

UDK 528.089.62:528.517:378.4(497.13 Zagreb)
Originalni znanstveni članak

PROJEKT I IZGRADNJA KALIBRACIJSKE BAZE GEODETSKOG FAKULTETA SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

Nikola SOLARIĆ, Miljenko SOLARIĆ, Dušan BENCIC — Zagreb*

SAŽETAK: Kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu izgrađena je za potrebe kalibriranja elektrooptičkih daljinomjera, ispitivanja točnosti novih tipova daljinomjera i postizanja jednoga zajedničkog mjerila pri mjerenju duljina do 6000 m na području Hrvatske. Pri projektu kalibracijske baze posebna je pozornost posvećena analizi rasporeda stupova, tako da rasponi stupova na bazi omogućuju ispitivanje gotovo svih pogrešaka elektrooptičkih daljinomjera poznatih u literaturi, a prema onom što je nama poznato, ovo je najdulja kalibracijska baza i s najvećim brojem stupova.

1. UVOD

Serijska proizvodnja prvih malih elektrooptičkih daljinomjera, koji su se mogli primijeniti u svakodnevnoj geodetskoj praksi, počela je približno 1968. godine — Wild Di 10, Zeiss SM 11, Kern DM 1000 (Strasser 1968, 1969; Leitz, Bornfeld 1968; Münch 1973; Aeschlimann 1974). Pojavom prvih malih elektrooptičkih daljinomjera pojavio se je problem kalibracije i metoda ispitivanja nelinearnosti »podjele« daljinomjera, te je o tom objelodanjeno više radova (Pauli 1968, 1970; Schwendener 1971; Halmos, Kadar 1972, 1976; Aeschlimann, Stocker 1975; Rüeger 1975, 1976, 1978; Bradsel 1977; Ashkenazi, Dodson 1977; Goretzki 1977; Jakob 1976; Witte, Frölich 1978; Herzog 1978; Zetsche 1979; Kahmen 1978; Zeiske 1980; Deumlich 1988, i dr.).

U teodolita, opažanjem u dva položaja durbina teodolita i pomicanjem limba između girusa uz pažljivo horizontiranje teodolita, ili uzimajući u obzir očitavanje alhidadne libele, otklanja se većina pogrešaka pri mjerenju kutova. Stoga nije bezuvjetno nužno kalibrirati teodolit. Za razliku od tog, u daljinomjera, opažanjem u dva položaja daljinomjera ili nekim drugim sličnim postupkom, ne mogu se otkloniti pogreške daljinomjera. Pogreške multiplikacijske konstante mogu se otkloniti mjerenjem na kalibracijskoj bazi na kojoj su poznati razmaci stupova, ili, što je još bolje, tako da se u mjernom laboratoriju (servisu) justiranjem dotjera frekvencija u daljinomjeru na onu

* Prof. dr. Nikola Solarić, prof. dr. Miljenko Solarić i prof. dr. Dušan Benčić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 41000 Zagreb, Kačićeva 26.

veličinu koja je u tog daljinomjera pri konstrukciji uzeta u račun. Pravilno određivanje adicijske »konstante«, periodijske pogreške i pogreške nehomogenosti faze daljinomjera, zbog kojih se pojavljuje nelinearnost »podjele« kojom daljinomjer mjeri duljine, ne može se obaviti u laboratoriju nego se to mora izvesti u uvjetima kakvi vladaju na terenu, tj. na kalibracijskoj bazi. Zato je kalibraciju i ispitivanje elektrooptičkih daljinomjera nužno obaviti na bazi na kojoj je poželjno da su duljine između stupova precizno određene invarskim žicama ili preciznim elektrooptičkim daljinomjerom, primjerice Mekometrom ME 5000.

Za ispitivanje i kalibraciju prvih elektrooptičkih daljinomjera korištene su i manje ispitne (test) mreže, ali su se za tu svrhu puno boljim pokazale kalibracijske baze, jer imaju više prekobrojnih mjerenja (Zetsche 1979, str. 219). Osim toga, mišljenje je autora da se na kalibracijskoj bazi može bolje ispitati linearnost »podjele« kojom daljinomjer mjeri duljine, preko gotovo čitavoga mjernog područja, počevši od kratkih duljina do dugih, što nije moguće na ispitnim mrežama.

Prema dostupnim informacijama, prve kalibracijske baze za ispitivanje elektrooptičkih daljinomjera napravljene su u blizini proizvođača daljinomjera, Wilda, Kerna i drugih (Schwendener 1971, Aeschlimann 1974). U Engleskoj je prva baza napravljena 1977. godine u Nottinghamu (Ashkenazi, Dodson 1977) uz podršku dr. K. D. Froome i mr. R. H. Bradsell, koji su konstruirali tada najprecizniji elektrooptički daljinomjer Mekometar ME 3000, a koji su poznati i po najpreciznijem određivanju brzine svjetlosti u vakuumu. Prema podacima koje smo uspjeli skupiti u literaturi, napravljena je tablica 1, u kojoj je popis kalibracijskih baza s brojem stupova, maksimalnom duljinom, približnom godinom gradnje i literaturom u kojoj je taj podatak pronađen. U tablicu nisu unijete kalibracijske baze koje su stabilizirane kamenjem u ravnini zemlje, jer, kao što je to naveo Rüeger u svojoj knjizi, baze sa stupovima imaju prednost (Rüeger 1990, str. 196). Iz tablice 1. vidi se da *kalibracijska baza u Zagrebu ima najveću duljinu i znatno najveći broj stupova*, što omogućuje na njoj vrlo podrobna ispitivanja daljinomjera. *Osim toga, na njoj je predviđeno ispitivanje periodijske pogreške i pogreške nehomogenosti faze*, što na većem broju drugih baza nije.

Prije izradbe projekta kalibracijske baze u Zagrebu posjećene su i analizirani su detalji kalibracijskih baza i interferencijskih komparatora u:

- Potsdamu (Njemačka), u Zentralinstitut für Physik der Erde (interferencijski komparator) 1971. godine,
- Münchenu (Njemačka), u Deutsches Geodetisches Forschungsinstitut (interferencijski komparator) 1978. godine,
- Aarau (Švicarska), u tvrtki Kern za proizvodnju geodetskih instrumenata (kalibracijska baza) 1978. godine,
- Heerbruggu (Švicarska), u tvrtki Wild za proizvodnju geodetskih instrumenata (kalibracijska baza) 1978. godine,
- Logatecu u blizini Ljubljane, (komparator i ispitna mreža) 1980. godine.

Detalji uočeni za posjeta i razgledanja interferencijskih komparatora i kalibracijskih baza, uz proučavanje gotovo svih postavljenih baza publiciranih u literaturi, omogućili su da se učini odgovarajući projekt baze. Na uspješnost projektiranja je djelovalo i veliko iskustvo stečeno u tvornici Leica

TABLICA 1: Kalibracijske baze sa stupovima

Mjesto (država)	Broj stupova	Maks. duljina	Pribl. godina stabil.	Izvor literature
Heerbrugg-Wild (Švicarska)	7	990 m	1971.	(Schwendener 1971)
Ottawa (Kanada)	8	1300 m	1971.	(Bresse, Vamosi, 1990)
Aarau-Kern (Švicarska)	7	520 m	1974.	(Aeschlimann, Stocker 1975)
Nottingham (Engleska)	7	817 m	1977.	(Ashkenazi, Dodson 1977)
Logatec (Slovenija)	4 + test mreža	260 m	1977.	(Vodopivec 1977)
Hlohovec (Češko-Slovačka)	5	2549 m	1979.	(Abelovič et al 1990)
Priština (Srbija-Kosovo)	7	1800 m	≈ 1979.	(Milovanović 1984) (Kontić 1987)
Sydney (Australija)	8	980 m	prije 1980.	(Rüeger, Covelt 1980)
Neubiberg (Njemačka)	8	1080 m	1981.	(Caspary 1984)
Zagreb (Hrvatska)	25	3100 m (6000 m)	1982.	(Solarić N. 1982)
Graz (Austrija)	7	1080 m	1982.	(Reithofer 1985)
Gödöllö (Mađarska)	5	864 m	1986.	(Kääriäinen, et al 1988)
Cape Town (Južnoafrička Unija)	5	960 m	1986.	(Newling 1990)

(prije Kern) u Aarau (Švicarska), na tečaju za reparaturu Kernovih daljinomjera. Tijekom tog tečaja u tvornici saznalo se za brojne detalje o radu daljinomjera, koji nigdje u literaturi nisu opisani, nego su dio tvorničkih tajni.

