

UDK 681.783.2:528.517
Izvorni znanstveni članak

Povezivanje Münchenske i Zagrebačke baze za ispitivanje i umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera

Wolfgang MAURER, Klaus SCHNÄDELBACH – München¹
Nikola SOLARIĆ, Gorana NOVAKOVIĆ – Zagreb²

SAŽETAK. U radu je opisano povezivanje baza za ispitivanje i umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera u Zagrebu i Münchenu (Ebersberger Forst), radi prenošenja mjerila pri mjerenju duljina. Baza u Münchenu pripada sustavu svjetskih baza za umjeravanje, a izmjerena je svjetlosnim interferencijskim komparatorom Väisälä, najtočnijom metodom za mjerenje duljina do 1000 m. Osim toga Münchenska je baza povezana s ostalim bazama za ispitivanje elektrooptičkih daljinomjera u Njemačkoj, Kanadi, Austriji, Mađarskoj i Švicarskoj. Na taj se način i Hrvatska uključila u svjetski mjerni sustav za mjerenje velikih duljina, a zagrebačka baza postala je primarni etalon u Hrvatskoj.

Ključne riječi: baza za ispitivanje daljinomjera, elektrooptički daljinomjeri.

1. Uvod

U elektroničkom laboratoriju, odnosno servisu, moguće je vrlo točno namjestiti frekvenciju u elektrooptičkom daljinomjeru, a i ispitati i justirati veći broj drugih pogrešaka daljinomjera elektroničke prirode. Međutim dio pogrešaka koje zavise o duljini ne mogu se ispitati u laboratoriju, nego se moraju ispitati u terenskim uvjetima na bazi, i to preko cijelog dometa daljinomjera. Ispitivanje preko cijelog dometa naročito treba napraviti zbog periodijskih pogrešaka i pogrešaka faznog inhomogeniteta (Zetsche 1979; Solarić i dr. 1992). Zbog toga su prve baze za ispitivanje elektrooptičkih daljinomjera postavljene uz tvornice geodetskih instrumenata: Wild, Kern i Zeiss. Da bi daljinomjeri dobili što točnije mjerilo pri mjerenju duljina, tj. bili usuglašeni prema međunarodnom metru, tvornice koje ih proizvode poveza-

¹Prof. Dr. Ing. Klaus Schnädelbach, Dr.-Ing. Wolfgang Maurer, Geodätisches Institut der Technischen Universität München, D-80290 München, Arcisstraße 21, Deutschland.

²Prof. dr. sc. Nikola Solarić, redoviti član Akademije tehničkih znanosti Hrvatske, doc. dr. sc. Gorana Novaković, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: nsolaric@geodet.geof.hr, ngorana@geodet.geof.hr.

le su svoje baze s najtočnijim bazama za umjeravanje daljinomjera. Te najtočnije baze širom svijeta izmjerene su svjetlosnim interferencijskim komparatorom Väisälä, Finskog geodetskog instituta, s mjernom nesigurnošću 10^{-7} , tj. 0,1 mm/1000 m. O tim metodama vidi u (Väisälä 1930), (Honkasalo 1950), a o pregledu svih najtočnijih baza u (Jokela i dr. 1998). Ovakvom optičkom interferencijskom metodom izmjerena je i baza za umjeravanje daljinomjera u Münchenu (Ebersberger Forst).

Pri mjerenju kutova teodolitima, postupkom mjerenja u dva položaja teodolita, uz pažljivo horizontiranje, oslobadamo se praktično svih pogrešaka teodolita. Pri mjerenju daljinomjerom nema postupka mjerenja kojim bi se mogle poništiti njegove pogreške, nego se daljinomjer mora ispitati na kalibracijskoj bazi na kojoj su točno poznati razmaci između stupova. Na temelju tih mjerenja izračunaju se korekcije koje treba dodati na izmjerenu duljinu, da bi dobili njenu istinitu vrijednost. Zato je potpuno opravdano da jedan članak zakona o mjernoj djelatnosti propisuje da se daljinomjer za javnu uporabu mora jednom godišnje umjeriti na bazi za umjeravanje daljinomjera, a daljinomjeri za potrebe katastarske izmjere svake 3 godine (Narodne novine 1994a, 1994b i 1996).

Da bi se mogli umjeriti elektrooptički daljinomjeri, odnosno da bi se mogla ispitivati njihova preciznost i točnost, projektirana je i izgrađena 1982. godine baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (Solaric N. i dr. 1992). Ta baza sastoji se od 25 stupova i ima duljinu 3000 m, a jedna je od najduljih baza i baza s najviše stupova. U produžetku baze nalaze se u ravnini zemlje tri kamena, što omogućava ispitivanje daljinomjera koji su na stativima, do 6000 m. Velika duljina baze i veliki broj stupova omogućuju da se na terenu ispitaju sve pogreške elektroničke naravi, preko gotovo cijelog dometa mjerenja, većine elektrooptičkih daljinomjera.

Prvih 600 m baze izmjereno je 1983. godine invarskim žicama, umjerenim u Genevi i Sevresu s relativnom nesigurnošću $1 \cdot 10^{-6}$ (Novaković i dr. 1985), a 1984. godine izmjereno je 3000 m baze s preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Mekometer ME 3000, također s relativnom nesigurnošću $1 \cdot 10^{-6}$.

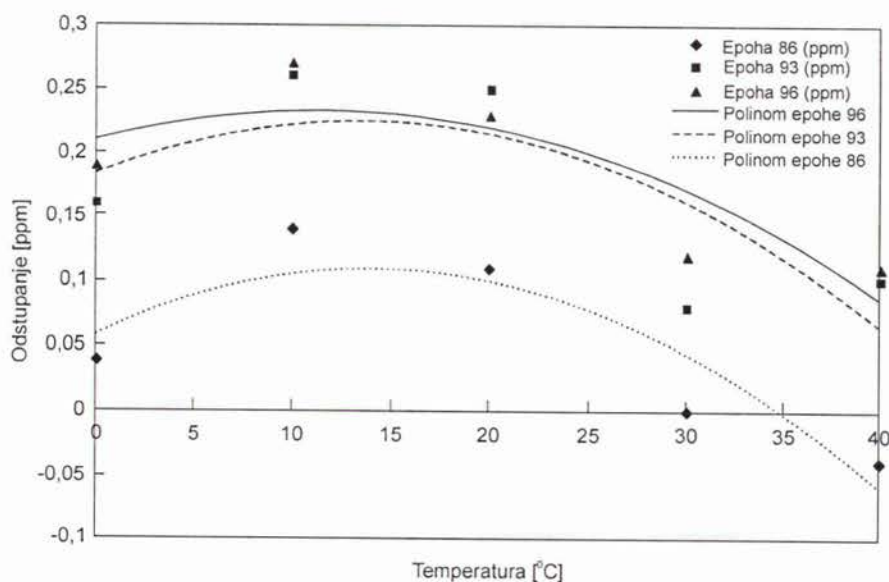
Godine 1988. baza je izmjerena Mekometrom ME 5000 s relativnom nesigurnošću $0,8 \cdot 10^{-7}$, pri čemu je primijenjen originalni postupak izjednačenja i ocjene preciznosti mjerenja (Solaric i dr. 2001).

