

UDK 528.02-53.08:528.13
Pregledni znanstveni članak / Review

Pregled metoda preciznog umjeravanja kalibracijskih baza

Mladen ZRINJSKI, Đuro BARKOVIĆ, Krunoslav ŠPOLJAR – Zagreb¹

SAŽETAK. Precizno umjeravanje kalibracijskih baza obavlja se svjetlosnim interferometrima, preciznim elektrooptičkim daljinomjerima i GNSS-om. U radu je dan pregled 14 kalibracijskih baza u 11 država svijeta umjerenih s jednom ili više preciznih metoda. Umjereni precizni elektrooptički daljinomjeri standard su za transfer sljedivog mjerila na nove kalibracijske baze. Daljnja umjeravanja na kalibracijskim bazama moguće je provesti neovisnim metodama što omogućuje kontrolu mjernih rezultata. Među prikazanim rezultatima dani su podaci posljednjeg umjeravanja kalibracijske baze Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu preciznim elektrooptičkim daljinomjerom i GPS-om. Provedena je analiza parametara umjeravanja svih 14 kalibracijskih baza. Kao najvažniji parametar umjeravanja za svaku kalibracijsku bazu iskazana je mjerna nesigurnost najveće umjerene duljine uz odgovarajući faktor proširenja.

Ključne riječi: kalibracijska baza, precizno umjeravanje, svjetlosni interferometar, precizni elektrooptički daljinomjer, GNSS, mjerna nesigurnost.

1. Uvod

Kalibracijska baza sastoji se od dva ili više trajno stabiliziranih geodetskih stupova s ugrađenim vijkom za prisilno centriranje, a služi za definiranje mjerila velikih duljina. Kalibracijske baze precizno se umjeravaju svjetlosnim interferometrima, preciznim elektrooptičkim daljinomjerima i GNSS-om. Praktičnu

¹ Prof. dr. sc. Mladen Zrinjski, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mladen.zrinjski@geof.unizg.hr

Prof. dr. sc. Đuro Barković, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: djuro.barkovic@geof.unizg.hr

Krunoslav Špoljar, mag. ing. geod. et geoinf., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: krunoslav.spoljar@geof.unizg.hr

primjenu kalibracijske baze dobivaju razvojem elektrooptičkih daljinomjera, dok razvitkom GNSS-a kalibracijske baze postaju i testna područja za mjerenje GNSS-vektora (baznih linija).

Tema je rada pregled metoda preciznog umjeravanja kalibracijskih baza u svijetu te osvrt na dosadašnja umjeravanja kalibracijske baze Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Glavni kriteriji za navođenje kalibracijske baze u ovom su radu odabir metoda preciznog umjeravanja te godina posljednjeg umjeravanja.

Prema Jokela (2014) prva kalibracijska baza Nummela izgrađena je 1933. godine, a služila je umjeravanju invarnih žica duljine 24 m. Razvitkom preciznih elektrooptičkih daljinomjera, 1947. godine kalibracijska baza Nummela prva je umjerena svjetlosnim interferometrom Väisälä i najdulja je kalibracijska baza u svijetu umjerena svjetlosnim interferometrom. Umjeravanjem preciznog elektrooptičkog daljinomjera Kern Mekometer ME5000 na bazi Nummela obavljen je transfer sljedivog mjerila na kalibracijske baze PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) u Braunschweigu u Njemačkoj (Pollinger i dr. 2012), Kyviškes u Litvi (Būga i dr. 2008) i Vääna u Estoniji (Jokela 2014).

Projektom Europskoga mjeriteljskog istraživačkog programa (EMRP – *European Metrology Research Programme*) od 2008. do 2016. godine obavljani su transferi mjerila na kalibracijsku bazu BEV (*Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen*) u Innsbrucku u Austriji (Jokela i dr. 2010) i bazu UPV (*Universidad Politécnica de Valencia*) u Valenciji u Španjolskoj (García-Asenjo i dr. 2021).

Razvitkom GNSS-a na kalibracijskim bazama provedena su testiranja i umjeravanja GNSS-instrumenata primjenom relativne statičke metode. Mnoge kalibracijske baze u svijetu izgrađene su prije razvoja GNSS-a te nemaju mogućnosti provođenja umjeravanja GNSS-om zbog neprikladnog položaja stupova u odnosu na prijam signala sa satelita, kao što su baze Nummela u Finskoj, PTB u Braunschweigu i Vääna u Estoniji. U ovome radu dan je pregled kalibracijskih baza na kojima su obavljena umjeravanja novijeg datuma te koje su mjerene GNSS-om.

Prilikom ovog istraživanja proučene su i druge kalibracijske baze čiji pregled nije dan u ovome radu, zbog toga što neki od karakterističnih parametara baze nisu javno dostupni. Kalibracijske baze Gödöllö u Mađarskoj (Jokela i dr. 2001), Hlohovec u Slovačkoj (Mičuda i Korčák 2001), Logatec u Sloveniji (Vodopivec 1977) i Priština na Kosovu (Kontiće i dr. 1987) nisu detaljno prikazane zbog nedostataka novijih podataka umjeravanja i njihove objave. Za kalibracijske baze u Sjevernoj i Južnoj Americi te Australiji nisu pronađene metode umjeravanja i nije iskazana mjerna nesigurnost.

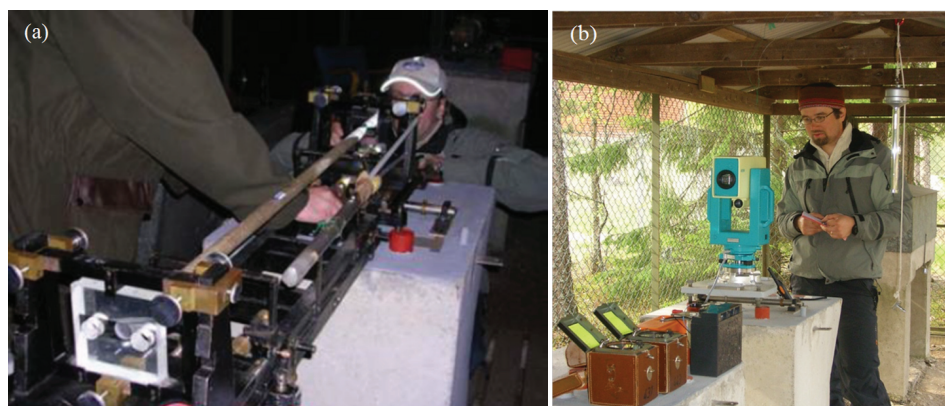
2. Kalibracijske baze u Finskoj

Finski geodetski institut (FGI – *Finnish Geodetic Institute*) djeluje od 1918. godine i tradicionalno je priznat u svijetu u kategoriji preciznih mjerenja i umjeravanja geodetskih instrumenata. U ovome poglavlju opisane su kalibracijske baze Nummela i Olkiluoto te baza Tehničkog sveučilišta u Helsinkiju (HUT – *Helsinki University of Technology*) Väisälä u Otaniemiu.

2.1. Kalibracijska baza Nummela

Kalibracijska baza Nummela (*Nummela Standard Baseline*) međunarodni je mjerni standard za mjerenje duljina u geodeziji. Baza se nalazi 45 km sjeverozapadno od Helsinkija. Sastoji se od 36 stupova na udaljenostima 24 m te joj je ukupna duljina 864 m. Prilikom izgradnje 1933. godine, baza je služila umjeravanju invarnih žica. Na temelju interferometrije bijelog svjetla, Finski geodetski institut od 1947. godine obavlja umjeravanje cijele duljine baze primjenom interferometra Väisälä (slika 1a).

Umjeravanje preciznog elektrooptičkog daljinomjera Kern Mekometer ME5000 (slika 1b) obavlja se u svrhu transfera sljedivosti mjerila pri čemu su mjereni atmosferski tlak dvama aneroidima Thommen i temperatura zraka psihrometrom Assmann. Prema objavljenim rezultatima, najnovija interferometrijska mjerenja obavljena su 2007. i 2013. godine (Jokela 2014).



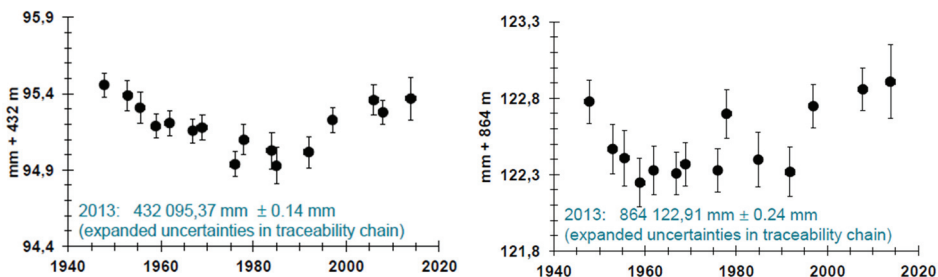
Slika 1. a) Svjetlosni interferometar Väisälä, b) precizni elektrooptički daljinomjer Kern Mekometer ME5000 (Jokela 2014).

Mjerenjima 2007. godine određena je duljina kalibracijske baze $864,12286 \text{ m} \pm 0,07 \text{ mm}$ ($k=1$). Rezultat umjeravanja 2013. godine iznosio je $432,09537 \text{ m} \pm 0,14 \text{ mm}$, odnosno $864,12291 \text{ m} \pm 0,24 \text{ mm}$ ($k=1$) (tablica 1).