2. POGRESKE NEHOMOGENOSTI FAZE I PERIODIJSKE POGRESKE

Na prvim elektrooptičkim daljinomjerima već su uočene pogreške nehomogenosti faze i periodijske pogreške, zbog kojih se pojavljuje nelinearnost »podjele« kojom daljinomjeri mjere duljine.

a) Pogreška nehomogenosti faze

Izvor pogreške nehomogenosti faze nalazi se u odašiljačkoj (luminiscentnoj) diodi, a i u prijemnoj fotodiodi. Ova pogreška objasnit će se na radu luminiscentne diode. Fronta elektromagnetskog vala (vala infrazraćenja) koja izlazi iz daljinomjera trebala bi teorijski biti ravnina (sl. 1), da duljina izmje-



Slika 1. Fronta vala kakva bi teorijski trebala biti, da daljinomjer nema pogrešaka i fronta kakva realno iz daljinomjera izlazi

rena daljinomjerom ne bi ovisila o tomu koji se dio fronte vala vraća u daljinomjer. To je teško postići, jer neki fotoni svjetlosti (infrazraćenja) izlijeću iz luminiscentne diode iz veće dubine i zaostaju za fotonima koji izlijeću s površine diode. Zato fronta vala svjetlosti koja izlazi iz daljinomjera nije ravnina nego je deformirana ploha i duljina što se dobije pomoću daljinomjera ovisi o tomu koji se dio fronte vala vraća u daljinomjer.

Ova pogreška uzrokuje da adicijska »konstanta« daljinomjera nije konstantna nego ovisi o duljini koja se mjeri. Osobito velike varijacije adicijske »konstante« daljinomjera nastaju na kratkim duljinama. Zato se i daljinomjeri moraju vrlo detaljno ispitati na duljinama do 100 m.

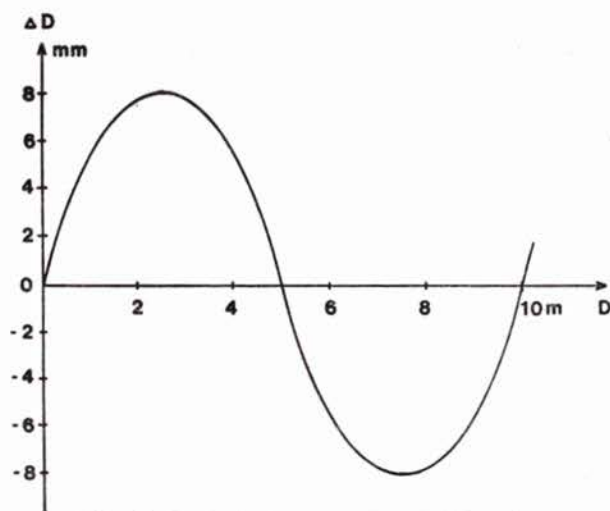
b) Periodijska pogreška

U različitim dijelovima daljinomjera ima signala koji su međusobno fazno pomaknuti, a i više signala različite frekvencije. Iako ti dijelovi daljinomjera nisu povezani žicom, događa se da se dio signala induktivnim putem (slično kao od radioodašiljača do radioprijamnika) prenosi iz jednog dijela u drugi dio daljinomjera, kamo to i ne bi trebalo. Ova pojava izaziva nastajanje periodijskih pogrešaka (sl. 2), koje se pojavljuju najjače s periodom poolvice temeljne valne duljine koju odašilje daljinomjer ($\lambda/2$). Pojavljuju se periodijske pogreške i s drugim periodima (Rüeger, Convell 1980), pa je zato potrebno ispitati daljinomjer preko cijelog dometa. Uzrok periodijskim pogreškama nalazi se i u smetnjama što nastaju zbog štetnih refleksa infrazraćenja na plohamo leća i prizama u daljinomjeru.

3. IZBOR LOKACIJE KALIBRACIJSKE BAZE

Pri izboru lokacije za kalibracijsku bazu pazilo se na sljedeće parametre:

- 1) da je zemljište vodoravno položeno ili lagano nagnuto (ili eventualno malo konkavno sa strelicom približno 1,5 m na 3000 m),



Slika 2. Periodijska pogreška daljinomjera

- 2) da je duljine veće od 2 km (jer su u vrijeme izradbe projekta za našu bazu elektrooptički daljinomjeri imali domet do 2 km), s mogućnošću eventualnog proširenja kad se dometi daljinomjera povećaju,
- 3) da je na geološki stabilnom terenu,
- 4) da je približno jednako zračenje tla pod sunčevim utjecajem (bez promjena dijelova terena sa sjenom i bez sjene),
- 5) da je vegetacija niska (niska trava),
- 6) da je ograničen pristup ljudima (da ljudi ne oštećuju stupove i ne presijecaju vizuru tijekom mjerenja),
- 7) da ima jednostavan pristup,
- 8) da uz bazu postoji put, za brži prijevoz reflektora i daljinomjera između stajališta,
- 9) da je po mogućnosti na terenu jednog vlasnika s kojim se dobro surađuje,
- 10) da nema u blizini dalekovoda i velikih radijskih i televizijskih odašiljača,
- 11) da nema opasnosti da će se između točaka baze izgraditi neki objekt.

Sve ove uvjete bilo je teško potpuno zadovoljiti, te je pri izboru učinjen određeni kompromis.

Što se tiče geoloških uvjeta za lokaciju kalibracijskih baza, idealni bi sastav bio s vapnencima i škriljcima visoke kvalitete. Tereni koji dolaze u obzir zbog svoje dobre građe su oni s poluvezanim pijeskom, šljuncima neocena visokoriječnih terasa, breče i vapnenjački sedimenti neogena (Ferenc 1978).

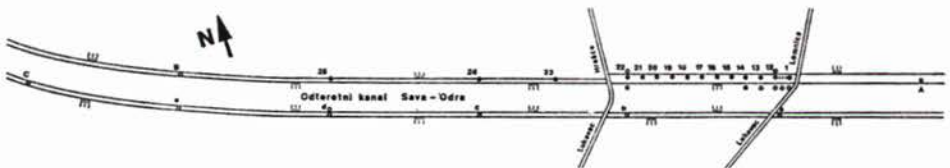
U blizini Zagreba nije pronađena optimalna lokacija, a u želji da je u okolini Zagreba moralo se je birati lokaciju i na terenu sa slabijom građom (nevezani pijesak i šljunak s glinom). Dolazile su u obzir sljedeće lokacije:

- 1) predjel uz autocestu Zagreb—Karlovac,
- 2) područje vodocrpilišta Mala Mlaka (Ferenc 1978),
- 3) blizina Bedekovčine (Solarić, N. 1979),

ali za njih nisu dobivene odgovarajuće dozvole.

Četvrta lokacija, koju je predložio doc. dr. Milivoj Junašević, bila je u blizini vodocrpilišta Mala Mlaka na nasipu oteretnoga kanala Sava-Odra pokraj Donje Lomnice i Lukavca (Velika Gorica). Kroz ovaj kanal ne protječe voda, samo se u slučaju opasnosti od poplave u Zagrebu kroz ovaj kanal propusti mali val vode. U zadnjih dvadesetak godina postojanja ovoga kanala kroz njega su prošla približno tri do četiri manja vala vode.

