

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski program geodezija,  
Smer Geodezija v inženirstvu

Kandidat:

**Miloš Skakić**

# **Testiranje elektronskih razdaljemerov pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorjev**

**Diplomska naloga št.: 243**

**Mentor:**

izr. prof. dr. Dušan Kogoj

**Somentor:**

doc. dr. Simona Savšek

Ljubljana, 12. 12. 2007

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **MILOŠ SKAKIĆ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom :  
**»TESTIRANJE ELEKTRONSKIH RAZDALJEMEROV PRI MERJENJU DOLŽIN  
BREZ UPORABE REFLEKTORJEV«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Celje, 9.11.2007

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 528.51(043.2)  
**Avtor:** Miloš Skakić  
**Mentor:** izr. prof. dr. Dušan Kogoj  
**Somentor:** asist. dr. Simona Savšek-Safić  
**Naslov:** Testiranje elektronskih razdaljemerov pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorjev  
**Obseg in oprema:** 81 str., 23 pregl., 26 sl.  
**Ključne besede:** geodetski instrumenti, elektronski razdaljemer, merjenje dolžin, Topcon, Leica

### **Izvleček:**

V diplomski nalogi obravnavamo merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemer, in sicer principi merjenja, pogreške, ki lahko pri tem nastanejo in odpravljanje le teh. V nadaljevanju se osredotočimo na možnost merjenja dolžin brez uporabe reflektorja in na posebnosti, ki se pojavljajo pri tovrstnih meritvah. Slednje nas pripelje do opisa testnih meritev, ki so bile opravljene z namenom pridobitve ocene natančnosti opazovanj in določitve dosega testiranih instrumentov glede na vrsto materiala in vpadnega kota merskega žarka. Rezultati s komentarji nam podajo primerjavo testiranih instrumentov glede omenjenih lastnosti pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorjev.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDK:** 528.51(043.2)

**Author:** Miloš Skakić

**Mentor:** assoc. prof. dr. Dušan Kogoj

**Comentor:** assist. dr. Simona Savšek-Safić

**Title:** Testing of electronic distometers in reflectorless measuring mode

**Notes:** 81 p., 23 tab., 26 fig.

**Key words:** surveying instruments, electronic distometers, distance measuring, Topcon, Leica

### **Abstract:**

This thesis treats distance measuring with electronic distometers, more precisely principles of measuring, errors, which can result from it, and ways of doing away with them. Further on it focuses on the possibility of distance measuring without the use of a reflector and on particularities which occur at this type of measurements. The latter brings us to description of test measurements, which were done with the intention of evaluating observation precision and defining the reach of tested instruments according to material type and angle of incidence in the measuring ray. Results, accompanied with comments, give comparison of tested instruments according to the mentioned characteristics at distance measuring without the use of a reflector.

## KAZALO

1.	UVOD .....	1
2	MERJENJE DOLŽIN Z ELEKTRONSKIMI RAZDALJEMERI .....	3
2.1	Razdaljemerji glede na vrsto elektromagnetnega valovanja .....	4
2.2	Razdaljemerji glede na način merjenja .....	5
2.2.1	Impulzni razdaljemerji.....	6
2.2.2	Interferenčni razdaljemerji.....	7
2.2.3	Fazni razdaljemerji.....	8
3	IZVORI POGREŠKOV PRI MERJENJU DOLŽIN Z ELEKTRONSKIMI RAZDALJEMERI.....	12
3.1	Vplivi atmosfere .....	12
3.1.1	Lomni količnik $n$ pri svetlobnih elektronskih razdaljemerih.....	12
3.1.2	Vpliv napačno določenih meteoroloških parametrov .....	15
3.2	Instrumentalni pogreški.....	16
3.2.1	Pogrešek frekvence takta .....	16
3.2.2	Pogrešek določitve ničelne točke razdaljemera – adicijska konstanta .....	17
3.2.3	Pogrešek orientacije prizme .....	19
3.2.4	Ločljivost .....	21
3.2.5	Specifični pogreški pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorjev .....	22
4	UMERJANJE ELEKTRONSKIH RAZDALJEMEROV .....	28
4.1	Določitev ločljivosti merskega sistema.....	28
4.2	Določitev adicijske konstante .....	30
4.2.1	Določitev z znanimi dolžinami.....	31
4.2.2	Določitev brez znanih dolžin.....	33
4.3	Določitev multiplikacijske konstante .....	34
4.3.1	Določitev velikosti časovne enote z merjenjem frekvence .....	34
4.3.2	Določitev na osnovi geodetskih meritev.....	35
5	OSNOVNE REDUKCIJE DOLŽIN MERJENIH Z ELEKTRONSKIMI RAZDALJEMERI.....	36
5.1	Meteorološki popravki .....	36
5.2	Geometrični popravki .....	37
5.2.1	Izračun poševne dolžine med točkama na nivoju terena .....	38
5.3	Projekcijski popravki.....	40

<b>6</b>	<b>MERJENJE DOLŽIN Z ELEKTRONSKIMI RAZDALJEMERI BREZ UPORABE REFLEKTORJEV .....</b>	<b>41</b>
<b>6.1</b>	<b>Specifične redukcije pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorjev .....</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>TEST INSTRUMENTOV PRI MERJENJU DOLŽIN BREZ UPORABE REFLEKTORJEV .....</b>	<b>45</b>
<b>7.1</b>	<b>Deklarirane lastnosti testiranih instrumentov s strani proizvajalca .....</b>	<b>46</b>
<b>7.2</b>	<b>Potek meritev .....</b>	<b>49</b>
<b>7.2.1</b>	<b>Izbor materialov .....</b>	<b>50</b>
<b>7.3</b>	<b>Primerjava rezultatov meritev .....</b>	<b>56</b>
<b>7.3.1</b>	<b>Doseg testiranih instrumentov.....</b>	<b>56</b>
<b>7.3.2</b>	<b>Natančnost testiranih instrumentov .....</b>	<b>60</b>
<b>7.4</b>	<b>Metode določanja lastnosti s strani proizvajalca.....</b>	<b>77</b>
<b>8</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>79</b>
	<b>VIRI .....</b>	<b>81</b>

## 1. UVOD

Merjenje dolžin je ena od osnovnih nalog terestrične geodezije, v današnjem času pa se te merijo skoraj izključno z elektronskimi razdaljemerji.

Razvoj elektronskih razdaljemerov sega v dvajseta leta prejšnjega stoletja. Predhodniki instrumentov, primernih za rabo v geodeziji, so bili razviti za potrebe vojske. Radar in sonar uporabljata za določevanje razdalje med dvema točkama radijske valove, ki se od cilja odbijejo in se vrnejo nazaj v izhodišče. Na osnovi izmerjenega časa se določi razdalja do cilja. Osnovni princip določitve dolžine je tako enak kot pri elektronskih razdaljemerih za potrebe geodezije, vendar je natančnost radarjev za te potrebe preslaba.

Razvoj elektrooptičnih razdaljemerov se je začel v tridesetih letih dvajsetega stoletja in je leta 1949 pripeljal do izdelave prvega elektronskega razdaljemera geodetske natančnosti. Geodimeter, kot se ta instrument imenuje, je uporabljal vidno svetlobo in je deloval na faznem principu merjenja. Z njim se je dalo meriti dolžine do 40 kilometrov. Njegova slabost je bila ta, da se ga je dalo uporabljati le v mraku in temi, bil pa je tudi zelo masiven, tako da ga je bilo treba prevažati z vozom.

Leta 1956 je bil razvit Tellurometer, prvi mikrovalovni razdaljemer, ki je zagotavljal geodetsko natančnost. Deloval je na faznem principu merjenja, z njim se je dalo meriti dolžine kar do 80 kilometrov, uporabljal pa se je lahko tudi podnevi.

S pojavom elektronskih razdaljemerov je postalo merjenje dolžin hitrejše, učinkovitejše in bolj ekonomično. V nadaljnjem razvoju je prišlo do znatnega povečanja dosega predvsem elektrooptičnih razdaljemerov, in tudi do boljše natančnosti. Zmanjšala sta se velikost in masa razdaljemerov, kar jih je naredilo bolj priročne za vsakdanjo rabo. Nekateri instrumenti omogočajo dinamično merjenje dolžin, kar pomeni, da instrument izvede v kratkem času zelo veliko število meritev – tudi do 60 meritev na sekundo. Ta način omogoča reševanje specifičnih nalog v inženirski geodeziji. Pride pa tudi do kombinacije elektronskih razdaljemerov z elektronskimi teodoliti. Te instrumente imenujemo

elektronski tahimetri, ki hitro in učinkovito zajemajo merske podatke. Ti instrumenti so danes nepogrešljivi pri klasični terestrični izmeri.

V tej diplomski nalogi se osredotočimo na principe merjenja dolžin z elektronskimi razdaljmeri, pogreške in popravke, ter možnosti merjenja dolžin brez uporabe reflektorja. Prvotno so takšne meritve omogočali samo impulzni razdaljmeri, danes pa je to možno tudi s faznimi. Pred časom je bil na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo opravljen test takrat vodilnega razdaljemera, Leice DIOR 3002S, ki ima impulzni način merjenja. Danes, ko so fazni dosti napredovali pa smo isti instrument postavili ob bok Leici TPS1201 in Topconu GPT 7000i, ki uporabljata fazni način merjenja. Oba uporabljata nove tehnološke dosežke za izboljšanje dosega in ohranjanje visoke natančnosti pri daljših dolžinah pri merjenju brez uporabe reflektorja. Tako nas je zanimalo, če so najnovejši fazni razdaljmeri primerljivi z vodilnim impulznim, ali pa ga morda celo presegajo.



## 2 MERJENJE DOLŽIN Z ELEKTRONSKIMI RAZDALJEMERI

Pri merjenju dolžin z elektronskimi razdaljemerji gre za določitev dolžine na osnovi izmerjenega časa, v katerem elektromagnetno valovanje prepotuje merjeno razdaljo.

Na eni krajni točki imamo instrument, na drugi pa reflektor, ki predstavlja dodatni pribor pri meritvah. Sodobni elektronski razdaljemerji so elektrooptični in so izvor elektromagnetnega valovanja, ki ga preko oddajne optike instrumenta usmerimo proti reflektorju. Valovanje pade na prizmo reflektorja, kjer se elektromagnetni valovi odbijejo nazaj proti instrumentu in prepotujejo merjeno dolžino v obratni smeri na sprejemno optiko instrumenta.

Če predpostavimo, da poznamo čas oddaje ( $t_o$ ) in čas sprejema ( $t_s$ ) elektromagnetnega valovanja, lahko določimo čas potovanja valovanja :

$$\Delta t = t_s - t_o$$

Pri tem je  $\Delta t$  čas, ki ga valovanje potrebuje, da dvakrat prepotuje merjeno dolžino. Instrument ta čas določi direktno ali indirektno s primerjavo merskega in referenčnega signala, oziroma zunanjo in notranjo potjo signala. Ker se elektromagnetno valovanje v homogenem ozračju giblje z enakomerno hitrostjo ( $c$ ), računamo dolžino med dvema točkama po enačbi :

$$D = \frac{c\Delta t}{2}$$

Tu je pomembno predvsem, da se zelo natančno določi hitrost valovanja  $c$  in čas potovanja  $\Delta t$ .

Za konstanto hitrosti svetlobe v vakuumu je določena vrednost  $299792458 \cdot (1 \pm 4 \cdot 10^{-9})$   $\text{ms}^{-2}$ , vendar je ostal problem natančnejše določitve, zato so na novo definirali enoto za dolžino, ki je definirana na osnovi hitrosti svetlobe. Definicija je bila sprejeta leta 1983 in

se glasi : En meter je dolžina poti, ki jo prepotuje elektromagnetno valovanje v vakuumu v času  $1/299792458$  s.

Z veliko natančnostjo pa je potrebno določiti tudi čas potovanja elektromagnetnega valovanja, saj ima le to izredno veliko hitrost. Napaka merjenja časa se direktno odrazi v meritvi, zato se časovni interval  $\Delta t$  v splošnem ne meri direktno.

Poznamo različne vrste elektronskih razdaljemerov, danes pa se za terestrične meritve uporabljajo predvsem elektrooptični, ki pri svojem delovanju uporabljajao vidno ali infrardečo svetlobo. Svetilo v instrumentu je izvor visokofrekvenčnega elektromagnetnega valovanja, ki se preko oddajne optike usmeri proti reflektorju. Povratni žarek ima zaradi divergence in absorpcije v atmosferi tudi do milijonkrat manjšo svetlobno jakost. Na fotodetektorju se spremeni v električni signal, ki se ojači in primerja z referenčnim signalom. Rezultat primerjave je vrednost merjene dolžine.

## 2.1 Razdaljemerji glede na vrsto elektromagnetnega valovanja

Elektronski razdaljemer uporablja elektromagnetno valovanje, ki ga oddaja periodično nihajoč izvor, ki s frekvenco  $f$  oddaja elektromagnetne valove enake frekvence in valovne dolžine  $\lambda$ , ki se širijo s svetlobno hitrostjo  $c$ .

Velja povezava:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Elektromagnetno valovanje je transverzalno, kar pomeni, da je smer nihanja elektromagnetnega polja pravokotna na smer širjenja valovanja. Opišemo ga lahko s sinusoido ali kosinusoido, kar pomeni, da gre za harmonično valovanje. Tako lahko za izbrani trenutek ali na določeni oddaljenosti ugotovimo nihajno stanje elektromagnetnega valovanja.

Glede na uporabljeno valovno dolžino elektromagnetnega valovanja poznamo dve vrsti elektronskih razdaljemerov: mikrovalovne in elektrooptične.

Mikrovalovni razdaljemerji se za klasične terestrične izmere v geodeziji ne uporabljajo več. Občutljivi so na spremenljive pogoje v atmosferi, skozi katero se valovanje širi. Tako zaradi večje valovne dolžine obstaja možnost za odstopanje od premočrnosti širjenja valovanja, to pa se nato odbije od bližnjih objektov ali terena. Veliko bolj občutljivi so tudi na spremembo vlažnosti v zraku. Njihova prednost pa je, da niso vezani na vidnost. Tako lahko merimo tudi skozi meglo in oblake. Pri merjenju daljših dolžin zaradi razpršenosti snopa na reflektor ne pade zadostna količina valovanja, zato se uporabljajo aktivni reflektorji, ki delujejo tako, da sprejeti žarek najprej ojačijo in ga nato vrnejo proti instrumentu.

Elektrooptični razdaljemerji nimajo take razpršenosti, zato uporabljajo pasivne reflektorje. Vezani pa so na vidljivost in imajo zmanjšan doseg zaradi večje absorpcije in sipanja svetlobe v atmosferi. Danes se za potrebe geodezije uporabljajo predvsem elektrooptični razdaljemerji.

## 2.2 Razdaljemerji glede na način merjenja

Zaradi potrebne natančnosti določitve časovnega intervala  $\Delta t$ , je to rešeno tako, da se meritev opravi dvakrat, enkrat z merskim signalom in drugič z referenčnim.

Z različnimi tehničnimi rešitvami lahko merimo dolžine na različne načine. Tako elektrooptične razdaljemere glede na način merjenja ločimo v tri skupine:

- impulzni razdaljemerji,
- interferenčni razdaljemerji,
- fazni razdaljemerji.

### 2.2.1 Impulzni razdaljemer

Svoje ime so dobili po obliki svetlobnega žarka, s katerim merijo dolžino. Ta način merjenja je v osnovi najpreprostejši. Temelji na direktnem merjenju časa, ki ga svetlobni impulz potrebuje, da dvakrat prepotuje razdaljo od razdaljemera do reflektorja in nazaj. Ob znani hitrosti svetlobe je izračun dolžine enostaven. Zanima pa nas, s kakšno natančnostjo je potrebno določiti  $\Delta t$ .

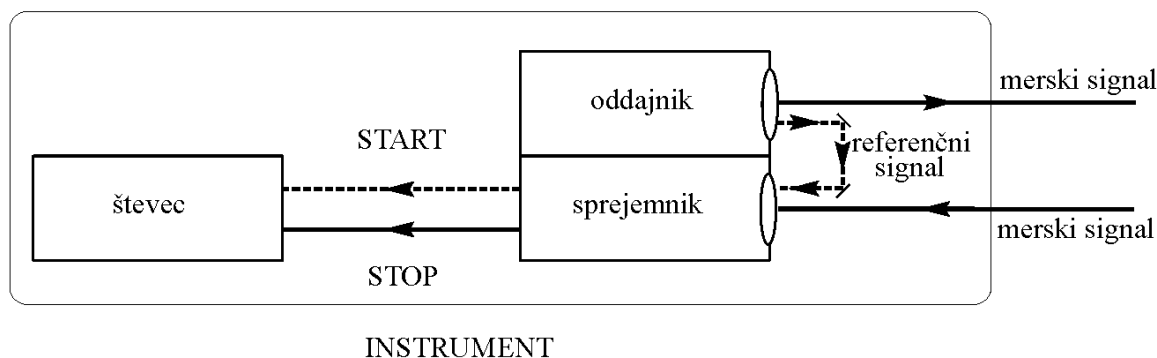
Izrazimo  $\Delta t$  :

$$\Delta t = \frac{2D}{c}$$

Standardni odklon merjenja časa je :

$$\sigma_{\Delta t} = \frac{2}{c} \sigma_D$$

Iz enačbe je razvidno, da natančnost določitve časa ni odvisna od velikosti dolžine, temveč od tega, kako natančno želimo določiti dolžino. V primeru, da hočemo dolžino določiti z natančnostjo  $\pm 5$  mm, moramo  $\Delta t$  določiti z natančnostjo  $\pm 0.033$  ns. Komerzialna tehnologija dolgo ni omogočala tako natančne določitve časa, zaradi česar se impulzni razdaljemerji niso uveljavili vse do devetdesetih let 20. stoletja.



SLIKA1: Princip primerjave referenčnega in merskega signala pri impulznih razdaljemerih

Prednosti impulznih razdaljemerov pred faznimi in interferenčnimi:

- Dosegajo isto natančnost kot fazni, čas merjenja pa je krajši, ker grobo merjenje odpade.
- Merimo lahko daljše dolžine ( do 15 km ), ker so impulzni sunki kratki in zelo močni.
- Impulzni način omogoča enolične rezultate izmerjenih dolžin in visoko ločljivost.
- Imajo enostavnejšo konstrukcijo kot frekvenčni elektrooptični in so lažji.
- Zaradi močne svetlobne jakosti impulzov je možno pri krajših razdaljah meriti brez reflektorjev, z dosegom do 350 m.
- Odpadejo nekateri sistematični pogreški, značilni za fazne razdaljemere.

Slabosti impulznih razdaljemerov:

- Natančnost se zmanjša, ko merimo brez uporabe reflektorja.
- Deformacija svetlobnega impulza zaradi vplivov atmosfere slabša natančnost meritev.
- Zaradi varnosti ni mogoče neomejeno povečevati jakosti impulza.

### 2.2.2 Interferenčni razdaljemeri

Interferenčni razdaljemeri uporabljajo fizikalni pojav interference svetlobe. Dva koherentna svetlobna žarka združimo, s čemer nastane interferenčna slika. Oblika te slike je odvisna od fazne razlike med žarkoma. Kadar žarka nihata v fazi, se ojačita in interferenčna slika je seštevek velikosti amplitud žarkov. Kadar pa je njuna fazna razlika enaka  $\pi$ , žarka oslabita in amplitudi se med seboj odštejeta, zato dobimo temo.

Žarka sta koherentna, kadar imata enaki frekvenci, valovni dolžini in stalno fazno razliko. Koherentnost žarkov zagotovimo z laserjem kot izvorom svetlobe in delilcem žarka, ki razdeli laserski žarek na referenčni, ki ima na fotodetektorju stalno fazo, in na merskega, katerega faza se s spreminjanjem položaja merske prizme spreminja. Najpogosteje se uporablja helij neonov laser ( He-Ne laser,  $\lambda = 0.632 \mu\text{m}$  ).

Prednosti interferenčnih razdaljemerov:

- To je najnatančnejši način merjenja dolžin.
- Omogočajo merjenje dolžin z največjo ločljivostjo.

Slabosti interferenčnih razdaljemerov:

- Postopek meritev je zelo zahteven in zato potrebujemo drag instrumentarij in pribor.
- Merjenje dolžine je mogoče le, če je zagotovljen kontinuiran premik merske prizme od začetne do končne točke.
- Namenjeni so le za laboratorijske meritve, saj je smiselno meriti dolžine le do 50 metrov.

### 2.2.3 Fazni razdaljemerji

Delovanje faznih razdaljemerov temelji na moduliranem elektromagnetnem valovanju. Modulacija je združitev dveh ali več valovanj iste vrste. Združujemo dve elektromagnetni valovanji, ki se lahko ujemata v fazi ali frekvenci, lahko pa sta oba elementa različna. Modulacija pomeni spremembo valovanj v času in prostoru.

Pri faznih razdaljemerih združujemo dve valovanji, in sicer:

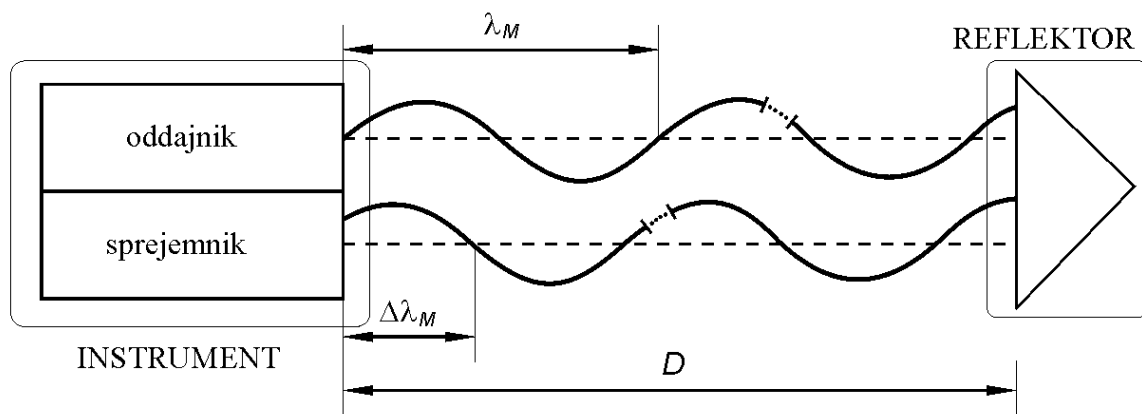
- Nosilno valovanje: Svetilo je izvor elektromagnetnega valovanja zelo visokih frekvenc  $f_N$ . To valovanje zagotavlja premočrtnost širjenja v atmosferi. Govorimo o nosilnem valovanju oziroma nosilcu informacijske faze (kot merski trak brez nanešene razdelbe). Doseg instrumenta, hitrost valovanja in absorpcija svetlobe so odvisni od lastnosti nosilnega valovanja.
- Mersko valovanje: nosilno valovanje je modulirano z merskim, katerega izvor je kremenov kristal. Kristal kremen generira modulacijsko (mersko) frekvenco  $f_M$ , ki je bistveno nižja od  $f_N$ . Danes razdaljemerji uporabljajo frekvence od 15 MHz do 100 MHz, natančnejši pa tudi do 500 MHz. Modulacijska frekvenca nam zagotavlja dolžinsko mersko enoto – polovično modulacijsko valovno dolžino. Velikost le te

je odvisna od velikosti modulacijske frekvence in znaša od 10 m do 1,5 m, pri najnatančnejših celo do 0,3 m.

