

Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti i okomitosti 2D mjernog sustava

Tubić, Helena

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:437008>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Helena Tubić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Marko Katić, dipl. ing.

Student:

Helena Tubić

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru, doc. dr.sc. Marku Katiću, na ukazanom povjerenju, korisnim savjetima i pružanju stručne pomoći, kojima mi je uvelike olakšao izradu ovog rada.

Zahvaljujem se i Tomislavu Habeku na pruženoj pomoći te uloženom trudu i vremenu.

Na kraju, posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, bratu i baki na pruženoj podršci i pomoći bez koje ne bih mogla završiti studij. Također, zahvaljujem se prijateljicama Tini i Ivi koje su bile uz mene i pružale mi podršku tijekom cijelog studiranja, a posebno hvala dugogodišnjem dečku Lovri na pruženoj podršci, razumijevanju i ljubavi na svakom koraku studija.

Helena Tubić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **HELENA TUBIĆ** Mat. br.: 0035195597

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerenje odstupanja od pravocrtnosti i okomitosti 2D mjernog sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Straightness and squareness measurement on a 2D measurement system**

Opis zadatka:

U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a izrađena je konstrukcijska baza za 2D mjerni sustav velikih dimenzija (1,8 m x 1,2 m) koja se sastoji od optičkog stola i dvije precizne vodilice s klizačima. Namjena sustava je umjeravanje pravocrtnosti i okomitosti raznih mjerila i etalona duljine. Osnovna pretpostavka za razvoj ove mjerne metode je utvrđivanje odstupanja vođenja na vodilicama i kuta između vodilica. U okviru ovog zadatka potrebno je obraditi sljedeće cjeline:

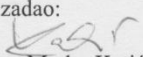
1. Opisati tolerancije oblika i položaja s posebnim naglaskom na odstupanje od pravocrtnosti i okomitosti.
2. Opisati mjerne metode pogodne za utvrđivanje iznosa odstupanja od pravocrtnosti i okomitosti.
3. Provesti ponovljena mjerenja odstupanja od pravocrtnosti i okomitosti vodilica.
4. Utvrditi vremensku stabilnost odstupanja od pravocrtnosti i okomitosti vodilica.
5. Demonstrirati utjecaj utvrđenih odstupanja na odabranom primjeru mjerenja.
6. Zaključak.

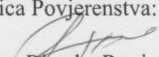
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
17. siječnja 2019.

Rok predaje rada:
21. ožujka 2019.

Predviđeni datum obrane:
27. ožujka 2019.
28. ožujka 2019.
29. ožujka 2019.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Marko Katić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
1.1. Mjeriteljstvo	3
1.2. Pogreške u mjerenju	3
2. TOLERANCIJE OBLIKA I POLOŽAJA	5
2.1. Tolerancije oblika	6
2.1.1. Odstupanje od pravocrtnosti	6
2.1.2. Odstupanje od ravnosti	7
2.1.3. Odstupanje od kružnosti	7
2.1.4. Odstupanje od cilindričnosti	8
2.1.5. Odstupanje od oblika linije	8
2.1.6. Odstupanje od oblika plohe.....	9
2.2. Tolerancije položaja	9
2.2.1. Odstupanje od paralelnosti.....	9
2.2.2. Odstupanje od okomitosti	10
2.2.3. Odstupanje od kuta nagiba.....	10
2.2.4. Odstupanje od lokacije.....	11
2.2.5. Odstupanje od koncentričnosti ili koaksijalnosti	12
2.2.6. Odstupanje od simetričnosti.....	12
3. MJERENJE ODSUPANJA OD PRAVOCRTNOSTI	13
3.1. Analiza dobivenih rezultata	14
3.1.1. Metoda najmanjih kvadrata.....	14
3.1.2. Ponovljena mjerenja i ponovljivost	17
3.1.3. Pogreška pravocrtnosti i rasipanje rezultata.....	18
3.2. Metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti	20
3.2.1. Interferometar.....	20
3.2.2. Autokolimator	26
4. MJERENJE ODSUPANJA OD OKOMITOSTI	30
5. UTJECAJI NA MJERNU NESIGURNOST	32
5.1. Nedovoljna krutost poda	32
5.1.1. Mjerenja izvedena ponovljivim postavljanjem operatera	35
5.1.2. Mjerenja izvedena nasumičnim postavljanjem operatera	37
5.1.3. Usporedba rezultata mjerenja izvedena s ponovljivim i nasumičnim postavljanjem operatera	40

5.2. Ponovljivost pozicioniranja interferometra prilikom mjerenja odstupanja od pravocrtnosti	44
6. MJERENJE Odstupanja od pravocrtnosti u smjeru OSI X.....	45
6.1. Mjerenje horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti	45
6.1.1. Mjerenje interferometrom	45
6.1.1.1. Jednosmjerna mjerenja.....	45
6.1.1.2. Dvosmjerna mjerenja	51
6.1.2. Mjerenje autokolimatorom.....	58
6.1.3. Usporedba mjerenja interferometrom i autokolimatorom	61
6.2. Mjerenje vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti	63
7. MJERENJE Odstupanja od pravocrtnosti u smjeru OSI Y.....	66
7.1. Mjerenje horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti	66
7.1.1. Mjerenje interferometrom	66
7.1.1.1. Jednosmjerna mjerenja.....	66
7.1.1.2. Dvosmjerna mjerenja	71
7.1.2. Mjerenje autokolimatorom.....	74
7.1.3. Usporedba mjerenja interferometrom i autokolimatorom	76
7.2. Mjerenje vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti	78
8. MJERENJE Odstupanja od okomitosti	81
8.1. Mjerenja prije postavljanja lasera i prizme na optički stol	82
8.2. Mjerenja nakon postavljanja lasera i prizme na optički stol.....	85
9. VREMENSKA STABILNOST	89
9.1. Vremenska stabilnost odstupanja od pravocrtnosti.....	89
9.2. Vremenska stabilnost odstupanja od okomitosti.....	91
10. UTJECAJ Odstupanja od pravocrtnosti vodilice na primjeru MJERENJA	92
11. ZAKLJUČAK.....	94
LITERATURA.....	95

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz postupka mjerenja [1].....	1
Slika 2.	Razlika između točnosti i preciznosti [2]	2
Slika 3.	Netočnost mjerenja [3]	2
Slika 4.	Klasifikacija pogrešaka	4
Slika 5.	Tolerancije i simboli [5]	5
Slika 6.	Tolerancija oblika.....	6
Slika 7.	Tolerancijska zona pravocrtности [5].....	6
Slika 8.	Označavanje odstupanja od pravocrtности na nacrtu [5]	6
Slika 9.	Odstupanje od ravnosti [3]	7
Slika 10.	Odstupanje od kružnosti [3]	7
Slika 11.	Odstupanje od cilindričnosti [6]	8
Slika 12.	Odstupanje od oblika linije [7]	8
Slika 13.	Odstupanje od oblika plohe [7]	9
Slika 14.	Tolerancija položaja	9
Slika 15.	Odstupanje od paralelnosti [7]	10
Slika 16.	Odstupanje od okomitosti [7]	10
Slika 17.	Odstupanje od kuta nagiba [7].....	11
Slika 18.	Odstupanje od lokacije [7]	11
Slika 19.	Odstupanje od koaksijalnosti [7].....	12
Slika 20.	Odstupanje od simetričnosti [7]	12
Slika 21.	Mjerenje pravocrtности bazirano na mjerenju duljine [8].....	13
Slika 22.	Mjerenje pravocrtности bazirano na mjerenju kutova [8]	13
Slika 23.	Dijagram rasipanja	14
Slika 24.	Primjer regresijskog pravca.....	14
Slika 25.	Regresijski pravac [5].....	15
Slika 26.	Pogreška nesuosnosti referentne linije i osi predmeta mjerenja [9].....	16
Slika 27.	Odstupanje od pravocrtности i pogreška nesuosnosti	16
Slika 28.	Pogreška nesuosnosti eliminirana	17
Slika 29.	Normalna razdioba [10].....	17
Slika 30.	Pogreška pravocrtности i rasipanje rezultata	19
Slika 31.	Pogreška pravocrtности i rasipanje rezultata kod dvosmjernog mjerenja	19
Slika 32.	Princip rada Michelsonovog interferometra [14]	21
Slika 33.	Linearna postavka Michelsonovog interferometra [14]	21
Slika 34.	Primjer konstruktivne i destruktivne interferencije [16]	22
Slika 35.	Nastajanje i promjena konstruktivne i destruktivne interferencije u Michelsonovom interferometru [17]	23
Slika 36.	Prikaz konstruktivne i destruktivne interferencije na zaslonu [16].....	23
Slika 37.	Izvor pogrešaka u nekompenziranom i kompenziranom interferencijskom sustavu [14]	24
Slika 38.	Konfiguracija reflektora i interferometra za mjerenje horizontalnih odstupanja od pravocrtности [18]	25
Slika 39.	Konfiguracija reflektora i interferometra za mjerenje vertikalnih odstupanja od pravocrtности [18]	25
Slika 40.	Interferometar [18]	25
Slika 41.	Mjerenje pravocrtности autokolimatorom [19]	27

Slika 42.	Princip rada autokolimatora [19].....	27
Slika 43.	Skale za očitavanje kutnog pomaka reflektora [19].....	28
Slika 44.	Vidno polje autokolimatora kada je reflektor nagnut u odnosu na optičku os.....	28
Slika 45.	Vidno polje autokolimatora kada je reflektor okomit na optičku os.....	29
Slika 46.	Računanje odstupanja od okomitosti interferometrom [21].....	30
Slika 47.	Smjer mjerenja pravocrtnosti od optičke prizme [22].....	31
Slika 48.	Smjer mjerenja pravocrtnosti prema optičkoj prizmi [22].....	31
Slika 49.	Vodilica dugačka 1,8 m.....	32
Slika 50.	Reflektor u smjeru osi Y.....	33
Slika 51.	Laser i optička prizma na odgovarajućim stalcima, eksterno u odnosu na stol	33
Slika 52.	Laser i optička prizma postavljeni na stol.....	35
Slika 53.	Usporedba odstupanja od pravocrtnosti dobivenih ponovljivim postavljanjem operatera	36
Slika 54.	Usporedba odstupanja od pravocrtnosti dobivenih nasumičnim postavljanjem operatera	38
Slika 55.	Usporedba rezultata mjerenja izvedena nasumičnim postavljanjem operatera nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol	39
Slika 56.	Usporedba svih rezultata mjerenja	40
Slika 57.	Aritmetička sredina odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja zajedno.....	42
Slika 58.	Aritmetička sredina odstupanja od pravocrtnosti mjerenja izvedena ponovljivim postavljanjem operatera.....	43
Slika 59.	Usporedba aritmetičkih sredina svih mjerenja i mjerenja izvedena ponovljivim postavljanjem operatera.....	43
Slika 60.	Pozicija mjerne letve	44
Slika 61.	Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi X - interferometar.....	45
Slika 62.	Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X prije postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar	49
Slika 63.	Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar	49
Slika 64.	Usporedba aritmetičkih sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar	50
Slika 65.	Smjer OD i PREMA laseru na vodilici u smjeru osi X	51
Slika 66.	Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru OD lasera– interferometar.....	52
Slika 67.	Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru PREMA laseru – interferometar.....	52
Slika 68.	Usporedba aritmetičkih sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti dvosmjernih mjerenja u smjeru osi X – interferometar	54
Slika 69.	Usporedba aritmetičkih sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, u smjeru od lasera - interferometar	55
Slika 70.	Usporedba aritmetičkih sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, u smjeru prema laseru - interferometar	57
Slika 71.	Autokolimator na vodilici 1,8 m	58
Slika 72.	Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi X - autokolimator	59

Slika 73.	Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X – autokolimator	60
Slika 74.	Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X dobivenih mjerenjima s interferometrom i autokolimatorom	61
Slika 75.	Usporedba vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi X	63
Slika 76.	Aritmetička sredina vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X.....	65
Slika 77.	Vodilica dugačka 1,2 m.....	66
Slika 78.	Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi Y – interferometar	67
Slika 79.	Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y, prije postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar.....	69
Slika 80.	Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y, nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar	69
Slika 81.	Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar	70
Slika 82.	Smjer PREMA i OD reflektora na vodilici u smjeru osi Y	71
Slika 83.	Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru PREMA reflektoru – interferometar.....	72
Slika 84.	Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru OD reflektora – interferometar.....	72
Slika 85.	Usporedba aritmetičkih sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti dvosmjernih mjerenja u smjeru osi Y – interferometar	73
Slika 86.	Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi Y - autokolimator	75
Slika 87.	Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X – autokolimator	76
Slika 88.	Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y dobivenih mjerenjima s interferometrom i autokolimatorom	77
Slika 89.	Usporedba vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi Y	79
Slika 90.	Aritmetičke sredine vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y.....	80
Slika 91.	Prikaz mjerenog kuta između vodilica	81
Slika 92.	Odstupanje od okomitosti 1 prije postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru od optičke prizme	82
Slika 93.	Odstupanje od okomitosti 2 prije postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru od optičke prizme	83
Slika 94.	Odstupanje od okomitosti 1 prije postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru prema optičkoj prizmi	83
Slika 95.	Odstupanje od okomitosti 2 prije postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru prema optičkoj prizmi	84
Slika 96.	Odstupanje od okomitosti 1 nakon postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru od optičke prizme	85
Slika 97.	Odstupanje od okomitosti 2 nakon postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru od optičke prizme	86
Slika 98.	Odstupanje od okomitosti 1 nakon postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru prema optičkoj prizmi	86
Slika 99.	Odstupanje od okomitosti 2 nakon postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru prema optičkoj prizmi	87

Slika 100.	Odstupanje od okomitosti 3 nakon postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru prema optičkoj prizmi	87
Slika 101.	Ispitivanje vremenske stabilnosti odstupanja od pravocrtnosti	89
Slika 102.	Induktivno ticalo.....	92
Slika 103.	Pozicija granitnog lineala u odnosu na vodilicu.....	93
Slika 104.	Utjecaj odstupanja od pravocrtnosti vodilice	93

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Analiza mjerenja izvedena ponovljivim postavljanjem operatera	35
Tablica 2.	Analiza za prva 3 mjerenja izvedena nasumičnim postavljanjem operatera, prije postavljanja lasera i prizme na stol.....	37
Tablica 3.	Analiza mjerenja izvedena nasumičnim postavljanjem operatera nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol	38
Tablica 4.	Analiza pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata po skupinama mjerenja	40
Tablica 5.	Analiza rezultata svih mjerenja zajedno – ponovljiva i nasumična postavljanja operatera	41
Tablica 6.	Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi X - interferometar	46
Tablica 7.	Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, u smjeru osi X - interferometar	47
Tablica 8.	Analiza horizontalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih mjerenja u smjeru osi X - interferometar	48
Tablica 9.	Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih dvosmjernih mjerenja u smjeru osi X - interferometar	53
Tablica 10.	Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, u smjeru od lasera - interferometar	54
Tablica 11.	Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, u smjeru prema laseru - interferometar	56
Tablica 12.	Analiza horizontalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih dvosmjernih mjerenja u smjeru osi X - interferometar	57
Tablica 13.	Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru X osi - autokolimator.....	59
Tablica 14.	Analiza horizontalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih mjerenja u smjeru osi X - autokolimator	61
Tablica 15.	Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja s interferometrom i autokolimatorom	62
Tablica 16.	Usporedna tablica horizontalnih pogrešaka pravocrtnosti i rasipanja rezultata dobivenih mjerenjima s autokolimatorom i interferometrom	63
Tablica 17.	Analiza vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi X	64
Tablica 18.	Analiza vertikalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih mjerenja u smjeru osi X	65
Tablica 19.	Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi Y - interferometar	67
Tablica 20.	Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol - interferometar ..	68
Tablica 21.	Analiza horizontalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata po skupinama mjerenja, u smjeru osi Y - interferometar	70
Tablica 22.	Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih dvosmjernih mjerenja u smjeru osi Y - interferometar	73

Tablica 23. Analiza horizontalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih dvosmjernih mjerenja u smjeru osi Y - interferometar	74
Tablica 24. Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru Y osi - autokolimator.....	75
Tablica 25. Analiza horizontalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih mjerenja u smjeru osi X - autokolimator	76
Tablica 26. Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja s interferometrom i autokolimatorom	77
Tablica 27. Usporedna tablica horizontalnih pogrešaka pravocrtnosti i rasipanja rezultata u smjeru osi Y, dobivenih mjerenjima s autokolimatorom i interferometrom.....	78
Tablica 28. Analiza vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi Y	79
Tablica 29. Analiza vertikalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih mjerenja u smjeru osi Y	80
Tablica 30. Odstupanja od okomitosti dobivena prije postavljanja lasera i prizme na stol	84
Tablica 31. Odstupanja od okomitosti dobivena nakon postavljanja lasera i prizme na stol...	88
Tablica 32. Analiza vremenske stabilnosti odstupanja od pravocrtnosti	90
Tablica 33. Analiza vremenske stabilnosti odstupanja od okomitosti	91

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	μm	Nagib pravca
b	μm	Odsječak pravca
B	/	Brojčana vrijednost mjerne veličine
d	μm	Pomak interferometra
k	/	Broj mjernih točaka
L	mm	Krak pomicanja interferometra
n	/	Broj ponovljenih mjerenja
N	/	Broj registriranih resica lasera
OP	μm	Pogreška pravocrtnosti
p	μm	Udaljenost pravca od ishodišta koordinatnog sustava
P_{op}	μm	Prikazano odstupanje od pravocrtnosti
R	μm	Rasipanje rezultata
s_i	μm	Procijenjeno standardno odstupanje
T_k	μm	Tolerancija kružnosti
T_p	μm	Tolerancija pravocrtnosti
T_{ra}	μm	Tolerancija ravnosti
U	μm	Proširena mjerna nesigurnost
x	μm	Dobiveno odstupanje od pravocrtnosti
X	/	Mjerna veličina
X_{dm}	/	Vrijednost mjerne veličine dobivena mjerenjem
$\bar{x}_i$	μm	Aritmetička sredina
X_m	/	Usvojena mjerna veličina
X_0	/	Stvarna vrijednost mjerne veličine
$\bar{x} + 2s$	μm	Maksimalno odstupanje od pravocrtnosti s razinom povjerenja od približno 95%
$\bar{x} - 2s$	μm	Minimalno odstupanje od pravocrtnosti s razinom povjerenja od približno 95%
α	"	Kutno odstupanje od pravocrtnosti
δ	μm	Udaljenost točke odstupanja od pravocrtnosti, od pravca
Δ	μm	Ukupno odstupanje od pravocrtnosti
ΔX	μm	Apsolutna pogreška
ΔX_r	%	Relativna pogreška
λ	μm	Valna duljina

SAŽETAK

U ovom radu utvrđena su odstupanja od pravocrtnosti i okomitosti dviju preciznih vodoravnica, smještenih na optičkom stolu u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. U današnje doba, točna i precizna mjerenja vrlo su bitna u svim granama industrije. Zahtjevi industrije sve su veći te su poboljšanja mjernih alata neizbježna. U uvodnom dijelu rada opisane su tolerancije oblika i položaja, s posebnim naglaskom na pravocrtnosti i okomitost te su objašnjeni mjerni alati koji se koriste u radu.

U eksperimentalnom dijelu rada, za mjerenja su upotrijebljena dva različita mjerna alata: autokolimator i laserski mjerni sustav, odnosno interferometar. Mjerenja su ponovljena nekoliko puta, kroz vremenski period od nekoliko mjeseci, kako bi se kvalitetno mogla izraziti preciznost i stabilnost vođenja. Tijekom izvođenja mjerenja, utvrđeno je da pod u laboratoriju nije dovoljno krut, te je zbog toga u radu definiran i koliki utjecaj ta nedovoljna krutost poda ima na rezultate mjerenja.

Ključne riječi: mjerenje, pravocrtnost, odstupanje od pravocrtnosti, okomitost, odstupanje od okomitosti, interferometar, autokolimator

SUMMARY

In this paper, straightness and squareness deviations of the two guides, located on the optical table in the Laboratory for precision length measurement at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, will be measured. In today's world, accurate measurements are very important in all branches of the industry. Industry requirements are increasing and improvements in measuring tools are inevitable. The introductory part of the paper describes the tolerances of shape and position, with particular emphasis on straightness and squareness, and the measurement tools used in the work are explained.

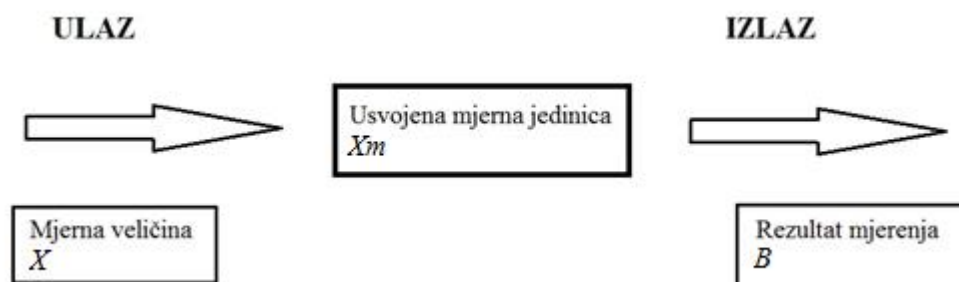
In the experimental part of the work, two different measuring tools were used for the measurement: autocollimator and laser measuring system, interferometer. Measurements were repeated several times over a period of several months, in order to qualitatively express the precision and stability of the guidance. During the measurement, it was found that the floor in the laboratory was not rigid enough and therefore the paper tries to find out how much impact the floor stiffness has on the measurement results.

Key words: measurement, straightness, straightness deviations, squareness, squareness deviations, interferometer, autocollimator

1. UVOD

Prva mjerenja u prošlosti izvodila su se na tržnicama, pri raspodjeli ratnoga plijena te pri razmjeni dobara i usluga. Također je tada važno bilo i mjerenje zemljišta te mjerenje vremena. Mjerila su se najprije duljina, površina, obujam, masa, odnosno težina, i vrijeme, odnosno trajanje, te se prebrojavao broj komada neke cjeline.

Mjerenje predstavlja proces eksperimentalnog dobivanja jedne ili više vrijednosti neke veličine. Postoje tri vrste mjernih metoda: posredno, diferencijsko i izravno mjerenje. Posredno mjerenje je metoda prema kojoj se mjerenjem drugih veličina, koje su funkcijski povezane sa željenom mjernom veličinom, određuje vrijednost željene mjerne veličine. Diferencijska mjerna metoda je metoda u kojoj se uspoređuju mjerna veličina i istovrsna veličina poznate vrijednosti te se zatim mjeri razlika tih dviju vrijednosti. Izravno mjerenje je usporedba mjerne veličine s mjernom jedinicom, kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Prikaz postupka mjerenja [1]

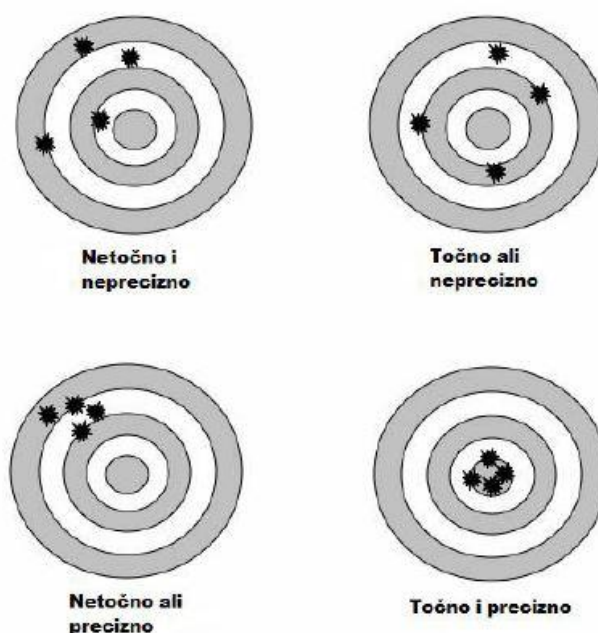
Mjerna veličina je veličina koja se mjeri. Ona je B puta manja ili veća od usvojene mjerne jedinice X_m :

$$X = B \cdot X_m \quad (1)$$

gdje B označava brojčanu vrijednost mjerne veličine, a X_m usvojenu mjernu jedinicu.

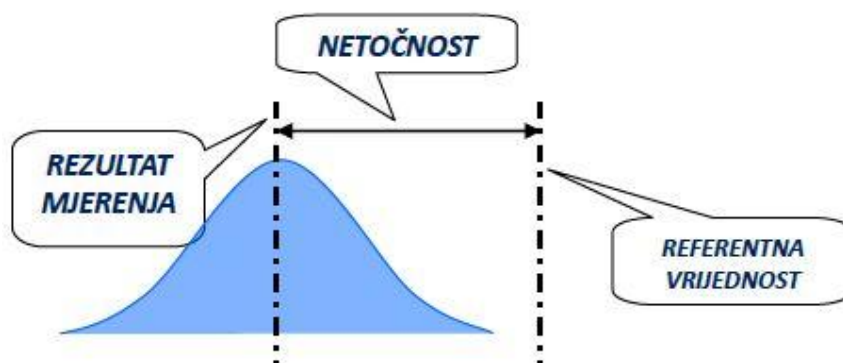
Mjerna jedinica je dogovorena vrijednost mjerne veličine s kojom se pri mjerenju uspoređuju sve druge istovrsne veličine. Danas postoje međunarodni dogovori, temeljeni na normama i zakonima, koji određuju nazive, vrijednosti, oznake i uporabu mjernih jedinica.

U mjerenju postoji nekoliko vrlo bitnih pojmova: točnost, preciznost i ponovljivost. Točnost označava bliskost rezultata mjerenja i usvojene referentne vrijednosti, dok preciznost označava bliskost između rezultata nezavisnih mjerenja dobivenih pod istim, unaprijed određenim, uvjetima (Slika 2).



Slika 2. Razlika između točnosti i preciznosti [2]

Netočnost se definira kao odstupanje rezultata mjerenja od referentne vrijednosti (Slika 3). Referentna vrijednost se temelji na srednjoj vrijednosti rezultata više mjerenja provedenih u istim uvjetima s istom opremom.



Slika 3. Netočnost mjerenja [3]

Ponovljivost je usko slaganje između rezultata više mjerenja iste mjerne veličine pri istim mjernim uvjetima.

1.1. Mjeriteljstvo

Mjeriteljstvo je znanost o mjerenju i njegovoj primjeni. Dijeli na 3 glavna područja:

1. Zakonsko mjeriteljstvo – dio mjeriteljstva uređen zakonom i drugim propisima u cilju uspostave povjerenja u rezultate mjerenja; odnosi se na djelatnosti koje su rezultat zahtjeva iz propisa,
2. Znanstveno mjeriteljstvo – dio mjeriteljstva koje se bavi problemima koji su zajednički za sva mjeriteljska pitanja bez obzira na mjerenu veličinu; obuhvaća opće teoretske i praktične probleme koji se tiču mjernih jedinica,
3. Industrijsko mjeriteljstvo – dio mjeriteljstva koje se bavi mjerenjima u proizvodnji i upravljanju kakvoćom; obuhvaća postupke umjeravanja, razdoblja umjeravanja, upravljanje mjernim procesima itd. [4]

1.2. Pogreške u mjerenju

Sva mjerenja podliježu pogreškama. Pogreška u mjerenju označava odstupanje dobivene vrijednosti mjerne veličine od prave, stvarne vrijednosti. Takvo odstupanje može se izraziti u apsolutnom i relativnom iznosu, pa prema tome postoje dvije vrste pogrešaka:

- apsolutna i
- relativna pogreška.

Apsolutna pogreška ΔX označava odstupanje vrijednosti dobivene mjerenjem X_{dm} od stvarne vrijednosti X_0 . Ova greška definirana je kao pozitivna vrijednost razlike parametara X_{dm} i X_0 i izražena je u mjernoj jedinici mjerene veličine.

$$\Delta X = |X_0 - X_{dm}| \quad (2)$$

Relativna pogreška ΔX_r označava omjer apsolutne pogreške ΔX i mjerne veličine X_0 . Najčešće je izražena u postocima.

$$\Delta X_r = \frac{\Delta X}{X_0} \cdot 100 = \frac{|X_0 - X_m|}{X_0} \cdot 100 \quad (3)$$

Najčešće pogreške u mjerenju, odnosno uzroci tih grešaka su:

- nepravilno rukovanje s mjernim uređajem zbog nedovoljnog poznavanja uređaja,
- neispravnost mjernog uređaja,
- okolina u kojoj se izvode mjerenja, odnosno nemogućnost ostvarenja potpuno istih uvjeta za sva mjerenja (tlak, temperatura, osvjetljenje itd.) i
- neutvrđeni uzroci koji su prisutni kod mnogih mjerenja, a stvaraju veliki problem zato što se takvim pogreškama ne zna uzrok zbog čega nisu ni predvidive.

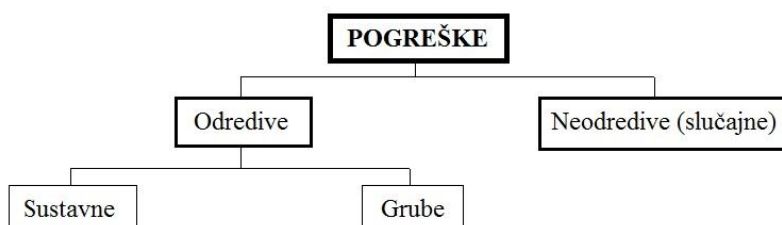
Postroje tri vrste pogrešaka u mjerenju s obzirom na karakter:

1. sustavne pogreške,
2. slučajne pogreške i
3. grube pogreške.

Sustavne pogreške su pogreške koje nastaju kao posljedica loše odabrane mjerne metode ili korištene mjerne opreme. Karakteristika takvih pogrešaka je da ostaju nepromjenjive i stabilne, ili se mijenjaju na predvidiv način, pri ponavljanju mjerenja. Posljedica ovih pogrešaka je netočnost rezultata mjerenja.

Slučajne pogreške su pogreške kojima je nepoznat uzrok nastajanja. Pri ponavljanju mjerenja se mijenjaju na nepredvidiv način. Posljedica ovih pogrešaka je rasipanje rezultata mjerenja, odnosno nepreciznost.

Grube pogreške su pogreške koje nastaju iz raznih razloga, a neki od njih su: nepravilno spajanje ili korištenje mjernog uređaja, neispravnost mjernog uređaja, pogreške pri očitavanju, a često se radi i o osobnoj pogrešci mjeritelja. Karakteristika ovakvih pogrešaka je da vrijednosti dobivene mjerenjima bitno odstupaju od ostalih rezultata. Kao posljedicu ovakvih pogrešaka, mjerenja u kojima su te pogreške dobivene moraju se izbaciti iz analize.



Slika 4. Klasifikacija pogrešaka

2. TOLERANCIJE OBLIKA I POLOŽAJA

Tolerancije mjera dozvoljavaju odstupanja stvarnih mjera od propisane veličine. Koriste se jer u praksi nije moguća apsolutno točna izrada, a nije ni neophodna za pravilno funkcioniranje proizvedenog stroja.

Strojni dijelovi su u većini slučajeva sastavljeni od različitih geometrijskih oblika, kao što su: kružnica, konus, ravna ploha, valjak itd. Da bi strojni dio bio ispravan, potrebno je očuvati međusobni položaj svih geometrijskih oblika od kojih se sastoji. Potrebno je voditi računa o paralelnosti, okomitosti, simetričnosti, kutu, koncentričnosti itd.

Osim poznatih tolerancija dužinskih mjera, postoje i tolerancije oblika i položaja (Slika 5).

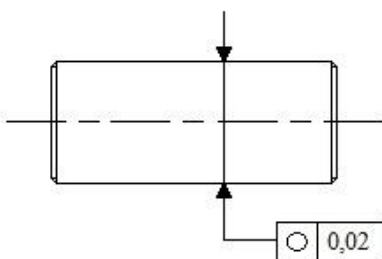
TOLERANCIJE OBLIKA		TOLERANCIJE POLOŽAJA		SLOŽENE TOLERANCIJE	
Karakteristika	Simbol	Karakteristika	Simbol	Karakteristika	Simbol
Pravocrtnost		Paralelnost		Netočnost okretanja	
Ravnoća		Okomitost		Radijalna netočnost okretanja	
Kružnost		Kut nagiba		Aksijalna netočnost okretanja	
Cilindričnost		Lokacija			
Oblik linije		Koncentričnost			
Oblik površine		Simetričnost			

Slika 5. Tolerancije i simboli [5]

2.1. Tolerancije oblika

Granice tolerancijskog prostora su zamišljene plohe ili konture idealnog geometrijskog oblika između kojih se treba nalaziti stvarna kontura.

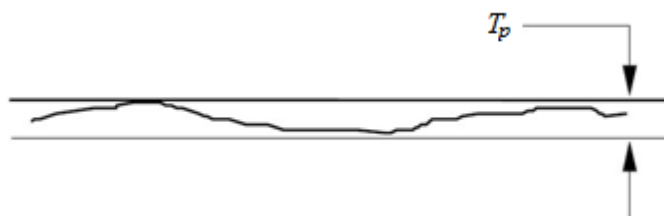
Primjer oznake tolerancije oblika prikazan je na slici 6. Sastoji se od dvodijelnog pravokutnika. U lijevom dijelu pravokutnika nalazi se oznaka vrste odstupanja, a u desnom dijelu dopuštena vrijednost tog odstupanja.



Slika 6. Tolerancija oblika

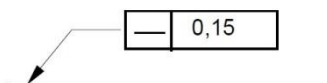
2.1.1. Odstupanje od pravocrtnosti

Pravocrtnost je stanje u kojem su sve točke na istom pravcu (Slika 7). Dopušteno odstupanje od pravocrtnosti, odnosno tolerancija pravocrtnosti T_p , određena je s udaljenošću između dva pravca koji se nalaze u istoj ravnini.



Slika 7. Tolerancijska zona pravocrtnosti [5]

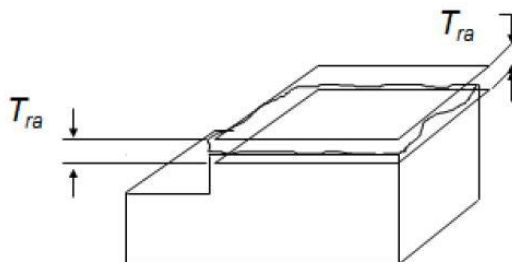
Na nacrtu, odstupanje od pravocrtnosti prikazuje se u pogledu u kojemu je element koji treba kontrolirati prikazan kao ravna linija. Oznaka tolerancije oblika i položaja pridružuje se odgovarajućoj liniji pomoću strelice (Slika 8).



Slika 8. Označavanje odstupanja od pravocrtnosti na nacrtu [5]

2.1.2. Odstupanje od ravnosti

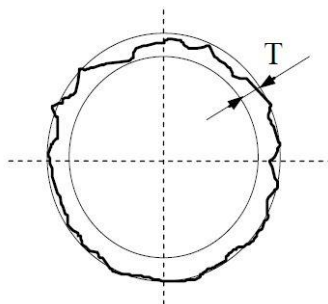
Ravnost je stanje površine kod koje su sve točke na istoj ravnini. Dopušteno odstupanje od ravnosti određeno je prostorom između dviju ravnina koje su međusobno udaljene za iznos dopuštenog odstupanja T_{ra} (Slika 9). [3]



Slika 9. Odstupanje od ravnosti [3]

2.1.3. Odstupanje od kružnosti

Kružnost se odnosi na stanje kružne linije ili površine kružnog dijela, kod kojeg su sve točke na liniji ili na obodu poprečnog presjeka dijela jednako udaljene od središnje točke. Odstupanje od kružnosti T_k je radijalna širina prstenaste površine između dvije komplanarne, međusobno koncentrične, kružnice (Slika 10). [3]



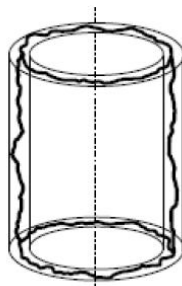
Slika 10. Odstupanje od kružnosti [3]

Da bi element zadovoljio uvjet kružnosti, linija oblika mora se nalaziti unutar te dvije granične, međusobno koncentrične, kružnice.

2.1.4. Odstupanje od cilindričnosti

Cilindričnost se odnosi na stanje površine koja tvori cilindar, pri čemu su elementi površine u presjecima paralelnim s osi cilindra ravni i paralelni, a u presjecima okomitim na os cilindra okrugli.

