

# KOMPARIRANJE IN KALIBRIRANJE ELEKTRONSKIH RAZDALJEMEROV

COMPARISON AND CALIBRATION OF ELECTRONIC DISTANCE METERS

*Dušan Kogoj, Florjan Vodopivec*

## POVZETEK

*Vsi merski instrumenti so podvrženi pogreškom. Na slučajne pogreške zaradi njihove karakteristike ne moremo vplivati in jih s kalibriranjem ne moremo izločiti. Sistematični pogreški pa imajo lahko velik vpliv, zato jih moramo skrbno določiti in glede na naravo zmanjšati z justiranjem instrumenta, eliminirati z izbiro ustrezne metode dela ali pa računsko upoštevati. Kalibriran instrument je osnovni pogoj za korektno meritve. Kalibracijo elektronskih razdaljemerov opravljamo v laboratoriju ali na komparatorski bazi v naravi. Prav s tem namenom je bila obnovljena komparatorska baza Logatec.*

## ABSTRACT

*All measuring instruments are subject to errors. Due to their characteristics random errors cannot be influenced and with instrument calibration they cannot be eliminated. Systematical errors can exercise great influence on the measuring values so they must be carefully determined and reduced with instrument adjustment, eliminated with a suitable measuring method or taken into account in the computation process. A calibrated instrument is the basic condition for performing correct measurements. The calibration of the electronic distance meter should be done in laboratories and in field test lines or base nets. With this intention the Logatec comparator base was renewed.*

## KLJUČNE BESEDE

*merjenje dolžin, elektronski razdaljemer, komparatorska baza Logatec*

## KEY WORDS

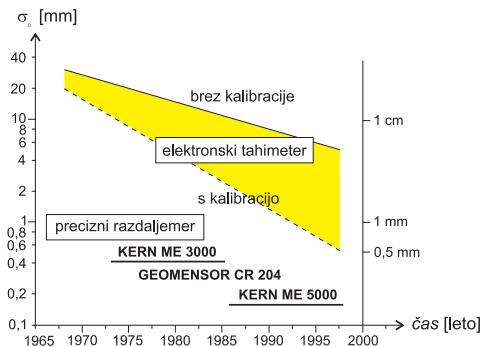
*distance measurements, electronic distance meters, comparison basis Logatec*

## 1. UVOD

Tehnološki razvoj prinaša vse večje natančnosti elektronskih razdaljemerov. Slika 1 prikazuje, kakšno natančnost zagotavljajo elektronski razdaljemerji od šestdesetih let do danes (Steiger, 1998); posebej so navedeni precizni elektrooptični razdaljemerji. Iz prikaza je razvidno, kako pomembno je kalibriranje elektronskih razdaljemerov. Danes se na trgu pojavljajo instrumenti, ki imajo pod pogojem, da so kalibrirani, praktično popolno notranjo natančnost. Natančnost izmerjene dolžine je bolj ali manj odvisna le še od kvalitete določitve gostote atmosfere, skozi katero se svetlobni žarek širi.

## 2. POGREŠKI ELEKTRONSKIH RAZDALJEMEROV

Kot skoraj vsi merski postopki, je tudi merjenje dolžin podvrženo številnim pogreškom, ki vplivajo na končno merjeno vrednost. Predvsem so tu prisotni pogreški okolja in instrumentalni pogreški.



Slika 1: Povečevanje natančnosti elektronskih razdaljemerov

V postopku meritev je merska vrednost, ki jo prikaže razdaljemer, praktično neodvisna od dela operaterja. Subjektivni pogreški so vezani predvsem na postopek ugotavljanja atmosferskih parametrov ter na 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.