Pri faznih razdaljemerih se običajno uporablja amplitudna modulacija. Amplitudno modulirano valovanje, ki je rezultat združitve nosilnega in merskega valovanja, ima spremenljivo amplitudo. Tako lahko na osnovi jakosti svetlobnega žarka instrument določi fazo merskega valovanja.

#### Princip merjenja pri faznih razdaljemerih:

Valovna dolžina merskega vala je odvisna od modulacijske frekvence in sredstva, skozi katerega se valovanje širi.



SLIKA 2: Princip merjenja dolžine pri faznih razdaljemerih

Velja:

$$\lambda_M = \frac{c}{f_M}$$

$\lambda_M$  ..... valovna dolžina moduliranega valovanja

$f_M$  ..... modulacijska frekvenca

$c$  ..... hitrost nosilnega svetlobnega valovanja v sredstvu.

Celotno pot merskega žarka zapišemo v enotah modulacijskih valovnih dolžin:

$$2D = N\lambda_M + \Delta\lambda_M$$

$$D = N\frac{\lambda_M}{2} + \frac{\Delta\lambda_M}{2}$$

$N$  ..... število polovičnih valovnih dolžin na merjeni poti

$\Delta\lambda_M$ ..... del modulacijske valovne dolžine, ki ga določimo na osnovi merjenja fazne razlike med merskim žarkom in referenčnim žarkom, in sicer:

$$\Delta\lambda_M = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \lambda_M$$

Pri tem gre za določevanje števila polovičnih modulacijskih valovnih dolžin  $N$  in fazne razlike  $\Delta\varphi$  med merskim in referenčnim žarkom. Bistvo celotnega postopka meritev je ugotavljanje fazne razlike med primerjanima žarkoma, od koder prihaja tudi ime fazni razdaljemer.

$$\frac{\lambda_M}{2} = U$$

$$\frac{\Delta\lambda_M}{2} = R$$

Dobimo:

$$D = NU + R$$

Kjer je  $U$  merilo oziroma merska enota,  $R$  pa ostanek. Izmeriti dolžino pomeni določiti število enot  $N$  in velikost ostanka  $R$ .



Fazne razdaljemerne lahko glede na natančnost razdelimo v dve skupini:

- Razdaljemerji običajne natančnosti, kjer je standardni odklon dolžine približno  $\sigma_D = 3 \text{ mm}$ ; 2 ppm. Uporabni so za večino običajnih geodetskih nalog in so sestavni del elektronskih tahimetrov.
- Precizni fazni razdaljemerji, ki so običajno samostojni instrumenti in zagotavljajo natančnost tudi do  $\sigma_D = 0.2 \text{ mm}$ ; 0.2 ppm. So zelo dragi, njihova uporaba pa je nujna pri zahtevnih geodetskih delih, ki pa jih ni veliko. Zaradi tega niso komercialno zanimivi.

Prednosti faznih razdaljemerov:

- Najbolj preizkušen postopek merjenja dolžin z elektrooptičnimi razdaljemerji, hkrati pa so instrumenti zelo kompaktni in v splošnem cenejši.
- Meritev je neobčutljiva na kratko prekinitev signala.
- Novejši fazni razdaljemerji omogočajo merjenje brez reflektorja.

Slabosti faznih razdaljemerov:

- Daljši čas merjenja, čeprav se je z novimi modeli bistveno skrajšal.
- Pojavljanje specifičnih cikličnih pogreškov faze.
- Daljše dolžine je potrebno meriti z več modulacijskimi frekvencami, kar lahko slabša natančnost meritev.
- V primerjavi z impulznim načinom potrebujejo fazni razdaljemerji bolj zapleteno optiko in učinkovitejši izvor električne napetosti.

### **3 IZVORI POGREŠKOV PRI MERJENJU DOLŽIN Z ELEKTRONSKIMI RAZDALJEMERI**

Kot praktično vsi merski postopki, je tudi merjenje dolžin podvrženo številnim pogreškom, ki plivajo na končno merjeno vrednost. Predvsem so tu prisotni pogreški okolja in instrumentalni pogreški. V postopku meritev je merska vrednost, ki jo prikaže razdaljemer, praktično neodvisna dela operaterja. Subjektivni pogreški so vezani predvsem na postopek ugotavljanja atmosferskih parametrov ter kvaliteto centriranja instrumenta in reflektorja. S preizkušanjem instrumentov kontroliramo instrumentalne pogreške. Instrumentalni pogreški so posledica konstrukcijske nepopolnosti instrumenta in pribora, s katerim merimo. Najpomembnejša sta pogrešek merila instrumenta in pogrešek ničelne točke razdaljemera in reflektorja.

#### **3.1 Vplivi atmosfere**

Atmosfera vpliva na meritev razdalje na dva načina:

- vpliv lomnega količnika  $n$  na hitrost širjenja valovanja in zato na valovno dolžino  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c_0}{nf}$$

- vpliv refrakcije na geometrično obliko merske linije.

##### **3.1.1 Lomni količnik $n$ pri svetlobnih elektronskih razdaljemerih**

Lomni količnik svetlobe kot nosilca valovanja je odvisen od :

- Valovne dolžine nosilca valovanja,

- Meteoroloških pogojev – gostote atmosfere, ki jo določamo z meritvijo temperature, zračnega tlaka in delnega tlaka vodne pare.

Fazna hitrost je hitrost širjenja valovanja nekega monokromatskega vala. Zapišemo jo tako:

$$c_f = \frac{c_0}{n_f}$$

Vendar pa nikoli ne dosežemo popolnega monokromatskega valovanja, ker vsako valovanje, ki ga uporabljajo elektronski razdaljmeri, izvira iz ozkega frekvenčnega območja valovanja različnih valovnih dolžin in hitrosti elektromagnetnega valovanja. Ta harmonična valovanja se prekrivajo in zato nastanejo valovne skupine. Energija se pri tem širi z grupno hitrostjo  $c_g$ .

Skupni lomni količnik je sedaj določen z :

$$n_g = \frac{c_0}{c_g}$$

Izražen s Cauchyjevo vrsto:

$$(n_g - 1) \cdot 10^6 = N_g = A + 3 \cdot \frac{B}{\lambda_e^2} + 5 \cdot \frac{C}{\lambda_e^4}$$

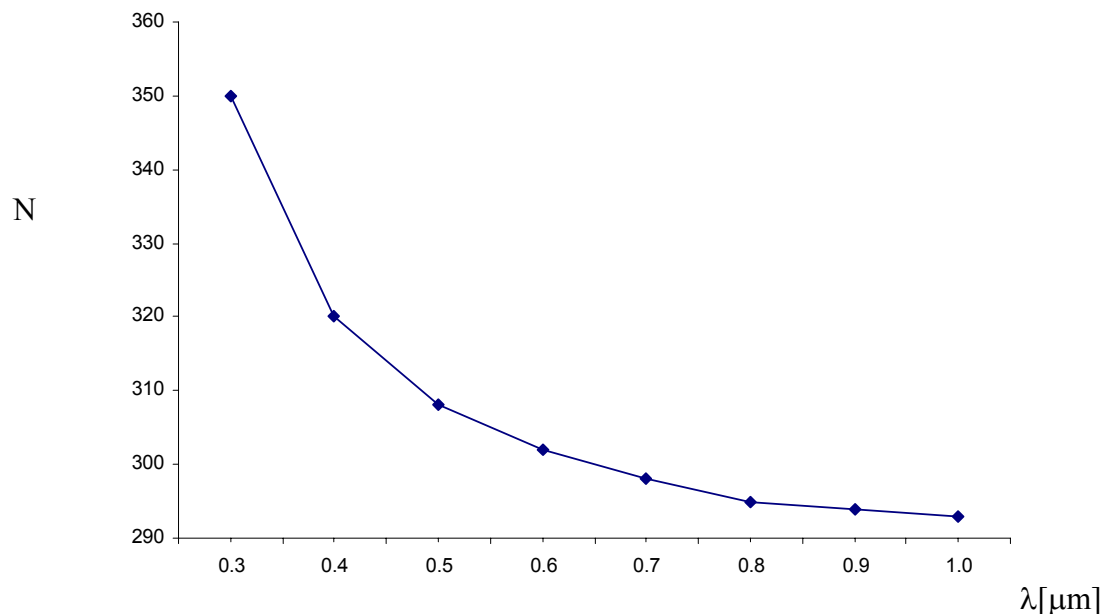
$\lambda_e$ .....efektivna valovna dolžina izražena v  $\mu\text{m}$

Efektivna valovna dolžina  $\lambda_e$  pa ni odvisna le od frekvenčnega območja, temveč tudi od sposobnosti filtriranja oddajne in sprejemne optike, modulatorja in sprejemnika. Običajno je določena eksperimentalno in jo poda proizvajalec.

Konstante A, B in C izhajajo iz laboratorijskih poizkusov. Leta 1966 so bile predstavljene konstante - EDLEN :

$$N_g = 287,583 + 3 \cdot \frac{1,6134}{\lambda_e^2} + 5 \cdot \frac{0,0144}{\lambda_e^4}$$

Te enačbe veljajo v območju:  $0,3\mu\text{m} < \lambda < 1,0\mu\text{m}$



GRAF 1 : Odvisnost lomnega količnika od valovne dolžine

Ker pa ne merimo v zgoraj navedenih pogojih, moramo tako dobljeni lomni količnik  $N_g$  še popraviti za dane meteorološke pogoje. Uporabimo interpolacijsko enačbo (Barrel/Sears in Kochlarusch) :

$$n_d = 1 + \frac{n_g - 1}{1 + \alpha t} \cdot \frac{p}{760} - \frac{4,1 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha t} \cdot e$$

$n_d$ ..... skupni lomni količnik svetlobe pri dejanskih razmerah

$$n = n(\lambda, t, p, e)$$

$p$ ..... zračni tlak (v torrilih)

$e$ ..... delni tlak vodne pare (v torrilih)

$\alpha$ ..... razteznostni koeficient zraka  $\alpha=1/273,16=0,00367$

$t$ ..... temperatura zraka (v °C)

Vpliv tlaka vodne pare pri svetlobi je v povprečju zelo majhen in zato v glavnem zanemarljiv.

### 3.1.2 Vpliv napačno določenih meteoroloških parametrov

Meteorološki parametri, predvsem temperatura in zračni tlak, močno vplivajo na optično gostoto zraka. S spremembo optične gostote zraka pa se spremeni tudi hitrost elektromagnetnega valovanja.

Ker ne vemo, s kakšno hitrostjo se širi svetloba vzdolž merjene dolžine, moramo na krajiščih in pa tudi vmes izmeriti temperaturo in zračni tlak. Bolj natančno ju bomo izmerili, bolj točno bomo lahko določili meteorološke vplive in meritev dolžine bo natančnejša. Hitrost svetlobe v atmosferi je enaka :

$$c = \frac{c_0}{n}$$

$n$ ..... lomni količnik atmosfere  $n = n(t,p)$

Sprememba lomnega količnika pomeni spremembo velikosti izmerjene dolžine :

$$\frac{dD}{D} = -\frac{dn}{n} \quad , \text{ kjer je } n \approx 1, \text{ sledi } dD = -D \cdot dn$$

Za običajne meteorološke pogoje velja naslednja enačba :

$$dD_{EOR} = (0,38dp + 0,98dt + 0,06dt_M)10^{-6} D$$

Pogrešek zaradi meteoroloških vplivov je slučajni pogrešek in ga zmanjšamo s povečanjem števila meritev in z merjenjem v različnih meteoroloških pogojih.

## 3.2 Instrumentalni pogoški

### 3.2.1 Pogrešek frekvence takta

Za natančno merjenje dolžin mora biti časovna enota razdaljemera konstantna. Kot izvor časovne enote se uporabljajo kristali kvarca, ki dajejo konstantno frekvenco z natančnostjo od  $10^{-6}$  do  $10^{-7}$ . Vendar pa zaradi staranja kristalov pride do sprememb (ki so reda  $3 \cdot 10^{-7}$  na leto). Pri staranju kvarca gre za počasno in nepretrgano spreminjanje v kristalni strukturi. Ta efekt moramo registrirati z rednim testiranjem frekvenc. Proizvajalec sicer poskuša velik del frekvenčnih sprememb vnaprej onemogočiti že pred vgradnjo kvarca v instrument s pomočjo umetnega staranja kvarca.

Čas, ki je potreben, da impulz prepotuje pot od razdaljemera do reflektorja in nazaj, je sestavljen iz števila celih časovnih enot in ostanka. Če ostanek časovne enote zanemarimo, enačbo diferenciramo in delimo z  $D$ , dobimo :

$$D = \frac{c}{2} NT \Rightarrow dD = \frac{c}{2} NdT \Rightarrow dD = \frac{D}{T} dT \Rightarrow \frac{dD}{D} = \frac{dT}{T}$$

Vidimo, da je ta pogrešek sistematičen in zelo vpliva na natančnost merjenja dolžin.

Pri moduliranju nosilnega valovanja z modulatorsko frekvenco  $f_M$  je valovna dolžina merskega vala določena na osnovi poznane hitrosti svetlobe  $c$  ( $c_0$ ) in lomnega količnika sredstva, skozi katero se širi  $n$  ( $n_0$ ).

$$\lambda_M = \frac{c}{f_M} = \frac{c_0}{n_0 \cdot f_M}.$$

Sprememba modulatorske frekvence povzroči spremembo merila

$$d\lambda_M = -\frac{c_0}{n} \cdot \frac{1}{f_M^2} \cdot df_M = -\frac{\lambda_M}{f_M} \cdot df_M.$$

Dolžina se pri faznem načinu merjenja določi na osnovi velikosti valovne dolžine merskega vala  $\lambda_M$  in števila merskih valov  $N$  ter ostanka  $\Delta\lambda_M$  (dela valovne dolžine).

$$D = N \cdot \frac{\lambda_M}{2} + \frac{\Delta\lambda_M}{2}$$

Vpliv spremembe  $df_M$  je na določitev  $\Delta\lambda_M$  zanemarljiv, ker je  $N \cdot \lambda_M \gg \Delta\lambda_M$ , torej bo sprememba dolžine

$$dD = \frac{1}{2} N \cdot d\lambda_M \approx \frac{D}{\lambda_M} d\lambda_M \quad \text{in je} \quad \frac{dD}{D} = \frac{d\lambda_M}{\lambda_M} = -\frac{df_M}{f_M}$$

Relativna sprememba dolžine  $dD/D$  je enaka relativni spremembi modulacijske frekvence z negativnim predznakom. Povečanje frekvence pomeni zmanjšanje modulacijske valovne dolžine. Izmerjena dolžina bo prekratka. Sprememba merske frekvence vpliva na spremembo dolžine enako kot sprememba lomnega količnika. Velikost spremembe dolžine raste sorazmerno z naraščanjem dolžine. Odločilna zato je najmanjša oz. osnovna modulacijska frekvenca, ki določa fino merilo. Podoben rezultat bi dobili pri impulznih razdaljemerih, pri čemer je merilo definirano z osnovno časovno enoto  $T$  (takt):

$$D = \frac{c}{2} N \cdot T, \text{ odvajamo } dD = \frac{c}{2} N \cdot dT = \frac{D}{T} \cdot dT \quad \text{in dobimo} \quad \frac{dD}{D} = \frac{dT}{T}.$$

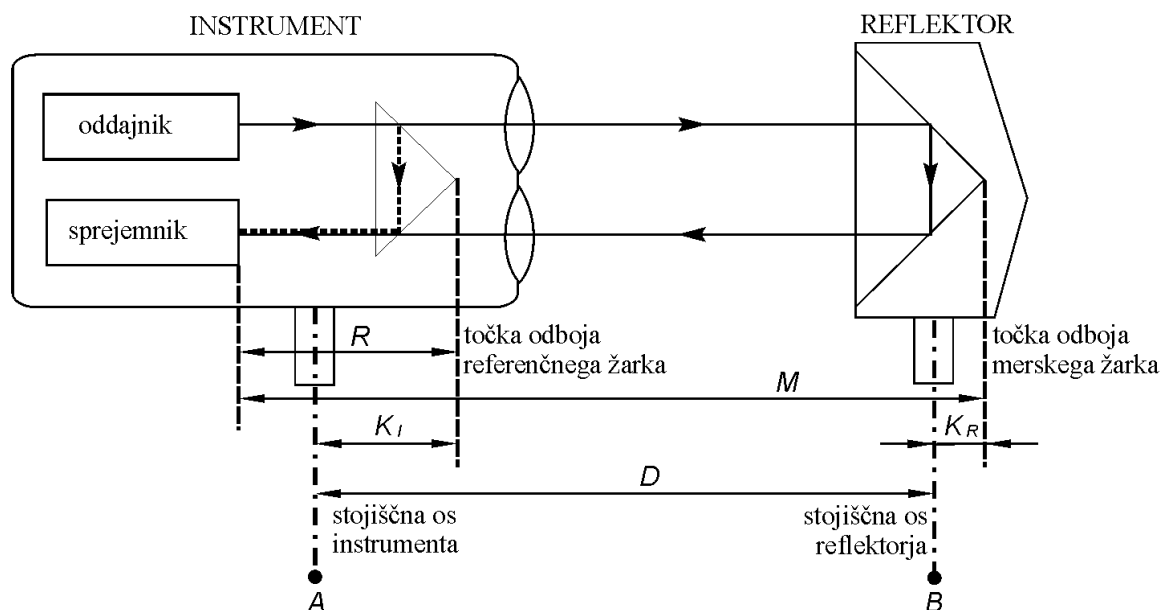
### 3.2.2 Pogrešek določitve ničelne točke razdaljmera – adicijska konstanta

Pri vsakem elektronskem razdaljemeru je dolžina merjene stranice določena z razliko med zunanjo mersko potjo  $M$  in notranjo mersko potjo  $R$ . Zaradi tega načina določitve vrednosti dolžine bodo eliminirani nekateri pogreški, ki pri merskih postopkih obeh poti vplivajo na enak način.

$$D' = M - R$$

Pojavljata se dve ekscentriciteti, in sicer :

- Ekscentriciteta referenčnega signala  $K_I$  – ekscentriciteta razdaljemera, ki je posledica geometrične poti referenčnega signala in elektronskih zakasnitev v posameznih delih instrumenta. Glede na aktivno odbojno točko notranje poti nastaja torej v instrumentu ekscentričnost. Sestavljata jo geometrična pot svetlobe in elektronski obratovalni čas. Ekscentriciteta predstavlja nesovpadanje stojiščne osi instrumenta in točke oddaje oziroma sprejema elektromagnetnega vala.
- Ekscentriciteta merskega vala  $K_R$  – ekscentriciteta reflektorja, ki je posledica geometrične poti merskega signala skozi prizmo reflektorja in je odvisna predvsem od položaja prizme glede na stojiščno os reflektorja. Toda tudi posamezni reflektorji istega tipa lahko med seboj izkazujejo občutna odstopanja.



SLIKA 3: Pogrešek ničelne točke razdaljemera in reflektorja

Popravek ničelne točke  $k_a$  (adicijska konstanta) je vsota linearnih ekscentricitet razdaljemera in reflektorja in ga določamo s primerjavo z znano dolžino



$$k_a = K_I + K_R$$

$$D = M - R + K_I + K_R = D' \cdot k_a$$

pri čemer  $k_a$  zajema vse modelne popravke za sistematične pogreške (atmosfera, frekvenca, ciklični pogreški). Spreminjanje geometričnih ekscentričnosti  $K_I$ ,  $K_R$  pomenijo spremembo vrednosti adicijske konstante tudi v primeru:

- kratke časovne fazne neenakosti med moduliranim merskim signalom in referenčnim signalom,
- vplivov fazne nehomogenosti v odvisnosti od razdalje,
- odstopanja v modelu za korekcijo cikličnih pogreškov.

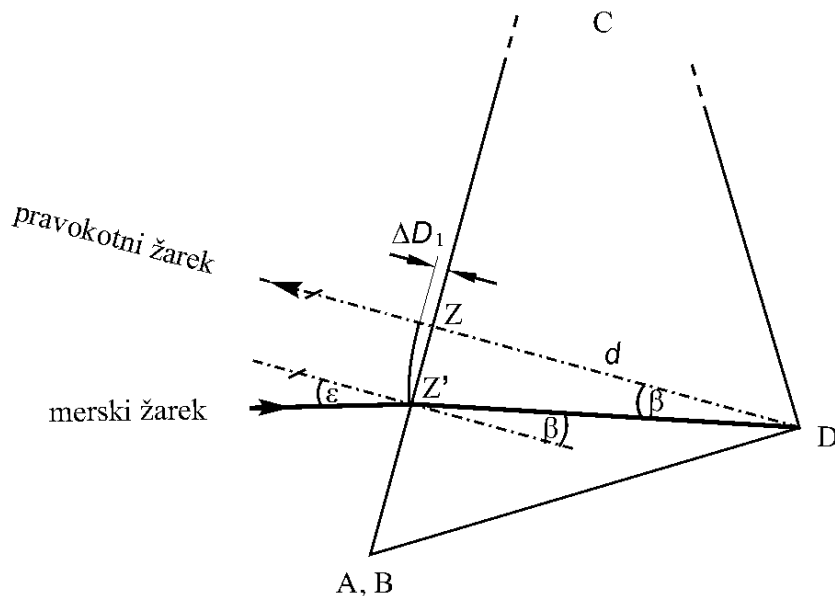
Zaradi teh vzrokov ne moremo adicijske konstante obravnavati kot konstante. Poleg tega, da je odvisna od oddaljenosti, je spremenljiva tudi v času. Končno vrednost dolžinskega popravka zato v splošnem izračunamo glede na velikost merjene dolžine. Govorimo o popravku ničelne točke.