Prednosti su ove lokacije u tome što je od Geodetskog fakulteta Zagreb udaljena samo približno 25 km, a dostupna je automobilom. Kruna nasipa je gotovo u vodoravno položenoj ravnini (približno 1‰), trava se redovito kosi, moguć je prijevoz automobilom od stupa do stupa, i, što je bilo vrlo važno, svi stupovi nalaze se na posjedu jednog vlasnika. Osim toga, ne može se ponoviti sudbina velikogoričkog bazisa kad su između stupova, tj. na vizuri između njih, izgrađene neke kuće, te je tako praktički uništena. Zahvaljujući velikom razumijevanju naših kolega u Općem vodoprivrednom poduzeću za slivno područje Save iz Zagreba, direktora Roke Škegre, dipl. inž., potpisan je sporazum-ugovor o izgradnji stupova na nasipu. Glede stabilnosti terena, u svakom slučaju bilo bi sigurnije da to nije nasip, ali stariji, dosta odležali, nasip također je vrlo stabilan. Tako se, primjerice i kalibracijske baze tvornice Wild u Heerbruggu i tvornice Kern u Aarauu nalaze na nasipima uz rijeke Rajnu i Aare. Budući da nije pronađena lokacija koja zadovoljava sve uvjete, odlučeno je da se ipak na ovom terenu, koji nije specijalno stabilan, a zadovoljava gotovo sve ostale uvjete, izgradi kalibracijska baza s 25 stupova. Pritom je planirano da se rasponi stupova precizno mjere Mekometrom, približno svakih tri do pet godina, a prema potrebi i češće. Osim toga, planirano je u blizini baze na nekom još stabilnijem terenu od nasipa postaviti dva do tri stupa na duljini približno 3 km. Pronalaženje lokacije za tri stupa puno je lakše. Ta tri stupa moglo bi se smatrati stabilnim i na njima bi se mogao ispitati precizni elektrooptički daljinomjer Mekometar, kojim bi zatim na bazi bili određeni rasponi između stupova. Do gradnje ovih triju stupova na stabilnom terenu do sada nažalost nije došlo, ali oni danas više i nisu toliko potrebni, jer se, za razliku od Mekometra ME 3000, kod novog Mekometra ME 5000 frekvencija praktički jednostavno kontrolira s relativnom točnošću boljom od 10^{-7} , a adicijska konstanta može se odrediti na kalibracijskoj bazi kad rasponi stupova nisu poznati. Osim toga, u Mekometru teorijski ne bi trebalo biti periodijske pogreške (Maurer et al. 1988).

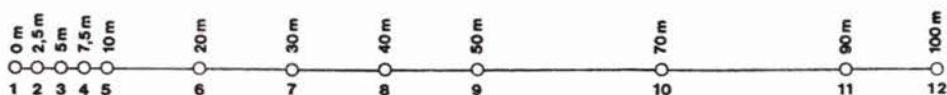


Slika 3. Raspored stupova kalibracijske baze na nasipu oteretnoga kanala Sava—Odra u blizini Donje Lomnice (puni kružić — stup baze, prazan kružić — betonski stupić u ravnini zemlje)

Na sjevernom nasipu oteretnoga kanala Sava-Odra (sl. 3), istočno od prijelaza Hrašće—Lukavec, kruna nasipa je široka 5,40 m i nasip je vrlo kvalitetan, visok 4 do 5 m, a 1982. godine bio je star približno deset godina. tj. prema mišljenju geomehaničara dosta odležao i stabiliziran (Verić 1981). Zapadno od prijelaza Hrašće—Lukavec kruna nasipa je uža 2,50 m, nasip nije tako kvalitetan kao onaj sa širim dijelom krune, te su na tom dijelu projektirana samo tri stupa. Nisu se postavljali stupovi baze na dijelu istočno od prijelaza Donja Lomnica—Lukavec, iako je nasip na tom dijelu vrlo kvalitetan i u pravcu je, jer se usporedno uz nasip, na udaljenosti oko 100 m, nalazi manji električni dalekovod. Na tom dijelu stabilizirana je samo jedna točka A u ravnini zemlje (sl. 3), te se na toj točki može postaviti stativ.

4. RASPORED STUPOVA

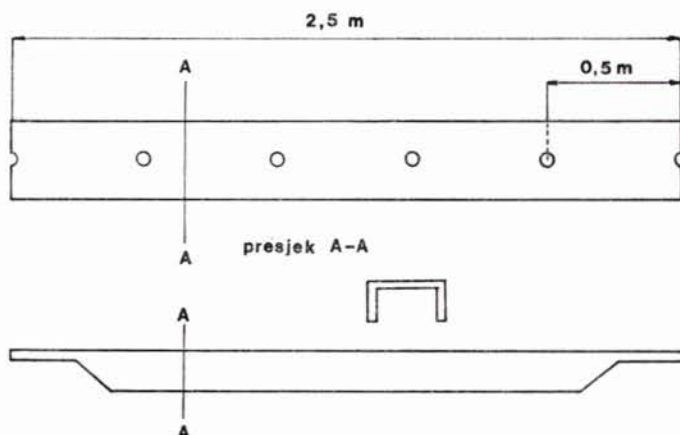
Prema prvom projektu rasporeda stupova u Zagrebu, stupovi su trebali biti na razmaku cijelog broja invarskih žica, tj. cijeli broj puta 24 m (Ferenc 1978), tako da je jednostavnije mjerenje invarskim žicama. Proučavajući literaturu, zaključeno je da bi trebalo projektirati novi raspored stupova (Solarić 1981). Na to je osobito ukazivao rad (Rüeger 1976) u kojemu je utvrđeno da adicijska konstanta može biti pogrešna do 75% amplitude kratkoperiodijske pogreške, a i radovi (Pauli 1968, Aeschlimann, Stocker 1974), prema kojima je vrlo važno da je raspon stupova cijeli broj mjernih jedinica, tj. polovica valnih duljina daljinomjera. Stoga je 1980. godine napravljen novi projekt (Solarić 1981) pri kojemu se pazilo na to, a uz to i da se može ispitati i utjecaj periodijske pogreške i pogreške nehomogenosti faze. Kao što je već navedeno, zbog pogrešaka nehomogenosti faze daljinomjera vrlo važno je podrobno ispitati daljinomjer na kratkim duljinama, do 100 m. U tom području adicijska konstanta, zbog navedene pogreške, vrlo često znatno varira, te je zato odlučeno da se na udaljenosti do 100 m projektira dvanaest stupova (stupovi 1 do 12 na sl. 4).



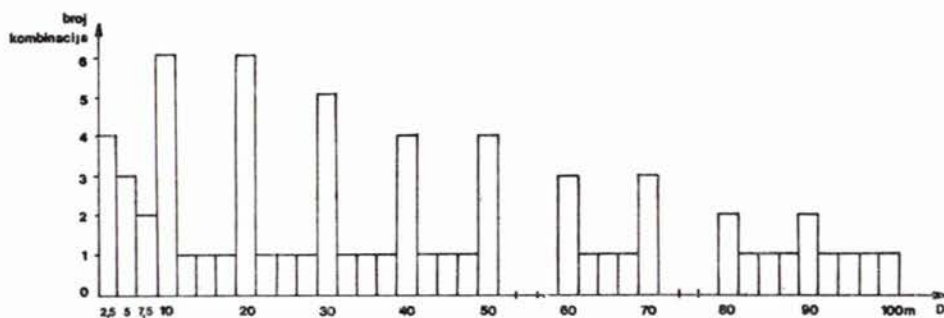
Slika 4. Raspored stupova baze za ispitivanje periodijske pogreške daljinomjera (stupovi 1 do 5) i za ispitivanje na kratkim duljinama (stupovi 1 do 12)

Stupovi 1 do 5 služe za postavljanje tračnica (sl. 5) s otvorom za pomicanje reflektora svakih 0,5 m pri ispitivanju periodijske pogreške (koja se obično ispituje na duljinama većim od 90 m tj. sa stupa 12). Prihvaćeno je rješenje s relativno velikim brojem stupova, jer nisu postojali izgledi da će se moći u skorij budućnosti nabaviti interferencijski komparator, a s druge strane ne mora se svaki put na teren nositi interferencijski komparator, što može biti nesporno pri prijevozu i zahtijevati veći utrošak vremena.