## 2.1 Pogrešek merske frekvence oziroma časovne enote

Pri moduliranju nosilnega valovanja z modulacijsko 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 modulacijske 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  $df_M$  na določitev  $\Delta\lambda_M$  je 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 razdaljemernih, pri čemer je merilo definirano z osnovno časovno enoto  $T$  (takt):

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

## 2.2 Pogrešek določitve ničelne točke razdaljemera

Pri vsakem elektronskem razdaljemernu 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. Kljub temu pa nekateri ostajajo. 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  $K_I$ ,  $K_R$  pomeni spremembo vrednosti adicijske konstante tudi v primeru:

- kratkočasovne fazne neenakosti med merskim signalom in referenčnim signalom,
- vpliva fazne nehomogenosti v odvisnosti od razdalje,
- odstopanja v modelu za korekcijo cikličnih pogreškov.

Zaradi teh vzrokov adicijske konstante ne moremo obravnavati kot konstante. Poleg tega, da je odvisna od oddaljenosti, je spremenljiva tudi v času. Govorimo o popravku ničelne točke.

## 3. KOMPARIANJE ELEKTRONSKIH RAZDALJEMEROV

Kot 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 najbolj 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.

### 3.1 Preizkus frekvenc

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 (Schauerte in Witte, 2000). 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 (Joeckl, Stober, 1995):

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

Konstanta  $k_M$  je torej kvocient nominalne in dejanske merske 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:

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

### 3.2 Določitev glavnih konstant na komparatorski bazi

Ker je korekcija ničelne točke  $k_a$  odvisna od oddaljenosti, jo lahko določamo le s poznano dano dolžino oziroma večjim številom dolžin, ki jih zagotavlja tako imenovana komparatorska baza. Dimenzije baze so določene s povečano natančnostjo. Baza je razdeljena na posamezne odseke, tako da velikosti dolžin zagotavljajo enakomerno razporeditev po celotnem območju meritev – še posebno je pomembna razporeditev dolžin v bližnjem območju meritev, tj. pod 50 m.

#### Primer 1 (Kogoj, 2002):

Preizkušan je bil razdaljemer Kern DM 503 v kombinaciji s pripadajočim originalnim reflektorjem in teodolitom E2. Meritve so bile opravljene na stari linijski komparatorski bazi v Logatcu. Bazo tvori 5 točk v liniji, oddaljenost med krajnjima točkama je 260 m. Dimenzije baze so bile določene s preciznim razdaljemerom Mekometer ME 5000. Podatki o dimenzijah baze in meritvah s preizkušanim razdaljemerom so zbrani v tabeli 1. Merjene vrednosti so popravljene za meteorološke popravke, upoštevana je vertikalna ekscentriciteta.

Od-do	Dolžina baze [m]	Merjena dolžina refl. št. 1 [m]
1-2	100,0039	100,01017
1-3	111,6785	111,68592
1-4	196,6863	196,69070
1-5	259,9945	259,99760
2-3	11,6746	11,68005
2-4	96,6824	96,68915
2-5	159,9906	159,99496
3-4	85,0078	85,01605
3-5	148,3160	148,31967
4-5	63,3082	63,31383

Preglednica 1: Rezultati meritev na linijski komparatorski bazi Logatec (razdaljemer Kern DM 503, št. 348185)

Z izbiro linearnega funkcijskega modela

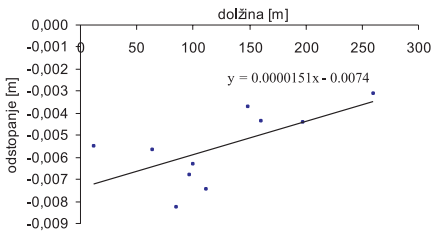
$$D = D_a(1 + \Delta k_M) + k_a$$

in izračunom na osnovi merjenih vrednosti so bile dobljene naslednje vrednosti:

$$k_a = -0.0074 \text{ m} , \sigma_{k_a} = 0.0009 \text{ m} \quad \text{»adicijska konstanta«}$$

$$k_M = (1 + \Delta k_M) = 1.0000151 \quad \sigma_{\Delta k_M} = 6.4 \text{ ppm} , k_M \text{ je } \text{»multiplikacijska konstanta«}.$$

Referenčni standardni odklon, ki opisuje natančnost meritev, je  $\sigma_0 = 1.36 \text{ mm}$ . Meritve so bile opravljene v mejah natančnosti, ki jih zagotavlja preizkušani razdaljemer. Merske vrednosti in izravnalna premica (linearna regresija) so prikazane na sliki 2.