Tablica 1. Posljednja interferometrijska mjerenja na kalibracijskoj bazi Nummela (prema Jokela 2014, Jokela 2017).

| Godina | 0 – 432 m | | 0 – 864 m | |
|--------|----------------|-----------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|
| | Duljina [m] | Mjerna nesigurnost ($k=1$) [mm] | Duljina [m] | Mjerna nesigurnost ($k=1$) [mm] |
| 2005. | 432,09536 | $\pm 0,05$ | – | – |
| 2007. | 432,09528 | $\pm 0,04$ | 864,12286 | $\pm 0,07$ |
| 2013. | 432,09537 | $\pm 0,14$ | 864,12291 | $\pm 0,24$ |

Nešto veće vrijednosti mjernih nesigurnosti 2013. godine rezultat su nepovoljnih vremenskih uvjeta (Jokela 2017). Slika 2 prikazuje dugu tradiciju interferometrijskih mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi Nummela s pripadajućim mjernim nesigurnostima.

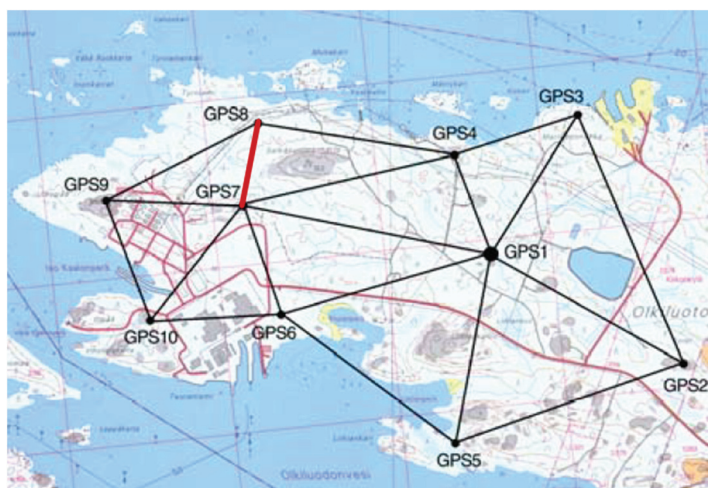


Slika 2. Rezultati interferometrijskih umjeravanja na kalibracijskoj bazi Nummela do 2013. godine (Jokela 2017).

Interferometrijskim umjeravanjem preciznih elektrooptičkih daljinomjera na kalibracijskoj bazi Nummela, transfer sljedivog mjerila prenesen je na kalibracijske baze u Njemačkoj, Španjolskoj, Estoniji, Litvi, Austriji, Kini, Južnoj Koreji itd. Kalibracijska baza Nummela također omogućuje umjeravanje novih instrumenata za mjerenje udaljenosti.

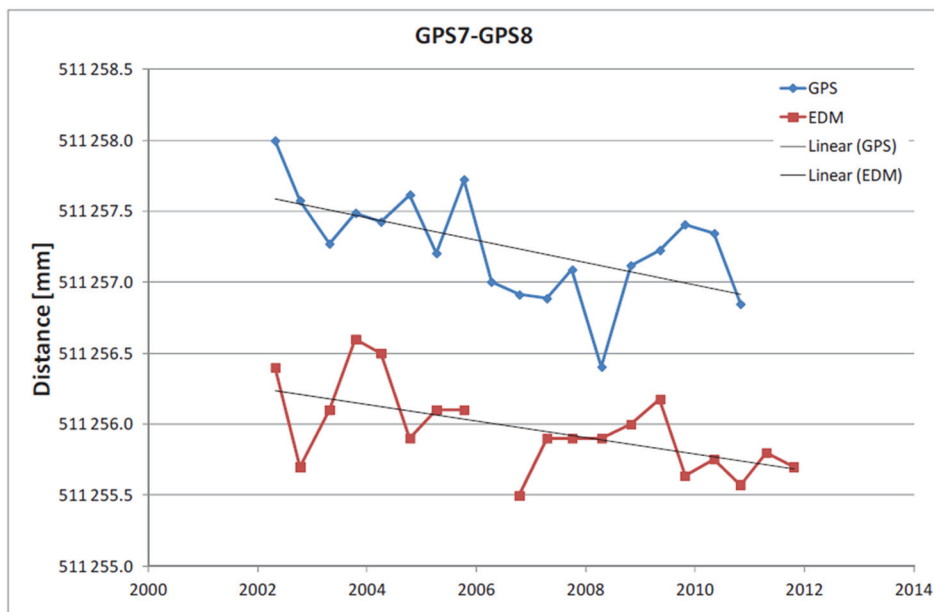
2.2. Kalibracijska baza Olkiluoto

U finskom gradu Olkiluoto 2002. godine uspostavljena je kalibracijska baza duljine 511,256 m za elektrooptičko mjerenje udaljenosti između stabiliziranih stupova GPS7 i GPS8 (slika 3), čime je omogućeno praćenje mogućih pogreška skaliranja GPS-mjerenja. Od 2002. godine duljina je mjerena preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME5000 u vlasništvu Tehničkog sveučilišta u Helsinkiju (Jokela i Häkli 2006). Mekometer ME5000 svake se godine umjerava na kalibracijskoj bazi Nummela, što osigurava sljedivost mjerila i kvalitetu rezultata. Mjerenja meteoroloških parametara obavljena su pokraj stupova (GPS7 i GPS8), psihrometrima Thies Clima i aneroidima Thommenom Höhenmesser.



Slika 3. Lokalna mreža GPS-točaka na području Olkiluota (prema Jokela i Häkli 2006).

Mjerenja duljina provedena su istovremeno s GPS-kampanjama. Na temelju 19 kampanja (slika 4) u 10 godina (2002. – 2012.), duljina dobivena GPS-om veća je za 0,64 mm od iste duljine izmjerene Mekometrom ME5000 (Jokela 2014).

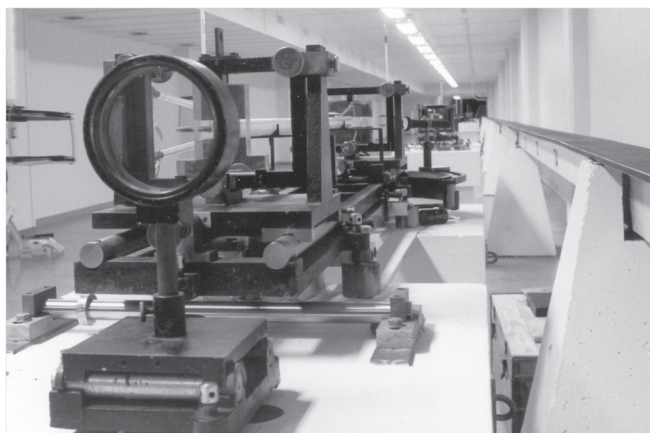


Slika 4. Rezultati mjerenja na bazi Olkiluoto s pomoću Mekometra ME5000 i GPS-a (Koivula i dr. 2012).

Procjena mjerne nesigurnosti prema Koivula i dr. (2012) iznosi $\pm 0,26$ mm ($k=2$) za duljinu 511,2557 m izmjerenu Mekometrom ME5000, dok ukupna mjerena nesigurnost za 19 kampanja GNSS-om iznosi $\pm 0,32$ mm ($k=2$) za duljinu 511,2562 m.

2.3. Kalibracijska baza HUT Väisälä

Kalibracijska baza HUT Väisälä u Otaniemi u gradu Espoo u ukupne duljine 75 m, umjerena je svjetlosnim interferometrom Väisälä (slika 5, tablica 2) kao zajednički projekt Finskog geodetskog instituta i Laboratorija za geodeziju i kartografiju Sveučilišta u Helsinkiju. Stupovi se nalaze u kalibracijskom laboratoriju Sveučilišta u Helsinkiju. Laboratorij je duljine 82 m, širine od 3 m do 5 m i visine od 2,1 m do 2,6 m te je namijenjen različitim umjeravanjima u geodeziji (Jokela 2014).



Slika 5. Kalibracijska baza HUT Väisälä (Jokela 2014).

Osim određivanja duljine baze, svrha je bila ispitivanje upotrebljivosti svjetlosnog interferometra Väisälä u zatvorenom prostoru, kako bi se obavila usporedba između metode svjetlosne interferometrije i drugih preciznih metoda mjerenja duljina u laboratorijskim uvjetima.

Tablica 2. Duljine između stupova kalibracijske baze HUT Väisälä izmjerene svjetlosnim interferometrom Väisälä (prema Jokela 2014).