Iz histograma na slici 6. vidi se da se i bez tračnica mogu vrlo podrobno ispitati i kalibrirati daljinomjeri na kratkim duljinama do 100 m, gotovo svakih 2,5 m, osim između 50—60 m i 70—80 m. S pomoću tračnica daljino-



Slika 5. Tračnice za postavljanje reflektora



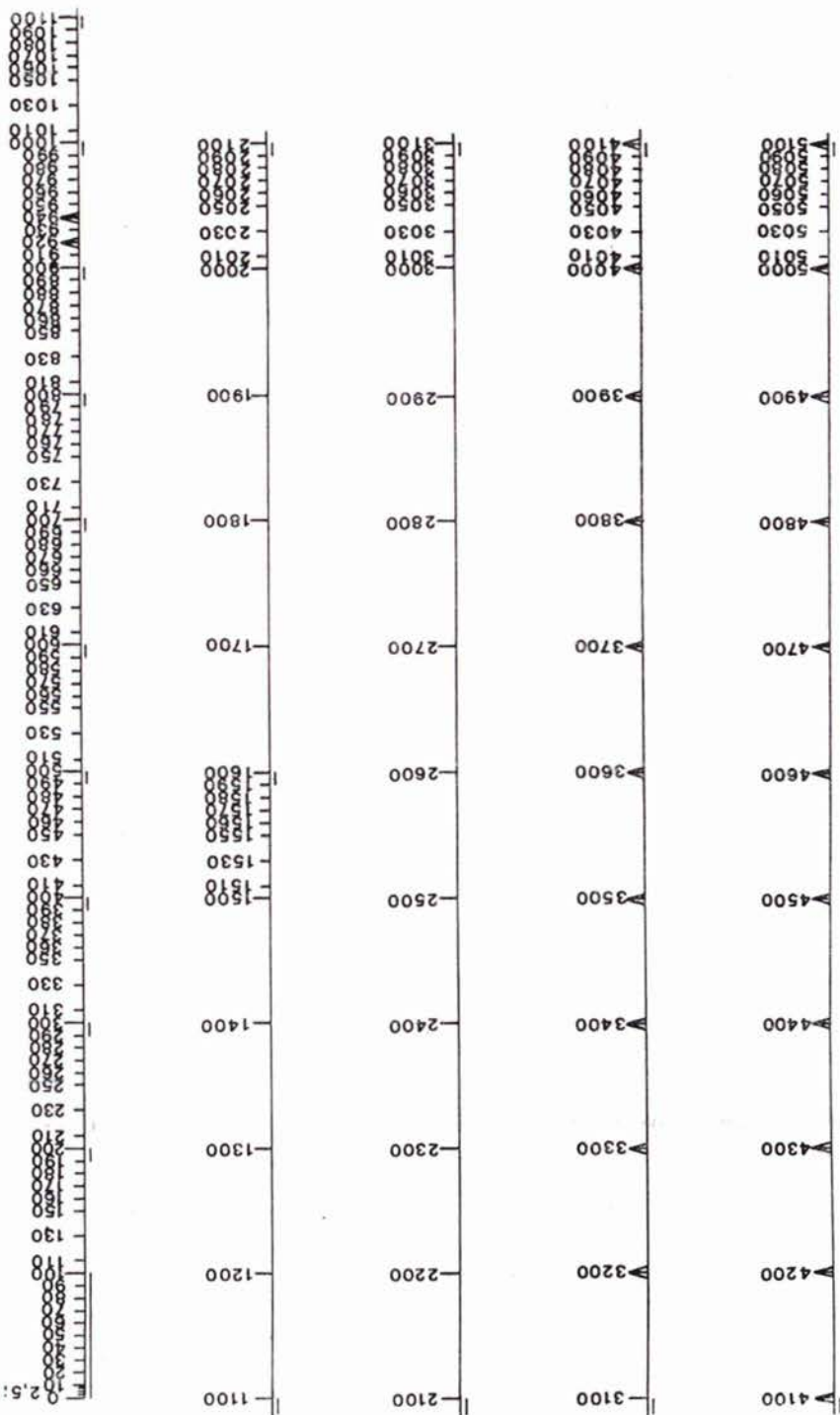
Slika 6. Histogram broja kombinacija duljina koje se mogu mjeriti sa stupova 1 do 12

mjer se može ispitati još podrobnije svakih 0,5 m osim između 50—60 i 70—80 m, a to potpuno zadovoljava i najpodrobnija ispitivanja daljinomjera. Za ispitivanje i kalibraciju daljinomjera na većim duljinama, od 100 m do 3100 m, postavljeni su stupovi 12 do 25, visoki približno 1,2 m (sl. 3), a, zatim, da se poveća domet do 6900 m, projektirana su dodatno tri betonska stupića (u ravnini zemlje) A, B i C.

Na slici 7. predložene su sve moguće duljine, koje se mogu ostvariti između svih stupova i stabiliziranih betonskih stupića u ravnini zemlje. Iz tog se prikaza vidi da se mogu izmjeriti 172 različite duljine (bez tračnica) i 1177 duljina (s tračnicama). Nadalje, vidi se da se gotovo svakih 10 m može ispitati daljinomjer od 10—1000 m, 1500—1600 m, 2000—2100 m, 3000—3100 m, 4000—4100 m i 5000—5100 m, a svakih 100 m do 5000 m. Periodijsku pogrešku moguće je kontinuirano ispitivati unutar prvih 100 m, svakih 100 m do 1100 m, svakih 500 m između 1100 i 2100 m, a preko 2100 m svakih 1000 m. Iz prethodnog objašnjenja vidi se da je ova kalibracijska baza projektirana tako da je prikladna i za najpodrobnija ispitivanja i kalibraciju elektrooptičkih daljinomjera.

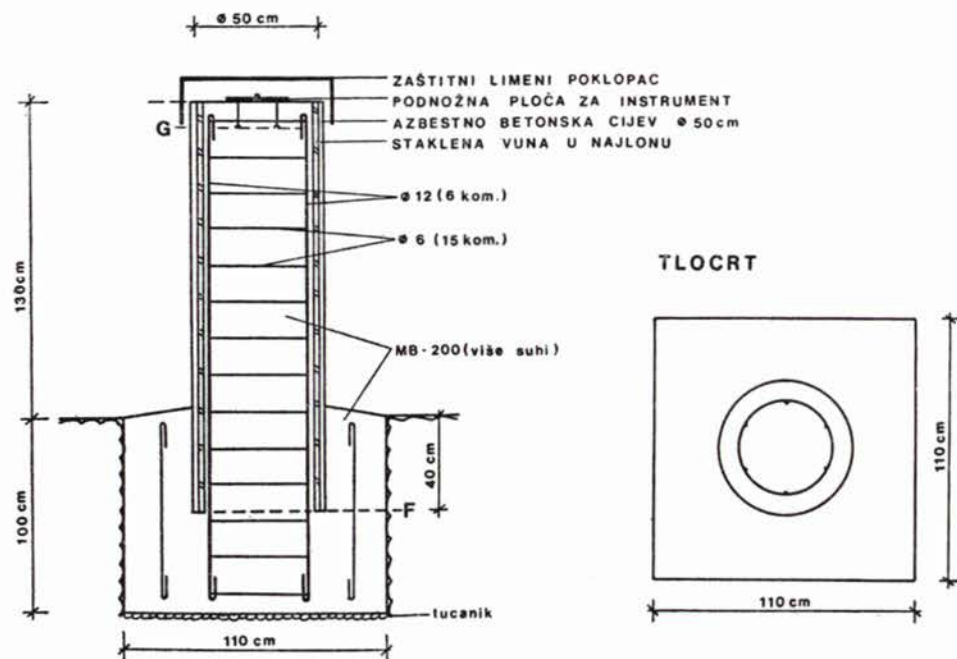
Slika 7. Duljine koje je moguće mjeriti između stupova 1—25 i stabiliziranih betonskih stupića u ravnini zemlje A, B i C