Slika2: Popravek ničelne točke razdaljemera Kern DM 503

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:

$$k_M = \frac{[D]}{[D']}, \text{ za podatke iz tabele 1 dobimo } k_M = 1.0000172 \text{ ali } \Delta k_M = k_M - 1 = +17.2 \text{ ppm}.$$

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

### 3.3 Meritve v vseh kombinacijah

Naj bo dana linijska komparatorska baza. Bazo tvori  $p$  točk, ki so stabilizirane v liniji, stabilizacija omogoča prisilno centriranje. Bazo tvori torej  $t$  delnih dolžin, kjer je  $t = p - 1$ . Posamezne odseke izmerimo v vseh možnih kombinacijah. Število merjenih dolžin bo:

$$n = \binom{n}{2} = \frac{p(p-1)}{2} = \frac{t(t+1)}{2}.$$

Z izravnavo po posredni metodi določimo najverjetnejše vrednosti iskanih količin (neznank). Iščemo definitivne vrednosti dolžin posameznih odsekov ( $x_k$ ,  $k = 1, \dots, t$ ) ter korekcijo ničelne točke, ki jo lahko v tem primeru ocenimo le kot konstanto -  $k_{a0}$ . Izkaže se, da je korekcija ničelne točke, določene »v vseh kombinacijah«, identična z aritmetično sredino vseh po enostavnem principu izračunanih posameznih vrednosti.

V primeru linearne odvisnosti korekcije ničelne točke od velikosti dolžine s tem postopkom dosežemo enako vrednost  $k_0$  kot z regresijsko premico na osnovi komparacije na bazi znanih dimenzij. Tako določena vrednost je vprašljiva v bližnjem območju (pri zelo kratkih dolžinah). Toda v primeru, da je prisotna odvisnost korekcije ničelne točke od dolžine funkcija višjega reda, rezultat tega načina preizkusa ni identičen z nobenim drugim postopkom določanja.

Če nadomestimo izračun  $k_0$  s pričakovano vrednostjo  $k_0$ , se lahko omejimo na posamezne neznanke korekcije ničelne točke, katerih izračun lahko pospešimo z enovitimi (sklenjenimi) enačbami. V splošnem velja naslednji izraz za izračun konstantnega dela korekcije ničelne točke (Joeckl in Stober, 1995):

$$k_a = \frac{6}{t(t^2 - 1)} \sum_{j=1}^t \sum_{i=1}^{t-j+1} (2i - t - 1) \cdot D'_{0.5}(-j^2 + (2t+3)j)^{+i-t-1}$$

**Primer 2** (Kogoj, 2002):

Izračunajmo popravek ničelne točke po gornji splošni enačbi za primer meritev na linijski komparatorski bazi v Logatcu, ki so zbrane v tabeli 1. Bazo tvorijo štirje odseki. Predhodno ni treba upoštevati popravka merila (multiplikacijske konstante). Dobljena je vrednost:

$$k_a = -0.0077 \text{ m}$$

Zanimiva je primerjava rezultatov ločene določitve adicijske in multiplikacijske konstante z rezultati skupne določitve za isti primer preizkusa razdaljemera Kern DM 503 (primer 1). Razlike v končnih numeričnih vrednostih so posledica izbire različnih funkcijskih modelov.

#### 4. KOMPARATORSKE BAZE

Geodetski način določanja osnovnih instrumentalnih popravkov elektronskih razdaljemero zahteva vzpostavitev komparatorske baze. Bazo materializiramo z nizom geodetskih točk, ki omogočajo natančno centriranje. Točke tvorijo ali linijo ali mrežo, njihov medsebojni položaj je zelo natančno določen.