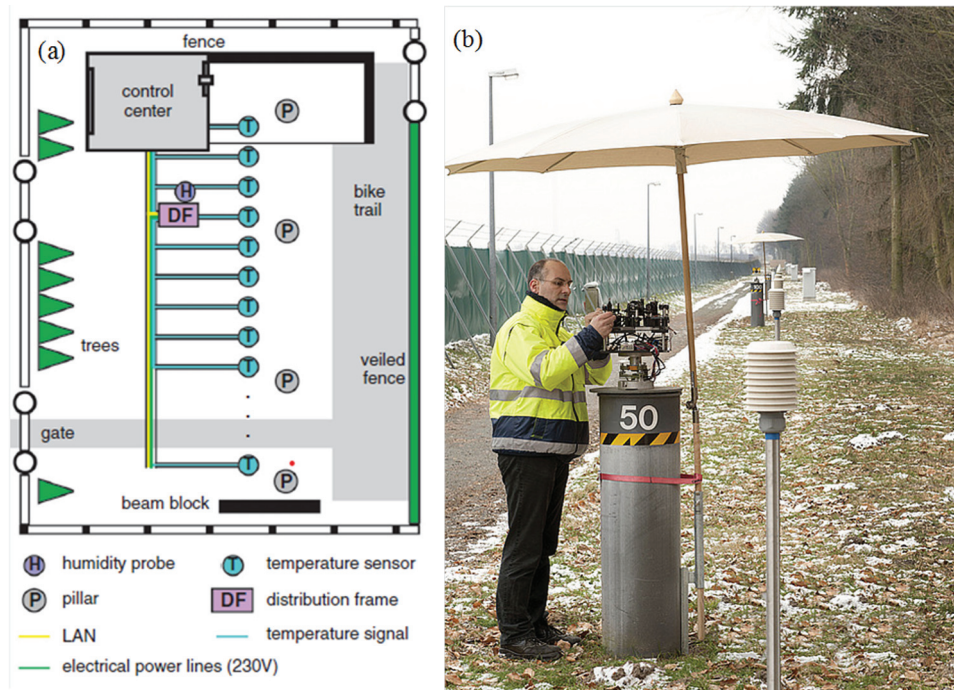
| Stupovi | Duljina [m] | Mjerna nesigurnost ($k=2$) [mm] |
|---------|----------------|-----------------------------------------|
| 0–1 | 5,02094 | $\pm 0,06$ |
| 0–2 | 25,02181 | $\pm 0,06$ |
| 0–3 | 75,02566 | $\pm 0,06$ |

3. Kalibracijske baze u Njemačkoj

U ovome poglavlju opisane su dvije kalibracijske baze u Njemačkoj. Nacionalni mjeriteljski institut Njemačke (PTB – *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*) uspostavio je bazu duljine 600 m u Braunschweigu. U Neubibergu se nalazi kalibracijska baza Sveučilišta saveznih oružanih snaga München (UniBW – *Universität der Bundeswehr München*) duljine 1100 m.

3.1. Kalibracijska baza PTB

Geodetska kalibracijska baza PTB u Braunschweigu u Njemačkoj nalazi se na sjevernom području Nacionalnog mjeriteljskog instituta. Izgrađena je 1970-ih godina, duljine 600 m, a sastoji se od 8 stabiliziranih stupova s udaljenostima od početnog stupa 50 m, 100 m, 150 m, 250 m, 350 m, 500 m i 600 m. Prema Pollinger i dr. (2012) baza je opremljena sustavom za mjerenje meteoroloških parametara te posjeduje svu opremu i infrastrukturu potrebnu za obavljanje preciznih geodetskih umjeravanja. Neposredno uz prvi stup nalazi se klimatizirani laboratorij, koji omogućava zaštitu posebnih laserskih izvora prilikom mjerenja. Duž cijele kalibracijske baze postavljeno je 60 senzora na međusobnoj udaljenosti 10 m za mjerenje temperature zraka, 2 senzora za mjerenje atmosferskog tlaka (Setra 470) te 6 senzora za mjerenje relativne vlažnosti zraka (Testo 6681) (slika 6a). Prilikom mjerenja duljina bez meteoroloških senzora te primjenom meteoroloških korekcija na mjerene duljine dobivene su razlike duljina od $-0,07$ mm do $+0,12$ mm (Jokela i dr. 2012). Slika 6b prikazuje provjeru preciznog elektrooptičkog daljinomjera u razvoju, sustav senzora za mjerenje atmosferskih parametara te ogradu s lijeve strane koja služi kao zaštita pri mjerenju laserima (URL 1).



Slika 6. a) Shematski prikaz kalibracijske baze PTB s meteorološkim sensorima (Pollinger i dr. 2012), b) provjera preciznog elektrooptičkog daljinomjera u razvoju (URL 1).

Prema Jokela i dr. (2012) Finski geodetski institut je u lipnju 2011. godine obavio transfer mjerila s kalibracijske baze Nummela preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME5000 na kalibracijsku bazu PTB (tablica 3).

Tablica 3. Rezultati umjeravanja na kalibracijskoj bazi PTB (prema Jokela i dr. 2012).

| Stupovi | Duljina [m] | Mjerna nesigurnost ($k=2$) [mm] |
|---------|----------------|-----------------------------------------|
| 0–1 | 49,99780 | $\pm 0,20$ |
| 0–2 | 99,99336 | $\pm 0,22$ |
| 0–3 | 150,00495 | $\pm 0,24$ |
| 0–4 | 249,99878 | $\pm 0,28$ |
| 0–5 | 350,00151 | $\pm 0,33$ |
| 0–6 | 499,99859 | $\pm 0,41$ |
| 0–7 | 599,98861 | $\pm 0,47$ |

3.2. Kalibracijska baza Neubiberg

Sveučilište saveznih oružanih snaga München (UniBW) izgradilo je 2009. godine kalibracijsku bazu u Neubibergu. Baza se sastoji od 8 stupova ukupne duljine 1100 m pri čemu se prvih 7 stupova nalazi do 590 m od početnog stupa. Svrha gradnje ove kalibracijske baze bila je potreba za umjeravanjem elektrooptičkih daljinomjera i usporedba rezultata mjerenja duljina s GNSS-om (slika 7) (Heister 2012).



Slika 7. Mjerenja na kalibracijskoj bazi UniBW (Zimmermann i dr. 2016).

U sklopu Europskog istraživačkog projekta (EMRP), Finski geodetski institut je 2014. godine obavio umjeravanje kalibracijske baze preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME5000 (tablica 4), koji je prethodno umjeren na kalibracijskoj bazi Nummela (Heunecke 2015).

Tablica 4. Rezultati umjeravanja na kalibracijskoj bazi u Neubibergu (prema Heunecke 2015).

| Stupovi | Duljina [m] | Mjerna nesigurnost ($k=2$) [mm] |
|---------|----------------|-----------------------------------------|
| 1–2 | 18,78040 | $\pm 0,03$ |
| 1–3 | 101,23744 | $\pm 0,02$ |
| 1–4 | 247,38424 | $\pm 0,02$ |
| 1–5 | 425,36323 | $\pm 0,02$ |
| 1–6 | 539,66192 | $\pm 0,02$ |
| 1–7 | 590,28763 | $\pm 0,02$ |
| 1–8 | 1099,98594 | $\pm 0,03$ |

GPS-om je obavljeno mjerenje na 6 stupova (1, 2, 3, 6, 7 i 8). Korištene su 3 antene Trimble Zephyr Geodetic i 3 precizne antene *Choke Ring* Leica AT504GG. Opažanja su obavljena u 8 sesija u trajanju od najmanje 4 sata te su dobiveni podaci u naknadnoj obradi softverom Leica Geo Office. Dobivena je konačna duljina $1099,9940 \text{ m} \pm 0,53 \text{ mm}$ ($k=2$) (Zimmermann i dr. 2016).

4. Kalibracijska baza u Austriji

Savezni ured za umjeravanje i geodetsku izmjeru (BEV – *Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen*) izgradio je 2006. godine u zapadnom predgrađu grada Innsbrucka u Austriji kalibracijsku bazu duljine 1080 m. Stupovi baze postavljeni su između autoceste i rijeke Inn. Baza se sastoji od 7 stabiliziranih stupova s duljinama 30 m, 120 m, 270 m, 480 m, 750 m i 1080 m od prvog stupa. U sklopu istraživačkog projekta EMRP, umjeravanje kalibracijske baze u Innsbrucku obavljeno je u 4 dana 2008. godine preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME5000 (slika 8, tablica 5), koji je umjeren na kalibracijskoj bazi Nummela (Jokela i dr. 2010).



Slika 8. Kalibracijska baza BEV (Jokela i dr. 2010).

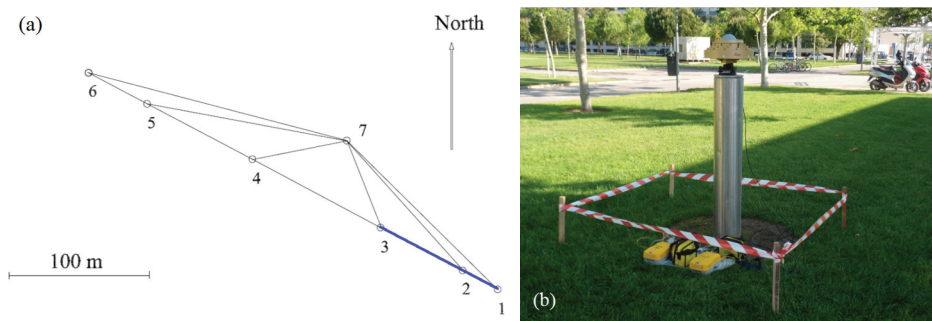
Glavni razlog za izgradnju ove kalibracijske baze bili su drugačiji uvjeti u odnosu na kalibracijsku bazu u Nummeli. Prilikom mjerenja duljina, meteorološkim su sensorima prikupljeni podaci za temperaturu zraka, atmosferski tlak i relativnu vlažnost zraka. Postignute su mjerne nesigurnosti u rasponu od $\pm 0,21 \text{ mm}$ do $\pm 0,81 \text{ mm}$ ($k=2$) (Jokela i dr. 2010).