Nacionalne etalone treba povremeno (svake tri godine) komparirati s drugim nacionalnim etalonima. Zato je dogovoreno da se ponovno izmjeri zagrebačka baza i poveže s bazom (Ebersberger Forst) u blizini Münchena. Baza Ebersberger Forst izmjerena je svjetlosnim interferencijskim komparatorom 1958. i 1963. godine (Kneißl, Eichhorn 1959); (Herzog 1964), a zatim je povezana s ostalim bazama za ispitivanje elektrooptičkih daljinomjera u Njemačkoj, Kanadi, Austriji, Mađarskoj i Švicarskoj. Na taj je način, preko baze u Münchenu, i Hrvatska uključena u svjetski mjerni sustav za mjerenje duljina do 3000 m.

2. Mjerenje frekvencije u laboratoriju i duljina na bazi Ebersberger Forst u Münchenu

Za prenošenje mjerila korišten je precizni elektrooptički daljinomjer Mekometer ME 5000 – br. 357003, vlasništvo Geodätisches Institut der Technischen Universität München. Taj instrument pokazao se, za vrijeme povremene višegodišnje kalibracije, vrlo

stabilnim. Na slici 1 prikazana su odstupanja izmjerene frekvencije u daljinomjeru od frekvencije koju bi daljinomjer trebao imati, u zavisnosti od temperature okoline, za epohu 1986., 1993. i 1996. Iz slike se vidi da postoji gotovo dugovremenska konstantnost frekvencije i uvijek približno sličan oblik krivulje utjecaja temperature.



Slika 1. Odstupanje frekvencije daljinomjera Mekometer ME 5000 br. 357003 od vrijednosti koju bi trebao imati obzirom na temperaturu okoline.

U Münchenu su napravljena i ispitivanja promjene frekvencije daljinomjera df s vremenom proteklim od uključivanja daljinomjera u rad (zagrijavanja). Rezultati ispitivanja prikazani su na slikama 2, 3 i 4. Iz tih je grafikona vidljivo da se frekvencija, od uključivanja instrumenta do 40 minute, mijenja najviše za približno 60 Hz, odnosno mjerilo duljina mijenja se za 0,02 ppm. Budući da je prvo mjerenje izvedeno najranije 10 minuta nakon uključivanja daljinomjera u rad, taj je utjecaj zanemariv, ali je ipak pri automatskoj obradbi podataka uzet u obzir.

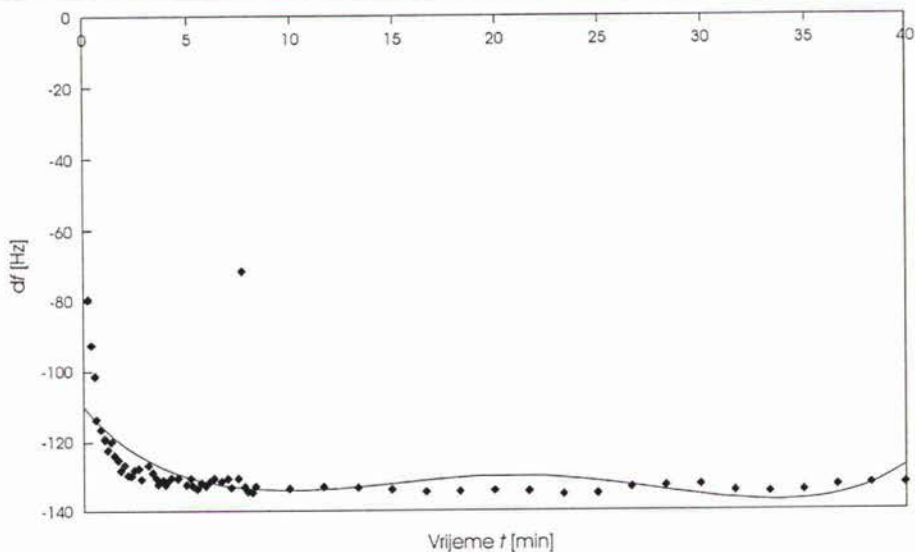
Prije polaska na mjernu kampanju u Zagreb, na bazi Ebersberger Forst izmjereni su daljinomjerom Mekometer ME 5000 razmaci između stupova 0-18-36 u svim kombinacijama. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 1.

Isto takvo mjerenje izvedeno je nakon povratka s mjerne kampanje u Zagrebu. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 2.

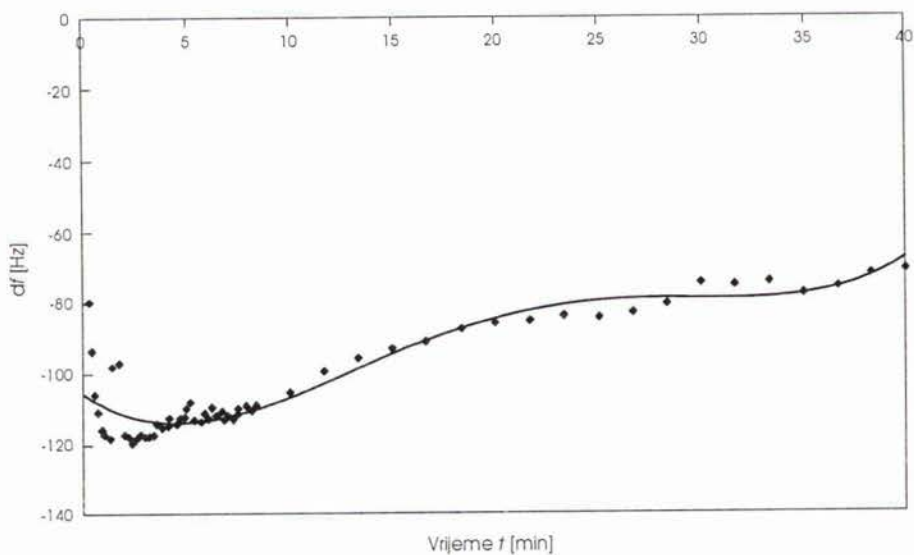
Za korekciju mjerila duljina izmjerenih u Zagrebu uzeta je aritmetička sredina od svih ppm-a određenih u Münchenu prije i poslije povratka iz Zagreba:

$$\text{sredina} = -0,06 \text{ ppm}, \bar{s} = 0,11 \text{ ppm}.$$

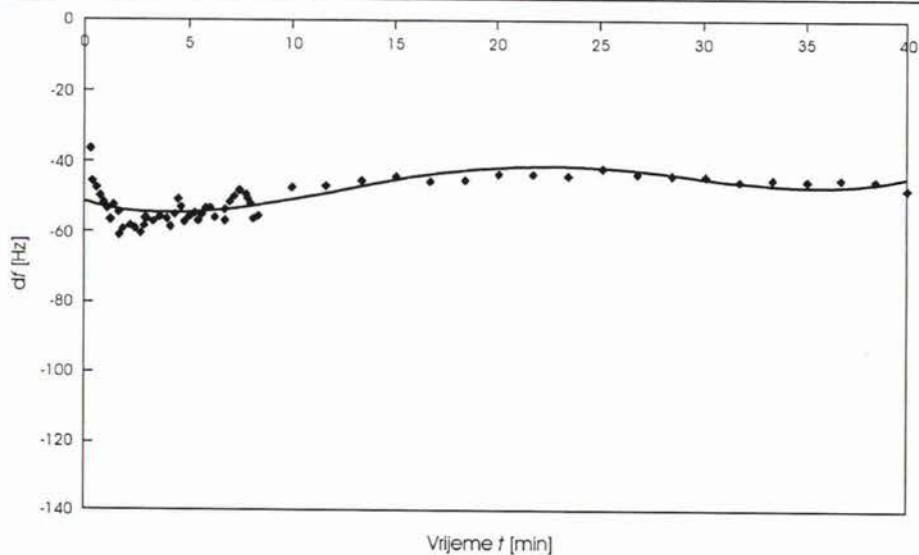
Svi rezultati mjerenja popravljani su za tu korekciju mjerila (poglavlje 4), iako je ona manja od mjerne nesigurnosti s kojom je određena.



Slika 2. Promjene frekvencije df obzirom na vrijeme proteklo od uključivanja (zagrijavanja) daljinomjera u rad, pri temperaturi od 10 °C.



Slika 3. Promjene frekvencije df obzirom na vrijeme proteklo od uključivanja (zagrijavanja) daljinomjera u rad, pri temperaturi od 20 °C.



Slika 4. Promjene frekvencije df obzirom na vrijeme proteklo od uključivanja daljinomjera u rad (zagrijavanja), pri temperaturi od $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tablica 1. Rezultati mjerenja Mekometrom ME 5000 br. 357003 u Münchenu prije polaska na mjernu kampanju u Zagreb.

Stajalište	Ciljna točka	Reducirana duljina	$\frac{\text{"Triba"}-\text{"Ima"}\text{ [mm]}}{\text{duljina [km]}}$
0	36	864,06514 m	-0,01 ppm
0	36	864,06525 m	-0,14 ppm
0	18	432,03181 m	0,25 ppm
0	18	432,03179 m	0,30 ppm
36	0	864,06544 m	-0,36 ppm
36	0	864,06540 m	-0,31 ppm
36	18	432,03304 m	0,38 ppm
36	18	432,03302 m	0,42 ppm
18	0	432,03167 m	0,58 ppm
18	0	432,03165 m	0,63 ppm
18	36	432,03294 m	0,60 ppm
18	36	432,03290 m	0,68 ppm
sredina = 0,25 ppm; \bar{s} = 0,11 ppm			

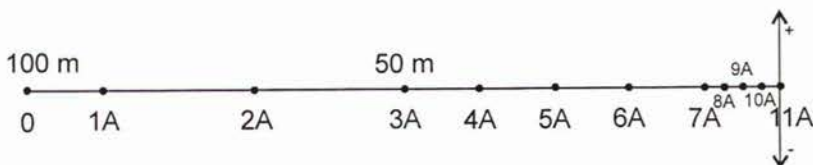
Tablica 2. Rezultati mjerenja Mekometrom ME 5000 br. 357003 u Münchenu nakon povratka s mjerne kampanje u Zagrebu.

Stajalište	Ciljna točka	Reducirana duljina	"Triba"- "Ima" [mm] duljina [km]
0	36	864,06545 m	-0,37 ppm
0	36	864,06504 m	0,11 ppm
0	18	432,03179 m	0,29 ppm
0	18	432,03212 m	-0,46 ppm
36	0	864,06537 m	-0,28 ppm
36	0	864,06548 m	-0,40 ppm
36	18	432,03351 m	-0,71 ppm
36	18	432,03321 m	-0,03 ppm
18	0	432,03213 m	-0,48 ppm
18	0	432,03179 m	0,31 ppm
18	36	432,03377 m	-1,32 ppm
18	36	432,03370 m	-1,16 ppm
sredina = - 0,36 ppm; \bar{s} = 0,15 ppm			

3. Mjerenje na bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

3.1. Mjerenja duljina do 100 m

Mjerna kampanja na bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu održana je od 22. 09. do 05. 10. 1996. godine. Izmjerene su kratke duljine do 100 m, između svih stupova u svim kombinacijama (osim raspona kraćih od 5 m) (slika 5).



Slika 5. Raspored stupova na kalibracijskoj bazi u Zagrebu (za duljine do 100 m).

Umjerenim psihrometrima i digitalnim aneroidima mjereni su temperatura, tlak i vlažnost zraka uz daljinomjer i reflektor, da bi se mogao uzeti u obzir njihov utjecaj na rezultate mjerenja duljina. Pritom je očitavana temperatura suhog i mokrog termometra na 0,1 °C, a tlak zraka na 0,1 mbar. Na slici 6. vidi se Mekometar ME 5000 na stupu baze, a na malom topografskom stolu laptop HP Portabl Plus, koji s po-



- | | |
|----------------------|------------------------|
| 1 - Mekometer | 4 - digitalni aneroid |
| 2 - topografski stol | 5 - ručna radiopostaja |
| 3 -laptop | 6 - kalkulator |

Slika 6. Precizni daljinomjer Mekometer ME 5000 na stupu baze i laptop koji upravlja mjerenjem daljinomjera.

moću programa «Promeko» upravlja mjerenjem Mekometra. Na topografskom stolu nalazi se i digitalni aneroid, ručna radiopostaja, kalkulator i zapisnik mjerenja. Psihrometar je držan pod zaštitnikom, da izravne zrake Sunca ne bi djelovale na očitavanje termometra (slika 7).



- | | |
|-----------------|---------------|
| 1 - psihrometar | 2 - zaštitnik |
|-----------------|---------------|

Slika 7. Psihrometar pod zaštitnikom od sunčanih zraka.

Sve izmjerene duljine korigirane su za utjecaj atmosfere, reducirane su na pravac kroz stupove baze 0 i 11A te svedene na duljinu luka na srednjoj nadmorskoj visini baze 110,00 m (Schnädelbach 1981).