### 3.2.3 Pogrešek orientacije prizme

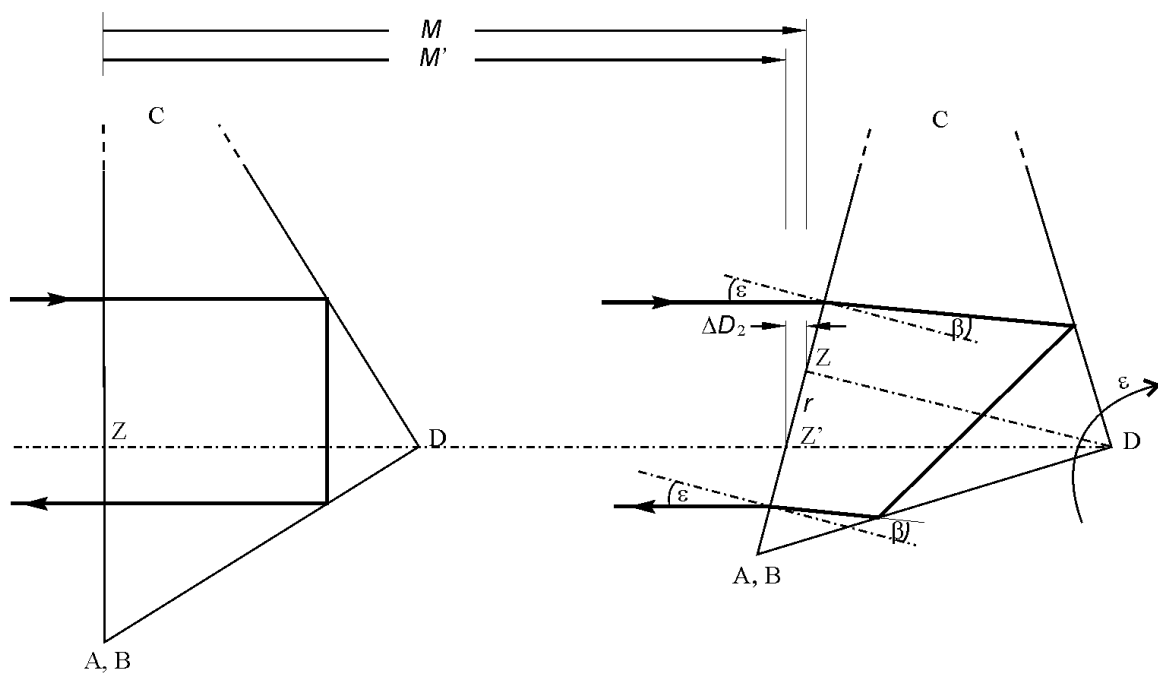
Pogrešek orientacije prizme je značilen za vse vrste elektronskih razdaljemerov pri merjenju dolžin s pomočjo pasivnih reflektorjev. Pogrešek ni velik, vendar ga pri natančnejših meritvah moramo upoštevati. To storimo tako, da prizmo čimbolj natančno orientiramo ali pa računsko upoštevamo pogrešek, sestavljen iz dveh delov, ki sta nasprotnega predznaka.

Pot žarka skozi prizmo je najkrajša, če žarek pade pravokotno na čelno ploskev. Prvi del pogreška nastane, če pade žarek na prizmo pod kotom  $\varepsilon$ , kar pomeni, da se kot ustrezno podaljša. Podaljšek poti je geometrična pot.

Drugi del pogreška pa nastane izven prizme. Če prizma ni točno orientirana proti razdaljemeru, žarek ne poteka skozi njo simetrično.



SLIKA 4: Podaljšanje optične poti žarka skozi prizmo



SLIKA 5: Nesimetrični prehod žarka skozi prizmo

### 3.2.4 Ločljivost

Pod pojmom ločljivost razumemo zmožnost instrumenta, da dve med seboj zelo podobni vrednosti spozna za različni. Ločljivost obravnavamo ločeno za fazne in impulzne razdaljemere.

Pri faznih zaradi oslabitve jakosti signala in motenj pri prehodu skozi atmosfero ločljivost instrumenta ni odvisna le od natančnosti merskega sistema za merjenje faze, ampak tudi od stanja atmosfere ter velikosti merjene dolžine. Pri elektrooptičnih razdaljemerih kratkega dosega lahko pri optimalnih pogojih pričakujemo ločljivost velikosti  $10^{-4}U$ , kar pri sodobnih razdaljemerih, kjer je  $U = 10$  m, pomeni ločljivost do  $\pm 1$  mm.

Pri impulznih je natančnost meritev odvisna od natančnosti določitve osnovne časovne enote  $T$  – takta, oziroma predvsem od ločljivosti merjenja časa  $\Delta t$ .

Z merjenjem časovnega intervala pa je povezan problem oblike in določitve prednjega roba svetlobnega impulza:

- nastane s kratkočasovnim svetlobnim impulzom, ki traja nekaj nanosekund.
- Prednji rob, ki naj bi bil pravilne oblike, se deformira zaradi podobnih vplivov, ki pri faznem načinu povzročijo nehomogenost faze (vpliv izvora svetlobe, vpliv atmosfere...).
- Deformacijo impulza je potrebno odpraviti s primernimi metodami elektronskih meritev.

Pri FEN 2000 je to doseženo tako, da instrument na poseben način določi časovno sredino svetlobnega impulza. Pri instrumentu Leica Wild Di 3000 je določitev časovnega trenutka prav tako neodvisna od amplitude svetlobnega impulza.

Standardni odklon merske vrednosti, to je vrednosti, prikazane na zaslonu, ki je aritmetična sredina velikega števila meritev, približno 1000 pri Leica Wild Di 3000, leži pod  $\pm 2$  mm.

### 3.2.5 Specifični pogoški pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorjev

Pri elektronskih razdaljemerih, vgrajenih v tahimetre, pri načinu merjenja dolžin brez uporabe reflektorjev, položaj končne točke ni več enolično določljiv. S tem, ko v funkcionalnem modelu za izračun koordinat detaljnih točk uporabimo polarna elementa izmere – kot in dolžino, moramo poznati osnovne principe zgradbe in delovanja instrumenta. Poleg poznanih pogojev, ki se nanašajo na kotna merjenja, moramo primerljive pogoje upoštevati tudi pri dolžinskih meritvah. Med meritvijo pride zaradi tehnologije in principa delovanja do odstopanj od idealne geometrične konstrukcije instrumenta. Ta odstopanja so izvor geometričnih napak, ki jih moramo določiti in izločiti.

#### 3.2.5.1 Konstrukcija razdaljemera in kombinacija z elektronskim teodolitom

Pri vplivu napak moramo razlikovati med:

- paralakso: pri merjenju dolžin brez reflektorjev je določitev odhodnega in povratnega signala dosežena z biaksialno optiko. V primerjavi z koaksialnim sistemom se lahko pri tej izvedbi leč objektivna poveča občutljivost. Ločitev oddajne in sprejemne optike pa ima tudi pomankljivost, saj z oddaljenostjo optičnih osi žarka v skupni točki cilja nista vzporedna, ampak tvorita majhen kot - paralakso. Napaka dolžine zaradi paralakse je direktna posledica biaksialne optike in ni v povezavi s postopkom merjenja dolžin.
- ekscentriciteto: v splošnem z ekscentriciteto opisujemo paralelni zamik osi glede na definirani pravilni položaj. Z ločitvijo oddajnega in sprejemnega žarka so pri konstrukcijskih rešitvah za elektronske tahimetre nujne kompromisne rešitve. Najmanj ena optična os razdaljemera mora biti glede na vizurno os teodolita določena ekscentrično. Zato je potrebna korekcija merjene dolžine na osnovi ekscentricitet z redukcijo optične osi razdaljemera na optično os teodolita.

Za opis sistematičnih napak dolžin, ki so posledica konstrukcije instrumenta, moramo definirati osnovne osi instrumenta, na osnovi katerih računamo geometrične popravke.

- Oddajna os je os oddajne optike razdaljamera.
- Optična os razdaljamera teče vzporedno z oddajno osjo in če ni instrumentalnih napak, seka stojiščno os. Služi kot geometrična osnova za merjenje dolžin.
- Optična os ciljne točke (vizurna os) je definirana kot osnova pri merjenju kotov. Definirana je z optičnim centrom optike objektivna daljnogleda ter presečiščem nitnega križa.
- Modelna os ciljne točke je pravokotna na horizontalno vrtilno os daljnogleda in teče skozi presečišče horizontalne in vertikalne stojiščne osi instrumenta. Služi kot osnovna os pri polarni izmeri.

Optična os razdaljamera in os oddajne optike se definirata glede na način izvedbe razdaljamera (integriran, sestavljen...). V idealnem primeru bi vse štiri osi sovpadale. Vendar pa bi se kljub temu zaradi nepopolnosti instrumenta pojavljala odstopanja, ki jih je potrebno odpraviti.

Glede na položaj osi ločimo štiri primere:

- Paralaktični premik definirane karakteristične ciljne točke glede na os razdaljamera, ki je neposredno posledica paralakse.
- Vertikalna ekscentriciteta osi razdaljamera glede na horizontalno vrtilno os razdaljamera.
- Napaka osi oddajne optike se pojavi, kadar os oddajne optike in os razdaljamera v horizontu nista vzporedni modelni osi, ampak z njo oklepata majhen kot.
- V vertikalnem smislu je neparalelnost osi razdaljamera in modelne osi določena kot napaka nagiba oddajne osi.

Najenostavneje prikažemo vpliv napak na končno mersko vrednost s predpostavko, da ciljna točka leži na ravni površini, ki pa lahko leži pod različnim kotom glede na osi.

Pri tahimetrih z razdaljemerom, ki omogočajo merjenje dolžin brez uporabe reflektorjev, ločimo štiri konstrukcijske principe, ki se razlikujejo glede na izvedbo posameznih osi. Opisali bomo princip, ki se nanaša na instrument Leica DIOR.

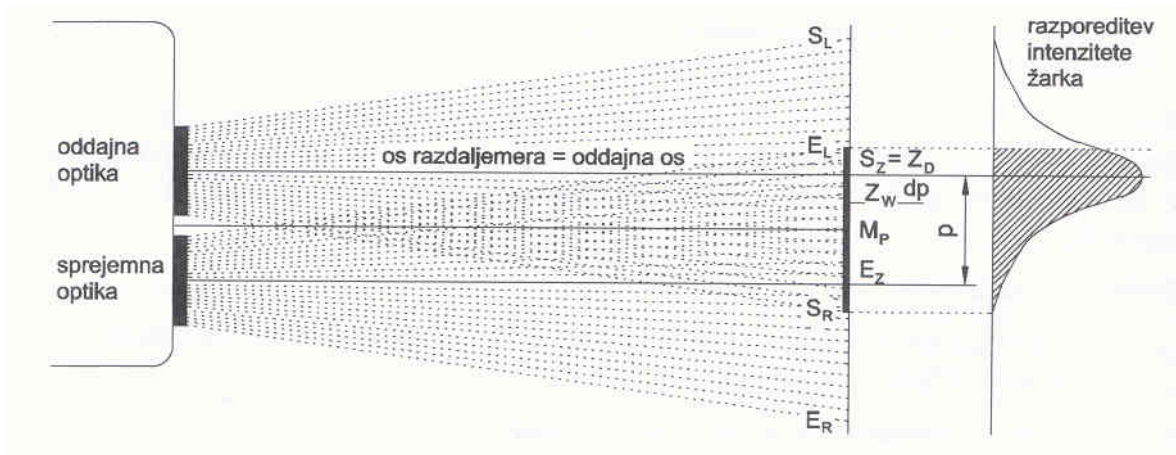
Leče za merjenje dolžin ležijo horizontalno druga poleg druge in simetrično na stojiščno os. Razdaljemer je natakljiv na daljnogled. Merjenje je mogoče le v prvi krožni legi, zato je os razdaljemera vedno nad vizurno osjo daljnogleda. Za os razdaljemera je določena vertikalna ekscentriciteta glede na vizurno os. Zaradi paralakse se pojavi horizontalni premik glede na oddajno optiko. Pomembna je vzporednost osi razdaljemera in kolimacijske osi teodolita, tako v horizontalnem kot v vertikalnem smislu.

### 3.2.5.2 Paralaktični premik zaradi biaksialne optike

Oddajna in sprejemna optika sta pri biaksialni optiki zamaknjeni, zato sta zamaknjeni tudi zorni polji obeh optik. Svetlobni žarek pade na pravokotno ploskev. Njegovo širino označimo s krajnima točkama  $S_L$  in  $S_R$ . Žarek pade na sprejemno optiko pod določenim kotom. Na površini ciljne točke je širina zornega polja opisana s točkama  $E_L$  in  $S_R$ . Ta asimetričnost uporabe odbitega žarka ni bistvena pri merjenju dolžin, če je osvetlitev merskega žarka v prečnem preseku enakomerna. Ker pa se običajno intenziteta svetlobe na oddajni diodi z oddaljenostjo od centra manjša (Gaussova krivulja), ni mogoče na ciljni površini jasno določiti efektivne točke cilja.

Če hočemo določiti paralaktični premik, moramo določiti dve različni ciljni točki. Ti dve točki v idealnem primeru sovpadata, v splošnem pa sta zamaknjeni za paralaktični premik  $dp$ . To sta:

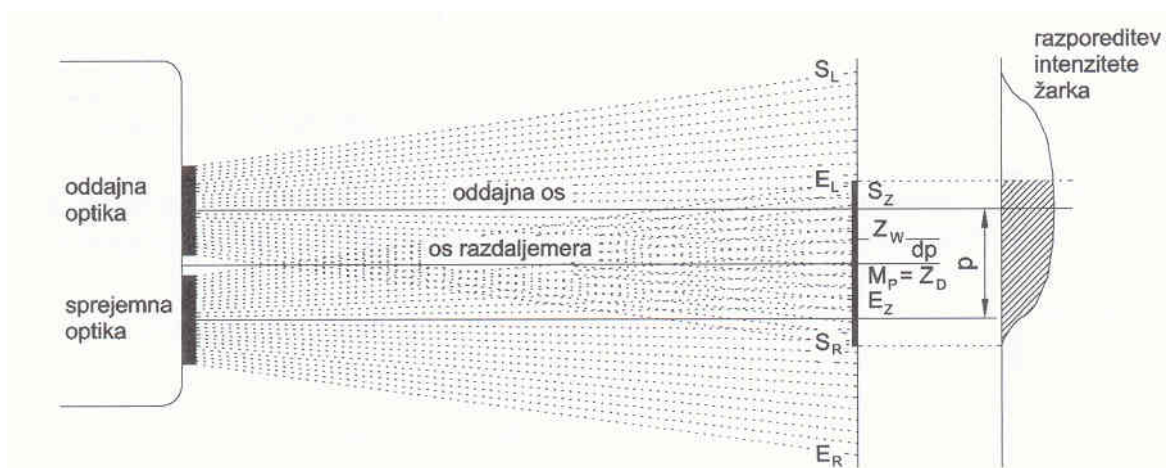
- geometrična ciljna točka  $Z_D$ , ki predstavlja prehodno točko geometrično definirane osi razdaljemera ter ciljne ploskve,
- efektivna ciljna točka  $Z_W$ , ki je dejanska osnovna točka za merjenje dolžine na ciljni ploskvi.



SLIKA 6: Primer, ko os razdaljemera poteka koaksialno glede na optično os oddaljene enote

Položaj efektivne ciljne točke  $Z_W$  niha v območju med točkama  $S_Z$  in  $M_P$ . Nihanje je odvisno od funkcije porazdelitve intenzitete svetlobnega žarka na oddajni optiki. Zato točka  $Z_W$  leži na ciljni površini med osjo oddajne optike razdaljemera in srednje vzporednice, katere položaj je določen z divergenco svetlobnega žarka in premerom leč oddajne in sprejemne optike razdaljemera.

Čim višji je vrh krivulje intenzitete žarka, tembolj blizu osi oddajne optike je efektivna točka cilja (slika 6) in obratno (slika 7), ko je efektivna točka bliže srednji vzporednici.



SLIKA 7: Primer, ko os razdaljemera sovpada s srednjo vzporedno osjo

Točki  $S_Z$  in  $M_P$  poleg nihanja položaja efektivne točke na ciljni ploskvi določata tudi alternativna položaja ciljne točke  $Z_D$  in položaja osi razdaljemera:

- os razdaljemera poteka koaksialno glede na optično os oddajne enote (slika 6),
- os razdaljemera sovpada s srednjo vzporedno osjo (slika 7).

Položaj osi razdaljemera naj bo izbran tako, da bo paralaktični premik  $dp$ , ki predstavlja oddaljenost geometrične ciljne točke  $Z_D$  od efektivne  $Z_W$ , pravokotno na os razdaljemera, kar se da majhen.

$$dp = f(p, g(J), s, O_S, O_E, \varepsilon_S, \varepsilon_E)$$

Paralelni premik je odvisen od oddaljenosti  $p$  med obema optičnima osema, funkcije porazdelitve intenzitete signala  $g(J)$  na oddajni diodi, merjene dolžine  $s$ , premera objektivov oddajne in sprejemne optike  $O_S$  in  $O_E$ , divergence svetlobnega žarka  $\varepsilon_S$  in  $\varepsilon_E$  na oddajni in sprejemni enoti.

Položaj efektivne ciljne točke in s tem velikost paralaktičnega premika je najbolj odvisen od poteka krivulje porazdelitve intenzitete svetlobe oddajne diode. Tako je mogoče na osnovi poznavanja intenzitete porazdelitve izbrati položaj geometrične ciljne točke in s tem zmanjšati paralaktični premik  $dp$  na minimum:

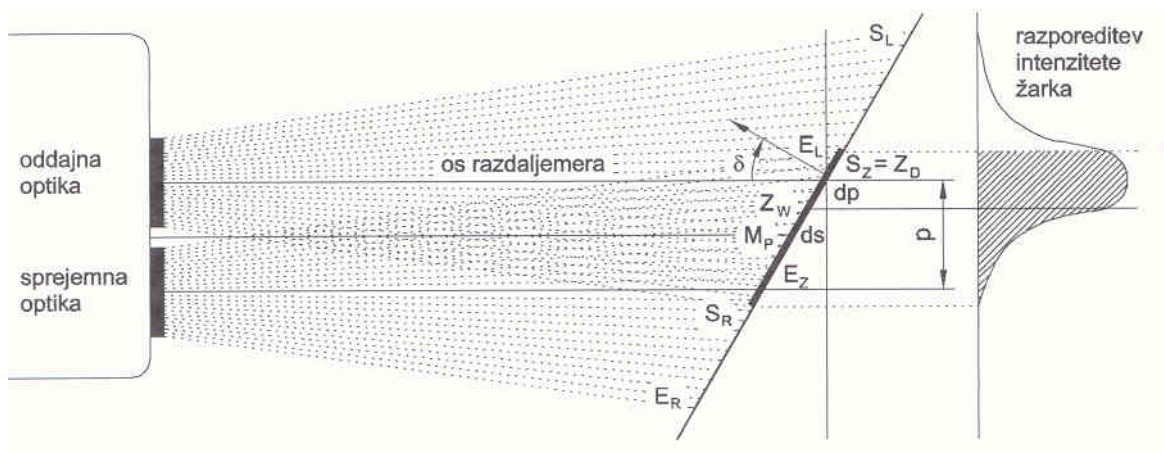
- v prvem primeru pri strmi krivulji naj bo geometrična ciljna točka poravnana s  $S_Z$ ,
- v drugem primeru pri položni krivulji pa z  $M_P$ .

### 3.2.5.3 Vpliv paralaktičnega premika na merjeno dolžino

Kadar je žarek pravokoten na površino objekta, do katerega merimo dolžino, paralaktični premik ciljne točke nima nikakršnega vpliva na rezultat merjene dolžine. Če pa žarek pade na objekt pod kotom, se pojavi sistematična napaka, ki je odvisna od kota nagiba in velikosti paralaktičnega premika.

$$ds = dp \times \tan \delta$$





SLIKA 8: Vpliv paralakse pri nagnjeni ciljni ploskvi

Proizvajalci razdaljemerov, ki omogočajo merjenje dolžin brez uporabe reflektorjev priporočajo, da se izogibamociljev, kjer je kot  $\delta$  večji kot 60 gon. Vendar pa se v praksi ne moremo vedno izogniti temu. Za zmanjšanje napake paralakse obstajata dva načina. Prvi način je tak, da se zmanjša oddaljenost  $p$  obeh optičnih osi s premikom leč, druge konstrukcijsko pogojene spremembe pa so povezane s porazdelitvijo svetlobne intenzitete oddajne optike.

## **4 UMERJANJE ELEKTRONSKIH RAZDALJEMEROV**

Kakor vsak merski pribor moramo tudi elektrooptične razdaljemere od časa do časa preizkusiti in umeriti. Za rutinsko delo zadošča preizkus, s katerim se prepričamo, da razdaljemer dosega natančnost, ki jo deklarira proizvajalec. Tak preizkus opravimo najbolje na testni bazi, ki seveda ustreza predhodno zahtevanim pogojem. V primeru, da želimo natančnost razdaljemera potrditi, predvsem za posebne namene s področja inženirske geodezije, ali pa želimo boljši vpogled v pravilno delovanje instrumenta in učinek posameznih pogreškov, so priporočljivi posamezni postopki umerjanja ali kalibriranja razdaljemera. To nam omogoča določitev določenih komponent pogreškov.

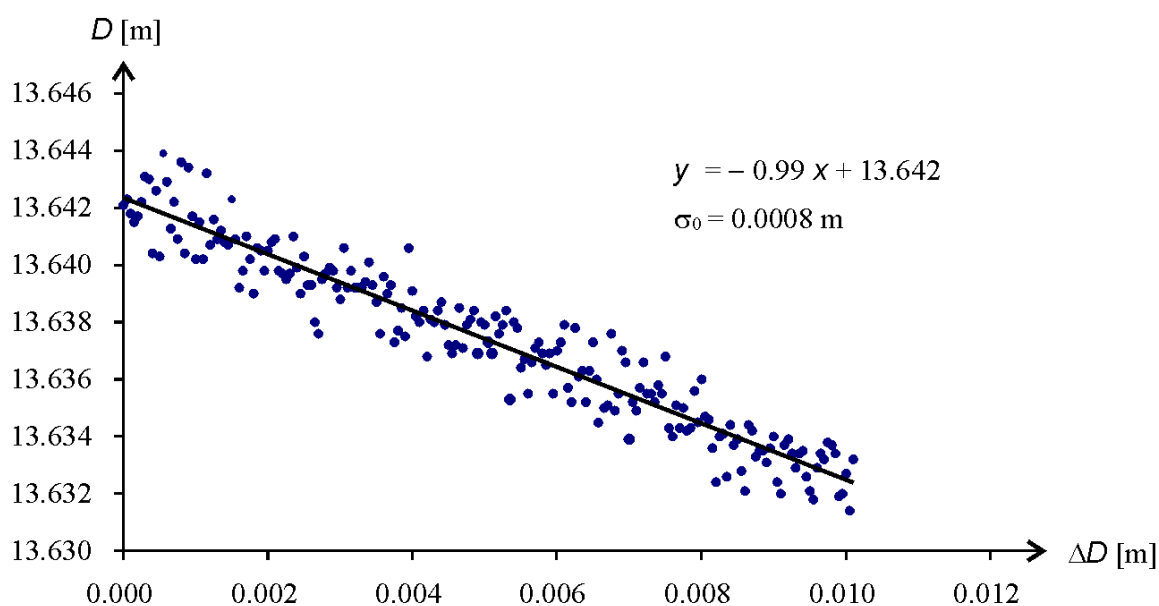
### **4.1 Določitev ločljivosti merskega sistema**

Osnovni princip preizkusa je primerjava pravih vrednosti spremembe dolžine z izmerjenimi vrednostmi instrumenta, ki ga preizkušamo. Da zagotovimo konstantnost meteoroloških pogojev, običajno v laboratoriju merimo dolžino optimalne velikosti. Velikost dolžine spreminjamo za znano vrednost in to spremembo izmerimo z razdaljemerom. Osnovni korak spremembe naj bo največ polovica ekranske ločljivosti instrumenta. Mikrometrške spremembe dolžine lahko zagotovimo s posebnimi mikrometrskimi ploščami, na katere je postavljen reflektor in omogočajo premik reflektorja v smeri dolžine ali pa meritve izvajamo na merski mizi in je velikost spremembe določena z interferometrom.