Tablica 5. Rezultati umjeravanja na kalibracijskoj bazi BEV (prema Jokela i dr. 2010).

| Stupovi | Duljina | Mjerna nesigurnost ($k=2$) |
|---------|------------|---------------------------------|
| | [m] | [mm] |
| 1–2 | 30,03863 | $\pm 0,21$ |
| 1–3 | 120,03612 | $\pm 0,21$ |
| 1–4 | 270,00810 | $\pm 0,28$ |
| 1–5 | 479,98928 | $\pm 0,38$ |
| 1–6 | 749,99250 | $\pm 0,56$ |
| 1–7 | 1080,04118 | $\pm 0,81$ |

5. Kalibracijska baza u Španjolskoj

Kalibracijska baza Politehničkog sveučilišta u Valenciji (UPV – *Universidad Politécnica de Valencia*) izgrađena je 2007. godine. Sastoji se od 7 stupova, pri čemu je 6 stupova u pravcu, a sedmi stup tvori konfiguraciju trokuta (slika 9a). Uz elektrooptička mjerenja duljina, obavljena su i mjerenja baznih linija GNSS-om (slika 9b).



Slika 9. a) Konfiguracija kalibracijske baze UPV, b) GNSS-mjerenja (García-Asenjo i dr. 2021).

Transfer mjerila obavljen je 2012. godine preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME5000, koji je prethodno umjeren na kalibracijskoj bazi Nummela. Udaljenosti između stupova određene su s mjernom nesigurnošću u rasponu od $\pm 0,20$ mm do $\pm 0,33$ mm ($k=2$) (tablica 6) (García-Asenjo i dr. 2021).

Tablica 6. *Transfer mjerila 2012. godine na kalibracijsku bazu UPV (García-Asenjo i dr. 2021).*

| Stupovi | Duljina [m] | Mjerna nesigurnost ($k=2$) [mm] |
|---------|----------------|-----------------------------------------|
| 1–2 | 28,38334 | $\pm 0,20$ |
| 1–3 | 94,40121 | $\pm 0,21$ |
| 1–4 | 198,00786 | $\pm 0,26$ |
| 1–5 | 282,78960 | $\pm 0,30$ |
| 1–6 | 330,01110 | $\pm 0,33$ |
| 1–7 | 151,17235 | $\pm 0,24$ |

Sporazumom sklopljenim između Politehničkog sveučilišta u Valenciji i Sveučilišta Complutense u Madridu (UCM – *Universidad Complutense de Madrid*) dopuštena je uporaba daljinomjera Mekometer ME5000 na kalibracijskoj bazi UPV radi praćenja stabilnosti baze. U tu svrhu obavljene su mjerne kampanje GNSS-a od 2013. do 2016. godine, pri čemu su se mjerenja odvijala u 4 sesije po 12 sati na stupovima 1 i 3. Prilikom mjerenja primijenjeni su GNSS-prijamnici Trimble 5700 i Leica GS10 te precizne antene *Choke Ring* Leica AR25. Rezultati GNSS-mjerenja obrađeni su znanstvenim softverom *Bernese 5.2* (García-Asenjo i dr. 2021). Stupovi 1 i 3 izabrani su zbog najbolje lokacije te su u tablici 7 uspoređeni rezultati mjerenja duljina preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Mekometer ME5000 i GNSS-om s pripadajućim mjernim nesigurnostima.

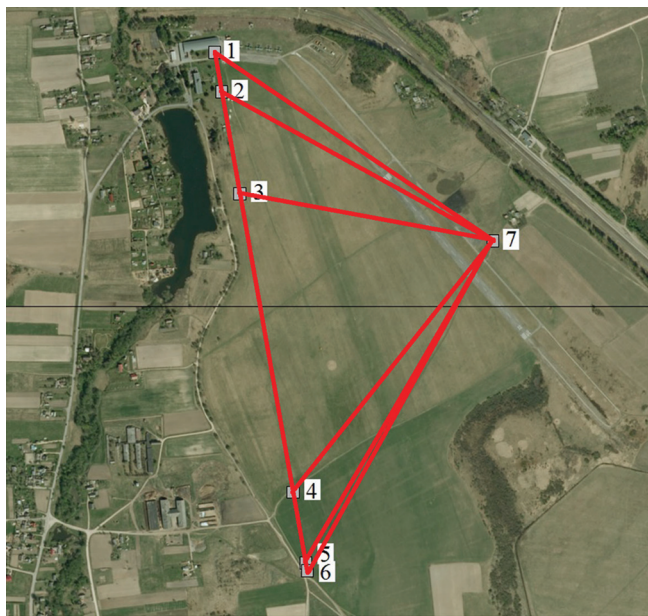
Tablica 7. *Rezultati mjerenja na kalibracijskoj bazi UPV (prema García-Asenjo i dr. 2021).*

| Godina mjerenja | ME5000 [m] | GNSS [m] | GNSS – ME5000 [mm] | Mjerna nesigurnost ($k=2$) [mm] |
|-----------------|---------------|-------------|-----------------------|-----------------------------------------|
| 2013. | 94,40146 | 94,40133 | -0,13 | $\pm 0,42$ |
| 2014. | 94,40057 | 94,40085 | 0,28 | $\pm 0,40$ |
| 2015. | 94,40108 | 94,40110 | 0,02 | $\pm 0,45$ |
| 2016. | 94,40093 | 94,40126 | 0,33 | $\pm 0,54$ |

6. Kalibracijska baza u Litvi

Institut za geodeziju Tehničkog sveučilišta Gediminas u Vilniusu u Litvi (VGTU – *Vilnius Gediminas Technical University*) uspostavio je 1996. godine kalibracijsku bazu Kyviškes za umjeravanje elektrooptičkih instrumenata te je najduža kalibracijska baza u Litvi. Baza se nalazi 15 km istočno od grada Vilnusa. Za sva mjerenja duljina primijenjen je precizni elektrooptički daljinomjer Kern Mekometer ME5000, a posljednje je umjeravanje obavljeno 2007.

godine (tablica 8). Baza se sastoji od 6 stupova u pravcu na udaljenostima 100 m, 360 m, 1120 m, 1300 m i 1320 m od početnog stupa (slika 10). Položaj kalibracijske baze pogodan je za umjeravanje horizontalnih kutova geodetskih mjernih stanica, ali i za GNSS-mjerenja (slika 11) te je gradnjom sedmog stupa 2000. godine kalibracijska baza poprimila oblik trokuta (slika 10). Udaljenost između stupova 1 i 7 iznosi 841 m (Büga i dr. 2016).



Slika 10. Konfiguracija kalibracijske baze Kyviškes (prema Büga i dr. 2016).



Slika 11. GNSS-mjerenja na kalibracijskoj bazi Kyviškes (Jokela i dr. 2009).

Rezultati umjeravanja preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Mekometrom ME5000 uz mjerenje atmosferskih parametara potvrđuju dobru stabilnost baze, pri čemu se dobivena mjerna nesigurnost nalazi u intervalu od $\pm 0,20$ mm do $\pm 0,90$ mm ($k=2$).

Tablica 8. *Rezultati umjeravanja na kalibracijskoj bazi Kyviškes 2007. godine (prema Būga i dr. 2008).*

| Stupovi | Duljina [m] | Mjerna nesigurnost ($k=2$) [mm] |
|---------|----------------|-----------------------------------------|
| 1–2 | 100,1634 | $\pm 0,20$ |
| 1–3 | 360,1771 | $\pm 0,30$ |
| 1–4 | 1120,3867 | $\pm 0,80$ |
| 1–5 | 1300,4837 | $\pm 0,90$ |
| 1–6 | 1320,4951 | $\pm 0,90$ |
| 1–7 | 841,8144 | $\pm 0,80$ |

GNSS-om su obavljena mjerenja 2008. godine primjenom GPS-prijamnika Ashtech Z-XII3 i preciznih antena *Choke Ring* u dvije 24-satne sesije, koja su naknadno obrađena znanstvenim softverom *Bernese 5.0*. Dobivena je konačna duljina $1320 \text{ m} \pm 1,90 \text{ mm}$ ($k=2$) (Būga i dr. 2008).

7. Kalibracijska baza u Estoniji

Estonski odbor za zemljište (estonski: Maa-amet) pri Ministarstvu okoliša uspostavio je kalibracijsku bazu Vääna, koja se nalazi 20 km zapadno od Tallinna. Finski geodetski institut obavio je 2000. godine prvo umjeravanje duljine 1728 m. Baza je skraćena i obnovljena 2008. godine te ponovno umjerena, a duljina joj je 1344 m s 13 stupova (slika 12). Prilikom mjerenja 2008. godine bili su povoljni vremenski uvjeti. Umjeravanja su obavljena preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME5000 (Jokela 2014).

