

SLJEDIVOST DULJINA OD DEFINICIJE METRA DO KALIBRACIJSKE BAZE

Distances Traceability from the Meter Definition to Calibration Baseline

SAŽETAK:

U ovom radu prikazana je mjerna sljedivost duljina od same definicije metra do kalibracijskih baza. Opisana je Kalibracijska baza Nummela u Finskoj na kojoj je najpreciznije u svijetu realizirana definicija metra, odnosno na kojoj su rasponi između stupova određeni najpreciznijim postojećim daljinomjerom, svjetlosnim interferometrom Väisälä. Nadalje, prikazano je umjeravanje elektrooptičkog daljinomjera Kern Mekometer ME5000 na bazi Nummela te transfer sljedivog mjerila pomoću njega na kalibracijske baze diljem Europe: Kyviškes u Litvi, Vääna u Estoniji, BEV u Innsbrucku u Austriji, PTB u Braunschweigu u Njemačkoj te UPV u Valenciji u Španjolskoj. Opisan je i transfer mjerila s baze Ebersberger Forst u Münchenu na kalibracijsku bazu Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu koristeći Kern Mekometer ME5000 čime je kalibracijska baza Geodetskog fakulteta postala dio svjetskih mjernih sustava i primarni etalon za mjerenje velikih duljina u Republici Hrvatskoj.

KLJUČNE RIJEČI: SLJEDIVOST, KALIBRACIJSKA BAZA NUMMELA, TRANSFER MJERILA, INTERFEROMETAR VÄISÄLÄ, KALIBRACIJSKA BAZA GEODETSKOG FAKULTETA SVEUČILIŠTA U ZAGREBU.

SUMMARY:

This paper presents the measurement traceability of the lengths from the definition of the meter to different calibration bases. Nummela Calibration Base in Finland is described, where the most precise definition of the meter in the world is realized. Ranges between its pillars are determined by the most accurate existing distance meter, the Väisälä light interferometer. Furthermore, the calibration of the Nummela baseline by using Kern Mekometer ME5000 and the transfer of traceable gauges through calibration bases across Europe is presented: Kyviškes in Lithuania, Vääna in Estonia, BEV in Innsbruck in Austria, PTB in Braunschweig, Germany, and UPV in Valencia, Spain. The scale transfer from Ebersberger Forst Baseline in Munich to the Calibration Baseline of the Faculty of Geodesy, University of Zagreb by using the Kern Mekometer ME5000 is described thus making the Calibration baseline of the Faculty of Geodesy a part of the world measurement system and the primary standard for measuring long distances in the Republic of Croatia.

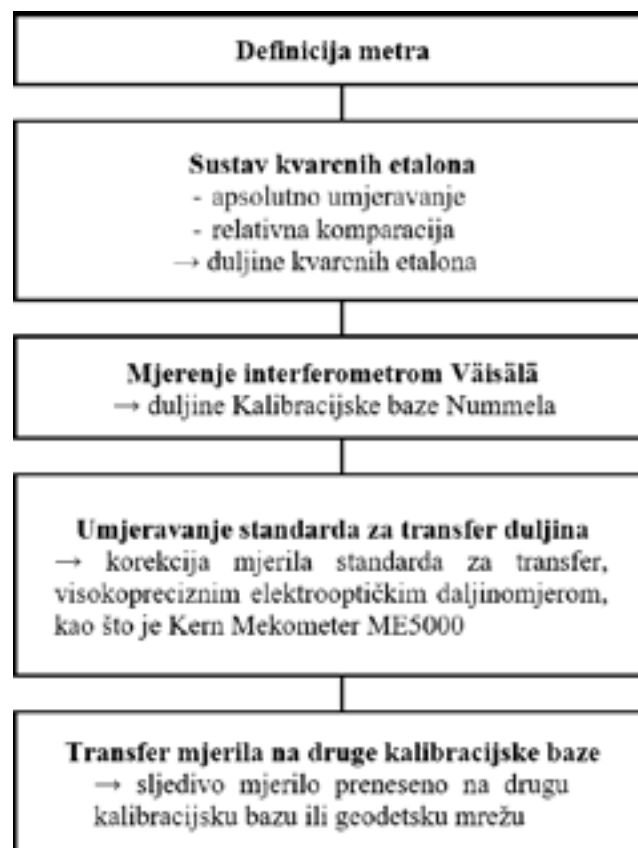
KEY WORDS: TRACEABILITY, NUMMELA CALIBRATION BASELINE, SCALE TRANSFER, VÄISÄLÄ INTERFEROMETER, CALIBRATION BASELINE OF THE FACULTY OF GEODESY, UNIVERSITY OF ZAGREB.

1. Uvod

U današnje vrijeme dostupni su nam različiti komercijalni instrumenti za mjerenje duljina, a ovisno o mjernoj nesigurnosti i doseg, formira im se cijena, a samim time i pristupačnost. Tako se instrumenti kao što su krojački, zidarski ili stolarski metar mogu pronaći u trgovinama na svakom koraku, mjerne vrpce i laserski daljinomjeri manje preciznosti u trgovinama građevinske opreme, precizniji laserski daljinomjeri i elektrooptički daljinomjeri u zastupništvima proizvođača, a najprecizniji instrumenti kao što su laserski interferometri uglavnom izravno kod proizvođača. No sve te instrumente, osim svrhe, veže i jedna zajednička karakteristika, a to je mjeriteljska sljedivost. Prema Zakonu o mjeriteljstvu (Hrvatski sabor, 2018) mjeriteljska sljedivost je: „svojstvo mjernog rezultata kojim se taj rezultat dovodi u vezu s navedenom referencijom dokumentiranim neprekinutim lancem umjeravanja, od kojih svako pridonosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti". Kao referencija koristi se mjerni etalon koji je ostvarenje definicije dane veličine s iskazanom vrijednošću veličine i mjernom nesigurnošću. Dakle, svi navedeni instrumenti su mjernom sljedivošću povezani s određenim referentnim etalonom metra koji ima mjernu sljedivost do same definicije metra. Realizirani etalon metra može biti različite kvalitete, odnosno može imati veću ili manju mjernu nesigurnost. Tako će kvaliteta određivanja nesigurnosti mjernog instrumenta biti ovisna o mjernoj sljedivosti, odnosno o mjernom etalonu i načinu prijenosa njegove mjere na instrument koji se umjerava. Konačni cilj je mjernom rezultatu osigurati dokumentirani slijed umjeravanja sve do nacionalnog ili međunarodnog mjernog standarda, a time i do mjerne jedinice u sustavu SI (*Système International d'unités*).

Umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera kao integriranih dijelova geodetskih mjernih stanica mora se obaviti visokom točnošću, odnosno malom mjernom nesigurnošću. Umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera obavlja se na kalibracijskim bazama koje također moraju biti umjerene uz poznati lanac mjeriteljske sljedivosti, i to na način da imaju nižu mjernu nesigurnost od zahtjeva uređaja koji će se umjeravati. U ovom radu na primjeru jedne od najpoznatijih kalibracijskih baza u svijetu, Nummela

u Finskoj, opisan je slijed prijenosa mjerila duljina na druge kalibracijske baze i elektrooptičke daljinomjere (slika 1.1).



Slika 1.1. Lanac sljedivosti mjerenja duljina (Jokela, 2014).

2. Kalibracijska baza Nummela

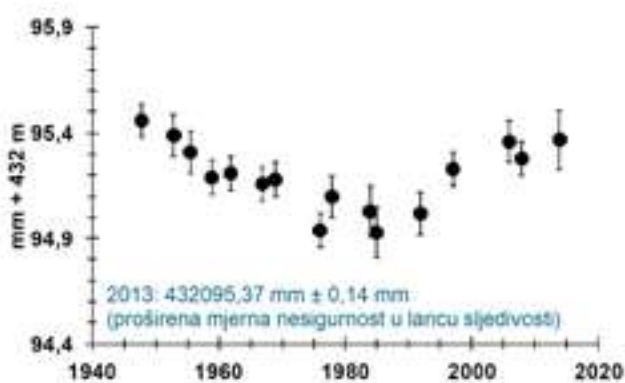
Kalibracijska baza Nummela u Finskoj, kao dio Finskog geodetskog instituta, međunarodno je priznati standard za mjerenje duljina u geodeziji. Zadatak kalibracijske baze je transfer sljedivog mjerila pomoću interferometra Väisälä na bazu, koja se koristi za umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera (NLS, 2019). Lanac sljedivosti mjerenja duljina do definicije metra ostvaren je primjenom sustava kvarenih etalona, čija je apsolutna kalibracija provedena u laboratorijima koji su akreditirani za realizaciju SI metra. Takav postav omogućuje poznatu kontinuiranost apsolutnih i relativnih umjeravanja koja sežu sve do definicije i realizacije metra. Lanac sljedivosti mjerenja duljina opisan je na slici 1.1. Baza je poznata zbog svoje više od 80 godina duge povijesti, submilimetarske stabilnosti i relativne točnosti od 10^{-7} (Jokela, 2014).

S duljinom od 864 metra, Nummela je najdulja baza izmjerena interferometrom Väisälä. Baza pruža usluge umjeravanja najpreciznijih elektrooptičkih daljinomjera u terenskim uvjetima, koji se dalje primjenjuju u preciznim geodetskim radovima i za prijenos sljedivog mjerila na druge kalibracijske baze u svijetu.

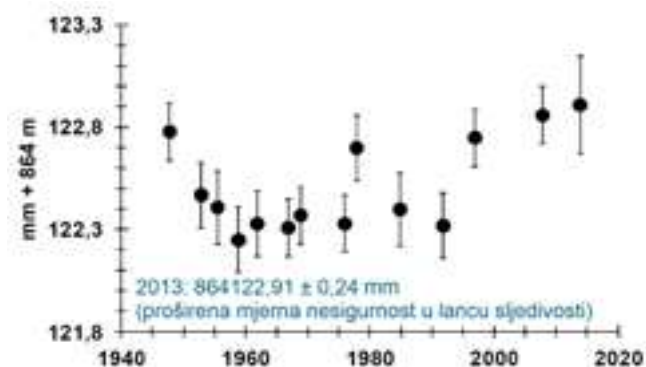
2.1. POVIJEST KALIBRACIJSKE BAZE NUMMELA

Kalibracijska baza Nummela izgrađena je 1933. godine za potrebe umjeravanja invarnih žica duljine 24 m, koje su umjeravane interferometrom Väisälä. Izvorna konfiguracija baze je prilagođena toj primjeni, 36 drvenih stupova na razmaku od 24 m, što iznosi 864 m (Jokela i Häkli, 2006). Mjerilo Finske trigonometrijske mreže prvog reda određeno je tim invarnim žicama, mjerenjem 16 baznih linija.

Kalibracijska baza Nummela prvi je put izmjerena u cijeloj duljini interferometrom Väisälä 1947. godine, od strane Finskog geodetskog instituta, što je dokumentirao Tauno Bruno Honkasalo 1950. godine. U razdoblju od 1947. do 2013. baza je izmjerena 16 puta, s mjernom nesigurnošću od 0,02 mm do 0,09 mm za udaljenosti od 24 m do 864 m (slike 2.1 i 2.2) (Jokela i dr., 2009). Puna duljina baze od 864 m zbog nepovoljnih vremenskih uvjeta nije izmjerena 1983. i 2005. godine (slika 2.2). Relativno visoke vrijednosti mjernih nesigurnosti u mjerenjima provedenima 2013. godine također se mogu pripisati nepovoljnim vremenskim uvjetima (Jokela, 2017). Mjerenja izvedena 2013. godine su obrađena, ali još nisu objavljena u znanstvenom radu. Varijacija ukupne duljine baze kroz povijest manja je od 0,6 mm, što dokazuje da je tlo na kojem je izgrađena baza iznimno stabilno.



Slika 2.1. Rezultati izmjere kalibracijske baze Nummela tijekom povijesti – 432 m (Jokela, 2017).

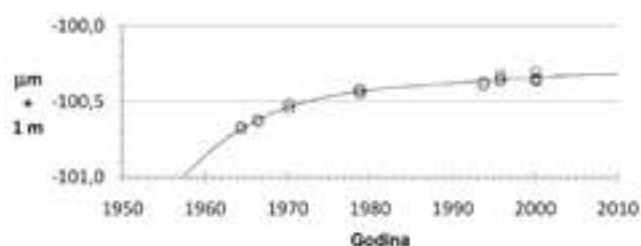


Slika 2.2. Rezultati izmjere kalibracijske baze Nummela tijekom povijesti – 864 m (Jokela, 2017).