V intervalu premika reflektorja primerjamo pravo vrednost premika reflektorja z merjeno vrednostjo, ki jo izmerimo z razdaljemerom. Število primerjav naj bo optimalno, običajno od 50 do 100. Na osnovi odstopanj od izravnalne premice je mogoče statistično določiti ločljivost instrumenta. V splošnem se pojavljata dva primera.

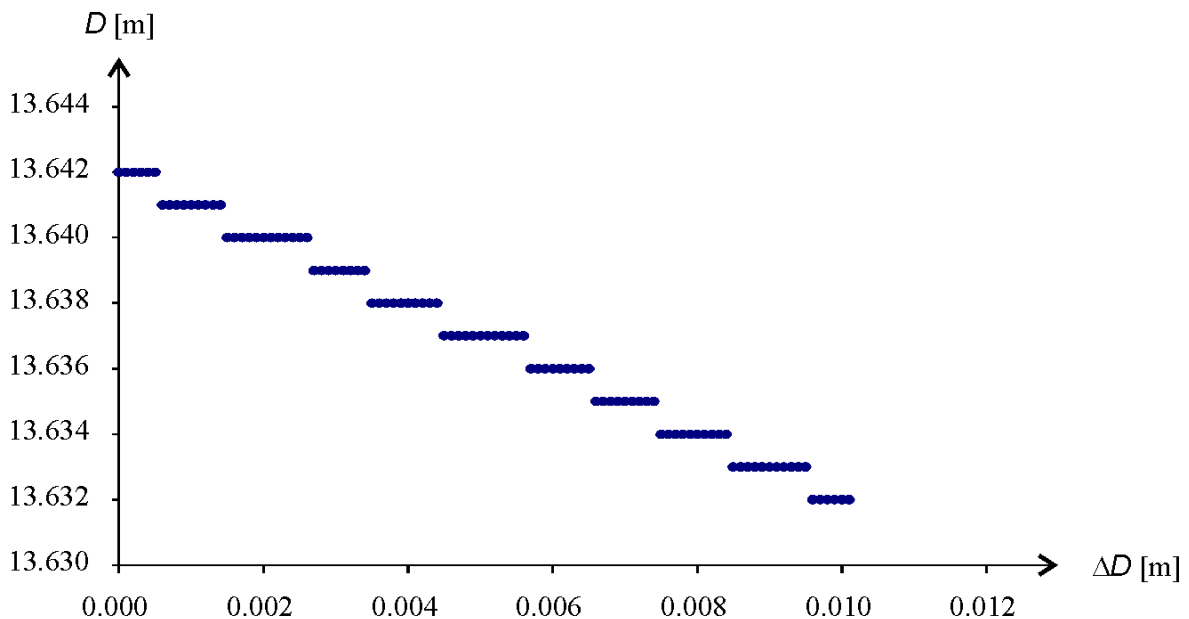
- V prvem primeru je merska ločljivost manjša od ekranske ločljivosti instrumenta. Popravki kažejo slučajni značaj – razporeditev glede na izravnalno premico je slučajna. Standardni odklon, ocenjen iz rezultatov izravnave, definira podatek o ločljivosti instrumenta. Izračunamo ga po enačbi:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{[vv]}{n-2}}$$



GRAF 2 : Primer praktičnih meritev in izračuna ločljivosti (Leica Wild DIOR 3002) – ločljivost instrumenta na osnovi preizkusa je 0.8 mm, ekranska ločljivost je 0.1 mm

- V primeru, da je natančnost merjenja občutno večja od ekranske ločljivosti instrumenta, bi popravki kazali sistematični značaj, kar bi bilo razvidno iz stopničaste oblike grafa. Tedaj bi bilo mogoče oceniti ločljivost instrumenta s preračunom elementov stopničaste funkcije in izračunom popravkov glede na tako definirano funkcijo. Teoretična oblika grafa stopničaste funkcije je definirana z ekransko ločljivostjo. Ob ekranski ločljivosti na primer 1mm bo dolžina in višina stopnice 1mm.



GRAF 3 : Primer instrumenta z ekransko ločljivostjo manjšo od merske ločljivosti

Obstaja pa še ena možnost določitve podatka o ločljivosti. Temelji na enačbi ocene natančnosti na osnovi razlik dvojnih merjenj dolžin, kjer je  $d$  razlika merjene dolžine v obeh smereh.

$$c = \sqrt{\frac{[dd]}{2n}}$$

V tem primeru moramo opraviti terenske meritve. Merimo dolžine med točkami v obeh smereh na različnih oddaljenostih, običajno od 20 do 1000 m. Pri preračunu dolžin je potrebno upoštevati vse sistematične vplive in povsem izločiti šume.

## 4.2 Določitev adicijske konstante

Zaradi različnih vzrokov je popravek ničelne točke  $k_a$  v splošnem od merjene dolžine odvisna količina. Zapišemo jo lahko kot :

$$k_a = k_0 + \Delta k_a$$

$k_a$ ..... skupni popravek ničelne točke

$k_0$ ..... popravek ničelne točke pri  $D = 0$  m

$\Delta k_a$ ..... dolžinsko v splošnem nelinearno odvisni popravek.

$k_0$  in  $\Delta k_a$  sta odvisna drug od drugega. Velikosti izračunanega konstantnega dela in od dolžine odvisnega dela sta lahko za isti instrument v istem trenutku različni, odvisno tudi ali predvsem od metode preizkusa instrumenta oziroma postopka meritev in izračuna, na primer  $k_0$  in  $\Delta k_a$  kot polinom,  $k'_0$  in  $\Delta k'_a$  kot premica.

Adicijsko konstanto lahko določamo na več načinov:

- z znanimi dolžinami,
- brez znanih dolžin.

#### 4.2.1 Določitev z znanimi dolžinami

S primerjavo merjenih in znanih vrednosti dolžine na kalibracijski bazi. Primerjavo moramo delati na celem merskem območju razdaljemera.

Merjene dolžine  $D'_i$  je smiselno najprej ločeno popraviti za ciklični pogrešek faze  $k_F$ .

$$\Delta D_i = D_i - D'_i$$

Za računsko izravnavo je primeren na primer polinomski model. Popravek opišemo s polinomom izbrane stopnje, torej :

$$\Delta D \cong k_a = a_0 + a_1 D + a_2 D^2 + a_3 D^3 + \dots$$

Popravek ničelne točke je opisan s polinomom 3. stopnje, ki ima obliko :

$$k_a = 0.0030 + 5.07 \cdot 10^{-5} D' + 2.5 \cdot 10^{-7} D'^2 + 4.6 \cdot 10^{-10} D'^3$$

Pogosto uporabljamo namesto polinoma poenostavljeni linearni funkcijski model, v literaturi imenovan *skupna določitev adicijske in multiplikacijske konstante*.

$$k_a = a_0 + a_1 D'$$

Linearne enačbe popravkov v funkcionalnem modelu posredne izravnave so običajno enako utežene in imajo obliko :

$$v_i = a_0 + a_1 D'_i - \Delta D_i, \text{ kjer je } i = 1, \dots, n$$

Parametra izravnalne premice izračunamo:

$$a_0 = \frac{[D' D'] [\Delta D] - [D'] [D' \Delta D]}{n [D' D'] - [D']^2}$$

$$a_1 = \frac{-[D'] [\Delta D] + n [D' \Delta D]}{n [D' D'] - [D']^2}$$

Odsek na ordinatni osi  $a_0$  pri nelinearnem modelu  $k_a$  ni enak iskani vrednosti  $k_0$ , ampak sovпада s presečiščem izravnalne premice z ordinatno osjo  $k'_0$ . Koefficient  $a_1$  predstavlja tangens naklonskega kota izravnalne premice oziroma faktor merila

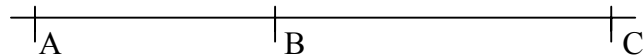
$$a_0 = k'_0$$

$$a_1 D' = \Delta k'_a$$

$$k'_a = k'_0 + \Delta k'_a$$

#### 4.2.2 Določitev brez znanih dožin

Z merjenjem nepoznane dolžine in posameznih delov te dolžine v vseh kombinacijah. Pri tej določitvi ni potrebno poznati nobene precizno določene dolžine, imeti pa moramo najmanj tri točke v liniji.



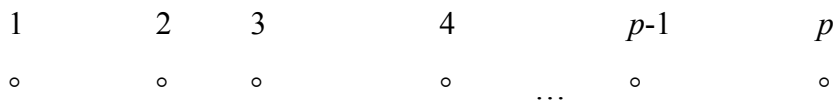
Določitev točk naj se izvaja s pomočjo prisilnega centriranja. Obojestransko izmerimo vse tri dolžine. Te so obremenjene s pogreškom adicijske konstante, kar upoštevamo v enačbi :

$$\overline{AB'} + k_a + \overline{BC'} + k_a = \overline{AC'} + k_a$$

Ko enačbo uredimo, dobimo izraz za adicijsko konstanto :

$$k_a = \overline{AC'} - \overline{AB'} - \overline{BC'}$$

Postopek meritev in izračuna je preprost. Bolj natančne rezultate pa dobimo, če povečamo število točk v liniji, merimo dolžine obojestransko, v izračunu pa upoštevamo aritmetične sredine.



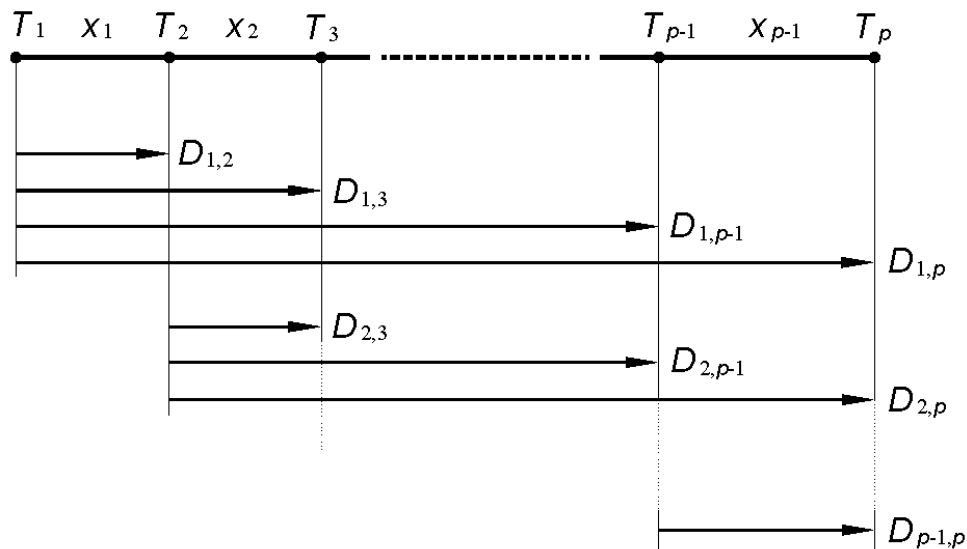
Govorimo o merjenju dolžin v vseh kombinacijah med točkami v liniji.

$p$ ..... število točk v liniji

$t = p-1$  ..... število delnih linij

$n = \binom{p}{2} = \frac{p(p-1)}{2}$  ..... število merjenih dolžin

$$k_a = \frac{6}{t(t^2 - 1)} \sum_{j=1}^t \sum_{i=1}^{t-j+1} (2i - t - 1) \cdot D_{0,5(-j^2 + (2t+3)j) + i - t - 1}$$



SLIKA 9: Meritev v vseh kombinacijah

### 4.3 Določitev multiplikacijske konstante

#### 4.3.1 Določitev velikosti časovne enote z merjenjem frekvence

Merilo dolžin faznega razdaljemera je določeno z modulacijsko frekvenco  $f_M$  finega merila, merilo dolžin impulznega razdaljemera pa z velikostjo časovne enote oz. takta. V obeh primerih lahko govorimo o velikosti merske frekvence, ki jo generira frekvenčni oscilator. V primeru, da želimo določiti samo dolžinsko merilo, je najbolj smiselno, da ga določimo na osnovi merjenja merske frekvence. Za meritve merske frekvence uporabljamo temperaturno stabiliziran in kalibriran elektronski števec frekvenc (*frekvenčni merilnik*).

Dolžina  $D$  bo prava vrednost le, če velja da sta *nominalna merska frekvenca*  $f_0$  in *dejanska merska frekvenca*  $f_M$  enaki, torej, če velja enakost  $f_M = f_0$ .



Multiplikacijska konstanta razdaljemera (ali konstanta merila razdaljemera)  $k_M$  bo:

$$k_M = 1 + \Delta k_M = 1 + \frac{f_0 - f_M}{f_M} = \frac{f_0}{f_M}.$$

Konstanta  $k_M$  je torej kvocient nominalne in dejanske modulacijske frekvence (fazni in impulzni ER) in opisuje merilo razdaljemera. Določimo jo torej lahko s preizkušanjem frekvenc. Merjene dolžine  $D_a$  popravimo za  $\Delta D$  zaradi popravka merila  $\Delta k_M$  enostavno:

$$\Delta D = D_a \cdot \Delta k_M \quad \text{in je} \quad D = D_a + \Delta D \quad \text{ali enostavneje} \quad D = D_a \cdot k_M$$

#### 4.3.2 Določitev na osnovi geodetskih meritev

Merilo razdaljemera, običajno določeno z merjenjem merske frekvence, lahko praktično določimo tudi na osnovi geodetskih meritev na komparatorski bazi. Ob predhodnem upoštevanju adicijske konstante in cikličnega popravka za popravljene dolžine  $D'$  lahko zapišemo:

$$D = D' \cdot k_M$$

Primerjamo torej dane dolžine z merjenimi. Večje število primerjav nam nudi možnost izravnave. Najverjetnejšo vrednost »multiplikacijske« konstante dobimo po enačbi:

$$k_M = \frac{[D]}{[D']}.$$

Določanje merila razdaljemera na osnovi meritev na komparatorski bazi je v praksi največkrat dopolnilo meritvam merske frekvence. S tem kontroliramo delovanje celotnega sistema razdaljemera.

## 5 OSNOVNE REDUKCIJE DOLŽIN MERJENIH Z ELEKTRONSKIMI RAZDALJEMERI

Vrednost merjene dolžine, ki jo prikaže elektronski razdaljemer, v splošnem ni direktno uporabna za nadaljnja računanja koordinat. Na terenu izmerimo dolžino med izbranimi točkama. Ta dolžina je največkrat poševna, zaradi meteoroloških vplivov tudi ukrivljena. Ker je dolžina merjena na neki nadmorski višini, še ni uporabna za računanje na izbrani skupni ploskvi. Merjeno dolžino moramo zato reducirati, kar pomeni, da jo popravimo za izračunano vrednost. Poznamo tri skupine popravkov dolžin :

- meteorološki popravki,
- geometrični popravki,
- projekcijski popravki.

### 5.1 Meteorološki popravki

Ti popravki so nujno potrebni in jih moramo upoštevati pri vsaki meritvi, ne glede na uporabo izmerjene dolžine.

Pri elektronsko merjeni dolžini  $D'$  ima valovna dolžina  $\lambda$  neko nominalno vrednost. Ta se nanaša na referenčni lomni količnik in s tem na točno določeno (referenčno) hitrost razširjanja elektromagnetnega valovanja.

$$\lambda = \frac{c_0}{n_0 f} \Rightarrow n_0 = \frac{c_0}{\lambda f}$$

Referenčni lomni količnik se nanaša na izbrane pogoje v atmosferi.

$$n_0 = n(\lambda, t_0, p_0, e_0)$$

Tako se tudi dolžina, ki jo prikaže instrument, nanaša na referenčni lomni količnik, ki je v splošnem različen za različne tipe instrumentov.

Mi pa merimo dolžino pri dejanskih pogojih v atmosferi in zato moramo upoštevati dejanski lomni količnik  $n$ . Ta se razlikuje od referenčnega in ga izračunamo na osnovi izmerjenih meteoroloških parametrov.

$$n_D = n(\lambda, t, p, e)$$

Optična pot je za referenčne in dejanske pogoje enaka. Zato za dejansko dolžino veljajo naslednje enačbe :

$$D' n_D = D_0 n_0 \Rightarrow D' = D_0 \frac{n_0}{n_D}$$

Relativna sprememba dolžine se preoblikuje z atmosfersko korekcijo  $k_n$  kot popravek merjene dolžine :

$$D' = D_0 + k_n \Rightarrow k_n = D' - D_0 = D_0 \left( \frac{n_0 - n_D}{n_D} \right)$$

Če je  $n_D \approx 1$ , sledi :  $k_n = D_0(n_0 - n_D)$ .  $k_n$  imenujemo prvi popravek hitrosti in pomeni relativno spremembo dolžine na kilometer. Pogosto ga imenujemo tudi *ppm* popravek.

## 5.2 Geometrični popravki

Geometrične popravke lahko obravnavamo na dva načina :

- Geometrični popravki pomenijo razliko med prostorsko krivuljo  $D$ , ki je definirana z refrakcijsko krivuljo, in sfernim lokom na referenčni ravnini. Popravki pomenijo upoštevanje ukrivljenosti refrakcijske krivulje, horizontalnih in vertikalnih ekscentricitet razdaljemera in reflektorja, horizontalne dolžine na referenčni nivo, naklonske in višinske redukcije ter na osnovi dolžine tetive izračun krožnega loka.
- Geometrični popravki pomenijo razliko med prostorsko krivuljo  $D$ , ki je definirana z refrakcijsko krivuljo, in premo poševno dolžino na nivoju točk, to je dolžino kamen - kamen. Popravki pomenijo upoštevanje ukrivljenosti refrakcijske krivulje ter horizontalnih in vertikalnih ekscentricitet razdaljemera in reflektorja.

V prvem primeru je z izračunom redukcij povezana oblika referenčne ploskve. Potrebujemo tudi podatke o merjenih zenitnih razdaljah in podatke o elipsoidnih višinah. V drugem primeru pa potrebujemo približne vrednosti višin oz. zenitnih razdalj. Zato tudi zahteva dodatno merjene količine.

### 5.2.1 Izračun poševne dolžine med točkama na nivoju terena

Izračun se nanaša na dolge dolžine oziroma na vse dolžine, ki jih merimo tako, da instrument in reflektor postavimo na stativ. V splošnem imata različni višini. Poznamo dva primera izračuna :

a) Primer, ko je podana višinska razlika med točkama :

Dano :

$S_r$ ..... izmerjena in na poševno tetivo na nivoju stativov reducirana dolžina

$i$ ..... višina instrumenta

$l$ ..... višina reflektorja

$H_A$ ..... nadmorska višina točke stojišča instrumenta

$H_B$ ..... nadmorska višina točke stojišča reflektorja

Iščemo :

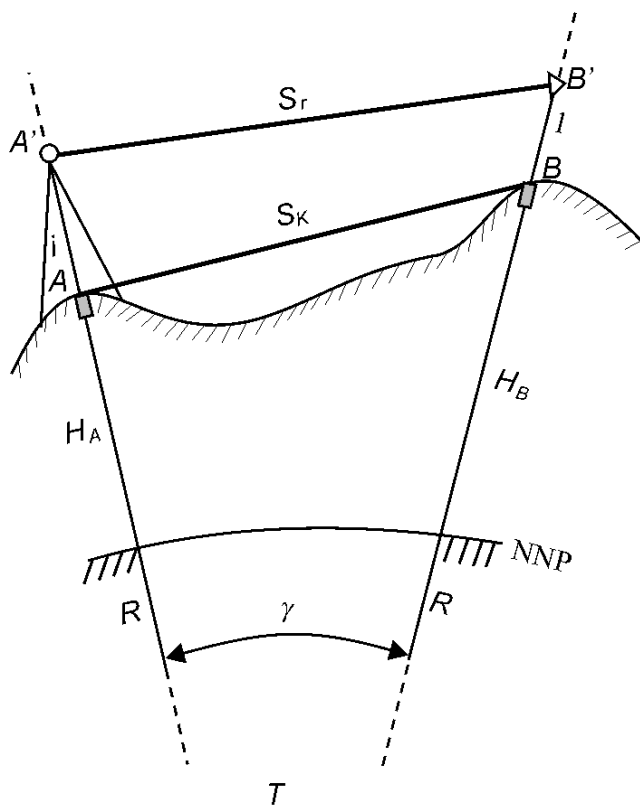
$S_B$ ..... poševna dolžina na nivoju točk na terenu (dolžina kamen – kamen)

Enačba popravkov dolžine je :

$$\Delta S = \frac{(i-l)(H_B - H_A)}{S_r} - \frac{l^2}{2S_r} - \frac{(i+l)}{2R} S_r$$

Vrednost dolžine kamen – kamen pa :

$$S_B = S_r + \Delta S$$

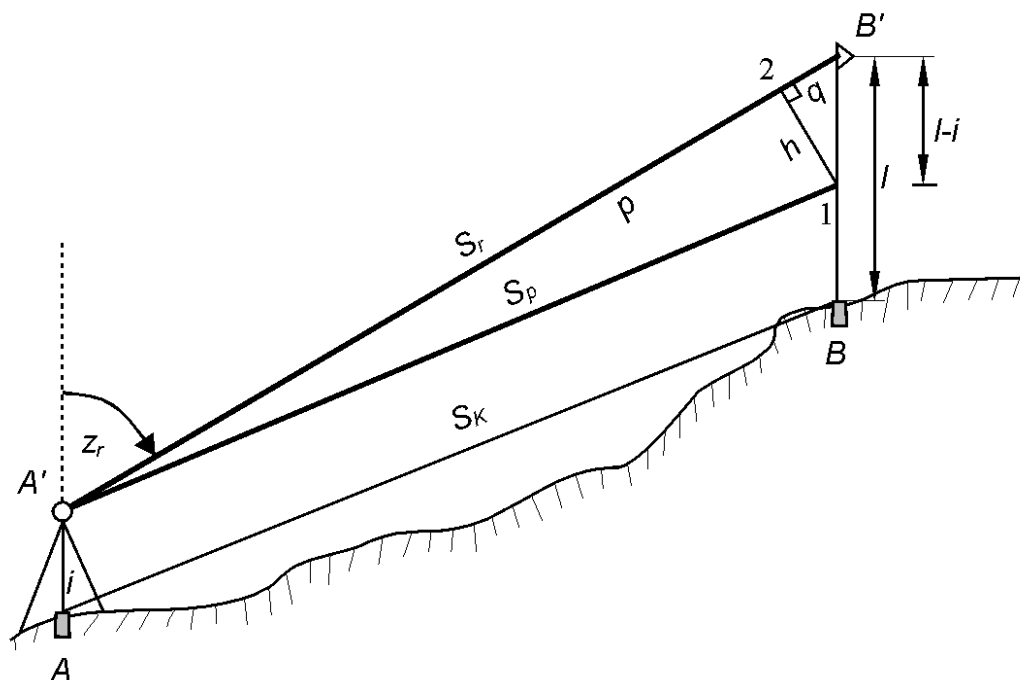


SLIKA 10: Kamen – kamen redukcija

b) Primer, ko je merjena zenitna razdalja med točkama :

Merjena zenitna razdalja na stojišču instrumenta  $z_A$  sovpada z nagibom svetlobnega žarka razdaljemera.

$$S_p = S_r + (l - i) \cdot \cos z_A - \frac{((i - l) \cdot \sin z_A)^2}{2S_r} = S_r + \Delta$$



SLIKA 11: Izračun dolžine na nivoju točk ob merjeni zenitni razdalji

### 5.3 Projekcijski popravki

Ti popravki so neodvisni od metode merjenja dolžin.

