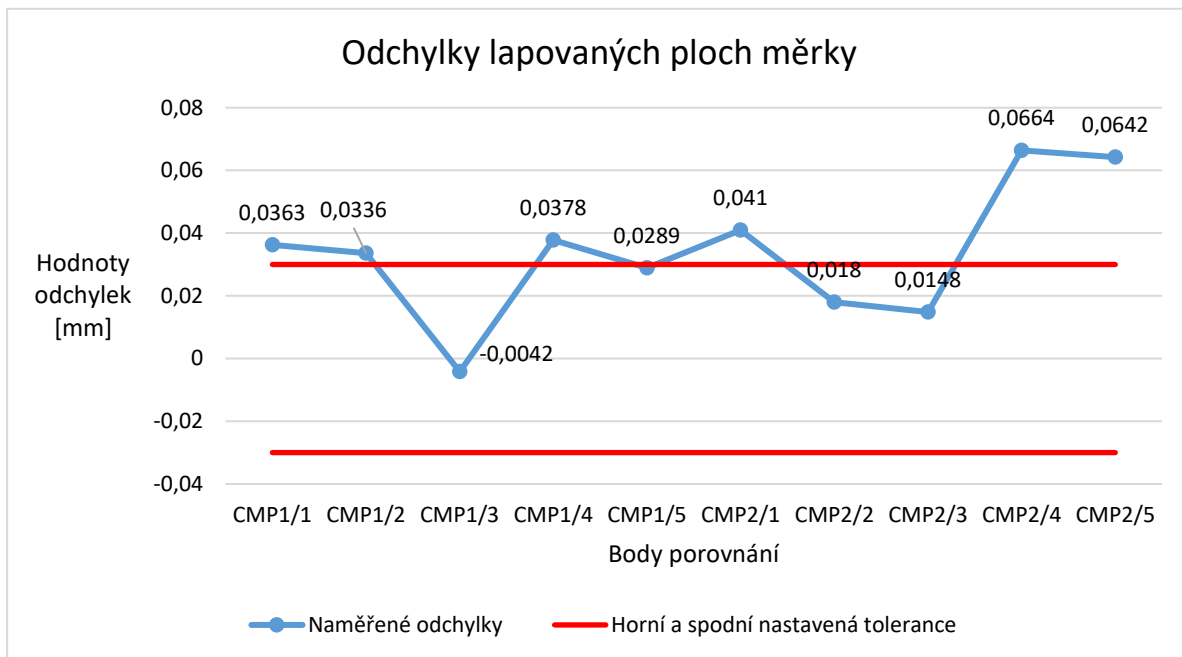
Nastavení skeneru č. 37



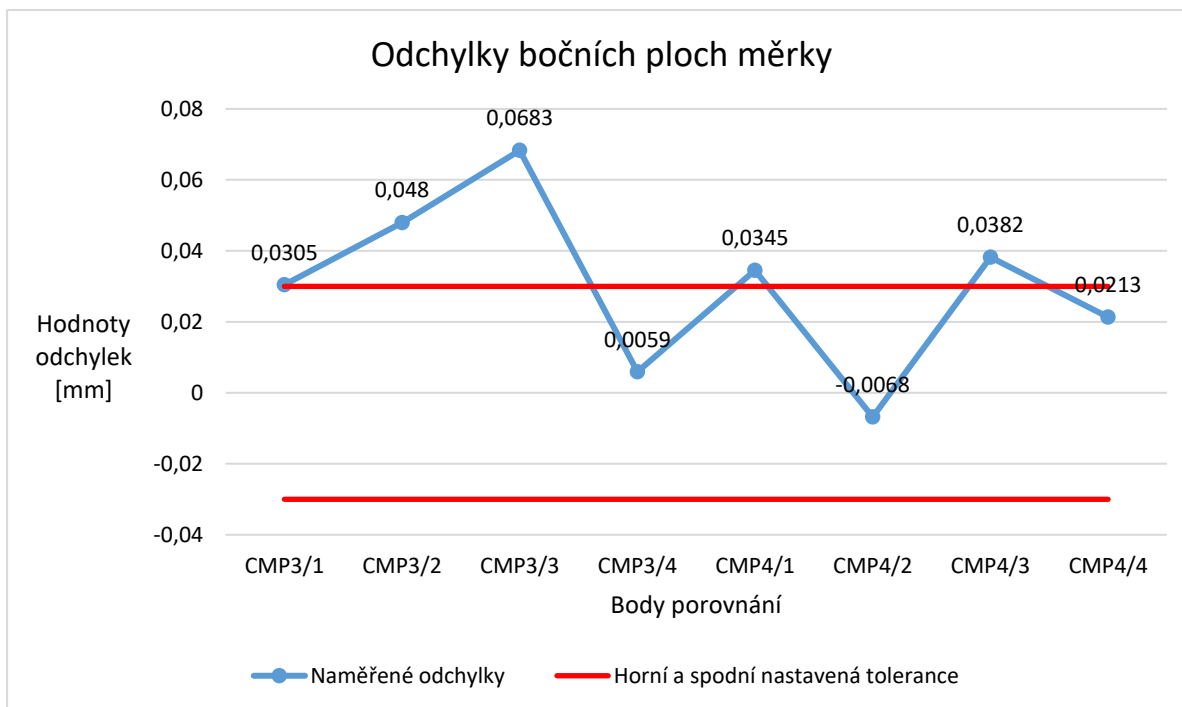
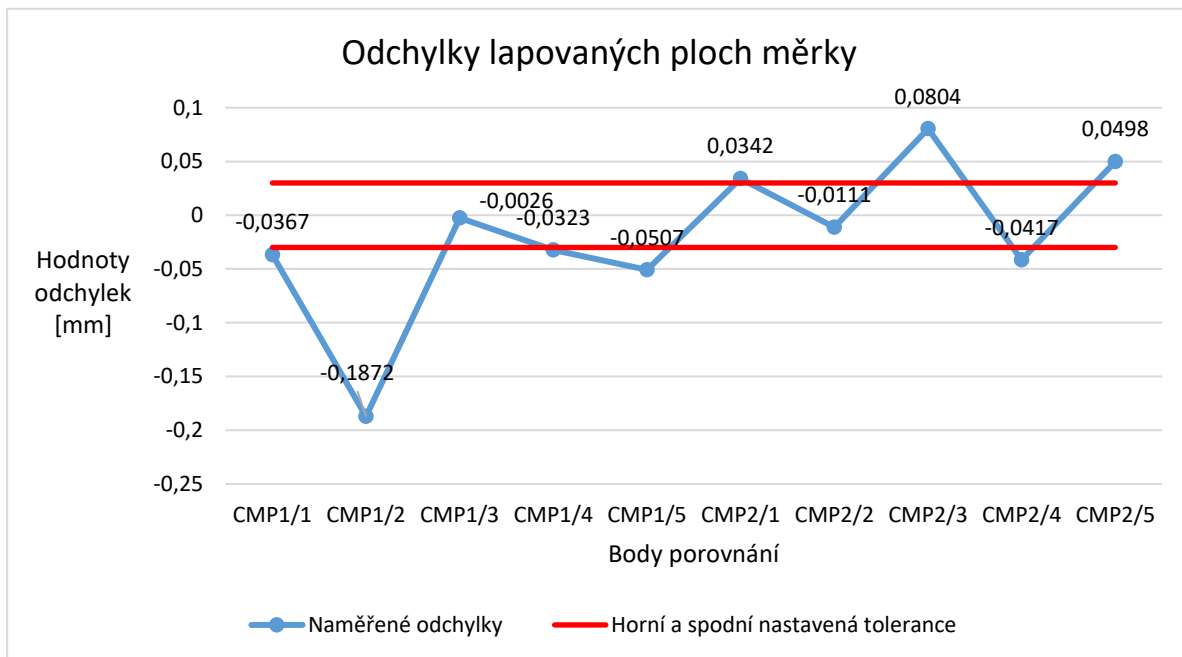
Nastavení skeneru č. 38