##### 4.1 Zasnova komparatorskih baz

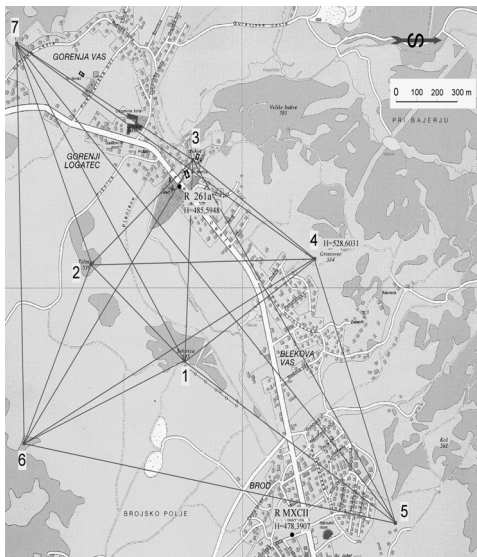
Baze za umerjanje (komparatorske baze) naj bi izpolnjevale naslednje pogoje (Joeckl in Strober,

1995; Deutsche Norm, 1990; International Standard, 1998):

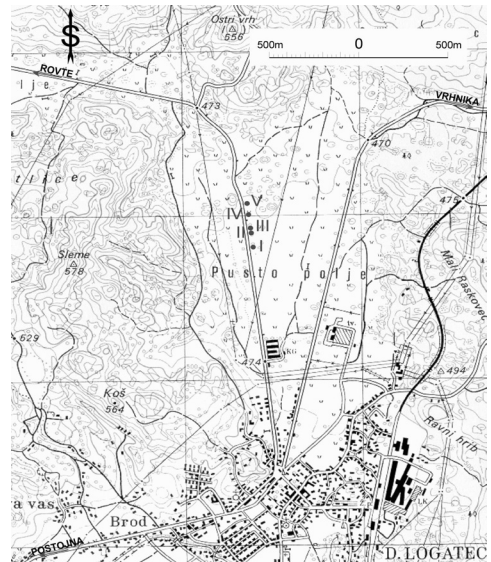
- Dolžine naj bodo enakomerno porazdeljene čez celotno območje dosega razdaljemera. Najkrajše in najdaljše dolžine naj ustrezajo običajnemu merskemu območju razdaljemera (RANGE).
- Fazni ostanki naj bodo konstantni, velikost vmesnih dolžin naj bo celoštevilčni večkratnik finega merila.
- Teren naj bo čim bolj horizontalen; rahel poves (dolina) v sredini izboljša vidnost.
- Na celotni bazi naj bodo zagotovljeni enakomerni meteorološki pogoji (veter, osončenje).
- Teren, na katerem je baza stabilizirana, naj bo enakomerno zaraščen (najbolje trava, tj. brez asfalta).
- Zagotovljena naj bo stabilnost merskih točk (stebri, prisilno centriranje); če uporabljamo stative, naj bo podlaga utrjena.
- Točke naj bodo enostavno dostopne in odmaknjene od prometnih poti.
- Na tako imenovanih »tržnih« komparatorjih (stalni komparatorji, kjer so stabilizirane t. i. talne točke ali stebri, ki omogočajo natančno prisilno centriranje) mora biti geološko zagotovljen trajni položaj točke - geološko stabilen teren.