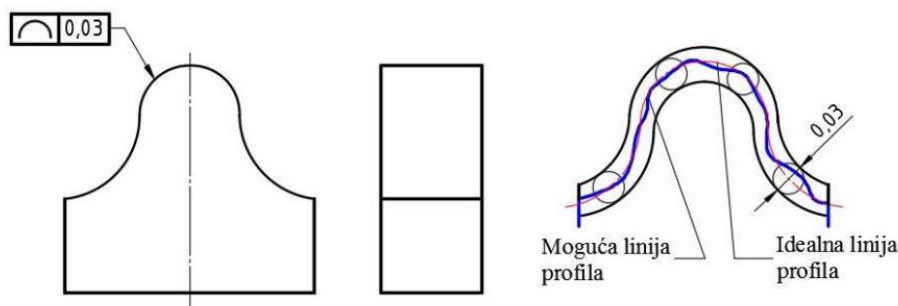
Odstupanje od cilindričnosti je prostor između dva međusobno koaksijalna cilindra, a sve točke s površine promatranog cilindra moraju ležati unutar tog prostora. [6]



Slika 11. Odstupanje od cilindričnosti [6]

2.1.5. Odstupanje od oblika linije

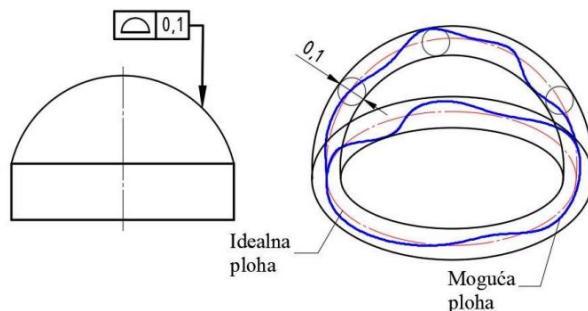
Ovim zahtjevom određuje se oblik linije svakog pojedinog poprečnog presjeka tijela. Zona tolerancija je površina između dviju linija koje obuhvaćaju kružnicu s promjerom jednakim zahtijevanoj toleranciji (Slika 12). Središta tih kružnica nalaze se na geometrijski idealnoj liniji. [7]



Slika 12. Odstupanje od oblika linije [7]

2.1.6. Odstupanje od oblika plohe

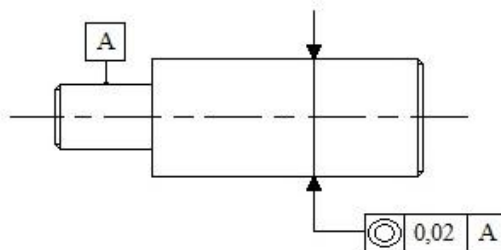
Ovim zahtjevom određuje se oblik neke plohe koja se mora nalaziti u prostoru između dviju ploha koje obuhvaćaju kugle promjera jednakog zahtijevanoj toleranciji, čija se središta nalaze na geometrijski idealnoj plohi (Slika 13). [7]



Slika 13. Odstupanje od oblika plohe [7]

2.2. Tolerancije položaja

Tolerancije položaja osi i ploha strojnih dijelova dopunjuju tolerancije oblika s tim što se definiraju u odnosu na neku referentnu os ili plohu (Slika 14).



Slika 14. Tolerancija položaja

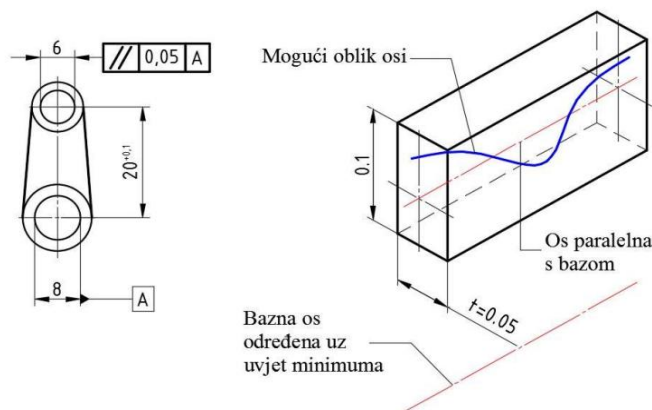
Referentna os ili ploha se označava posebnim slovom. Oznaka tolerancije položaja sastoji se od tri dijela. U lijevom dijelu pravokutnika nalazi se oznaka vrste odstupanja, u srednjem dijelu dopuštena vrijednost tog odstupanja, a u desnom dijelu se definira referentna ploha.

2.2.1. Odstupanje od paralelnosti

Postoji više mogućnosti određivanja zahtjeva za paralelnost na nekom strojnom dijelu (paralelnost osi prema osi, paralelnost osi prema ravni, paralelnost plohe prema ravni, paralelnost plohe prema plohi).

U slučaju zahtjeva za paralelnosti osi prema osi, potrebno je propisati neku baznu os prema kojoj se traži paralelnost. Bazna os određuje se uz uvjet minimuma. Zone tolerancije mogu biti određene kvadrom, valjkom ili dvjema ravninama. [7]

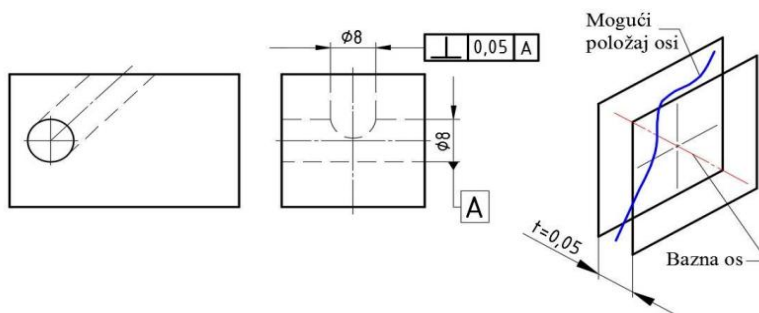
Na slici 15 prikazan je primjer zona tolerancije određenih dvjema ravninama.



Slika 15. Odstupanje od paralelnosti [7]

2.2.2. Odstupanje od okomitosti

Kod okomitosti također postoji više mogućnosti određivanja zahtjeva, a ovdje će se spomenuti okomitost osi prema osi. Zona tolerancije je prostor između dviju ravnina koje su okomite na baznu os. [7]

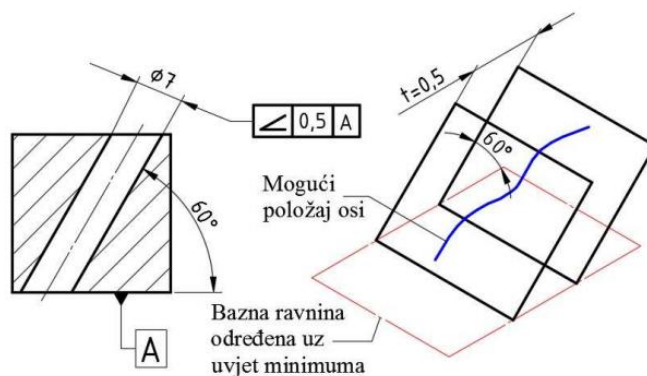


Slika 16. Odstupanje od okomitosti [7]

2.2.3. Odstupanje od kuta nagiba

Postoje dva moguća slučaja kod toleriranja kuta nagiba: kut nagiba prema pravcu ili ravnini i kut nagiba plohe prema pravcu ili ravnini.

Kod kuta nagiba prema pravcu ili ravnini, jedina moguća zona tolerancije je prostor između dviju paralelnih ravnina koje su pod traženim kutem u odnosu na bazni pravac ili ravninu (Slika 17). [7]

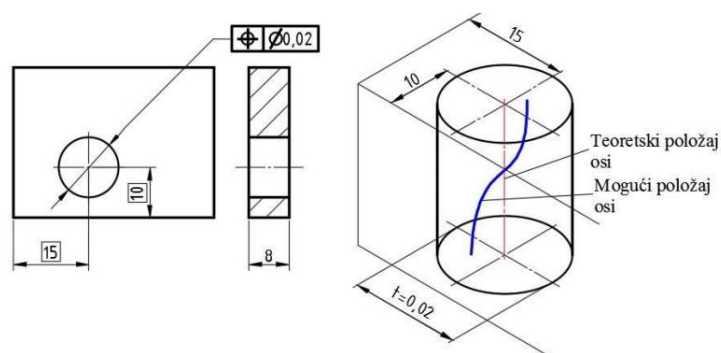


Slika 17. Odstupanje od kuta nagiba [7]

Kod kuta nagiba plohe prema pravcu ili ravnini, zona tolerancije je prostor između dviju paralelnih ravnina koje zatvaraju propisani kut s baznim pravcem ili ravninom. [7]

2.2.4. Odstupanje od lokacije

Uz primjenu tolerancije lokacije obavezno se primjenjuju i teoretske mjere kojima se određuje teoretski položaj elementa. Zona tolerancije može biti određena valjkom što je i najčešće primjenjiv slučaj (oznaka Φ uz toleranciju). Prilikom primjene tolerancije lokacije mogu se, a i ne moraju, koristiti baze. U slučaju kad se ne koriste baze, položaj zone tolerancije se određuje prema teoretskim linijama na crtežu (Slika 18). [7]

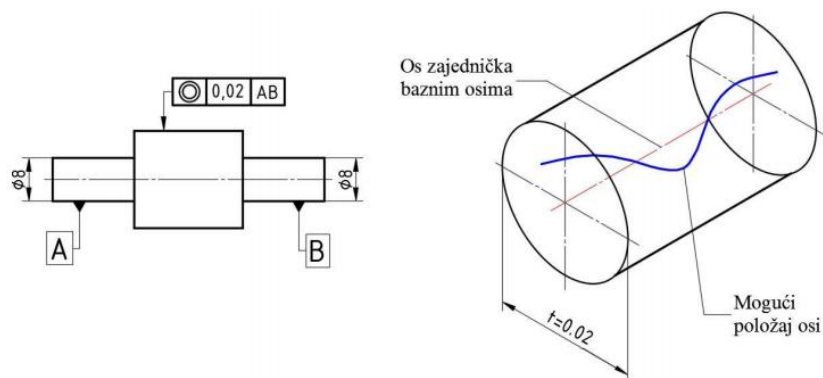


Slika 18. Odstupanje od lokacije [7]

U slučaju kad se koriste baze, položaj zone tolerancije se određuje tako da baza služi kao ishodište koordinatnog sustava te se onda prema njoj dalje određuje lokacija ostalih elemenata. [7]

2.2.5. Odstupanje od koncentričnosti ili koaksijalnosti

Koncentričnost je zahtjev da dva kruga imaju zajedničko središte, a koaksijalnost je zahtjev da dva valjka imaju zajedničku os. Simbol za oba zahtjeva su isti. [7]



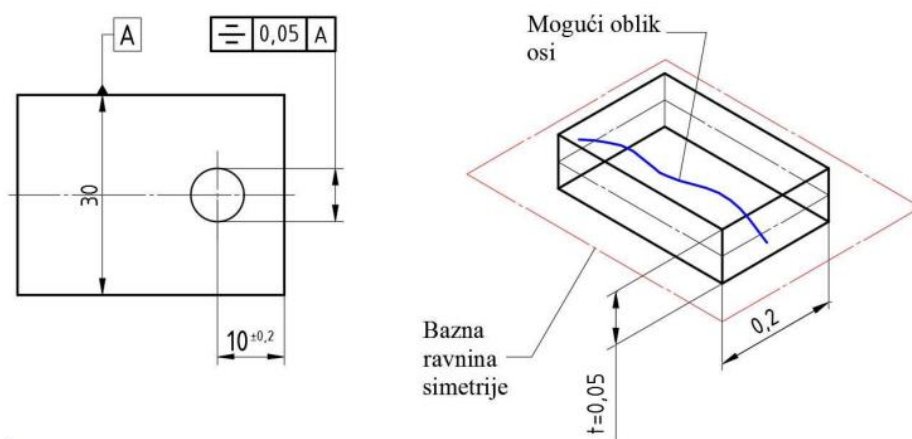
Slika 19. Odstupanje od koaksijalnosti [7]

2.2.6. Odstupanje od simetričnosti

Kod simetričnosti se razlikuju dva slučaja:

- simetričnost osi prema plohi i
- simetričnost plohe prema plohi.

Kod simetričnosti osi prema plohi zona tolerancije je zapravo kvadar kojem je jedna dimenzija jednaka toleranciji simetrije, a druga je jednaka toleranciji mjere. Središnja ravnina identična je s baznom ravlinom simetrije (Slika 20). [7]



Slika 20. Odstupanje od simetričnosti [7]

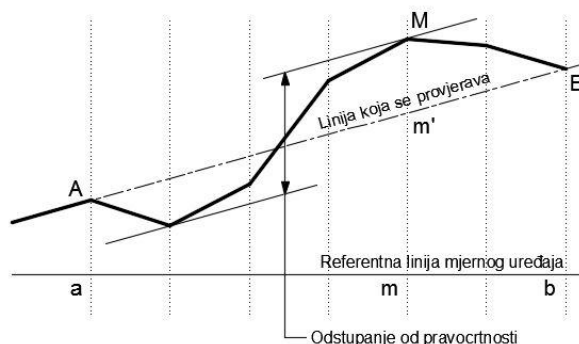
Kod simetričnosti plohe prema plohi zona tolerancije je prostor između dviju ravnina.[7]

3. MJERENJE ODSUPANJA OD PRAVOCRTNOSTI

Postoje dvije metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti:

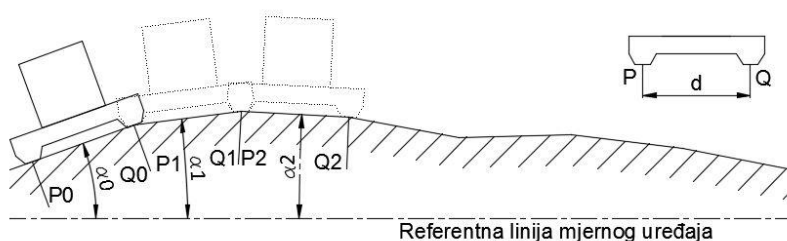
- mjerenje duljine i
- mjerenje kutova.

Mjerenje pravocrtnosti bazirano na mjerenju duljine izvodi se tako da se mjerni uređaj postavi odgovarajuće u odnosu na liniju čija se pravocrtnost provjerava. Uređaj daje odstupanje linije koja se provjerava od referentne linije mjernog uređaja (Slika 21). Odstupanja se mogu dobiti u različitim točkama linije koja se provjerava.



Slika 21. Mjerenje pravocrtnosti bazirano na mjerenju duljine [8]

Mjerenje pravocrtnosti bazirano na mjerenju kutova se razlikuje od onog baziranog na mjerenju duljine po tome što je sada gibajući element u kontaktu s linijom koja se provjerava u dvije točke P i Q, međusobno udaljene za d (Slika 22). Gibajući element se pomiče tako da, na dvije uzastopne pozicije P_0, Q_0 i P_1, Q_1 , P_1 se podudara s Q_0 . [8]



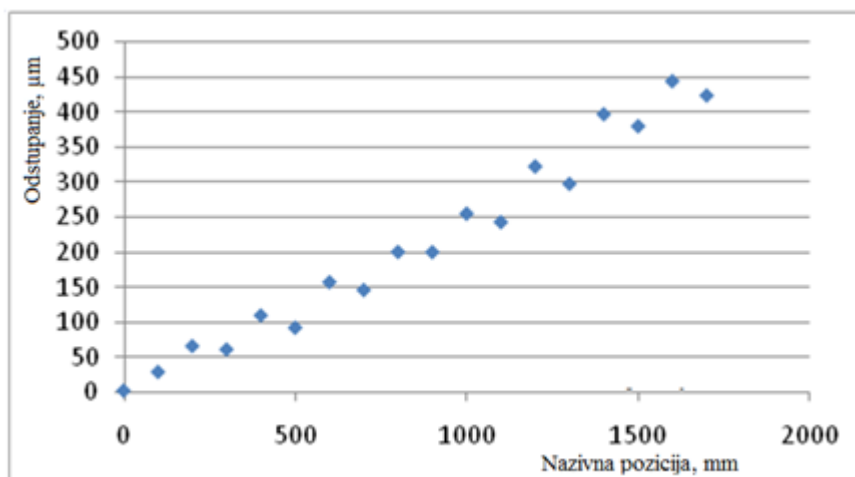
Slika 22. Mjerenje pravocrtnosti bazirano na mjerenju kutova [8]

Pravocrtnost se mjeri tako da se uzduž radnog komada očitavaju odstupanja u određenom broju i s određenim razmakom. Početna točka radnog komada ima nultu vrijednost. Vrijednosti dobivene mjerenjem potrebno je obraditi nekom metodom, npr. metodom najmanjih kvadrata.

3.1. Analiza dobivenih rezultata

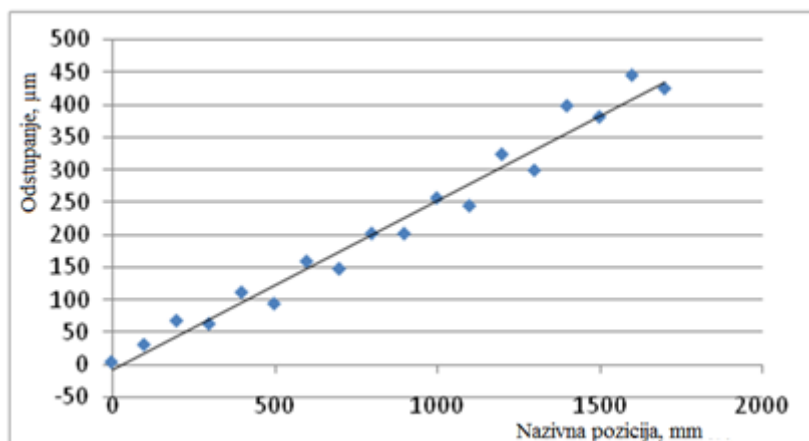
3.1.1. Metoda najmanjih kvadrata

Metoda najmanjih kvadrata jedna je od najvažnijih metoda za obradu eksperimentalno dobivenih podataka. S pomoću metode najmanjih kvadrata, nastoji se u dijagram rasipanja ucrtati regresijski pravac koji najbolje opisuje odnos promatranih točaka.

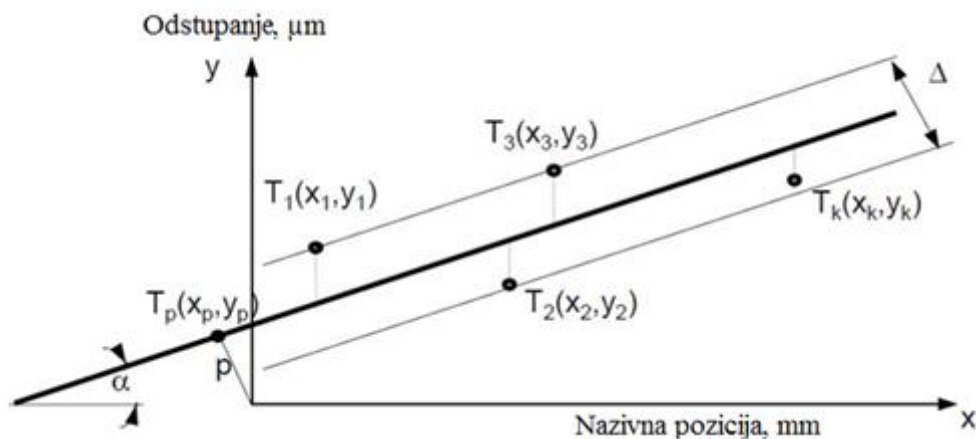


Slika 23. Dijagram rasipanja

Kada se u dijagramu rasipanja prikažu svi rezultati dobiveni mjerenjem, dobije se oblak točaka kroz koji je moguće provući beskonačno mnogo različitih pravaca. No ako se želi najbolje opisati odnos točaka, provest će se metoda najmanjih kvadrata te se u dijagram provući regresijski pravac koji minimizira udaljenosti svih koordinatnih točaka upisanih u dijagram rasipanja.



Slika 24. Primjer regresijskog pravca



Slika 25. Regresijski pravac [5]

Regresijski pravac određuje se iz koordinata točaka u ravnini i eksplicitnom jednadžbom pravca.

$$a = \frac{k \sum_{i=1}^k x_i y_i - \sum_{i=1}^k x_i \sum_{i=1}^k y_i}{k \sum_{i=1}^k x_i^2 - (\sum_{i=1}^k x_i)^2} \quad (4)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^k x_i^2 \sum_{i=1}^k y_i - \sum_{i=1}^k x_i \sum_{i=1}^k x_i y_i}{k \sum_{i=1}^k x_i^2 - (\sum_{i=1}^k x_i)^2} \quad (5)$$

K predstavlja broj mjernih točaka, a predstavlja nagib pravca, a b odsječak.

Udaljenost točke $T_1(x_1, y_1)$ od pravca računa se prema izrazu:

$$\delta = x_i \cos \alpha + y_i \sin \alpha - p \quad (6)$$

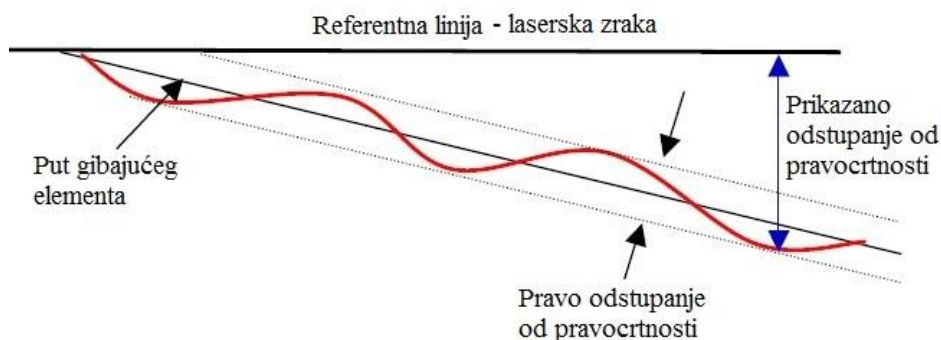
gdje p predstavlja udaljenost pravca od ishodišta koordinatnog sustava.

$$\delta = x_i \left[k \sum_{i=1}^k x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^k x_i \right)^2 \right] + y_i \left[k \sum_{i=1}^k x_i y_i - \sum_{i=1}^k x_i \sum_{i=1}^k y_i \right] - b \frac{\sqrt{a^2 + 1}}{a^2 + 1} \quad (7)$$

Ukupno odstupanje od pravocrtnosti bit će jednako zbroju udaljenosti u oba smjera. [5]

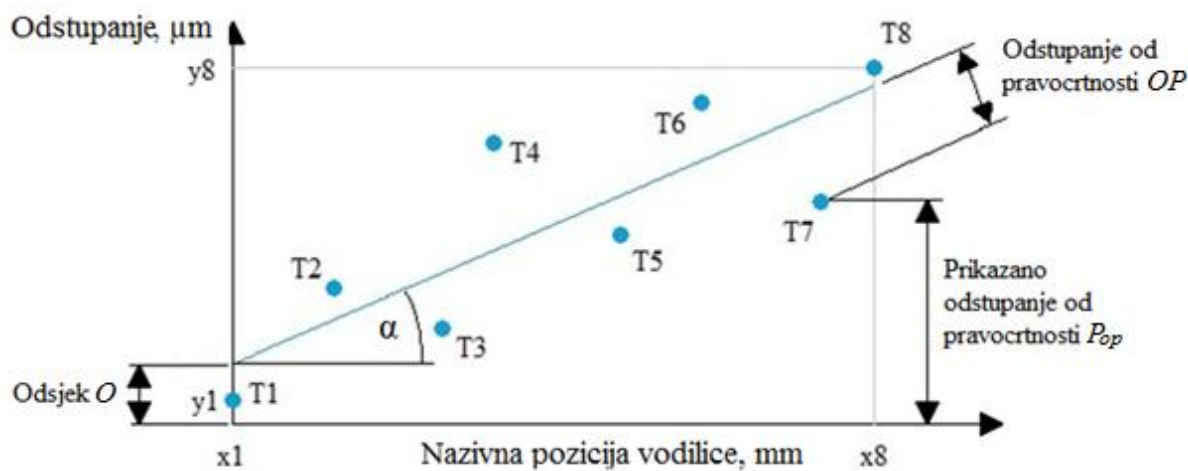
$$\Delta = \delta_{max} + |\delta_{min}| \quad (8)$$

Nakon provedenih jednadžbi, u dijagramu još uvijek postoji pogreška nesuosnosti referentne linije i osi predmeta mjerenja (Slika 26).



Slika 26. Pogreška nesuosnosti referentne linije i osi predmeta mjerenja [9]

Pogreška nesuosnosti predstavlja razliku između pravca gibajućeg elementa kojim se mjeri, i referentne linije, odnosno linije mjerne opreme. Na primjer, ako se provodi mjerenje odstupanja od pravocrtnosti vodilice s laserskim mjernim sustavom, tada pogreška nesuosnosti predstavlja razliku između linije vodilice te linije laserske zrake. Kako bi se u dijagramu pokazala samo prava odstupanja od pravocrtnosti potrebno je eliminirati pogrešku nesuosnosti.



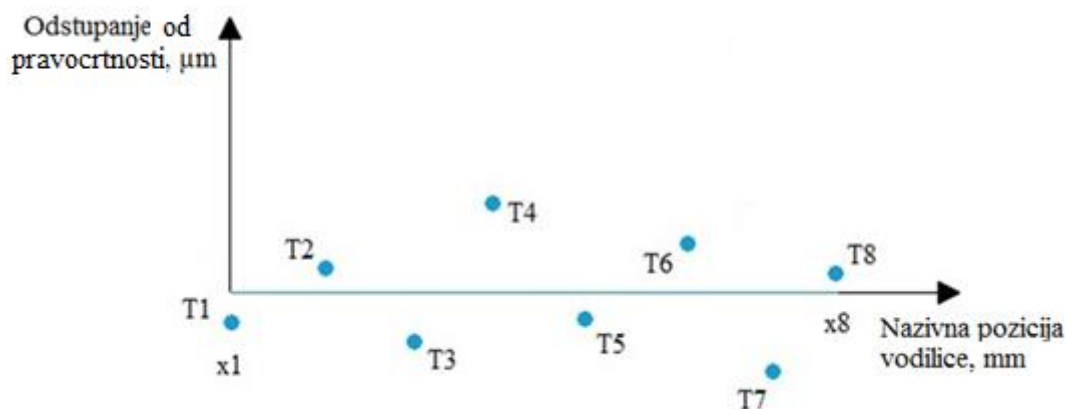
Slika 27. Odstupanje od pravocrtnosti i pogreška nesuosnosti

$$OP = P_{op} - (\alpha \cdot (x_n - x_0) + O) \quad (9)$$

Za točku T₇ jednažba glasi:

$$OP_7 = P_{op7} - (\alpha \cdot (x_7 - x_1) + O) \quad (10)$$

Nakon korištenja jednažbe (9), pogreška nesuosnosti u potpunosti je eliminirana (Slika 28).

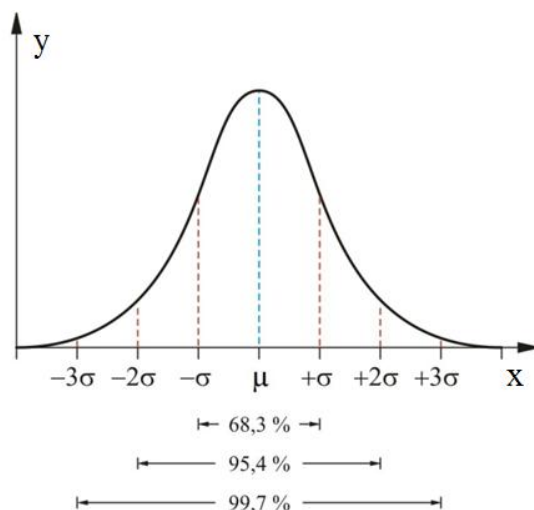


Slika 28. Pogreška nesuosnosti eliminirana

3.1.2. Ponovljena mjerenja i ponovljivost

Rezultate dobivene nakon analize metodom najmanjih kvadrata treba usporediti. Ponovljena mjerenja se rade u svrhu utvrđivanja preciznosti sustava.

Ponovljivost znači da su mjerenja rađena pri istim uvjetima, istim mjernim uređajem, od strane iste osobe te se pretpostavlja da nema sustavnih pogrešaka, nego samo onih slučajnih. Slučajne pogreške su distribuirane po normalnoj razdiobi koja matematički ima svoju očekivanu vrijednost μ i parametar rasipanja, odnosno standardnu devijaciju, σ (Slika 29).



Slika 29. Normalna razdioba [10]

S obzirom na to da se mjerenja ne ponavljaju beskonačni broj puta, radi se procjena očekivane vrijednosti μ aritmetičkom sredinom $\bar{x}$ te procjena standardne devijacije σ s procijenjenim standardnim odstupanjem s .

Za niz podataka $x_1, x_2, \dots, x_n$ koji predstavljaju rezultate različitih mjerenja za istu točku, njihovom aritmetičkom sredinom zovemo

$$\bar{x}_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (11)$$

gdje i predstavlja poziciju za koju se računa aritmetička sredina, a n predstavlja broj, odnosno količinu mjerenja.

Za isti niz podataka, procijenjenim standardnim odstupanjem zovemo broj:

$$s_i = \sqrt{\frac{(\bar{x}-x_1)^2 + (\bar{x}-x_2)^2 + \dots + (\bar{x}-x_n)^2}{n-1}}. \quad (12)$$

Procijenjeno standardno odstupanje nam govori o nesigurnosti mjerenja. Nesigurnost je količinska mjera kvalitete mjernog rezultata, koja omogućuje da se mjerni rezultati uspoređuju s drugim rezultatima. [11]

Mjerni rezultati iskazuju se u obliku:

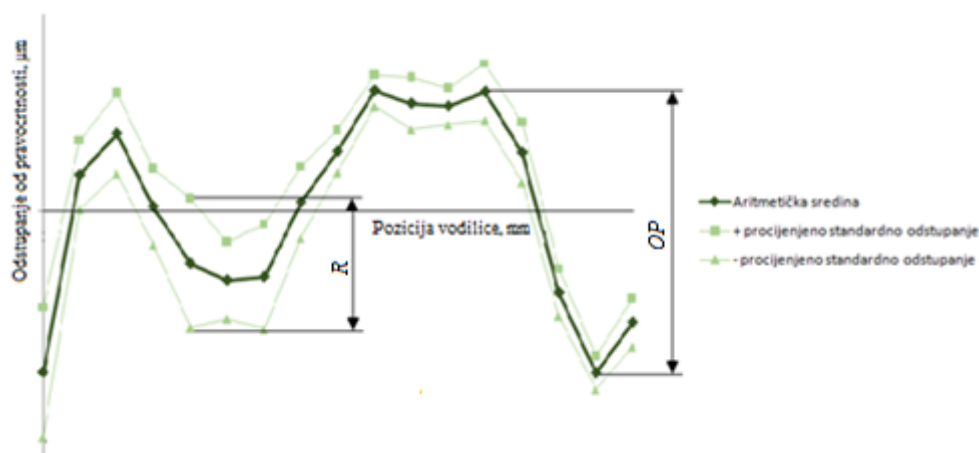
$$Y = y \pm U \quad (13)$$

pri čemu U označava proširenu mjernu nesigurnost. Proširena mjerna nesigurnost se dobiva množenjem faktora pokrivanja s vrijednošću standardne mjerne nesigurnosti. Faktor pokrivanja najčešće iznosi 2 i tada je proširena mjerna nesigurnost dana s razinom povjerenja od približno 95% (Slika 29). [11]

U daljnjoj analizi će se na gore opisani način procjenjivati ponovljivost rezultata mjerenja odstupanja od pravocrtnosti, kao bitna sastavnica mjerne nesigurnosti.

3.1.3. Pogreška pravocrtnosti i rasipanje rezultata

Nakon što su izračunati aritmetička sredina $\bar{x}$ i procijenjeno standardno odstupanje s , potrebno je izračunati pogrešku pravocrtnosti OP i rasipanje rezultata R . Iako se odstupanje od pravocrtnosti najčešće iskazuje samo kao raspon mjernih rezultata, u ovom će se radu na pravocrtnost primijeniti obrada rezultata iz norme ISO 230-2:2014 [12] koja se odnosi na točnost pozicioniranja. Iako ova norma nije specifično predviđena za iskazivanje odstupanja od pravocrtnosti, moguće ju je primijeniti i na tu vrstu rezultata pri čemu je omogućeno iskazivanje razlika između jednosmjernog i dvosmjernog mjerenja.



Slika 30. Pogreška pravocrtnosti i rasipanje rezultata

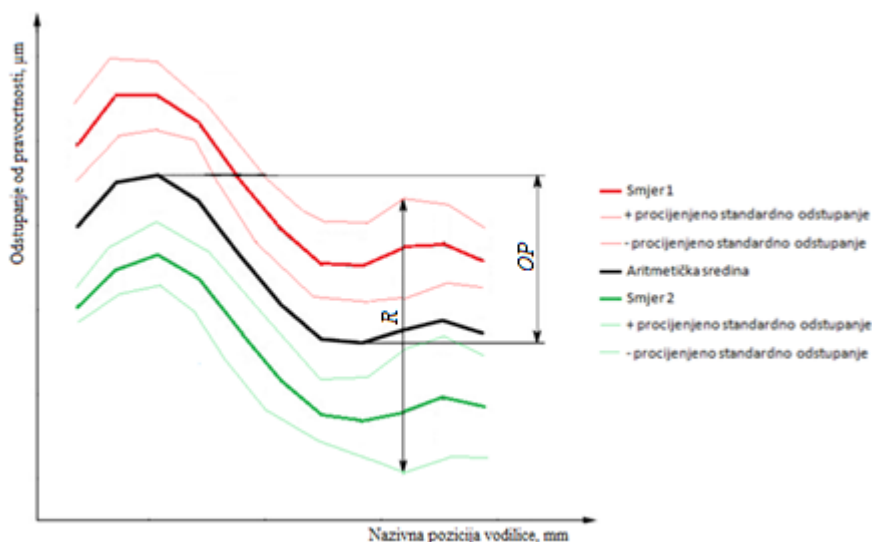
Pogreška pravocrtnosti OP je razlika maksimalne i minimalne vrijednosti aritmetičke sredine odstupanja od pravocrtnosti.

$$OP = \max(\bar{x}_i) - \min(\bar{x}_i) \quad (14)$$

Rasipanje rezultata R je definirano kao $\pm 2s$ ($4s$) što odgovara razini povjerenja od približno 95%.

$$R = \max(4s_i) \quad (15)$$

Kod dvosmjernog mjerenja, pogreškom pravocrtnosti OP smatra se razlika maksimalne i minimalne vrijednosti aritmetičke sredine odstupanja od pravocrtnosti oba smjera (Slika 31).



Slika 31. Pogreška pravocrtnosti i rasipanje rezultata kod dvosmjernog mjerenja

3.2. Metode mjerenja odstupanja od pravocrtnosti

Danas postoji veliki broj metoda koje se mogu koristiti za mjerenje odstupanja od pravocrtnosti, a dijele se prema mjernim uređajima koje koriste. Neke od tih metoda su:

- laserski mjerni sustav,
- autokolimator,
- lineal s komparatorom,
- 3D dužinski mjerni uređaji,
- libela itd.

3.2.1. Interferometar

Interferometar je laserski mjerni uređaj koji koristi interferenciju valova, najčešće svjetlosnih, radio ili zvučnih valova. Interferencija valova je metoda mjerenja koja koristi međudjelovanje dvaju ili više valova kako bi se dobile potrebne informacije.

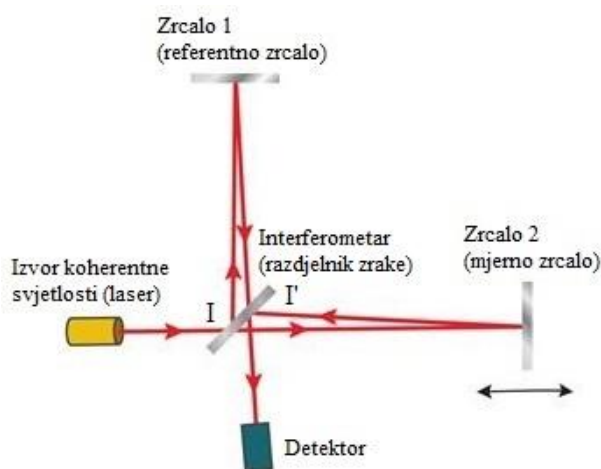
Interferometrija se koristi za opisivanje metoda koje koriste svjetlosne valove za proučavanje promjena u pomaku. Koristeći dvije svjetlosne zrake (najčešće se jedno svjetlo podijeli na dva snopa), može se stvoriti interferencijski uzorak kada se te dvije zrake superponiraju. Budući da je valna duljina vidljivog svjetla vrlo kratka, mogu se otkriti male promjene u razlikama putova, odnosno prijedene udaljenosti, između te dvije zrake. Upravo zbog toga je optička interferometrija vrijedna mjerna tehnika već više od stotinu godina. Njegova točnost kasnije se poboljšala izumom lasera. [14]

Da bi uopće došlo do interferencije valova, mora se osigurati jedan uvjet – valovi moraju biti koherentni, odnosno faza vala svjetlosti mora biti definirana u svakom trenutku. Da bi valovi bili koherentni, oni moraju imati:

- razliku faza koja se ne mijenja u vremenu,
- identične valne duljine (npr. ne može doći do interferencije zelene i crvene svjetlosti) i
- identične amplitude. [15]

Prvu demonstraciju korištenja interferencije svjetla kao mjernog alata izveo je Albert A. Michelson 1880-ih godina razvojem prvog interferometra. Iako je tehnologija, kao i točnost mjerenja, razvijena tijekom godina, baza interferometrije je i dalje ostao Michelsonov interferometar, odnosno njegov princip rada.