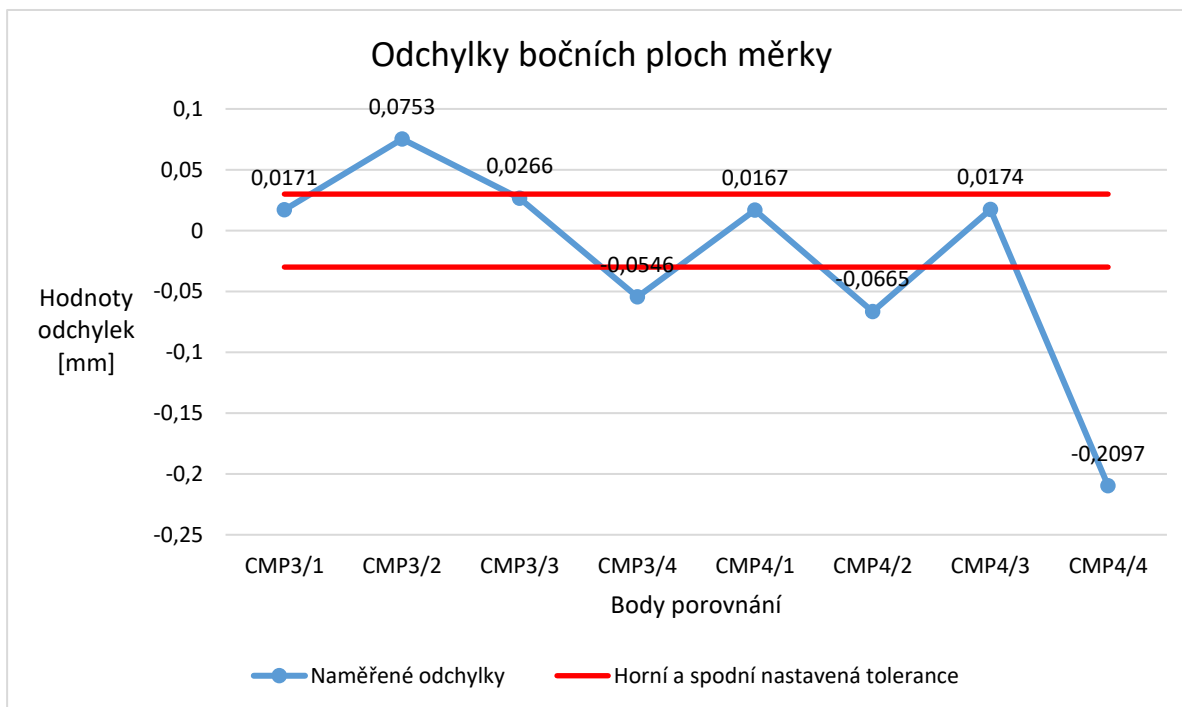
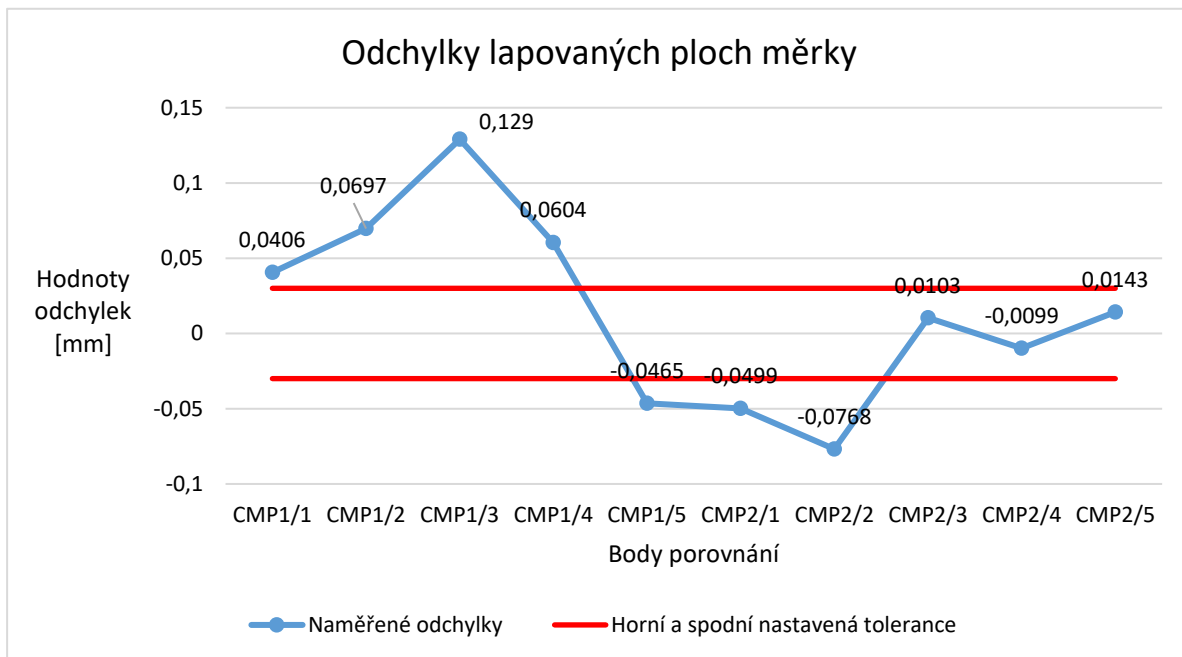
Nastavení skeneru č. 39



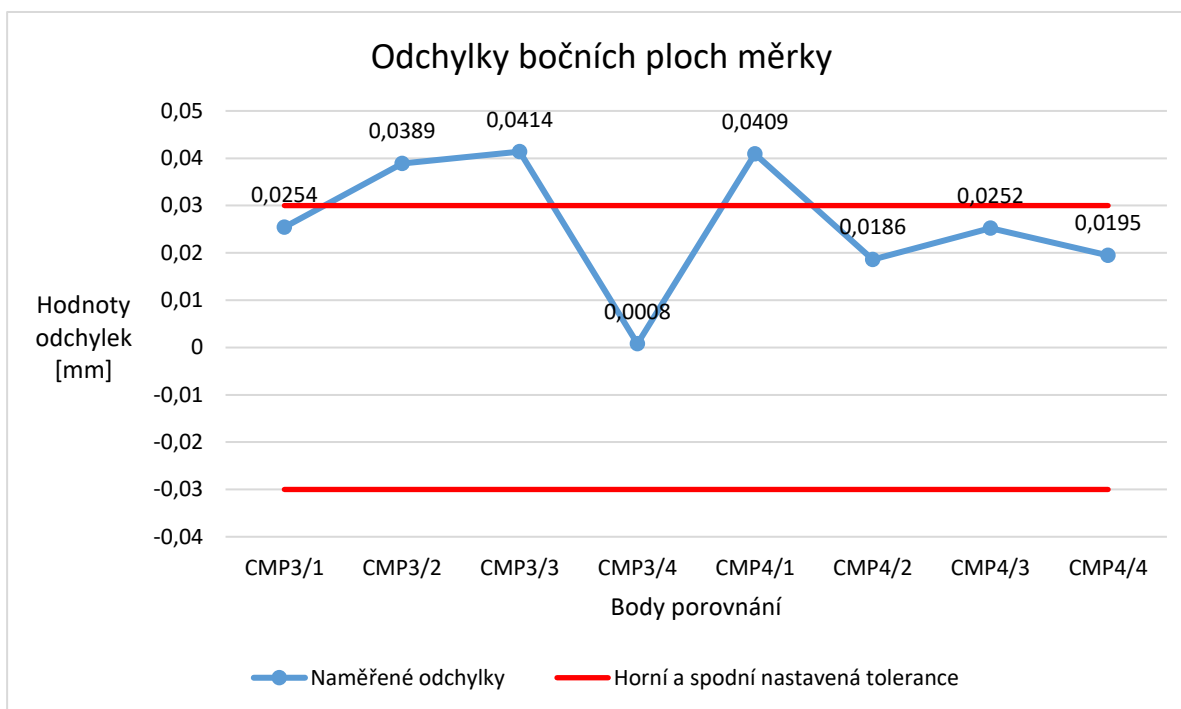
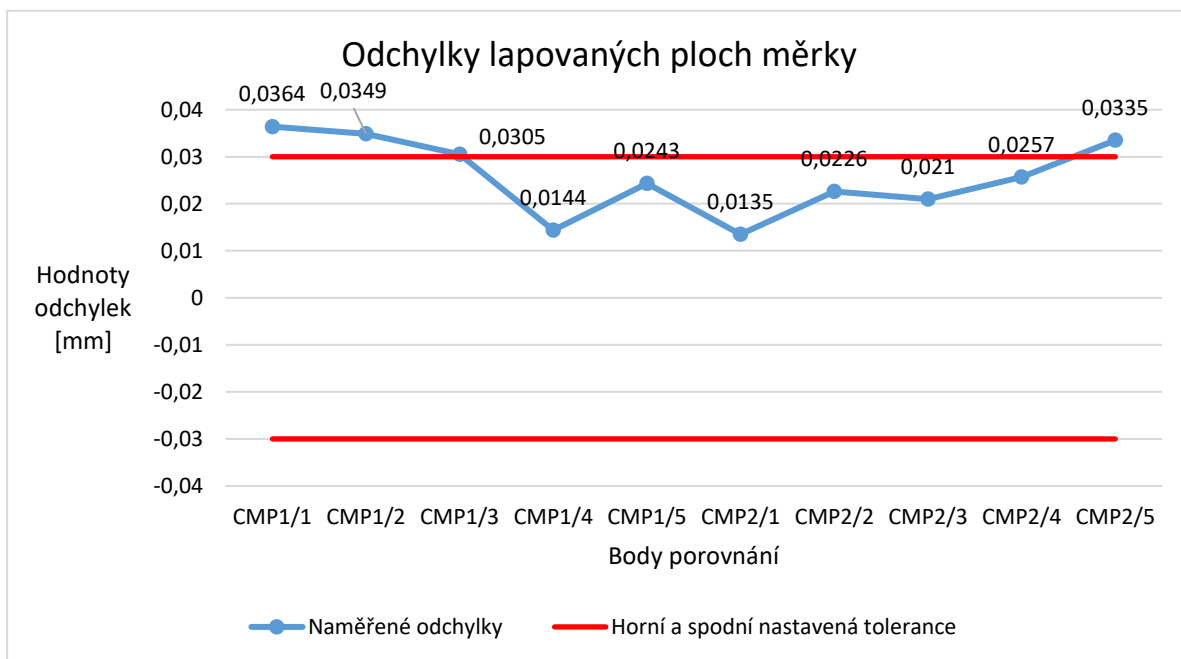
Nastavení skeneru č. 40



