

UDK 528.27(497.5):528.563.08:528.089.6

Izvorni znanstveni članak

Prijedlog gravimetrijske kalibracijske baze Republike Hrvatske

Marija REPANIĆ, Ilija GRGIĆ, Tomislav BAŠIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. U radu je dan prijedlog službene kalibracijske baze Republike Hrvatske te pomoćne vertikalne kalibracijske baze. Poblize sse sažete navode postupci kalibracije te daje matematička osnova relevantna za kalibraciju relativnih gravimetara koji se u Republici Hrvatskoj koriste za izmjeru gravimetrijske osnove. Analizirana je točnost kalibracije relativnih gravimetara. Nadalje, ispitano je stanje postojeće kalibracijske baze. Naposljetku, dan je prijedlog nove službene kalibracijske baze koja je horizontalna, ali dijelom i vertikalna, te pomoćne vertikalne kalibracijske baze Republike Hrvatske. Sukladno prijedlogu, službena kalibracijska baza sastojala bi se od dvije točke određene apsolutnim, te jedne popunjavajuće točke određene relativnim gravimetrijskim mjerenjima. Za krajnje točke predviđene su lokacije u Čakovcu (ili alternativno Zaboku) i Gospiću, čiji je procijenjeni raspon ubrzanja sile teže $2993 \mu\text{ms}^{-2}$ (odnosno $2755 \mu\text{ms}^{-2}$), uz transport gravimetara autocestom u trajanju od 3 sata (odnosno 2 i pol sata). Nadalje, pomoćna vertikalna kalibracijska baza sastojala bi se od dvije točke određene apsolutnim gravimetrijskim mjerenjima, i to točke na Medvednici kraj Zagreba te točke u Zaboku. Procijenjeni raspon ubrzanja sile teže iznosi $1720 \mu\text{ms}^{-2}$, uz transport gravimetara županijskom cestom u trajanju od 45 minuta. Predloženom službenom i pomoćnom vertikalnom kalibracijskom bazom omogućilo bi se znatno poboljšanje točnosti kalibracije relativnih gravimetara.

Ključne riječi: kalibracija relativnih gravimetara, gravimetrijska kalibracijska baza, relativna gravimetrija, Scintrex Autograv CG 3/3M, CG-5.

1. Uvod

Kao pripremu za novi ciklus apsolutne gravimetrijske izmjere gravimetrijske mreže 0. reda, Hrvatski geodetski institut (u nastavku HGI) je 2010. godine za potrebe Državne geodetske uprave (u nastavku DGU) izradio studiju o stanju i prijedlog za dopunu gravimetrijske mreže 0. reda i gravimetrijske kalibracijske

¹ mr. sc. Marija Repanić, Državna geodetska uprava, Gruška 20, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: marija.repanic@dgu.hr,

dr. sc. Ilija Grgić, Državna geodetska uprava, Gruška 20, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: ilija.grgic@dgu.hr, prof. dr. sc. Tomislav Bašić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: tomislav.basic@geof.hr.

baze Republike Hrvatske. Studijom je utvrđeno da gravimetrijska mreža 0. reda obuhvaća nedovoljan broj (četiri) pouzdano određenih apsolutnih točaka koje zadovoljavaju međunarodne kriterije za stabilizaciju apsolutnih gravimetrijskih točaka. Također, apsolutna gravimetrijska mjerenja na točkama 0. reda obavljena su prije 12, odnosno 16 godina (ovisno o točki) pa je nužno što prije obaviti novu seriju apsolutnih mjerenja. Nadalje, dan je prijedlog dopune gravimetrijske mreže 0. reda četirima (ili alternativno trima) novim točkama i predložena je jedna lokacija za izmještanje postojeće točke. Prijedlogom za dopunu vodilo se računa da točke gravimetrijske mreže 0. reda ujedno posluže i za uspostavu nove horizontalne i vertikalne gravimetrijske kalibracijske baze, te da omogućе uspostavu jedne do dvije postaje Europske kombinirane geodetske mreže (engl. *European Combined Geodetic Network – ECGN*) na hrvatskom teritoriju. U ovom radu dan je pregled činjenica relevantnih za uspostavu horizontalne i vertikalne gravimetrijske kalibracijske baze utvrđenih studijom.