2,5 : 5 : 7,5



5. PROJEKT IZGRADNJE STUPOVA BAZE

Za dio nasipa s krunom širine 5,40 m predviđeno je da se stupovi baze naprave kao što je to prikazano na slici 8 (Verić 1981). Za termičku izolaciju



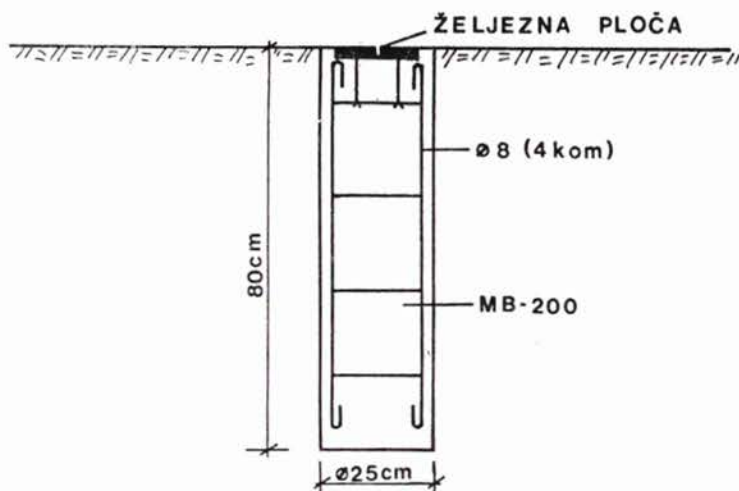
Slika 8. Stupovi baze 1 do 22 (na širem dijelu nasipa). Točka do koje je betonirano u prvoj fazi betoniranja označena je slovom F, a točka do koje je betonirano u drugoj fazi s G

stupa predviđena je staklena vuna, u sintetičnoj foliji, jer su ispitivanja pokazala da se zbog zagrijavanja stupa s jedne strane od sunca stup može svi-nuti i 1 mm (Kobold 1958, 1961), ili 0,6 mm (Rüeger 1983).

Kako je prema ugovoru s Općim vodoprivrednim poduzećem kruna nasipa trebala ostati slobodna (za eventualni prijevoz kamionima za vrijeme poplave), stupovi 23, 24 i 25 na užem dijelu nasipa morali su biti postavljeni na rub krune nasipa (Verić 1981). Iako to nije optimalno, nije se moglo izbjeći.

Da bi se mogli ispitivati daljinomjeri i na većim duljinama od 3100 m, stabilizirana su tri betonska stupića u ravnini zemlje (sl. 9), točke A, B i C (sl. 3).

Za utvrđivanje eventualnog pomicanja stupova u blizini podnožja nasipa uz važnije stupove 1, 12, 22, 24 i 25, stabilizirani su i betonski stupići u ravnini zemlje (sl. 9. i 3). Mjerenjem horizontalnih kutova, u više različitih epoha, sa stupa baze na neku daleku točku i na značku koja se postavlja na centar betonskog stupića u podnožju nasipa i uz izmjerenu duljinu od stupa do stupića može se odrediti pomak stupa. Da bi pogreška centriranja značke



Slika 9. Stabilizacija betonskih stupića u ravnini zemlje

što manje djelovala, razvijen je posebni adapter, tako da se preko njega (bez stativa) može pravilno centrirati značka.

Da bi se odredilo i eventualno naginjanje stupova uzduž baze, na stupovima 1, 9, 12, 13, 14, 22, 23, 24, 25 ubetonirane su na vrhovima tri metalne pločice na koje se može, preko adaptera, postaviti klinomjer, te se mjerenjem u više epoha može utvrditi eventualno naginjanje stupa.

Za određivanje slijeganja stupova, kao nivelmanski reperi služe centralni vijci na podnožnim pločama s tim da su izbrušeni u obliku polukugle (sl. 8) (prema prijedlogu prof. dr. Stjepana Klaka). Takvo povoljno rješenje nije primijećeno u literaturi pri opisu ostalih kalibracijskih baza.

Radi postizanja što većeg broja prekobrojnih neovisnih mjerenja i ispitivanja raznih utjecaja, stabilizirani su betonski stupići u ravnini zemlje i na usporednom južnom nasipu okomito na smjer baze nasuprot stupova 1, 12, 22, 24 i 25 (sl. 3, točke a, b, c, d i e).

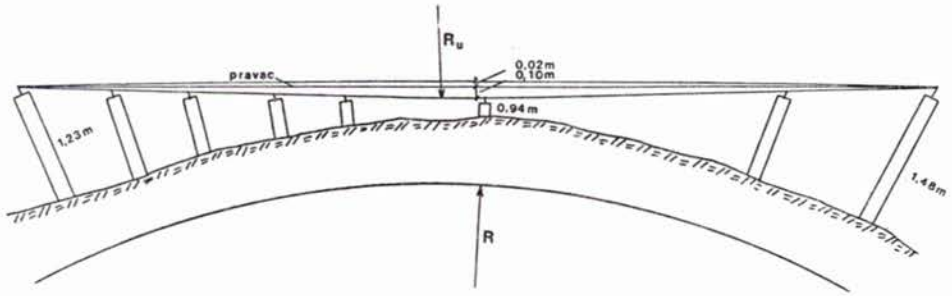
Hod vijka na podnožnim pločama stupova izabran je tako da se na njih mogu izravno centrirati (priviti) podnožne ploče Wildovih i Zeissovih instrumenata. Preko Zeissove podnožne ploče i adaptera konstruiranog u Zagrebu (Solarić, 1980) ili adaptera realiziranog u Ljubljani mogu se na stupu baze pravilno centrirati i Kernovi instrumenti. Na taj se način na kalibracijskoj bazi mogu praktično ispitivati daljinomjeri svih poznatih svjetskih tvrtki proizvođača geodetskih instrumenata.

Na stupovima 2, 3, 4 i 5 su specijalne podnožne ploče, koje se mogu malo pomicati u horizontalnom smjeru, tako da se između njih i stupa 1 mogu postaviti tračnice za ispitivanje periodijske pogreške, ako i dođe do eventualnog pomicanja nekog od tih stupova.

Pri gradnji stupova pazilo se na to da su svi stupovi 1 do 22 što točnije u pravcu. Pri ugradbi podnožnih ploča s centralnim vijkom u stup pazilo se da su one horizontalne, u pravcu baze (stup 1—stup 22), na projektiranoj udaljenosti od prvog stupa i projektiranoj visini s točnošću boljom od ± 1

do 2 cm. Sve te uvjete nije bilo lako zadovoljiti u isto vrijeme, ali uz trud i zalaganje to je učinjeno, te pri mjerenju duljina između stupova, na potezu od stupa 1 do stupa 22, neće trebati (pri točnostima i do 0,2 mm) uvoditi geometrijske redukcije na pravac baze (1—22).

Visine stupova projektirane su tako da su uvažavani visina terena, zakrivljenost Zemlje, normalni koeficijent refrakcije i da su svi vrhovi stupova u stanovitom blagom konkavnom luku sa strelicom 0,12 m (sl. 10).



Slika 10. Shema uzdužnog profila baze

Da bi se postigle optimalne visine stupova, napravljen je program »BAZA« za elektroničko računalo HP 9845 pomoću kojeg su izračunane visine stupova. Kao optimalno prihvaćeno je rješenje u kojeg je visina stupa 1 — 1,24 m, najnižeg stupa 17 — 0,94 m i zadnjeg stupa 25 — 1,48 m.