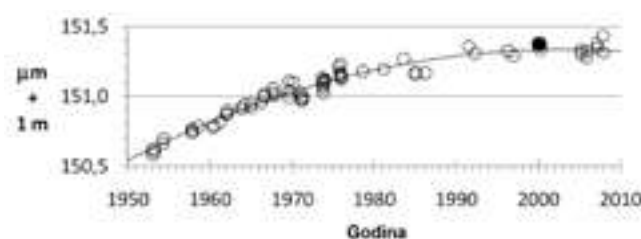
2.2. SUSTAV KVARCNIH ETALONA

Mjerenje duljina interferometrom Väisälä bazira se na multipliciranju duljine kvarcnog etalona, stoga je potrebno poznavati njegovu duljinu sa što manjom nesigurnošću. Kvarcni etaloni su 23 mm debele kvarcne cijevi duljine jednog metra. Završeci etalona su sfernog oblika, debljine stijenke od 10 do 15 mm i različitih radijusa zakrivljenosti. Njihova duljina određuje se apsolutnom kalibracijom u akreditiranom laboratoriju laserskim interferometrom, a opažanjima u dugom razdoblju uočeno je da se njihova duljina mijenja, odnosno da se produžuju (slika 2.3). U razdoblju od 1964. do 1995. obavljeno je šest apsolutnih kalibracija kvarcnih etalona koji se koriste u Finskoj, a obavio ih je Nacionalni mjeriteljski institut Njemačke (PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt) u Braunschweigu. Kako bi osigurali sljedivost i kontinuitet mjerenja duljina, Centar za mjeriteljstvo i akreditaciju Finske (MIKES – Centre for Metrology and Accreditation) osnovao je servis za apsolutnu kalibraciju kvarcnih etalona (Lassila i dr., 2003). MIKES je zadužen za implementaciju i razvoj nacionalnih mjernih standarda i realizaciju mjernih jedinica SI u Finskoj. MIKES koristi interferometar koji kombinira bijelu svjetlost i laser za apsolutnu kalibraciju. Rezultati posljednjih apsolutnih kalibracija, kao i usporedba s prethodnom kalibracijom obavljenom u PTB-u dani su u tablici 2.1. Apsolutnom kalibracijom određena je duljina kvarcnog etalona s mjernom nesigurnošću 35 nm, odnosno 71 nm prošireno na 2σ (Lassila i dr., 2003). Relativna kalibracija obavlja se međusobnom usporedbom kvarcnih etalona od kojih su neki apsolutno kalibrirani. Takva kalibracija obavlja se u Tuorla opservatoriju Sveučilišta u Turku. Relativna kalibracija kvarcnih etalona obavlja se prije i nakon

izmjere interferometrom Väisälä (slika 2.4). Apolutne i relativne kalibracije određuju trenutni sustav kvarcnih etalona Braunschweig-Tuorla-MIKES 2000 (BTM00).



Slika 2.3. Promjena duljine kvarcnog etalona br. 49, određena iz apsolutnih kalibracija u PTB-u, Tuorli i MIKES-u (Jokela i Häkli, 2010).



Slika 2.4. Duljine kvarcnog etalona br. VIII, određena iz relativnih kalibracija u Tuorli; crna točka označava apsolutnu kalibraciju u MIKES-u (Jokela i Häkli, 2010).

Tablica 2.1. Rezultati apsolutnih kalibracija kvarcnih etalona (Lassila i dr., 2003).

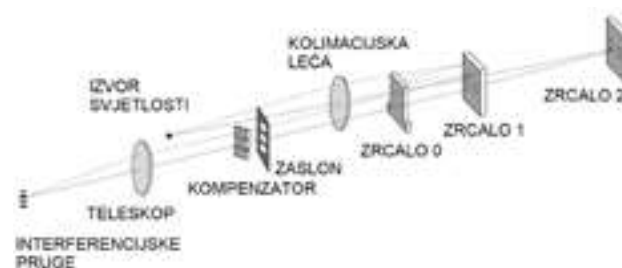
Broj kvarcnog etalona	Duljina MIKES [μm]	Duljina PTB [μm]
VIII	1000151,371	-
49	1000032,346	1000032,350
50	1000029,248	-
51	1000018,362	1000018,380
Mjerna nesigurnost	0,035	0,030

2.3. INTERFEROMETAR VÄISÄLÄ

Yrjö Väisälä prvi je uveo princip interferencije bijele svjetlosti na mjerenja udaljenosti u svojoj doktorskoj disertaciji 1923. godine. Prva mjerenja izveo je u Laboratoriju za fiziku Sveučilišta u Helsinkiju, a 1930. izveo je mjerenje udaljenosti od 192 m s relativnom točnosti od 10^{-7} (Jokela, 2014). Iako je izumljen prije gotovo 100 godina, interferometar Väisälä se i danas koristi budući da se nijedna druga metoda interferometrijskog mjerenja duljina ne može primijeniti na velike udaljenosti i u terenskim uvjetima.

Osnovni princip rada interferometra Väisälä dan je u nastavku.

Bijela svjetlost iz točkastog izvora dijeli se na dvije paralelne zrake kolimacijskom lećom (slika 2.5). Jedan dio svjetlosti putuje između zrcala 0 i 1, dok drugi dio svjetlosti putuje do zrcala 2. Udaljenost između zrcala 1 i 2 je cijeli broj udaljenosti (n) između zrcala 0 i 1. Svjetlost putuje n puta između zrcala 0 i 1, a jednom do zrcala 2 i natrag u teleskop. Zrcala se namještaju tako da se zrake koje putuju jednakom udaljenosti, ali različitim putanjama, sijeku u fokusu teleskopa, gdje se pojavljuju interferencijske pruge. Pri prvom multipliciranju udaljenosti između zrcala 0 i 1 postavlja se kvarcni etalon, čime se udaljenost između zrcala 1 i 2 određuje visokom točnošću, uz sljedivost. Daljnja izmjera provodi se multipliciranjem udaljenosti između zrcala 1 i 2.



Slika 2.5. Skica interferometra Väisälä (Lassila i dr., 2003).

2.4. INTERFEROMETRIJSKA MJERENJA NA KALIBRACIJSKOJ BAZI NUMMELA

Današnja konfiguracija kalibracijske baze Nummela prilagođena je izmjeri interferometrom Väisälä. Kako je princip interferometra Väisälä multipliciranje otprije poznate duljine, stupovi baze postavljeni su na pozicijama 0, 1, 6, 24, 72, 216, 432 i 864 m. Takva konfiguracija odgovara multipliciranju udaljenosti u nizu $1 \times 6 \times 4 \times 3 \times 3 \times 2 \times 2$. Dakle, duljina kvarcnog etalona od 1 m multiplicira se šest puta, zatim se ta udaljenost multiplicira četiri puta i tako dalje. Na pozicijama 0, 432 i 864 m nalaze se podzemni centri, koji su udaljeni od stupova bazne linije oko 2 m, a duljine između njihovih središta konačni su rezultati interferometrijskih mjerenja. Metoda izmjere interferometrom Väisälä jednostavna je u teoriji, ali je vrlo zahtjevna i dugotrajna u praksi. Postavljanje interferometra Väisälä traje oko dva tjedna, a u razdoblju izmjere od dva do tri mjeseca samo je nekoliko oblačnih večeri u kojima su atmosferski uvjeti dovoljno stabilni za izmjeru duljina većih od

100 m. Naime, za jedno uspješno mjerenje potrebna je stabilnost temperature unutar 1°C tijekom vremena od barem sedam sati, koliko traje opažanje (Jokela i dr., 2009).