Po opravljenih meritvah za nadaljnji izračun potrebujemo horizontalne dolžine, zato najprej poševno dolžino horizontiramo. Nato moramo izvesti redukcijo dolžine na ničelni nivo. Ta redukcija je potrebna, kadar so meritve širšega obsega, mi pa jih želimo vklopiti v državni sistem. Lokalne ali državne mreže so definirane na določeni nivojski ploskvi. Če hočemo uporabljati izmerjene dolžine za izračun koordinat točk, jih moramo reducirati na izbrano nivojsko ploskev mreže. Običajno je to ničelna nivojska ploskev. Meritve dolžin povežemo z danimi geodetskimi točkami državne mreže.

## **6 MERJENJE DOLŽIN Z ELEKTRONSKIMI RAZDALJEMERI BREZ UPORABE REFLEKTORJEV**

Za naloge, kot so določevanje položaja težko dostopnih točk naravnih objektov, snemanje profilov v tunelih in jaških, merjenje nevarnih objektov in podobno, so najprimernejši razdaljemerji, ki omogočajo merjenje dolžin brez uporabe reflektorjev.

Prvotno so takšne meritve omogočali samo impulzni razdaljemerji, danes pa je to možno tudi s faznimi. Pri teh meritvah se svetlobni žarek odbije od naravne ali umetne površine, v kritičnih primerih pa lahko uporabimo posebno odbojno folijo.

Razdaljemere, ki omogočajo tovrstne meritve, delimo na prave geodetske razdaljemere in na ročne elektronske razdaljemere.

Prvi so običajno samostojni instrumenti, ki jih lahko uporabljamo tudi v kombinaciji s teodolitom ali pa so integralni del elektronskih tahimetrov. Ti instrumenti omogočajo tudi običajno merjenje dolžin z uporabo reflektorjev, kar bistveno poveča tako doseg kot natančnost.

Druga skupina, ročni razdaljemerji, pa so za opravljanje manj natančnih meritev. Pri meritvah jih ponavadi držimo v roki.

V splošnem je natančnost in doseg pri takšnem načinu merjenja odvisen predvsem od vrste materiala, oziroma teksture, ter barve in zasuka ploskve glede na merski žarek. Načeloma je pri gladkih površinah slabši doseg zaradi razpršitve merskega signala, isti problem pa je tudi pri zasuku ploskve. Pri razdaljah večjih od 150m natančnost skokovito pada.

### **6.1 Specifične redukcije pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorjev**

Dolžine brez uporabe reflektorja merimo najpogosteje pri klasični terestrični polarni izmeri. Elementi prostorskega polarnega sistema se morajo nanašati na identično ciljno

točko, katere koordinate določamo. Vrednosti merjene zenitne razdalje in horizontalnega kota se nanašata na vizirno ciljno točko. Če je ciljna točka označena z laserskim žarkom in ta ne sovпада s kolimacijsko osjo, je treba obe merjeni količini reducirati. Podobno je potrebno reducirati tudi merjeno dolžino, vzrok za to pa so ekscentricitete optičnih osi.

Predpostavimo, da so velikosti horizontalnih ekscentricitet zanemarljive, saj se veliko pogosteje pojavljajo vertikalne ekscentricitete  $e$ , katere velikost naj bo v našem primeru znana. V odvisnosti od načina označevanja ciljne točke se vrednost  $e$  nanaša na:

- Ekscentriciteto osi razdaljemera glede na optično os daljnogleda teodolita v primeru, ko je ciljna točka definirana s presečiščem nitnega križa daljnogleda teodolita;
- Ekscentriciteto osi razdaljemera glede na os laserskega žarka v primeru označevanja ciljne točke z laserskim žarkom.

Predpostavimo, da ležijo osi razdaljemera, daljnogleda teodolita in laserskega žarka za signalizacijo (obravnavan je primer z natakljivim razdaljemerom) v isti vertikalni ravnini. Pogoji za korektne meritve je vzporednost vseh treh osi. Predpostavimo, da je odbojna ploskev ravnina. Velikost popravka dolžine je odvisna od velikosti ekscentricitete ter od velikosti in smeri nagiba odbojne ploskve. Izračun geometrične redukcije je mogoč, če je poznan vpadni kot svetlobnega žarka na odbojno ploskev.

Vpadni kot je definiran z:

- Nagibom ploskve  $\beta$ ; kot  $\beta$  je pozitiven, kadar je odbojna ploskev obrnjena navzgor, in negativen, kadar je obrnjena navzdol.
- Nepravokotnostjo ploskve glede na smer optične osi razdaljemera  $\varphi$ .
- Velikostjo zenitne razdalje  $Z_r$ .

Določitev popravka dolžine je zahtevna, ker je treba natančno določiti nagibe odbojnih ploskev, kar pa je v praksi pogosto zelo težko. Upoštevamo nepravokotnost presekov v vertikalni ravnini. Točke  $B_{ER}$ ,  $B_{RP}$ ,  $B_P$ , in  $T'$  ležijo na isti vertikalni kolimacijski ravnini. Rešujemo pravokotni trikotnik  $B_{ER}B_{RP}B_P$ .





točko B in efektivno točko odboja svetlobnega žarka  $B_{ER}$ . Linija seka vertikalo skozi točko  $B_{ER}$  pod kotom  $\beta'$ . Vrednost tega kota lahko izračunamo, če poznamo kot nepravokotnosti  $\varphi$ . Točka T je projekcija točke T' na horizont točk B in  $B_P$ . Definirani so trije pravokotni trikotniki, in sicer dva vertikalna  $B_P B_{ER} T$  in  $B B_{ER} T$  ter horizontalni trikotnik  $B_P B T$ .

Veljajo sledeči odnosi:

$$a = x \cdot \tan\beta \qquad b = x \cdot \tan\beta' \qquad a = b \cdot \cos\varphi$$

V tretji enačbi upoštevamo izraza za stranici  $a$  in  $b$ . Izraz za izračun vrednosti kota  $\beta'$  je :

$$\beta' = \arctan\left(\frac{\tan\beta}{\cos\varphi}\right)$$

Geometrični popravek merjene dolžine bo  $\Delta S_{r\varphi}$ . Na sliki 9 rešujemo pravokotni trikotnik  $B_{ER} B_R B$ . Enačba za izračun popravka je enaka kot v prvem primeru, le da namesto kota  $\beta$  uporabimo  $\beta'$  in je :

$$\Delta S_{r\varphi} = -e \cdot \cot\left[Zr - \arctan\left(\frac{\tan\beta}{\cos\varphi}\right)\right]$$

Pri izračunu geometričnih popravkov smo zavestno spregledali popravke zaradi horizontalnih ekscentricitet optičnih osi. Ekscentricitete so najpogosteje majhne in so zato popravki zanemarljivi. Glede na natančnost teodolita in razdaljemera in glede na uporabljeno metodo meritev je mogoče oceniti natančnost določitve koordinat detaljnih točk, kjer je treba upoštevati tudi napako določitve pravega mesta detaljne točke, ta pa je odvisna predvsem od značilnosti vizirane površine. Ker je ta površina ponavadi nepravilne oblike, je pravilni postopek geometrične redukcije dolžin praktično nemogoč. Realna natančnost določitve koordinat detaljnih točk je zato bistveno slabša od natančnosti, ki nam jo nudi instrumentarij in metoda.

## 7 TEST INSTRUMENTOV PRI MERJENJU DOLŽIN BREZ UPORABE REFLEKTORJEV

Med terenskimi meritvami smo izvedli primerjavo dosega in natančnosti treh instrumentov glede na vrsto odbojne podlage in zasuk. Materiale plošč smo zaradi primerljivosti izbrali iste kot so v diplomski nalogi Jerine Marolt, Merjenje dolžin z elektronskimi rezdaljmeri brez uporabe reflektorjev. Uporabljeni instrumenti pa so bili Leica DIOR 3002S, Leica TPS1201, ki sta last Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, in Topcon GPT 7000i, ki smo si ga sposodili pri zastopniku te znamke za Slovenijo, to je Geoizmera s.p. iz Raven na Koroškem. Prvi izmed naštetih je uporabljen zaradi primerjave meritev z rezultati meritev v zgoraj omenjeni diplomski nalogi.



SLIKA 13: Postavitev instrumentov v prvi seriji terenskih meritev.

## 7.1 Deklarirane lastnosti testiranih instrumentov s strani proizvajalca

- Leica DIOR 3002S



SLIKA 14: Leica Wild DIOR 3002

TABELA 1 : Deklarirane lastnosti instrumenta Leica DIOR 3002S

	<b>Leica DIOR 3002S</b>
<b>Svetilo</b>	Laserska dioda
<b>Laserski impulz</b>	0.860m
<b>Divergenca žarka</b>	7' 13" 2.1 m na 1 km
<b>Merska frekvenca</b>	15 MHz
<b>Referenčni pogoji</b>	$n_0$ 1.0002815 $p_0$ 1013.25 hPa $t_0$ 12°C
<b>Doseg</b>	6 km / 1 prizma 8 km / 11 prizem 350m
<b>Čas meritve</b>	0.8 – 3.5 s
<b>Standardni odklon</b>	3 – 5 mm ; 1 ppm 5 – 10 mm
<b>Ekranška ločljivost</b>	0.1mm
<b>Način merjenja</b>	Impulzni

- **Leica TPS1201**



SLIKA 15: Leica TPS1201

**TABELA 2** : Deklarirane lastnosti instrumenta Leica TPS1201

	<b>Leica TPS1201</b>
<b>Svetilo</b>	Laser
<b>Nosilno valovanje</b>	670 nm
<b>Divergenca žarka</b>	25mm × 80mm na 200 m
<b>Merska frekvenca</b>	100 - 150 MHz
<b>Doseg</b>	> 10000 m / prizma > 500 m / brez prizme
<b>Čas meritve</b>	3 – 6 s, max 12 s
<b>Standardni odklon</b>	5mm ; 2 ppm 3 - 5 mm ; 2 ppm*
<b>Ekranška ločljivost</b>	0.1mm
<b>Način merjenja</b>	Fazni

- **Topcon GPT 7000i**



SLIKA 16: Topcon GPT 7000i

TABELA 3 : Deklarirane lastnosti instrumenta Topcon GPT 7000i

	<b>Topcon GPT 7000i</b>
<b>Svetilo</b>	Laser
<b>Doseg</b>	3000 m / prizma 250 m / brez prizme
<b>Čas meritve</b>	1.2 – 3 s
<b>Standardni odklon</b>	2 - 3 mm ; 2 ppm 10 mm / 1.5 – 25 m* 3 mm / 25 – 250 m*
<b>Ekranska ločljivost</b>	1 mm
<b>Način merjenja</b>	Fazni

## 7.2 Potek meritev

Namen meritev je bil ugotoviti natančnost testiranih instrumentov glede na vrsto materiala, od katerega se elektromagnetno valovanje odbije, oddaljenost in zasuk materiala glede na os merskega žarka. Meritve smo izvedli na kolesarski stezi v bližini živalskega vrta v Ljubljani in na Ljubljanskem barju. Plošče z materiali so bile velikosti 60×60cm.

Meritve na kolesarski stezi smo začeli pri oddaljenosti 50m, se prestavili na 100m in 150m, dalje pa smo se prestavljali po 20m do oddaljenosti 650m. Merili smo po pet meritev na material za posamezen zasuk na isti razdalji. Za vsak material so bili štirje zasuki ( 0°,10°,25°,45°). Tako je prišlo do 100 meritev na razdaljo za posamezen instrument. Skupno je bilo izmerjeno 2850 dolžin.

V drugem delu meritev nam je ostalo le še delo z Leico TPS. Ponovili smo postopek iz prvega dela in sicer od 670 metrov do konca dosega tega instrumenta. V tem delu je bilo izmerjenih 200 dolžin. Skupno število izmerjenih dolžin je tako 3050.

Instrumentarij:

- Leica TPS1201
- Topcon GPT 7000i
- Leica DIOR 3002S na teodolitu Leica T1800
- 4 stativi
- okvir za plošče
- plošče materialov ( les, grobi omet, fini omet, stiropor, pločevina )
- meteorološka postaja
- pribor za določitev zasuka plošč

### 7.2.1 Izbor materialov

Kot sem že omenil, sem izbral iste materiale, kot so bili uporabljeni pri testnih meritvah v diplomski nalogi Jerine Marolt. Gre seveda za iste vrste materialov, ki pa niso identični.

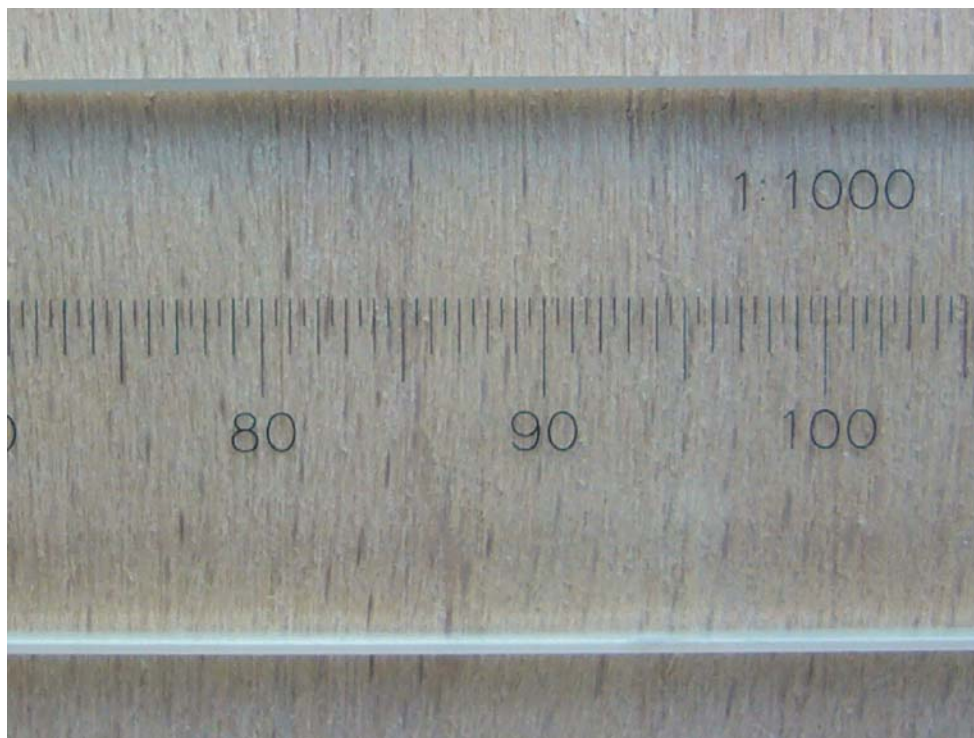
Velikost plošč 60×60cm smo izbrali zaradi divergence merskega žarka, ki pri Leici DIOR znaša 2,1mrad, kar je pri dolžini 300 metrov premera 66cm. Pričakovali smo, da doseg tega instrumenta ne bo daljši od te dolžine. Na plošče pa smo pritrdili tudi vizirne markice, in sicer 9 centimetrov pod sredino vsake plošče, ker le toliko znaša paralaksa med vizirno osjo teodolita in osjo merskega žarka razdaljemera pri Leici DIOR. Pri ostalih dveh instrumentih smo vizirali sredino plošče.

Pri vplivu vrste odbojnega materiala igrata vlogo predvsem barva in tekstura materiala. Vsi materiali so razmeroma svetli. Glede teksture pa izstopata ometa, ki imata, v primerjavi z drugimi materiali, grobo površino. Na naslednjih straneh so slike plošč s terenskih meritev in slike tekstur ob merilu.