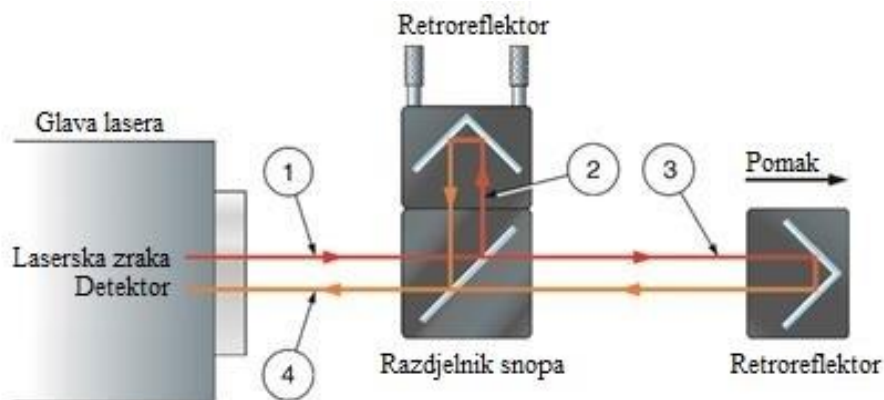
Michelsonov interferometar sastoji se od razdjelnika snopa svjetlosti i dva zrcala. Kada svjetlost prođe kroz razdjelnik (koji djelomično i reflektira), u točki I se dijeli u dva snopa s različitim optičkim putevima (jedna zraka ide prema zrcalu 1, dok druga zraka ide prema zrcalu 2) (Slika 32). Nakon što se reflektiraju na zrcalima 1 i 2, prije dolaska na detektor snopovi se ponovno spoje u točki I' na razdjelniku snopa. Razlika putanje ta dva snopa uzrokuje faznu razliku koja stvara interferencijski uzorak. Uzorak se zatim analizira pomoću detektora kako bi se procijenile karakteristike vala, svojstva materijala ili pomicanje jednog od zrcala, ovisno o tome za što se koristio interferometar.



Slika 32. Princip rada Michelsonovog interferometra [14]

Kako bi se stvorio interferencijski uzorak s velikom preciznošću, vrlo je važno imati stabilan izvor valne duljine što se postiže pomoću lasera.

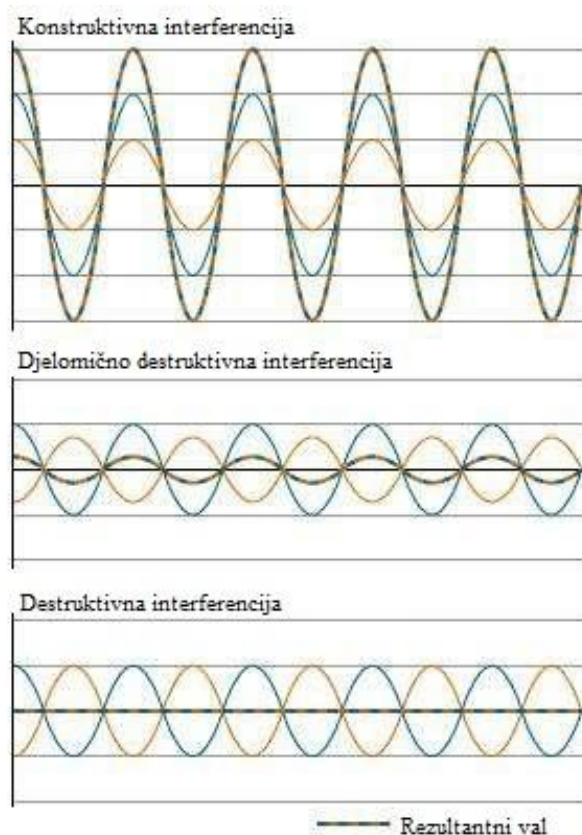
Postoje različiti interferometri s različitim postavkama koji se temelje na Michelsonovom principu, ali linearna postavka je najjednostavniji tip koji se može objasniti (Slika 33).



Slika 33. Linearna postavka Michelsonovog interferometra [14]

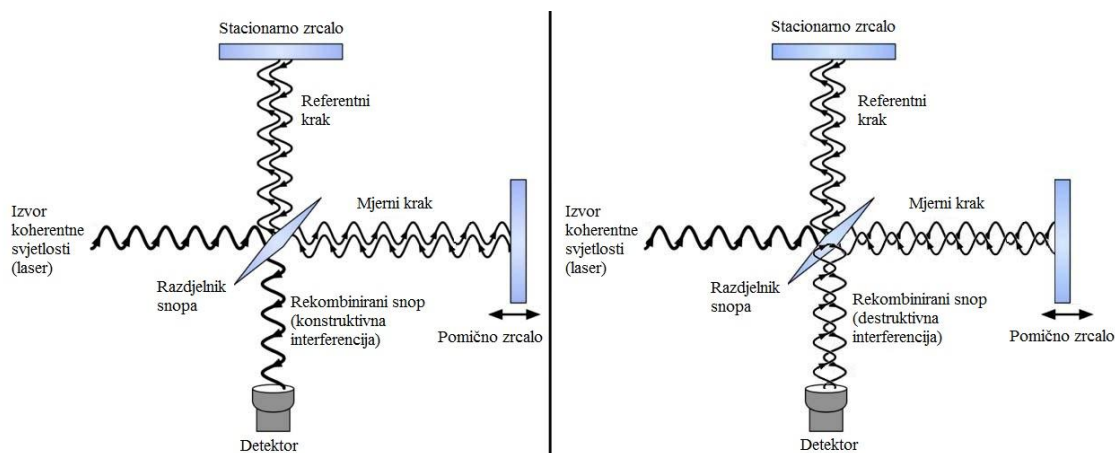
U laserskom sustavu dva zrcala (korištena u Michelsonovom interferometru) su retroreflektori, odnosno prizme koje reflektiraju upadno svjetlo u smjeru paralelnom smjeru iz kojeg je došao. Jedan retroreflektor pričvršćen je na razdjelnik snopa i tvori referentni krak, dok se drugom retroreflektoru udaljenost od razdjelnika snopa mijenja pa upravo zbog toga taj retroreflektor tvori mjerni krak.

Laserska zraka (1) izlazi iz glave lasera i razdvaja se na dva snopa (reflektirani (2) i preneseni (3)) na razdjelniku snopa. Ti se snopovi zatim odbijaju od dva retroreflektora te se spajaju na razdjelniku snopa prije nego dođu do detektora. Upotreba retroreflektora osigurava da su snopovi koji dolaze iz referentnih i mjernih krakova paralelni kada se međusobno spoje na razdjelniku snopa. Rekombinirani snopovi dolaze do detektora gdje međusobno konstruktivno ili destruktivno interferiraju. Tijekom konstruktivne interferencije, dva snopa su u amplitudnoj fazi, a vrhovi amplituda snopova se međusobno pojačavaju i tako rezultiraju svijetlom linijom. Dok tijekom destruktivne interferencije snopovi su izvan faze te se brjegovu amplitude jednog snopa poništavaju s dolinama amplituda drugog snopa što rezultira tamnim resama (Slika 34 i Slika 36). [14]



Slika 34. Primjer konstruktivne i destruktivne interferencije [16]

Optička obrada signala u detektoru omogućuje promatranje interferencije tih dvaju snopova. Pomicanje mjernog kraka uzrokuje promjenu u relativnoj fazi dvaju snopova (Slika 35).

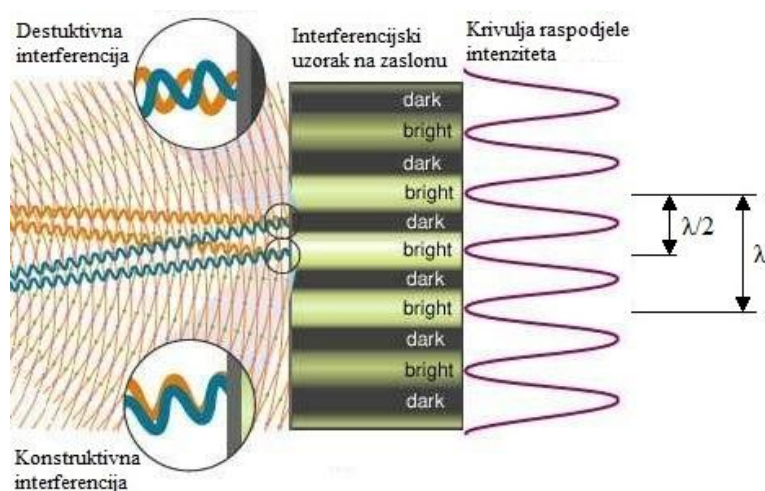


Slika 35. Nastajanje i promjena konstruktivne i destruktivne interferencije u Michelsonovom interferometru [17]

Ovaj ciklus destruktivne i konstruktivne interferencije uzrokuje da intenzitet rekombinirane svjetlosti ciklički varira. Jedan ciklus varijacije u intenzitetu od svjetlosti do tame do svjetlosti javlja se svaki put kada se mjerni retroreflektor pomakne za 316,5 nm, što je polovica valne duljine lasera (jer taj pokret uzrokuje promjenu optičke putanje za 633 nm, što je valna duljina lasera). Stoga se kretanje mjeri izračunavanjem broja ciklusa pomoću sljedeće formule:

$$d = \frac{\lambda N}{2} \quad (16)$$

gdje je d oznaka za pomak (μm), λ je valna duljina lasera ($0,633 \mu\text{m}$), a N broj registriranih resica.



Slika 36. Prikaz konstruktivne i destruktivne interferencije na zaslonu [16]

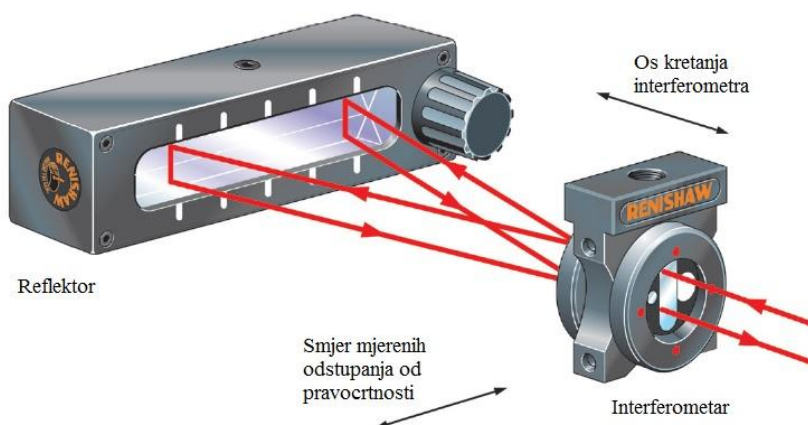
Radna valna duljina laserske zrake ovisi o indeksu loma zraka kroz koji prolazi, a to se mijenja s temperaturom zraka, tlakom zraka i relativnom vlagom. Upravo zbog toga, valnu duljinu snopa treba mijenjati, odnosno kompenzirati, kako bi se uključile bilo kakve promjene u tim parametrima. [14]

Na slici 37 prikazani su primjeri pogrešaka u nekompenziranom i kompenziranom interferencijskom sustavu te njihovi utjecaji. Pogreška je na dijagramu prikazana s mjernom jedinicom ppm što označava "dijelove po milijunu" (engl. *Parts Per Million*). Vidi se da bez pouzdane i točne kompenzacije valne duljine, greške od oko 20 ppm bile bi uobičajene u linearnim očitajima mjerenja.

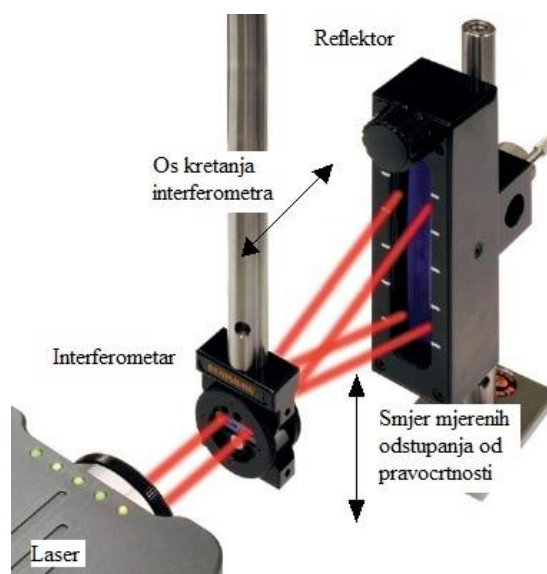


Slika 37. Izvor pogrešaka u nekompenziranom i kompenziranom interferencijskom sustavu [14]

Interferometar se u ovom diplomskom radu koristio za mjerenje odstupanja od pravocrtnosti dviju vodilica, bazirano na mjerenu duljine. Za obje vodilice mjerena su i horizontalna i vertikalna odstupanja od pravocrtnosti. Korišteni uređaji su: laser, interferometar, optička prizma i reflektor. Konfiguracija reflektora i interferometra za mjerenje horizontalnih i vertikalnih odstupanja je prikazana na slikama 38 i 39.

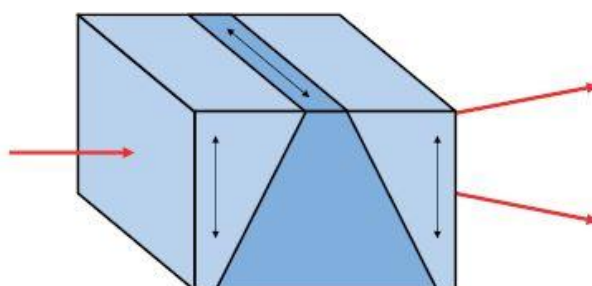


Slika 38. Konfiguracija reflektora i interferometra za mjerenje horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti [18]



Slika 39. Konfiguracija reflektora i interferometra za mjerenje vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti [18]

Interferometar, odnosno razdjelnik snopa, detaljnije je prikazan na slici ispod. Napravljen je od 3 klina (engl. *wedges*) dvolomnog kristala (engl. *birefringent crystal*). [18]



Slika 40. Interferometar [18]

3.2.2. Autokolimator

Autokolimator je osjetljivi optički uređaj koji se koristi za točno mjerenje pravocrtnosti, ravnosti, pravokutnosti i paralelnosti pomoću mjerenja malih kutnih odstupanja.

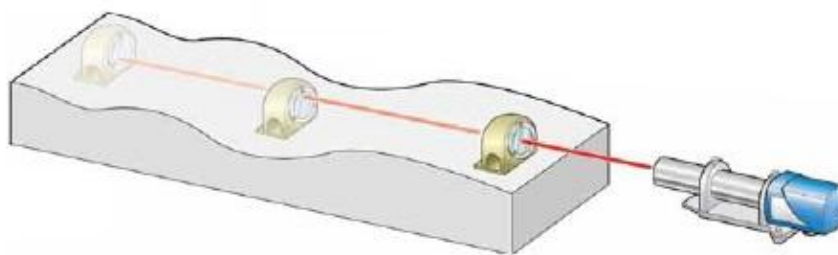
Pravocrtnost bilo koje površine može se odrediti mjerenjem kutnog pomaka određenog broja pozicija na površini koja se ispituje. Razmak između pozicija ostaje isti duž cijele površine.

Proizvođač autokolimatora korištenog u izradi diplomskog rada je Taylor Hobson. Glavne prednosti njihovih autokolimatora su:

- visoka točnost i širok raspon mjerenja kuta,
- jednostavno postavljanje i rad,
- umjeravanje u skladu s međunarodnim standardima,
- mogućnost biranja između vizualnih i elektroničkih uređaja i
- širok raspon dodatne opreme. [19]

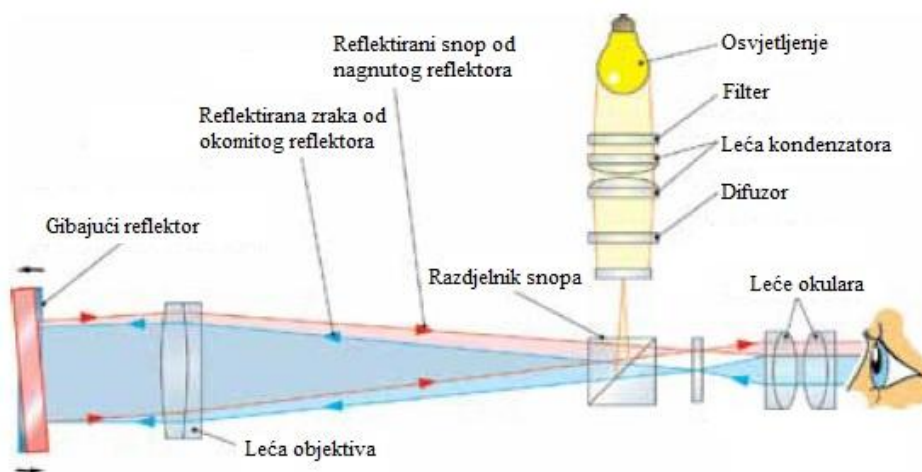
Autokolimator može biti vizualni ili elektronički. U izradi ovog rada korišten je vizualni autokolimator. Vizualni autokolimatori su izuzetno precizni instrumenti sa širokim rasponom primjena. Obično se isporučuju s okularom postavljenim za gledanje ravno kroz preglednik. Mjerenja se obavljaju pomoću mreže u sustavu za promatranje okulara s mikrometrima ili bez njih. Autokolimatori u sustavu za promatranje imaju dvije osi zbog čega se mogu u isto vrijeme mjeriti i horizontalna i vertikalna odstupanja. Postoje i tipovi autokolimatora koji imaju samo jednu os pa se moraju rotirati za 90 stupnjeva kako bi se mjerila odstupanja u drugoj ravnini, no takav tip autokolimatora nije korišten u ovom radu. [19]

Autokolimator se postavlja na kraj vodilice, eksterno u odnosu na vodilicu, s krutim potpornim postoljem. Zrcalo se montira na gibajuću komponentu te se njegovim pomicanjem duž vodilice uzrokuje odbijanje reflektirane slike mete u skladu s kutnom pogreškom vodilice.



Slika 41. Mjerenje pravocrtnosti autokolimatorom [19]

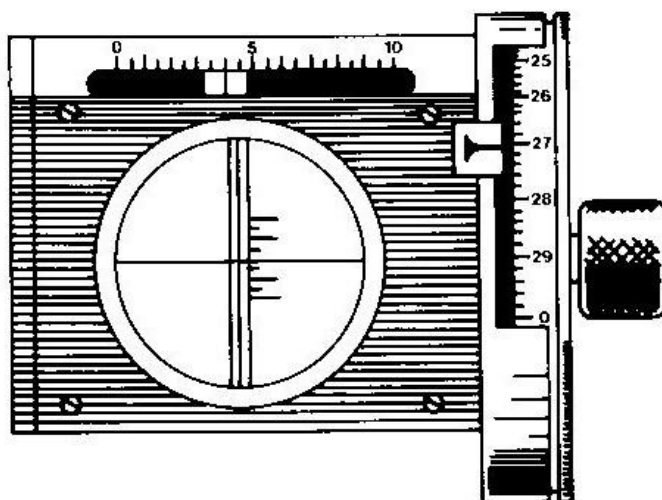
Osvjetljeni ciljni križ usmjeren je prema cilju pomoću razdjelnika snopa. Nakon refleksije od zrcala, svjetlo se vraća kroz autokolimator i prolazi kroz razdjelnik snopa, formirajući sliku ciljnog križa u ravnini okulara (Slika 42). [19]



Slika 42. Princip rada autokolimatora [19]

Što se više kut reflektora povećava, to se smanjuje količina svjetla koja dolazi natrag do leće okulara te stoga postoje ograničenja za udaljenost reflektora. [20]

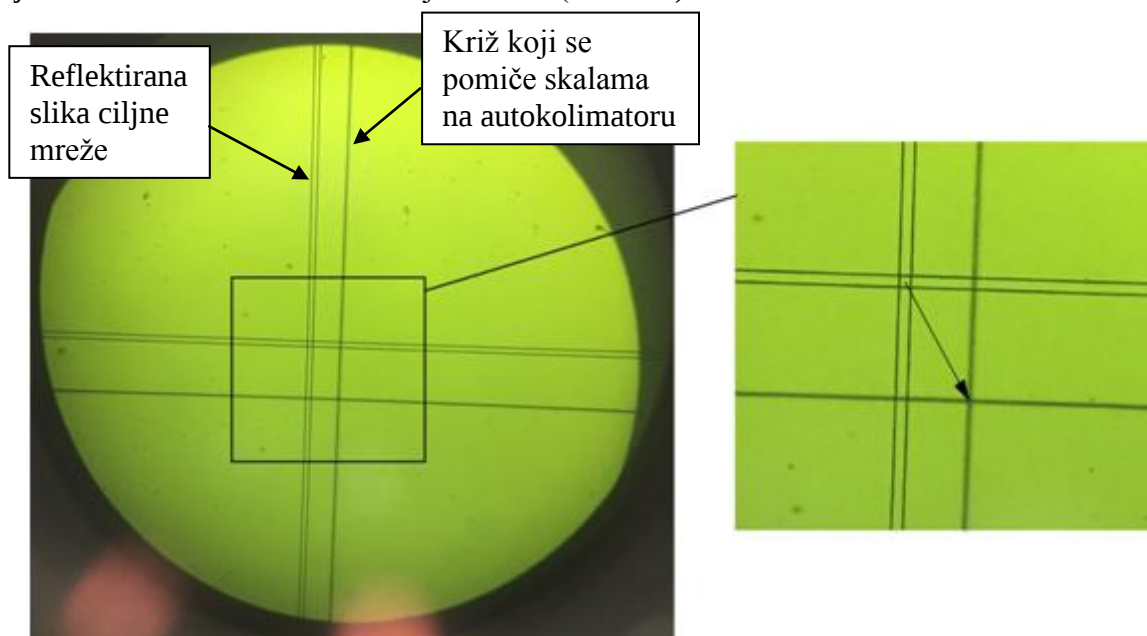
Kutni pomak reflektora može se očitati iz dvije skale na autokolimatoru, svaka za pomak u jednom smjeru (Slika 43).



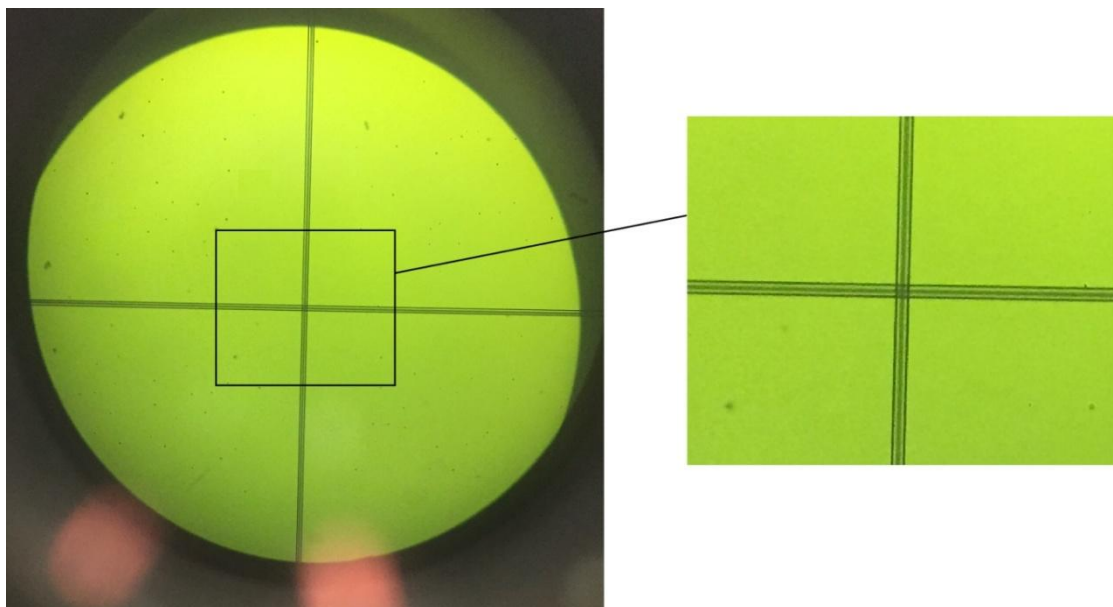
Slika 43. Skale za očitavanje kutnog pomaka reflektora [19]

Prilikom mjerenja, početna pozicija uzima se kao referentna pozicija, odnosno referentni kutni pomak. On se oduzima od svih ostalih zabilježenih kutnih pomaka kako bi se dobila promjena kutnog pomaka od nulte do mjerene pozicije. Skalama na autokolimatoru bilježe se kutni pomaci u minutama i sekundama.

Autokolimator se koristi tako da se pomiče križ u vidnom polju (Slika 44) sve dok se ne sjedini s reflektiranom slikom ciljne mreže (Slika 45).



Slika 44. Vidno polje autokolimatora kada je reflektor nagnut u odnosu na optičku os



Slika 45. Vidno polje autokolimatora kada je reflektor okomit na optičku os

S mjerenjem dobivenim kutnim pomakom i poznatim pomakom zrcala po vodilici, može se dobiti traženo odstupanje od pravocrtnosti:

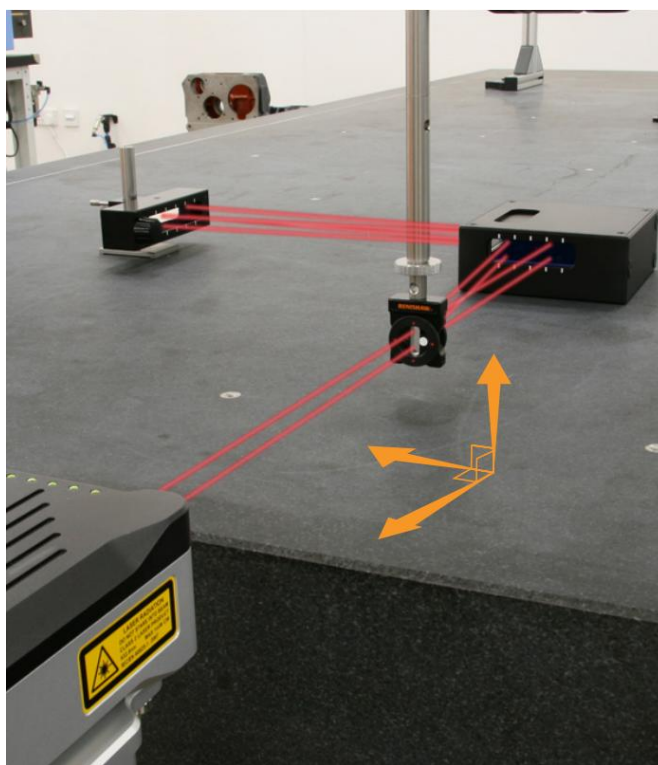
$$OP = L \cdot tg(\alpha) \quad (17)$$

gdje L predstavlja pomak zrcala, a α izmjereno kutno odstupanje.

4. MJERENJE Odstupanja od okomitosti

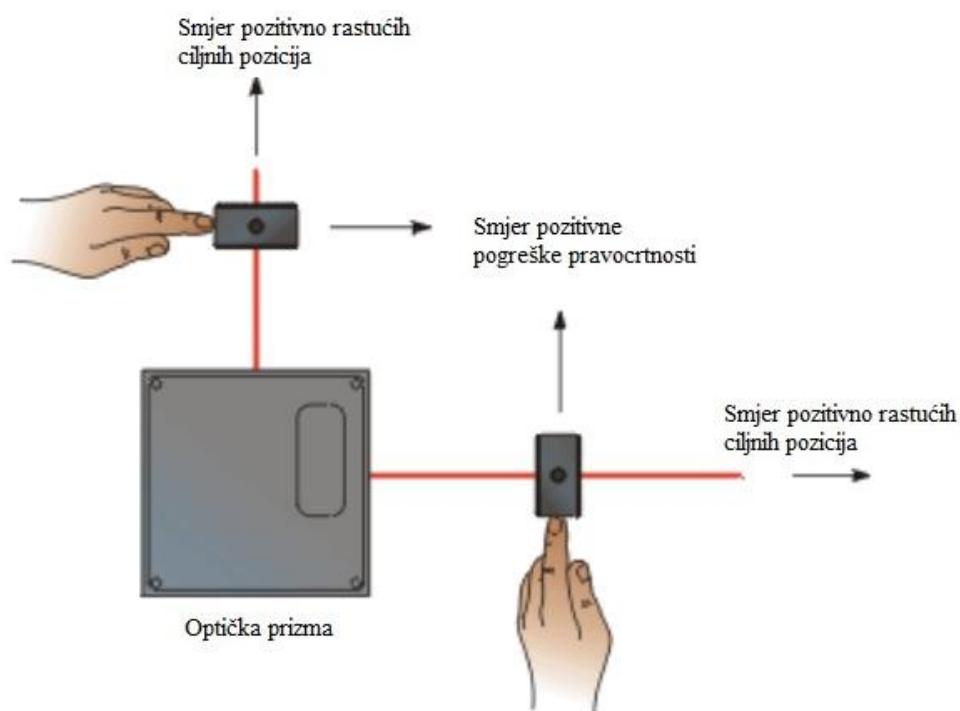
Tolerancija okomitosti naznačuje odnos između dviju značajki. Značajka u odnosu na koju se kontrolira kutni odnos kontrolirane značajke treba se proglasiti referentnom, ili baznom, značajkom.

U ovom diplomskom radu, kut je mjerjen između dviju vodilica postavljenih u smjeru X i Y osi. Kut je mjerjen laserskim mjernim uređajem, interferometrom. Koristeći optičku prizmu i kombinirajući dva mjerenja pravocrtnosti, može se izračunati odstupanje od okomitosti između dvije osi (Slika 46).

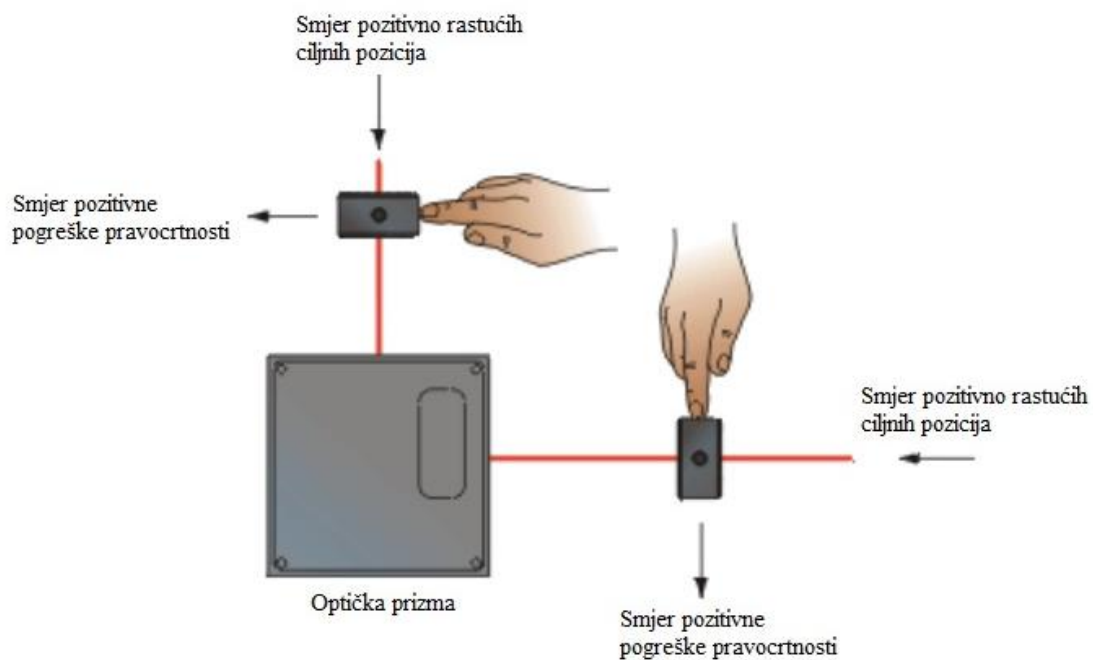


Slika 46. Računanje odstupanja od okomitosti interferometrom [21]

Prilikom mjerenja pravocrtnosti potrebno je voditi računa o smjeru pozitivne pogreške pravocrtnosti, kao što je prikazano na slikama 47 i 48, te je potrebno paziti da se optička prizma, laser ili reflektor ne pomaknu prilikom mjerenja pravocrtnosti obje vodilice, odnosno prije mjerenja okomitosti.



Slika 47. Smjer mjerenja pravocrtnosti od optičke prizme [22]

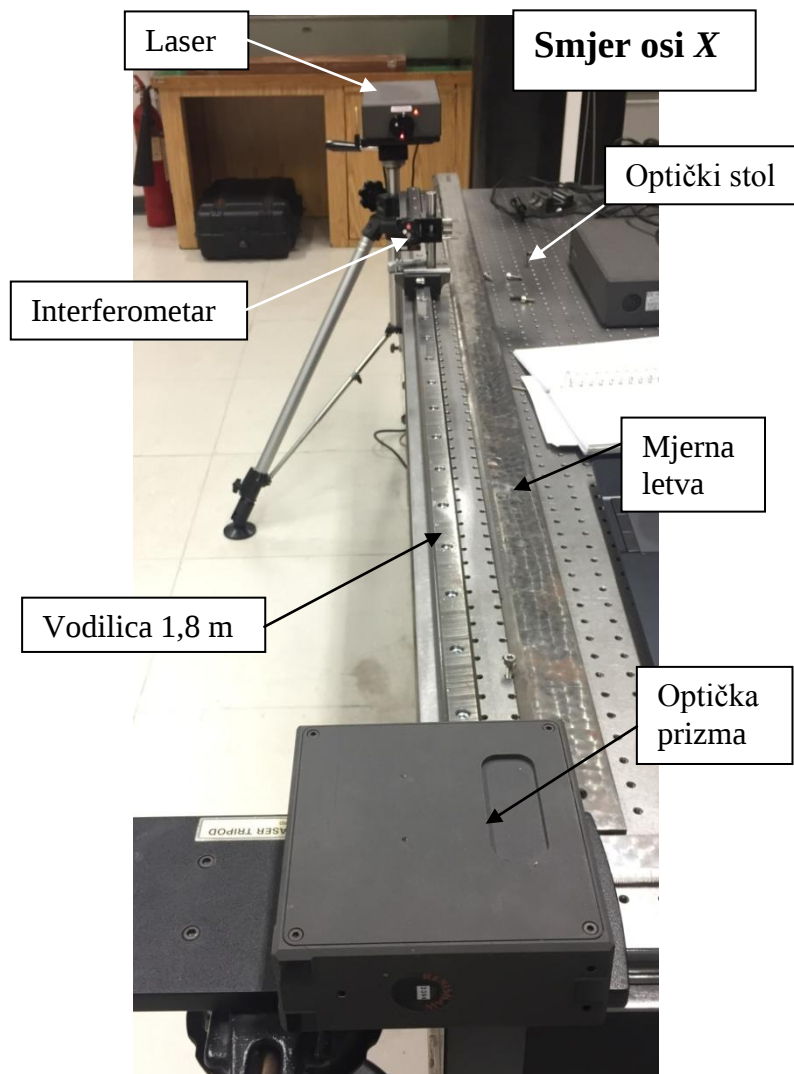


Slika 48. Smjer mjerenja pravocrtnosti prema optičkoj prizmi [22]

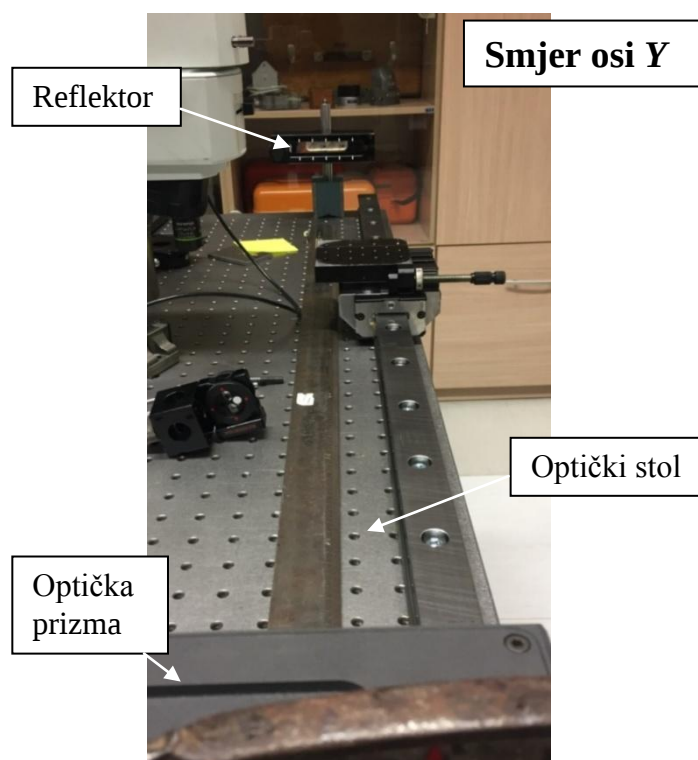
5. UTJECAJI NA MJERNU NESIGURNOST

5.1. Nedovoljna krutost poda

Mjerila su se horizontalna odstupanja od pravocrtnosti vodilice dugačke 1,8 m koja je okrenuta u smjeru osi X . Interferometar je pomican po vodilici te se mjerilo odstupanje od pravocrtnosti svakih 100 mm, odnosno u 18 točaka (0 mm - 1700 mm).