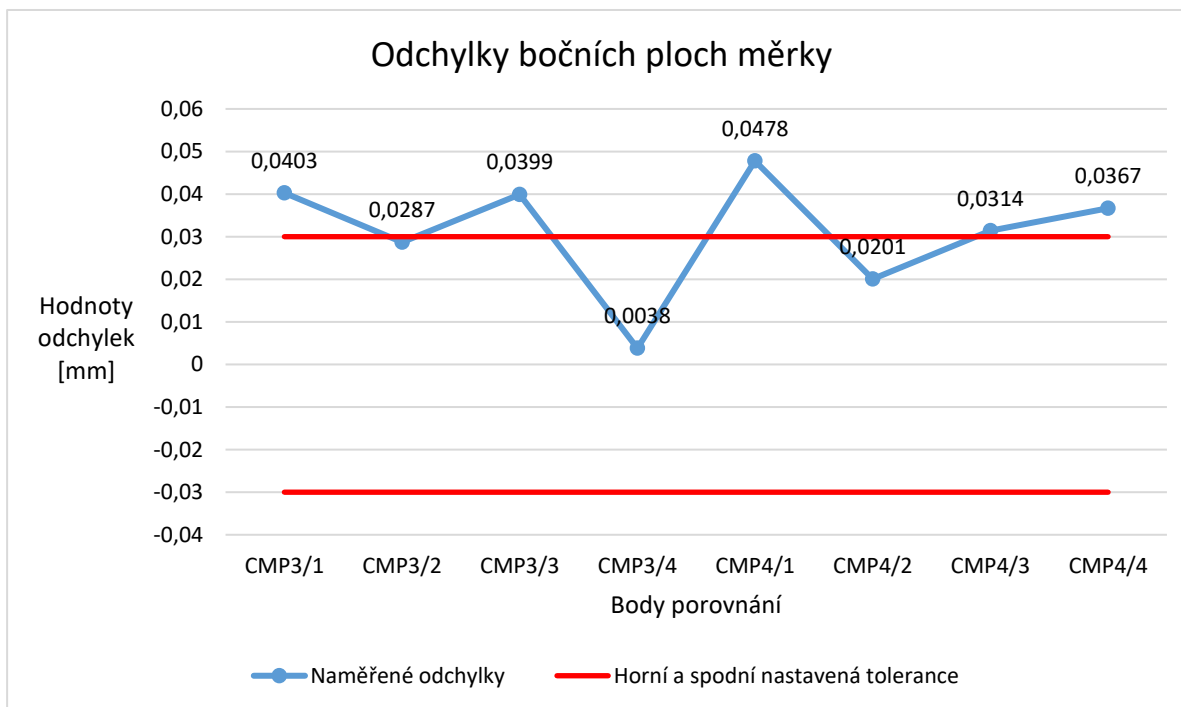
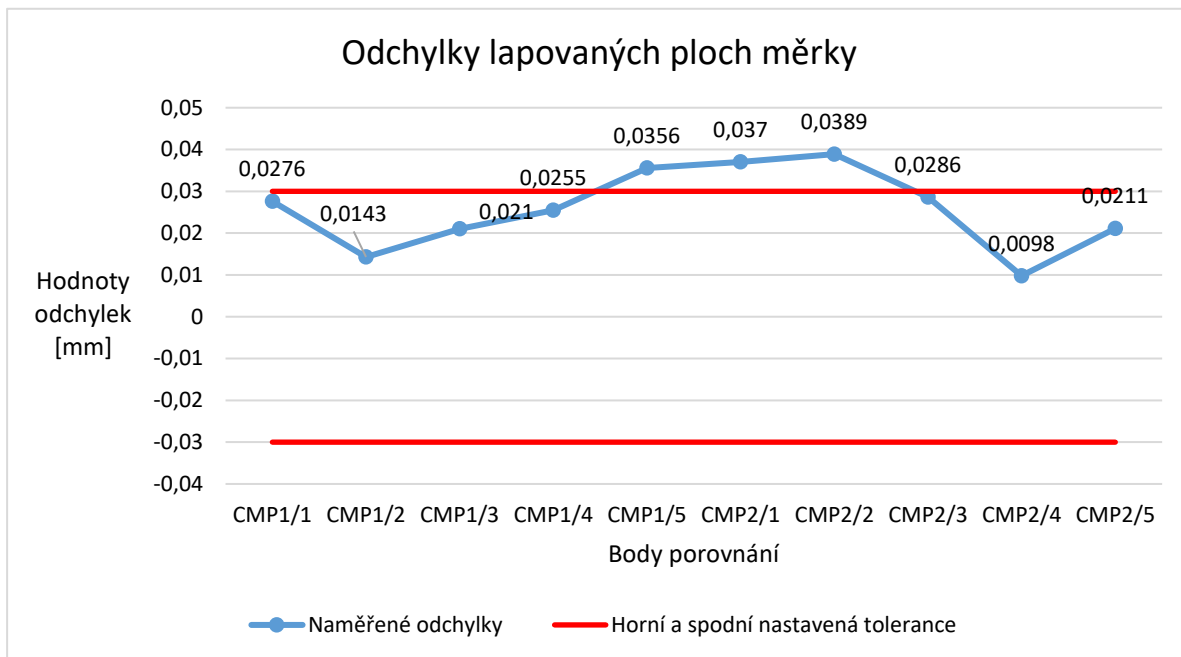
Nastavení skeneru č. 41