3.1.1. Procjena preciznosti mjerenja duljina do 100 m

Na temelju mjerenja naprijed i natrag pojedinih duljina između stupova izračunane su njihove srednje vrijednosti i standardna odstupanja po formuli:

$$\bar{s}_{vz_i} = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2 \cdot n}}, \quad (1)$$

gdje su:

d – razlika mjerenja duljina naprijed – natrag,

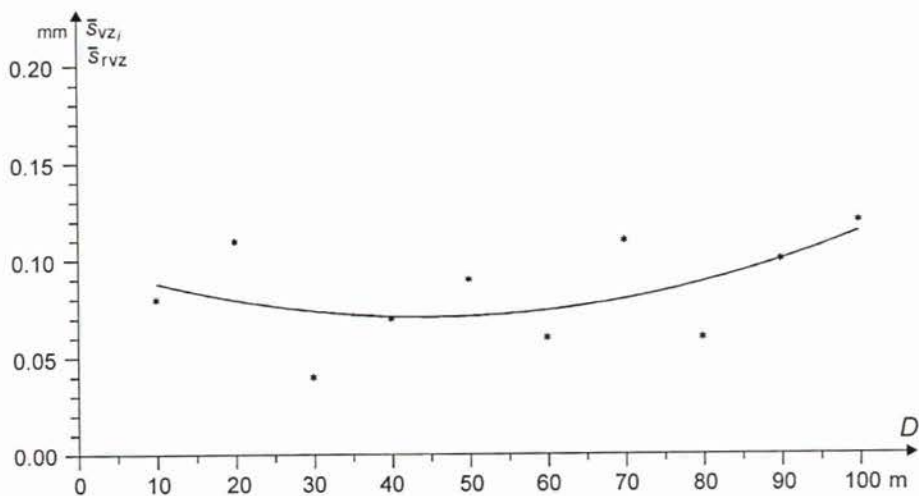
n – broj dvostrukih mjerenja.

Pritom su uzete u obzir samo duljine koje su višekratnik duljine 10 m ($n \times 10$ m).

Zatim je ovisno o pojedinim duljinama određen regresijski polinom \bar{s}_{rvz} (slika 8):

$$\bar{s}_{rvz} = 0,150 \text{ mm} - 0,002 \text{ 172 mm} \cdot D_m + 0,000 \text{ 023 106 mm} \cdot D_m^2, \quad (2)$$

gdje je D_m duljina u metrima.



Slika 8. Standardna odstupanja sredina duljina \bar{s}_{vz_i} dobivena iz mjerenja duljina naprijed i natrag i regresijski polinom \bar{s}_{rvz} za duljine do 100 m.

Za dobivanje najbolje procijenjene vrijednosti raspona između stupova, adicijske korekcije daljinomjera, ocjene preciznosti mjerenja i dobivenih rezultata, proveden je iterativni postupak izjednačenja po originalnoj metodi (Solarić, N. i dr. 2001). U

prvo izjednačenje ušlo se s težinama $p_i = 1/\bar{s}_{rvz}^2$. Nakon izjednačenja izračunani su procijenjeni popravci \hat{v} kao razlike između izjednačenih vrijednosti duljina i sredina duljina dobivenih iz mjerenja naprijed i natrag. Pomoću procijenjenih popravaka \hat{v} ponovno su izračunana standardna odstupanja sredina duljina (iz mjerenja duljina naprijed i natrag) dobivenih iz različitih kombinacija pojedinih veličina duljina $D_i = 10 \text{ m}, 20 \text{ m}, 30 \text{ m}, \dots, 90 \text{ m}$, prema formuli:

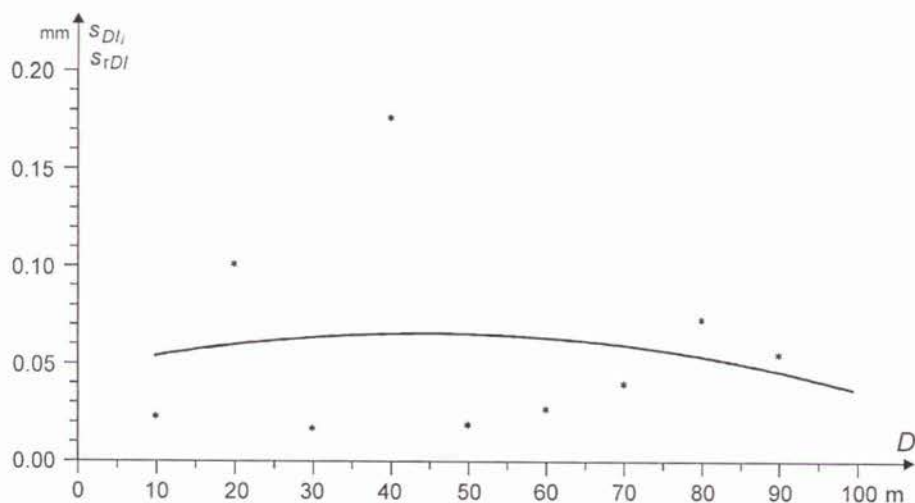
$$s_{DI_i} = \sqrt{\frac{\sum \hat{v}_i^2}{n_i - 1}}, \quad (3)$$

gdje je n_i broj kombinacija za pojedine veličine duljina.

Na temelju tako dobivenih standardnih odstupanja nakon prvog izjednačenja s_{DI_i} , postavljen je, ovisno o veličini duljine, novi regresijski polinom s_{rDI} (slika 9):

$$s_{rDI} = 0,008 \text{ mm} + 0,002 \text{ 057 mm} \cdot D_m + 0,000 \text{ 020 292 m} \cdot D_m^2. \quad (4)$$

Na kratkim duljinama do 100 m, zbog velikog rasipanja rezultata mjerenja, vjerojatno bi bilo bolje umjesto regresijskog polinoma postaviti pravac paralelan s apscisom, zbog toga ćemo pri sljedećim mjerenjima i njihovoj obradbi tako i postupiti.



Slika 9. Standardna odstupanja s_{DI_i} s kojima su određene sredine duljina dobivene iz različitih kombinacija izmjerenih duljina (do 100 m), nakon prvog izjednačenja, i regresijski polinom s_{rDI} .

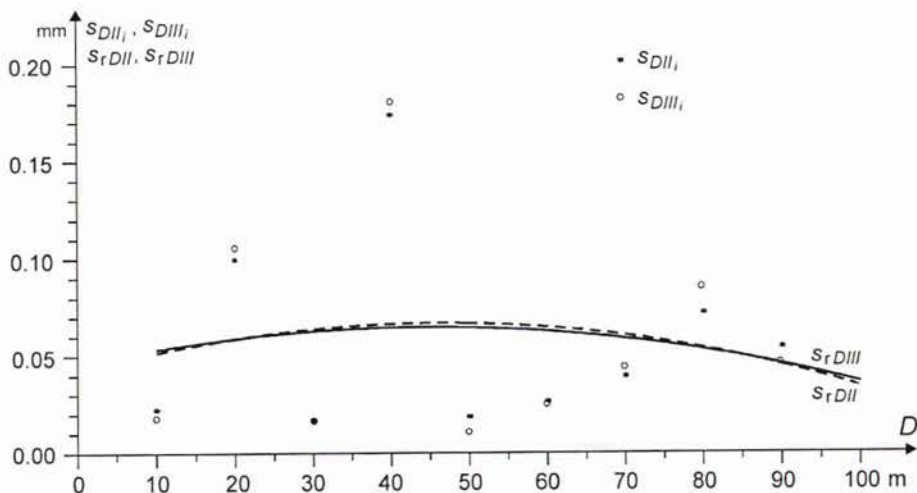
Nakon toga izračunane su nove težine $p_i = 1/s_{rDI}^2$, s kojima se ušlo u drugo izjednačenje i izračunane su nove procjene vrijednosti razmaka stupova i preciznosti tako dobivenih rezultata. Na isti način, s pomoću formule (3), izračunata su standardna odstupanja s_{DII_i} i pripadajući regresijski polinom (slika 10)

$$s_{rDII} = 0,046 \text{ mm} + 0,000 859 \text{ mm} \cdot D_m - 0,000 009 578 \text{ mm} \cdot D_m^2. \quad (5)$$