Izmjeri prethodi komparacija kvarcnih etalona u opservatoriju Tuorla (slika 2.6), a kvarcni etalon koji se uvijek koristi na bazi Nummela ima oznaku br. VIII (slika 2.7). Također, prije svakog interferencijskog mjerenja obavlja se izmjera visinskih razlika između stupova i podzemnih centara na bazi. Visinske razlike potrebne su da bi se komponente interferometra Väisälä postavile na istu visinu u prostoru kako bi se mogle odrediti geometrijske korekcije poput redukcije kose duljine na horizontalnu i kako bi se otkrile eventualne nestabilnosti i pomaci stupova i podzemnih centara baze. Pri niveliranju baze 2005. i 2007. godine korišten je nivelir Zeiss DiNi12 i par kodiranih letava (Jokela, 2014).



Slika 2.6. Komparacija kvarcnog etalona br. VIII u opservatoriju Tuorla (Jokela i dr., 2009).

Pozicije u prostoru glavnih dijelova interferometra moraju biti poznate unutar 1 mm, a fino pomicanje i zakretanje dijelova obavlja se pomoću brojnih vijaka. Interferencijske pruge vidljive su u teleskopu samo kada su pozicije zrcala točne unutar 0,001

mm. To se ne može postići finim pomicanjem zrcala, već se za to koristi kompenzator. Kada se pojave interferencijske pruge u teleskopu bilježi se položaj zrcala, koji se zatim projicira na podzemne centre. Projiciranje rezultata interferometrijskih mjerenja na podzemne centre obavlja se kombinacijom mehaničkih i optičkih metoda prijenosa, čiji je utjecaj na mjernu nesigurnost 2005. iznosio od 0,034 mm do 0,043 mm, a 2007. od 0,016 mm do 0,033 mm. Ove vrijednosti nisu ovisne o opažanoj duljini, već ovise samo o nesigurnostima unutar sustava prijenosa. Nesigurnosti uzrokovane nesigurnostima u određivanju duljine kvarcnog etalona su od 0,001 mm do 0,030 mm za udaljenosti od 24 m do 864 m (Jokela i dr., 2009). Konačni rezultati izmjera 1996., 2005. i 2007. godine dani su u tablici 2.2. Nesigurnosti se odnose na ukupan iznos svih mjernih nesigurnosti u sljedivom lancu i dane su s vjerojatnošću 1σ .



Slika 2.7. Interferometar Väisälä postavljen na stupovima 0 i 1, s kvarcnim etalom br. VIII (Jokela i dr., 2009).

Tablica 2.2. Rezultati interferometrijskih mjerenja na kalibracijskoj bazi Nummela 1996., 2005. i 2007. godine (Jokela i dr., 2009).

Epoha	Duljina [mm + 432 m]	Nesigurnost 1σ [mm]	Duljina [mm + 864 m]	Nesigurnost 1σ [mm]
1996,9	95,23	$\pm 0,04$	122,75	$\pm 0,07$
2005,8	95,36	$\pm 0,05$	–	–
2007,8	95,28	$\pm 0,04$	122,86	$\pm 0,07$

3. Transfer sljedivog mjerila pomoću instrumenta Kern Mekometer ME5000

Mjeriteljski sljedivi transfer mjerila široko je korištena usluga koju pruža Finski geodetski institut i kalibracijska baza Nummela. Projekti transfera mjerila bazirani su na mjerenjima provedenim interferometrom Väisälä na kalibracijskoj bazi Nummela 1996., 2005. i 2007. godine. U zadnjih 20-ak godina mjerilo kalibracijske baze Nummela preneseno je na gotovo 20 kalibracijskih baza i testnih poligona u više od 10 zemalja diljem svijeta. U ovom poglavlju opisani su neki od projekata transfera mjerila. Kao standard za transfer korišten je visokoprecizni elektrooptički daljinomjer Kern Mekometer ME5000, koji se nekoliko puta godišnje umjerava na kalibracijskoj bazi Nummela (Jokela i dr., 2009).

3.1. KERN MEKOMETER ME5000

Transfer mjerila sa standardnih kalibracijskih baza na baze nižeg reda obavlja se visokopreciznim umjerenim elektrooptičkim daljinomjerima koji su standard za transfer. U praksi, danas to omogućuje samo jedan daljinomjer – Kern Mekometer ME5000 (slika 3.1). Taj instrument postao je vrlo vrijedan budući da se više ne proizvodi te nije u prodaji, a ni jedan drugi daljinomjer ne posjeduje usporedivu točnost. Kern ME5000 je poznat kao najtočniji elektrooptički daljinomjer srednjeg dometa u svijetu. Predstavljen 1986. godine, odmah je privukao pozornost zbog svoje visoke točnosti koja iznosi $0,2 \text{ mm} + 0,2 \text{ ppm}$, kao i zbog širokog raspona ostvarivih mjerenja koji iznosi od 20 m do 8000 m. Ubrzo je pomoću softvera PROMEKO, razvijenog na Tehničkom sveučilištu u Münchenu proširen raspon na ispod 20 m (SLAC, 1992).

Mjerenje udaljenosti Mekometrom ME5000 bazira se na principu modificirane izmjere faze. Umjesto korištenja fiksne modulacijske frekvencije i mjerenja fazne razlike, modulacijska frekvencija se namješta unutar određenog intervala dok se ne poklope faze

odaslanog i primljenog signala. To se obavlja na četiri frekvencije, po jednom na krajevima i dva puta u sredini intervala za namještanje frekvencije. Sve mjerene frekvencije koriste se za računanje duljine. Izvor zračenja je Helij-Neonski infracrveni laser valne duljine 632,8 nm. Mjerenje jedne duljine traje oko 2 minute u standardnom modu rada (Dvořáček, 2012).



Slika 3.1. Kern Mekometer ME5000 i reflektor Kern RMO5035 (Dvořáček, 2012).