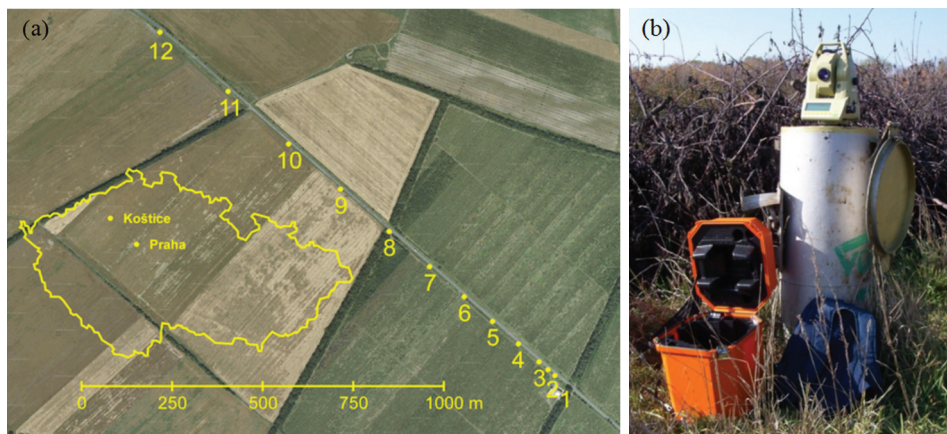


Slika 12. *Kalibracijska baza Vääna (Jokela 2014).*

Rezultati umjeravanja pokazuju da je postignuta mjerna nesigurnost od $\pm 0,16$ mm do $\pm 0,22$ mm ($k=2$) između stupova na 2 m i 374 m te mjerna nesigurnost $\pm 0,60$ mm ($k=2$) za duljinu 1344 m (Jokela 2014). Posljednja mjerenja obavljena su daljinomjerom Mekometer ME5000 u srpnju 2020. godine. Uz stupove baze postavljeni su senzori Väisälä za mjerenje atmosferskih parametara (temperature zraka i atmosferskog tlaka).

8. Kalibracijska baza u Češkoj

Češka nacionalna kalibracijska baza Koštice nalazi se na području sjeverne Češke, 60 km sjeverozapadno od Praga. Pozicionirana je uz cestu između naselja Koštice i Libčevos (slika 13a). Baza se sastoji od 12 trajno stabiliziranih stupova koji su dijelovi geodetske osnovne Koštice. Duljina kalibracijske baze iznosi 1450 m. Umjeravanje je obavljeno preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Leica TCA2003 (slika 13b, tablica 9).



Slika 13. a) Konfiguracija kalibracijske baze Koštice, b) umjeravanje preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Leica TCA2003 (Lechner i dr. 2008).

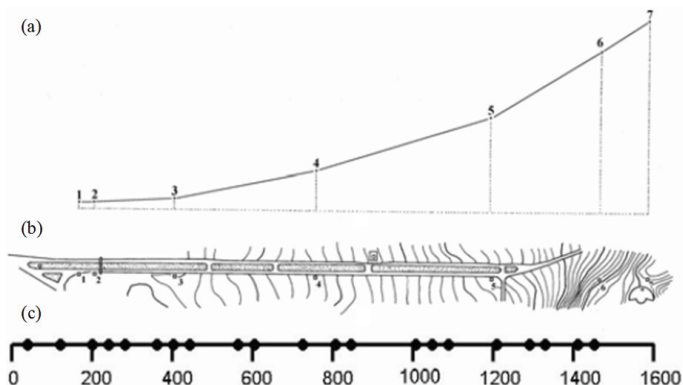
Prilikom umjeravanja upotrijebljeni su instrumenti za mjerenje atmosferskih parametara (temperature zraka i atmosferskog tlaka). Mjerna sljedivost prenesena je laserskim interferometrom HP 5519A na malim duljinama (Lechner i dr. 2008).

Tablica 9. *Rezultati umjeravanja preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Leica TCA2003 (prema Lechner i dr. 2008).*

| Stupovi | Duljina [m] | Mjerna nesigurnost ($k=2$) [mm] |
|---------|----------------|-----------------------------------------|
| 1–2 | 25,0892 | $\pm 0,5$ |
| 1–3 | 58,0519 | $\pm 0,5$ |
| 1–4 | 133,8831 | $\pm 0,6$ |
| 1–5 | 228,9825 | $\pm 0,8$ |
| 1–6 | 332,9594 | $\pm 1,1$ |
| 1–7 | 459,8596 | $\pm 1,5$ |
| 1–8 | 608,8432 | $\pm 1,9$ |
| 1–9 | 787,0671 | $\pm 2,4$ |
| 1–10 | 977,8891 | $\pm 3,0$ |
| 1–11 | 1199,9900 | $\pm 3,6$ |
| 1–12 | 1450,0077 | $\pm 4,4$ |

9. Kalibracijska baza u Turskoj

Kalibracijska baza Konya nalazi se na području kampusa Alaeddin Keykubad Sveučilišta Selcuk u gradu Konyi u Turskoj. Baza se sastoji od 7 stupova duljine 1450 m (slika 14c), koji su umjereni preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME3000. GPS-mjerenja obavljena su 2006. godine istovremeno sa 7 dvofrekvencijskih GPS-prijamnika Topcon Odyssey s duljinama trajanja sesije 4 sata. Dobivene mjerne nesigurnosti mjerenja kosih duljina (baznih linija, vektora) GPS-om iznosile su od $\pm 0,30$ mm do $\pm 0,60$ mm ($k=2$). Vektori izmjereni GPS-om reducirani su na horizont, a zatim na referentnu plohu koja je definirana visinom prve točke baze (slika 14a) (İnal i dr. 2008).



Slika 14. *a) Uzdužni profil kalibracijske baze Konya, b) topografski prikaz, c) udaljenosti od početnog stupa (İnal i dr. 2008).*

Duljine na kalibracijskoj bazi izmjerene su daljinomjerima Sokkisha SET 2, Topcon GTS 701, Topcon GTS 229 i Sokkia Power SET 2000, kako bi se za svaki od njih odredila mjerna nesigurnost mjerenja duljina te adicijska korekcija. U tablici 10 uspoređeni su rezultati mjerenja daljinomjerom Topcon GTS 701 i GPS-om. Iz dobivenih mjernih nesigurnosti mjerenja baznih linija zaključeno je da se GPS može primijeniti za umjeravanje instrumenata na kalibracijskoj bazi Konya (İnal i dr. 2008).

Tablica 10. *Rezultati umjeravanja na kalibracijskoj bazi Konya (prema İnal i dr. 2008).*

| Stupovi | Topcon GTS 701 [m] | GPS | |
|---------|-----------------------|----------------|-----------------------------------------|
| | | Duljina [m] | Mjerna nesigurnost ($k=2$) [mm] |
| 1–2 | 40,3796 | 40,3580 | ±0,34 |
| 1–3 | 241,8234 | 241,8038 | ±0,60 |
| 1–4 | 604,2069 | 604,2408 | ±0,60 |
| 1–5 | 1047,2355 | 1047,4439 | ±0,50 |
| 1–6 | 1328,7636 | 1329,3236 | ±0,54 |
| 1–7 | 1449,4850 | 1450,2196 | ±0,30 |

10. Kalibracijske baze u Kini

Na temelju iskustva izgradnje i umjeravanja kalibracijske baze Nummela te uz pomoć Finskog geodetskog instituta izgrađena je kalibracijska baza Chengdu u Kini. Sastojala se od 12 stupova ukupne duljine 1488 m. Transfer mjerila s kalibracijske baze Nummela prenesen je 1998. godine preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME5000. Konačna izjednačena duljina iznosi 1488,01737 m ± 0,42 mm ($k=2$). Baza je uništena u jakom potresu 2008. godine i više se ne upotrebljava (Jokela 2014).

Zbog toga je izgrađena nova kalibracijska baza u Kini, u gradu Shenyangu. Sastoji se od 6 stupova s ukupnom duljinom 1104 m. Prva su umjeravanja obavljena 2019. godine pomoću 3 nezavisne metode: invarnim žicama duljine 24 m, preciznim elektrooptičkim daljinomjerom i GNSS-om. Prilikom mjerenja duljina, pomoću 4 meteorološka senzora raspoređena duž kalibracijske baze mjerena je temperatura zraka, atmosferski tlak i relativna vlažnost zraka. GNSS-mjerenja obavljena su na stupovima 3, 5 i 6 (slika 15). Upotrijebljena su 3 prijamnika Trimble NetR9 s duljinom trajanja sesije 24 sata. Nekoliko visokih stabala u blizini stupa 5 rezultiralo je povećanim multipathom (Gu i dr. 2019).



Slika 15. GNSS-mjerenja na kalibracijskoj bazi Shenyang (Gu i dr. 2019).

Budući da su za GNSS-mjerenja upotrijebljena samo 3 stupa, u tablici 11 prikazani su rezultati umjeravanja samo između tih stupova.

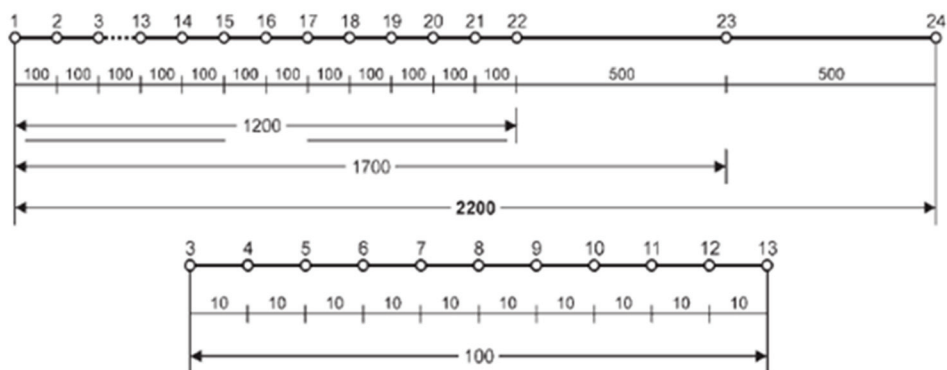
Tablica 11. Rezultati mjerenja na kalibracijskoj bazi Shenyang (prema Gu i dr. 2019).

| Stupovi | Mjerena duljina | | | Razlika duljina | | |
|---------|---------------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Precizni daljinomjer (1) [m] | GNSS (2) [m] | Invarna žica (3) [m] | (1)–(2) [mm] | (1)–(3) [mm] | (2)–(3) [mm] |
| 3–5 | 480,09099 | 480,08725 | 480,09135 | 3,74 | –0,36 | –4,10 |
| 3–6 | 576,09959 | 576,09968 | 576,10006 | –0,09 | –0,47 | –0,38 |
| 5–6 | 96,00860 | 96,01242 | 96,00871 | –3,82 | –0,11 | 3,71 |

U tablici 15 navedena je najveća duljina (stupovi 3–6), koja je izmjerena trima neovisnim metodama. Mjerna nesigurnost nije prikazana zbog toga što nije dana u dostupnoj literaturi, nego je iskazana razlika duljina.