Istim je postupkom izvršeno i treće izjednačenje, izračunana su nova standardna odstupanja s_{DIIIi} i pripadajući regresijski polinom:

$$s_{rDIII} = 0,043 \text{ mm} + 0,001 061 \text{ mm} \cdot D_m - 0,000 011 407 \text{ mm} \cdot D_m^2, \quad (6)$$

što je također prikazano na slici 10.



Slika 10. Standardna odstupanja s_{DIIi} i s_{DIIIi} s kojima su određene sredine duljina dobivene iz raznih kombinacija izmjerenih duljina (do 100 m), nakon drugog i trećeg izjednačenja, i regresijski polinomi s_{rDII} i s_{rDIII} .

Na slici 10 je vidljivo da se vrijednosti standardnih odstupanja mjerenja duljina prije i nakon trećeg izjednačenja podudaraju, pa se procijenjene vrijednosti raspona stupova i adicijske korekcije daljinomjera, nakon trećeg izjednačenja, mogu smatrati definitivnim vrijednostima.

Naprijed navedeni zaključak vidljiv je i iz tablice 3 (stupac 7), gdje su razlike između procijenjenih veličina za raspone stupova i adicijske korekcije daljinomjera dobivene nakon drugog i trećeg izjednačenja zanemarivo male (do 0,01 mm). To je još jedan dokaz da je iterativni postupak izjednačenja zaista konvergirao.

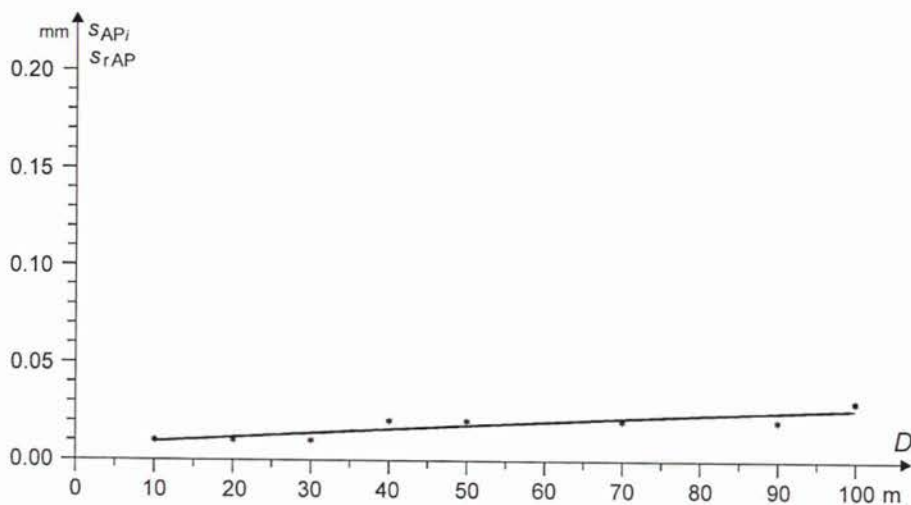
Prema standardnim odstupanjima s_{rDIII} , dobivenima iz raznih kombinacija izmjerenih duljina (slika 10 i jednačba 6), vidi se, da je za mjerne kampanje u Zagrebu Mekometrom ME 5000 postignuta vrlo visoka preciznost obostrano mjerenih duljina (do 100 m).

3.1.2. Procjena preciznosti određivanja razmaka stupova i adicijske korekcije na duljinama do 100 m

Standardna odstupanja s_{AP_i} s kojima su procijenjene vrijednosti raspona stupova i adicijske korekcije prikazana su u tablici 3 (stupac 6), a grafički na slici 11. Iz standardnih odstupanja s_{AP_i} može se zaključiti da je za mjerne kampanje u Zagrebu postignuta vrlo visoka preciznost procjene vrijednosti raspona stupova i adicijske korekcije.

Tablica 3. Standardna odstupanja i razlike između procijenjenih vrijednosti razmaka stupova (do 100 m) kao i adicijske korekcije nakon I., II. i III. izjednačenja.

Rasponi između stupova	Približni raspon m	I. izjednač. Stand. odst. mm	II. izjednač. Stand. odst. mm	Razlika II.-I. izjednač. mm	III. izjednač. Stand. odst. s_{AP_i} mm	Razlika III.-II. izjednač. mm
1	2	3	4	5	6	7
11A-7A	10	0,04	0,02	+0,03	0,01	0,00
11A-6A	20	0,04	0,02	+0,02	0,01	-0,01
11A-5A	30	0,04	0,02	+0,01	0,01	-0,01
11A-4A	40	0,04	0,02	+0,07	0,02	0,00
11A-3A	50	0,05	0,03	+0,05	0,02	0,00
11A-2A	70	0,05	0,03	+0,04	0,02	+0,01
11A-1A	90	0,06	0,03	+0,02	0,02	0,00
11A-0	100	0,06	0,03	+0,05	0,03	0,00
Adicijska korekcija	0,03 mm	0,03	0,02	+0,01	0,01	0,00

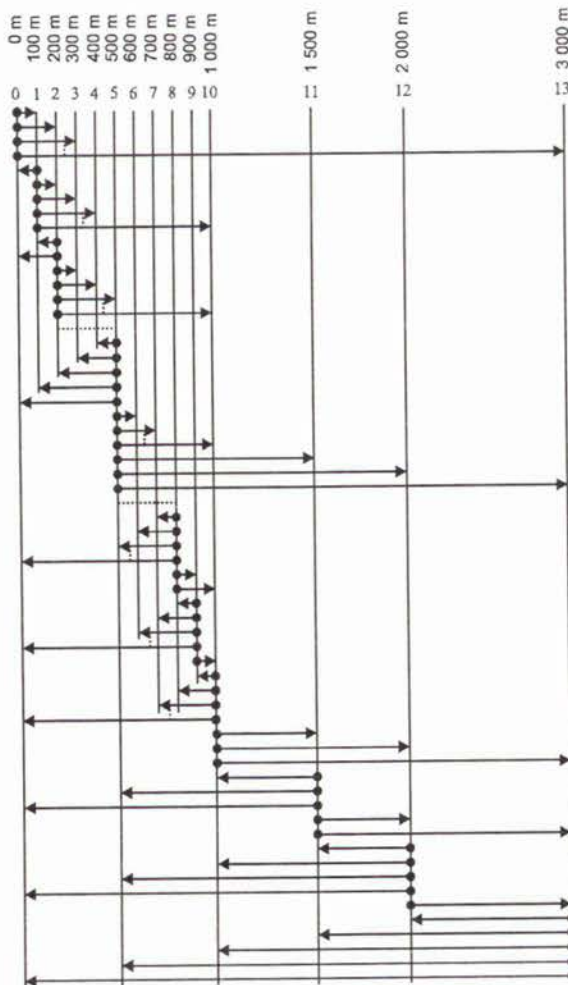


Slika 11. Standardna odstupanja s_{AP_i} s kojima su određeni rasponi stupova na duljinama do 100 m i regresijski polinom s_{rAP} .