#### 4.2 Komparatorska baza Logatec

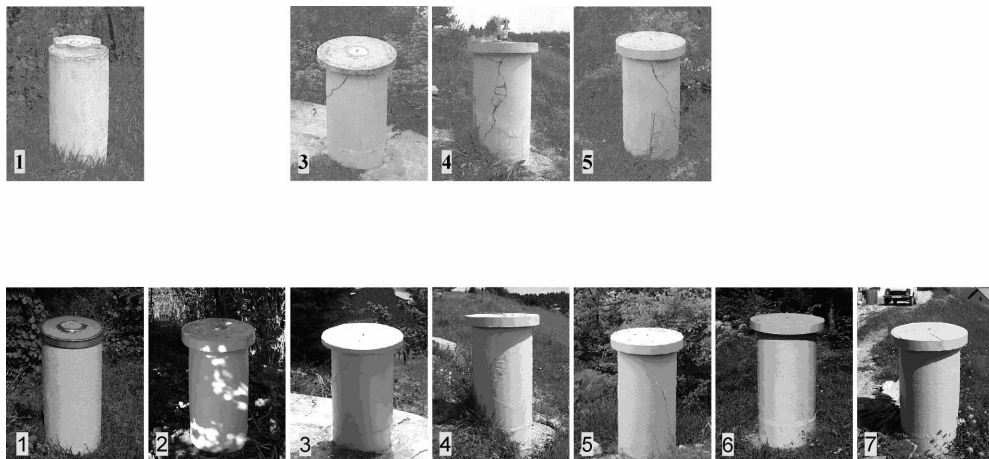
K sreči ima Slovenija bazo, ki je namenjena najnatančnejšim kalibracijam elektronskih razdaljemero. To je *Republiška komparatorska baza Logatec - velika baza*. Baza je bila postavljena že leta 1976 iz sredstev takratne Geodetske uprave. Slika 3 prikazuje veliko bazo z vsemi možnimi merjenimi dolžinami. Dimenzije baze so relativno velike. Velikosti dolžin se gibljejo v intervalu od 634 m do 2665 m. Leta 1976 je bila baza prvič izmerjena in meritve izravnane. Celotni postopek je bil ponovljen v letih 1984 in 1990.



Slika 3: Velika baza Logatec



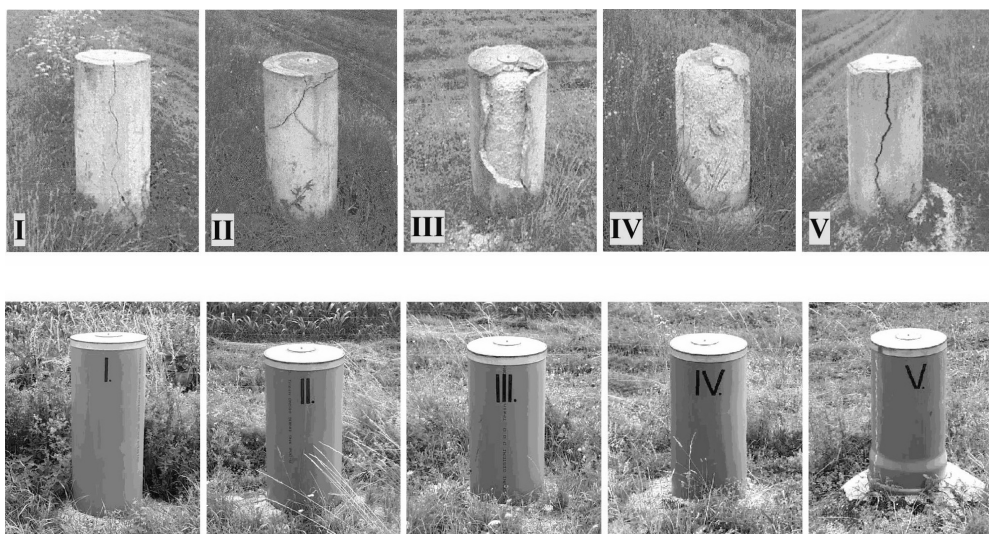
Slika 4: Mala baza Logatec



Slika 5: Stebri velike baze pred sanacijo in po njej

Kasneje je Geodetski zavod financiral postavitev krajše komparatorske linijske baze ob cesti Logatec–Rovte (slika 4), ki je bolj primerna za kalibriranje zlasti adicijske konstante. Velikost baze je 260 m, definira jo 5 stebrov. To bazo so uporabljali jamomerci premogovnika Velenje in rudnika Žirovski vrh, Geoservis ter Katedra za geodezijo za pedagoške namene.