Visina stupa 25 viša je nego što je to pogodno za normalnoga visokog opažača, ali budući da je tako visok samo jedan stup s kojeg se rjeđe opaža, ovo rješenje je prihvaćeno, a niži opažatelj može eventualno pod noge postaviti poklopac za zaštitu vrha stupa. Budući da je daljinomjer najčešće približno 0,25 m iznad podnožne ploče stupa, vizura daljinomjera za normalne refrakcije minimalno je 1,2 m do najviše 1,7 m iznad terena, što je vrlo pogodno. Ljeti, za izrazito sunčanih dana, kada koeficijent refrakcije može biti $k = -5$ (Hübner 1978), vizura sa stupa 1 na stup 25 ide uza sam teren, ali na bazi će se moći mjeriti, jer su stupovi 23, 24 i 25 malo izvan pravca baze (stup 1 — stup 22). Takve vremenske prilike treba izbjegavati, jer tada vizura prolazi kroz slojeve različite temperature, tj. blizu terena ($\approx 0,1$ m) i na približno 1,50 m visine. Pri mjerenju temperature uz daljinomjer i reflektor u takvim vremenskim prilikama na bazi može nastati pogreška veća od 1°C , što na duljini 3000 m može izazvati pogrešku približno 3 mm, pa i više. Zato se preporuča da se u podne mjere duljine kraće od 1000 m, a ujutro i predvečer veće duljine. Ako se pri takvim uvjetima mjere duljina, temperatura i tlak zraka, osim uz daljinomjer i reflektor treba mjeriti i u sredini, na visini kroz koju približno prolazi vizura. Pritom treba uvesti i »drugu korekturu« brzine svjetlosti (Benčić 1990) za pola duljine.

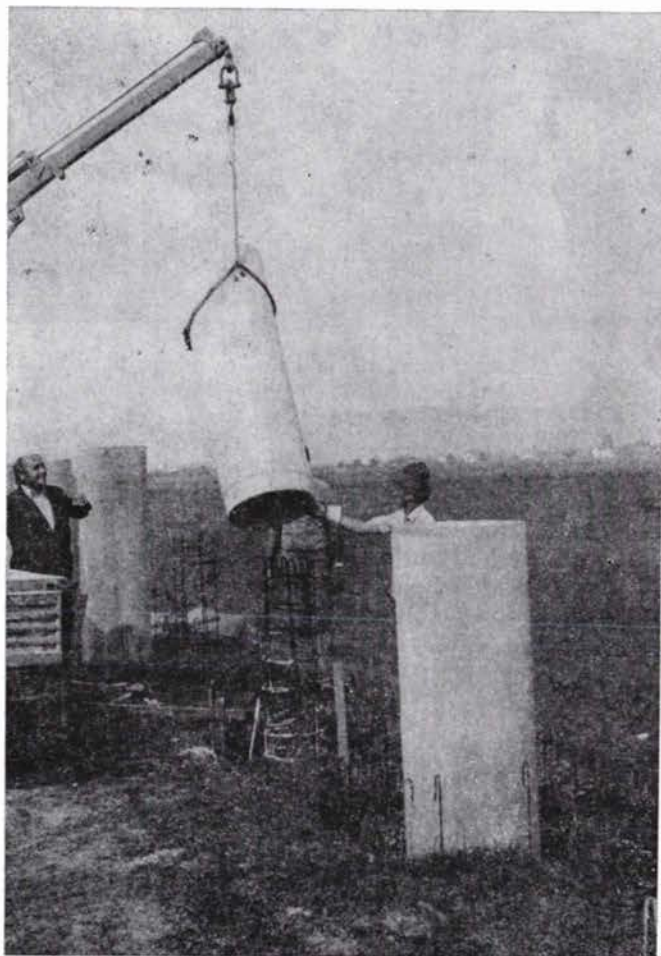
Budući da stupovi 23, 24 i 25 nisu u pravcu baze (stup 1 — stup 22), pri mjerenju s točnošću većom od ± 1 mm trebat će uvoditi horizontalne redukcije na pravac koji u horizontalnom smjeru prolazi kroz stup 1 i 22, a u vertikalnom kroz vrh stupa 1 i visinu stupa 25 (ako ga se zamisli projicirano na vertikalnu ravninu kroz stup 1 — stup 22).

6. GRADNJA STUPOVA BAZE

Nakon potpisivanja ugovora s Općim vodoprivrednim poduzećem Zagreb da Geodetski fakultet može na nasipu izgraditi stupove, trebalo je zahtijevati građevinsku dozvolu i dobiveno je rješenje o urbanističko-tehničkim uvjetima gradnje.

Prije gradnje stupova iskolčena su mjesta budućih stupova baze i bočni osiguravajući kolčiči, a pripremljeni su i zaštitni poklopci za stupove i podnožne ploče s centralnim vijkom za ugradbu u vrh stupova. Zatim su izrezane azbestno-betonske cijevi. Da bi vrh stupa dosegno projektiranu visinu, prema duljini cijevi određeno je u svakoj iskopanoj rupi do koje visine treba betonirati u prvoj fazi (točka F na sl. 8). Tijekom betoniranja u prvoj fazi postavljena je i centrirana željezna armatura.

U drugoj fazi teške azbestno-betonske cijevi podignute su dizalicom iznad željezne armature (sl. 11), cijevi su centrirane, postavljene vertikalno i



Slika 11. Dizalica za podizanje azbestno-betonske cijevi iznad željezne armature

na projektiranu visinu, a u njih je postavljena staklena vuna i sintetična folija (sl. 12). Nakon toga prišlo se betoniranju do točke G (sl. 8), a pritom se osobito pazilo na to da se beton dobro nabija.



Slika 12. Postavljanje staklene vune u cijevi (u kojima je tada bila samo željezna armatura)

U trećoj su fazi u azbestno-betonske cijevi postavljeni držači za zaštitni poklopac i podnožna ploča tako da zadovoljava sve navedene uvjete s visokom točnošću, što nije bilo lako postići. Zatim je na sam vrh stupa, uz unutarnji rub cijevi, postavljen tanak sloj stiropora tako da je azbestno-betonska cijev odvojena od unutarnjega betonskog dijela cijevi, a poslije toga prišlo se betoniranju s rjeđim betonom. Gradnja stupova obavljena je od srpnja do listopada 1982. godine.

7. ZAKLJUČAK

Određivanje adicijske »konstante« i nelinearnosti »podjele« kojom daljinomjer mjeri duljinu, zbog pogrešaka nehomogenosti faze i periodijskih pogrešaka, nije moguće obaviti u laboratoriju, nego se to mora obaviti na terenu, na kalibracijskoj bazi. Na ispitnim mrežama (kojih također ima dosta u svijetu) elektrooptički daljinomjeri ne mogu se detaljno ispitati preko cijelog dometa kao što je to moguće na bazi. Stoga kalibracijske baze, pogotovu one stabilizirane stupovima (a ne betonskim stupićima u ravnini zemlje), pružaju neusporedivo najpogodnije mogućnosti za pravilno kalibrira-

nje i ispitivanje linearnosti »podjele« daljinomjera. U Zagrebu je bilo pokušaja već od 1975. godine da se postavi kalibracijska baza. U obzir su dolazile četiri lokacije od kojih je ipak odabrana lokacija na nasipu oteretnoga kanala Sava-Odra u blizini Donje Lomnice (Velika Gorica). Ta lokacija zadovoljava gotovo sve uvjete, premda nije najpovoljnija što se stabilnosti tiče. Stoga je predviđeno da se osim baze na izrazito stabilnom terenu postave još tri stupa. Do danas ta tri stupa nisu postavljena, iako, s obzirom na to da se u Mekometru ME 5000 vrlo jednostavno može izmjeriti frekvencija i da on teorijski ne bi trebao pokazivati periodijske pogreške (Maurer et al. 1988), to više nije toliko nužno.