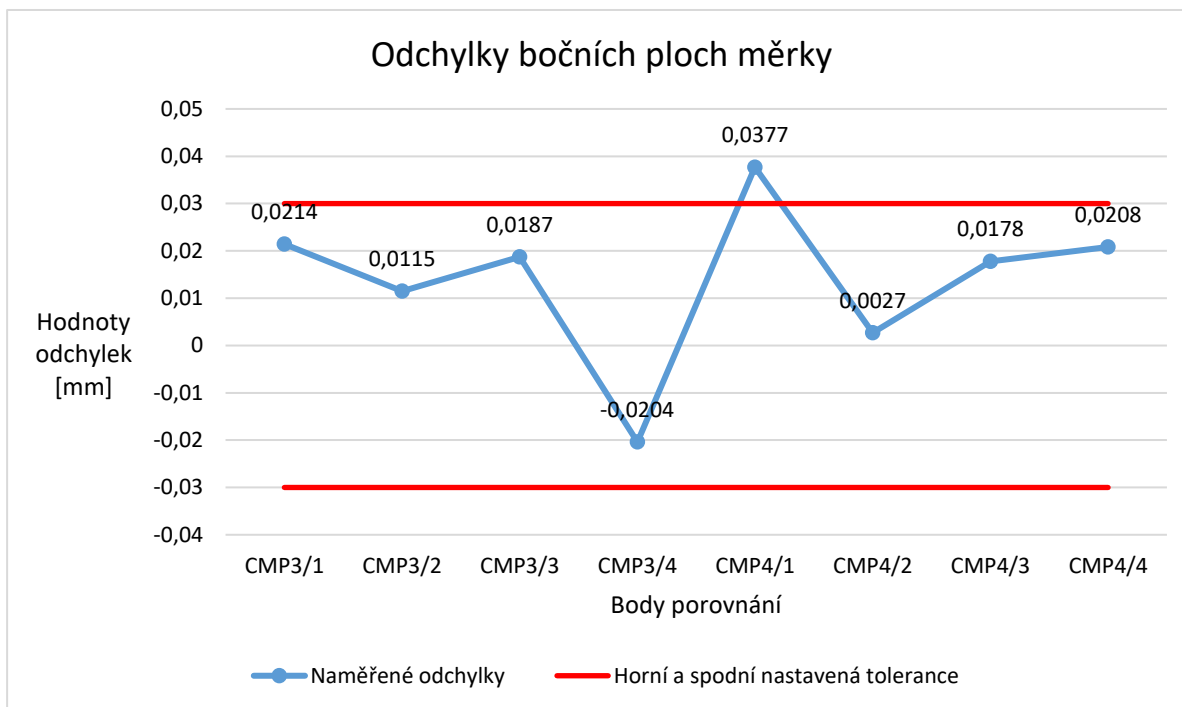
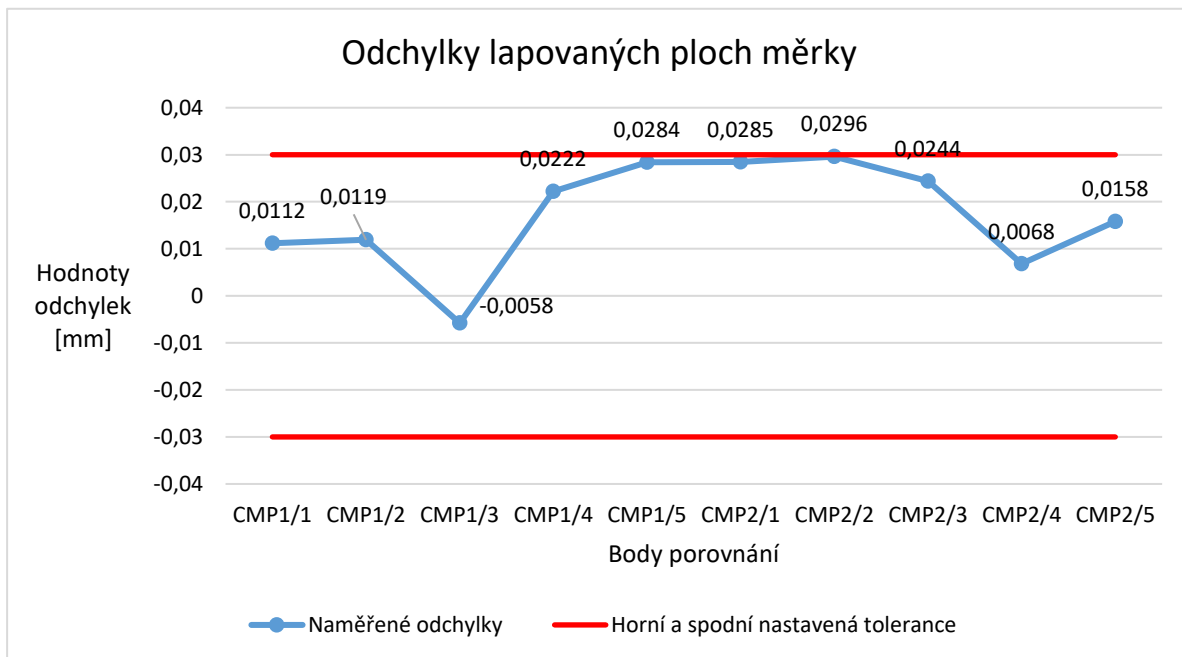
Nastavení skeneru č. 50



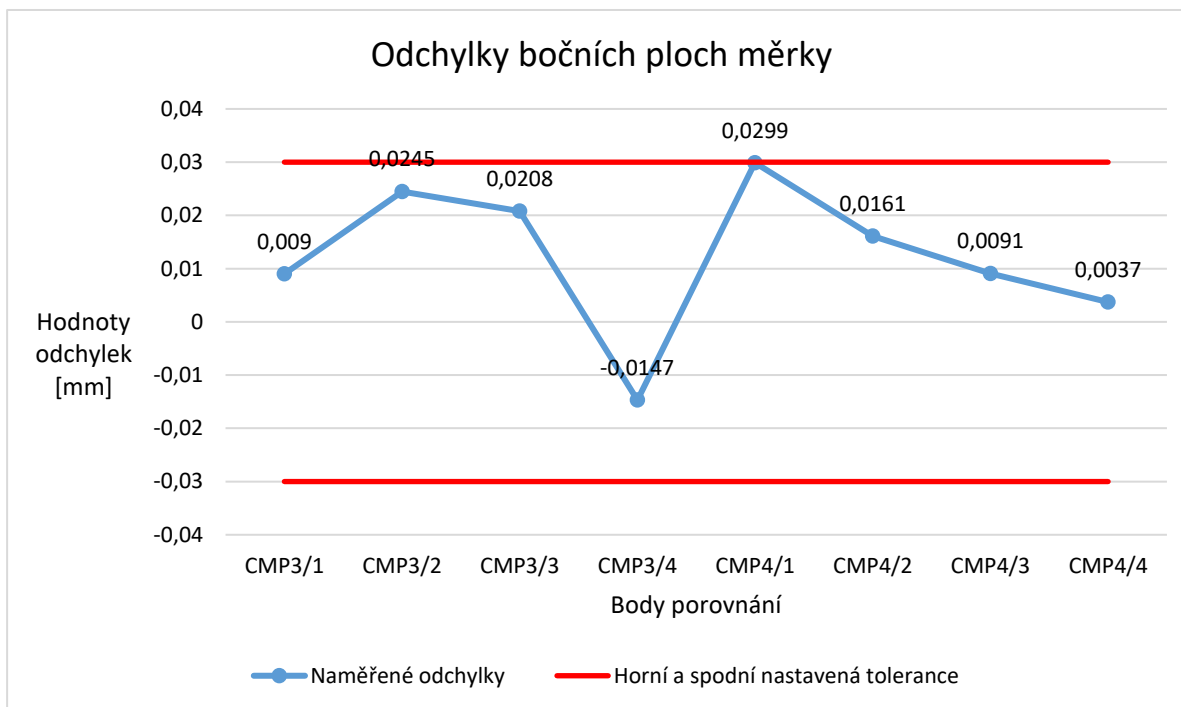
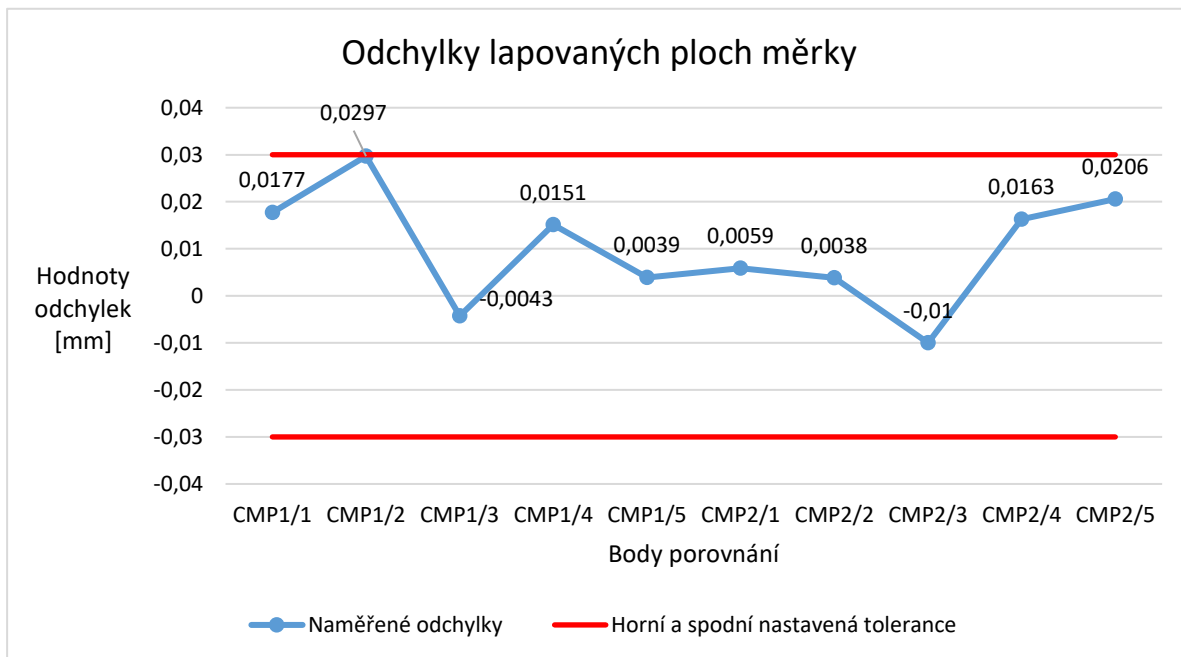
Nastavení skeneru č. 51