U prospektu za Mekometer ME 5000 navodi se da je preciznost daljinomjera 0,02 mm, mjerna nesigurnost (na duljinama do 24 m) 0,03 mm, i da je točnost prisilnog centriranja s originalnim priborom tvornice Kern 0,03 mm. Usporedbom procjene standardnih odstupanja određivanja raspona stupova na bazi u Zagrebu (slika 11) s podacima navedenima u prospektu, može se zaključiti da je postignuta vrlo visoka preciznost mjerenja i rezultata.

3.2. Mjerenje duljina većih od 100 m

Pri mjerenjima duljina većih od 100 m Mekometrom ME 5000, izmjerene su sve moguće kombinacije duljina (naprijed i natrag) između stupova 0, 1, 2, ..., 10 (slika 12) i sve moguće kombinacije između stupova 0, 5, 10, 11, 12, 13. Mjerenja su izve-



Slika 12. Raspored stupova na duljinama od 100 do 3000 m, s naznakom koje su duljine mjerene.

dena u razdoblju od 22. 09. do 5. 10. 1996. godine. Izmjerene su ukupno 134 duljine, tj. 67 duljina naprijed i natrag. Svaka je duljina mjerena najmanje dva puta, a ondje gdje su razlike bile veće i tri do četiri puta. Za vrijeme mjerenja umjerenim psihrometrima i digitalnim aneroidima mjereni su temperatura, tlak i vlažnost zraka uz daljinomjer i reflektor, a na velikim duljinama i na do četiri dodatna mjesta, pravilno raspoređena duž baze, da bi se mogao što bolje uzeti u obzir njihov utjecaj duž putanje svjetlosti na rezultate mjerenja.

Sve izmjerene duljine korigirane su za utjecaj atmosfere, izvršena je redukcija na pravac kroz stupove baze 0 i 10 te svedene na duljinu luka na srednjoj nadmorskoj visini baze 110,00 m.

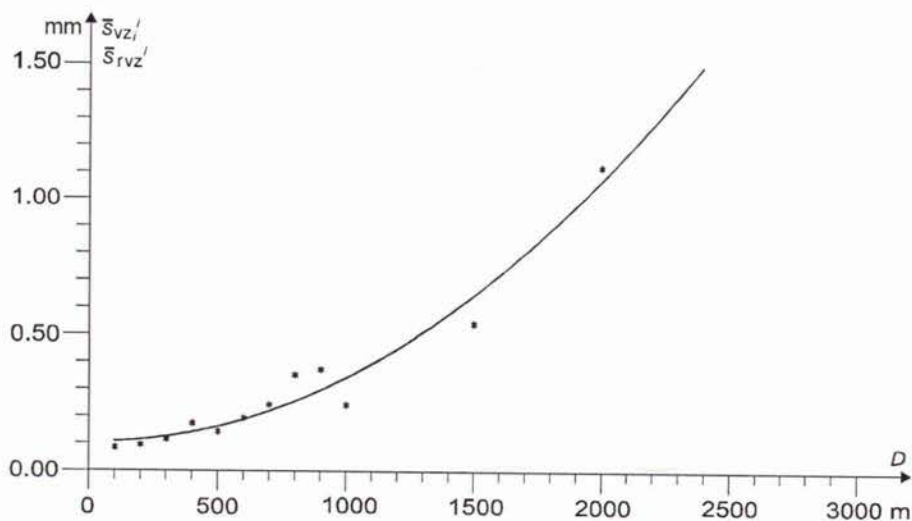
3.2.1. Procjena preciznosti mjerenja duljina većih od 100 m

Postupci računanja najbolje procijenjenih vrijednosti udaljenosti između stupova na duljinama većim od 100 m, adicijske korekcije daljinomjera i procjene preciznosti mjerenih i izračunatih veličina, isti su kao i kod duljina do 100 m.

Regresijski polinom s'_{rvz} za standardna odstupanja sredina duljina iz mjerenja naprijed i natrag (slika 13), za duljine veće od 100 m, iznosio je:

$$s'_{rvz} = 0,147 \text{ mm} - 0,013 \text{ mm} \cdot D_{\text{km}} + 0,349 \text{ mm} \cdot D_{\text{km}}^2, \quad (7)$$

gdje je D_{km} duljina u kilometrima.

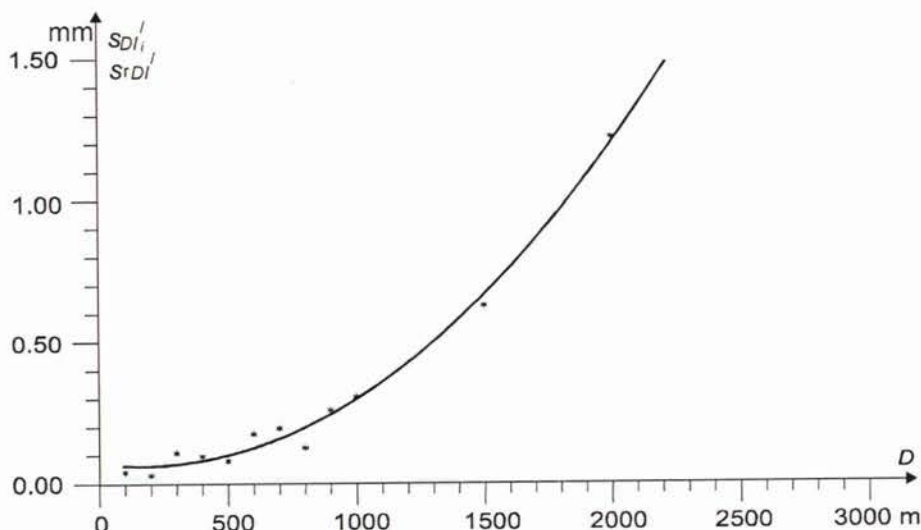


Slika 13. Standardna odstupanja sredina duljina i regresijski polinom s'_{rvz} za duljine od 100 m do 3000 m.

Na duljinama većim od 100 m (od stupa 0 do 13), u izjednačenje su uzete u obzir sve izmjerene duljine osim duljine mjerene u jednom smjeru od stupa 0 do stupa 12, koja je bila grubo pogrešno izmjerena.