Pri projektiranju raspona stupova pazilo se na to da oni imaju cijeli broj mjernih jedinica (tj. polovica valnih duljina daljinomjera), a osim toga da se može ispitati i utjecaj periodijske pogreške i pogreške nehomogenosti faze.

Da bi se daljinomjeri mogli ispitati što detaljnije na kratkim duljinama gdje pokazuju najveće varijacije u adicijskoj »konstanti«, postavljeno je na duljini do 100 m dvanaest stupova.

Na duljinama većim od 100 m do 1100 m daljinomjer se može ispitati sa stupova gotovo svakih 10 m, svakih 100 m od 1100 do 3100, a sa stativa do 5100 m, odnosno daljinomjer se može ispitati do maksimalne duljine 6000 m.

Na taj način stvorena je u Zagrebu mogućnost za detaljno kalibriranje elektrooptičkih daljinomjera, ispitivanje točnosti novih tipova daljinomjera, a, osim toga, omogućeno je *postizanje zajedničkog mjerila u Hrvatskoj* pri mjerenju velikih duljina do 6000 m. Od 1984. godine prema Zakonu o mjernim jedinicama (Službeni list FRJ, 1984, 9, str. 353—366) i Pravilniku o načinu na koji se ispituje tip mjerila (Službeni list SFRJ, 1984, 26, str. 736) do sada se jednom u godini moralo obaviti ispitivanje daljinomjera. Vjerojatno će u Hrvatskoj biti donijet sličan zakon i pravilnik, jer za razliku od teodolita u kojega se mjerenjem u dva položaja dubrina može otkloniti većina instrumentalnih pogrešaka, u daljinomjera tih mogućnosti nema, pa ga se *mora ispitati na kalibracijskoj bazi*. Takve kalibracije su nužne, pogotovu ako mjerenja treba obaviti s većom točnošću, primjerice pri montažnoj gradnji velikih građevinskih objekata. Proizvođači velikih gotovih građevinskih elemenata i graditelj temelja na terenu moraju imati jednako duljinsko mjerilo. U protivnom, mogu se pojaviti velike teškoće pri montaži i povećani troškovi pri gradnji.

Prvi dio kalibracijske baze u duljini 600 m izmjeren je 1983. godine invarskim žicama (kalibriranim u Sérvesu) s približnom relativnom točnošću $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ (Novaković et al. 1985), a cijela baza izmjerena je 1984. godine preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Mekometer ME 3000 s približnom točnošću $\pm 1 \cdot 10^{-6}$. Godine 1988. baza je izmjerena Mekometrom ME 5000 s relativnom točnošću $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ (Solarić et al. 1992). Nakon sljedeće serije preciznih mjerenja Mekometrom ME 5000, koja se uskoro planira, bit će analizirana i stabilnost stupova.

Do danas je na bazi kalibrirano približno trideset elektrooptičkih daljinomjera za koje su izdani nalazi kalibracije, a uskoro će trebati nešto poduzeti da se pravno, nakon kalibracije, može izdati certifikat. U tom smislu već se poduzimaju mjere preko Hrvatskoga mjeriteljskog društva.

Danas, nakon gotovo deset godina od gradnje stupova kalibracijske baze Geodetskog fakulteta u Zagrebu, kad se može dati dosta realna ocjena, može se kazati da je baza pravilno projektirana, osobito glede rasporeda stupova. *Nije poznato da je negdje drugdje postavljena baza s većim ili jednakim mogućnostima detaljnog ispitivanja i kalibriranja daljinomjera*, a na to ukazuju i odlični rezultati ispitivanja točnosti Mekometra ME 5000 (Solarić et al. 1992), ali i GPS-prijamnicima proizvodnje Ashtech (Bilajbegović, Solarić 1989).

ZAHVALA

Zahvaljujemo se Ministarstvu za znanost, tehnologiju i informatiku Hrvatske i bivšem SIZ-u III za znanost na financijskoj potpori, a prof. dr. Franji Veriću i mr. Mirjani Lovrinčić na besplatnoj geomehaničkoj ekspertizi (ocjeni) nasipa i preporuci kako da se stupovi stabiliziraju.

Posebice se zahvaljujemo direktoru Roki Škegri, dipl. inž. i svim kolegama iz Općega vodoprivrednog poduzeća, što su pokazali veliko razumijevanje, te dopustili gradnju stupova na njihovom nasipu oteretnoga kanala Sava-Odra, a doc. dr. Milivoju Junaševiću što je predložio ovu lokaciju za kalibracijsku bazu.

Zahvaljujemo se kolegi Stjepanu Domitranu, dipl. inž. što je omogućio posjet kalibracijskoj bazi tvornice Wild u blizini Heerbrugga, direktoru Deutsches Geodätisches Forschungsinstituta, dr. E. Reinhartu, što je omogućio posjet interferencijskom komparatoru u blizini Münchena i prof. dr. Florijanu Vodopivecu, što je pokazao ispitnu mrežu pokraj Logatca.

Zahvaljujemo se također na pomoći prof. dr. Stjepanu Klaku, doc. dr. Krsti Šimičiću, mr. Gorani Novaković, mr. Zlatku Lasiću, laborantu Damiru Višiću i pokojnom laborantu Zdravku Mihaliću.

LITERATURA

- Abelović, J.; Bucko, E.; Slaboch, V.; Sanda, V. (1990): EDM calibration in Czechoslovakia. Facilities, methods and results, FIG XIX international congress, Helsinki, Finland, 1990, 501.3/1–14.
- Aeschlimann, H. (1974): Kern DM 500, ein neues elektronisches Tachymeter. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 1974, 2, 57–61.
- Aeschlimann, H.; Stocker, R. (1975): Gerätefehler an elektrooptischen Distanzmessern. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 1975, Heft 2.
- Ashkenazi, V.; Dodson, A. H. (June 1977): The Nottingham Multi-Pillar Baseline. Journal of the Association of Surveyors in Civil Engineering, June 1977, 39–62.
- Benčić, D. (1990): Geodetski instrumenti, Školska knjiga, Zagreb 1990.
- Bilajbegović, A.; Solarić, M. (1991): Mogućnosti i stanje GPS tehnologije te rezultati ispitivanja prijemnika Ashtech na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta u Zagrebu. Geodetski list, 1991, 1–3, 25–34.
- Bradsell, R. H. (1977): A simple Calibrator for the Mekometer EDM Instrument. Paper presented to IAG-Symposium on EDM and Refraction. Wageningen 23.–28. 5. 1977.
- Bresse, B.; Vamosi, S. (1990): Comparison of the Canadian national baseline with the Väisälä-standard in Munich, FIG XIX international congress, Helsinki, Finland, 1990, P 501.2/1.