2. Kalibracija relativnih gravimetara

Kalibracijom relativnih gravimetara određuju se parametri kalibracijske funkcije kojom se jedinice gravimetra (engl. *counter units CU*) pretvaraju u jedinice ubrzanja sile teže, tj. ms^{-2} (Torge 1989). Kalibracijska funkcija može se odrediti na temelju laboratorijskih mjerenja (što ne daje rezultat zadovoljavajuće preciznosti) ili mjerenja na kalibracijskoj bazi ili sustavu. Također, ako se raspolaze približnim vrijednostima parametara kalibracijske funkcije, popravke linearnog člana kalibracijske funkcije moguće je odrediti u okviru izjednačenja gravimetrijske mreže. Kalibracijska funkcija mijenja se tijekom vremena zbog promjene svojstva konstrukcijskih elemenata gravimetra.

Pravilnik o načinu izvođenja osnovnih geodetskih radova (NN 87/2009) propisuje da je relativne gravimetre kojima se obavljaju mjerenja pri razvoju gravimetrijske mreže I. i II. reda potrebno kalibrirati na službenoj kalibracijskoj bazi Republike Hrvatske neposredno prije i nakon mjerne kampanje.

2.1. Kalibracijska funkcija relativnih gravimetara

Ako se zanemari ovisnost kalibracijske funkcije o vremenu, opći oblik kalibracijske funkcije glasi (Torge 1989):

$$g = F(z), \quad (1)$$

gdje je g ubrzanje sile teže, a z vrijednost očitavanja u mjernim jedinicama gravimetra.

Kalibracijska funkcija relativnih gravimetara koji se danas proizvode: Scintrex Autograv CG-5 i Autograv CG-3/3M, koji se više ne proizvode, zahvaljujući kvarcnom senzoru i elektroničkom ugađanju, sadrži samo linearni član (Scintrex 1998; Seigel 1995) pa ima oblik:

$$F(z) = N_0 + Y_1 z, \quad (2)$$

gdje je N_0 nivo instrumenta, a Y_1 linearni član.

U Republici Hrvatskoj postoje tri takva gravimetra kojima se obavljaju mjerenja za potrebe uspostave i održavanja gravimetrijske osnove: dva do studenoga 2010. u vlasništvu HGI-a, danas u vlasništvu DGU-a (CG-3M), i jedan u vlasništvu Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (CG-5). Iako se više ne proizvode, u svijetu se još uvijek koriste i astazirani relativni gravimetri s metalnom oprugom: LaCoste & Romberg modeli G i D, kojih kalibracijska funkcija nije linearna, već se sastoji od polinoma, najčešće, trećeg stupnja i periodičnih članova (Torge 1989; IAG, SSG 3.37 1983; LaCoste & Romberg 2004). Međutim, takvi se gravimetri u Republici Hrvatskoj ne koriste pri izmjeri gravimetrijske osnove.

2.2. Određivanje kalibracijske funkcije na kalibracijskoj bazi

Na kalibracijskim bazama točke s poznatim vrijednostima ubrzanja sile teže mogu se protezati u smjeru sjever-jug. U tom se slučaju koristi promjena ubrzanja sile teže s promjenom geodetske širine. Takve se kalibracijske baze nazivaju horizontalnima. Također, za kalibracijsku bazu može se koristiti i promjena ubrzanja sile teže s promjenom visine. Takve kalibracijske baze nazivaju se vertikalnima, a njihove točke raspoređene su po padini nekog brda ili planine, ili uzduž visokih zgrada. Prednost je vertikalnih kalibracijskih baza u manjoj udaljenosti između točaka, čime se smanjuje utjecaj šokova i vibracija tijekom transporta na točnost mjerenja. Međutim, nagle promjene temperature i atmosferskog tlaka pri mjerenju u planinskom području, te gibanje zgrade i mikroseizmika ljudi pri mjerenju u visokim zgradama, mogu narušiti točnost mjerenja (Torge 1989). Također, kako s visinom dolazi do promjena atmosferskog tlaka, mogu se pojaviti problemi pri kalibraciji starijih instrumenata kojima je oslabila zaštita od prodora vanjskog zraka.

Ovisno o rasponu i točnosti kalibracijske baze te o unutarnjem rasponu između točaka moguće je odrediti linearne, nelinearne i periodične članove kalibracijske funkcije.