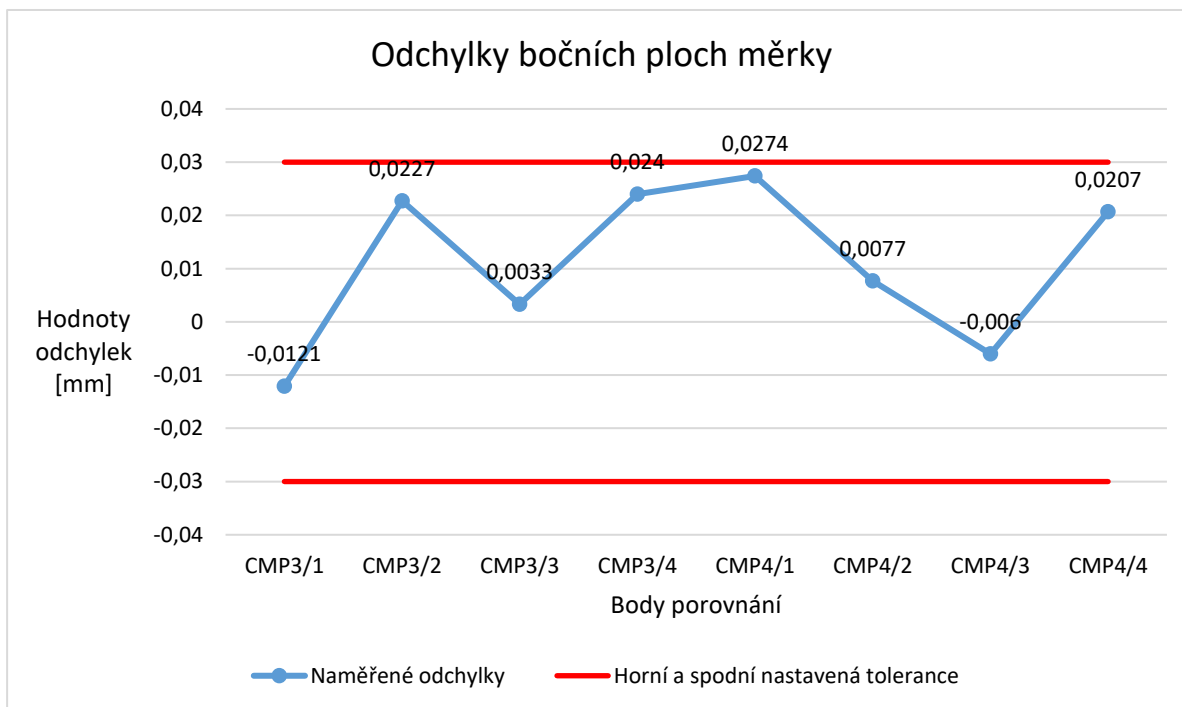
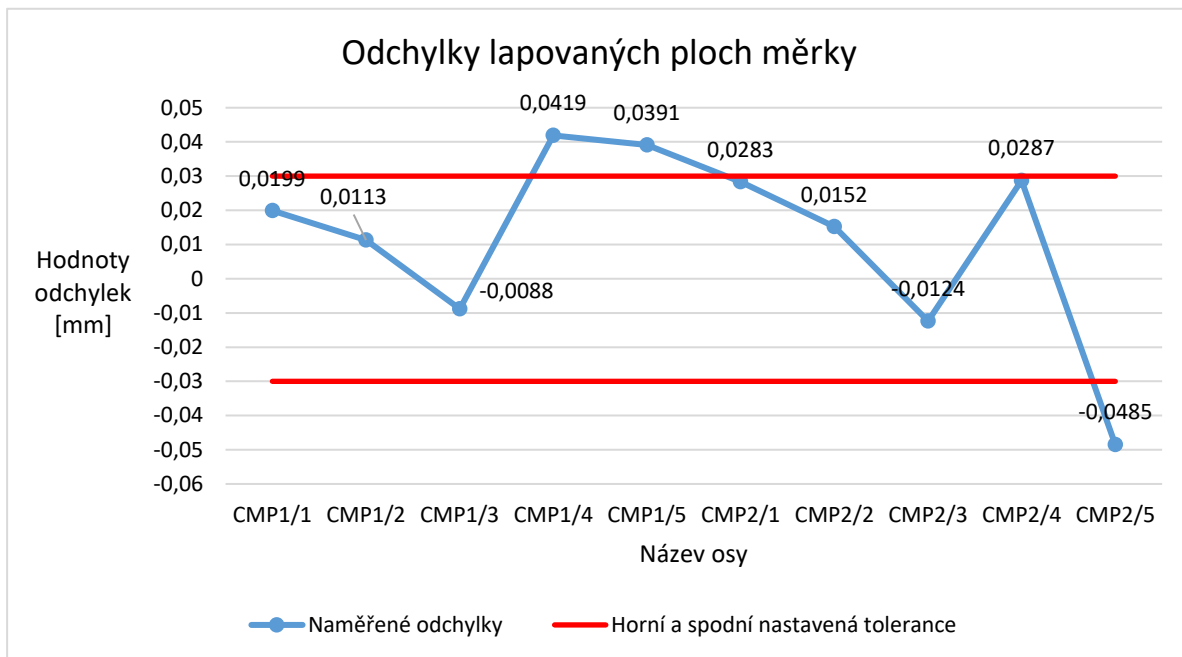
Nastavení skeneru č. 52



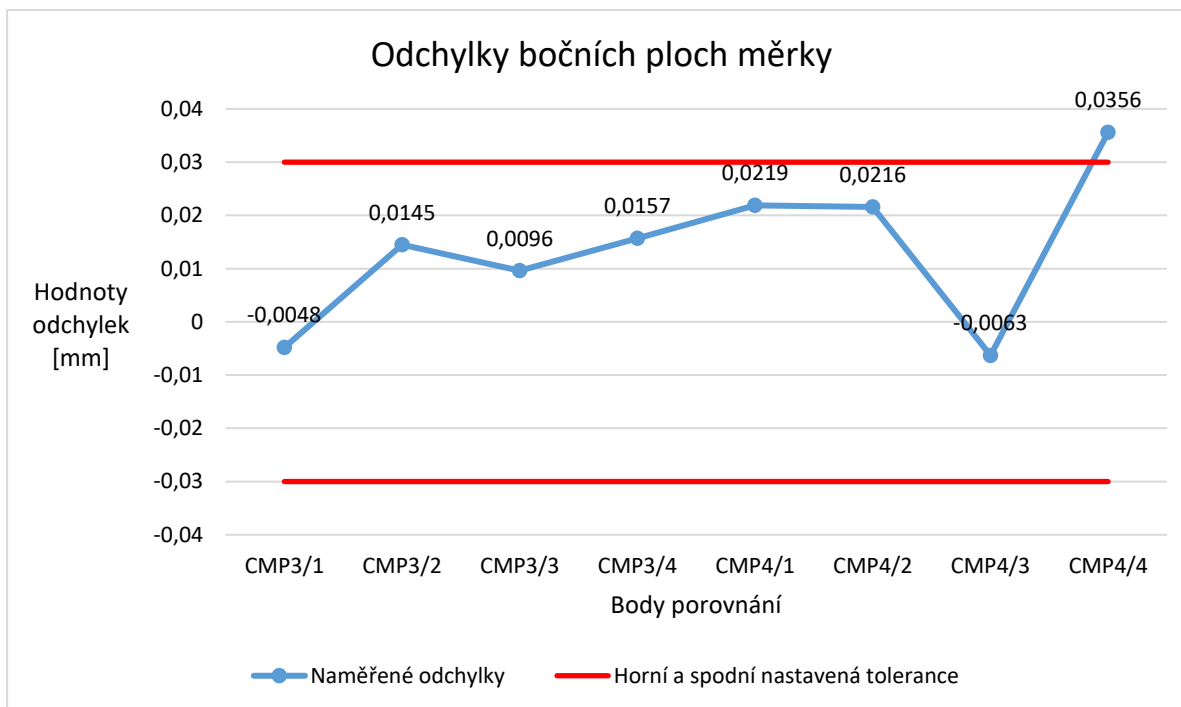
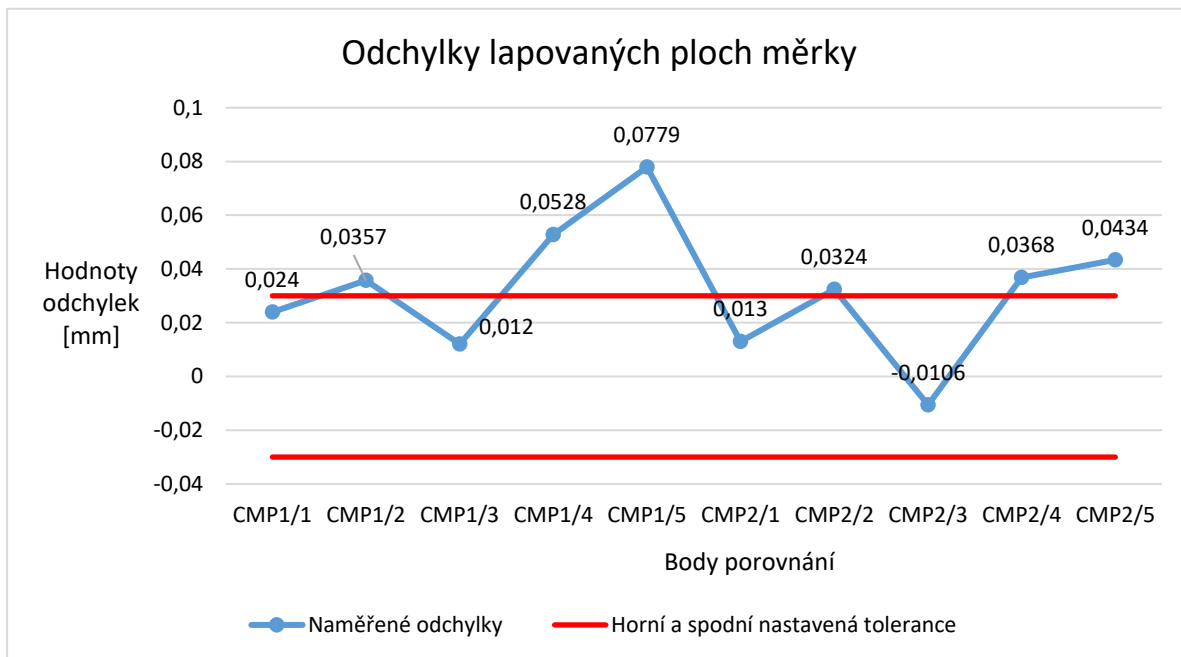
Nastavení skeneru č. 53