11. Kalibracijska baza u Srbiji

Kalibracijsku bazu uspostavio je 1989. godine Vojnogeografski institut Srbije (VGI) u blizini grada Kovina, Republika Srbija. Baza se nalazi 20 km istočno od Beograda. Sastoji se od 24 stupa ukupne duljine 2200 m (slika 16). VGI je izgradio bazu kao primarni standard za umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera.



Slika 16. Raspored stupova kalibracijske baze Kovin (Božić i dr. 2013).

Umjeravanja su obavljena preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Mekometer ME5000 u 10 mjernih kampanja, podijeljenih u dvije faze: mjerenje malih duljina i mjerenje velikih duljina. Prvo mjerenje baze provedeno je 1990. godine, a posljednje 2002. godine, rezultati kojega su prikazani u tablici 12 (Božić i dr. 2013).

Tablica 12. Rezultati umjeravanja na kalibracijskoj bazi Kovin (prema Božić i dr. 2013).

| Stup | Duljina [m] | Standardno odstupanje ($k=1$) [mm] | Stup | Duljina [m] | Standardno odstupanje ($k=1$) [mm] |
|------|----------------|-----------------------------------------------|------|----------------|-----------------------------------------------|
| 1 | 0,0000 | 0,00 | 13 | 299,8662 | 0,26 |
| 2 | 100,0066 | 0,26 | 14 | 400,0626 | 0,12 |
| 3 | 199,9542 | 0,26 | 15 | 500,1310 | 0,26 |
| 4 | 209,9861 | 0,26 | 16 | 599,9693 | 0,25 |
| 5 | 219,9154 | 0,26 | 17 | 700,0366 | 0,25 |
| 6 | 229,9571 | 0,26 | 18 | 800,0903 | 0,12 |
| 7 | 240,0041 | 0,26 | 19 | 900,0693 | 0,25 |
| 8 | 250,0280 | 0,26 | 20 | 999,9286 | 0,25 |
| 9 | 260,0482 | 0,26 | 21 | 1099,9194 | 0,25 |
| 10 | 270,0023 | 0,26 | 22 | 1199,9276 | 0,13 |
| 11 | 279,9531 | 0,26 | 23 | 1699,8956 | 0,14 |
| 12 | 289,9994 | 0,26 | 24 | 2199,9820 | 0,15 |

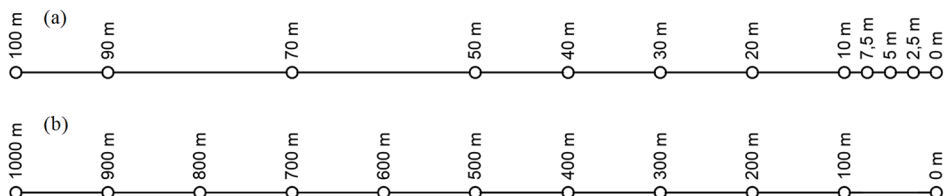
12. Kalibracijska baza u Hrvatskoj

Kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu izgrađena je 1982. godine za potrebe ispitivanja i umjeravanja elektrooptičkih daljinomjera te postizanja jednoga zajedničkog mjerila pri mjeranju duljina do 3100 m (6000 m) na području Republike Hrvatske (Solarić i dr. 1992). Baza se nalazi na naspisu oteretnog kanala Sava – Odra u blizini Velike Gorice (slika 17).



Slika 17. Kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (Zrinjski 2010).

Projekt s rasporedom stupova (tablica 13, slika 18) izrađen je 1980. godine, pri čemu razmaci stupova omogućuju ispitivanje utjecaja pogreške fazne nehomogenosti i periodijske pogreške daljinomjera. Utjecaj pogreške fazne nehomogenosti ispituje se na malim duljinama do 100 m, dok stupovi do 3100 m služe za potrebe ispitivanja i umjeravanja daljinomjera na velikim duljinama (Benčić i Solarić 2008).



Slika 18. Raspored stupova kalibracijske baze Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, a) udaljenosti od početnog stupa 11A (tablica 13 lijevo), b) udaljenosti od početnog stupa 0 (tablica 13 desno).

Tablica 13. *Raspored stupova kalibracijske baze Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (Zrinjski 2010).*

| Oznaka stupa | Udaljenost od početnog stupa 11A [m] | Oznaka stupa | Udaljenost od početnog stupa 0 [m] |
|--------------|--------------------------------------|--------------|------------------------------------|
| 11A | 0 | 0 | 0 |
| 10A | 2,5 | 1 | 100 |
| 9A | 5 | 2 | 200 |
| 8A | 7,5 | 3 | 300 |
| 7A | 10 | 4 | 400 |
| 6A | 20 | 5 | 500 |
| 5A | 30 | 6 | 600 |
| 4A | 40 | 7 | 700 |
| 3A | 50 | 8 | 800 |
| 2A | 70 | 9 | 900 |
| 1A | 90 | 10 | 1000 |
| 0 | 100 | 11 | 1500 |
| | | 12 | 2000 |
| | | 13 | 3000 |

Prvo mjerenje kalibracijske baze obavljeno je 1983. godine dvjema invarnim žicama duljine 24 m i jednom invarnom vrpcom duljine 12 m (Novaković i dr. 1985). U radu Maurer i dr. (2001) opisano je drugo mjerenje 1984. godine obavljeno preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME3000 te je prikazan prijenos mjerila 1996. godine iz Münchena u Zagreb pomoću preciznog elektrooptičkog daljinomjera Kern Mekometer ME5000, pri čemu je baza u Münchenu umjerena svjetlosnim interferometrom Väisälä. Baza je obnovljena 2007. godine i posljednje umjeravanje Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu obavio je 2009. godine preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Leica TCA2003 te je pomoću GPS-a provedena neovisna kontrola mjerenja (Zrinjski 2010).

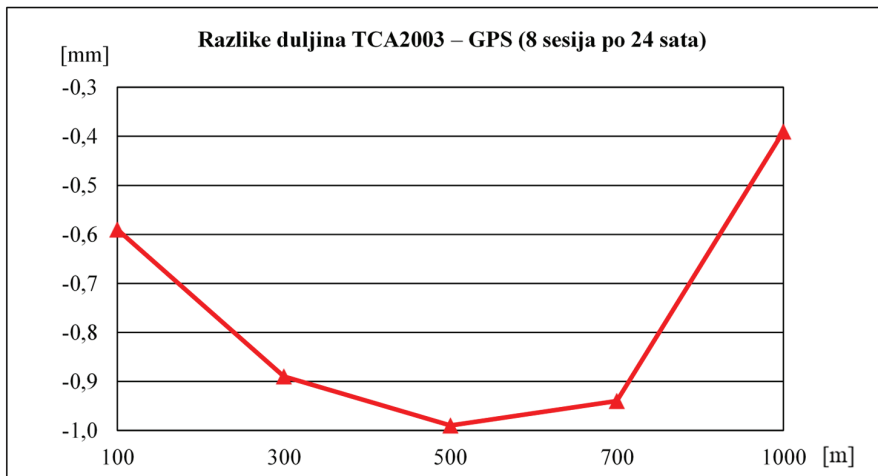
Mjerenja duljina preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Leica TCA2003 obavljena su u 5 do 18 ponavljanja, vrlo brzo jer je postupak mjerenja automatiziran te u svim kombinacijama duljina na stupovima 0, 1, 3, 5, 7 i 10 (tablica 13) (Zrinjski i dr. 2019b). Atmosferski parametri mjereni su s pomoću dva meteorološka senzora Väisälä WXT510, pri čemu je Väisälä 1 bio postavljen uz stup 0, a Väisälä 2 uz stup 10 (Zrinjski 2010, Solarić i dr. 2012).

GPS-mjerenja su obavljena u 8 sesija po 24 sata, tj. u 4 serije, primjenom 4 prijamnika Trimble 5700 i 2 prijamnika Trimble R7 te 6 antena Zephyr Geodetic (Solarić i dr. 2009, Zrinjski 2010) na stupovima baze: 0, 1, 3, 5, 7 i 10 (slika 18 b). Serija obuhvaća razdoblje mjerenja od dvije sesije, s istom postavom antena na pojedinim stupovima, pri čemu je u neparnoj sesiji (24h) antena orijentirana prema sjeveru, a u parnoj sesiji (24h) prema jugu. Tablica 14 prikazuje standardna odstupanja dobivena mjerenjima duljina raspona stupova baze i GPS-mjerenjima te ukupne razlike TCA2003 – GPS pri čemu su sve dobivene razlike manje od 1 mm (Zrinjski 2010).