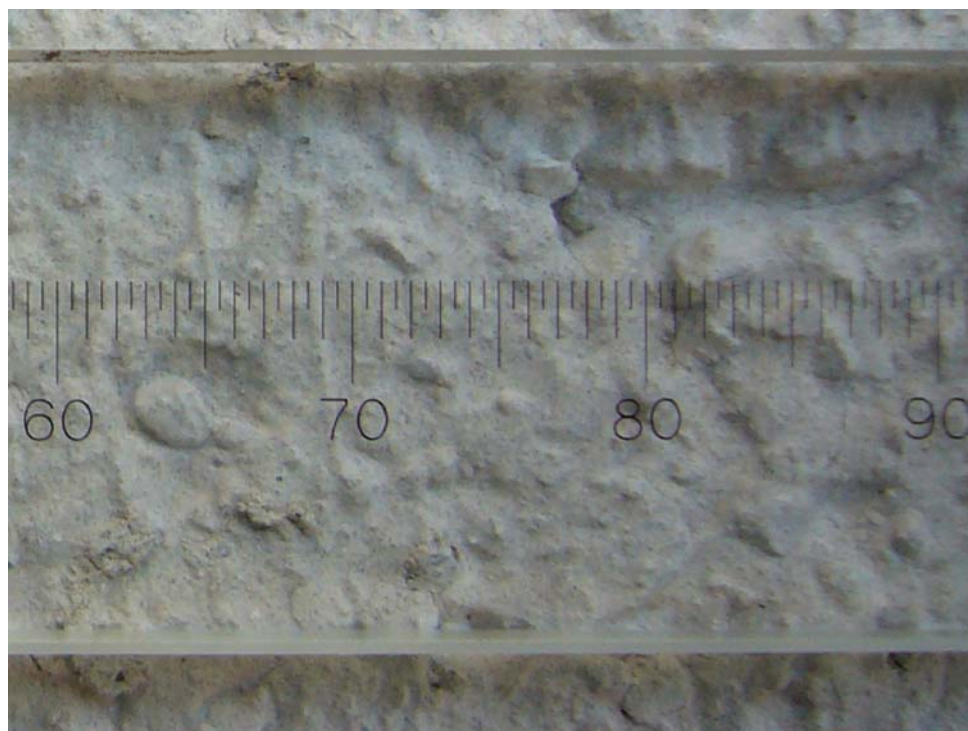
SLIKA 17: Plošča lesa



SLIKA 18: Tekstura lesene plošče



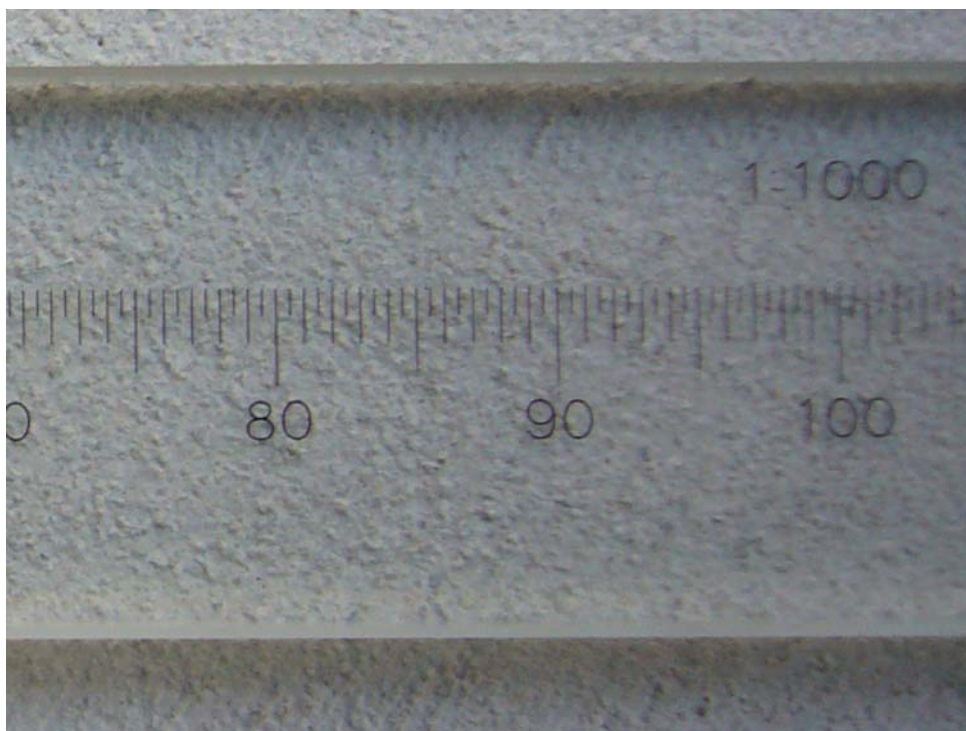
SLIKA 19: Plošča grobega ometa



SLIKA 20: Tekstura grobega ometa



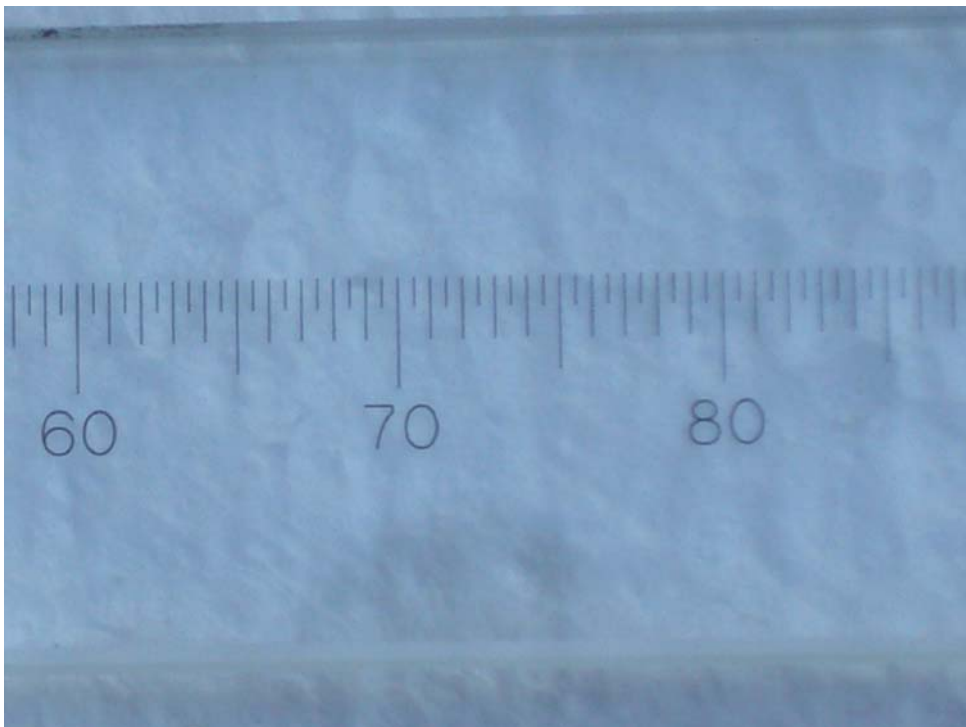
SLIKA 21: Plošča finega ometa



SLIKA 22: Tekstura finega ometa



SLIKA 23: Plošča stiropora



SLIKA 24: tekstura stiropora



SLIKA 25: Plošča pločevine



SLIKA 26: Tekstura pločevine

## 7.3 Primerjava rezultatov meritev

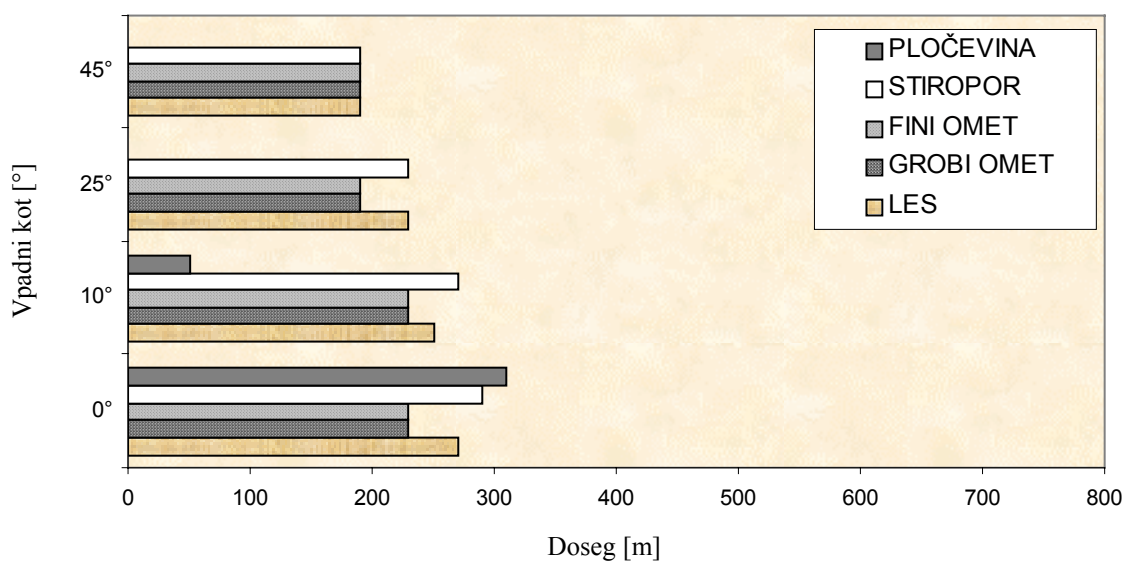
### 7.3.1 Doseg testiranih instrumentov

Doseg je v našem primeru najdaljša razdalja, ki jo je instrument še izmeril do posamezne plošče pri določenem zasuku. To razdaljo je moral izmeriti petkrat do iste razdalje v desetih poskusih.

Doseg Leice DIOR 3002S glede na material in zasuk:

TABELA 4 : Doseg DIOR-ja glede na material in zasuk

Material	Doseg [m] pri zasuku [°]			
	0°	10°	25°	45°
LES	270	250	230	190
GROBI OMET	230	230	190	190
FINI OMET	230	230	190	190
STIROPOR	290	270	230	190
PLOČEVINA	310	50	-	-



GRAF 5 : Doseg DIOR-ja glede na material in zasuk

Najdaljši doseg je imel DIOR pri pločevini in zasuku  $0^\circ$ , in sicer 310 metrov. Presenetljivo je pri istem materialu in zasuku  $10^\circ$  meril le do razdalje 50 metrov, pri večjih zasukih pa sploh ni meril.

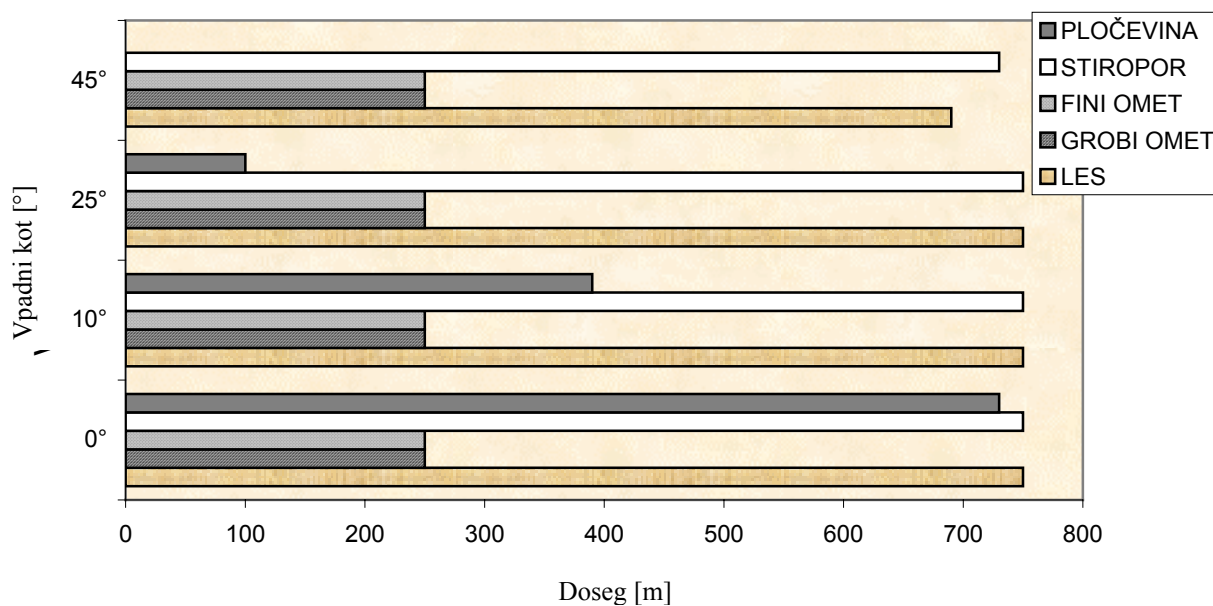
Pri ostalih materialih je meril pri vseh vpadnih kotih, pri zasuku  $45^\circ$  je dosegel 190 metrov, pri  $25^\circ$  je pri grobem in finem ometu imel doseg 190 metrov, pri stiroporu in lesu pa 230 metrov. Pri  $10^\circ$  zasuka je imel največji doseg do stiropora, 270 metrov, do lesu je dosegel 250 metrov, do ometov pa 230 metrov. Pri frontalnem merjenju je poleg pločevine najdlje meril do stiropora 290 metrov, do lesu 270 metrov, do ometov pa 230 metrov.

V primerjavi z rezultati merjenj pri diplomski nalogi Jerine Marolt so dosegi glede na vpadni kot podobni pri ometih in stiroporu, pri lesu in pločevini pa se dosti razlikujejo. Pri zasuku  $0^\circ$  sva za les dobila podoben rezultat, pri zasukih pa je pri njenih meritvah na les DIOR odpovedal. Pri pločevini je bil pri njenih meritvah krajši doseg pri zasuku  $0^\circ$ , je pa meril tudi pri zasuku  $45^\circ$ .

Doseg Leice TPS 1201 glede na material in zasuk:

TABELA 5 : Doseg Leice TPS glede na material in zasuk

Material	Doseg [m] glede na zasuk [°]			
	$0^\circ$	$10^\circ$	$25^\circ$	$45^\circ$
LES	750	750	750	690
GROBI OMET	250	250	250	250
FINI OMET	250	250	250	250
STIROPOR	750	750	750	730
PLOČEVINA	730	390	100	-



GRAF 6 : Doseg Leice TPS 1201 glede na material in zasuk

Instrument Leica TPS1201 je imel najboljši doseg pri stiroporu in lesu, kjer je pri vseh zasukih razen pri 45° meril do dolžine 750 metrov. Pri 45° zasuka je na les meril do 690 metrov, pri stiroporu pa do 730 metrov. Pri lesu ni izmeril dolžine 270 metrov pri nobenem zasuku, dolžine 310 pa pri zasukih 25° in 45°.

Pri pločevini je pri zasuku 0° dosegel dolžino 730 metrov, pri 10° zasuka 390 metrov, s tem da vmes ni izmeril dolžin 270m, 290m, 330m in 350m. Pri 25° zasuka je dosegel 100 metrov pri 45° pa ni izmeril nobene dolžine.

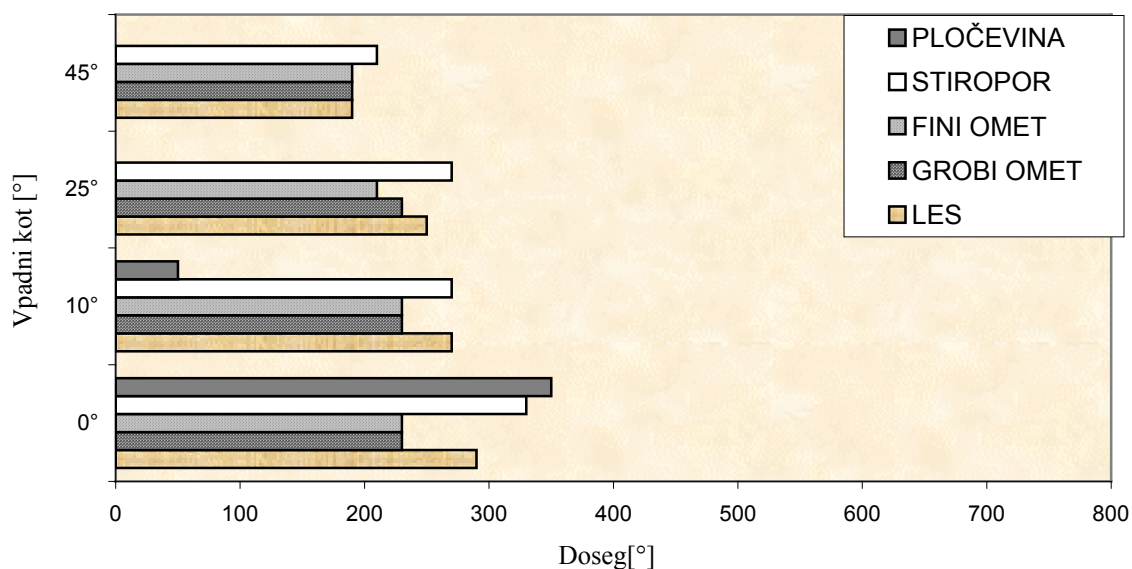
Pri ometih je pri vseh zasukih meril do 250 metrov, kar je presenetljivo glede na dosege pri ostalih materialih.



Doseg Topcona GPT 7000i glede na material in zasuk:

TABELA 6 : Doseg Topcona glede na material in zasuk

Material	Doseg [m] glede na zasuk[°]			
	0°	10°	25°	45°
LES	290	270	250	190
GROBI OMET	230	230	230	190
FINI OMET	230	230	210	190
STIROPOR	330	270	270	210
PLOČEVINA	350	50	-	-



GRAF 7 : Doseg Topcona GPT 7000i glede na material in zasuk

Topcon je dosegel podobne rezultate kot DIOR, in sicer je največji doseg, 350 metrov, imel pri pločevini pri zasuku 0°, a je pri zasuku 10° dosegel le 50 metrov, pri večjih vpadnih kotih pa sploh ni meril. Splošno je najbolje meril do plošče stiropora, in sicer pri 0° zasuka 330 metrov, pri 10° in 25° zasuka 270 metrov in pri 45° zasuka 210 metrov. Pri lesu je dosegel pri zasuku 0° 290 metrov, pri 10° zasuka 270 metrov, pri 25° zasuka 250 metrov in pri 45° zasuka 190 metrov. Pri ometih je dosegal podobne rezultate. Pri 0° in 10°

zasuka je pri obeh dosegel 230 metrov, pri 45° zasuka pa pri obeh 190 metrov. Pri 25° zasuka je pri grobem ometu dosegel 230 metrov, pri finem pa 210 metrov.

Glede dosega je po pričakovanjih najboljše rezultate dosegel instrument Leica TPS1201, ki je meril do dolžine 750 metrov, kar je enkrat več od konkurentov pri meritvah, a je pri daljših dolžinah vprašljiva natančnost izmerjenih dolžin, čemur pa se posvetimo v naslednjem poglavju. Za vse tri instrumente lahko rečemo, da najboljše dosegajo stiropor in les najslabše pa omete. Pri pločevini je doseg pri zasuku 0° najdaljši, razen pri TPS-u, a z zasukom hitro pade.

Če je bila superiornost Leice TPS pričakovana, pa nas je presenetil Topcon, ki je po deklariranih zmogljivostih v smislu dosega slabši od Leice DIOR, a je pri meritvah dosegel boljše rezultate. DIOR pri nobenem od uporabljenih materialov ni dosegel deklariranega dometa, Topcon pa ga je pri pločevini presegel kar za 100 metrov. Če pa želimo primerjati naše rezultate z deklariranimi lastnostmi s strani proizvajalca, pa moramo poznati metode, s katerimi so le te določene. Več o tem v poglavju 7.4.

### 7.3.2 Natančnost testiranih instrumentov

Z namenom pridobitve ocene natančnosti instrumentov pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorjev smo vsako dolžino izmerili petkrat. Natančnost je tako določena iz odstopanj od aritmetične sredine, se pravi, da gre za notranjo natančnost. Iz odstopanj sem nato izračunal standardni odklon dolžine.

$$v_i = \bar{d} - d_i$$
$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}$$

$v_i$ ..... odstopanje pri  $i$ -ti meritvi

$d$ prečno..... aritmetična sredina meritev iste dolžine pri enakih pogojih

$d_i$ .....  $i$ -ta dolžina

$n$ ..... število meritev

**Natančnost Leice DIOR 3002S:**

STANDARDNI ODKLONI DOLŽINE PRI MATERIALIH GLEDE NA ZASUK

TABELA 7 : Standardni odklon dolžine pri lesu

Dolžina [m]	Odklon pri zasukih [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0023	0,0014	0,0019	0,0017
100	0,0012	0,0024	0,0014	0,0017
150	0,0024	0,0025	0,0006	0,0045
170	0,0016	0,0024	0,0017	0,0046
190	0,0012	0,0026	0,0026	0,0032
210	0,0013	0,0047	0,0105	-
230	0,0099	0,0042	0,0312	-
250	0,0415	0,0068	-	-
270	0,0049	-	-	-

TABELA 8 : Standardni odklon dolžine pri grobem ometu

Dolžina [m]	Odklon pri zasukih [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0017	0,0006	0,0013	0,0027
100	0,0019	0,0016	0,0020	0,0015
150	0,0015	0,0022	0,0023	0,0050
170	0,0030	0,0014	0,0049	0,0055
190	0,0024	0,0043	0,0046	0,0053
210	0,0031	0,0065	-	-
230	0,0054	0,0466	-	-

TABELA 9 : Standardni odklon dolžine pri finem ometu

Dolžina [m]	Odklon pri zasukih [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0018	0,0010	0,0018	0,0012
100	0,0013	0,0021	0,0019	0,0027
150	0,0038	0,0023	0,0011	0,0040
170	0,0037	0,0059	0,0020	0,0036
190	0,0024	0,0029	0,0022	0,0188
210	0,0250	0,0054	-	-
230	0,0114	0,0046	-	-

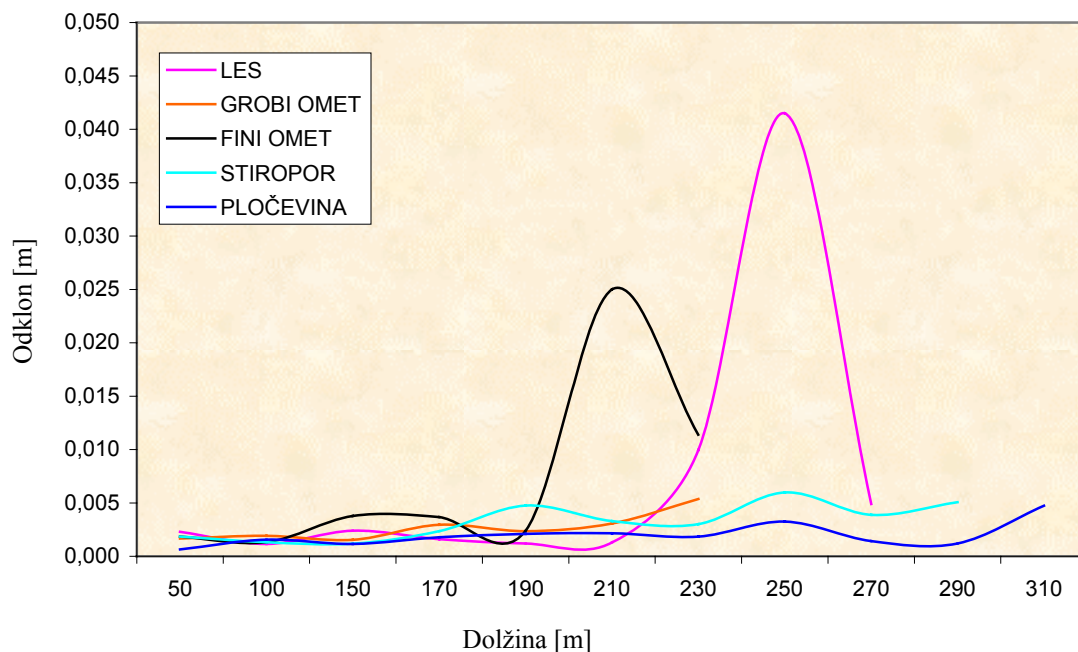
TABELA 10 : Standardni odklon dolžine pri stiroporu

Dolžina [m]	Odklon pri zasukih [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0018	0,0017	0,0072	0,0016
100	0,0013	0,0015	0,0067	0,0006
150	0,0012	0,0014	0,0024	0,0025
170	0,0024	0,0023	0,0016	0,0055
190	0,0048	0,0013	0,0032	0,0029
210	0,0033	0,0017	0,0040	-
230	0,0030	0,0058	0,0193	-
250	0,0060	0,0113	-	-
270	0,0039	0,0874	-	-
290	0,0051	-	-	-

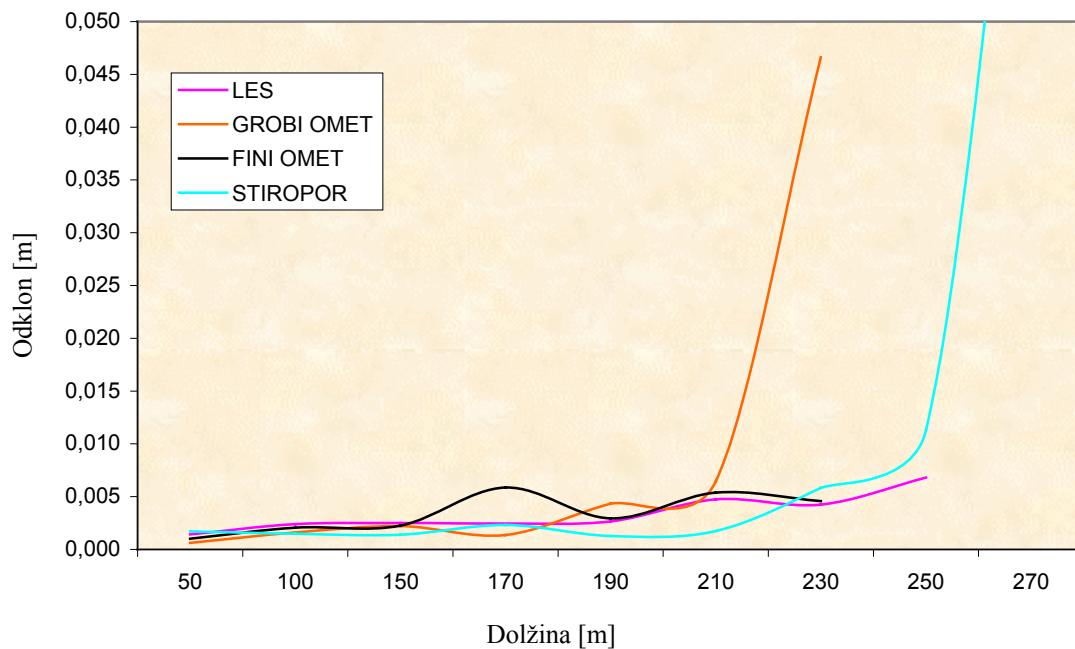
TABELA 11 : Standardni odklon dolžine pri pločevini

Dolžina [m]	Odklon pri zasukih [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0006	0,0032	-	-
100	0,0016	-	-	-
150	0,0012	-	-	-
170	0,0018	-	-	-
190	0,0021	-	-	-
210	0,0022	-	-	-
230	0,0018	-	-	-
250	0,0033	-	-	-
270	0,0014	-	-	-
290	0,0012	-	-	-
310	0,0047	-	-	-