3.2. UMJERAVANJE KERN MEKOMETRA ME5000 NA KALIBRACIJSKOJ BAZI NUMMELA

Umjeravanje Mekometra ME5000 obavlja se nekoliko puta godišnje na kalibracijskoj bazi Nummela, a prije i nakon transfera mjerila na druge baze. Cilj umjeravanja je odrediti adicijsku konstantu para daljinomjera i pripadajućeg reflektora, korekciju za mjerilo te ocjene točnosti tih dvaju parametara. Duljine između stupova kalibracijske baze mjere se u svim kombinacijama, u oba smjera te u dva ponavljanja, budući da jedno mjerenje traje oko 2 minute, a ono je rezultat više parcijalnih rezultata mjerenja. Usmjeravanje zrake obavlja se elektroničkim putem, što zapravo znači da je usmjeravanje obavljeno ručno, tako da je očitana snaga reflektiranog signala maksimalna. Rezultati mjerenja bilježe se rezolucijom od 0,1 mm.

Prilikom umjeravanja od presudne je važnosti određivanje atmosferskih uvjeta u okolini. Za to se koriste dva psihrometra, uređaja koji mjere vlažnost zraka pomoću suhog i vlažnog termometra, na oba kraja mjerene dužine. Očitavanja termometara

su rezolucije 0,1 °C. Mjerenje tlaka zraka obavlja se samo na stajalištu jer se mjerenja izvode u oba smjera. Promjena tlaka uslijed promjene visine je zanemarena budući da je maksimalna visinska razlika između stupova samo 4 m. Rezolucija čitanja barometara je 0,1 hPa. Parcijalni tlak vodene pare u zraku za prvu brzinsku korekciju određuje se iz mjerenja tlaka zraka i očitavanja suhog i vlažnog termometra na psihrometru (Dvořáček 2012).

Rezultati mjerenja duljina korigiraju se za geometrijske i brzinske korekcije te se uspoređuju s „pravih“ vrijednostima duljina koje su određene interferometrom Väisälä. Pri računanju korekcija uzimaju se u obzir točnosti određivanja fizikalnih veličina (temperature, tlaka, vlažnosti zraka) te njihov utjecaj na točnost računanja pojedine korekcije. Te vrijednosti koriste se za računanje kumulativnog utjecaja svih mjerenja na određivanje instrumentalnih korekcija. Razlike mjerenih i „pravih“ vrijednosti umjeravanja iz 2008. godine prikazane su na slici 13. Vrijednosti adicijske konstante, korekcije mjerila kao i njihove ocjene točnosti računaju se izjednačenjem po posrednim mjerenjima. Rezultati kalibracije provedene 2011. godine prikazani su u tablici 3.1.

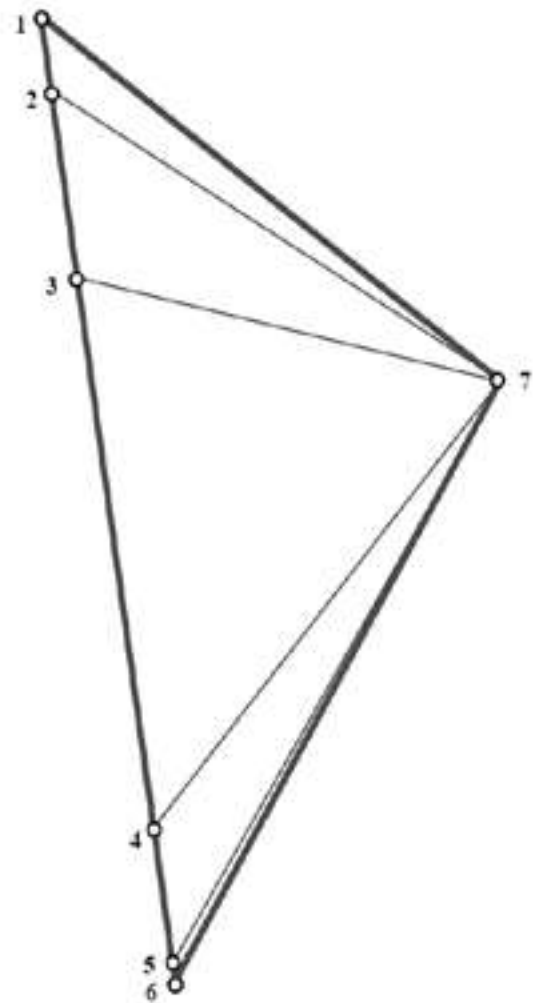
Tablica 3.1. Konačne vrijednosti instrumentalnih korekcija i proširene nesigurnosti iz 2011. godine (Dvořáček, 2012).

Daljinomjer	Adicijska konstanta [mm]		Korekcija mjerila [mm/km]	
	Vrijednost	Standardno odstupanje 2σ	Vrijednost	Standardno odstupanje 2σ
Kern ME5000	0,024	$\pm 0,040$	0,238	0,383

3.3. TRANSFER MJERILA NA KALIBRACIJSKU BAZU KYVIŠKES U LITVI

Suradnjom Finskog geodetskog instituta i Tehničkog sveučilišta Vilnius Gediminas u Litvi, 1996. godine izgrađena je kalibracijska baza Kyviškes. Baza se sastoji od šest stupova u pravcu na udaljenostima od 100, 360, 1120, 1300 i 1320 m (slika 3.2), a 2000. godine dodan je sedmi stup koji se nalazi van pravca. Takva konfiguracija baze i konstrukcija stupova koji su opremljeni vijcima za prisilno centriranje omogućuje kalibraciju GNSS prijarnika, teodolita, geodetskih mjernih stanica i drugih mjernih uređaja. Kalibracija baze obavljena je 1997., 2001.,

2007. i 2008. godine, a mjerenja su pokazala da je baza umjerena točno te da je stabilna u vremenu. Rezultati kalibracija 1997. i 2001. godine, kao i njihove razlike te proširene nesigurnosti (2σ) prikazane su u tablici 3.2. Proširene nesigurnosti mjerenja obavljenih 1997. godine su u rasponu od 0,4 mm do 1,2 mm za udaljenosti od 20 m do 1320 m. U mjerenjima obavljenima 2001. i 2007. godine nesigurnosti su manje, od 0,2 mm do 0,8 mm, zbog povoljnijih vremenskih uvjeta. Iskustva pokazuju da je ova metoda transfera mjerila vrlo efikasna kada je cilj ostvariti submilimetarske nesigurnosti (Jokela, 2014).



Slika 3.2. Konfiguracija kalibracijske baze Kyviškes (Juceviciute i dr., 2002).