Tablica 14. Rezultati mjerenja na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu 2009. godine (Zrinjski 2010).

| Stupovi | Približna duljina [m] | Standardno odstupanje TCA2003 ($k=1$) [mm] | Standardno odstupanje GPS ($k=1,96$) [mm] | Razlike duljina TCA2003 – GPS [mm] | Relativna točnost |
|---------|--------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| 0–1 | 100 | 0,067 | 0,26 | –0,59 | 1:169 492 |
| 0–3 | 300 | 0,070 | 0,35 | –0,89 | 1:337 079 |
| 0–5 | 500 | 0,073 | 0,45 | –0,99 | 1:505 051 |
| 0–7 | 700 | 0,076 | 0,49 | –0,94 | 1:744 681 |
| 0–10 | 1000 | 0,081 | 0,70 | –0,39 | 1:2 564 103 |

Rezultati umjeravanja pokazuju da je mjerilo na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta određeno s točnošću od 0,39 mm na duljini od 1000 m (tablica 14, slika 19), uz primjenu preciznog elektrooptičkog daljinomjera Leica TCA2003, senzora Väisälä WXT510, umjeravanjem frekvencije daljinomjera u Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (Zrinjski 2010, Barković i dr. 2012) i određivanjem periodijske pogreške te neovisnom kontrolom GNSS-mjerenjima. Predznak svih razlika duljina je minus, što znači da su sve duljine dobivene GPS-om veće od istih dobivenih s pomoću preciznog elektrooptičkog daljinomjera Leica TCA2003 (Zrinjski 2010).



Slika 19. Razlike konačnih duljina TCA2003 – GPS (Zrinjski 2010).

Danas kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu služi za ispitivanje i umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera i GNSS-instrumenata te drugih mjernih instrumenata i uređaja, što obavezno treba obavljati redovito te prije preciznih geodetskih mjerenja (Zrinjski 2010, Zrinjski i dr. 2011a, Zrinjski i dr. 2011b, Zrinjski i dr. 2015, Barković i dr. 2016).

13. Analiza parametara umjeravanja kalibracijskih baza

U tablici 15 prikazan je pregled najbitnijih parametara umjeravanja kalibracijskih baza obuhvaćenih ovim radom prema dostupnoj literaturi. Od proučenih parametara u završnoj analizi u obzir su uzete metode i godine umjeravanja te mjerena duljina i pripadajuća mjerna nesigurnost uz faktor proširenja.

Tablica 15. Analiza parametara umjeravanja kalibracijskih baza.

| Mjesto Država | Ukupni broj stupova | Godina izgradnje | Metode umjeravanja | Godina umjeravanja | Umjerena duljina [m] | Mjerna nesigurnost [mm] | |
|--------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|------------|
| Nummela Finska | 24 | 1933. | Intereferometar Väisälä | 2007. | 864,12286 | $k=1$ | $\pm 0,07$ |
| Olkiluoto Finska | 2 | 2002. | ME5000 | 2012. | 511,2557 | $k=2$ | $\pm 0,26$ |
| | | | GNSS | 2011. | 511,2562 | $k=2$ | $\pm 0,32$ |
| Otaniemi Finska | 4 | 1964. | Intereferometar Väisälä | 1998. | 75,02566 | $k=2$ | $\pm 0,06$ |
| Braunschweig Njemačka | 8 | 1970-ih | ME5000 | 2011. | 599,98861 | $k=2$ | $\pm 0,47$ |
| Neubiberg Njemačka | 8 | 2009. | ME5000 | 2014. | 1099,98594 | $k=2$ | $\pm 0,03$ |
| | | | GNSS | 2014. | 1099,9940 | $k=2$ | $\pm 0,53$ |
| Innsbruck Austija | 7 | 2006. | ME5000 | 2008. | 1080,04118 | $k=2$ | $\pm 0,81$ |
| Valencia Španjolska | 6 + 1 (oblik trokuta) | 2007. | ME5000 | 2012. | 330,01110 | $k=2$ | $\pm 0,30$ |
| | | | ME5000 | 2016. | 94,40093 | $k=2$ | $\pm 0,21$ |
| | | | GNSS | 2016. | 94,40126 | $k=2$ | $\pm 0,54$ |
| Kyviškes Litva | 6 + 1 (oblik trokuta) | 2000. | ME5000 | 2007. | 1320,4951 | $k=2$ | $\pm 0,90$ |
| | | | GNSS | 2007. | 1320 | $k=2$ | $\pm 1,90$ |
| Väina Estonija | 13 | 2008. | ME5000 | 2008. | 1344 | $k=2$ | $\pm 0,60$ |
| Košnice Češka | 12 | 1983. | TCA2003 | 2007. | 1450,0077 | $k=2$ | $\pm 4,40$ |
| Konya Turska | 7 | 1990. | GTS 701 | 2006. | 1449,4850 | $k=2$ | $\pm 2,00$ |
| | | | GNSS | 2006. | 1450,2196 | $k=2$ | $\pm 0,30$ |
| Shenyang Kina | 6 | nakon 2012. | Precizni daljinomjer (1) | 2019. | 576,09959 | (1)–(2) | $-0,09$ |
| | | | GNSS (2) | 2019. | 576,09968 | (1)–(3) | $-0,47$ |
| | | | Invarna žica (3) | 2019. | 576,10006 | (2)–(3) | $-0,38$ |
| Kovin Srbija | 24 | 1989. | ME5000 | 2002. | 2199,9820 | $k=1$ | $\pm 0,15$ |
| Zagreb Hrvatska | 25 | 1982. | TCA2003 | 2009. | 1000 | $k=1$ | $\pm 0,08$ |
| | | | GNSS | 2009. | 1000 | $k=1,96$ | $\pm 0,70$ |

Najstarija je kalibracijska baza Nummela u Finskoj, dok je baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu najdulja u svijetu s ukupnom duljinom 3100 m te je ujedno baza s najvećim brojem stupova. Prema provedenoj analizi, umjeravane duljine kalibracijskih baza iznose od 75 m u laboratoriju do 2200 m na otvorenome. Dobivena je najmanja mjerna nesigurnost $\pm 0,03$ mm ($k=2$) za duljinu 1099,98594 m umjerenu preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME5000 na kalibracijskoj bazi Neubiberg u Njemačkoj, a najveća mjerna nesigurnost $\pm 4,40$ mm ($k=2$) dobivena je za duljinu 1450,0077 m na kalibracijskoj bazi Koštice u Češkoj, koja je umjerena preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Leica TCA2003.

14. Zaključak

Precizno mjerenje duljina mjerni je postupak određivanja duljina s relativnom točnošću od 1:400 000 ili boljom (Deumlich i Staiger 2002). Visokoprecizno mjerenje duljina zahtijeva postizanje relativne točnosti 1:1 000 000 ili bolje (Benčić i Solarić 2008). Danas se precizno umjeravanje kalibracijskih baza obavlja svjetlosnim interferometrom, preciznim elektrooptičkim daljinomjerom i GNSS-om. Prema dobivenim parametrima, mjerenja preciznim elektrooptičkim daljinomjerima na malim duljinama preciznija su u odnosu na mjerenja GNSS-om, dok GNSS-mjerenja nisu osjetljiva na atmosferske parametre, pa mogu poslužiti kao neovisna kontrola mjerenja duljina na kalibracijskim bazama.

Posljednje umjeravanje kalibracijske baze Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu obavljeno je dvjema neovisnim metodama (preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Leica TCA2003 i GPS-om), pri čemu je postignuta relativna točnost 1:2 564 103 na duljini 1000 m. Razlika duljina TCA2003 – GPS na duljini 1000 m iznosi $-0,39$ mm, što definira mjerilo kalibracijske baze Geodetskog fakulteta s točnošću od $0,39$ mm na duljini od 1000 m te se može kategorizirati u visokoprecizna mjerenja.

Kako bi se postigla relativna točnost 1:1 000 000 (1 ppm, 10^{-6}) ili bolja pri mjerenju elektrooptičkim daljinomjerom, potrebno je precizno mjeriti atmosferske parametre, umjeriti mjernu frekvenciju elektrooptičkog daljinomjera i odrediti periodijske pogreške. Preporuča se mjerenje atmosferskih parametara duž kalibracijske baze, uz svaki stup. Potrebno je odabrati senzor koji ima zadovoljavajuću točnost i automatizirati postupak mjerenja atmosferskih parametara (temperatura zraka, atmosferskog tlaka i relativne vlažnosti zraka).

Puna operativnost GPS-a, GLONASS-a, Galilea i BeiDoua omogućuje znatna poboljšanja u pozicioniranju i određivanju vremena, što se može primijeniti u preciznom mjerenju duljina baznih linija (Zrinjski i dr. 2019a). Prilikom takvih mjerenja potrebno je primijeniti precizne GNSS-antene (*Choke Ring*) i prijamnike koji registriraju signale navedenih globalnih navigacijskih satelitskih sustava, primijeniti interval registracije opažanja od 1 sekunde te obradu podataka GNSS-mjerenja provesti znanstvenim softverom *Bernese*.

Za umjeravanje kalibracijskih baza preporuča se svakako primijeniti barem dvije neovisne precizne metode, radi usporedbe dobivenih rezultata i preciznosti mjerenja te procjene ostvarene točnosti umjeravanja.