Nastavení skeneru č. 54



Nastavení skeneru č. 55



PŘÍLOHA č. 4

Příklad grafického protokolu

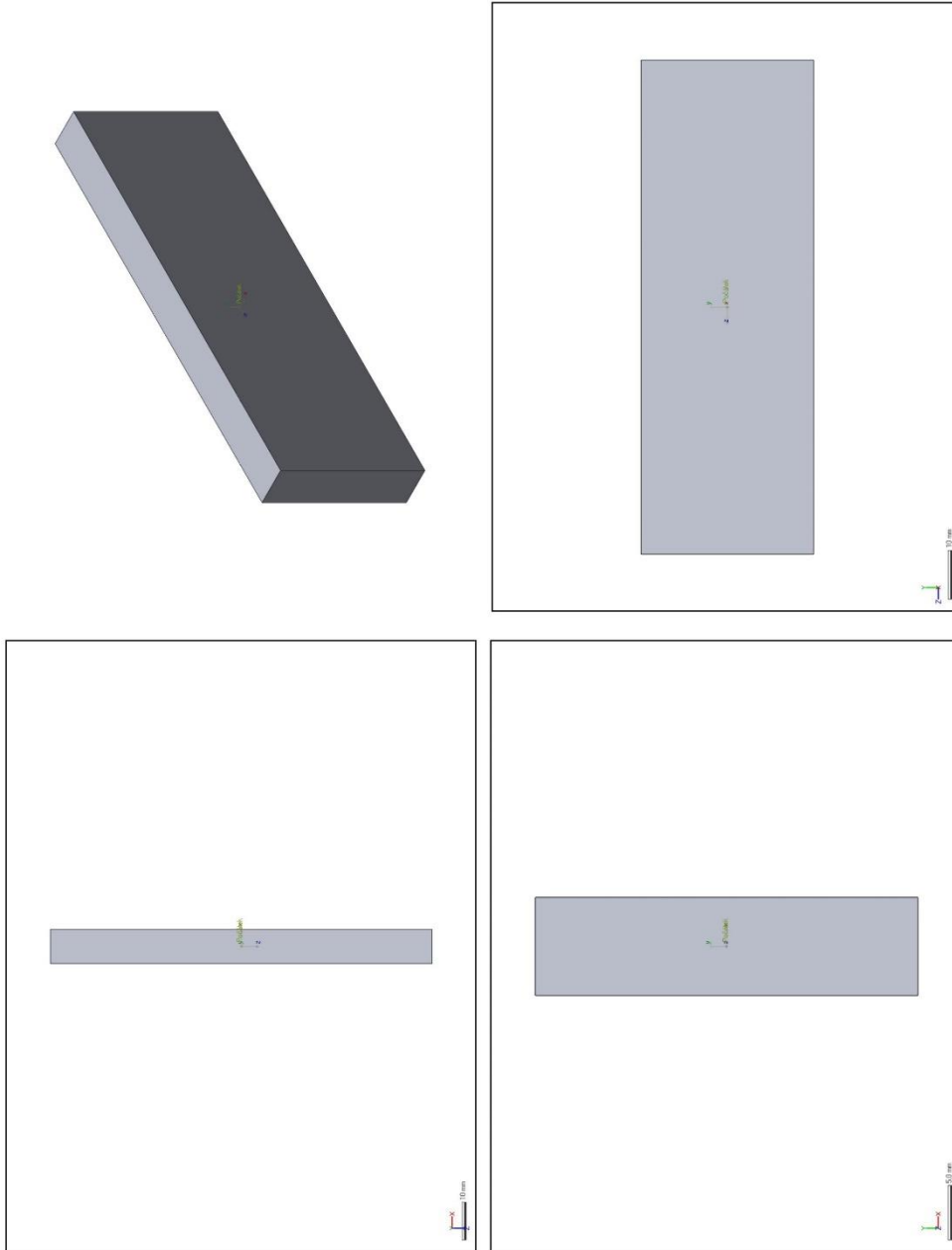


Product Name	Diplomová práce
Part Name	Základní měřka 100mm
Part Number	-
Department	KTO
Inspector	Ladislav Čížek
Date	Apr 22, 2022
Unit	mm

Disclaimer

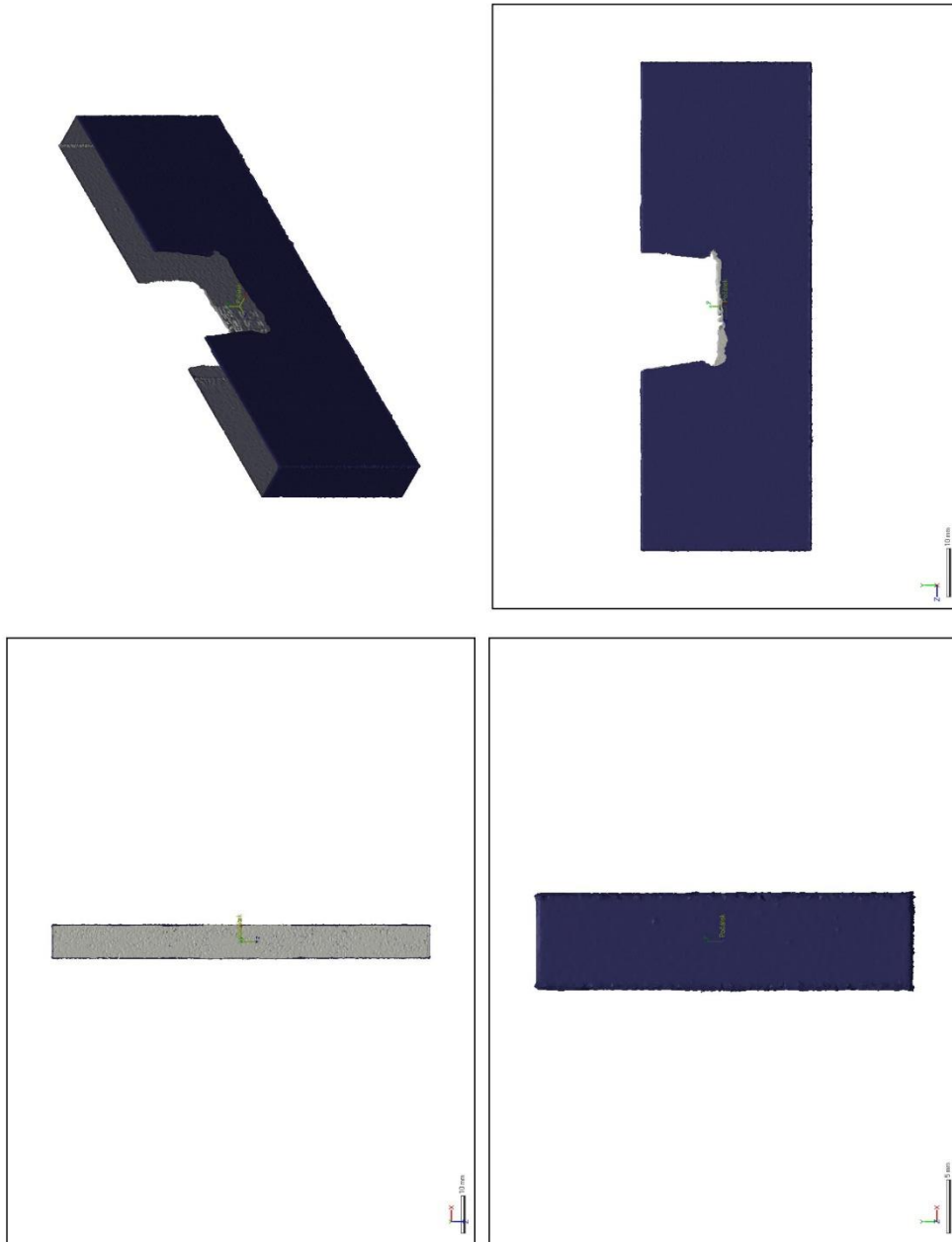
The results of this analysis and forecasts are believed to be reliable but are not to be construed as providing a warranty, including any warranty of merchantability or fitness for purpose, or representation for which 3D Systems, Inc. assumes legal responsibility. Users should undertake sufficient verification and iterative testing to determine the suitability of any information presented. Nothing herein is to be taken as permission, inducement or recommendation by 3D Systems, Inc. to practice any patented invention without a license or to in any way infringe upon the intellectual property rights of any other party.