Prema Torgeu (1989), ako se želi odrediti samo linearni član kalibracijske funkcije, potrebno je poznavati vrijednost ubrzanja sile teže na najmanje dvije točke. Linearni član može se tako odrediti iz poznate razlike ubrzanja sile teže (Δg) i razlike očitavanja (Δz) na temelju izraza:

$$Y_1 = \frac{\Delta g}{\Delta z}. \quad (3)$$

Dodatne točke koriste se kako bi se povećala preciznost određenih članova te omogućilo statističko testiranje signifikantnosti članova viših redova.

Danas se ubrzanje sile teže na točkama kalibracijskih baza određuje apsolutnim gravimetrima. Za određivanje vrijednosti ubrzanja sile teže na popunjavajućim točkama kalibracijske baze mogu se koristiti i relativni gravimetri.

2.3. Točnost kalibracije relativnih gravimetara

Relativna točnost linearnog člana kalibracijske funkcije dobivenog na temelju izraza (3) može se dobiti na temelju izraza (Torge 1989):

$$\frac{dY_1}{Y_1} = \frac{d(\Delta g)}{\Delta g} - \frac{d(\Delta z)}{\Delta z}. \quad (4)$$

Dakle, kako bi se postigla veća relativna točnost pri određivanju linearnog člana kalibracijske funkcije, poželjno je da razlika ubrzanja sile teže na točkama kalibracijske baze (tj. raspon kalibracijske baze) bude što veća. Nadalje, relativna točnost kalibracije ovisi o točnosti i stabilnosti vrijednosti ubrzanja sile teže na poznatim točkama određenim apsolutnom gravimetrijom te točnosti relativnih mjerenja (Torge 1989; Timmen i dr. 2006; Flury i dr. 2007).

U svrhu određivanja točnosti apsolutnih gravimetara Međunarodna udruga za geodeziju (*International Association of Geodesy – IAG*) svake četiri godine od 1981. organizira međunarodnu usporedbu apsolutnih gravimetara (*International Comparison of Absolute Gravimeters – ICAG*). Također, regionalne usporedbe apsolutnih gravimetara provode se i mnogo češće (Van Camp i dr. 2003). Različiti izvori upućuju na neslaganja između različitih gravimetara utvrđena usporedbama apsolutnih gravimetara i do $0,13 \mu\text{ms}^{-2}$ za FG5, a za druge tipove apsolutnih gravimetara i više (Van Camp i dr. 2003; Vitushkin i dr. 2003). Uklanjanjem različitih sustavnih utjecaja, navedena neslaganja gravimetara FG5 znatno su smanjena, pa prema aktualnim specifikacijama proizvođača iznose do $0,02 \mu\text{ms}^{-2}$ (URL 1). Osim točnosti samih apsolutnih mjerenja, na točnost određivanja ubrzanja sile teže na točkama kalibracijske baze utječe i točnost redukcije na različite referentne visine. Ta redukcija se provodi na temelju vertikalnoga gradijenta ubrzanja sile teže određenim na temelju mjerenja relativnim gravimetrima. Prema Timmen i dr. (2006) te Flury i dr. (2007), točnost ove redukcije na temelju vertikalnoga gradijenta određenim relativnim gravimetrom Scintrex CG-3M iznosi $0,03 \mu\text{ms}^{-2}$.

Točnost relativnih mjerenja ovisi ponajprije o transportnom hodu gravimetra i elastičnoj histerezi, dakle o uvjetima transporta i vremenskoj udaljenosti između točaka. Iako je deklarirana točnost relativnih gravimetara Scintrex CG-3M i CG-5 $0,05 \mu\text{ms}^{-2}$ (Seigel 1995), istraživanja (Flury i dr. 2007) su pokazala da, čak i uz mali vremenski razmak između opažanja (10–20 min), trajanje opažanja od minimalno 30 minuta, te višestruko ponavljanje mjerenja kalibracijske baze u jednom danu, točnost mjerenja razlika ubrzanja sile teže na kalibracijskoj bazi iznosi $0,05 - 0,1 \mu\text{ms}^{-2}$.

Dakle, s obzirom na točnost određivanja apsolutnih točaka te točnost relativnih mjerenja na kalibracijskoj bazi, uz postignutu najvišu točnost apsolutnih i relativnih mjerenja, raspon između točaka kalibracijske baze trebao bi biti najmanje $1000 \mu\text{ms}^{-2}$, kako bi se postigla relativna točnost linearnog člana kalibracijske funkcije od 10^{-4} .