Literatura

- Barković, Đ., Zrinjski, M., Peša, M. (2012): Testing of Measuring Frequency of Electro-Optical Distance Meters, Conference Proceedings, Volume II – 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2012, International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM (Ed.), Sofia, 805–812.
- Barković, Đ., Zrinjski, M., Baričević, S. (2016): Automatizacija ispitivanja preciznosti elektrooptičkih daljinomjera na kalibracijskoj bazi, Geodetski list, 70 (4), 311–336.
- Benčić, D., Solarić, N. (2008): Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici, Školska knjiga, Zagreb.
- Božić, B., Fan, H., Milosavljević, Z. (2013): Establishment of the MGI EDM calibration baseline, Survey Review, 45 (331), 263–268.
- Būga, A., Jokela J., Putrimas R. (2008): Traceability, Stability and Use of the Kyviškes Calibration Baseline – The First 10 Years, Proceedings, 7th International Conference “Environmental Engineering”, Selected papers, Vol. 3, Vilnius Gediminas Technical University Publishing House “Technika”, May 22–23, Vilnius, Lithuania, 1274–1280.
- Būga, A., Birvydiene, R., Kolosovskis, R., Krikštaponis, B., Obuchovski, R., Paršeliūnas, E., Putrimas, R., Šlikas, D. (2016): Analysis of the calibration quality of the Kyviškes Calibration Baseline, Acta Geodaetica et Geophysica, 51 (3), 505–514.
- Deumlich, F., Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, 9., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- García-Asenjo, L., Baselga, S., Atkins, C., Garrigues, P. (2021): Development of a Submillimetric GNSS-Based Distance Meter for Length Metrology, Sensors, 21 (4), 1145, 1–21.
- Gu, Y., Wang, L., Xiang, F., Ouyang, W., Jiang, L. (2019): Experimental Comparison of Outdoor Baseline Measurements by Different Methods, 2nd International Conference on Biofilms (ChinaBiofilms 2019), E3S Web of Conferences, Vol. 131, 01057, 1–5.
- Heister, H. (2012): Die neue Kalibrierbasis der UniBw München, Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 119 (10), 336–343.
- Heunecke, O. (2015): Die neue Neubiberger Pfeilerstrecke, Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 140 (6), 357–364.
- İnal, C., Sanlioglu, İ., Yigit, C. Ö. (2008): Scaling of EDM Calibration Baselines by GPS and Controlling of EDM Parameters, Survey Review, 40 (309), 304–312.
- Jokela, J. (2014): Length in Geodesy – On Metrological Traceability of a Geospatial Measurand, Doctoral dissertation, School of Engineering, Aalto University, Espoo, Finland.
- Jokela, J. (2017): Use of Nummela Standard Baseline in Present-Day European Metrology Research, Proceedings, FIG Working Week 2017, May 29 – June

- 2, Helsinki, Finland, 1–15.
- Jokela, J., Häkli, P. (2006): Current Research and Development at the Nummela Standard Baseline, Conference Proceedings, XXIII FIG Congress, October 8–13, Munich, Germany, 1–15.
- Jokela, J., Poutanen, M., Németh Zs., Virág, G. (2001): Remeasurement of the Gödöllő Standard Baseline, Publications of the Finnish Geodetic Institute, Helsinki, No. 131, 1–37.
- Jokela, J., Häkli, P., Ahola, J., Būga, A., Putrimas, R. (2009): On Traceability of Long Distances, Proceedings, XIX IMEKO World Congress, September 6–11, Lisbon, Portugal, 1882–1887.
- Jokela, J., Häkli, P., Kugler, R., Skorpil, H., Matus, M., Poutanen, M. (2010): Calibration of the BEV Geodetic Baseline, Proceedings, FIG Congress 2010, April 11–16, Sydney, Australia, 1–15.
- Jokela, J., Pollinger, F., Doloca, N. R., Meiners-Hagen, K. (2012): A comparison of two weather data acquisition methods for the calibration of the PTB geodetic baseline, Proceedings, XX IMEKO World Congress, September 9–14, Busan, Republic of Korea, 1–6.
- Koivula, H., Kallio, U., Nyberg, S., Jokela, J., Poutanen, M. (2012): GPS Operations at Olkiluoto in 2011, Working Report 2012-36, Finnish Geodetic Institute, Olkiluoto, Finland.
- Kontić, S., Mrkić, R., Kokalović, M. (1987): Primarni etaloni uglova i dužina SFRJ i njihov značaj za osnovne geodetske radove, Zbornik radova, Osnovni geodetski radovi i oprema za njihovo izvođenje, Priština, 349–368.
- Lechner, J., Cervinka L., Umnov I. (2008): Geodetic Surveying Tasks for Establishing a National Long Length Standard Baseline, Proceedings, FIG Working Week 2008, June 14–19, Stockholm, Sweden, 1–9.
- Maurer, W., Schnädelbach, K., Solarić, N., Novaković, G. (2001): Povezivanje Münchenske i zagrebačke baze za ispitivanje i umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera, Geodetski list, 55 (3), 177–194.
- Mičuda, J., Korčák, P. (2001): Methodology for Calibration of Electronic Distance Meters on the Length Baseline Hlohovec, Proceedings, Metrology in Geodesy, Bratislava, Slovakia, 101–105.
- Novaković, G., Džapo, M., Lasić, Z. (1985): Prvo mjerenje duljine kalibracijske baze Geodetskog fakulteta u Zagrebu invarskim žicama, Geodetski list, 39 (10–12), 291–295.
- Pollinger, F., Meyer, T., Beyer, J., Doloca, N. R., Schellin, W., Niemeier, W., Jokela, J., Häkli, P., Abou-Zeid, A., Meiners-Hagen, K. (2012): The upgraded PTB 600 m baseline: a high-accuracy reference for the calibration and the development of long distance measurement devices, Measurement Science and Technology, 23 (9), 1–11.
- Solarić, N., Solarić, M., Benčić, D. (1992): Projekt i izgradnja kalibracijske baze Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Geodetski list, 46 (1), 7–25.
- Solarić, N., Solarić, M., Zrinjski, M. (2009): GPS-antena Zephyr Geodetic, Geodetski list, 63 (4), 329–352.
- Solarić, N., Barković, Đ., Zrinjski, M. (2012): Automatizacija mjerenja

- atmosferskih parametara pri preciznom mjerenju duljina, Geodetski list, 66 (3), 165–186.
- Vodopivec, F. (1977): Dolžinska komparatorska baza SRS v Logatcu, interni izvještaj, August 1977., 1–449.
- Zimmermann, F., Eling, C., Kuhlmann, H. (2016): Investigations on the Influence of Antenna Near-Field Effects and Satellite Obstruction on the Uncertainty of GNSS-based Distance Measurements, *Journal of Applied Geodesy*, 10 (1), 53–60.
- Zrinjski, M. (2010): Definiranje mjerila kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primjenom preciznog elektrooptičkog daljinomjera i GPS-a, doktorska disertacija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Zrinjski, M., Barković, Đ., Kapustić, M. (2011a): Determination of Pillar Coordinates at the Calibration Baseline of the Faculty of Geodesy in Zagreb by Applying GPS, *Conference Proceedings, Volume II – 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2011, International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM (Ed.)*, Sofia, 239–246.
- Zrinjski, M., Solarić, N., Barković, Đ. (2011b): Analysis of the Influence of Multipath Effects on GPS Measurements at the Calibration Baseline of the Faculty of Geodesy, University of Zagreb, *Proceedings of Papers, 1st Serbian Geodetic Congress, Joksic, D. (Ed.)*, Beograd, 223–228.
- Zrinjski, M., Barković, Đ., Herent, M. (2015): Testing the Precision of GNSS RTK Measuring Systems by Applying of Computer Programme, *Conference Proceedings, Volume II – 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015, International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM (Ed.)*, Sofia, 499–506.
- Zrinjski, M., Barković, Đ., Matika, K. (2019a): Razvoj i modernizacija GNSS-a, *Geodetski list*, 73 (1), 45–65.
- Zrinjski, M., Barković, Đ., Baričević, S. (2019b): Precise Determination of Calibration Baseline Distances, *Journal of Surveying Engineering*, 145 (4), 05019005, 1–9.

Mrežna adresa

URL 1: Eine Basis für lange Strecken – PTB,
<https://www.ptb.de/cms/presseaktuelles/zeitschriften-magazine/ptb-news/ptb-news-ausgaben/archivederptb-news/ptb-news-2013-1/eine-basis-fuer-lange-strecken.html>,
(15. 1. 2022.).

Review of Precise Calibration Methods of Geodetic Calibration Baselines

ABSTRACT. Precise calibration of geodetic calibration baselines is performed by means of light interferometers, precise electro-optical distance meters and GNSS. The paper presents an overview of 14 geodetic calibration baselines in 11 states in the world that are calibrated with one or more precise methods. Calibrated precise electro-optical distance meters present a standard for the transfer of traceable scale to new geodetic calibration baselines. Further calibration on geodetic calibration baselines can be done using independent methods, which provides the control of measuring results. The presented results offer the data obtained during the last calibration of the geodetic calibration baseline of the Faculty of Geodesy, University of Zagreb, using precise electro-optical distance meter and GPS. The calibration parameters at all 14 geodetic calibration baselines have been analysed. The measuring uncertainty of the longest calibrated distance has been indicated as the most important calibration parameter for each geodetic calibration baseline with the appropriate expansion factor.

Keywords: geodetic calibration baseline, precise calibration, light interferometer, precise electro-optical distance meter, GNSS, measuring uncertainty.

Primljeno / Received: 2022-02-12

Prihvaćeno / Accepted: 2022-03-15