Výsledná data - 1 : Referenční Data - P_idat vysunut_m1



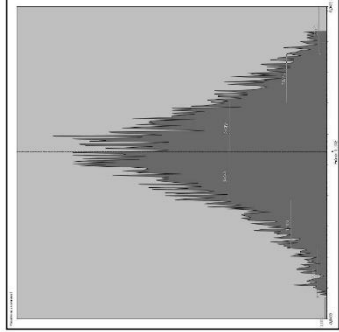
Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm

Výsledná data - 1 : Naměřená data - ZM100X_GSL0.1_v10_15mW_krida

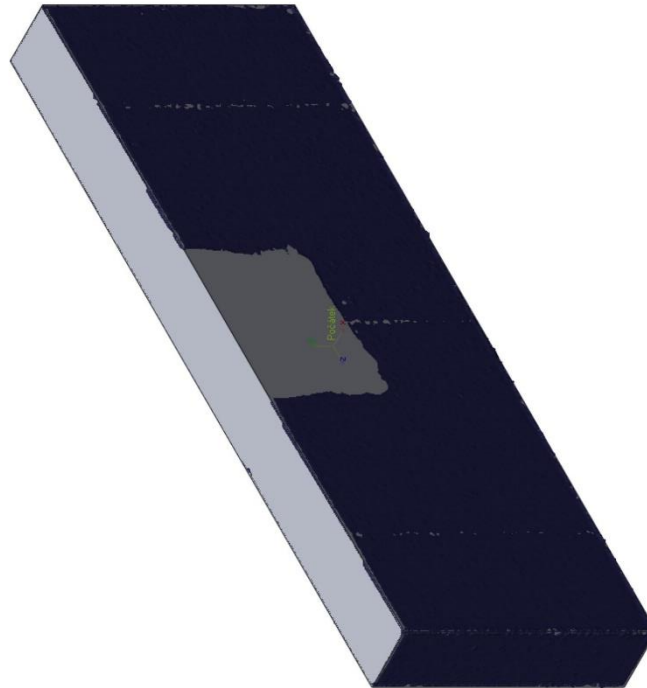


Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm

Výsledná data - 1 : Počáteční zarovnání1

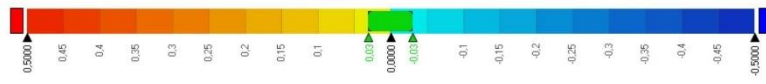
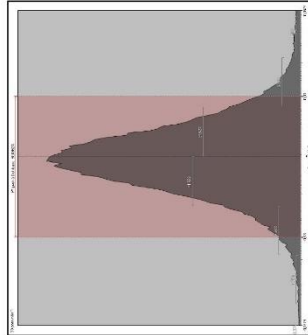


Min.	-0,0384
Max.	0,0384
Avg.	0,0032
RMS	0,0146
Std. Odch.	0,0142
Prom.	0,0002
+Avg.	0,0124
-Avg.	-0,0105



Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm

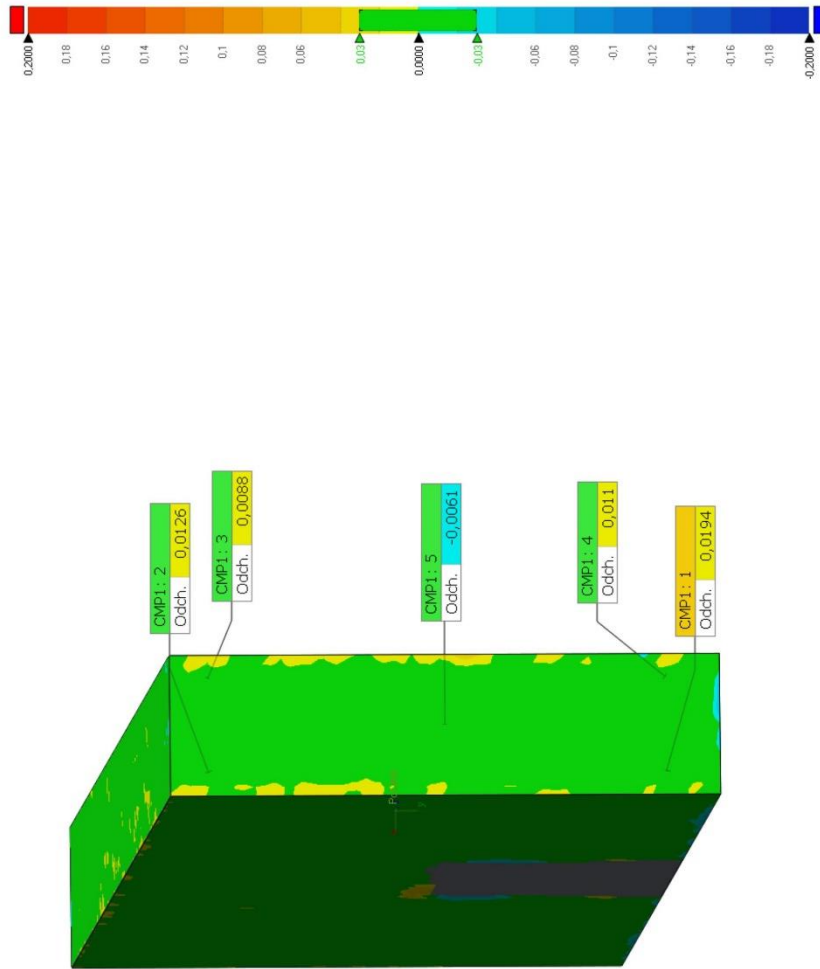
Výsledná data - 1 : 3D porovnání1



Min.	-0,1189
Max.	0,1189
Avg.	0,0045
RMS	0,0214
Std. Odch.	0,021
Prom.	0,0004
+Avg.	0,0157
-Avg.	-0,0126
V Toleranci(%)	90,0962
Mimo Tol.(%)	9,9038
Over Tol.(%)	6,8241
Zahmuto v Tol.(%)	3,0797

Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm

Výsledná data - 1 : CMP1

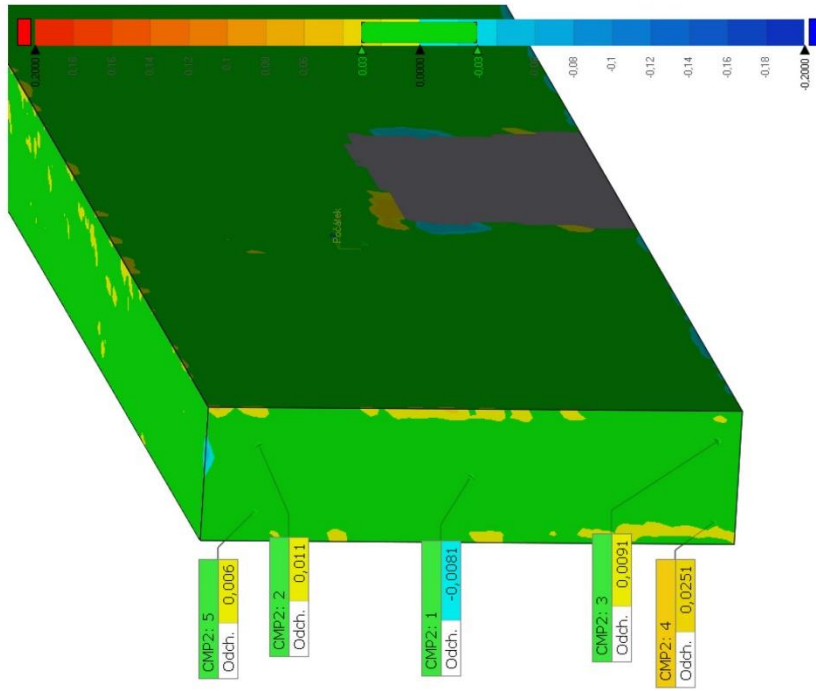


Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm

Název	Min.	Max.	Avg.	RMS	Std. Odch.	Prom.	+Avg.	-Avg.	
CMP1	-0,0223	0,0381	0,0094	0,0145	0,011	0,0001	0,0126	-0,011	
Název	Název výsledku	Tol.	Odch.	Referenční poz.			Měř. Poz.		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP1: 1	Výsledná data - 1	±0,03	0,0194	3	14	50	3	14	50,0194
CMP1: 2	Výsledná data - 1	±0,03	0,0126	3	-15	50	3	-15	50,0126
CMP1: 3	Výsledná data - 1	±0,03	0,0088	-3	-15	50	-3	-15	50,0088
CMP1: 4	Výsledná data - 1	±0,03	0,011	-3	14	50	-3	14	50,011
CMP1: 5	Výsledná data - 1	±0,03	-0,0061	0	0	50	0	0	49,9939

Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm

Výsledná data - 1 : CMP2

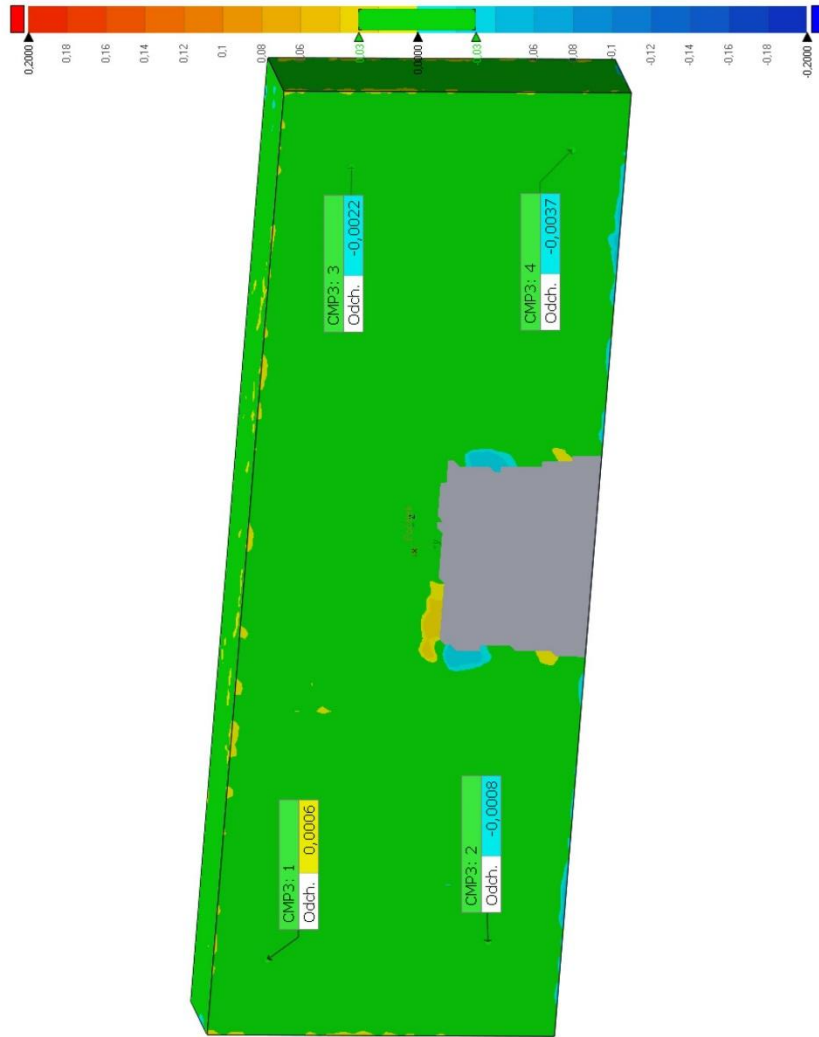


Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm

Název	Min.	Max.	Avg.	RMS	Std. Odch.	Prom.	+Avg.	-Avg.	
CMP2	-0,0198	0,0363	0,0078	0,0144	0,0121	0,0001	0,0127	-0,0092	
Název	Název výsledku	Tol.	Odch.	Referenční poz.			Měř. Poz.		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP2: 1	Výsledná data - 1	±0,03	-0,0081	0	0	-50	0	0	-49,9919
CMP2: 2	Výsledná data - 1	±0,03	0,011	2	-14	-50	2	-14	-50,011
CMP2: 3	Výsledná data - 1	±0,03	0,0091	2,5	16	-50	2,5	16	-50,0091
CMP2: 4	Výsledná data - 1	±0,03	0,0251	-3	16	-50	-3	16	-50,0251
CMP2: 5	Výsledná data - 1	±0,03	0,006	-2,5	-14	-50	-2,5	-14	-50,006

Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm

Výsledná data - 1 : CMP3

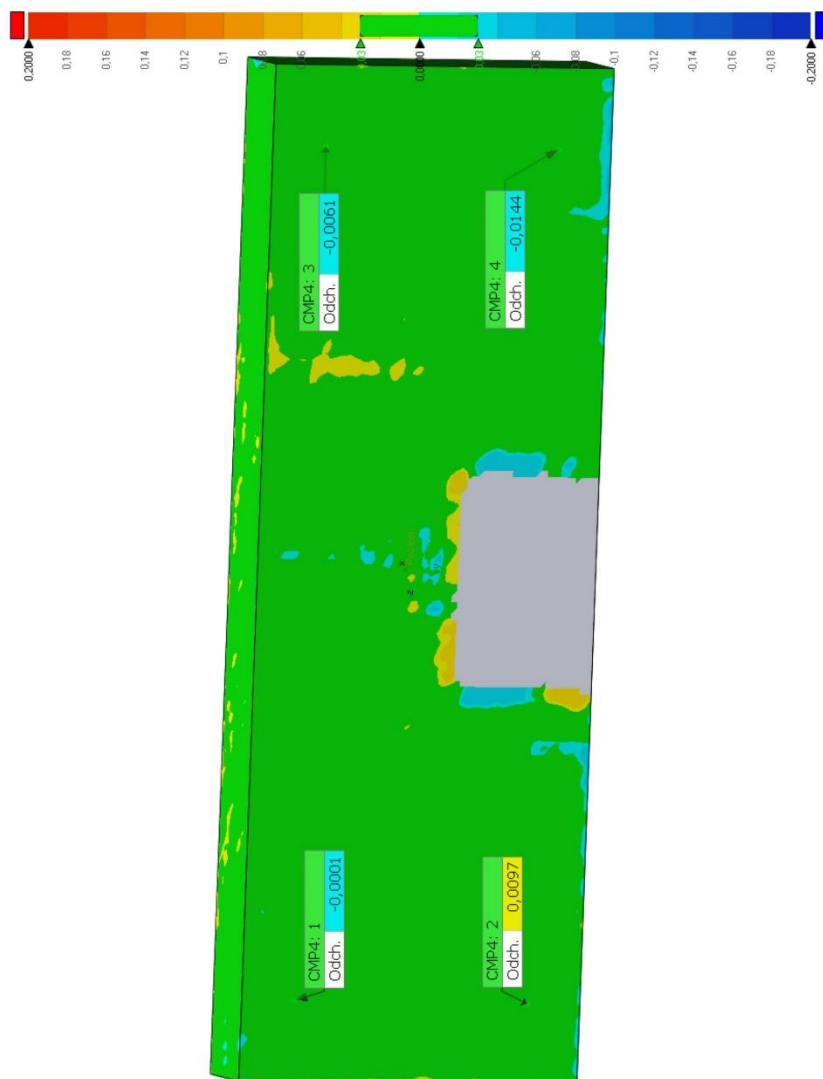


Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm

Název	Min.	Max.	Avg.	RMS	Std. Odch.	Prom.	+Avg.	-Avg.
CMP3	-0,019	0,0239	-0,0016	0,0069	0,0067	0	0,0054	-0,0053
Název	Název výsledku	Tol.	Odch.	Referenční poz.			Měř. Poz.	
				X	Y	Z	X	Y
CMP3: 1	Výsledná data - 1	±0,03	0,0006	4,475	-12	-42	4,4756	-12
CMP3: 2	Výsledná data - 1	±0,03	-0,0008	4,475	10	-40	4,4742	10
CMP3: 3	Výsledná data - 1	±0,03	-0,0022	4,475	-10	42	4,4728	-10
CMP3: 4	Výsledná data - 1	±0,03	-0,0037	4,475	12	44	4,4713	12
								44

Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm

Výsledná data - 1 : CMP4



Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm

Název	Min.	Max.	Avg.	RMS	Std. Odch.	Prom.	+Avg.	-Avg.	
CMP4	-0,0267	0,0245	-0,0028	0,0112	0,0108	0,0001	0,0069	-0,0102	
Název	Název výsledku	Tol.	Odch.	Referenční poz.			Měř. Poz.		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP4: 1	Výsledná data - 1	±0,03	-0,0001	-4,475	-12	42	-4,4749	-12	42
CMP4: 2	Výsledná data - 1	±0,03	0,0097	-4,475	12	42	-4,4847	12	42
CMP4: 3	Výsledná data - 1	±0,03	-0,0061	-4,475	-12	-42	-4,4689	-12	-42
CMP4: 4	Výsledná data - 1	±0,03	-0,0144	-4,475	12	-42	-4,4606	12	-42

Product Name	Diplomová práce	Department	KTO	Date	Apr 22, 2022
Part Name	Základní měřka 100mm	Inspector	Ladislav Čížek	Unit	mm