Ker bazi nista imeli pravega lastnika in skrbnika, si je zob časa dovolil prekomerno dejavnost (sliki 5, 6). Na mali bazi je bilo onemogočeno kvalitetno kalibriranje. Z namenom, da bi bazo obnovili in s tem omogočili kompariranje elektronskih razdaljemerov dosedanjim in vsem drugim zainteresiranim uporabnikom, smo sredstva združili: Geoservis, Ljubljana, Premogovnik Velenje in Katedra za geodezijo UL FGG, Ljubljana.



Slika 6: Stebri male baze pred sanacijo in po njej



Stroške smo si razdelili na tri približno enake dele, pripravili predlog sanacije in poiskali izvajalce. V jeseni 2001 je bila sanacija končana (rezultati so prikazani na slikah 5 in 6). Nekatere praktično nepoškodovane betonske stebre smo na novo prebarvali, to velja predvsem za stebre velike baze. Poškodovane stebre male baze smo zgradili skorajda na novo. Stebri so železobetonski. Z zunanje strani so obdani s propilensko cevjo. Gornja ploskev stebra je zaščiten s pokrovom iz nerjavečega jekla. Na ta način bodo poškodbe, ki bi nastale zaradi neugodnih vremenskih razmer, zmanjšane na minimum. Zagotovljena je torej zelo velika trajnost stabilizacije točk logaške baze.

Mala baza bo služila izključno kalibraciji elektronskih razdaljemerov. Na veliki bazi pa predvidevamo izmero vseh dolžin, vseh smeri, vertikalnih kotov, višinskih razlik z geometričnim nivelmanom ter določitev zemeljskega težnostnega pospeška. Žal je zaradi ovir večina točk manj primerna za meritve GPS. Tako bo poleg kalibriranja razdaljemerov mogoče na bazi testirati tudi natančnosti merjenja horizontalnih in vertikalnih kotov elektronskih tahimetrov.

## 5. ZAKLJUČEK

Dejstvo je, da se geodetski merski instrumentarij neprestano razvija. Posledica razvoja je tudi večanje natančnosti. Vendar pa elektronski instrumenti pogosto z elektroniko in softverskimi korekcijami zagotavljajo pravilnost delovanja instrumenta. Mehanske in optične rešitve so manj natančne, manj stabilne, pogosto pa tudi poenostavljene. Konstrukcijska stabilnost takih instrumentov v času je slabša. Mnenje, da elektronski instrumenti ne potrebujejo periodične kalibracije, je zelo zmotno. Zaradi navedenih dejstev je periodično kalibriranje nujno.

## LITERATURA

*Joeckl, R., Stober, M.: Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung, Verlag Konrad Wittwer GmbH, 3. dopolnjena izdaja, Stuttgart 1995*

*Kogoj, D.: Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemerji, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2002*

*Schauerte, W., Witte, B.: Die Prüfung elektrooptischer Distanzmesser (EDM) am Geodätischen Institut der Universität Bonn, XIII. International Course on Engineering Surveying, Technische Universität München, München, 2000*

*Steiger, R.: Zur Überprüfung moderner Vermessungsinstrumente, AVN, 11-12/98, Weichmann Verlag, Heidelberg, 1998*

*Deutsche Norm: DIN 18723 (Teil 2, 3, 6), Beuth Verlag, Berlin 1990*

*International Standard: ISO 8322-1, ISO 8322-8, ISO 8322-9, 1998*

**izr. prof. dr. Dušan Kogoj, univ. dipl. inž. geod.**

*Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,  
Jamova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija  
e-pošta: dkogoj@fgg.uni-lj.si*

**prof. dr. Florjan Vodopivec, univ. dipl. inž. geod., mag. rud.**

*Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,  
Jamova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija  
e-pošta: tjesih@fgg.uni-lj.si*

**Recenzenta: dr. Bojan Stopar, dr. Miran Kuhar**

**Prispelo v objavo: 20. november 2002**