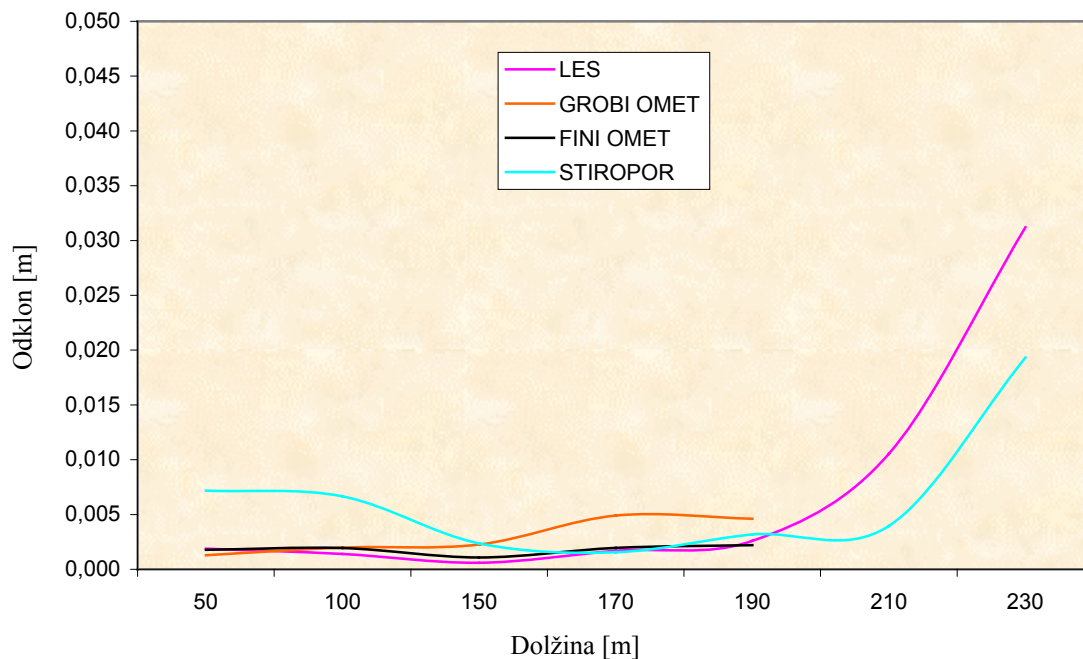
### STANDARDNI ODKLONI DOLŽIN PRI ISTEM ZASUKU GLEDE NA MATERIAL



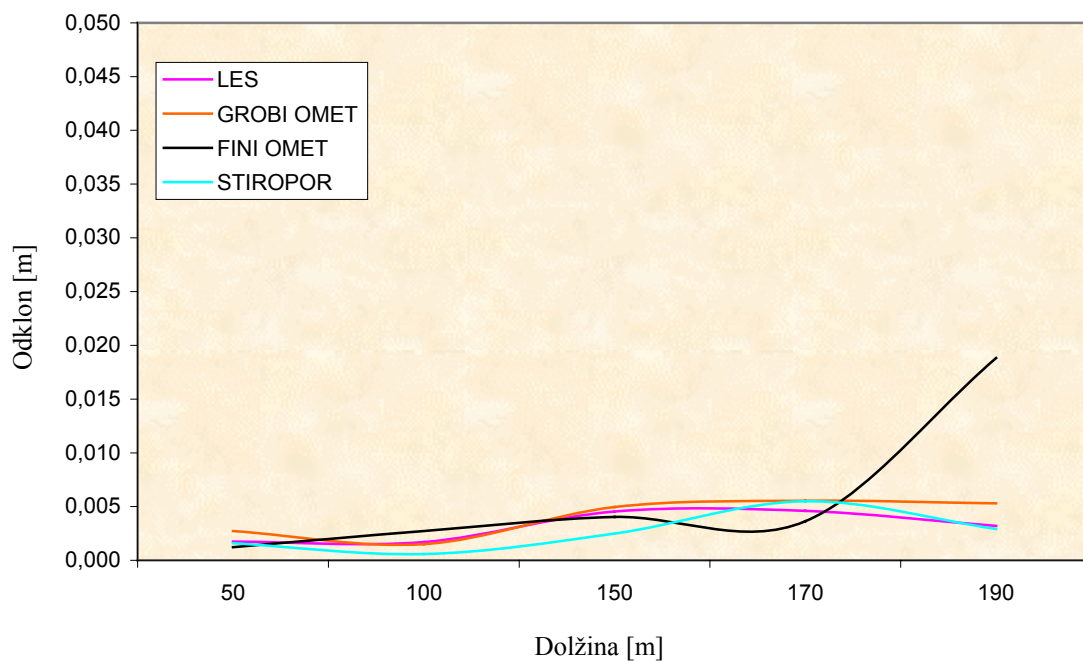
GRAF 8 : Odkloni dolžine pri zasuku 0°



GRAF 9 : Odklon dolžine pri zasuku 10°



GRAF 10 : Odklon dolžine pri zasuku 25°



GRAF 11 : Odklon dolžine pri zasuku 45°

Iz tabel in grafov, ki prikazujejo natančnost razdaljemera Leica DIOR 3002S, je razvidno, da je le ta v okviru 5 milimetrov pri vseh materialih in zasuku  $0^\circ$  do dolžine 190 metrov. Po tej dolžini natančnost močno pade pri finem ometu, pri lesu pa nad 210 metri. Pri ostalih materialih je natančnost v okviru 6mm do konca dosega.

Pri zasuku  $10^\circ$  je podobno obnašanje, le da merjenje pločevine odpove, pri  $25^\circ$  zasuka pa je zanimivo, da je natančnost pri razdaljah do 150 metrov slabša kot pri le tej in večjih. Ostali materiali imajo podobne lastnosti kot pri manjših zasukih. Natančnost pri pločevini močno pade nad 190 metri, pri stiroporu pa nad 210 metri.

Tudi pri  $45^\circ$  zasuku je natančnost relativno visoka. Pri krajših razdaljah pod 3 milimetre, pri 150 metrih pa pade do 4-5 milimetrov. Nad 170 metri močno pade pri finem ometu, pri ostalih je pod 6 milimetri do konca dosega. Zanimivo je, da je pri stiroporu do 150 metrov višja natančnost kot pri  $25^\circ$  zasuka.

### Natančnost Leice TPS1201 :

#### STANDARDNI ODKLONI DOLŽINE PRI MATERIALIH GLEDE NA ZASUK

TABELA 12 : Standardni odklon dolžine pri grobem ometu

Dolžina [m]	Odklon dolžine pri zasuku [m]			
	$0^\circ$	$10^\circ$	$25^\circ$	$45^\circ$
50	0,0018	0,0000	0,0054	0,0016
100	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
150	0,0008	0,0024	0,0016	0,0016
170	0,0008	0,0022	0,0018	0,0020
190	0,0020	0,0016	0,0022	0,0036
210	0,0026	0,0042	0,0022	0,0072
230	0,0020	0,0020	0,0050	0,0044
250	0,0022	0,0040	0,0050	0,0028

TABELA 13 : Standardni odklon dolžine pri lesu

Dolžina [m]	Odklon pri zasukih [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0000	0,0038	0,0016	0,0000
100	0,0012	0,0008	0,0008	0,0012
150	0,0018	0,0012	0,0016	0,0012
170	0,0012	0,0012	0,0028	0,0024
190	0,0030	0,0018	0,0022	0,0018
210	0,0010	0,0040	0,0032	0,0036
230	0,0012	0,0020	0,0028	0,0044
250	0,0046	0,0026	0,0038	0,0058
270	-	-	-	-
290	0,0132	0,0060	0,0082	0,0122
310	0,0048	0,0086	-	-
330	0,0020	0,0040	0,0008	0,0150
350	0,0044	0,0148	0,0098	0,0118
370	0,0046	0,0062	0,0020	0,0094
390	0,0036	0,0034	0,0050	0,0126
410	0,0040	0,0058	0,0028	0,0230
430	0,0060	0,0106	0,0168	0,0108
450	0,0114	0,0072	0,0084	0,0264
470	0,0060	0,0092	0,0166	0,0296
490	0,0160	0,0084	0,0150	0,0128
510	0,0086	0,0130	0,0258	0,0116
530	0,0082	0,0074	0,0202	0,0340
550	0,0022	0,0146	0,0100	0,0342
570	0,0242	0,0146	0,0322	0,0324
590	0,0084	0,0158	0,0574	0,0254
610	0,0100	0,0120	0,0304	0,0562
630	0,0084	0,0084	0,0098	0,0134
650	0,0124	0,0208	0,0320	0,0060
670	0,0082	0,0072	0,0108	0,0464
690	0,0128	0,0128	0,0170	0,0214
710	0,0190	0,0190	0,0190	-
730	0,0160	0,0206	0,0300	-
750	0,0172	0,0344	0,0202	-



TABELA 14 : Standardni odklon dolžine pri stiroporu

Dolžina [m]	Odklon dolžine pri zasuku [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0410	0,0000	0,0022	0,0000
100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008
150	0,0008	0,0008	0,0000	0,0028
170	0,0018	0,0008	0,0028	0,0020
190	0,0012	0,0016	0,0012	0,0026
210	0,0016	0,0008	0,0012	0,0030
230	0,0012	0,0022	0,0030	0,0018
250	0,0022	0,0010	0,0018	0,0060
270	0,0048	0,0016	0,0036	0,0106
290	0,0076	0,0070	0,0144	0,0118
310	0,0046	0,0044	0,0036	0,0054
330	0,0050	0,0086	0,0068	0,0110
350	0,0152	0,0078	0,0050	0,0120
370	0,0010	0,0062	0,0036	0,0040
390	0,0030	0,0080	0,0068	0,0066
410	0,0128	0,0062	0,0122	0,0170
430	0,0074	0,0072	0,0162	0,0202
450	0,0028	0,0072	0,0146	0,0126
470	0,0026	0,0066	0,0228	0,0286
490	0,0066	0,0076	0,0098	0,0146
510	0,0042	0,0066	0,0102	0,0494
530	0,0268	0,0114	0,0096	0,0202
550	0,0066	0,0068	0,0136	0,0498
570	0,0098	0,0118	0,0156	0,0406
590	0,0076	0,0088	0,0120	0,0544
610	0,0086	0,0066	0,0138	0,0286
630	0,0140	0,0140	0,0048	0,0296
650	0,0130	0,0114	0,0116	0,0194
670	0,0090	0,0106	0,0048	0,0458
690	0,0088	0,0088	0,0086	0,0248
710	0,0174	0,0174	0,0174	0,0152
730	0,0072	0,0130	0,0306	0,0260
750	0,0074	0,0174	0,0424	-

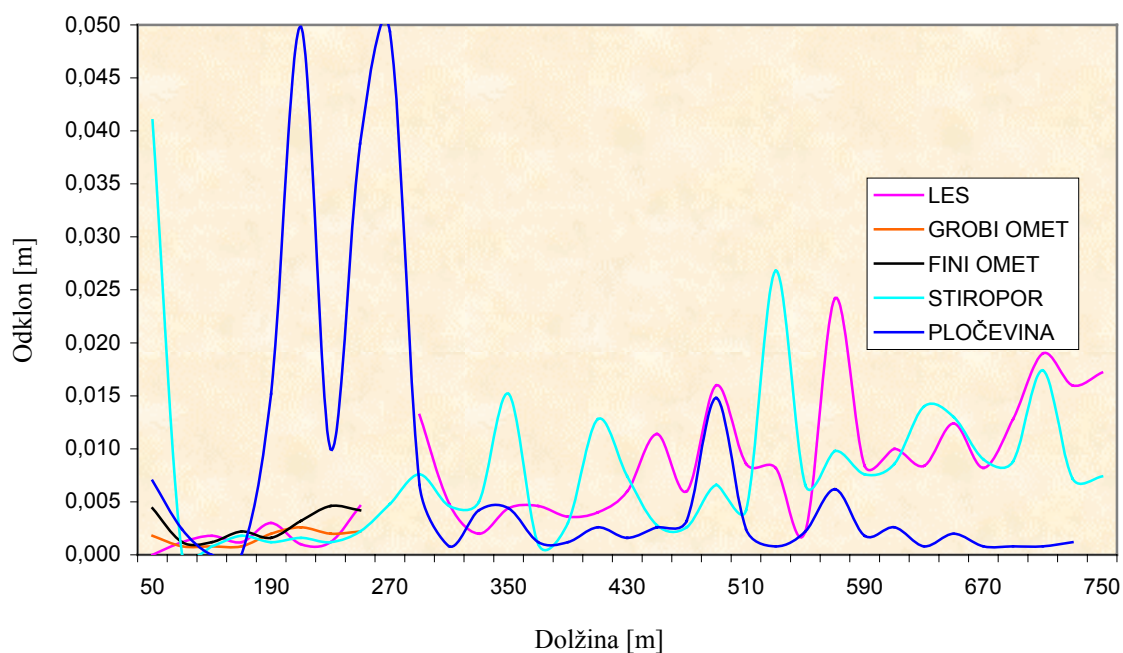
TABELA 15 : Standardni odklon dolžine pri pločevini

Dolžina [m]	Odklon dolžine pri zasuku [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0070	0,0000	0,0032	-
100	0,0024	0,0010	0,0146	-
150	0,0000	0,0082	-	-
170	0,0000	0,0070	-	-
190	0,0152	0,0182	-	-
210	0,0498	0,0152	-	-
230	0,0100	0,0094	-	-
250	0,0388	0,0272	-	-
270	0,0494	-	-	-
290	0,0066	-	-	-
310	0,0008	0,0122	-	-
330	0,0042	-	-	-
350	0,0044	-	-	-
370	0,0012	0,0196	-	-
390	0,0012	0,0266	-	-
410	0,0026	-	-	-
430	0,0016	-	-	-
450	0,0026	-	-	-
470	0,0032	-	-	-
490	0,0148	-	-	-
510	0,0024	-	-	-
530	0,0008	-	-	-
550	0,0022	-	-	-
570	0,0062	-	-	-
590	0,0018	-	-	-
610	0,0026	-	-	-
630	0,0008	-	-	-
650	0,0020	-	-	-
670	0,0008	-	-	-
690	0,0008	-	-	-
710	0,0008	-	-	-
730	0,0012	-	-	-
750	-	-	-	-

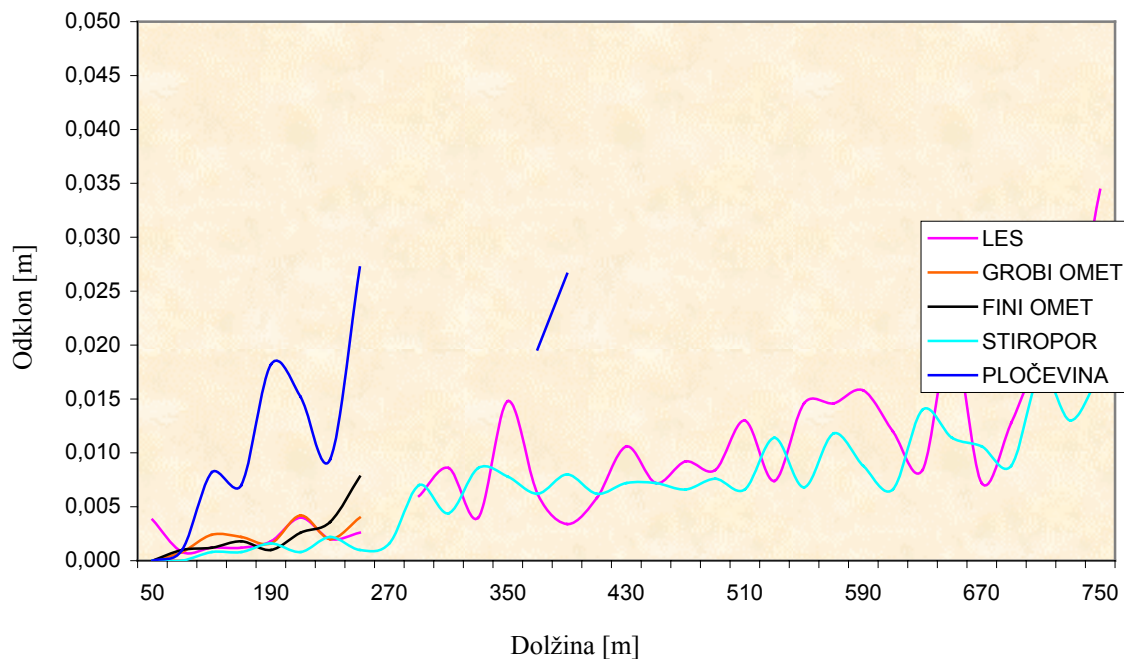
TABELA 16 : Standardni odklon dolžine pri finem ometu

Dolžina [m]	Odklon dolžine pri zasuku [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0044	0,0000	0,0048	0,0038
100	0,0012	0,0010	0,0008	0,0016
150	0,0012	0,0012	0,0024	0,0016
170	0,0022	0,0018	0,0024	0,0022
190	0,0016	0,0010	0,0012	0,0036
210	0,0032	0,0026	0,0018	0,0016
230	0,0046	0,0036	0,0044	0,0050
250	0,0042	0,0078	0,0054	0,0324

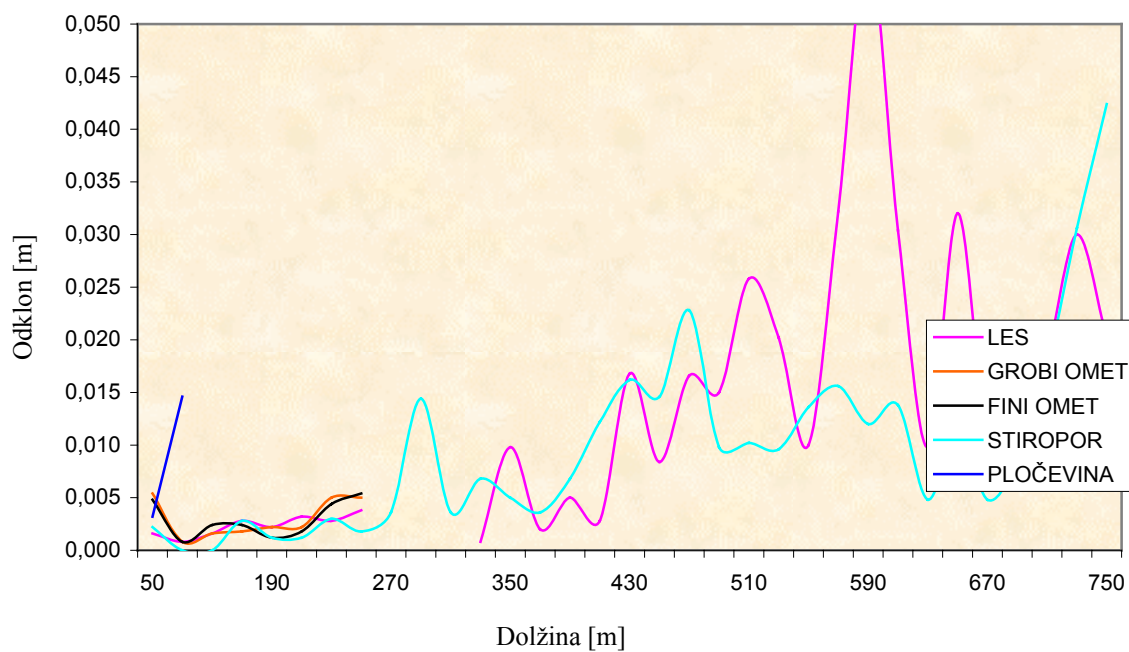
STANDARDNI ODKLONI DOLŽIN PRI ISTEM ZASUKU GLEDE NA MATERIAL



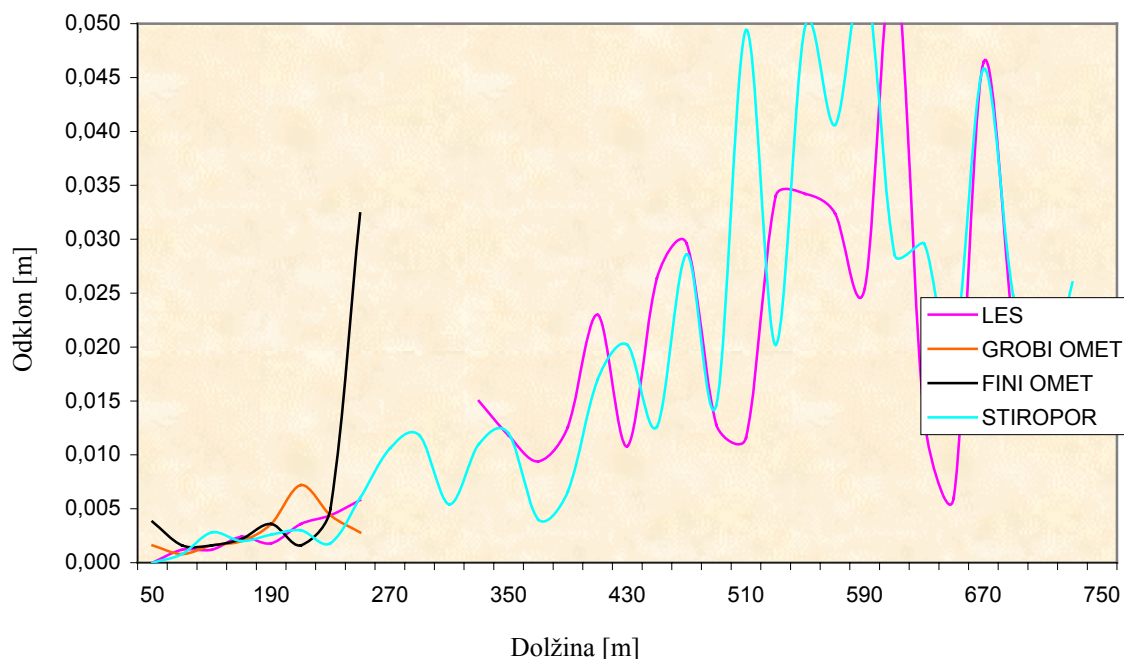
GRAF 12 : Odklon dolžine pri zasuku 0°



GRAF 13 : Odklon dolžine pri zasuku 10°



GRAF 14 : Odklon dolžine pri zasuku 25°



GRAF 15 : Odklon dolžine pri zasuku 45°

Iz grafov in tabel je razvidno, da je pri Leici TPS1201 natančnost dolžine merjene do pločevine zelo nestabilna pri vseh zasukih. Vidimo tudi, da je pri stiroporu pri zasuku 0° na 50 metrih dolžine slaba natančnost, ki pa pri 100 metrih naraste in ostane pod 2 milimetra do dolžine 250 metrov. Pri ostalih materialih je do te dolžine v okviru 5 milimetrov. Zanimivo je, da do lesu instrument ni meril pri dolžini 270 metrov, začel pa je spet pri 290 metrih s slabšo natančnostjo, ki pa je nad 310 metri ostala v okviru 5 milimetrov do razdalje 350 metrov.