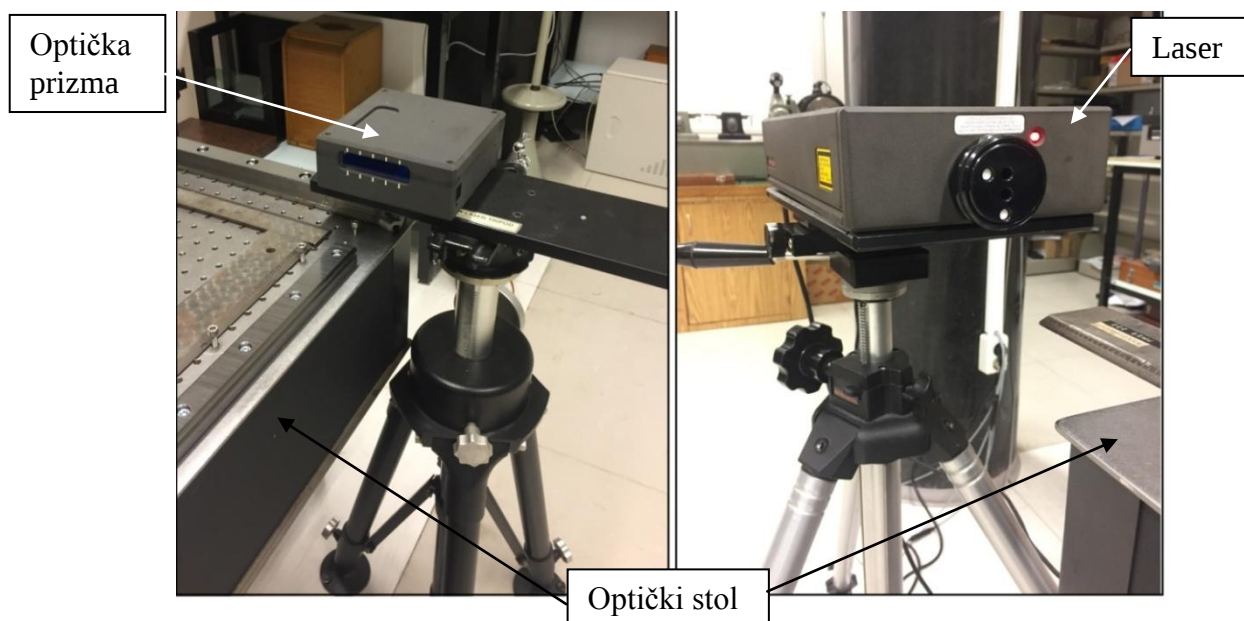


Slika 49. Vodilica dugačka 1,8 m



Slika 50. Reflektor u smjeru osi Y

Dio mjernog sustava, točnije interferometar i reflektor, nalazi se na optičkom stolu sa zračnim amortizerima kojima se pokušava smanjiti utjecaj vibracija poda na mjerenje, dok se optička prizma i laser nalaze na odgovarajućim stalcima pričvršćenima na pod, eksterno u odnosu na stol (Slika 51).

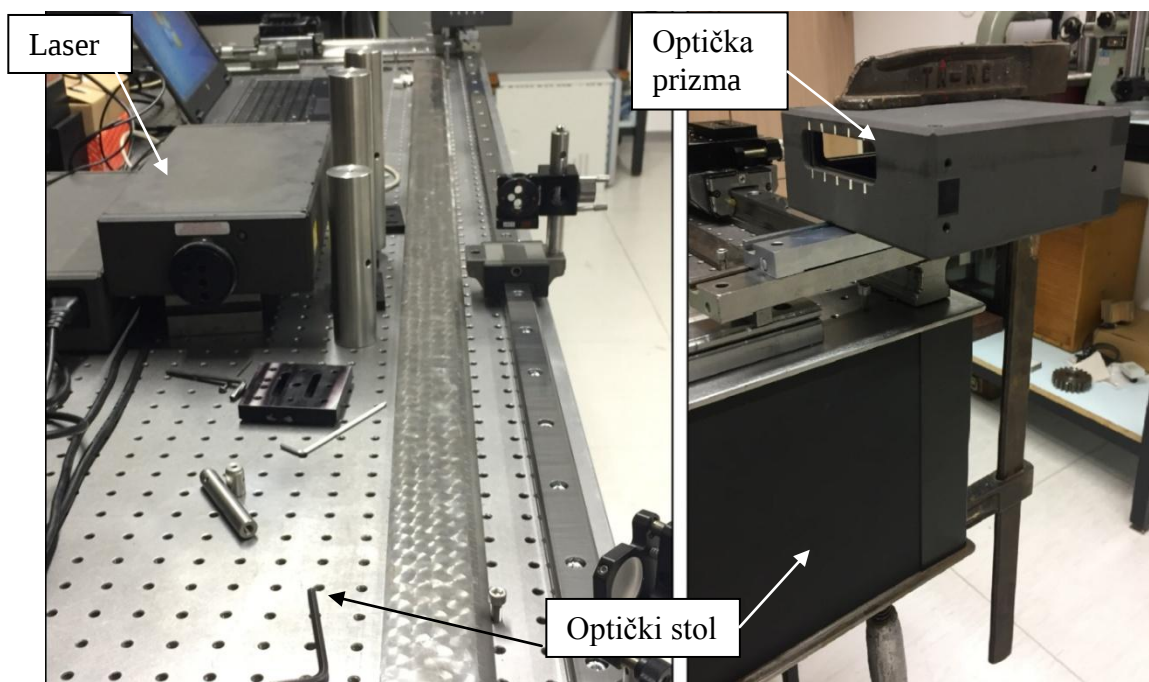


Slika 51. Laser i optička prizma na odgovarajućim stalcima, eksterno u odnosu na stol

Prilikom izvođenja mjerenja odstupanja od pravocrtnosti primijećeno je da pod nije dovoljno krut. Nedovoljna krutost poda uzrokuje pomake optičkog stola u odnosu na laser te tako utječe na rezultate mjerenja. Kako bi se utvrdilo kakav točno utjecaj nedovoljna krutost poda ima na rezultate mjerenja bilo je potrebno provesti nekoliko različitih mjerenja s obzirom na to gdje je operater, koji je izvodio mjerenja, stajao prilikom bilježenja odstupanja od pravocrtnosti. Prema tome, razlikuju se mjerenja izvedena s ponovljivim postavljanjem operatera te mjerenja izvedena s nasumičnim postavljanjem operatera. Nasumično postavljanje operatera označava da je operater, koji je izvodio mjerenja, prije bilježenja vrijednosti odstupanja za svaku poziciju, stajao na drugom mjestu i tako mijenjao položaj tereta na podu. Ponovljivo postavljanje označava da se operater, nakon svakog pomicanja interferometra za 100 mm, vratio na istu stajaću poziciju te tek nakon toga je zabilježena vrijednost odstupanja od pravocrtnosti u određenoj poziciji.

Pretpostavka je da vibracije poda nemaju utjecaja na interferometar i reflektor jer se ta dva dijela mjernog sustava pomiču zajedno sa stolom, ali imaju utjecaja na laser i optičku prizmu upravo zbog toga što su oni postavljeni eksterno u odnosu na stol i ne pomiču se zajedno s njim. Samim time se pretpostavlja da će se utjecaj poda minimizirati postavljanjem lasera i optičke prizme na optički stol (Slika 52), no svejedno je potrebno utvrditi koliki utjecaj pod ima na rezultate mjerenja kada su laser i prizma postavljeni eksterno u odnosu na stol jer ponekad, zbog veličine predmeta mjerenja, postavljanje lasera i optičke prizme na stol nije moguće. Upravo zato su uspoređena mjerenja obavljena prije i nakon pozicioniranja lasera i optičke prizme na optički stol, kako bi se utvrdilo kako vibracije poda utječu na rezultate mjerenja u različitim uvjetima.

Ukupno je provedeno 7 mjerenja. Dva mjerenja su napravljena prilikom ponovljivog postavljanja operatera u odnosu na optički stol, a zatim pet mjerenja s nasumičnim postavljanjem operatera u odnosu na stol, od kojih su zadnja dva mjerenja izvedena nakon postavljanja lasera i optičke prizme na optički stol (Slika 52).



Slika 52. Laser i optička prizma postavljeni na stol

5.1.1. Mjerenja izvedena ponovljivim postavljanjem operatera

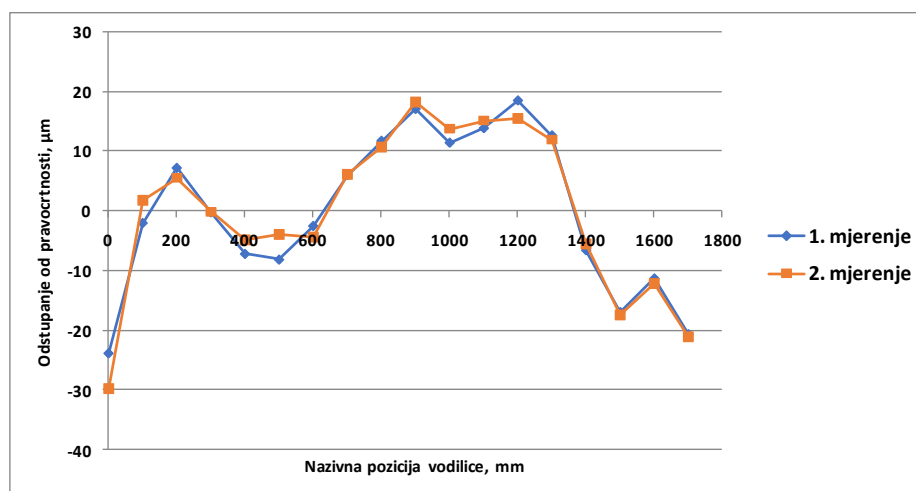
U sljedećoj tablici dani su aritmetička sredina odstupanja od pravocrtnosti i odgovarajuće procijenjeno standardno odstupanje svake točke mjerenja za oba mjerenja izvedena ponovljivim postavljanjem operatera u odnosu na optički stol. U tablici oznaka " $\bar{x}-2s$ " predstavlja minimalno odstupanje od pravocrtnosti s razinom povjerenja od približno 95%, kako je prikazano na slici 29, a oznaka " $\bar{x}+2s$ " predstavlja maksimalno odstupanje od pravocrtnosti s istom razinom povjerenja.

Tablica 1. Analiza mjerenja izvedena ponovljivim postavljanjem operatera

Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	$\bar{x}-2s$ [μm]	$\bar{x}+2s$ [μm]
1. točka = 0 mm	-26,76	4,18	-35,12	-18,41
2. točka = 100 mm	-0,10	2,65	-5,40	5,21
3. točka = 200 mm	6,42	1,20	4,03	8,82
4. točka = 300 mm	-0,16	0,05	-0,25	-0,06

5. točka = 400 mm	-5,99	1,64	-9,27	-2,70
6. točka = 500 mm	-6,02	2,96	-11,93	-0,11
7. točka = 600 mm	-3,40	1,32	-6,04	-0,76
8. točka = 700 mm	6,07	0,01	6,06	6,08
9. točka = 800 mm	11,24	0,81	9,61	12,86
10. točka = 900 mm	17,71	0,78	16,14	19,27
11. točka = 1000 mm	12,63	1,60	9,43	15,83
12. točka = 1100 mm	14,54	0,86	12,82	16,27
13. točka = 1200 mm	17,06	2,14	12,79	21,34
14. točka = 1300 mm	12,33	0,54	11,25	13,42
15. točka = 1400 mm	-6,00	0,77	-7,54	-4,46
16. točka = 1500 mm	-17,13	0,32	-17,77	-16,49
17. točka = 1600 mm	-11,66	0,56	-12,79	-10,53
18. točka = 1700 mm	-20,79	0,24	-21,27	-20,31

Procijenjeno standardno odstupanje nam govori o rasipanju rezultata. Što je procijenjeno standardno odstupanje manje, to je i rasipanje rezultata manje, te preciznost rezultata veća. Dijagram s usporedbom dobivenih odstupanja od pravocrtnosti oba mjerenja prikazan je na slici ispod.



Slika 53. Usporedba odstupanja od pravocrtnosti dobivenih ponovljivim postavljanjem operatera

5.1.2. Mjerenja izvedena nasumičnim postavljanjem operatera

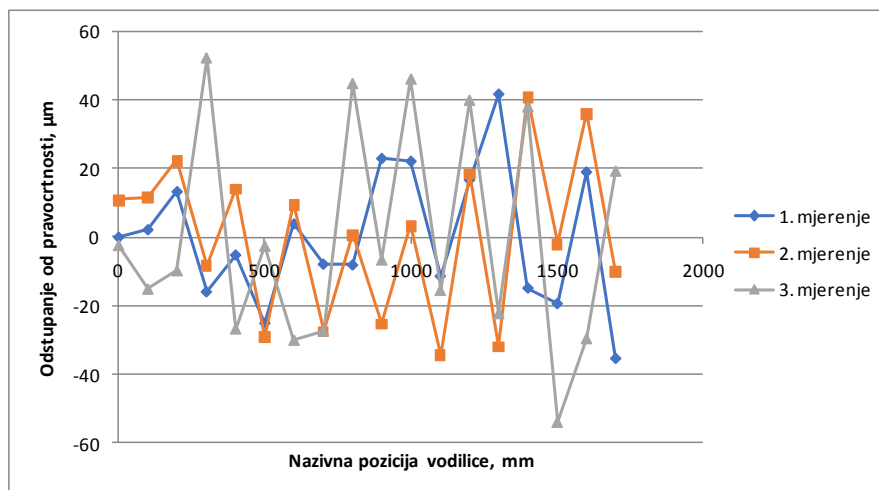
U sljedećoj tablici dani su aritmetička sredina odstupanja od pravocrtnosti i odgovarajuće procijenjeno standardno odstupanje svake točke mjerenja za prva tri mjerenja s nasumičnim postavljanjem operatera, izvedena prije postavljanja lasera i optičke prizme na stol.

Tablica 2. Analiza za prva 3 mjerenja izvedena nasumičnim postavljanjem operatera, prije postavljanja lasera i prizme na stol

Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	$\bar{x}-2s$ [μm]	$\bar{x}+2s$ [μm]
1. točka = 0 mm	2,89	7,07	-11,26	17,04
2. točka = 100 mm	-0,38	13,56	-27,50	26,73
3. točka = 200 mm	8,71	16,59	-24,47	41,89
4. točka = 300 mm	9,44	37,37	-65,31	84,19
5. točka = 400 mm	-5,87	20,44	-46,74	35,01
6. točka = 500 mm	-18,87	14,34	-47,54	9,80
7. točka = 600 mm	-5,45	21,40	-48,25	37,36
8. točka = 700 mm	-20,89	11,34	-43,57	1,80
9. točka = 800 mm	12,54	28,35	-44,17	69,25
10. točka = 900 mm	-3,00	24,39	-51,78	45,79
11. točka = 1000 mm	23,90	21,50	-19,11	66,90
12. točka = 1100 mm	-20,41	12,42	-45,24	4,42
13. točka = 1200 mm	25,12	12,96	-0,80	51,04
14. točka = 1300 mm	-4,19	40,04	-84,28	75,90
15. točka = 1400 mm	21,51	31,41	-41,32	84,33
16. točka = 1500 mm	-25,00	26,46	-77,92	27,92
17. točka = 1600 mm	8,59	34,09	-59,59	76,78
18. točka = 1700 mm	-8,65	27,30	-63,25	45,96

Uspoređujući procijenjena standardna odstupanja u tablicama 1 i 2 može se primijetiti kako su se vrijednosti spomenutih odstupanja povećala u mjerenjima izvedenima nasumičnim postavljanjem operatera, što se prethodno u radu i pretpostavilo.

Aritmetičke sredine odstupanja od pravocrtnosti dobivenih mjerenjima izvedenima nasumičnim postavljanjem operatera prikazane su na dijagramu ispod.



Slika 54. Usporedba odstupanja od pravocrtnosti dobivenih nasumičnim postavljanjem operatera

Po dijagramu na slici 54, kao i po rezultatima prikazanim u tablici 2, može se zaključiti da nedovoljna krutost poda ima velikog utjecaja na rezultate mjerenja te se ovakvi rezultati ne mogu uzeti u obzir u daljnjoj analizi. Utjecaj poda na rezultate mjerenja može se smanjiti ako se mjerenja izvedu s ponovljivim postavljanjem operatera.

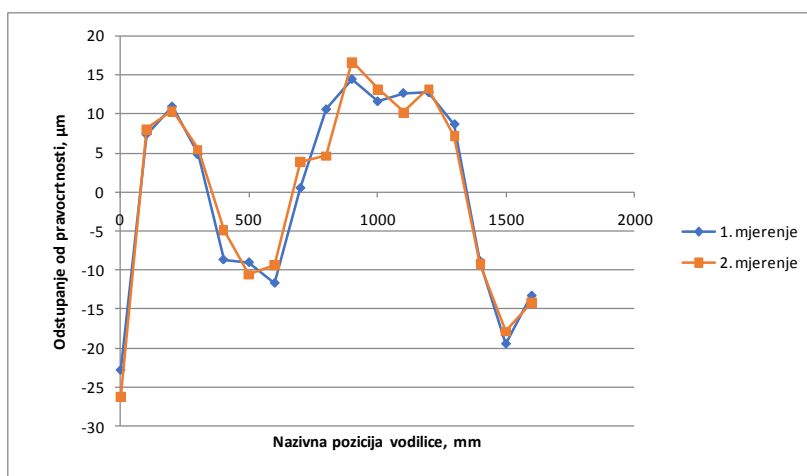
U tablici ispod prikazani su podaci za zadnja dva mjerenja s nasumičnim postavljanjem operatera, izvedena nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol. U tim mjerenjima ima 16 mjernih pozicija, 17. točki mjerenja se nije moglo pristupiti zbog položaja optičke prizme.

Tablica 3. Analiza mjerenja izvedena nasumičnim postavljanjem operatera nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol

Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	$\bar{x}-2s$ [μm]	$\bar{x}+2s$ [μm]
1. točka = 0 mm	-24,57	2,48	-29,53	-19,62
2. točka = 100 mm	7,67	0,47	6,73	8,60
3. točka = 200 mm	10,61	0,41	9,79	11,42

4. točka = 300 mm	5,10	0,49	4,12	6,07
5. točka = 400 mm	-6,82	2,65	-12,12	-1,51
6. točka = 500 mm	-9,83	1,12	-12,07	-7,58
7. točka = 600 mm	-10,54	1,61	-13,75	-7,32
8. točka = 700 mm	2,15	2,36	-2,57	6,87
9. točka = 800 mm	7,59	4,17	-0,75	15,94
10. točka = 900 mm	15,53	1,60	12,33	18,73
11. točka = 1000 mm	12,37	1,15	10,07	14,67
12. točka = 1100 mm	11,41	1,71	8,00	14,82
13. točka = 1200 mm	12,95	0,39	12,17	13,73
14. točka = 1300 mm	7,89	1,05	5,79	9,99
15. točka = 1400 mm	-9,07	0,23	-9,53	-8,62
16. točka = 1500 mm	-18,68	1,09	-20,86	-16,51
17. točka = 1600 mm	-13,75	0,64	-15,02	-12,48

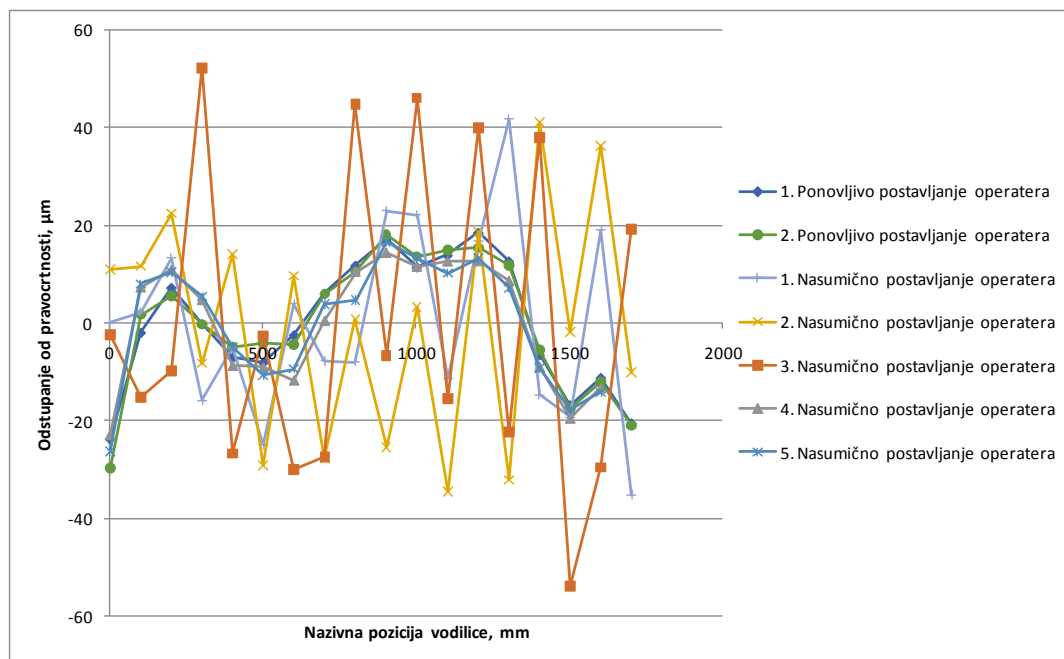
Po rezultatima u tablici vidi se da se standardno odstupanje od aritmetičke sredine u ovom slučaju znatno smanjilo, u usporedbi s onima iz tablice 2, iako se radi o mjerenjima izvedenima s nasumičnim postavljanjem operatora. Kao što je prethodno u radu i pretpostavljeno, utjecaj nedovoljne krutosti poda potpuno je smanjen postavljanjem svih korištenih mjernih uređaja na optički stol. Isto je prikazano i na dijagramu ispod.



Slika 55. Usporedba rezultata mjerenja izvedena nasumičnim postavljanjem operatora nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol

5.1.3. Usporedba rezultata mjerenja izvedena s ponovljivim i nasumičnim postavljanjem operatera

Na dijagramu na slici 56 vide se odstupanja od pravocrtnosti dobivena mjerenjima izvedenima ponovljivim i nasumičnim postavljanjem operatera u odnosu na stol. Zadnja dva mjerenja izvedena nasumičnim postavljanjem operatera provedena su nakon postavljanja lasera i optičke prizme na optički stol.



Slika 56. Usporedba svih rezultata mjerenja

U sljedećoj tablici dane su vrijednosti pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata određenih skupina mjerenja.

Tablica 4. Analiza pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata po skupinama mjerenja

Skupina mjerenja	Pogreška pravocrtnosti [μm]	Rasipanje rezultata [μm]
Mjerenja izvedena ponovljivim postavljanjem operatera	44,47	16,7
Mjerenja izvedena nasumičnim postavljanjem operatera, prije postavljanja lasera i prizme na stol	50,12	160,2
Mjerenja izvedena nasumičnim postavljanjem operatera, nakon postavljanja lasera i prizme na stol	40,10	16,7

Rasipanja rezultata jednaka su kod mjerenja izvedenih ponovljivim postavljanjem operatera prije i nasumičnim postavljanjem nakon postavljanja lasera i prizme na stol, dok se rasipanja onih mjerenja izvedenih nasumičnim postavljanjem operatera, prije postavljanja lasera i prizme na stol, znatno razlikuju, odnosno povećala su se otprilike 10 puta. Time se potvrđuje pretpostavka da se utjecaj nedovoljne krutosti poda potpuno smanjuje postavljanjem svih dijelova mjernog sustava interno u odnosu na stol.

Analizirajući podatke u tablicama 1, 2 i 3 i dijagrame na slikama 53, 54 i 55, može se zaključiti kako je nedovoljna krutost poda imala veliki utjecaj na same rezultate mjerenja. Podatke mjerenja s nasumičnim postavljanjem operatera, prije postavljanja lasera i optičke prizme na stol, ne smije se uzeti u obzir prilikom daljnje analize podataka jer bi posljedica bila neprecizni, ali i netočni rezultati. Isto je dokazano rezultatima analize svih mjerenja zajedno, i s ponovljivim i s nasumičnim postavljanjem operatera, u tablici ispod.

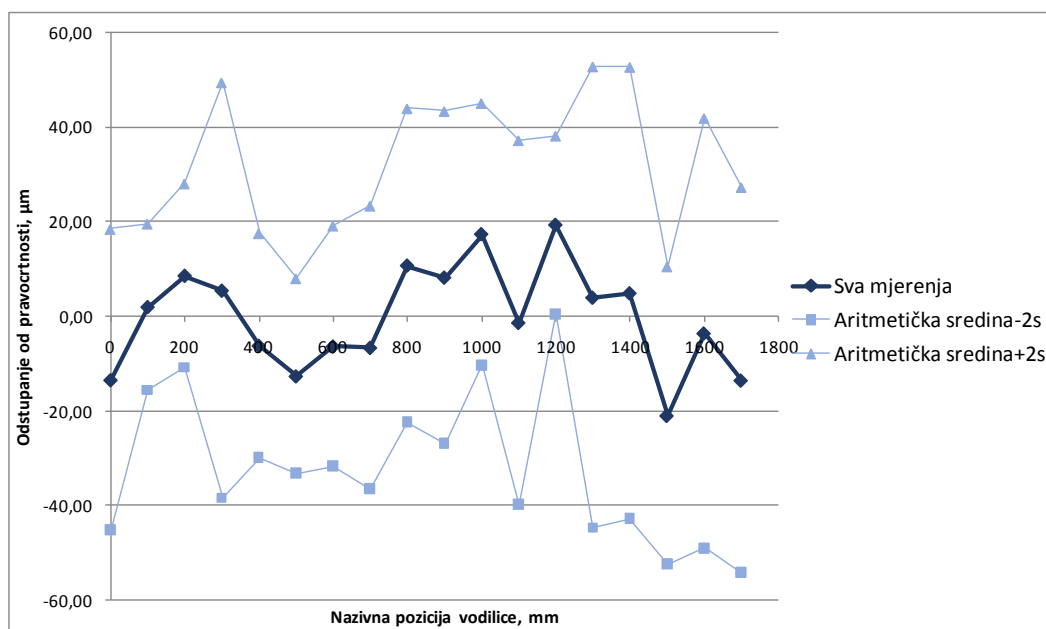
Tablica 5. Analiza rezultata svih mjerenja zajedno – ponovljiva i nasumična postavljanja operatera

Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	$\bar{x}-2s$ [μm]	$\bar{x}+2s$ [μm]
1. točka = 0 mm	-13,43	15,95	-45,33	18,47
2. točka = 100 mm	2,00	8,80	-15,61	19,60
3. točka = 200 mm	8,60	9,74	-10,89	28,09
4. točka = 300 mm	5,46	22,00	-38,55	49,46
5. točka = 400 mm	-6,17	11,88	-29,93	17,58
6. točka = 500 mm	-12,62	10,34	-33,29	8,06
7. točka = 600 mm	-6,32	12,75	-31,82	19,18
8. točka = 700 mm	-6,60	15,00	-36,59	23,39
9. točka = 800 mm	10,75	16,61	-22,47	43,98
10. točka = 900 mm	8,21	17,59	-26,98	43,40
11. točka = 1000 mm	17,38	13,85	-10,32	45,09
12. točka = 1100 mm	-1,33	19,29	-39,91	37,25

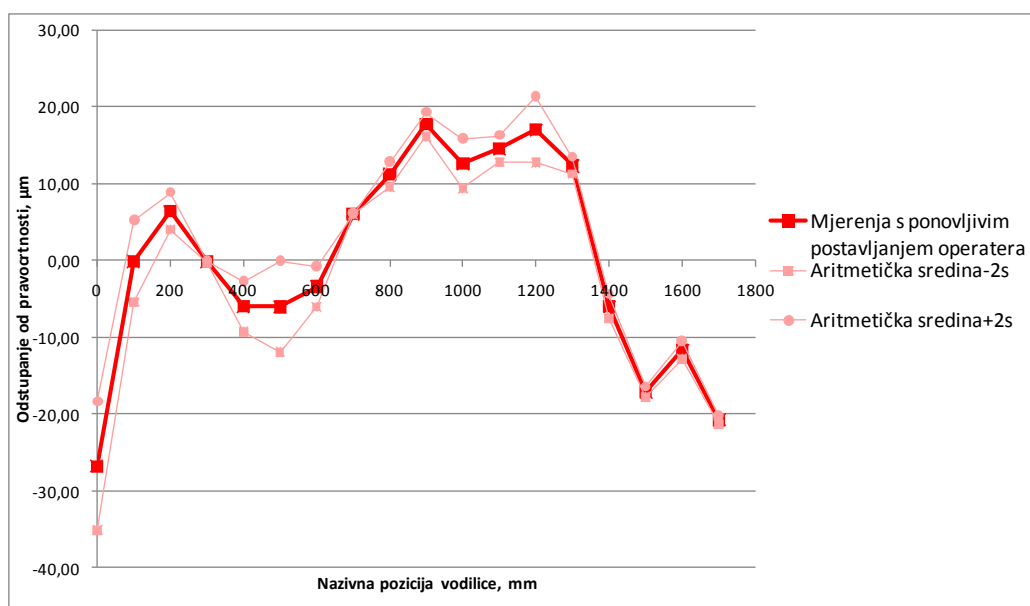
13. točka = 1200 mm	19,34	9,42	0,49	38,19
14. točka = 1300 mm	3,98	24,42	-44,86	52,83
15. točka = 1400 mm	4,91	23,91	-42,90	52,73
16. točka = 1500 mm	-20,95	15,76	-52,47	10,57
17. točka = 1600 mm	-3,58	22,76	-49,09	41,94
18. točka = 1700 mm	-13,50	20,42	-54,34	27,33

Usporedbom aritmetičkih sredina i odgovarajućih odstupanja od sredine svih točaka mjerenja u tablicama 1 i 5, vidi se velika razlika između rezultata. Standardno odstupanje dobiveno analizom svih mjerenja zajedno, prikazano u tablici 5, u prosjeku se povećalo 128 puta u odnosu na odstupanje u tablici 1, a maksimalno povećanje je u točki 8 gdje se vrijednost standardnog odstupanja povećala čak 1500 puta.

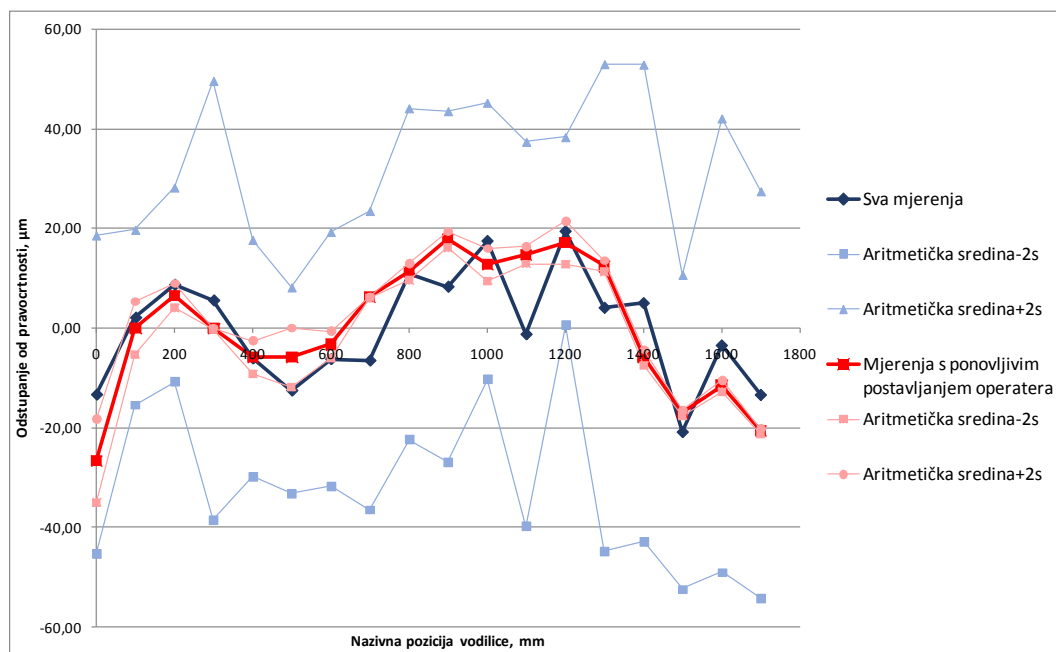
Na slici 57 prikazan je dijagram aritmetičkih sredina odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja zajedno, iz tablice 5, dok je na slici 58 prikazan dijagram aritmetičkih sredina odstupanja od pravocrtnosti mjerenja izvedenih ponovljivim postavljanjem operatera, iz tablice 1. Na slici 59 su te iste aritmetičke sredine prikazane zajedno kako bi se usporedile na istom dijagramu. Također su u dijagramima prikazane i odgovarajuće granice minimalnih i maksimalnih odstupanja od pravocrtnosti s razinom povjerenja od otprilike 95%.



Slika 57. Aritmetička sredina odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja zajedno



Slika 58. Aritmetička sredina odstupanja od pravocrtnosti mjerenja izvedena ponovljivim postavljanjem operatora

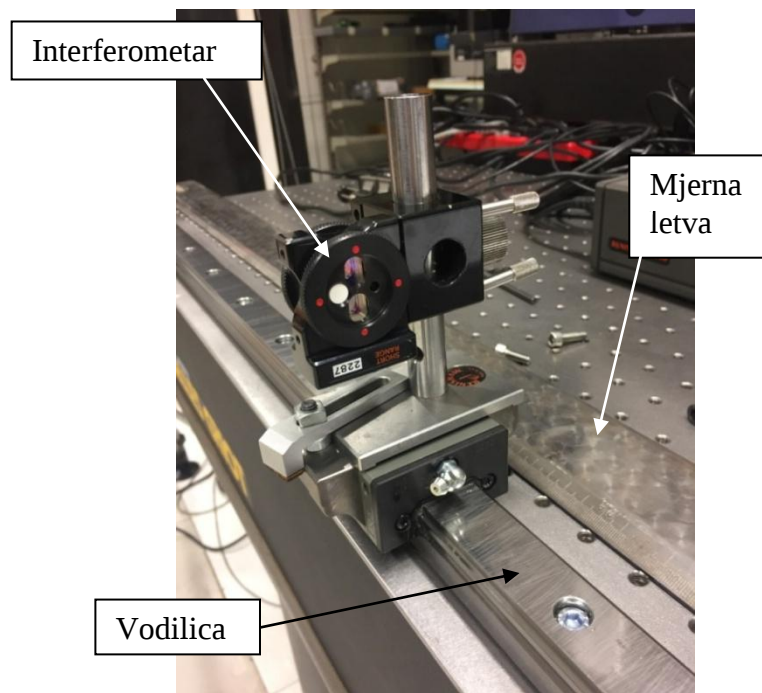


Slika 59. Usporedba aritmetičkih sredina svih mjerenja i mjerenja izvedena ponovljivim postavljanjem operatora

Iz dijagrama se može vidjeti da upotrebom rezultata mjerenja izvedenih nasumičnim postavljanjem operatora u daljnjoj analizi može dovesti do potpuno nepreciznih, ali i netočnih, rezultata, kao što je prethodno u radu i pretpostavljeno.