2.4. Kalibracijske baze u Europi

U Njemačkoj je prije nekoliko godina uspostavljena vertikalna kalibracijska baza specijalno za kalibraciju relativnih gravimetara Scintrex Autograv CG-3/3M i CG-5 (Timmen i dr. 2006; Flury i dr. 2007). Baza se sastoji od 4 apsolutne točke raspona $5280 \mu\text{ms}^{-2}$. Zahvaljujući tako velikom rasponu i vrlo kratkom vremenu transporta između točaka, na kalibracijskoj bazi moguće je postići relativnu točnost kalibracije $1-2 \cdot 10^{-5}$.

Mađarska je kalibracijska baza (Csapó i dr. 2003) horizontalna, a sastoji se od 5 apsolutnih i 8 relativnih točaka s prosječnom udaljenosti od 30 km. Raspon baze je $2100 \mu\text{ms}^{-2}$, a relativna točnost točaka je $0,08 - 0,12 \mu\text{ms}^{-2}$. Dakle, kako bi se postigla relativna točnost kalibracije od 10^{-4} , točnost relativnih mjerenja trebala bi iznositi $0,1 \mu\text{ms}^{-2}$ u najgorem slučaju.

3. Stanje gravimetrijske kalibracijske baze RH

Iako Pravilnik o načinu izvođenja osnovnih geodetskih radova (NN 87/2009) propisuje da je relativne gravimetre kojima se obavljaju mjerenja pri razvoju gravimetrijske mreže I. i II. reda potrebno kalibrirati na službenoj kalibracijskoj bazi Republike Hrvatske neposredno prije i nakon mjerne kampanje, takva kalibracijska baza još uvijek nije u potpunosti uspostavljena. Naime prema Bašić i dr. (2006) kalibracijska baza R. Hrvatske horizontalna je baza koja obuhvaća 10 točaka (tablica 1, slika 1). Točka 66 stara je točka osnovne gravimetrijske mreže bivše Jugoslavije, čija vrijednost ubrzanja sile teže u IGSN71 sustavu nije određena. Predložena kalibracijska baza uključuje promjenu ubrzanja sile teže s geodetskom širinom, ali i visinom pa je minimalna vrijednost ubrzanja sile teže upravo na točki GT127 na velebitskom prijevoju Mali Alan (visine 1048 m). Raspon kalibracijske baze iznosi $3780 \mu\text{ms}^{-2}$.

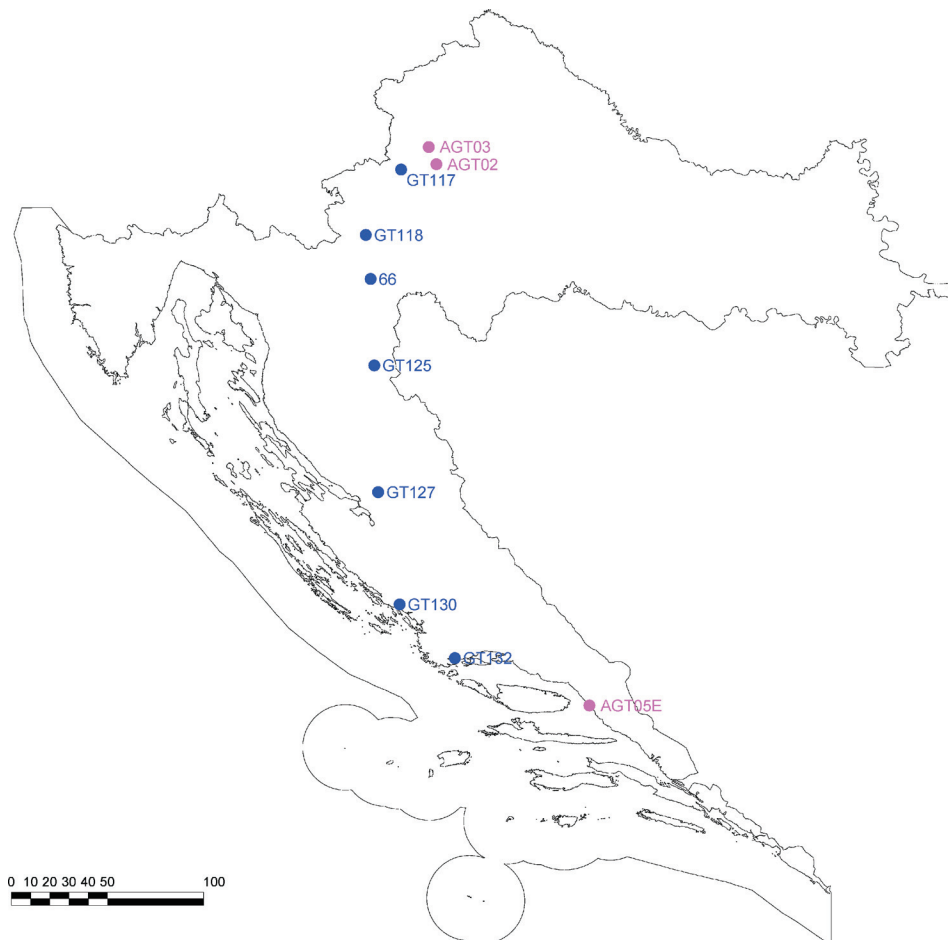
Tablica 1. Točke horizontalne gravimetrijske kalibracijske baze predložene 2006. godine.