Tablica 3.2. Duljine i mjerne nesigurnosti te razlike duljina i nesigurnosti u epohama 1997. i 2001., na bazi Kyviškes; sve nesigurnosti su proširene na 2 (Juceviciute i dr., 2002).

od-do	Duljine i nesigurnosti [mm]		Razlike duljina i nesigurnosti [mm]
	1997	2001	
1 - 2	100163,5 ±0,4	100163,3 ±0,2	-0,2 ±0,4
1 - 3	360175,1 ±0,6	360175,2 ±0,4	+0,1 ±0,7
1 - 4	1120379,2 ±1,0	1120378,5 ±0,6	-0,7 ±1,2
1 - 5	1300472,6 ±1,2	1300471,6 ±0,7	-1,0 ±1,4
1 - 6	1320482,6 ±1,2	1320481,6 ±0,7	-1,0 ±1,4
2 - 3	260011,6 ±0,6	260012,0 ±0,3	+0,4 ±0,7
3 - 4	760204,1 ±0,8	760203,3 ±0,5	-0,8 ±0,9
4 - 5	180093,4 ±0,4	180093,1 ±0,3	-0,3 ±0,5
5 - 6	20010,0 ±0,4	20010,0 ±0,3	0,0 ±0,5
1 - 7	-	841806,5 ±0,7	-
2 - 7	-	775236,9 ±0,7	-
3 - 7	-	644376,3 ±0,7	-
4 - 7	-	804745,9 ±0,7	-
5 - 7	-	933818,8 ±0,7	-
6 - 7	-	949186,1 ±0,7	-

3.4. TRANSFER MJERILA NA KALIBRACIJSKU BAZU VÄÄNA U ESTONIJI

Kalibracijska baza Vääna u Estoniji dio je Estonskog odbora za Zemljište (estonski: Maa-amet), pri Ministarstvu okoliša. Baza se sastoji od 13 stupova međusobno udaljenih od 2 m do 374 m, ukupne duljine 1344 m (slika 3.3). Svi stupovi su u pravcu, a najveća visinska razlika između stupova je 3 mm. Baza je prvi puta kalibrirana 2000. godine od strane Finskog geodetskog instituta. Stupovi su obnovljeni 2008. godine, nakon čega je uslijedila druga kalibracija.



Slika 3.3. Kern ME5000 na kalibracijskoj bazi Vääna (Jokela, 2014).

Budući da mjerni sustav koji se koristi kao standard za transfer nije u mogućnosti mjeriti duljine kraće od 20 m bez dodatnog softvera, mjerene su udaljenosti od 24 m do 1344 m, s 9 različitih stupova. Sveukupno, opažane su 144 duljine, u vrlo povoljnim uvjetima, koje su zatim izjednačene. Izjednačenje je pokazalo da su mjerenja vrlo točna i pouzdana, što se može pripisati povoljnim vremenskim uvjetima kao i novom, kvalitetnom priboru za prisilno centriranje koji je ugrađen na stupove prilikom obnove, a osigurava dobru ponovljivost mjerenja. Izjednačene vrijednosti pogrešaka mjerenja prikazane su na slici 17, a pokazuju ostvarivu točnost pri povoljnim uvjetima, te je razvidno da ne postoji ovisnost pogrešaka o iznosu duljine.

Procijenjena proširena nesigurnost je u rasponu od 0,16 mm do 0,22 mm za udaljenosti između 12 stupova u razmaku od 2 m do 374 m, dok za cijelu duljinu baze od 1344 m iznosi 0,60 mm. Ostvareni rezultati vjerojatno su blizu maksimalne ostvarive točnosti ove metode (Jokela, 2014).

3.5. TRANSFER MJERILA NA GEODETSKU BAZNU LINIJU BEV U INNSBRUCKU U AUSTRIJI

Geodetska bazna linija BEV (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen) u Innsbrucku, Austrija, izgrađena 2006. godine sudjeluje u grupnom istraživačkom projektu EMRP-a (*European Metrology Research Programme*) „Absolute long distance measurement in air”. U sklopu projekta mjerilo je preneseno s kalibracijske baze Nummela na 7 stupova geodetske bazne linije BEV 2006. i 2008. godine. Stupovi su na razmaku od 30, 120, 270, 480, 750 i 1080 m.

Godine 2006. opažane su 42 duljine, u jednom ponavljanju. Godine 2008. opažane su također 42 duljine, ali ovoga puta u četiri ponavljanja. Proširene nesigurnosti su u rasponu od 0,21 mm do 0,81 mm za duljine od 30 m do 1080 m. Razlike između mjerenja provedenih 2006. i 2008. godine prikazane na slici 18, ukazuju na ujednačenost mjerila i kratkoročnu stabilnost baze.

Temperaturni uvjeti bili su slični u Nummeli i Innsbrucku, ali relativno visoke vrijednosti izjednačenih pogrešaka ukazuju na nestabilnosti u atmosferi, koje se mogu pripisati lokaciji baze BEV. Naime,

baza se nalazi na obali rijeke, između planine i autoceste (slika 3.4). Takvi uvjeti su bliski radnoj okolini geodetskih stručnjaka, stoga je dobra za rutinsko umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera, ali ipak ne udovoljava standardima koje zahtijeva testiranje novih uređaja (Jokela, 2014).



Slika 3.4. Kalibracija baze BEV u Innsbrucku pomoću KERN Mekometra ME5000 (Jokela, 2014).

3.6. TRANSFER MJERILA NA GEODETSKU BAZNU LINIJU PTB U BRAUNSCHWEIGU U NJEMAČKOJ

Geodetska bazna linija Nacionalnog mjeriteljskog instituta (PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt) u Braunschweigu, Njemačka, posebna je po tome što se nalazi u sklopu mjeriteljskog instituta koji posjeduje svu opremu i infrastrukturu potrebnu za obavljanje najpreciznijih mjerenja. Baza je opremljena sustavom za praćenje meteoroloških podataka koji je postavljen uzduž stupova razmaknutih 50 m, a ukupna duljina baze je 600 m (slika 3.5).

Meteorološki podaci prikupljeni sustavom senzora i klasičnim instrumentarijem, dva psihrometra tipa Asmann i dva aneroidna barometra tipa Thommen. Ispitane su razlike u prikupljenim meteorološkim podacima te njihov utjecaj na računanje brzinskih korekcija i konačno, na duljine između stupova baze.

Prosječna razlika između 168 očitavanja temperature prikupljenih tijekom pet dana opažanja iznosila je +0,27 K sa standardnim odstupanjem 0,53 K. Na dan kad su uvjeti bili najpovoljniji prosječna razlika iznosila je samo -0,01 K uz standardno odstupanje od 0,22 K. Prosječna razlika između 168 očitavanja tlaka zraka iznosila je +8 Pa uz standardno odstupanje u iznosu 30 Pa. Prosječna razlika u relativnoj vlažno-

sti iznosila je -3 % uz standardno odstupanje od 3 %. Pri stabilnim uvjetima razlika je bila samo -1 % uz standardno odstupanje od 2 %.