5.2. Ponovljivost pozicioniranja interferometra prilikom mjerenja odstupanja od pravocrtnosti

Prilikom mjerenja odstupanja od pravocrtnosti, interferometar je ručno pomican po vodilici. Paralelno s vodilicom, postavljena je mjerna letva po kojoj je određivan iznos pomaka interferometra (Slika 60).



Slika 60. Pozicija mjerne letve

Vrijednosti odstupanja od pravocrtnosti mjerene su svakih 100 mm po vodilici. S obzirom na to da je interferometar na klizaču ručno pomican, postoji mogućnost da je došlo do pogreške prilikom pozicioniranja interferometra na određenu udaljenost. Potrebno je izračunati koliko je moguće odstupanje rezultata od dobivenog kutnog odstupanja. Za krak pomicanja interferometra se u obzir uzima 2 mm pogreške za svaki smjer.

Koristi se sljedeća jednadžba:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{x}{L} \quad (18)$$

gdje je α kut odstupanja od pravocrtnosti, x dobiveno odstupanje od pravocrtnosti na određenoj poziciji, a L mogući krak.

Za mjerenjem dobiveno odstupanje od pravocrtnosti x od 0,1573 mm i krak L od 100 ± 2 mm, dobije se kutno odstupanje $\alpha = 0,001573^\circ \pm 0,000032^\circ$. Vidi se da pogreška od 2 mm prilikom pozicioniranja interferometra zanemarivo malo utječe na rezultate mjerenja.

6. MJERENJE Odstupanja od pravocrtnosti u smjeru osi X

6.1. Mjerenje horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti

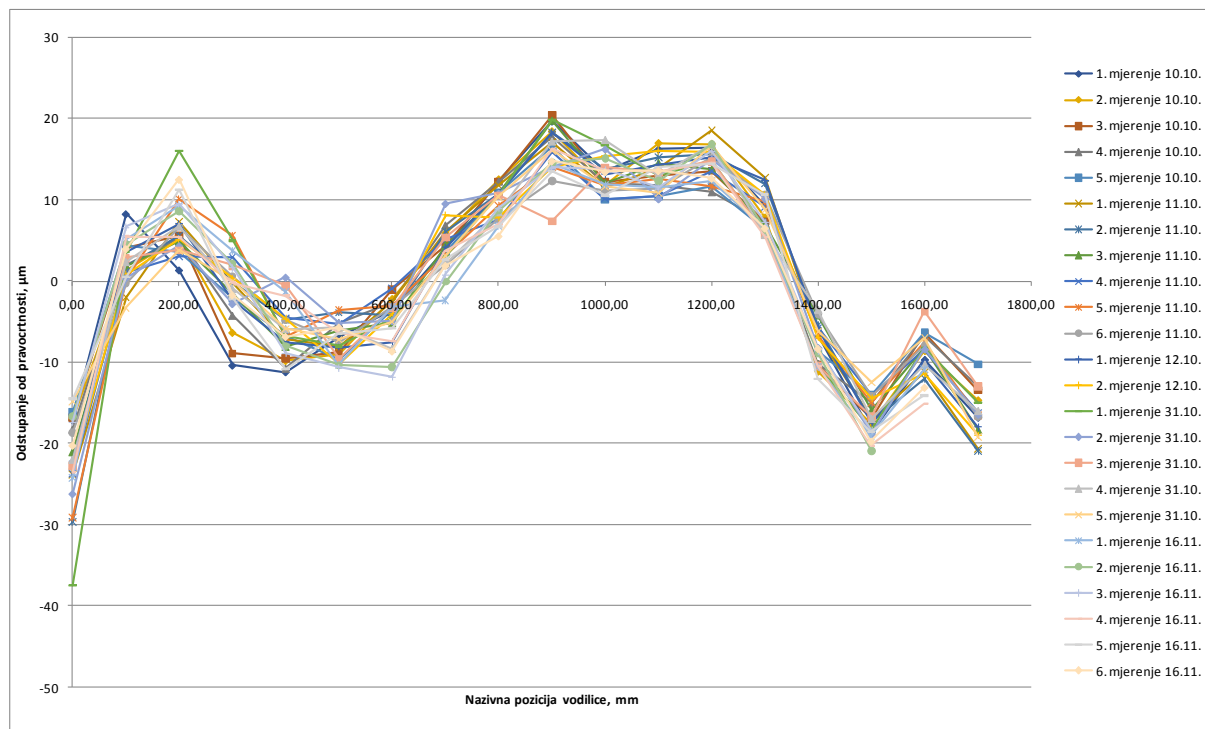
Odstupanja od pravocrtnosti u smjeru osi X mjerena su na vodilici dugačkoj 1,8 m (Slika 49).

6.1.1. Mjerenje interferometrom

6.1.1.1. Jednosmjerna mjerenja

Ukupno je provedeno 24 mjerenja. Većina mjerenja se sastoji od 18 točaka, odnosno mjerenja su rađena svakih 100 mm (0 mm – 1700 mm), dok se samo ona mjerenja 16.11.2018. sastoje od 17 točaka. Tada je optička prizma postavljena na rub stola (Slika 52) pa više nije bilo moguće pristupiti 18. mjernoj točki.

Na slici ispod prikazan je dijagram koji se sastoji od odstupanja od pravocrtnosti svih 24 provedenih mjerenja.



Slika 61. Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi X - interferometar

Kako bi se za svaku točku mjerenja dobila aritmetička sredina odstupanja od pravocrtnosti te procijenjeno standardno odstupanje od sredine korištene su jednadžbe (11) i (12). U tablici oznaka " $\bar{x}-2s$ " predstavlja minimalno odstupanje od pravocrtnosti s razinom povjerenja od približno 95%, kako je prikazano na slici 29, a oznaka " $\bar{x}+2s$ " predstavlja maksimalno odstupanje od pravocrtnosti s istom razinom povjerenja.

Tablica 6. Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi X - interferometar

Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	$\bar{x}-2s$ [μm]	$\bar{x}+2s$ [μm]
1. točka = 0 mm	-21,53	5,41	-32,34	-10,72
2. točka = 100 mm	2,48	2,66	-2,84	7,80
3. točka = 200 mm	6,75	3,37	0,01	13,48
4. točka = 300 mm	-0,86	3,90	-8,65	6,93
5. točka = 400 mm	-6,38	3,22	-12,82	0,06
6. točka = 500 mm	-7,42	2,11	-11,65	-3,20
7. točka = 600 mm	-4,90	2,84	-10,58	0,78
8. točka = 700 mm	3,90	2,60	-1,29	9,10
9. točka = 800 mm	9,62	2,06	5,49	13,75
10. točka = 900 mm	16,02	2,94	10,14	21,90
11. točka = 1000 mm	13,02	2,01	9,00	17,04
12. točka = 1100 mm	13,06	1,88	9,30	16,82
13. točka = 1200 mm	14,74	1,93	10,88	18,60
14. točka = 1300 mm	8,37	2,29	3,80	12,95
15. točka = 1400 mm	-7,93	2,45	-12,82	-3,03
16. točka = 1500 mm	-17,00	2,21	-21,43	-12,57
17. točka = 1600 mm	-9,70	2,91	-15,51	-3,89
18. točka = 1700 mm	-16,34	2,82	-21,98	-10,70

Dana 16.11.2018. laser i optička prizma postavljeni su na stol (Slika 52). Pretpostavka je da bi mjerenja izvedena toga dana trebala biti preciznija i imati manja standardna odstupanja od rezultata od prijašnjih mjerenja. Utjecaj nedovoljne krutosti poda na mjerenje već je objašnjen i dokazan u poglavlju 5.1, no ovdje je napravljena drugačija analiza. Uspoređuju se rezultati dobiveni mjerenjima s ponovljivim postavljanjem operatera (objašnjeno u poglavlju 5.1) prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, odnosno ne koriste se rezultati dobiveni nasumičnim postavljanjem operatera.

Ispod je dana usporedna tablica koja prikazuje aritmetičku sredinu i odgovarajuće procijenjeno standardno odstupanje od sredine za mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol.

Tablica 7. Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, u smjeru osi X - interferometar

	Mjerenja prije postavljanja		Mjerenja nakon postavljanja	
Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]
1. točka = 0 mm	-22,22	5,74	-19,45	3,94
2. točka = 100 mm	1,84	2,56	4,40	2,09
3. točka = 200 mm	5,86	3,20	9,43	2,44
4. točka = 300 mm	-1,34	4,24	0,56	2,31
5. točka = 400 mm	-6,41	3,09	-6,29	3,90
6. točka = 500 mm	-7,12	2,01	-8,33	2,34
7. točka = 600 mm	-3,89	1,91	-7,91	3,19
8. točka = 700 mm	4,83	2,02	1,10	2,16
9. točka = 800 mm	10,41	1,63	7,27	1,30
10. točka = 900 mm	16,50	3,24	14,60	0,96
11. točka = 1000 mm	13,01	2,17	13,05	1,58
12. točka = 1100 mm	13,18	2,09	12,73	1,11

13. točka = 1200 mm	14,83	2,03	14,48	1,75
14. točka = 1300 mm	8,80	2,31	7,11	1,82
15. točka = 1400 mm	-7,30	2,41	-9,81	1,44
16. točka = 1500 mm	-16,16	1,83	-19,51	1,02
17. točka = 1600 mm	-8,46	2,08	-13,41	1,48
18. točka = 1700 mm	-16,34	2,82		

Mjerenja napravljena 16.11. imaju samo 17 mjernih točaka, nemogućnost dolaska do 18. točke je posljedica postavljanja optičke prizme na stol, kao što je već spomenuto ranije.

Usporedbom odstupanja rezultata mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i prizme na stol, uočava se da 13, od 17, točaka ima manja odstupanja kod mjerenja napravljenih nakon postavljanja na stol.

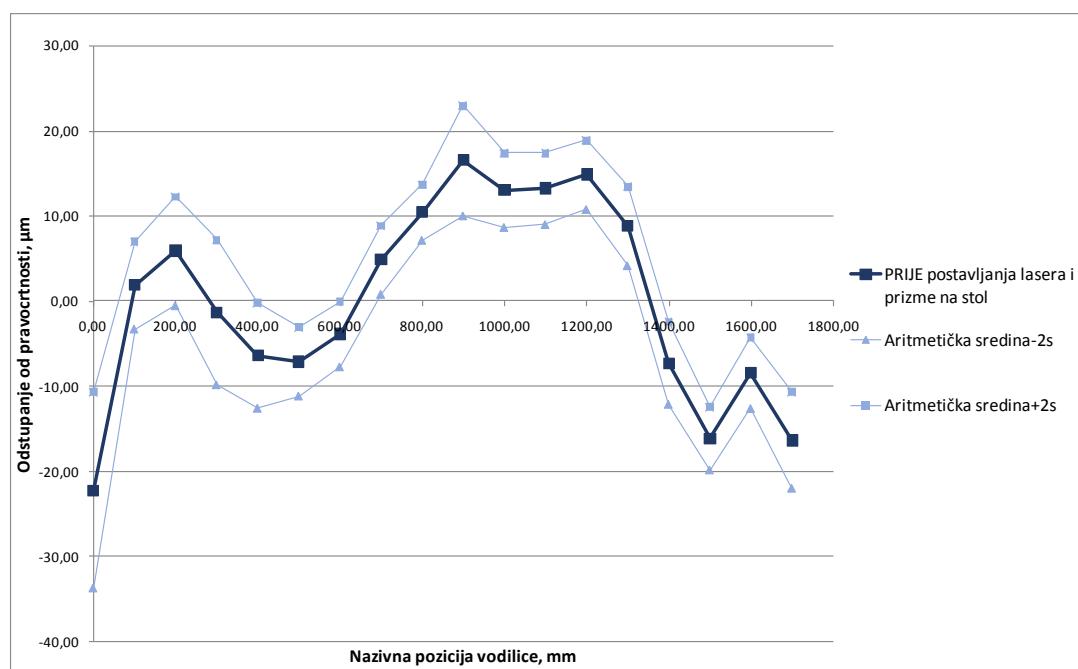
Odgovarajuća pogreška pravocrtosti i rasipanje rezultata prikazani su u tablici ispod po različitim skupinama mjerenja.

Tablica 8. Analiza horizontalne pogreške pravocrtosti i rasipanja rezultata svih mjerenja u smjeru osi X - interferometar

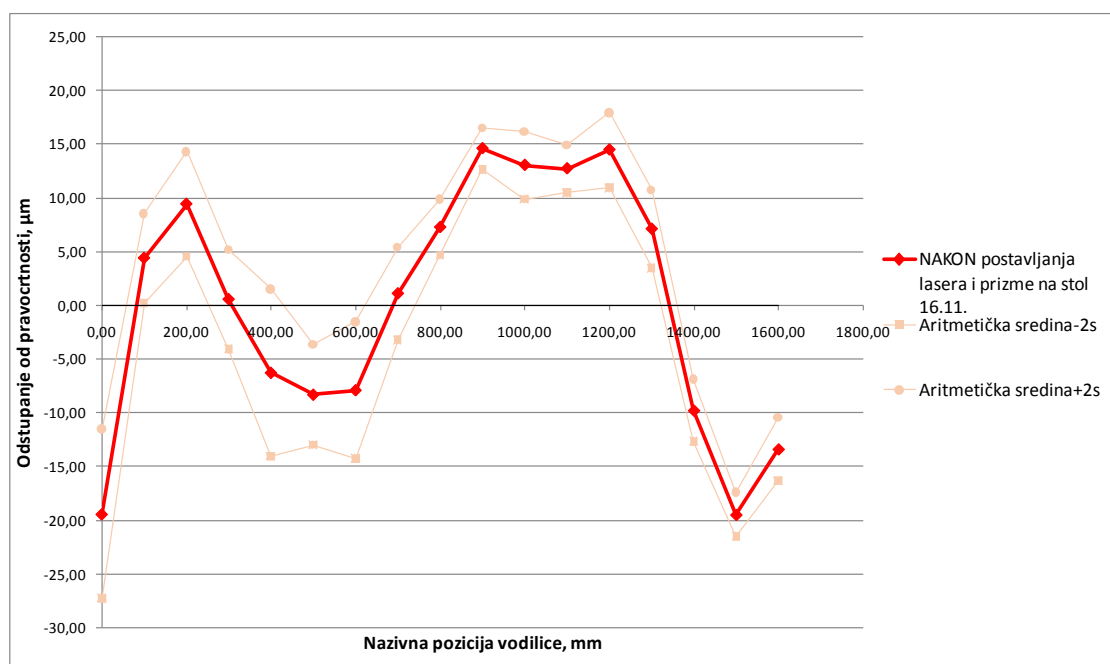
Skupina mjerenja	Pogreška pravocrtosti [μm]	Rasipanje rezultata [μm]
Sva mjerenja zajedno	37,6	21,6
Mjerenja prije postavljanja lasera i optičke prizme na stol	38,7	23,0
Mjerenja nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol	34,1	15,8

Kao što je već ranije u radu objašnjeno, utjecaj nedovoljne krutosti poda smanjuje se postavljanjem lasera i optičke prizme na stol, što se potvrđuje i ovim rezultatima. Rasipanje rezultata je najmanje kod mjerenja izvedenih nakon postavljanja lasera i prizme na stol što znači da su ta mjerenja najpreciznija.

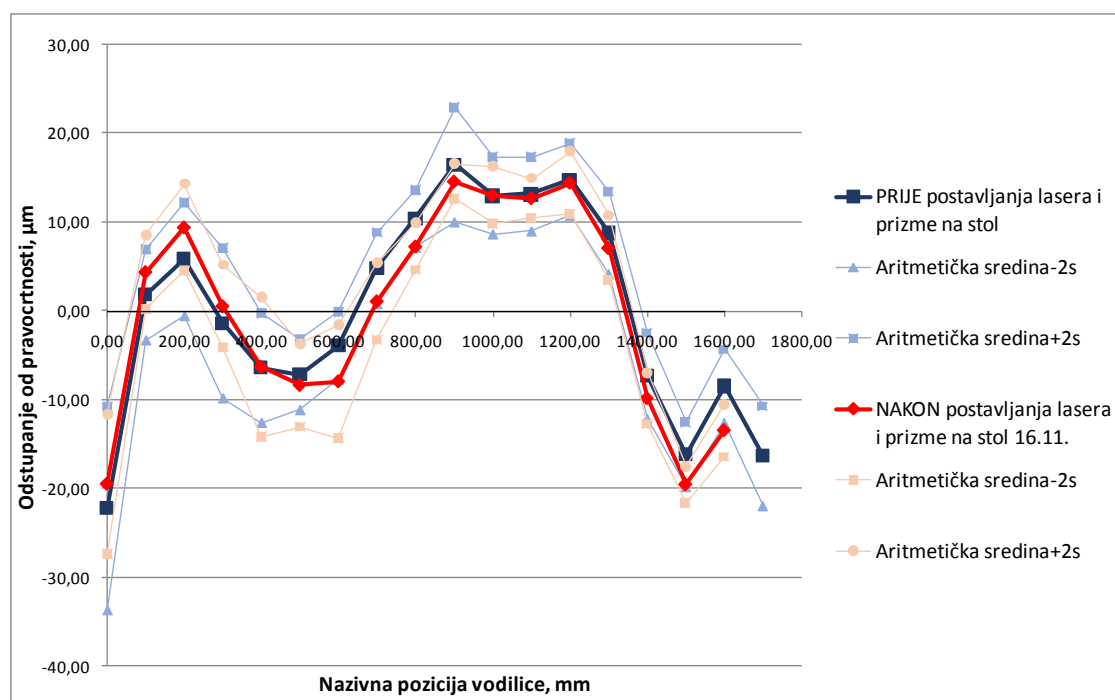
Na slikama ispod prikazani su dijagrami aritmetičkih sredina odstupanja od pravocrtosti dobivenih prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, te odgovarajuća minimalna i maksimalna odstupanja od pravocrtosti s razinom povjerenja od 95%.



Slika 62. Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X prije postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar



Slika 63. Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar

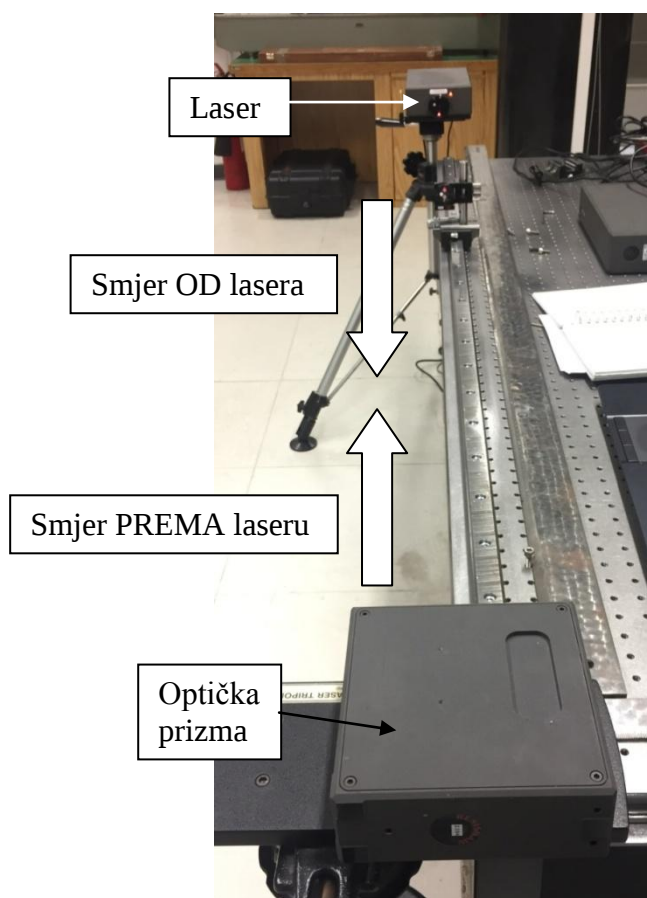


Slika 64. Usporedba aritmetičkih sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar

6.1.1.2. Dvosmjerna mjerenja

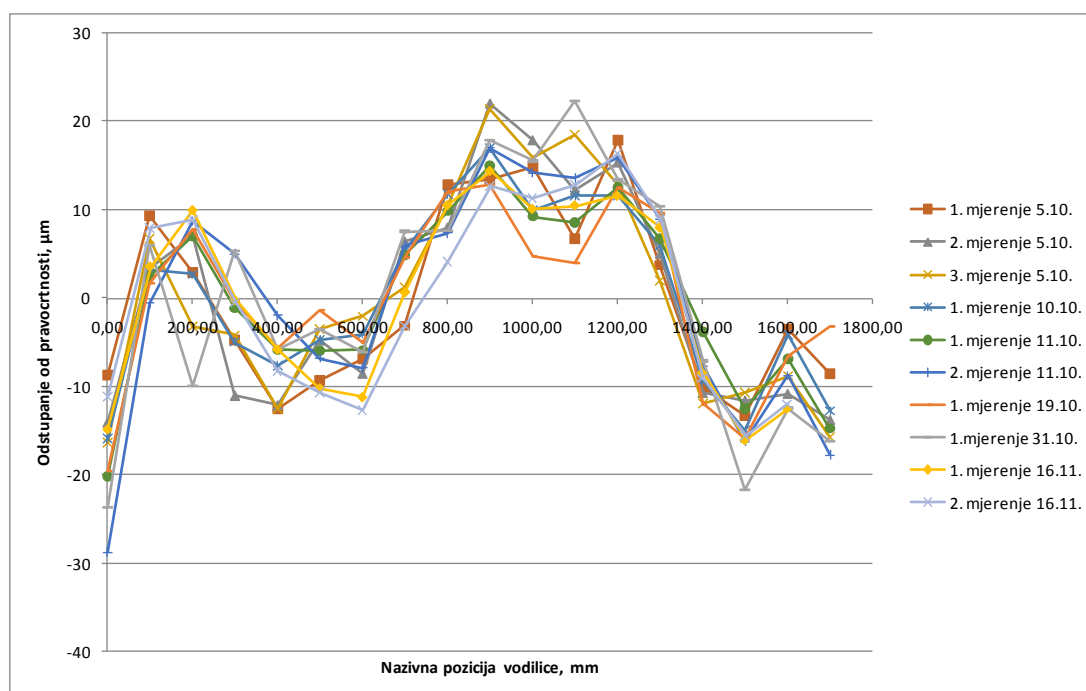
Dvosmjerno mjerenje se provodilo kako bi se usporedili rezultati dobiveni za oba smjera u istom mjerenju. Provedeno je ukupno 10 mjerenja. Rezultati su analizirani za svaki smjer zasebno te zatim uspoređivani. Dva smjera su:

- OD lasera prema optičkoj prizmi (0 mm – 1700 mm) i
- PREMA laseru od optičke prizme (1700 mm – 0 mm) (Slika 65).



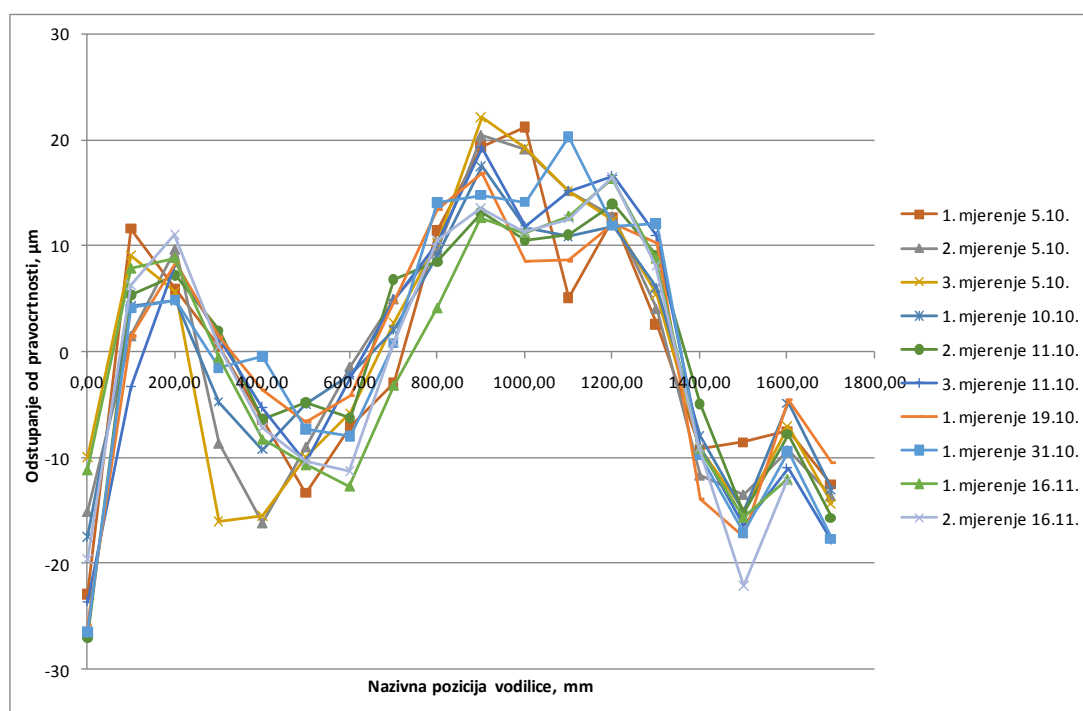
Slika 65. Smjer OD i PREMA laseru na vodilici u smjeru osi X

Rezultati svih mjerenja u smjeru od lasera, nakon provedene metode najmanjih kvadrata, prikazani su na slici ispod.



Slika 66. Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru OD lasera– interferometar

Rezultati svih mjerenja u smjeru prema laseru, nakon provedene metode najmanjih kvadrata, prikazani su na slici ispod.



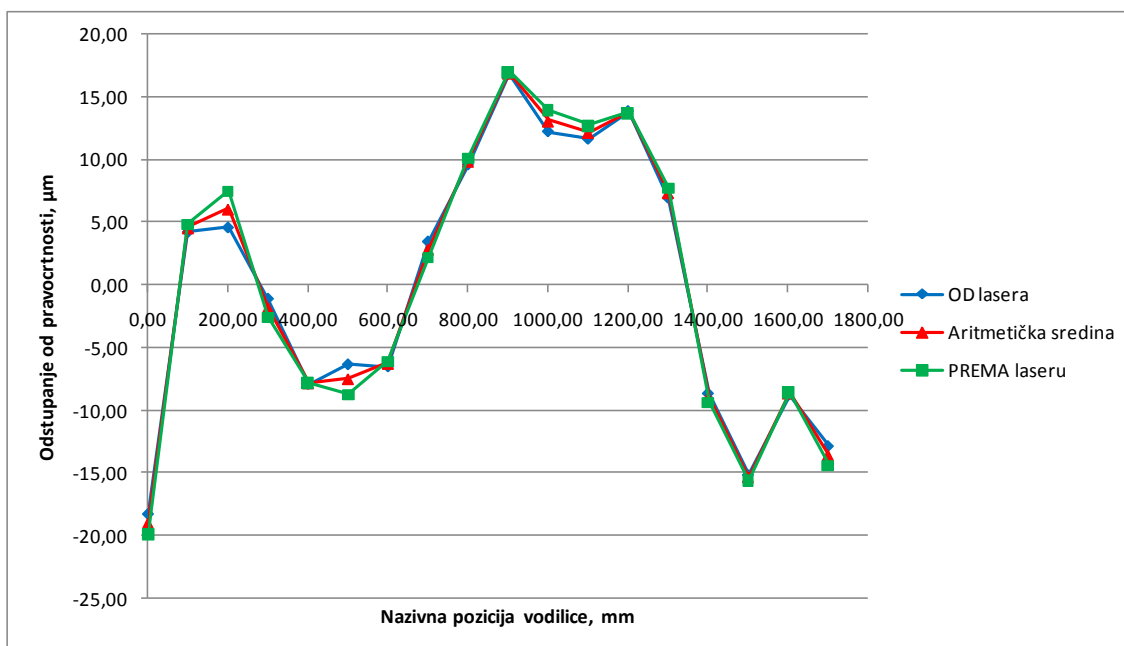
Slika 67. Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru PREMA laseru – interferometar

Analiza tih mjerenja u oba smjera prikazana je u tablici ispod. Analizom su dobiveni aritmetička sredina odstupanja od pravocrtnosti i procijenjeno standardno odstupanje rezultata.

Tablica 9. Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih dvosmjernih mjerenja u smjeru osi X - interferometar

	OD lasera		PREMA laseru	
Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]
1. točka = 0 mm	-18,26	5,55	-19,88	6,30
2. točka = 100 mm	4,20	2,88	4,87	4,29
3. točka = 200 mm	4,55	6,74	7,52	2,12
4. točka = 300 mm	-1,12	5,36	-2,55	5,76
5. točka = 400 mm	-7,91	3,61	-7,81	4,86
6. točka = 500 mm	-6,35	3,63	-8,70	2,77
7. točka = 600 mm	-6,52	2,53	-6,08	3,80
8. točka = 700 mm	3,43	3,37	2,21	3,36
9. točka = 800 mm	9,56	2,46	10,16	2,75
10. točka = 900 mm	16,80	3,09	17,02	3,34
11. točka = 1000 mm	12,21	4,07	13,94	4,38
12. točka = 1100 mm	11,61	5,51	12,73	4,19
13. točka = 1200 mm	13,82	2,05	13,74	2,00
14. točka = 1300 mm	6,92	2,74	7,77	3,11
15. točka = 1400 mm	-8,66	2,74	-9,33	2,29
16. točka = 1500 mm	-15,16	3,33	-15,57	3,40
17. točka = 1600 mm	-8,82	3,52	-8,53	2,73
18. točka = 1700 mm	-12,86	4,75	-14,38	2,57

Na slici ispod prikazane su linije aritmetičkih sredina odstupanja od pravocrtnosti za oba smjera posebno, te linija aritmetičke sredine tih dvaju smjerova.



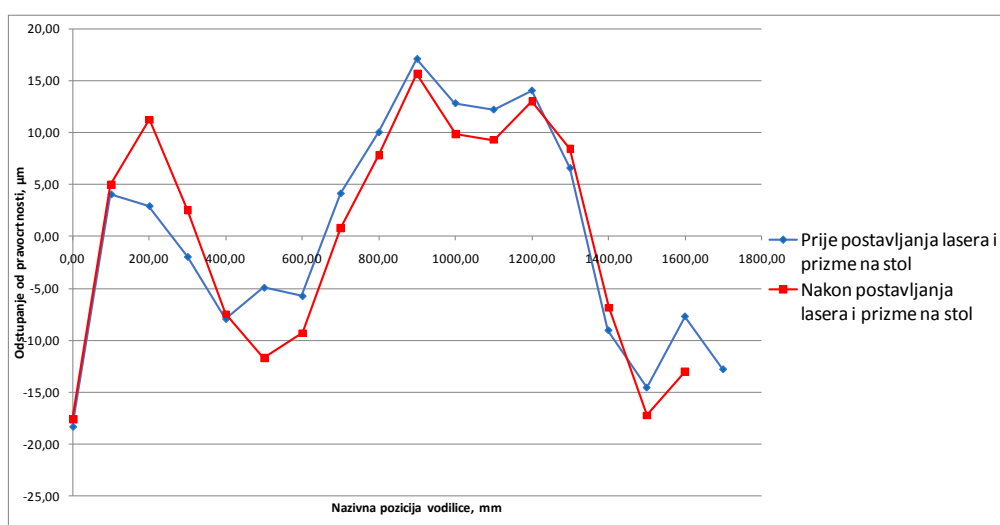
Slika 68. Usporedba aritmetičkih sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti dvosmjernih mjerenja u smjeru osi X – interferometar

Kako bi se otkrio utjecaj nedovoljne krutosti poda na dobivene rezultate, ista analiza provedena je posebno za mjerenja obavljena prije postavljanja optičke prizme i lasera na stol te posebno za mjerenja obavljena nakon postavljanja. Odgovarajuće aritmetičke sredine te procijenjena standardna odstupanja od sredine dani su u tablicama ispod te prikazani na slikama. U tablici 10 dani su rezultati za mjerenja provedena u smjeru od lasera te su isti prikazani na slici 69, a u tablici 11 dani su rezultati za mjerenja provedenih u smjeru prema laseru te prikazani na slici 70.

Tablica 10. Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, u smjeru od lasera - interferometar

	Mjerenja prije postavljanja		Mjerenja nakon postavljanja	
Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]
1. točka = 0 mm	-18,41	6,10	-17,67	3,92

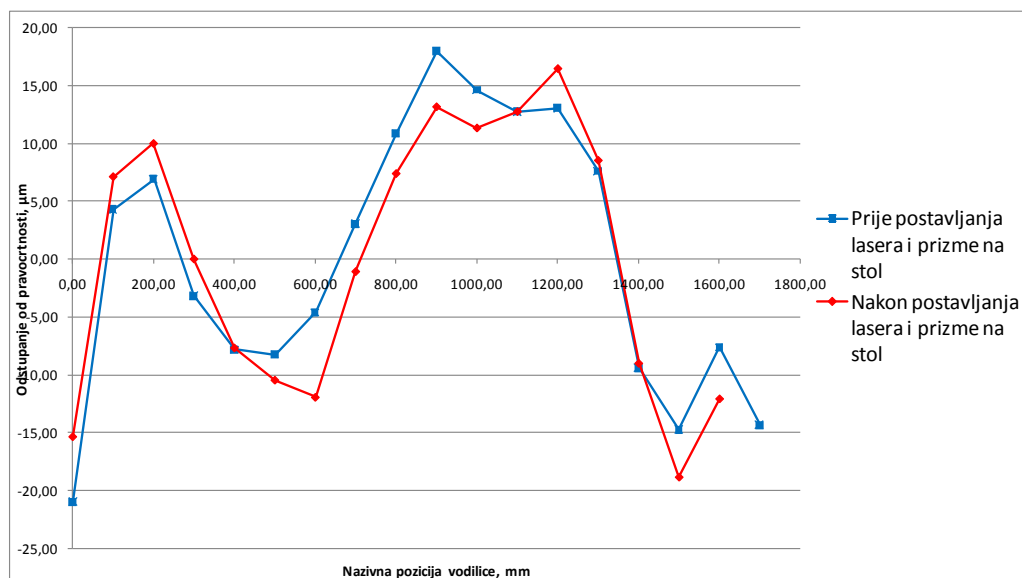
2. točka = 100 mm	4,00	3,14	4,99	1,96
3. točka = 200 mm	2,88	6,48	11,24	1,77
4. točka = 300 mm	-2,02	5,49	2,50	3,84
5. točka = 400 mm	-8,01	3,99	-7,50	2,37
6. točka = 500 mm	-5,00	2,42	-11,74	2,14
7. točka = 600 mm	-5,81	2,09	-9,34	2,69
8. točka = 700 mm	4,10	3,48	0,77	0,16
9. točka = 800 mm	10,00	2,13	7,82	3,86
10. točka = 900 mm	17,08	3,37	15,68	1,75
11. točka = 1000 mm	12,80	4,38	9,83	0,43
12. točka = 1100 mm	12,19	6,05	9,29	1,75
13. točka = 1200 mm	14,03	2,15	12,99	1,94
14. točka = 1300 mm	6,55	2,97	8,40	0,54
15. točka = 1400 mm	-9,10	2,79	-6,90	2,26
16. točka = 1500 mm	-14,63	3,49	-17,30	1,69
17. točka = 1600 mm	-7,76	3,08	-13,04	0,75
18. točka = 1700 mm	-12,86	4,75		



Slika 69. Usporedba aritmetičkih sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtosti mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, u smjeru od lasera - interferometar

Tablica 11. Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, u smjeru prema laseru - interferometar

	Mjerenja prije postavljanja		Mjerenja nakon postavljanja	
Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]
1. točka = 0 mm	-21,01	6,21	-15,36	6,02
2. točka = 100 mm	4,31	4,66	7,10	1,11
3. točka = 200 mm	6,91	1,82	9,97	1,53
4. točka = 300 mm	-3,19	6,35	-0,01	0,72
5. točka = 400 mm	-7,84	5,50	-7,69	0,75
6. točka = 500 mm	-8,26	2,96	-10,48	0,21
7. točka = 600 mm	-4,62	2,47	-11,96	0,95
8. točka = 700 mm	3,04	3,07	-1,09	2,89
9. točka = 800 mm	10,86	2,00	7,37	4,55
10. točka = 900 mm	17,99	2,98	13,14	0,69
11. točka = 1000 mm	14,60	4,71	11,31	0,08
12. točka = 1100 mm	12,73	4,75	12,72	0,17
13. točka = 1200 mm	13,06	1,59	16,44	0,14
14. točka = 1300 mm	7,58	3,50	8,51	0,46
15. točka = 1400 mm	-9,41	2,59	-9,02	0,06
16. točka = 1500 mm	-14,75	2,82	-18,86	4,64
17. točka = 1600 mm	-7,65	2,25	-12,09	0,16
18. točka = 1700 mm	-14,38	2,57		



Slika 70. Usporedba aritmetičkih sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, u smjeru prema laseru - interferometar

Na dijagramima na slikama može se vidjeti da linije prate isti trend, a proučavajući tablice vidi se da u većini slučajeva mjerenja provedena nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol imaju manja standardna odstupanja od onih provedenih prije postavljanja lasera i prizme na stol.