Pri 10° zasuku je podobno. Pri pločevini je do 100 metrov razdalje sicer še natančnost 1 milimeter, a nato naglo pade in je težko definirana. Pri ostalih materialih je natančnost do dolžine 250 metrov v okviru 4 milimetrov, z izjemo finega ometa, kjer pri tej dolžini pade na 8 milimetrov. Pri stiroporu natančnost pade po 270 metrih, a ostane do dolžine 510 metrov v okviru 1 centimetra. Pri lesu je pri razdaljah večjih od 310 metrov slabša natančnost kot pri 0° zasuka.

Pri 25° zasuka je pri pločevini na 50 metrih natančnost okoli 3 milimetre, a pri 100 metrih pade. Pri stiroporu do 270 metrov natančnost ostane v okviru 3 milimetrov, potem pade, a se po 310 metrih giblje do vrednosti 7 milimetrov, po 390 metrih pa spet pade. Pri ostalih

materialih je natančnost okoli 3 milimetre do razdalje 210 metrov, a do konca dosega ne pade pod 6 milimetrov. Pri ometih je pri začetni razdalji natančnost okoli 5 milimetrov, a naraste pod 3 do razdalje 100 metrov.

Pri 45° zasuka je podobno. Natančnost pri vseh materialih razen grobem ometu ostane pod 5 milimetrov do 230 metrov. Pri slednjem je nižja le pri 210-ih metrih. Pri daljših razdaljah natančnost pri vseh materialih pade.

### **Natančnost Topcon GPT 7000i :**

#### STANDARDNI ODKLONI DOLŽINE PRI MATERIALIH GLEDE NA ZASUK

TABELA 17 : Standardni odklon dolžine pri lesu

Dolžina [m]	Odklon dolžine pri zasuku [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0010	0,0026	0,0016	0,0016
100	0,0020	0,0030	0,0020	0,0018
150	0,0022	0,0018	0,0024	0,0010
170	0,0012	0,0018	0,0022	0,0024
190	0,0032	0,0024	0,0040	0,0050
210	0,0026	0,0028	-	-
230	0,0018	0,0052	0,0020	-
250	0,0038	0,0044	0,0036	-
270	0,0020	0,0012	-	-
290	0,0072	-	-	-

TABELA 18 : Standardni odklon dolžine pri grobem ometu

Dolžina [m]	Odklon dolžine pri zasuku [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0026	0,0016	0,0020	0,0016
100	0,0026	0,0020	0,0016	0,0026
150	0,0022	0,0034	0,0038	0,0046
170	0,0012	0,0012	0,0020	0,0044
190	0,0032	0,0030	0,0040	0,0030
210	-	-	-	-
230	0,0028	0,0036	0,0030	-

TABELA 19 : Standardni odklon dolžine pri stiroporu

Dolžina [m]	Odklon dolžine pri zasuku [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0018	0,0018	0,0016	0,0018
100	0,0018	0,0016	0,0008	0,0020
150	0,0038	0,0020	0,0016	0,0032
170	0,0018	0,0022	0,0018	0,0026
190	0,0028	0,0026	0,0026	0,0054
210	0,0030	0,0016	0,0018	0,0034
230	0,0016	0,0018	-	-
250	0,0016	0,0020	0,0036	-
270	0,0028	0,0032	0,0018	-
290	0,0022	-	-	-
310	0,0040	-	-	-

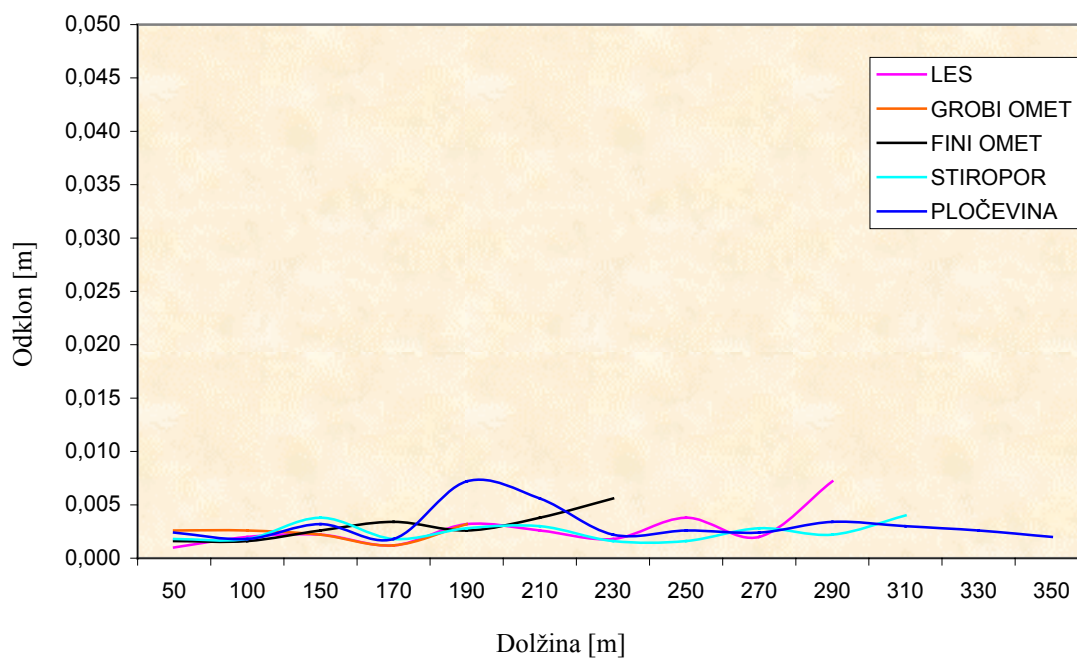
TABELA 20 : Standardni odklon dolžine pri pločevini

Dolžina [m]	Odklon dolžine pri zasuku [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0024	0,0026	-	-
100	0,0018	-	-	-
150	0,0032	-	-	-
170	0,0018	-	-	-
190	0,0072	-	-	-
210	0,0056	-	-	-
230	0,0022	-	-	-
250	0,0026	-	-	-
270	0,0024	-	-	-
290	0,0034	-	-	-
310	0,0030	-	-	-
330	0,0026	-	-	-
350	0,0020	-	-	-

TABELA 21 : Standardni odklon dolžine pri finem ometu

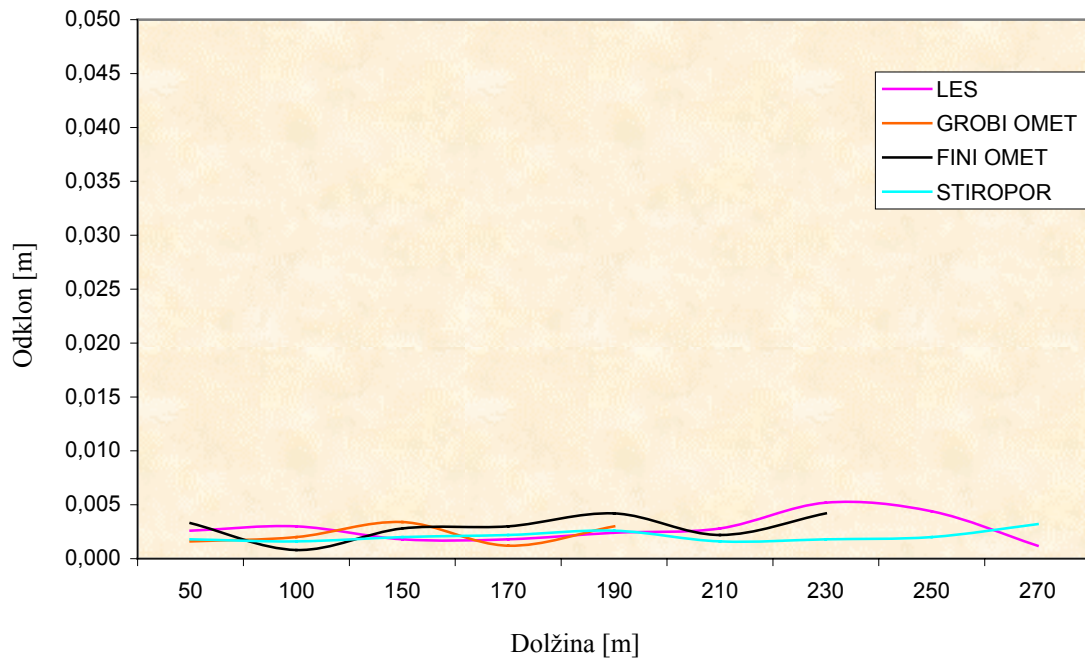
Dolžina [m]	Odklon dolžine pri zasuku [m]			
	0°	10°	25°	45°
50	0,0016	0,0033	0,0024	0,0030
100	0,0016	0,0008	0,0012	0,0016
150	0,0026	0,0028	0,0016	0,0022
170	0,0034	0,0030	0,0022	0,0058
190	0,0026	0,0042	0,0018	0,0046
210	0,0038	0,0022	0,0048	-
230	0,0056	0,0042	-	-

STANDARDNI ODKLONI DOLŽIN PRI ISTEM ZASUKU GLEDE NA MATERIAL

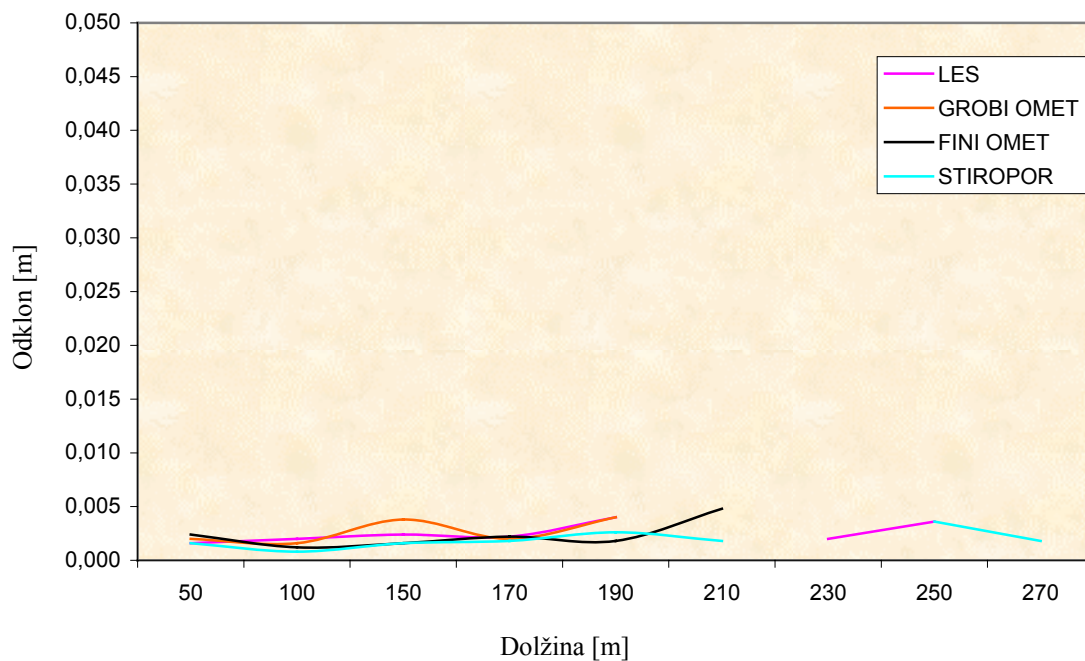


GRAF 16 : Odklon dolžine pri zasuku 0°

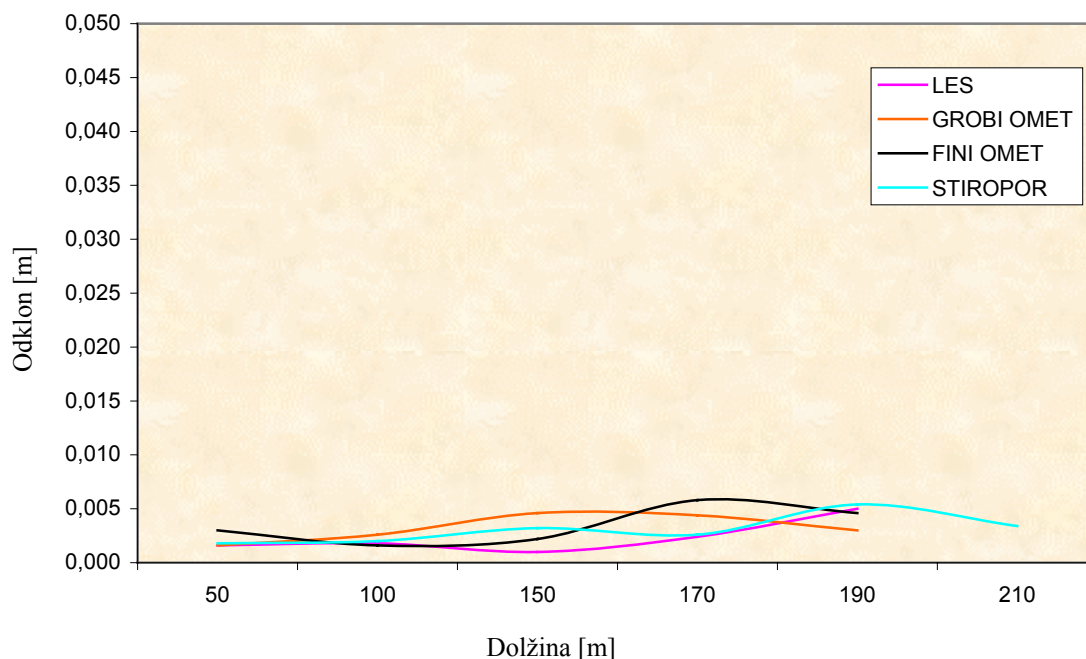




GRAF 17 : Odklon dolžine pri zasuku 10°



GRAF 18 : Odklon dolžine pri zasuku 25°



GRAF 19 : Odklon dolžine pri zasuku 45°

Glede na naše meritve je Topcon GPT 7000i dosegal večjo natančnost od deklarirane pri vseh materialih in vseh zasukih, z izjemami v naslednjih primerih.

Pri 0° zasuka za pločevino pri dolžinah 190 in 210 metrov, fini omet pri 230 metrih in les pri 290 metrih. Vendar nobena izmed vrednosti ni preseгла 7,5 milimetra.

Pri 10° zasuka je 5 milimetrov preseglal le pri lesu na dolžini 230 metrov, a le za 0,2 milimetra.

Pri 45° zasuka pa je omenjeno vrednost preseglal na finem ometu pri dolžini 170 metrov in na stiroporu pri 190-ih metrih. Tudi v teh primerih ni preseglal vrednosti za več kot milimeter.

## 7.4 Metode določanja lastnosti s strani proizvajalca

Če primerjamo rezultate, pridobljene s testnimi meritvami, s podanimi s strani proizvajalca, moramo poznati metode, ki jih proizvajalec uporablja pri določanju lastnosti.

Pri Leici DIOR so lastnosti podane v naslednji tabeli :

Pri merjenju so bile uporabljene tarče velikosti 0.6×0.6 m, ali večji objekti v naravi.

TABELA 22 : Pogoji pri deklariranem dosegu za Leico DIOR

Ravna površina, pravokotna na merski žarek	Odbojnost [%]	Pogoji okolja/doseg [m]			Rezultati naših meritev
		Slabi*	Povprečni*	Dobri*	
Bela/svetla barva,	>80	220	300	350	290 (stiropor)
Les	60-80	210	300	330	270
Siva barva	>60	200	260	320	230 (fini omet)
Beton	30-45	150	220	270	230 (grobi omet)
Suh svetel kamen	20-35	130	200	230	---
Vlažen temen kamen	5-15	100	140	170	---
Žareč objekt – temp. 1200°C	---	---	30-50	---	---
Odbojna plošča s prahoodpornim slojem	---	1000	1300	1500	---

\* Pogoji okolja :

Slabi: Močna osvetlitev merjenega objekta, merjenje nad segretim objekti

Povprečni: Dnevna svetloba, merjen objekt je v senci oz. oblačno vreme

Dobri: Ponoči ali v tunelu / zaprtem prostoru

Za natančnost je navedeno samo, da je določena pri merjenju pravokotno na površino, prekinitvev merskega signala pa daje nezanesljive rezultate.

Pri Leici TPS1201 so lastnosti razdaljamera podane :

TABELA 23 : Pogoji pri deklariranem dosegu za Leico TPS

Kodak odbojna plošča z:	Pogoji okolja/doseg [m]			Rezultati naših meritev
	Slabi*	Povprečni*	Dobri*	
90% odboja	300	500	>500	750**
18% odboja	200	300	>300	---

\* Pogoji okolja :

Slabi: Močna osvetlitev merjenega objekta, merjenje nad segretim objekti

Povprečni: Dnevna svetloba, merjen objekt je v senci oz. oblačno vreme - ??

Dobri: Ponoči ali v tunelu / zaprtem prostoru

\*\*Najdaljši doseg pri meritvah.

Natančnost je bila določena kot standardni odklon dolžine, in sicer pri merjenju v oblačnem vremenu s senco na merjenem objektu.

Pri Topconu GPT 7000i je pri deklaraciji dosega upoštevano merjenje na belo tarčo v medli svetlobi brez sončne osvetljenosti tarče. Pri natančnosti pa je navedeno le, da je merjeno na hrapavo površino.

## 8 ZAKLJUČEK

Cilj diplomske naloge je bila primerjava uporabljenih instrumentov glede na zmogljivosti in pregled nad napredkom, ki je bil dosežen pri razvoju elektronskega merjenja dolžin v zadnjih letih. Pri tem mislimo predvsem na fazne razdaljemere pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorjev.

Meritve Jerine Marolt so predstavljale test vodilnega instrumenta za merjenje dolžin brez uporabe reflektorjev v tistem času. Danes, osem let kasneje, pa se je isti instrument najslabše odrezal pri meritvah.

Testirali smo tri instrumente dveh vodilnih proizvajalcev Topcon in Leica. Natančnost je pri vseh treh primerljiva, je pa presenetil Topcon, ki se je glede na naše meritve izkazal za stabilnega v smislu natančnosti v celotnem območju dosega. Instrument Leica DIOR je dal rezultate, podobne tistim iz meritev Jerine Marolt, ki pa so tudi podobni deklariranim lastnostim s strani proizvajalca. Instrument Leica TPS je glede natančnosti dosegel podobne rezultate kot ostala dva instrumenta pri dolžinah do okoli 300 metrov. Pri večjih razdaljah, kjer sta druga dva odpovedala, pa je natančnost sicer še prišla v območje enega centimetra, a se ni izkazala za zanesljivo. Naše rezultati so standardni odkloni ponovljenih opazovanj in kažejo le notranjo natančnost instrumenta, vseeno pa lahko iz njih zaključimo, da so rezultati primerljivi z deklariranimi natančnostmi.

Glede dosega so se instrumenti različno odrezali. Tu izstopa Leica TPS1201, katerega doseg znaša kar 750 metrov. To je kljub deklariranemu dosegu presenetljiv rezultat, glede na to, da smo merili v sončnem vremenu. Da instrument lahko meri takšne dolžine brez uporabe reflektorja z zadostno natančnostjo, so tovarniško uvedli nekaj novosti. V razdaljemeru je občutljiv sistem za primerjanje merskega valovanja z nosilnim, ki uporablja modulacijske frekvence merskega signala velikosti od 100MHz do 300MHz. Pri obeh faznih razdaljemernih, Topconu in Leici TPS, je divergenca merskega žarka dosti manjša kot pri DIOR-ju. To pomeni, da je izmerjena razdalja bolj zanesljiva. Pri DIOR-ju je na 200 metrov razdalje velikost žarka  $\Phi = 44\text{cm}$ , medtem ko je pri TPS-u na isti razdalji velik le  $25\text{mm} \times 80\text{mm}$ . Pri dosegu je zanimivo tudi, da je Leica TPS skoraj neobčutljiva na kot zasuka v primerjavi z ostalima instrumentoma. Izjema je le pločevina, kjer je tudi TPS odpovedal pri zasukih, a vseeno kasneje kot ostala dva testirana instrumenta. Razlog

za takšen vpliv zasuka na merjenje pri pločevini je verjetno delna odsevnost materiala, ki večino merskega signala odbije podobno kot bi ga ogledalo. Presenetilo je dejstvo, da do ometov noben instrument ni meril več kot 250 metrov. To je nenavadno glede na to, da naj bi bilo merjenje do grobih podlag boljše, in tudi da je TPS do vseh ostalih materialov meril več kot enkrat dalje.

Rezultati naših meritev so primerljivi z deklariranimi podatki glede na to, da smo merili v vremenskih razmerah, podobnih kot so pri podajanju natančnosti in dosega označene za povprečne.

S pomočjo rezultatov naših meritev bi se lahko v praksi lažje odločali, kdaj uporabiti način merjenja dolžin brez uporabe reflektorja in kakšno natančnost lahko pričakujemo pri merjenju. V splošnem se je treba predvsem izogibati merjenju dolžin na gladke površine, preveliki izpostavljenosti svetlobi in razdaljam, daljšim od 200 metrov, oziroma 300 metrov pri Leici TPS.

Ta način merjenja ni namenjen za precizne meritve, je pa uporaben pri delih na nevarnih in težko dostopnih območjih za naloge, kjer nam zadostuje centimetrska natančnost.

## VIRI

- [1] KOGOJ D.: Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemerji, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana 2002
- [2] KOGOJ D.: Zmožnosti elektronskih razdaljemerov pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorja, Geodetski vestnik 45/2001, Ljubljana 2001
- [3] KOGOJ D., VODOPIVEC F.: Kompariranje in kalibriranje elektronskih razdaljemetov, Geodetski vestnik 47/2003, Ljubljana 2003
- [4] LOJEVEC G.: Zmožnosti elektronskih razdaljemerov pri merjenju dolžin brez uporabe reflektorjev, diplomska naloga, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana 2002
- [5] MAROLT J.: Merjenje dolžin brez uporabe reflektorjev, diplomska naloga, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana 1999
- [6] RICHTER E., JURETZKO M.: Das Messverhalten des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Leica TPS1200-Serie an Kanten, Allgemeine Vermessungs – Nachrichten 6/2007, Heidelberg 2007
- [7] Leica WILD DI3000S series - User manual, Leica Geosystems AG, Heerbrugg 1998
- [8] Leica TPS1200 series – Brochure, Leica Geosystems AG, Heerbrugg 2004