Gotovo jednaki rezultati analize meteoroloških podataka rezultirali su gotovo jednakim iznosima brzinskih korekcija, a time i konačnih duljina između stupova baze. Korištenjem podataka koji su prikupljeni klasičnim instrumentarijem ostvarene su točnosti od 0,20 mm do 0,47 mm za udaljenosti od 50 m do 600 m. Rezultati dobiveni korištenjem sustava meteoroloških senzora dobivene su razlike od -0,07 mm do +0,12 mm u odnosu na prethodne rezultate.

Zaključno, geodetska bazna linija PTB dobro je mjesto za testiranje, ispitivanje i kalibraciju daljinomjera, upravo zbog novog sustava meteoroloških senzora. Ipak, u realnim uvjetima, dovoljna je nekolicina kvalitetnih meteoroloških instrumenata za prikupljanje pouzdanih podataka za računanje brzinskih korekcija. Budući da nijednim od pristupa ne možemo u potpunosti ukloniti utjecaj vanjskih uvjeta na mjerenja, preporučuje se obavljanje opažanja kada su vremenski uvjeti povoljni i stabilni (Jokela, 2014).

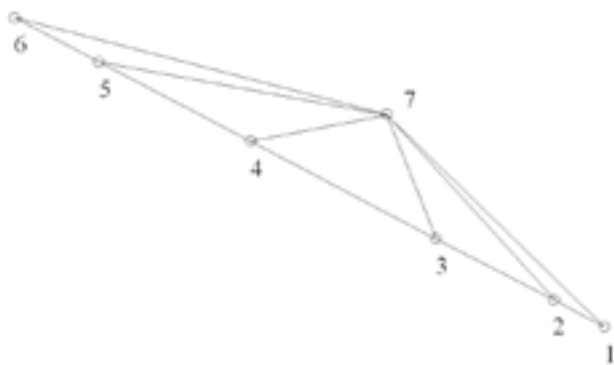


Slika 3.5. Geodetska bazna linija PTB, Braunschweig, opremljena meteorološkim sensorima (Jokela, 2014).

3.7. TRANSFER MJERILA NA GEODETSKU BAZNU LINIJU UPV U VALENCIJI U ŠPANSKOJ

Geodetska bazna linija Politehničkog sveučilišta u Valenciji (UPV – Universitat Politècnica de València), Španjolska, izgrađena je 2007. godine. Sastoji se od 6 stupova u pravcu, na udaljenostima 28, 94, 198, 282 i 330 m, dok je sedmi stup izmješten iz pravca i tvori konfiguraciju trokuta (slike 3.6 i 3.7). Apsolutno mjerilo je preneseno 2012. godine Kern Mekometrom ME5000 kalibriranim na kalibraci-

jskoj bazi Nummela (García-Asenjo i dr., 2016). Tijekom pet dana obavljena je izmjera šest stupova baze koji su u pravcu. Opažanje je obavljeno u četiri ponavljanja, obostranim mjerenjem udaljenosti između svih stupova, sveukupno 120 udaljenosti. Uvjeti tijekom opažanja bili su povoljni, uz blage promjene temperature u intervalu od 21 °C do 28 °C. Izjednačenjem su određena standardna odstupanja u iznosu od 0,009 mm do 0,040 mm. Kada su uračunate sve nesigurnosti koje su uključene u lancu sljedivosti, određene su proširene mjerne nesigurnosti koje iznose od 0,20 mm do 0,33 mm za udaljenosti od 28 m do 330 m. Sa sedmog stupa izmjerene su samo 4 udaljenosti, zbog nedostatka dogledanja. Udaljenosti su od 67 m do 190 m, a njihova proširene nesigurnosti bile su u rasponu od 0,19 mm do 0,24 mm (Jokela, 2014).



Slika 3.6. Konfiguracija geodetske bazne linije UPV u Valenciji (García-Asenjo i dr., 2016).



Slika 3.7. Izmjera geodetske bazne linije UPV u Valenciji (Jokela, 2014).

4. Kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu je tip Aarau kalibracijske baze, a izgrađena je 1982. godine (Solaric i dr., 1992) te je obnovljena 2007. godine (slika 4.1). Njezina glavna namjena je ispitivanje i umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera, ali se može koristiti i za ispitivanje GNSS prijamnika i antena. Prema dostupnoj literaturi to je najdulja kalibracijska baza u svijetu i baza s najvećim brojem stupova (Zrinjski, 2010). Podijeljena je u dva dijela: 12 stupova od 0 do 100 metara i 13 stupova od 100 do 3100 metara. Baza također ima još tri dodatne točke koje nisu stabilizirane u obliku stupova, već u ravnini s tlom, a omogućuju ispitivanje daljinomjera na udaljenosti do 6000 metara. Prvi dio baze do 100 m posebno je dizajniran za ispitivanje fazne nehomogenosti i periodijskih pogrešaka elektrooptičkih daljinomjera. Drugi dio baze namijenjen je za ispitivanje preciznosti i određivanje adicijske konstante elektrooptičkih daljinomjera. Stupovi kalibracijske baze visoki su od 0,94 m u sredini baze do 1,48 m na krajevima baze, te su na vrhu stupova ugrađeni vijci za prisilno centriranje podnožnih ploča koji imaju maksimalno poprečno odstupanje do 5 centimetara u odnosu na pravac od početka baze do stupa na udaljenosti 1100 metara.



Slika 4.1. Kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (Zrinjski, 2010).

4.1. IZMJERA I TRANSFER MJERILA NA KALIBRACIJSKU BAZU GEODETSKOG FAKULTETA SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

Prva mjerenja kalibracijske baze nakon njezine izgradnje poduzeta su 1983. godine u duljini do 600 m pomoću invarnih žica s relativnom točnošću od 1 ppm (Novaković i dr., 1985). Cijela baza izmjerena je 1984. godine preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME3000 s relativnom točnošću od 1 ppm (Solarić i dr., 1992).

Ujesen 1988. godine kalibracijska baza Geodetskog fakulteta izmjerena je preciznim elektrooptičkim daljinomjerom Kern Mekometer ME5000 u vlasništvu tadašnjeg Fakulteta za arhitekturu, građevinu i geodeziju u Ljubljani. Duljine do prvih 100 metara mjerene su u dva ponavljanja u svakom smjeru, dok su od 100 do 3100 metara mjerene jednom u svakom smjeru. Nakon izjednačenja mjerenja dobivena je mjerna nesigurnost od 0,01 mm + 0,35 ppm za duljine mjerene u jednom smjeru te 0,12 mm + 0,21 ppm za obostrano mjerene duljine, dok su razmaci stupova određeni s mjernom nesigurnošću od 0,063 mm + 0,065 ppm (Solarić i dr., 2002).