Odgovarajuća pogreška pravocrtnosti i rasipanje rezultata prikazani su u tablici ispod po različitim skupinama mjerenja.

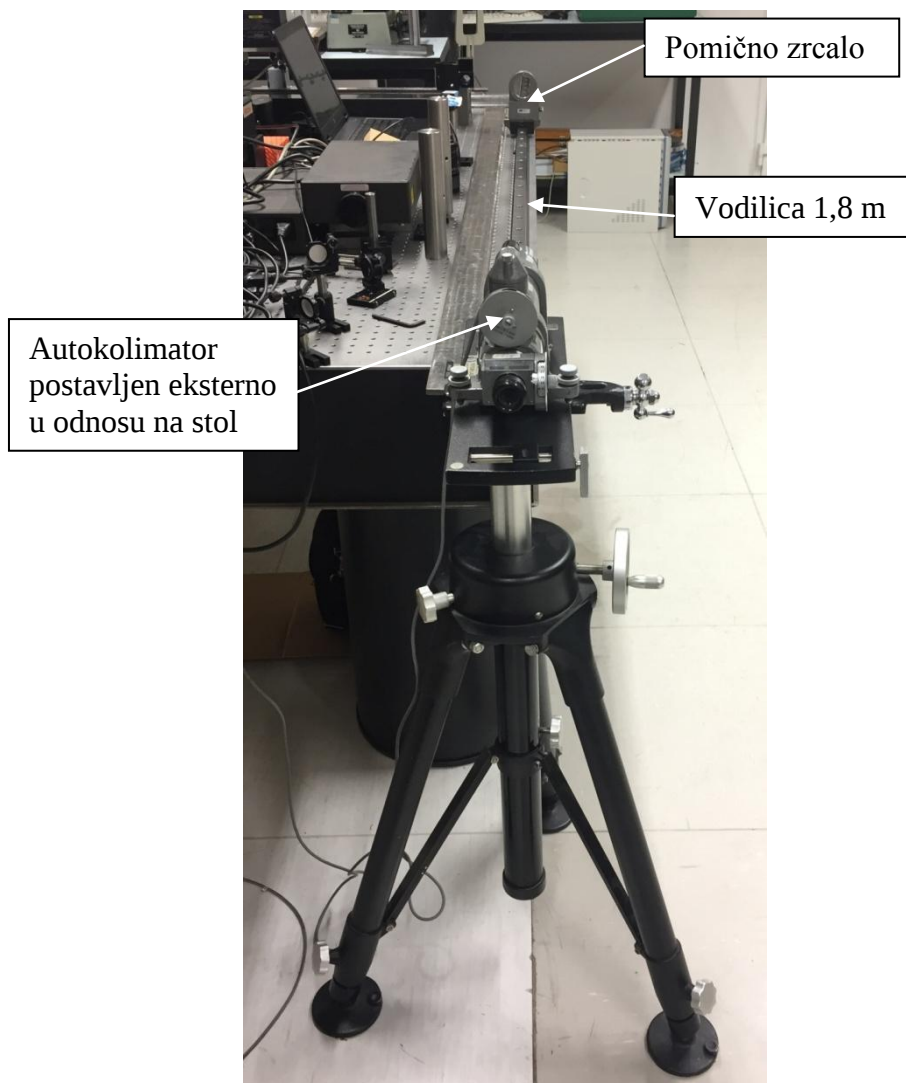
Tablica 12. Analiza horizontalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih dvosmjernih mjerenja u smjeru osi X - interferometar

Skupina mjerenja	Pogreška pravocrtnosti [μm]	Rasipanje rezultata [μm]
Sva mjerenja zajedno	35,98	26,96
Mjerenja prije postavljanja lasera i optičke prizme na stol	37,24	27,22
Mjerenja nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol	32,79	24,09

Dobivene pogreške pravocrtnosti podudaraju se s onima dobivenima jednosmjernim mjerenjima (poglavlje 6.1.1.1). Rasipanje rezultata najmanje je kod mjerenja izvedenih nakon postavljanja lasera i prizme na stol što znači da su ta mjerenja najpreciznija, kao što se prethodno u radu i pretpostavilo.

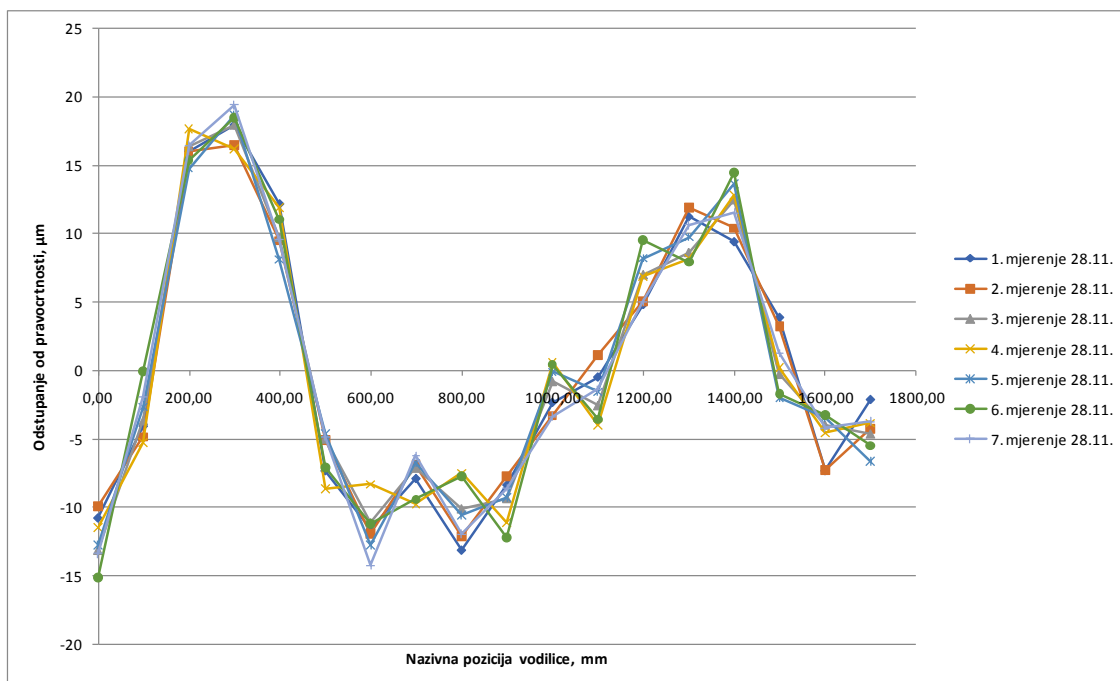
6.1.2. Mjerenje autokolimatorom

Na slici ispod prikazan je korišteni autokolimator postavljen eksterno u odnosu na stol te pomično zrcalo koje se giba po vodilici.



Slika 71. Autokolimator na vodilici 1,8 m

Provedeno je ukupno 7 jednosmjernih mjerenja s 18 mjernih točaka (0 mm – 1700 mm). Na dijagramu na slici ispod prikazana su odstupanja od pravocrtnosti svih 18 točaka.



Slika 72. Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi X - autokolimator

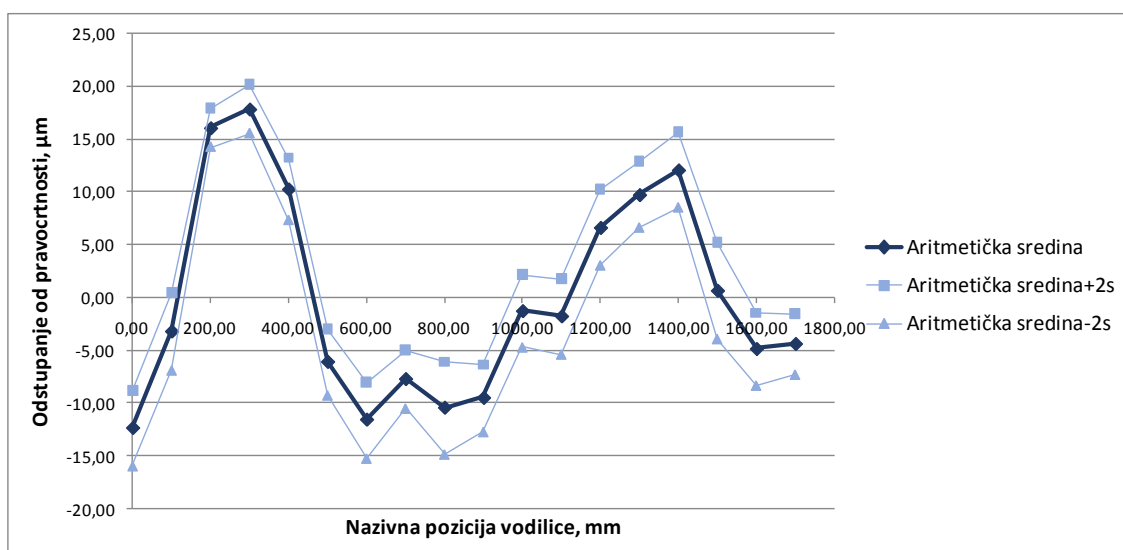
Na dijagramu se vidi da sva mjerenja imaju otprilike jednaki trend. Analizom su dobiveni aritmetička sredina i odgovarajuća procijenjena standardna odstupanja svih točaka svih mjerenja te su prikazani u tablici ispod.

Tablica 13. Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru X osi - autokolimator

Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	$\bar{x}-2s$ [μm]	$\bar{x}+2s$ [μm]
1. točka = 0 mm	-12,38	1,77	-15,91	-8,84
2. točka = 100 mm	-3,21	1,83	-6,87	0,44
3. točka = 200 mm	16,09	0,91	14,27	17,90
4. točka = 300 mm	17,87	1,16	15,55	20,18
5. točka = 400 mm	10,27	1,46	7,35	13,20
6. točka = 500 mm	-6,10	1,56	-9,23	-2,97
7. točka = 600 mm	-11,59	1,80	-15,19	-7,98
8. točka = 700 mm	-7,73	1,37	-10,47	-4,99

9. točka = 800 mm	-10,45	2,18	-14,80	-6,10
10. točka = 900 mm	-9,52	1,58	-12,68	-6,36
11. točka = 1000 mm	-1,28	1,71	-4,69	2,13
12. točka = 1100 mm	-1,78	1,79	-5,36	1,80
13. točka = 1200 mm	6,63	1,79	3,05	10,20
14. točka = 1300 mm	9,74	1,56	6,63	12,85
15. točka = 1400 mm	12,09	1,78	8,53	15,64
16. točka = 1500 mm	0,64	2,28	-3,91	5,20
17. točka = 1600 mm	-4,88	1,71	-8,30	-1,45
18. točka = 1700 mm	-4,40	1,43	-7,27	-1,53

Na slici ispod prikazan je dijagram s dobivenim aritmetičkim sredinama odstupanja od pravocrtnosti te odgovarajućim procijenjenim standardnim odstupanjima, s razinom povjerenja od približno 95%.



Slika 73. Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X – autokolimator

U nastavku, u tablici, napisane su odgovarajuće vrijednosti pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata.

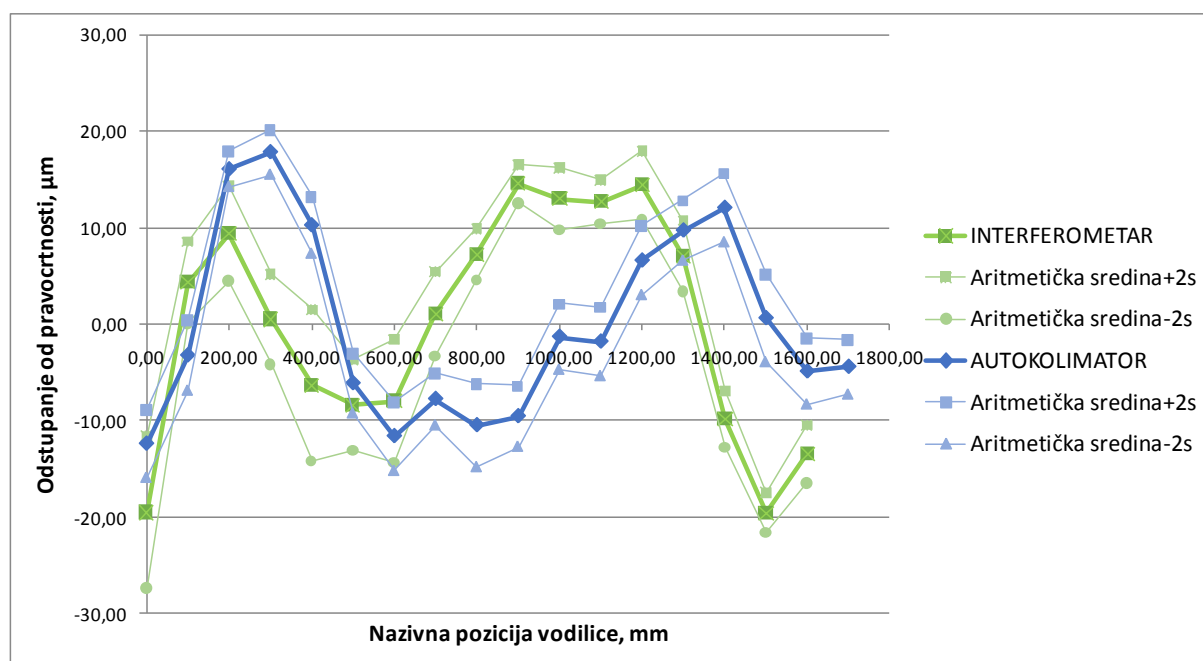
Tablica 14. Analiza horizontalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih mjerenja u smjeru osi X - autokolimator

Skupina mjerenja	Pogreška pravocrtnosti [μm]	Rasipanje rezultata [μm]
Sva mjerenja zajedno	30,2	9,1

6.1.3. Usporedba mjerenja interferometrom i autokolimatorom

Usporedit će se aritmetičke sredine i odgovarajuća procijenjena standardna odstupanja od aritmetičke sredine, dobivena mjerenjima s interferometrom i autokolimatorom. Za interferometar, uzet će se mjerenja koja su dala najpreciznije rezultate i najmanja odstupanja od aritmetičke sredine, a to su mjerenja napravljena 16.11., nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol.

Na slici ispod prikazan je dijagram aritmetičkih sredina odstupanja od pravocrtnosti dobivenih mjerenjima s interferometrom i autokolimatorom, te odgovarajućih minimalnih i maksimalnih odstupanja od pravocrtnosti s razinom povjerenja od 95%.



Slika 74. Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X dobivenih mjerenjima s interferometrom i autokolimatorom

U tablici ispod prikazana je usporedba aritmetičkih sredina i odgovarajućih procijenjenih standardnih odstupanja mjerenja s interferometrom i mjerenja s autokolimatorom.

Tablica 15. Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja s interferometrom i autokolimatorom

	INTERFEROMETAR		AUTOKOLIMATOR	
Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]
1. točka = 0 mm	-19,45	3,94	-12,38	1,77
2. točka = 100 mm	4,40	2,09	-3,21	1,83
3. točka = 200 mm	9,43	2,44	16,09	0,91
4. točka = 300 mm	0,56	2,31	17,87	1,16
5. točka = 400 mm	-6,29	3,90	10,27	1,46
6. točka = 500 mm	-8,33	2,34	-6,10	1,56
7. točka = 600 mm	-7,91	3,19	-11,59	1,80
8. točka = 700 mm	1,10	2,16	-7,73	1,37
9. točka = 800 mm	7,27	1,30	-10,45	2,18
10. točka = 900 mm	14,60	0,96	-9,52	1,58
11. točka = 1000 mm	13,05	1,58	-1,28	1,71
12. točka = 1100 mm	12,73	1,11	-1,78	1,79
13. točka = 1200 mm	14,48	1,75	6,63	1,79
14. točka = 1300 mm	7,11	1,82	9,74	1,56
15. točka = 1400 mm	-9,81	1,44	12,09	1,78
16. točka = 1500 mm	-19,51	1,02	0,64	2,28
17. točka = 1600 mm	-13,41	1,48	-4,88	1,71
18. točka = 1700 mm			-4,40	1,43

Uspoređujući rezultate na slici 74 vidi se da linije aritmetičkih sredina imaju otprilike isti trend. S obzirom na to da se radi u mikrometrima, ne može se očekivati da će se rezultati potpuno poklopiti jedni s drugima.

U tablici ispod napisane su odgovarajuće vrijednosti pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata dobivene mjerenjima s autokolimatorom i interferometrom.

Tablica 16. Usporedna tablica horizontalnih pogrešaka pravocrtnosti i rasipanja rezultata dobivenih mjerenjima s autokolimatorom i interferometrom

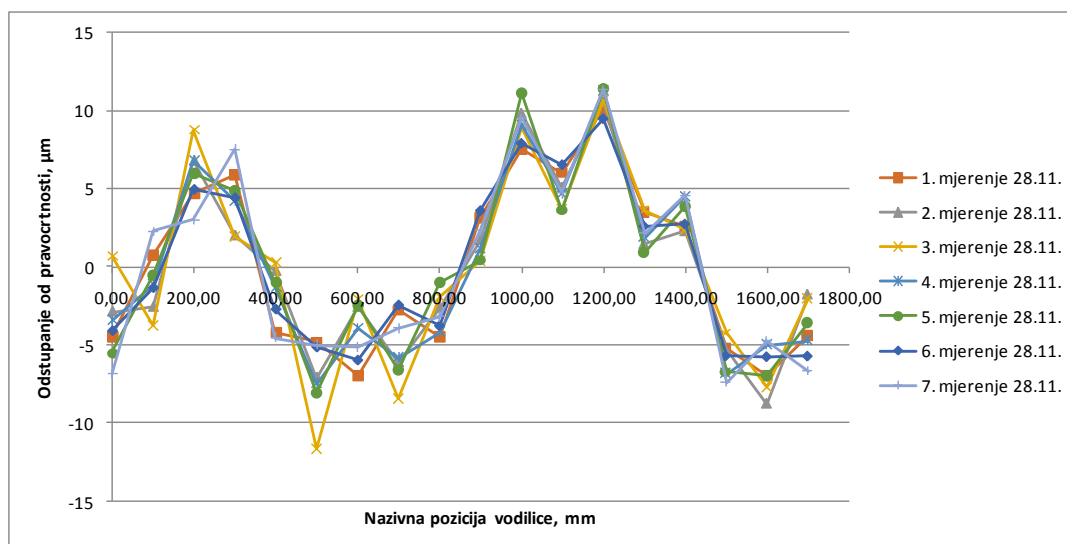
Mjerni uređaj	Pogreška pravocrtnosti [μm]	Rasipanje rezultata [μm]
Interferometar	34,1	15,8
Autokolimator	30,2	9,1

Iz tablice se da zaključiti da se korištenjem autokolimatora dobiju precizniji rezultati nego korištenjem interferometra, iako je utjecaj nedovoljne krutosti poda minimiziran.

6.2. Mjerenje vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti

Vertikalna odstupanja od pravocrtnosti mjerila su se na vodilici dugačkoj 1,8 m, okrenutoj u smjeru osi X , s mjernim uređajem autokolimatorom. Prethodno u radu, prilikom mjerenja horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti, ustanovljeno da se mjerenja izvedena s interferometrom i autokolimatorom međusobno poklapaju. Upravo zbog toga nije bilo potrebno izvoditi mjerenja vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti s oba mjerna uređaja.

Izvedeno je 7 mjerenja s 18. točaka (0 mm – 1700 mm). U nastavku je na slici prikazan dijagram s dobivenim odstupanjima od pravocrtnosti.



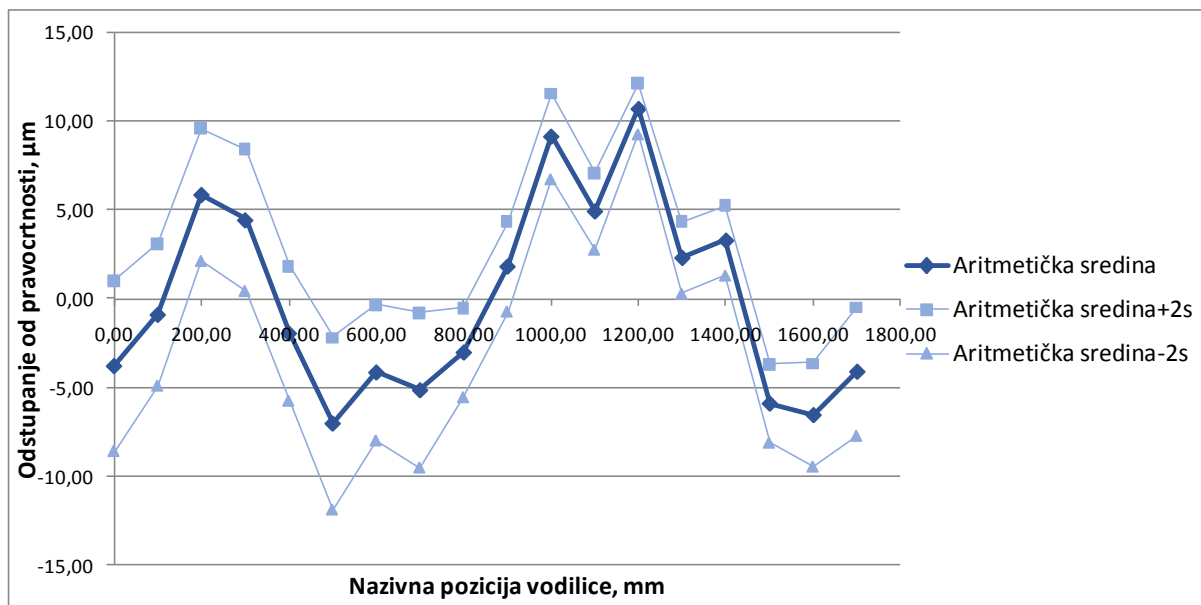
Slika 75. Usporedba vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi X

U tablici ispod napisane su odgovarajuće aritmetičke sredine, procijenjena standardna odstupanja te minimalna i maksimalna odstupanja od pravocrtosti s razinom povjerenja od približno 95%.

Tablica 17. Analiza vertikalnih odstupanja od pravocrtosti svih mjerenja u smjeru osi X

Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	$\bar{x}-2s$ [μm]	$\bar{x}+2s$ [μm]
1. točka = 0 mm	-3,79	2,40	-8,59	1,02
2. točka = 100 mm	-0,90	2,00	-4,90	3,10
3. točka = 200 mm	5,86	1,86	2,14	9,59
4. točka = 300 mm	4,43	2,00	0,44	8,42
5. točka = 400 mm	-1,95	1,90	-5,75	1,86
6. točka = 500 mm	-7,03	2,43	-11,89	-2,17
7. točka = 600 mm	-4,15	1,92	-7,99	-0,30
8. točka = 700 mm	-5,15	2,18	-9,52	-0,78
9. točka = 800 mm	-3,02	1,26	-5,55	-0,49
10. točka = 900 mm	1,82	1,27	-0,72	4,36
11. točka = 1000 mm	9,15	1,20	6,75	11,55
12. točka = 1100 mm	4,93	1,08	2,77	7,10
13. točka = 1200 mm	10,71	0,71	9,28	12,14
14. točka = 1300 mm	2,31	1,01	0,29	4,34
15. točka = 1400 mm	3,29	0,99	1,32	5,27
16. točka = 1500 mm	-5,90	1,11	-8,11	-3,68
17. točka = 1600 mm	-6,55	1,46	-9,46	-3,63
18. točka = 1700 mm	-4,10	1,81	-7,73	-0,48

Dobivene aritmetičke sredine odstupanja od pravocrtnosti te minimalna i maksimalna odstupanja od pravocrtnosti s razinom povjerenja od 95%, prikazani su na dijagramu na slici ispod.



Slika 76. Aritmetička sredina vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi X
U idućoj tablici su, nakon daljnje analize, prikazani dobivena pogreška pravocrtnosti i odgovarajuće rasipanje rezultata.

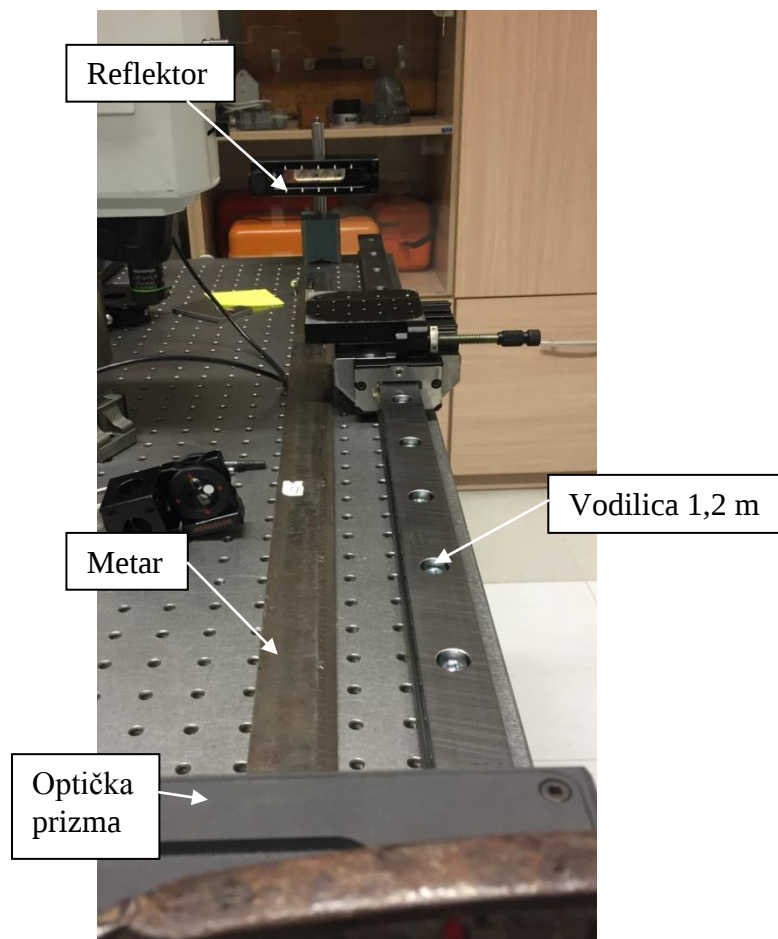
Tablica 18. Analiza vertikalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih mjerenja u smjeru osi X

Skupina mjerenja	Pogreška pravocrtnosti [μm]	Rasipanje rezultata [μm]
Sva mjerenja zajedno	17,7	9,7

7. MJERENJE ODSUPANJA OD PRAVOCRTNOSTI U SMJERU OSI Y

7.1. Mjerenje horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti

Odstupanja od pravocrtnosti u smjeru osi Y mjerena su na vodilici dugačkoj 1,2 m.

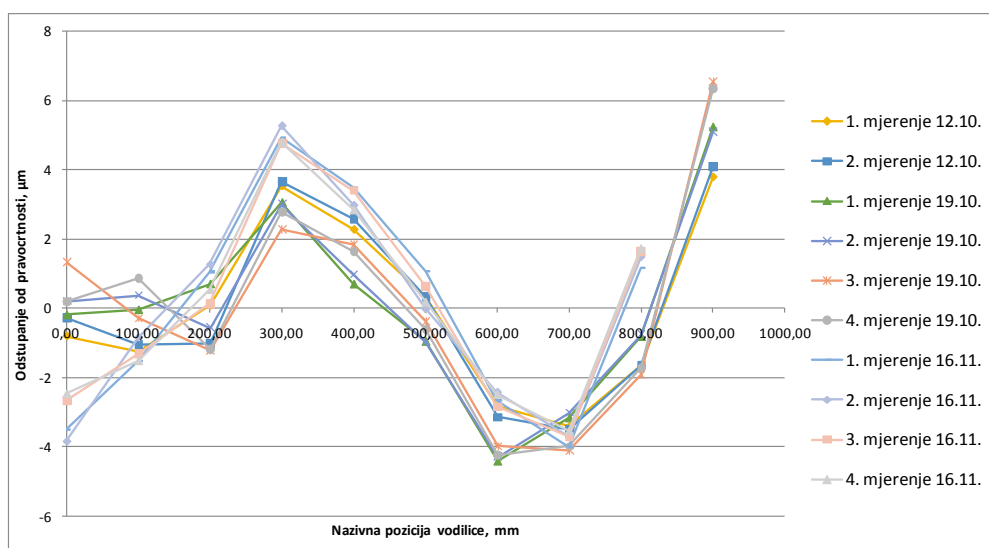


Slika 77. Vodilica dugačka 1,2 m

7.1.1. Mjerenje interferometrom

7.1.1.1. Jednosmjerna mjerenja

Ukupno je provedeno 10 mjerenja horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti u smjeru osi Y. Dio mjerenja je proveden u 9 točaka (0 mm – 800 mm), dok je drugi dio mjerenja proveden u 10 točaka (0 mm – 900 mm).



Slika 78. Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi Y – interferometar

U tablici ispod prikazane su aritmetičke sredine i odgovarajuća procijenjena standardna odstupanja od sredine svih točaka mjerenja.

Tablica 19. Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi Y - interferometar

Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	$\bar{x}-2s$ [μm]	$\bar{x}+2s$ [μm]
1. točka = 0 mm	-1,21	1,77	-4,75	2,34
2. točka = 100 mm	-0,67	0,84	-2,34	1,01
3. točka = 200 mm	-0,03	0,92	-1,87	1,82
4. točka = 300 mm	3,79	1,05	1,69	5,90
5. točka = 400 mm	2,26	0,97	0,33	4,20
6. točka = 500 mm	-0,05	0,68	-1,40	1,30
7. točka = 600 mm	-3,34	0,81	-4,96	-1,72
8. točka = 700 mm	-3,62	0,36	-4,34	-2,90
9. točka = 800 mm	-0,26	1,56	-3,38	2,87
10. točka = 900 mm	5,18	1,13	2,93	7,43

Kako bi provjerili koliki je utjecaj na odstupanje od sredine imala nedovoljna krutost poda, napravljena je posebna analiza mjerenja prije i nakon postavljanja lasera i prizme na stol. Pretpostavka je da će mjerenja napravljena nakon postavljanja svih mjernih uređaja na optički stol biti preciznija, kao što su bila i dosad prilikom mjerenja odstupanja od pravocrtosti vodilice okrenute u smjeru osi X .

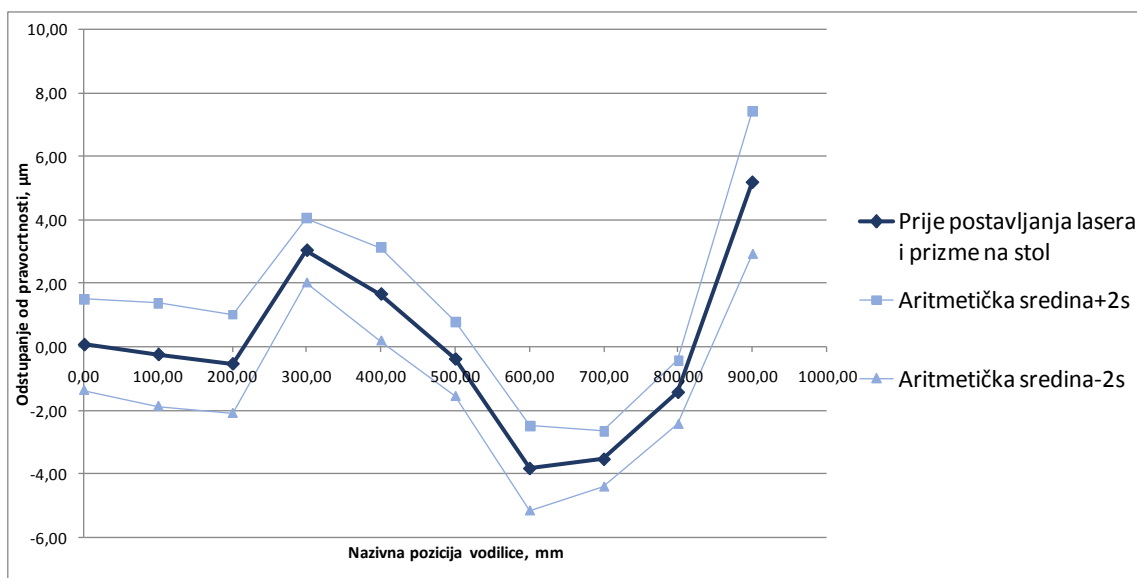
U usporednoj tablici ispod, dane su aritmetičke sredine i odgovarajuća procijenjena standardna odstupanja od sredine posebno za mjerenja napravljena prije i mjerenja napravljena nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol. Mjerenja napravljena nakon postavljanja lasera i prizme na stol imaju 9 mjernih točaka.

Tablica 20. Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtosti mjerenja u smjeru osi Y prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol - interferometar

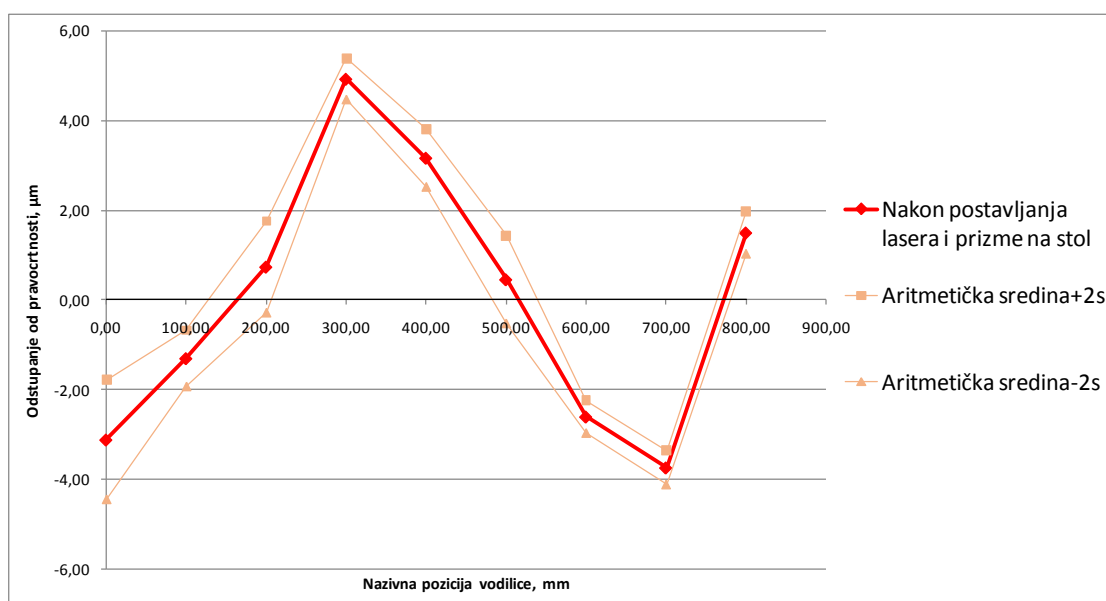
Točka mjerenja	Mjerenja prije postavljanja		Mjerenja nakon postavljanja	
	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]
1. točka = 0 mm	0,07	0,71	-3,12	0,67
2. točka = 100 mm	-0,24	0,81	-1,30	0,31
3. točka = 200 mm	-0,53	0,78	0,73	0,51
4. točka = 300 mm	3,04	0,51	4,92	0,23
5. točka = 400 mm	1,66	0,73	3,16	0,32
6. točka = 500 mm	-0,38	0,58	0,45	0,49
7. točka = 600 mm	-3,83	0,67	-2,61	0,18
8. točka = 700 mm	-3,54	0,44	-3,74	0,19
9. točka = 800 mm	-1,43	0,50	1,50	0,24
10. točka = 900 mm	5,18	1,13		

Usporedbom standardnih odstupanja od aritmetičke sredine vidi se da se u 8, od ukupno 9 točaka za uspoređivanje, odstupanje od sredine smanjilo nakon postavljanja svih mjernih uređaja na optički stol, što je ranije u radu i pretpostavljeno.