Pomoću procijenjenih popravaka \hat{v} , dobivenih nakon I. izjednačenja, procijenjena su standardna odstupanja sredina duljina (iz mjerenja naprijed i natrag) s_{DI_i} iz različitih kombinacija duljina, za pojedine grupe mjerenja $D_i = 100$ m, 200 m, 300 m ... do 2000 m, analogno kao i kod kratkih duljina. Iz tako dobivenih standardnih odstupanja, nakon prvog izjednačenja s_{DI_i}' , postavljen je regresijski polinom (slika 14):

$$s_{rDI_i}' = 0,072 \text{ mm} - 0,115 \text{ mm} \cdot D_{\text{km}} + 0,340 \text{ mm} \cdot D_{\text{km}}^2. \quad (8)$$



Slika 14. Standardna odstupanja s_{DI_i}' s kojima su određene sredine duljina dobivene iz različitih kombinacija izmjerenih duljina, nakon prvog izjednačenja, na duljinama većima od 100 m i regresijski polinom s_{rDI_i}' .

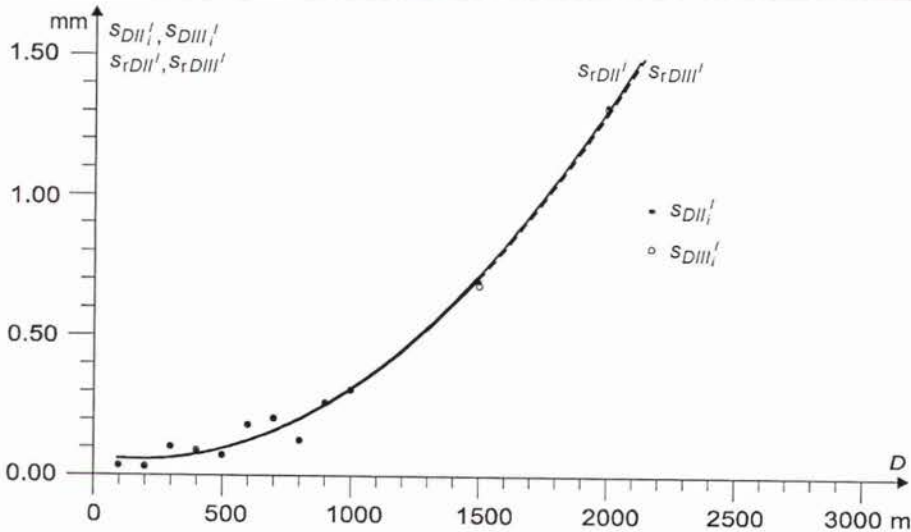
Nakon ponovljenog izjednačenja (II. izjednačenje), izračunata su standardna odstupanja s_{DII_i}' i postavljen regresijski polinom (slika 15):

$$s_{rDII_i}' = 0,071 \text{ mm} - 0,132 \text{ mm} \cdot D_{\text{km}} + 0,371 \text{ mm} \cdot D_{\text{km}}^2. \quad (9)$$

Zatim je provedeno i treće izjednačenje, izračunana su nova standardna odstupanja s_{DIII_i}' i regresijski polinom s_{rDIII_i}' (slika 15):

$$s_{rDIII_i}' = 0,071 \text{ mm} - 0,131 \text{ mm} \cdot D_{\text{km}} + 0,375 \text{ mm} \cdot D_{\text{km}}^2. \quad (10)$$

Pretpostavljeni model računanja standardnih odstupanja mjerenja duljina nakon drugog izjednačenja s_{DII_i}' dobro se slagao s izračunanim vrijednostima nakon trećeg izjednačenja s_{DIII_i}' (slika 15), pa se procijenjene vrijednosti za raspone stupova i adicijsku korekciju dobivene nakon trećeg izjednačenja, mogu smatrati definitivnim vrijednostima.



Slika 15. Standardna odstupanja $s_{DII_i'}$ i $s_{DIII_i'}$ s kojima su određene sredine duljina dobivene iz različitih kombinacija izmjerenih duljina, nakon drugog i trećeg izjednačenja, na duljinama većima od 100 m i regresijski polinomi $s_{rDII_i'}$ i $s_{rDIII_i'}$.

To se također vidi i iz tablice 4 (stupac 7) gdje su razlike između procijenjenih veličina raspona stupova i adicijske korekcije nakon III. i II. izjednačenja zanemarivo male (manje od 0,02 mm). Iz toga slijedi da je i taj iterativni postupak izjednačenja zaista konvergirao.

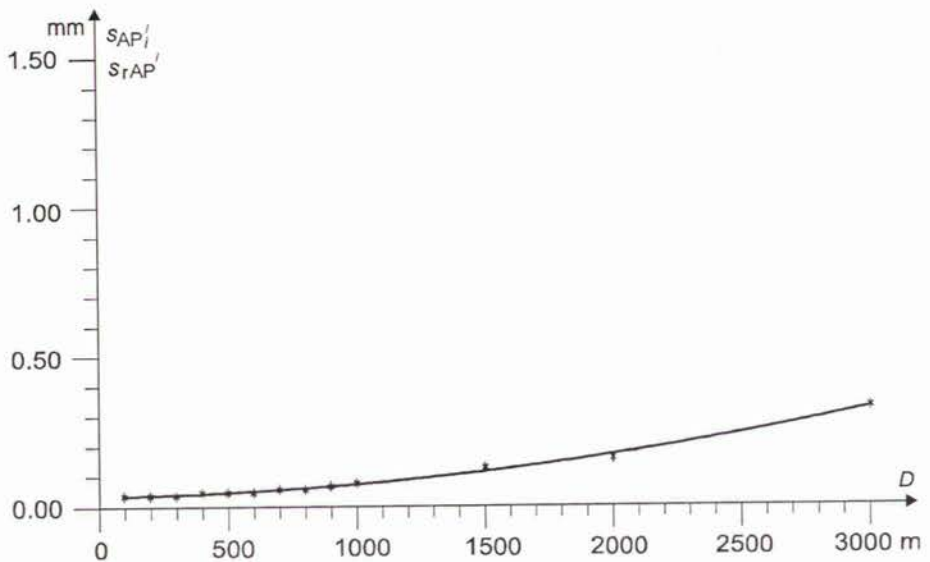
3.2.2. Procjena preciznosti određivanja razmaka stupova i adicijske korekcije na duljinama većima od 100 m

Standardna odstupanja $s_{AP_i'}$ kojima su procijenjene vrijednosti raspona stupova i adicijske korekcije prikazana su u tablici 4 (stupac 6), a grafički na slici 16. Iz standardnih odstupanja $s_{AP_i'}$ može se zaključiti da je za mjerne kampanje u Zagrebu postignuta vrlo visoka preciznost procjene vrijednosti raspona stupova i adicijske korekcije.