Godine 1996. provedeno je još jedno mjerenje razmaka stupova kalibracijske baze Geodetskog fakulteta koristeći precizni elektrooptički daljinomjer Kern Mekometer ME5000 u vlasništvu Geodetskog instituta Tehničkog sveučilišta u Münchenu. Posebnost ovog instrumenta je da se on redovito umjerava na bazi Ebersberger Forst u Münchenu koja je umjerena najpreciznijim postojećim daljinomjerom, a to je svjetlosni interferometar Väisälä. Nakon provedene izmjere i izjednačenja mjerenja izračunate su apsolutne nesigurnosti mjerenja (Maurer i dr., 2001):

- za mjerenje duljina: 0,06 mm na 100 m i 0,3 mm na 1000 m,
- za raspone stupova: 0,04 mm na 100 m i 0,2 mm na 1000 m.

Povezivanjem s minhenskom bazom, kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu postala je dio svjetskih mjernih sustava te je postala primarni etalon za mjerenje velikih duljina u Republici Hrvatskoj.

5. Zaključak

U ovom radu prikazana je mjerna sljedivost duljina od same definicije metra do kalibracijskih baza. Opisana je kalibracijska baza Nummela u Finskoj na kojoj je najpreciznije u svijetu realizirana definicija metra, odnosno na kojoj su rasponi između stupova određeni najpreciznijim postojećim daljinomjerom, svjetlosnim interferometrom Väisälä. Također, stupovi na bazi Nummela su se tijekom dugoga razdoblja pokazali iznimno stabilnima što je vrlo važno pri preciznim mjerenjima. Nadalje, prikazano je umjeravanje elektrooptičkog daljinomjera Kern Mekometer ME5000 na bazi Nummela te transfer sljedivog mjerila pomoću njega na kalibracijske baze diljem Europe: Kyviškes u Litvi, Väähä u Estoniji, BEV u Innsbrucku u Austriji, PTB u Braunschweigu u Njemačkoj te UPV u Valenciji u Španjolskoj. Opisan je i transfer mjerila s baze Ebersberger Forst u Münchenu na kalibracijsku bazu Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu koristeći Kern Mekometer ME5000. Taj transfer vrlo je važan jer je baza Ebersberger Forst umjerena koristeći interferometar Väisälä čime je kalibracijska baza Geodetskog fakulteta postala dio svjetskih mjernih sustava i primarni etalon za mjerenje velikih duljina u Republici Hrvatskoj.

LITERATURA

- Dvořáček, F., (2012), Calibration of Electronic Distance Meters, Master's thesis, Prag: Department of Special Geodesy, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University.
- García-Asenjo, L., Baselga, S., Garrigues P., (2016), Deformation Monitoring of the Submillimetric UPV Calibration Baseline, *Journal of Applied Geodesy*, vol. 11, no. 2, str. 107–114.
- Hrvatski sabor, (2018), Zakon o mjeriteljstvu, Zagreb: Narodne novine br. 111/18.
- Jokela, J., (2014), Length in Geodesy – on Metrological Traceability of a Geospatial Measurand, Doctoral dissertation, Espoo: School of Engineering, Aalto University School of Science.
- Jokela, J., (2017), Use of Nummela Standard Baseline in Present-Day European Metrology Research, Helsinki: FIG Working Week 2017.
- Jokela, J., Häkli, P., (2006), Current Research and Development at the Nummela Standard Baseline, Shaping the Change, München: XXIII FIG Congress.
- Jokela, J., Häkli P., (2010), Interference Measurements of the Nummela Standard Baseline in 2005 and 2007, Masala: Finnish geodetic institute.
- Jokela, J., Häkli P., Ahola J., Būga A., Putrimas R., (2009), On Traceability of Long Distances, Masala: Finnish Geodetic Institute.
- Juceviciute, V., Kumetaitis Z., Sleiteris E., Buga A., Obuchowski R., Parseliunas E., Petroskevicius P., Putrimas R., (2002), Trends of Development of the Lithuanian National Geodetic Control, *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, vol. 29, str. 273 – 281.
- Lassila A., Jokela J., Poutanen M., Jie X., (2003), Absolute Calibration of Quartz Bars of Väisälä Interferometer by White Light Gauge Block Interferometer, Dubrovnik: XVII IMEKO World Congress: Metrology in the 3rd Millennium.
- Maurer, W., Schnaedelbach, K., Solarić, N., Novaković, G., (2001), Povezivanje Münchenske i zagrebačke baze za ispitivanje i umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera, *Geodetski list*, vol. 55, br. 3, str. 177 – 194.
- NLS – National Land Survey of Finland, (2019), Nummela Standard Baseline [Internet], [pristupljeno 7. 3. 2019.].
- Novaković, G., Džapo, M., Lasić, Z., (1985), Prvo mjerenje duljine kalibracijske baze Geodetskog fakulteta u Zagrebu invarskim žicama, *Geodetski list*, vol. 62, br. 10 – 12, str. 291 – 295.
- Solarić, N., Solarić, M., Benčić, D., (1992), Projekt i izgradnja kalibracijske baze Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, *Geodetski list*, vol. 69, no. 1, str. 7 – 25.
- Solarić, N., Lapaine, M., Novaković, G., (2002), Testing

the Precision of the Electro-optical Distance Meter Mekometer ME5000 on the Calibration Baseline Zagreb, *Survey Review*, vol. 36, br. 286, str. 612 – 626. SLAC – Stanford Linear Accelerator Center, (1992), Proceedings of the Workshop on The Use and Calibration of the Kern ME5000 Mekometer, Kalifornija, Stanford: Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University.

Zrinjski, M., (2010), Definiranje mjerila kalibracijske baze Geodetskog fakulteta primjenom preciznog elektrooptičkog daljinomjera i GPS-a, doktorska disertacija, Zagreb: Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

AUTORI | AUTHORS

Prof. dr. sc. Đuro Barković, dipl. ing., Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: barkovic@geof.hr.

Izv. prof. dr. sc. Mladen Zrinjski, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, -10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mzrinjski@geof.hr.

Sergej Baričević, mag. ing. geod. et geoinf., asistent, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: sbaricevi@geof.hr.

Goran Popović, univ. bacc. geod. et geoinf., diplomski studij, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: gpopovic@geof.hr.