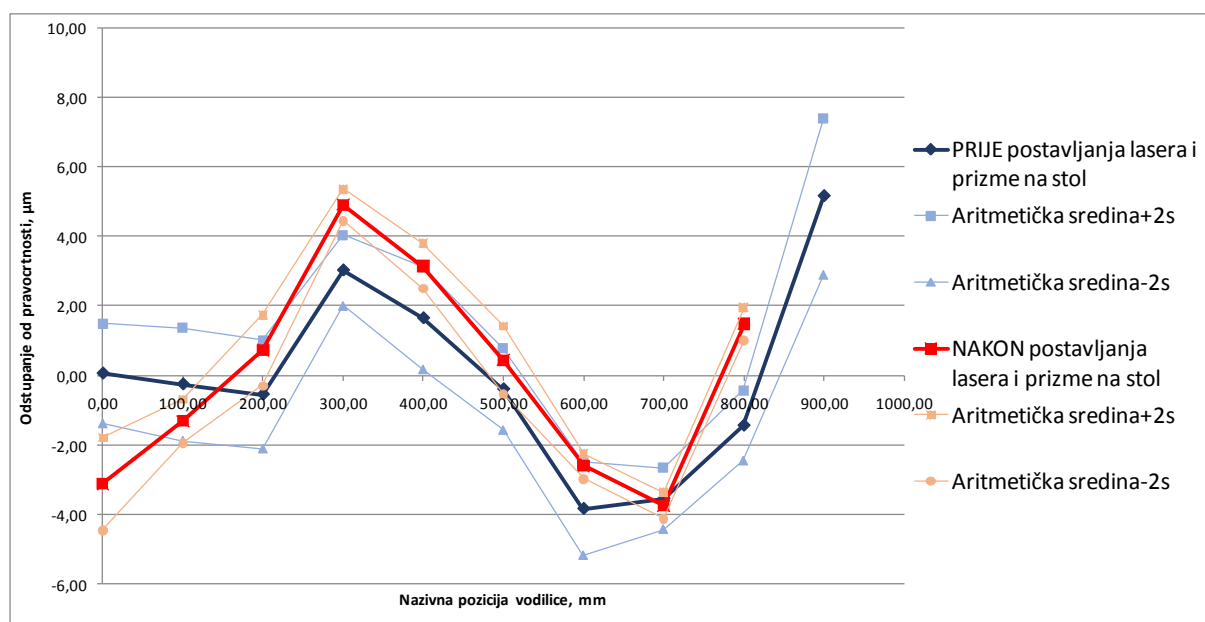
Na slikama ispod prikazani su prvo posebno dijagrami aritmetičkih sredina odstupanja od pravocrtnosti dobivenih prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, a zatim je prikazan i dijagram na kojem se oba rezultata nalaze zajedno. Također su na dijagramima prikazane i odgovarajuće vrijednosti minimalnih i maksimalnih odstupanja od pravocrtnosti s razinom povjerenja od 95%.



Slika 79. Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y, prije postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar



Slika 80. Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y, nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar



Slika 81. Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y prije i nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol – interferometar

Daljnjom analizom podataka dobivene su vrijednosti pogreške pravocrtnosti te rasipanja rezultata (Tablica 21).

Tablica 21. Analiza horizontalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata po skupinama mjerenja, u smjeru osi Y - interferometar

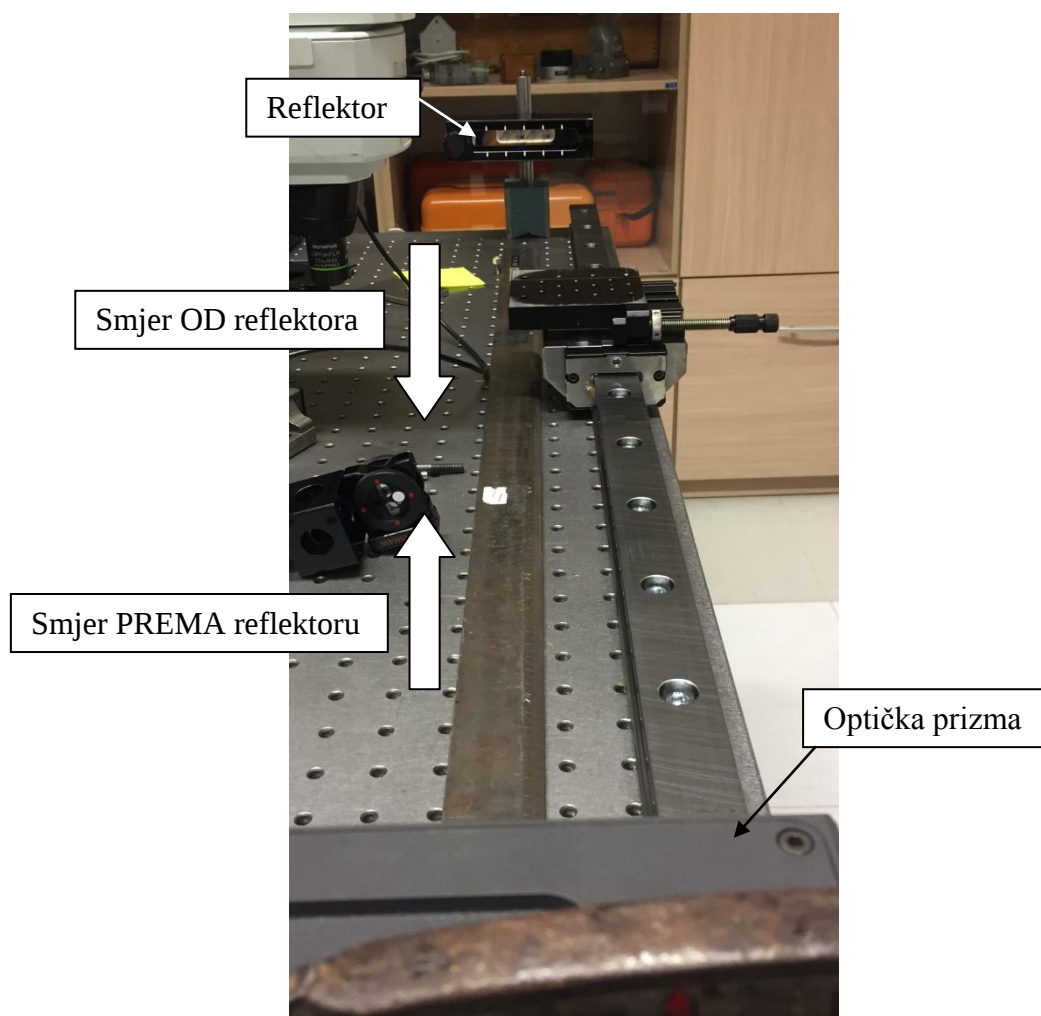
Skupina mjerenja	Pogreška pravocrtnosti [μm]	Rasipanje rezultata [μm]
Sva mjerenja zajedno	8,8	7,1
Mjerenja prije postavljanja lasera i optičke prizme na stol	9,0	4,5
Mjerenja nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol	8,7	2,7

Kako je bilo i očekivano, rasipanje rezultata je najmanje kod mjerenja izvedenih nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol. Može se reći da je ta skupina mjerenja najpreciznija.

7.1.1.2. Dvosmjerna mjerenja

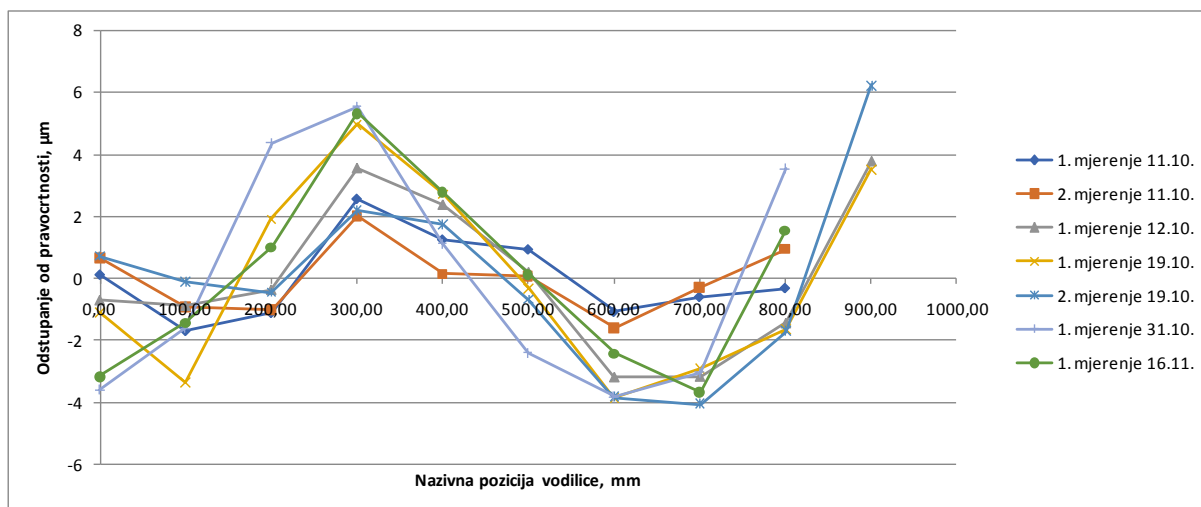
Dvosmjerno mjerenje se provodilo kako bi se usporedili rezultati dobiveni za oba smjera u istom mjerenju. Provedeno je ukupno 7 mjerenja. Rezultati su analizirani za svaki smjer zasebno te zatim uspoređivani. Dva smjera su:

- PREMA reflektoru od optičke prizme (0 mm – 900 mm) i
- OD reflektora prema optičkoj prizmi (900 mm – 0 mm) (Slika 82).



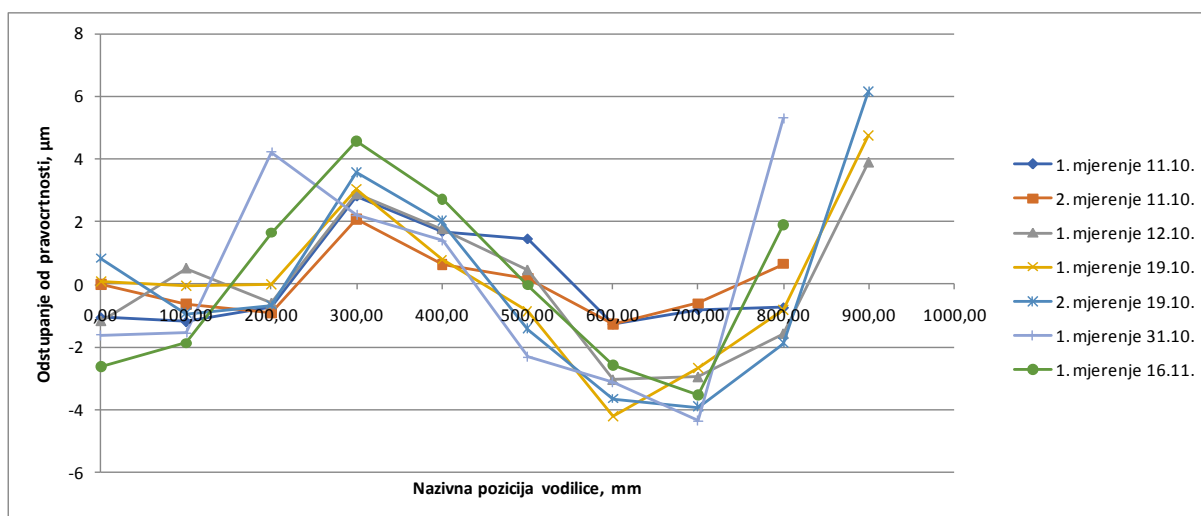
Slika 82. Smjer PREMA i OD reflektora na vodilici u smjeru osi Y

Rezultati odstupanja od pravocrtosti svih mjerenja u smjeru PREMA reflektoru, nakon provedene metode najmanjih kvadrata, prikazani su na slici ispod.



Slika 83. Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru PREMA reflektoru – interferometar

Rezultati svih mjerenja u smjeru OD reflektora, nakon provedene metode najmanjih kvadrata, prikazani su na slici ispod.



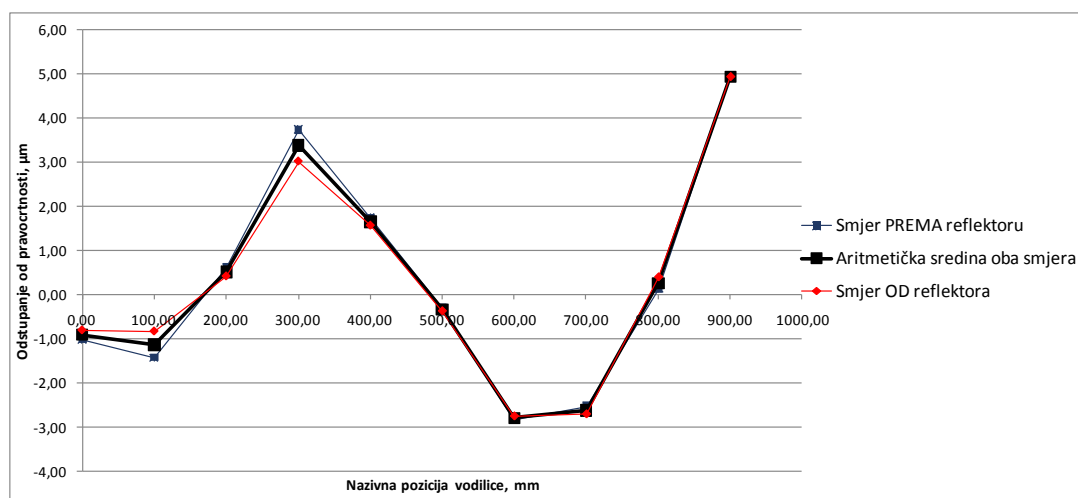
Slika 84. Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru OD reflektora – interferometar

Analiza tih mjerenja u oba smjera prikazana je u tablici ispod. Analizom su dobiveni aritmetička sredina odstupanja od pravocrtnosti i procijenjeno standardno odstupanje rezultata.

Tablica 22. Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih dvosmjernih mjerenja u smjeru osi Y - interferometar

Točka mjerenja	PREMA reflektoru		OD reflektora	
	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]
1. točka = 0 mm	-1,02	1,76	-0,81	1,18
2. točka = 100 mm	-1,44	1,00	-0,83	0,84
3. točka = 200 mm	0,61	1,98	0,41	1,89
4. točka = 300 mm	3,74	1,53	3,02	0,85
5. točka = 400 mm	1,73	0,97	1,56	0,72
6. točka = 500 mm	-0,30	1,05	-0,38	1,27
7. točka = 600 mm	-2,84	1,15	-2,76	1,13
8. točka = 700 mm	-2,54	1,49	-2,71	1,47
9. točka = 800 mm	0,13	1,98	0,39	2,52
10. točka = 900 mm	4,93	1,15	4,93	1,15

Na dijagramu na slici ispod prikazane su linije aritmetičkih sredina odstupanja od pravocrtnosti za oba smjera posebno, te linija aritmetičke sredine tih dvaju smjerova.



Slika 85. Usporedba aritmetičkih sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti dvosmjernih mjerenja u smjeru osi Y – interferometar

Na dijagramu na slici 85 vidi se kako linije aritmetičkih sredina odstupanja od pravocrtnosti oba smjera prate isti trend. Daljnjom analizom podataka dobivene su vrijednosti pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata (Tablica 23).

Tablica 23. Analiza horizontalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih dvosmjernih mjerenja u smjeru osi Y - interferometar

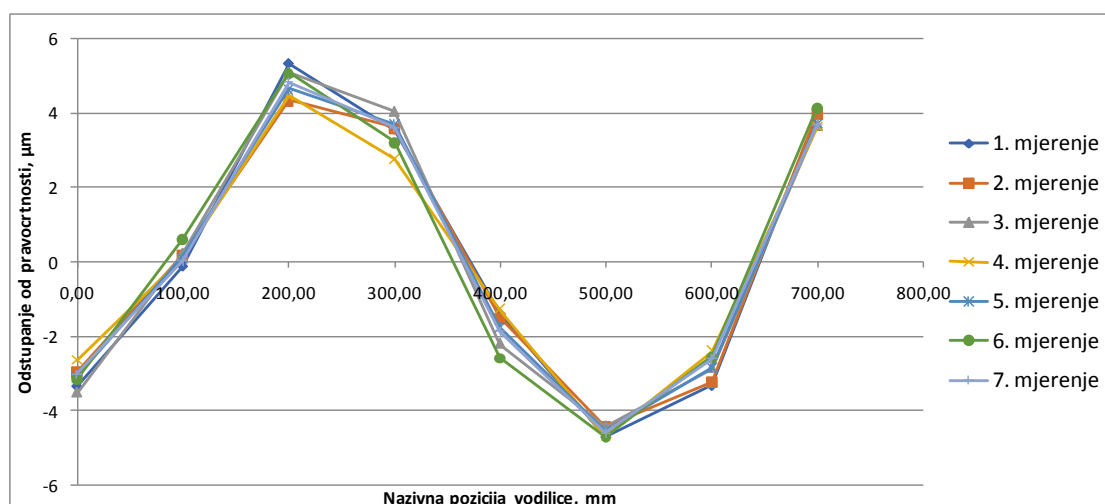
	Pogreška pravocrtnosti [μm]	Rasipanje rezultata [μm]
Sva mjerenja zajedno	7,73	10,10

Dobivene pogreške pravocrtnosti se podudaraju s onima dobivenima jednosmjernim mjerenjima (poglavlje 7.1.1.1). Dobivena vrijednost rasipanja rezultata znatno je veća u usporedbi s onima dobivenima kod jednosmjernih mjerenja, no s obzirom na to da je provedeno samo 7 dvosmjernih mjerenja može se pretpostaviti da bi se ta vrijednost smanjila kada bi se provelo i analiziralo više mjerenja.

Prethodno u radu je već nekoliko puta dokazan utjecaj nedovoljne krutosti poda na rezultate mjerenja pa se ovdje, po uzoru na prethodne analize, može također pretpostaviti da bi se preciznost mjerenja povećala, odnosno rasipanje rezultata smanjilo, kada bi sva mjerenja bila izvedena nakon postavljanja lasera i optičke prizme na optički stol.

7.1.2. Mjerenje autokolimatorom

Provedeno je ukupno 7 jednosmjernih mjerenja s 8 mjernih točaka (0 mm – 700 mm). Autokolimator je postavljen eksterno u odnosu na stol i zbog njegove pozicije se nije moglo pristupiti 9. i 10. točki mjerenja. Na dijagramu na slici ispod prikazana su odstupanja od pravocrtnosti svih 8 točaka.



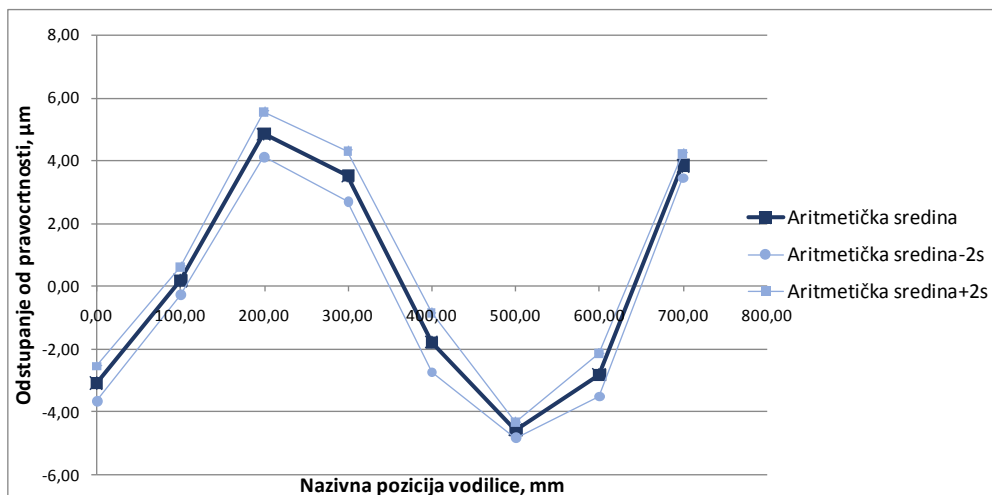
Slika 86. Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru osi Y - autokolimator

Na dijagramu se vidi da sva mjerenja imaju otprilike jednaki trend. Analizom su dobiveni aritmetička sredina i odgovarajuća procijenjena standardna odstupanja od sredine svih točaka svih mjerenja te su prikazani u tablici ispod.

Tablica 24. Analiza horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti svih mjerenja u smjeru Y osi - autokolimator

Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	$\bar{x}-2s$ [μm]	$\bar{x}+2s$ [μm]
1. točka = 0 mm	-3,10	0,28	-3,66	-2,54
2. točka = 100 mm	0,16	0,22	-0,28	0,61
3. točka = 200 mm	4,83	0,36	4,11	5,55
4. točka = 300 mm	3,50	0,40	2,69	4,31
5. točka = 400 mm	-1,80	0,47	-2,75	-0,86
6. točka = 500 mm	-4,59	0,13	-4,84	-4,33
7. točka = 600 mm	-2,83	0,35	-3,52	-2,14
8. točka = 700 mm	3,83	0,20	3,43	4,23

Na slici ispod prikazan je dijagram s dobivenim aritmetičkim sredinama odstupanja od pravocrtnosti te odgovarajućim procijenjenim standardnim odstupanjima, s razinom povjerenja od otprilike 95%.



Slika 87. Aritmetička sredina horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y – autokolimator

U nastavku, u tablici, napisane su odgovarajuće vrijednosti pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata.

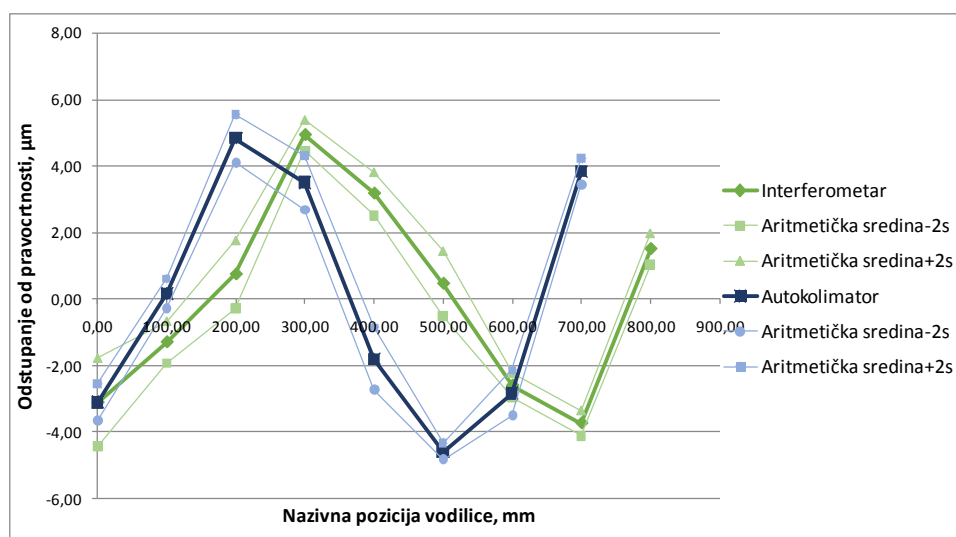
Tablica 25. Analiza horizontalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih mjerenja u smjeru osi Y - autokolimator

Skupina mjerenja	Pogreška pravocrtnosti [μm]	Rasipanje rezultata [μm]
Sva mjerenja zajedno	9,4	1,9

7.1.3. Usporedba mjerenja interferometrom i autokolimatorom

Usporedit će se aritmetičke sredine i odgovarajuća procijenjena standardna odstupanja od aritmetičke sredine, dobivena mjerenjima s interferometrom i autokolimatorom. Za interferometar, uzet će se mjerenja koja su dala najpreciznije rezultate i najmanja odstupanja od aritmetičke sredine, a to su mjerenja napravljena 16.11., nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol.

Na slici ispod prikazan je dijagram aritmetičkih sredina odstupanja od pravocrtnosti dobivenih mjerenjima s interferometrom i autokolimatorom, te odgovarajućih minimalnih i maksimalnih odstupanja od pravocrtnosti s razinom povjerenja od 95%.



Slika 88. Usporedba horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y dobivenih mjerenjima s interferometrom i autokolimatorom

U tablici ispod prikazana je usporedba aritmetičkih sredina i odgovarajućih procijenjenih standardnih odstupanja mjerenja s interferometrom i mjerenja s autokolimatorom.

Tablica 26. Usporedna tablica horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja s interferometrom i autokolimatorom

Točka mjerenja	INTERFEROMETAR		AUTOKOLIMATOR	
	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]
1. točka = 0 mm	-3,12	0,67	-3,10	0,28
2. točka = 100 mm	-1,30	0,31	0,16	0,22
3. točka = 200 mm	0,73	0,51	4,83	0,36
4. točka = 300 mm	4,92	0,23	3,50	0,40
5. točka = 400 mm	3,16	0,32	-1,80	0,47
6. točka = 500 mm	0,45	0,49	-4,59	0,13
7. točka = 600 mm	-2,61	0,18	-2,83	0,35
8. točka = 700 mm	-3,74	0,19	3,83	0,20
9. točka = 800 mm	1,50	0,24		

Uspoređujući rezultate na slici 88 vidi se da linije aritmetičkih sredina imaju otprilike isti trend. S obzirom na to da se radi u mikrometrima ne može se očekivati da će se rezultati potpuno poklopiti jedni s drugima.

U tablici ispod napisane su odgovarajuće vrijednosti pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata dobivene mjerenjima s autokolimatorom i interferometrom.

Tablica 27. Usporedna tablica horizontalnih pogrešaka pravocrtnosti i rasipanja rezultata u smjeru osi Y, dobivenih mjerenjima s autokolimatorom i interferometrom

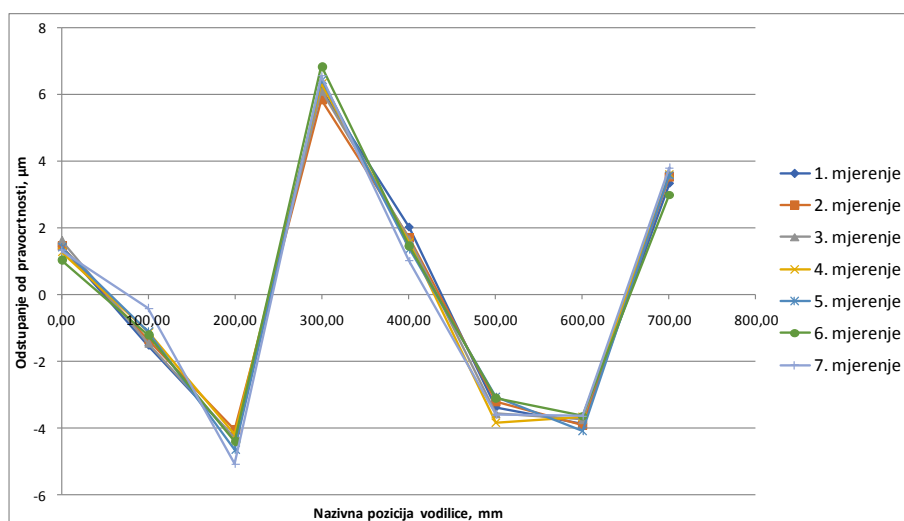
Mjerni uređaj	Pogreška pravocrtnosti [μm]	Rasipanje rezultata [μm]
Interferometar	8,7	2,7
Autokolimator	9,4	1,9

Iz tablice se vidi da se korištenjem autokolimatora dobiju precizniji rezultati nego korištenjem interferometra, kao i kod mjerenja odstupanja od pravocrtnosti vodilice u smjeru osi X, iako je utjecaj nedovoljne krutosti poda minimiziran.

7.2. Mjerenje vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti

Vertikalna odstupanja od pravocrtnosti mjerila su se mjernim uređajem autokolimatorom. Prethodno u radu, prilikom mjerenja horizontalnih odstupanja od pravocrtnosti, ustanovljeno da se mjerenja izvedena s interferometrom i autokolimatorom međusobno poklapaju. Upravo zbog toga nije bilo potrebno izvoditi mjerenja vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti s oba mjerna uređaja.

Izvedeno je 7 mjerenja s 8 točaka (0 mm – 700 mm). U nastavku je na slici prikazan dijagram s dobivenim odstupanjima od pravocrtnosti.



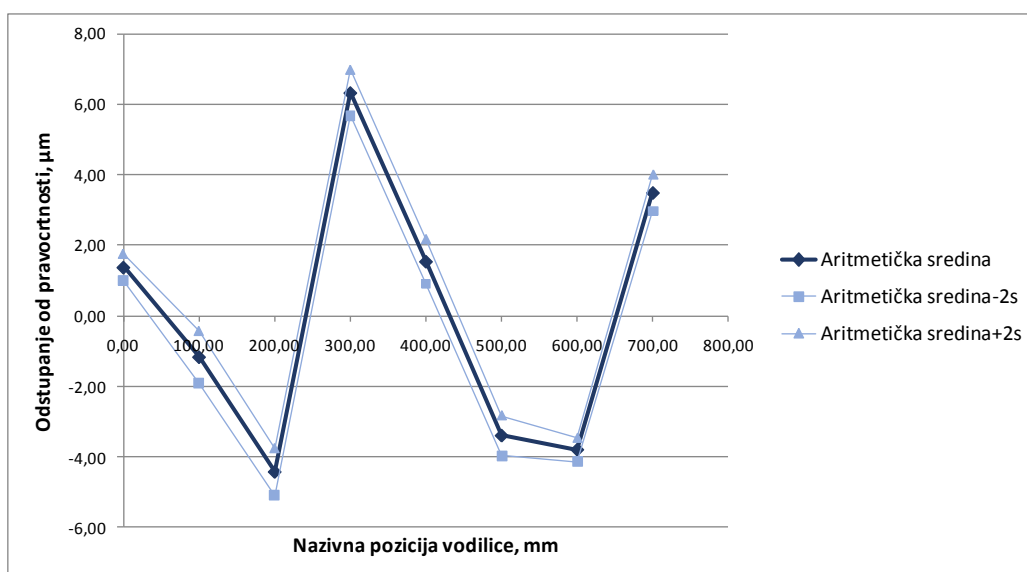
Slika 89. Usporedba vertikalnih odstupanja od pravocrtosti svih mjerenja u smjeru osi Y

U tablici ispod napisane su dobivene aritmetičke sredine, procijenjena standardna odstupanja te minimalna i maksimalna odstupanja od pravocrtosti s razinom povjerenja od približno 95%.

Tablica 28. Analiza vertikalnih odstupanja od pravocrtosti svih mjerenja u smjeru osi Y

Točka mjerenja	Aritmetička sredina $\bar{x}$ [μm]	Procijenjeno standardno odstupanje s [μm]	$\bar{x}-2s$ [μm]	$\bar{x}+2s$ [μm]
1. točka = 0 mm	1,38	0,19	1,00	1,76
2. točka = 100 mm	-1,16	0,37	-1,90	-0,42
3. točka = 200 mm	-4,42	0,34	-5,09	-3,74
4. točka = 300 mm	6,33	0,32	5,68	6,97
5. točka = 400 mm	1,54	0,32	0,91	2,18
6. točka = 500 mm	-3,39	0,29	-3,96	-2,81
7. točka = 600 mm	-3,79	0,17	-4,12	-3,45
8. točka = 700 mm	3,50	0,26	2,98	4,01

Dobivene aritmetičke sredine odstupanja od pravocrtosti te minimalna i maksimalna odstupanja od pravocrtosti s razinom povjerenja od 95%, prikazani su na dijagramu na slici ispod.



Slika 90. Aritmetičke sredine vertikalnih odstupanja od pravocrtnosti mjerenja u smjeru osi Y
U idućoj tablici su, nakon daljnje analize, prikazani dobivena pogreška pravocrtnosti i odgovarajuće rasipanje rezultata.

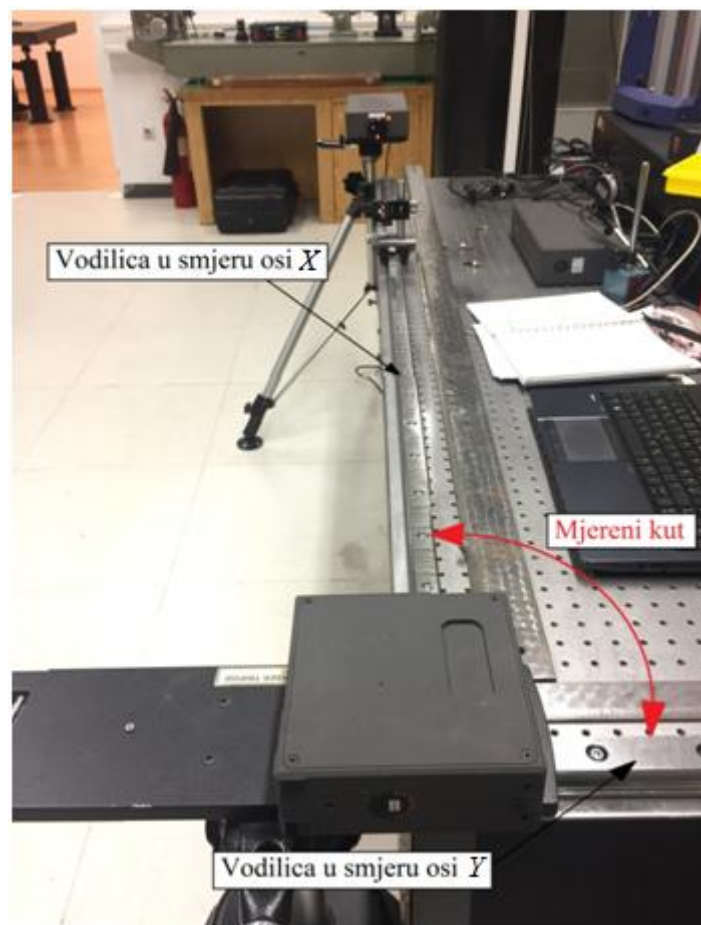
Tablica 29. Analiza vertikalne pogreške pravocrtnosti i rasipanja rezultata svih mjerenja u smjeru osi Y

	Pogreška pravocrtnosti [μm]	Rasipanje rezultata [μm]
Sva mjerenja zajedno	10,7	1,5

Po vrijednosti rasipanja rezultata može se zaključiti da je vrijednost pogreške pravocrtnosti vrlo precizna.

8. MJERENJE ODSUPANJA OD OKOMITOSTI

Kao što je već ranije u radu spomenuto, odstupanje od okomitosti mjereno je između dviju, naizgled okomitih, vodilica, laserskim mjernim sustavom. Odstupanje je mjereno tako da se prvo mjerila pravocrtnost obiju vodilica te se zatim, uz pomoć Renishaw programskog paketa, dobilo odstupanje od okomitosti (Slika 91).



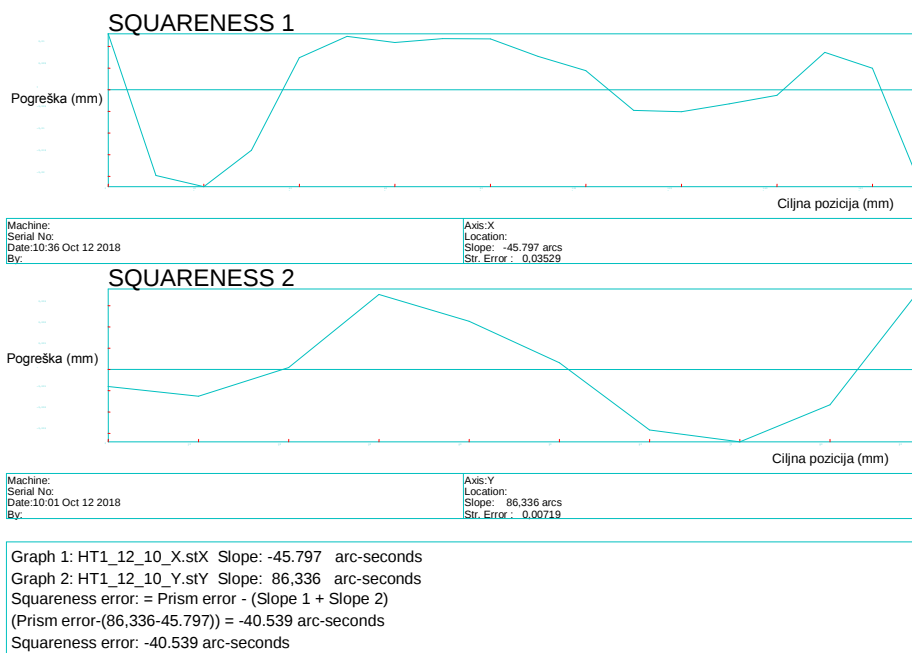
Slika 91. Prikaz mjerenog kuta između vodilica

Provedeno je 9 mjerenja odstupanja od okomitosti od kojih su 4 napravljena datuma 12.10.2018., prije postavljanja lasera i optičke prizme na stol, a 5 ih je napravljeno 16.11.2018., nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol, pa je samim time moguće utvrditi utjecaj nedovoljne krutosti poda na mjerenja odstupanja od okomitosti. Pretpostavka je da će rezultati dobiveni 16.11. biti precizniji upravo zbog toga što je tada utjecaj nedovoljne krutosti poda minimiziran.