U prospektu za Mekometer ME 5000 navodi se da je preciznost tog daljinomjera 0,02 mm, a mjerna nesigurnost (0,2 mm + 0,2 ppm). Usporedbom postignutih standardnih odstupanja mjerenja na zagrebačkoj bazi s podacima navedenim u prospektu, može se zaključiti da je postignuta vrlo visoka preciznost mjerenja. S obzirom da je na bazi Ebersberg Forst određivanje mjerila skale izvršeno sa standardnim odstupanjem 0,11 ppm, može se približno procijeniti da je za vrijeme mjerne kampanje postignuta mjerna nesigurnost mjerenja duljina od 0,06 mm na 100 m i 0,3 mm na 1000 m, a raspona stupova od 0,04 mm na 100 m i 0,2 mm na 1000 m.

Tablica 4. Standardna odstupanja i razlike između procijenjenih vrijednosti razmaka stupova (većih od 100 m) kao i adicijske korekcije nakon I., II. i III. izjednačenja.

Rasponi između stupova	Približni raspon m	I. izjednač. Stand. odst. mm	II. izjednač. Stand. odst. mm	Razlika II.-I. izjednač. mm	III. izjednač. Stand. odst. s_{APi}' mm	Razlika III.-II. izjednač. mm
1	2	3	4	5	6	7
0-1	100	0,04	0,04	+0,01	0,04	0,00
0-2	200	0,04	0,04	+0,01	0,04	0,00
0-3	300	0,05	0,04	+0,02	0,04	0,00
0-4	400	0,05	0,05	+0,01	0,05	+0,01
0-5	500	0,05	0,05	+0,02	0,05	0,00
0-6	600	0,06	0,05	+0,02	0,05	0,00
0-7	700	0,06	0,06	+0,03	0,06	0,00
0-8	800	0,06	0,06	+0,02	0,06	0,00
0-9	900	0,07	0,07	+0,01	0,07	0,00
0-10	1000	0,08	0,08	+0,01	0,08	+0,01
0-11	1500	0,12	0,13	+0,03	0,13	+0,01
0-12	2000	0,15	0,16	+0,09	0,16	+0,01
0-13	3000	0,24	0,31	+0,13	0,33	+0,02
Adicijska korekcija	0,02 mm	0,02	0,02	0,00	0,02	0,00



Slika 16. Standardna odstupanja s_{APi}' s kojima su određeni rasponi stupova na bazi na duljinama većima od 100 m i njihov regresijski polinom s_{rAPi}' .

4. Povezivanje mjerenja na bazi za umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera u Münchenu i Zagrebu

Iz mjerenja duljina na bazi Ebersberger Forst, prije i nakon mjerne kampanje u Zagrebu, dobivena je srednja vrijednost za mjerilo skale daljinomjera Mekometer ME 5000 br. 357003 (uzimajući u obzir adicijsku korekciju određenu u Zagrebu):

0,999 999 94.

S tim mjerilom skale pomnožene su procijenjene vrijednosti raspona stupova baze u Zagrebu, dobivene nakon III. izjednačenja, za duljine do 100 m i duljine veće od 100 m.

5. Zaključak

Na temelju izloženoga vidi se da je pri povezivanju baze u Münchenu (Ebersberger Forst) i baze u Zagrebu postignuta izrazito visoka preciznost mjerenja duljina, a vjerojatno i dobra mjerna nesigurnost. Na taj način Hrvatska je vrlo uspješno, preko baze u Münchenu, uključena u svjetski mjerni sustav za mjerenje velikih duljina (do 3000 m), a zagrebačka baza postala je primarni etalon za mjerenja velikih duljina u Hrvatskoj.

ZAHVALA. Zahvaljujemo Technische Universität München na suradnji i Državnoj geodetskoj upravi Republike Hrvatske na financiranju ovoga značajnog projekta, kojim je i Hrvatska uključena u svjetski mjerni sustav za mjerenje velikih duljina.

Literatura

- Herzog, H. (1964): Die Interferenzmessungen 1963 mit dem Väisäläkomparator auf der Münchner Normalstrecke. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, br. 114.
- Honkasalo, T. (1950): Measuring of the 864 m-long Nummela Standard Base line with the Väisälä Light Interference Comparator and some Investigations into Invar Wires, Veröff. des Finn. Geod. Inst., br. 37, Helsinki.
- Joeckel, R., Stober, M. (1991): Elektronische Entfernungsmessung. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- Jokela, J., Poutanen, M. (1998): The Väisälä Baselines in Finland. Veröff. d. Finn. Geod. Instituts, br. 127.
- Kneissl, M., Einhorn, G. (1959): Ergebnisse der Interferenzmessungen 1958 mit dem "Väisälä" – Komparator auf der Münchner Normalstrecke, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- Narodne novine (1994a): Zakon o mjerneoj djelatnosti, br. 11, 252-257.
- Narodne novine (1994b): Naredbe o vrstama mjerila za koje se provodi mjeriteljski nadzor, br. 93, 2615.

- Narodne novine (1996): Naredba o razdobljima za ponovno ovjeravanje mjerila, br. 50, 2159-2162.
- Novaković, G., Džapo, M., Lasić, Z. (1985): Prvo mjerenje duljine kalibracijske baze Geodetskog fakulteta u Zagrebu invarskim žicama, Geodetski list, br. 10-12, 291-295.
- Maurer, W., Schnädelbach, K. (1978): Ein neues Frequenzmessverfahren für das Mekometer ME 3000, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, br. 10, 350-355.
- Schnädelbach, K. (1981): Zur Reduktion von Entfernungsmessungen mit dem Mekometer ME 3000, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, br. 4, 145-149.
- Solarić, N., Solarić, M., Benčić, D. (1992): Projekt i izgradnja kalibracijske baze Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Geodetski list, br. 1, 7-27.
- Solarić, N., Lapaine, M., Novaković, G. (2001): Ispitivanje preciznosti daljinomjera Mekometer ME 5000 na kalibracijskoj bazi u Zagrebu (u pripremi za tisak).
- Väisälä, Y. (1930): Anwendung der Lichtinterferenz bei Basismessungen, Veröff. des Finn. Geod. Inst., br. 14, Helsinki.
- Zetsche, H. (1979): Elektronische Entfernungsmessung, Konrad Wittwer, Stuttgart.

Connection of Baselines for Testing and Calibration of Electrooptical Distance Meters in Munich and Zagreb

ABSTRACT. The paper describes the connection of baselines for testing and calibration of electrooptical distance meters in Zagreb and Munich (Ebersberger Forst) intended for the transfer of scales in distance measurement. The baseline in Munich belongs to the system of world baselines that has been measured with light interference comparator Väisälä being the most accurate method for measuring distances up to 1000 m. Apart from that, the Munich baseline is connected with the others baselines for electrooptical distance meters in Germany, Canada, Hungary, Austria and Switzerland. In that way, Croatia has been included into the world measuring system in measurements of large distances, too, and baseline at Zagreb became primary etalon for Croatia.

Key words: baseline, electrooptical distance meters.

Primljeno: 2001-3-5