- Caspary, W. (1984): Die Genauigkeit der Mekometermessungen auf der Prüfstrecke Neubiberg, Schriftenreihe-Universität der Bundeswehr München, Heft 11, 1984, 115—130.
- Deumlich, F. (1988): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, Verlag für Bauwesen, Berlin 1988.
- Ferenc, V. (1978): Izvještaj za četvrti kvartal 1977, interni izvještaj 06. 04. 1978, 1—10.
- Goretzki, W. (1977): Beitrag zur Konstantenbestimmung elektro-optischer Kurzstreckenmeßgeräte. Vermessungstechnik, 1977, 7, 228—230.
- Halmos, F.; Kadar, I. (1972): Die Bestimmung der Additionskonstanten elektronischer Entfernungsmesser. Vermessungstechnik, 1972, 9, 343—346.
- Halmos, F.; Kadar, I. (1976): Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der Eichkonstanten von elektrooptischen Strecken-kurzer Reichweite. Vermessungstechnik, 1976, 8, 309—312.
- Herzog, H. (1978): Untersuchungen von Elektrooptischen Entfernungsmessern Eldi 2, Zeitschrift für Vermessungswesen, 1978, 9, 370—383.
- Hübner, E. (1978): Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung des vertikalen Tagesgangs der bodennahen Refraktion zur Ableitung von Einsatzkriterien für Laserleitstrahlsysteme, Geodätische und geophysikalische Veröffentlichungen, Reihe III, Heft 41, Dresden 1978, 188—206.
- Jakob, G. (1976): Zur wirtschaftlichen Konstantenbestimmung elektro-optischer Entfernungsmesser durch Streckenmessung in allen Kombinationen, Vermessungstechnik, 1976, 11, 430—432.
- Kahmen, H. (1978): Elektronische Messverfahren in der Geodäsie, Wichmann, Karlsruhe 1978.
- Kääriäinen, J.; Kontinen, R.; Nemeth, Z. (1988): The Gödöllő standard baseline, Publications of the Finnish geodetic institute, Helsinki, 1988, 109, 1—66.
- Kobold, F. (1958): Geodätische Methoden zur Bestimmung von Geländebewegungen und von Deformationen an Bauwerken. Schweizerische Bauzeitung, 1958, 76, 163—167, 182—187.
- Kobold, F. (1961): Measurement of displacement and deformation by geodetic methods. Journal of Surveying and Mapping Division, Proc. of the Society of Civil Engineers, 1961, 87 (SUZ), 37—67.
- Kontić, S.; Mrkić, R.; Kokalović, M. (1987): Primarni etaloni uglova i dužina SFRJ i njihov značaj za osnovne geodetske radove, Zbornik radova savjetovanja »Osnovni geodetski radovi i oprema za njihovo izvođenje«, Priština, 1978, 349—368.
- Leitz, H.; Bornfeld, R. (1968): Der elektrooptische Entfernungsmesser Zeiss SM 11, Zeitschrift für Vermessungswesen, 1968, S. 31—36.
- Maurer, W.; Schirmer, W.; Schwarz, W. (1988): Wirkungsweise und Einsatzmöglichkeiten des Mekometer ME 5000, X Internationaler Kurs für Ingenervermessung, München 1988, A 10/1—14.
- Milovanović, V.; Ivanović, V. (1984): Prištinska osnovica i rezultati ispitivanja elektrooptičkih daljinomjera, Geodetska služba, 1984, 39, 22—33.
- Münch, K. H. (1973): Der Infrarot-Entfernungsmesser Kern DM 1000. Allgemeine Vermessungs Nachrichten, 1973, 6, 202—208.
- Novaković, G.; Džapo, M.; Lasić, Z. (1985): Prvo mjerenje duljine kalibracijske baze Geodetskog fakulteta u Zagrebu invarskim žicama, Geodetski list, 1985, 10—12, 291—295.
- Newling, M. (1990): The Cape Town baseline, FIG XIX International congress, Helsinki, Finland, 1990. P 501.3/1—7.
- Pauli, W. (1968): Messung einer kurzen Basis mit dem EOS durch Streckenmessung in allen Kombinationen. Vermessungstechnik, 1968, 7, 242—246.
- Pauli, W. (1970): Erprobung des EOK 2000 auf der Potsdamer Basis. Vermessungstechnik, 1970, S. 105—108.
- Reinhart, E.; Sigl, R.; Tremel, H. (1978): High precision length measurements by the German geodetic institute, IAG simposium on »High precision geodetic length measurements«, Helsinki, Finland, June 19—22, 1978, str. 1—24.
- Reithofer, A. (1985): Die Prüfstrecke Graz-Feldkirchen, Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 1985, 5, 174—176.
- Richter, H.; Wendt, H. (1969): Das neue elektrooptische Streckenmeßgerät EOK aus Jena. Allgemeine Vermessungs Nachrichten, 1969, 2, 80—85.

- Rüeger, M. (1976): Probleme bei der gemeinsamen Bestimmung von zyklischen Fehlern und Additionskonstante bei elektro-optischen Entfernungsmessern. Allgemeine Vermessungs Nachrichten, 1976, 10, 338—344.
- Rüeger, J. M. (1976): Eine Hilfe für die Projektierung von Eichstrecken elektronischer Distanzmesser, Vermessung-Photogrammetrie- Kulturtechnik, 1976, 9, 249—251.
- Rüeger, J. M. (1978): Entwurf von Prüf Strecken des Schwendener Typs für elektro-optische Entfernungsmesser. Vermessungs und Raumordnung, 1978, S. 315—324.
- Rüeger, J.; Covell, P. (1980): Zur Konstanz und Vielfältigkeit zyklischer Fehler in elektrooptischen Distanzmessern, Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 1980, 6, 261—266.
- Rüeger M. (1983): Deformation measurement and analysis as applied to EDM baselines. In: Rivett L (ed) Proc, Symposium on the surveillance of engineering structures, Dept of Surveying, University of Melbourne, 14—15 November 1987, 27 pp.
- Schwendener, H. R. (1971): Elektronische Distanzmesser für kurze Strecken. Genauigkeitsfragen und Prüfverfahren. Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen, 1971, 3, 59—67.
- Solarić, N. (1979): Izvještaj o kalibracijskoj bazi u blizini Bedekovčine, interni izvještaj, 1979.
- Solarić, N. (1980): Novi Kernov stativ i dodaci za adaptiranje na stativne i podnožne dijelove teodolita drugih firmi, Geodetski list, 1980, 4—6, 122—125.
- Solarić, N. (1981): Projekt kalibracijske baze na nasipu oteretnog kanala Sava-Odra, Projekt prije dobivanja građevinske dozvole, (interni dokument), 1981.
- Solarić, N. (1982): Izvještaj kolaudacione komisije pri preuzimanju kalibracijske baze na nasipu oteretnog kanala Sava-Odra, interni izvještaj, 1982.
- Solarić, N.; Benčić, D.; Vodopivec, F.; Kogoj, D.; Lapain, M.; Džapo, M.; Nogić, Č. (1992): Ispitivanje točnosti preciznog elektrooptičkog daljinomjera Leica-Kern Mekometar ME 5000 na kalibracijskoj bazi Zagreb, pređato u uredništvo časopisa Survey Review (London).
- Strasser, G. (1968): Ein moderner Distanzmesser für kurze Strecken. Zeitschrift für Vermessungswesen, 1968, S. 377—381.
- Strasser, G. (1969): Der Infrarot Distanzmesser Wild Distomat DI 10. Allgemeine Vermessungs Nachrichten, 1969, 2, 65—72.
- Strasser, G. (1969): Die elektronischen Entfernungsmesser Wild DI 50 und DI 10. Mefstechnik, 1969, S. 279—287.
- Verić, F. (1981): Ocjena podobnosti izgradnje kalibracijske baze na sjevernom nasipu oteretnog kanala Sava-Odra, interni izvještaj za dobivanje građevinske dozvole, 13./10.1981.
- Vodopivec, F. (1977): Dolžinska komparatorska baza SRS v Logatcu, interni izvještaj, august 1977, 1—449.
- Witte, B. (1978); Fröhlich, H. (1978): Eichung elektrooptischer Entfernungsmesser. Forum, 1978, 3, 337—347.
- Zeiske, K. (1980): Prüfverfahren für elektronische Tachymeter-gezeit am Beispiel des Wild TC1, Wild Heerbrugg AGG, 1980, 1—9.
- Zetsche, H. (1979): Elektronische Entfernungsmessung, Konrad Wittwer, Stuttgart 1979.

CALIBRATION BASELINE DESIGN AND CONSTRUCTION FOR THE FACULTY OF GEODESY, UNIVERSITY OF ZAGREB

The calibration baseline of the Faculty of Geodesy, University of Zagreb was made for the needs of calibrating electro-optical distance meters, examination of the accuracy of all distance meter types, and for obtaining one common scale for measuring long distances up to 6000 m on the territory of Croatia. Designing the calibration baseline required a special attention paid to analyzing the inter-pillar distances which should enable control of all known and otherwise in literature recorded errors of the electro-optical distance meters.

Primljeno: 1991-11-05