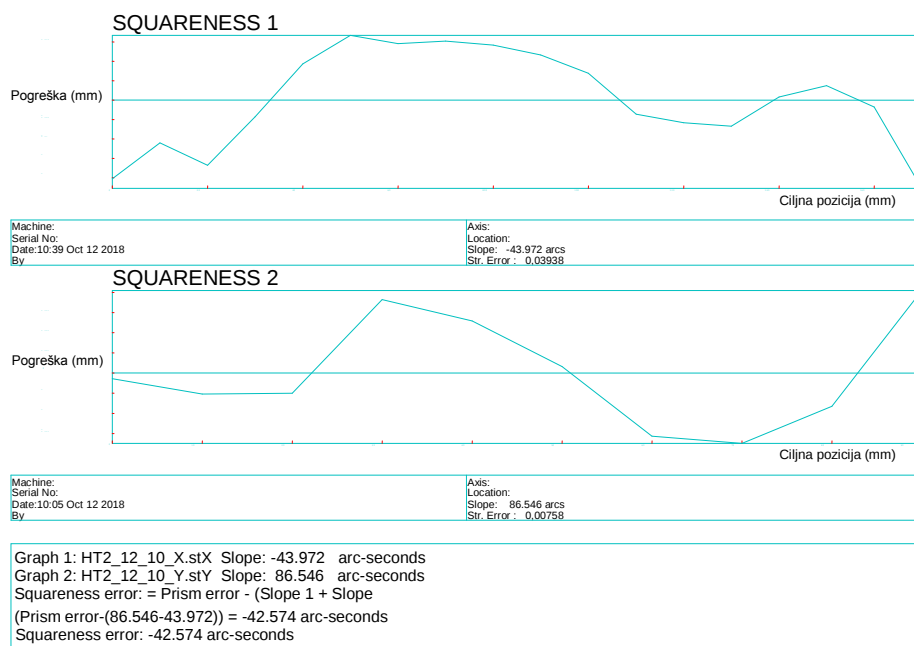
U rezultate mjerenja potrebno je uvrstiti i pogrešku optičke prizme koja u ovom slučaju iznosi +1,6" što je zanemarivo malo pa se u nastavku prilikom analize neće uzimati u obzir.

8.1. Mjerenja prije postavljanja lasera i prizme na optički stol

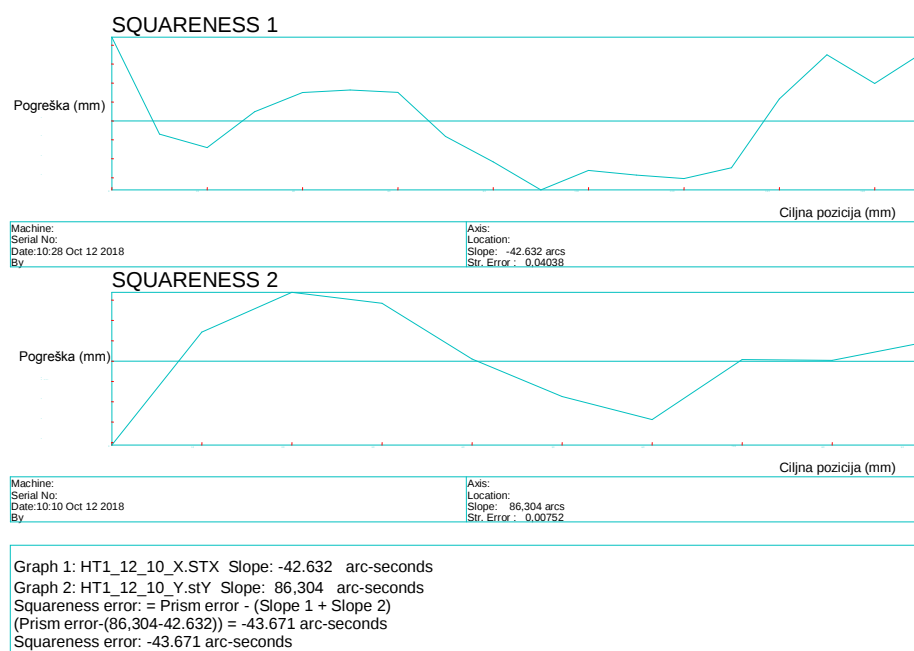
U nastavku na slikama prikazani su rezultati mjerenja odstupanja od okomitosti, dobiveni Renishaw programskim paketom. Prve dvije slike prikazuju rezultate dobivene mjerenjem u smjeru od optičke prizme, kao što je prikazano na slici 47, a druge dvije slike prikazuju mjerenja izvedena u smjeru prema optičkoj prizmi, kao što je prikazano na slici 48.



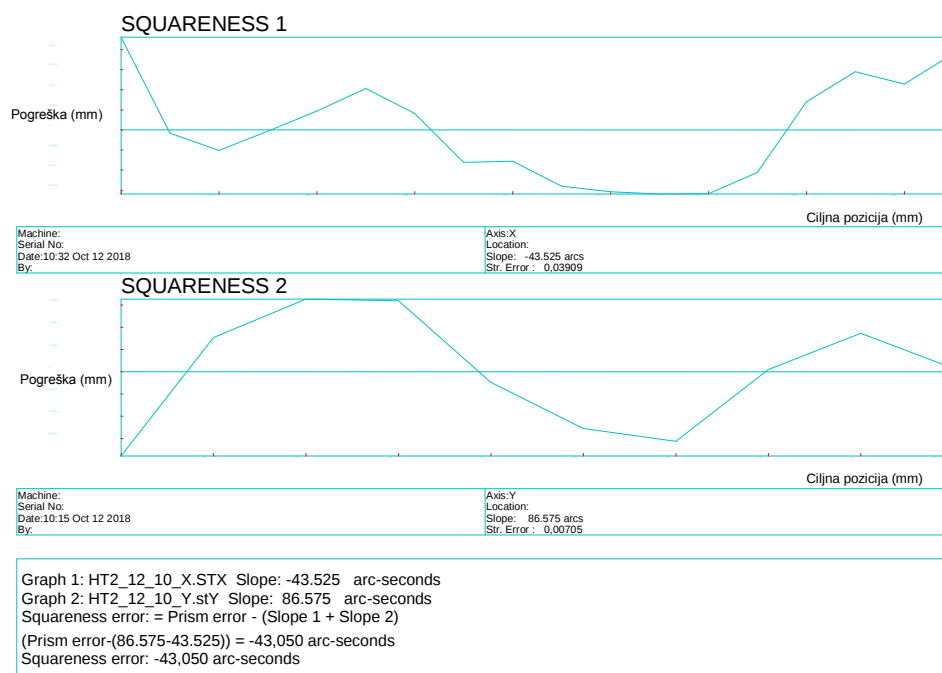
Slika 92. Odstupanje od okomitosti 1 prije postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru od optičke prizme



Slika 93. Odstupanje od okomitosti 2 prije postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru od optičke prizme



Slika 94. Odstupanje od okomitosti 1 prije postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru prema optičkoj prizmi



Slika 95. Odstupanje od okomitosti 2 prije postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru prema optičkoj prizmi

U tablici ispod prikazana su dobivena odstupanja od okomitosti.

Tablica 30. Odstupanja od okomitosti dobivena prije postavljanja lasera i prizme na stol

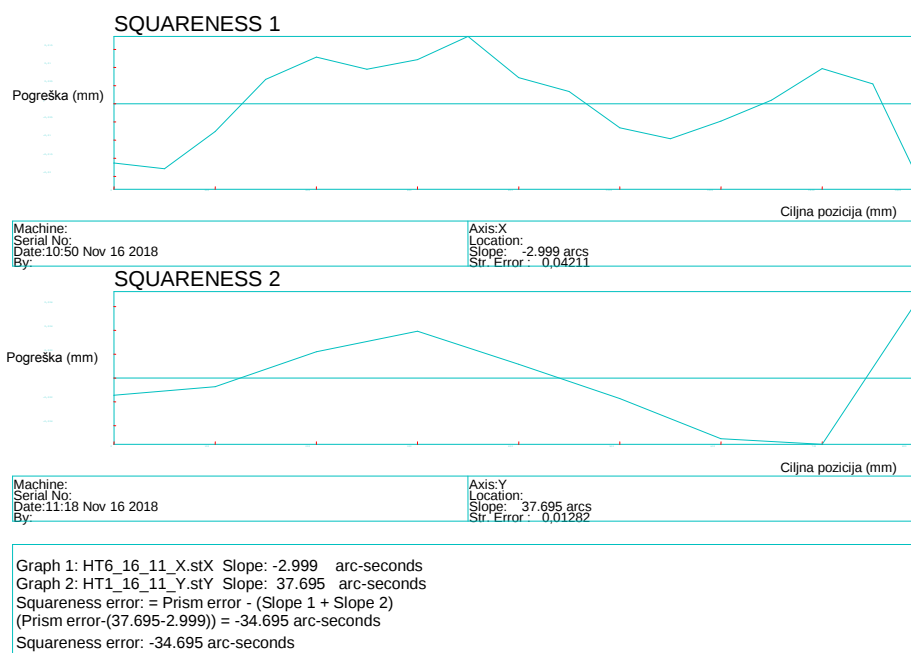
	Pogreška okomitosti ["]
1. mjerenje	-40,539
2. mjerenje	-42,574
3. mjerenje	-43,671
4. mjerenje	-43,050
RASPON	3,132

Iz tablice je vidljivo da je vrijednost pogreške okomitosti niska (radi se o kutnim sekundama).

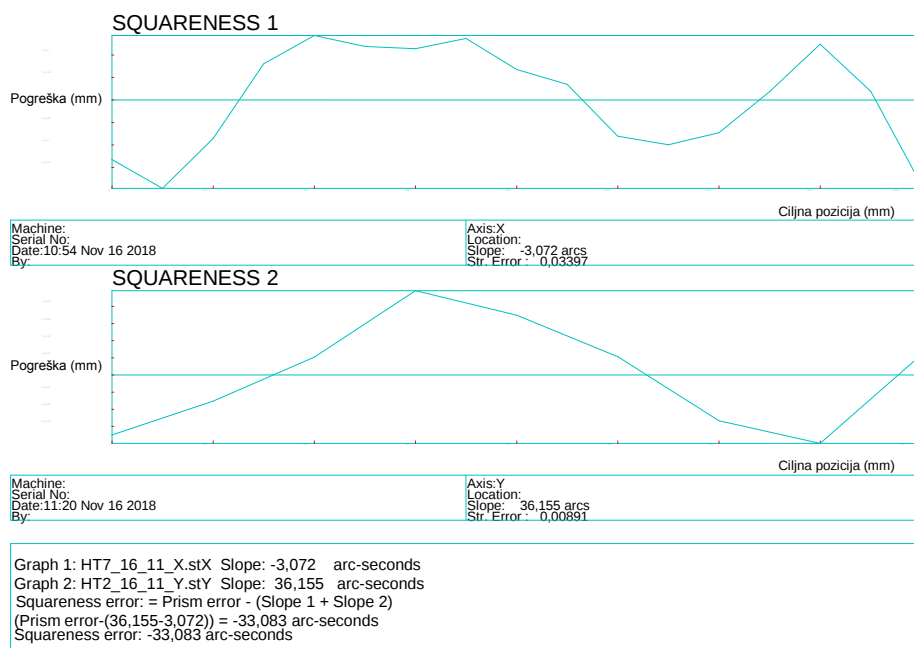
U nastavku će se ovi rezultati usporediti s onima dobivenim mjerenjima nakon postavljanja lasera i optičke prizme na stol.

8.2. Mjerenja nakon postavljanja lasera i prizme na optički stol

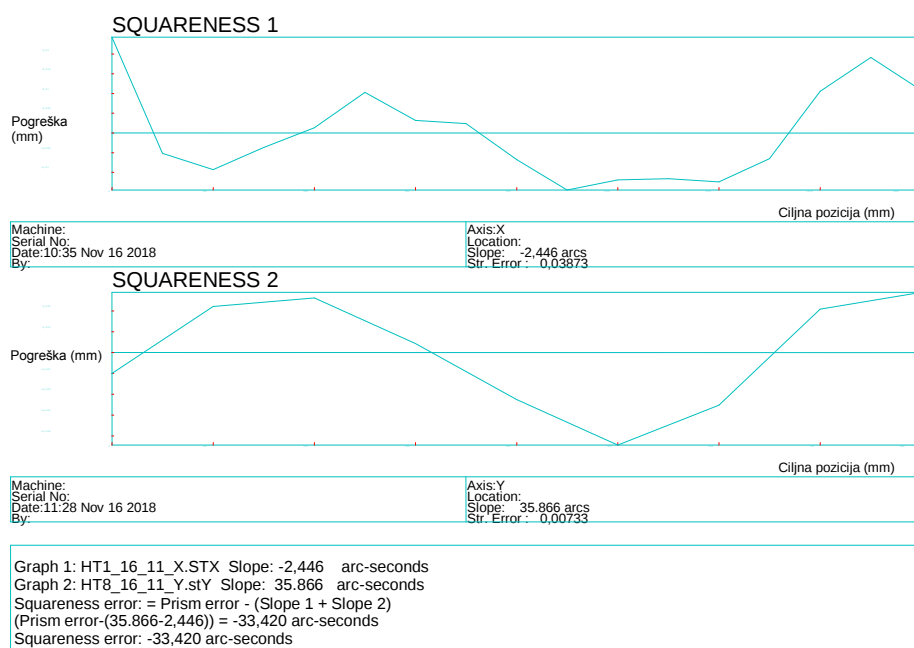
U nastavku na slikama prikazani su rezultati mjerenja odstupanja od okomitosti, dobiveni Renishaw programskim paketom. Prve dvije slike prikazuju rezultate dobivene mjerenjem u smjeru od optičke prizme, kao što je prikazano na slici 47, a druge tri slike prikazuju mjerenja izvedena u smjeru prema optičkoj prizmi, kao što je prikazano na slici 48.



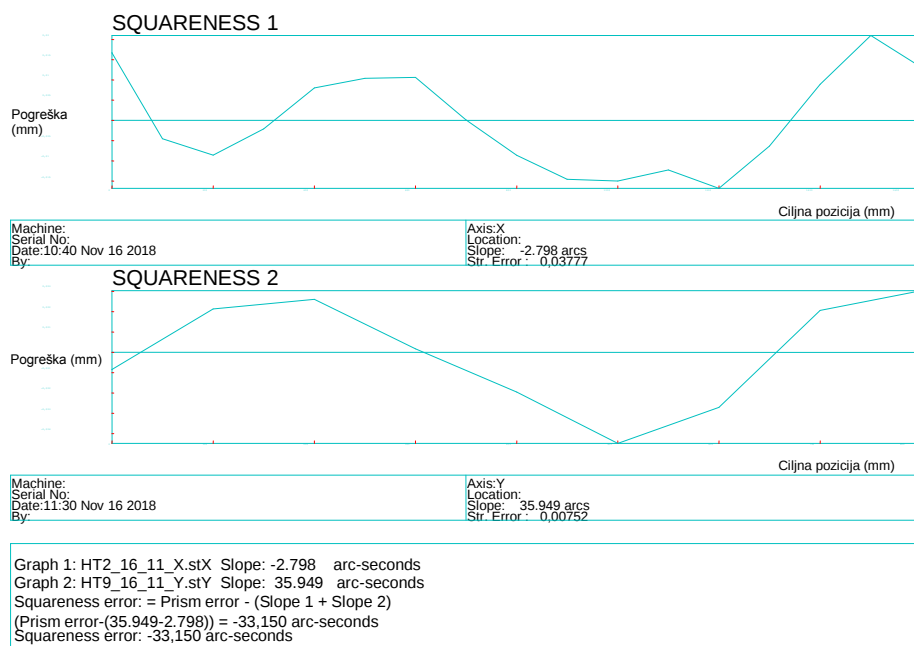
Slika 96. Odstupanje od okomitosti 1 nakon postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru od optičke prizme



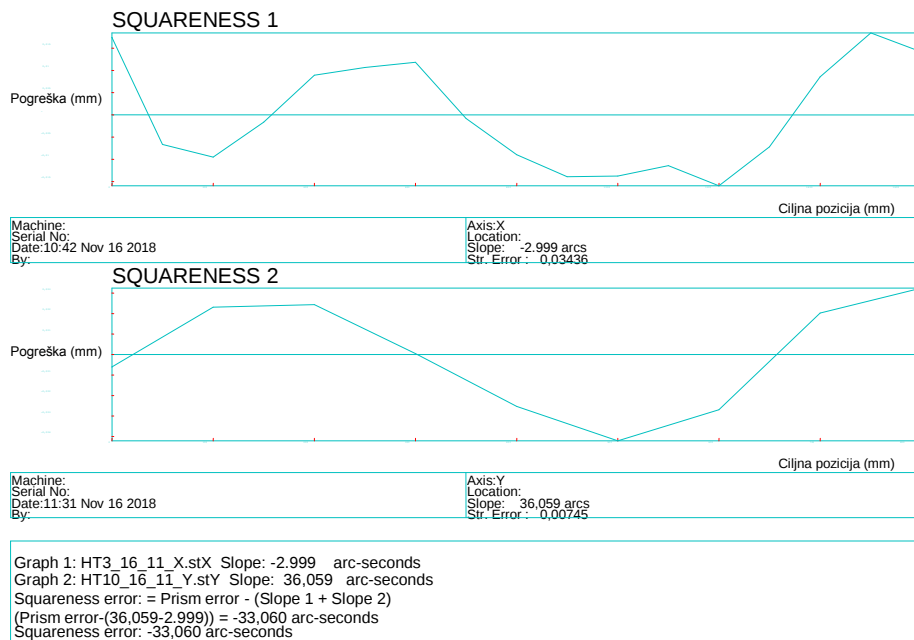
Slika 97. Odstupanje od okomitosti 2 nakon postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru od optičke prizme



Slika 98. Odstupanje od okomitosti 1 nakon postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru prema optičkoj prizmi



Slika 99. Odstupanje od okomitosti 2 nakon postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru prema optičkoj prizmi



Slika 100. Odstupanje od okomitosti 3 nakon postavljanja lasera i prizme na stol, u smjeru prema optičkoj prizmi

U tablici ispod prikazana su dobivena odstupanja od okomitosti.

Tablica 31. Odstupanja od okomitosti dobivena nakon postavljanja lasera i prizme na stol

	Pogreška okomitosti ["]
1. mjerenje	-34,695
2. mjerenje	-33,083
3. mjerenje	-33,420
4. mjerenje	-33,150
5. mjerenja	-33,060
RASPON	1,635

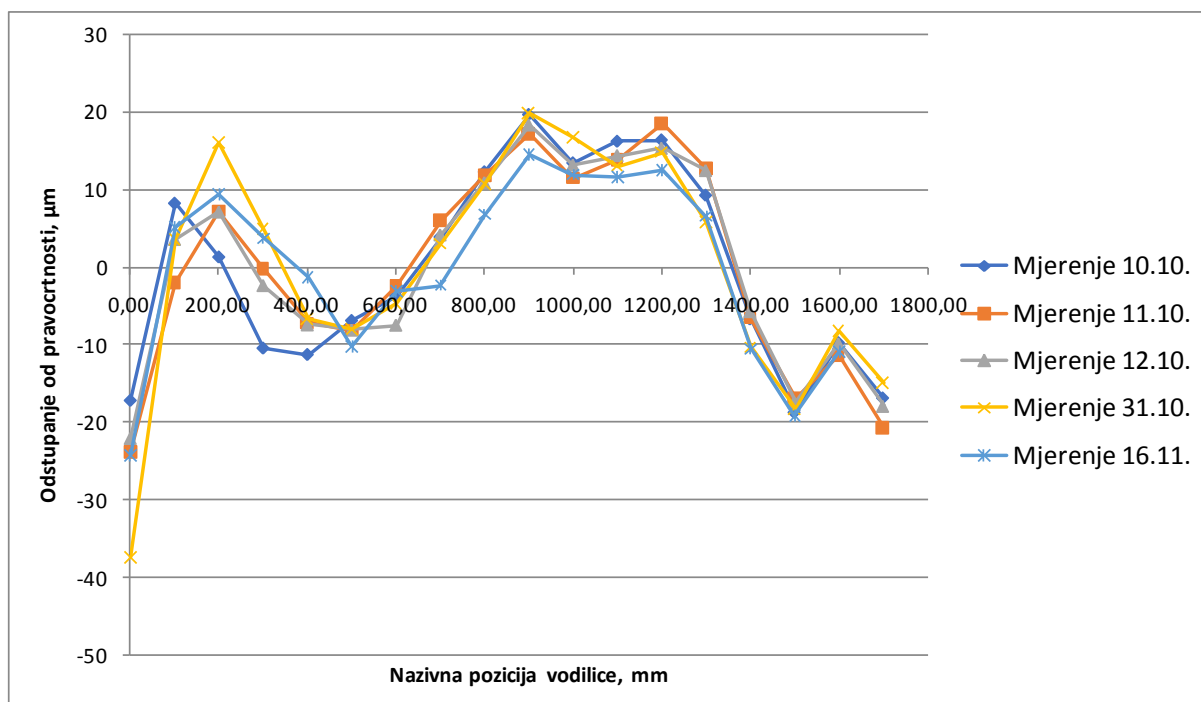
Iz tablice je vidljivo da je vrijednost pogreške okomitosti niska. Raspon dobivenih rezultata je dvostruko manji nego kod mjerenja napravljenih prije postavljanja lasera i prizme na stol (Tablica 30), što je bilo i za očekivati.

9. VREMENSKA STABILNOST

9.1. Vremenska stabilnost odstupanja od pravocrtnosti

Vremenska stabilnost mjernog sustava ispitana je na 5 mjerenja provedenih na vodilici dugačkoj 1,8 m, okrenutoj u smjeru osi *X*. Mjerenja su izvedena interferometrom sljedećih datuma: 10.10., 11.10., 12.10., 31.10., 16.11., po jedno mjerenje svakog dana.

Na slici ispod dan je dijagram s dobivenima horizontalnim odstupanjima od pravocrtnosti.



Slika 101. Ispitivanje vremenske stabilnosti odstupanja od pravocrtnosti

Uspoređivanje rezultata mjerenja je provedeno tako da se za svaku mjernu točku, od njih ukupno 18, tražila maksimalna i minimalna vrijednosti odstupanja od pravocrtnosti te njihova razlika. Rezultati su dani u tablici ispod.

Tablica 32. Analiza vremenske stabilnosti odstupanja od pravocrtnosti

	Odstupanje od pravocrtnosti		
Točka mjerenja	Maksimalna vrijednosti [μm]	Minimalna vrijednost [μm]	Razlika
1. točka = 0 mm	-17,11	-37,47	20,36
2. točka = 100 mm	8,27	-1,97	10,24
3. točka = 200 mm	16,07	1,34	14,72
4. točka = 300 mm	4,98	-10,38	15,36
5. točka = 400 mm	-1,29	-11,20	9,91
6. točka = 500 mm	-6,83	-10,28	3,45
7. točka = 600 mm	-2,47	-7,53	5,06
8. točka = 700 mm	6,07	-2,35	8,42
9. točka = 800 mm	12,31	6,76	5,54
10. točka = 900 mm	19,88	14,48	5,40
11. točka = 1000 mm	16,70	11,49	5,20
12. točka = 1100 mm	16,24	11,61	4,63
13. točka = 1200 mm	18,58	12,42	6,15
14. točka = 1300 mm	12,72	5,85	6,87
15. točka = 1400 mm	-5,78	-10,55	4,77
16. točka = 1500 mm	-16,90	-19,14	2,23
17. točka = 1600 mm	-8,20	-11,26	3,06
18. točka = 1700 mm	-14,99	-20,62	5,63

Razlika maksimalne i minimalne vrijednosti odstupanja od pravocrtnosti je najveća u 1. točki mjerenja. S obzirom na to da su vrijednosti odstupanja od pravocrtnosti u mikrometrima te se na slici 101 vidi da linije prate isti trend, može se reći da je vremenska stabilnost odstupanja od pravocrtnosti vrlo dobra.

9.2. Vremenska stabilnost odstupanja od okomitosti

Odstupanje od okomitosti mjereno je dva različita dana. U poglavlju 8.1 prikazana su odstupanja od okomitosti mjerena dana 12.10.2018., a u poglavlju 8.2 prikazana su ona mjerena dana 16.11.2018. U tablici ispod prikazane su po 3 vrijednosti odstupanja od okomitosti za svaki dan mjerenja te njihova razlika.

Tablica 33. Analiza vremenske stabilnosti odstupanja od okomitosti

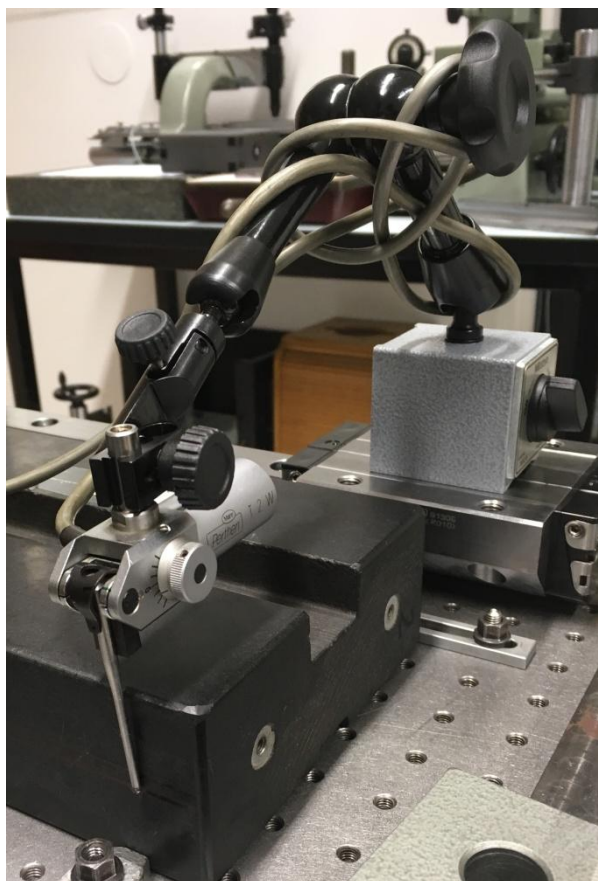
Pogreška okomitosti ["]		
12.10.2018.	16.11.2018.	Razlika
-42,574	-33,083	-9,154
-43,671	-33,420	-10,251
-43,050	-33,150	-9,9

Ako se gledaju samo rezultati mjerenja 12.10. može se reći da su mjerenja vrlo precizna, a isto se može reći i ako se gledaju samo rezultati dobiveni 16.11. Odnosno, drugim riječima, razlika rezultata približno je jednaka za sva 3 ispitana mjerenja te se ona može prepisati smanjenju utjecaja nedovoljne krutosti poda na mjerenja. Upravo zbog toga, može se reći da je vremenska stabilnost odstupanja od okomitosti vrlo dobra.

10. UTJECAJ Odstupanja od pravocrtnosti vodilice na primjeru mjerenja

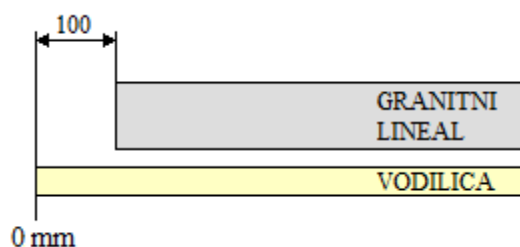
Prethodno u radu, mjerena su odstupanja od pravocrtnosti dviju vodilica. Preko tih vodilica, uz pomoć drugih mjernih uređaja, moguće je mjeriti odstupanja od pravocrtnosti drugih predmeta. Tada se kao rezultat dobije ukupna pogreška tog predmeta, što uključuje pogrešku pravocrtnosti predmeta, pogrešku pravocrtnosti vodilice preko koje je mjerenje obavljeno te pogrešku nesuosnosti koja se eliminira metodom najmanjih kvadrata.

U nastavku je kao primjer mjerenja uzeto mjerenje odstupanja od pravocrtnosti granitnog lineala, obavljeno induktivnim ticalom (Slika 102) postavljenim na klizaču na vodilici u smjeru osi X .



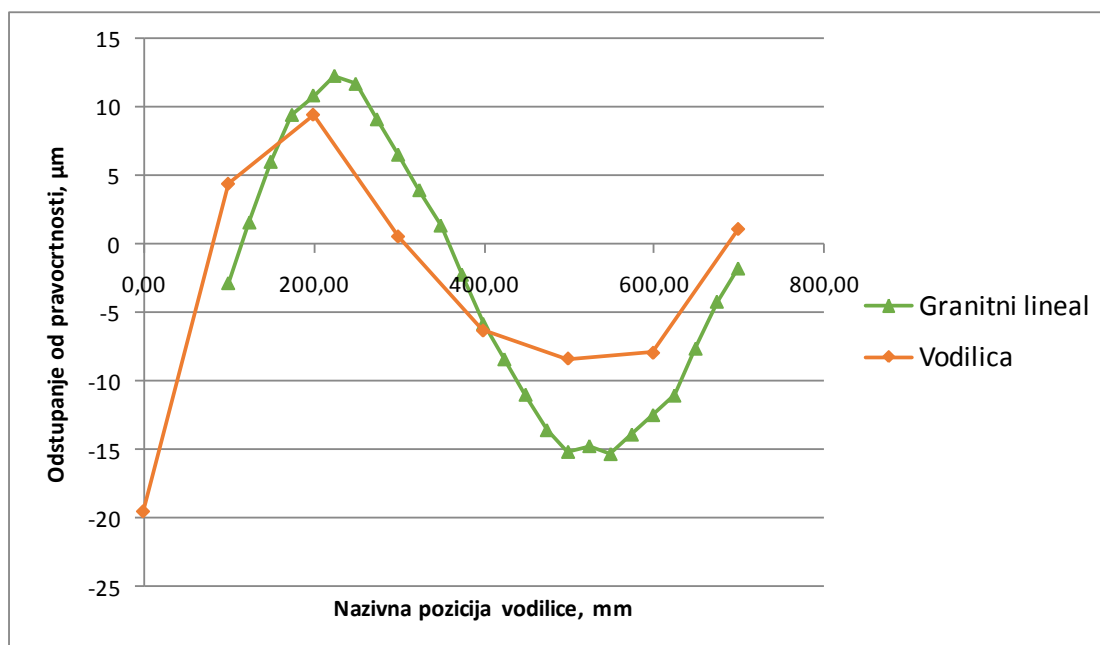
Slika 102. Induktivno ticalo

Granitni lineal nije bio postavljen na sami početak vodilice, već se prva mjerna točka granitnog lineal usklađuje s 2. mjernom točkom vodilice (100 mm), što će biti i prikazano na dijagramu u nastavku.



Slika 103. Pozicija granitnog lineala u odnosu na vodilicu

U nastavku je na slici prikazan dijagram s pogreškom pravocrtnosti vodilice u smjeru osi X (uzeti su rezultati dobiveni mjerenjima izvedenima s autokolimatom) te pogreškom granitnog lineala, koja je mjerena u 25 točaka, svakih 25 mm.



Slika 104. Utjecaj odstupanja od pravocrtnosti vodilice

Analizom se dobije ukupna pogreška granitnog lineala od $31 \mu\text{m}$, što je istog reda veličine kao i rezultat odstupanja od pravocrtnosti vodilice, dobiven mjerenjem autokolimatom, koji iznosi $30,2 \mu\text{m}$.

S obzirom na to da je poznato da dobivena pogreška granitnog lineala uključuje i pogrešku pravocrtnosti vodilice, može se zaključiti da je pogreška pravocrtnosti granitnog lineala vrlo mala u usporedbi s pogreškom pravocrtnosti vodilice. Samim time, zaključuje se da se, bez provedbe korekcije pravocrtnosti same vodilice, ne mogu mjeriti pogreške pravocrtnosti ostalih predmeta jer su same pogreške pravocrtnosti vodilice prevelike.

11. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu izmjerena su odstupanja od pravocrtnosti i okomitosti dviju vodilica i određena njihova vremenska stabilnost, uspoređeni su mjerni alati korišteni za dobivanje navedenih rezultata, te je utvrđen utjecaj krutosti poda na rezultate mjerenja.

Iznos pogreške pravocrtnosti vodilice okrenute u smjeru osi X iznosi $30,2\text{ }\mu\text{m}$ s rasipanjem rezultata od $9,1\text{ }\mu\text{m}$, dok pogreška pravocrtnosti druge vodilice, one okrenute u smjeru osi Y , iznosi $9,4\text{ }\mu\text{m}$ s rasipanjem rezultata od $1,9\text{ }\mu\text{m}$. Iznos pogreške okomitosti, mjerene interferometrom, iznosi od $33''$ do $43''$.

Ustanovljeno je da se korištenjem autokolimatora dobiju precizniji rezultati nego korištenjem interferometra, no proces mjerenja traje duže. Interferometrom je vrlo lako upravljati jer se odstupanja od pravocrtnosti mjere uz pomoć odgovarajućeg programa, dok se kod autokolimatora sve mora raditi ručno te zbog toga proces mjerenja traje puno dulje.

Analizirajući vremensku stabilnost odstupanja od pravocrtnosti i okomitosti ustanovljeno je da je sustav vremenski stabilan te se odstupanja nisu značajno mijenjala nakon određenog vremena.

Izvođenjem mjerenja ustanovljeno je da pod nije dovoljno krut. Provelo se istraživanje da se utvrdi utjecaj poda na rezultate mjerenja te je ustanovljeno da se prilikom nasumičnog postavljanja operatera, dok svi dijelovi mjernog sustava (u ovom slučaju misli se na laser i optičku prizmu) nisu postavljeno interno u odnosu na optički stol, smanjuje preciznost rezultata mjerenja. Utjecaj nedovoljne krutosti poda minimiziran je nakon postavljanja svih dijelova mjernog sustava na optički stol te su tada dobiveni precizniji rezultati.

U ovome diplomskom radu ustanovljeno je koliko mjerni sustav može biti osjetljiv te da je potrebno biti vrlo pažljiv prilikom obavljanja mjerenja i brzo uočavati sve moguće utjecaje na rezultate mjerenja.

Na kraju, na primjeru utjecaja odstupanja od pravocrtnosti vodilice u smjeru osi X , utvrđeno je kako se ta ista vodilica, zbog velike vrijednosti odstupanja od pravocrtnosti, bez korekcija ne može koristiti u mjerenju pogrešaka pravocrtnosti drugih predmeta.

LITERATURA

- [1] Šilić, Đ.: Mjerenja, Veleučilište Velika Gorica, 2016.
- [2] Bednjanec, F.: Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [3] Runje, B.: Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, Zagreb, 2014.
- [4] http://www.dzm.hr/o_mjeriteljstvu Državni zavod za mjeriteljstvo (pristupila stranici 28.12.2018.)
- [5] Mahović, S.: Teorija i tehnika mjerenja, Sveučilište u Zagrebu
- [6] Marković, I.: Sustav tolerancija oblika, orijentacije, položaja i netočnosti okretanja, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [7] Mucko, T.: Primjena statističkih tolerancija na strojarskim pozicijama, Završni rad, Sveučilište Sjever, 2015.
- [8] Bekić, N.: Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, 2008.
- [9] Giacomo, B., Tadeu Paziani, F.: Reversal technique applied to the measurement straightness errors, University of Sao Paulo, 2004.
- [10] <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=standardna+devijacija> (pristupila stranici 28.12.2018.)
- [11] Howarth, P.: Metrology in short, 3rd edition, Euromet e.V., 2008.
- [12] International Organization for Standardization: ISO 230-2, 2014.
- [13] <https://www.hzn.hr/> Hrvatski zavod za norme (pristupila 03.02.2019.)
- [14] <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854> (pristupila 29.12.2018.)
- [15] http://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/9%20F2_interferencija.pdf (pristupila 30.12.2018.)
- [16] <https://www.britannica.com/science/destructive-interference> (pristupila 29.12.2018.)
- [17] <http://www.muelaner.com/laser-interferometers/> (pristupila 29.12.2018.)
- [18] Chapman, M. A. V., Fergusson-Kelly, R., Lee, W.: Interferometric straightness measurement and application to moving table machines, Renishaw, 2013.
- [19] Taylor Hobson: Autocollimators & Accessories, USA, 2018.
- [20] <http://dhanish.co.nf/Course/Metlab/autocoll.pdf> Determination of straightness error using autocollimator (pristupila 4.1.2018.)
- [21] Renishaw: XL-80 laser measurement system, 2016.
- [22] Renishaw: On-line instructions for XL laser measurement system and accessories, 2011.

- [23] Tadić, T.: Aritmetička sredina i standardna devijacija, Poučak 69, 2017.
- [24] Jerković, I.: Metoda najmanjih kvadrata i njezina primjena u fizici, Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2016.
- [25] Taylor Hobson Centre of Excellence: Straightness & Parallelism