Broj točke	Ime točke	Red	φ (HTRS96)	λ (HTRS96)	H (HVR571) [m]	g (IGSN71) [μms^{-2}]	Δg (IGSN71) [μms^{-2}]
AGT03	Zagreb – Puntijarka	0	45°54'26".3536	15°58'05".0613	987.689	9 805 104.40	
AGT02	Zagreb – Maksimir	0	45°49'38".4012	16°01'11".7829	144.767	9 806 622.59	-1518.19
GT117	Sveta Nedjelja	I	45°48'03".0963	15°47'01".5602	129.406	9 806 583.83	38.76
GT118	Karlovac	I	45°29'34".7300	15°33'09".8792	111.865	9 806 386.58	197.25
st. 66	Zagorje						
GT125	Plitvička Jezera	I	44°52'56".2139	15°37'07".3713	578.357	9 804 638.71	1747.87*
GT127	Mali Alan	I	44°17'24".1893	15°39'09".2972	1047.833	9 802 842.33	1796.38
GT130	Vodice	I	43°45'53".7979	15°47'57".2764	37.923	9 804 952.15	-2109.82
GT132	Vrsine	I	43°30'53".0827	16°09'28".1247	8.576	9 804 649.19	302.96
AGT05E	Makarska	0	43°17'30".9682	17°01'20".0872	8.101	9 804 058.59	590.60

*razlika od točke GT188

Iako su kao krajnje točke predložene točke 0. reda, na jednoj od njih: AGT05E nisu provedena apsolutna gravimetrijska mjerenja. Zbog toga Bašić i dr. (2006) predviđa ponovnu uspostavu apsolutne gravimetrijske točke na tom području i/ili produljenje kalibracijske baze do Dubrovnika, tj. točke AGT06. U slučaju uspostave apsolutne gravimetrijske točke, nužno je odabrati novu lokaciju jer točka AGT05E ne zadovoljava uvjete za stabilizaciju apsolutnih gravimetrijskih točaka s obzirom na veličinu prostorijske.

K tome, iako su krajnje točke predložene baze u smislu protezanja sjever – jug točke AGT03 i AGT05E, krajnje točke raspona ubrzanja sile teže (tj. točke s maksimalnom i minimalnom vrijednošću) upravo su točke AGT02 (Maksimir) i



Slika 1. Horizontalna kalibracijska baza RH predložena 2006. godine.

GT127 (Mali Alan). Međutim, kako točka AGT02 ne zadovoljava međunarodne kriterije za stabilizaciju apsolutnih gravimetrijskih točaka, apsolutna gravimetrijska mjerenja obavljena su nešto slabijom preciznošću u odnosu na ostale apsolutne točke, dok na točki GT127 nisu obavljena, niti ih je moguće obaviti. Naime, osim što u blizini točke GT127 ne postoji nikakav objekt pogodan za stabilizaciju apsolutne točke, do prijevoja Mali Alan vodi neasfaltirana cesta koja nije pogodna za prijevoz apsolutnih gravimetara, niti za izvođenje dovoljno točnih relativnih gravimetrijskih mjerenja. Vrijednosti ubrzanja sile teže na točkama I. reda kalibracijske baze određene su samo u sklopu izjednačenja osnovne gravimetrijske mreže Republike Hrvatske (u nastavku OGM), u koje stara točka 66 nije uključena.

Kako je raspon kalibracijske baze manji od raspona OGM-a, vrijednosti ubrzanja sile teže na točkama baze potrebno je odrediti točnije od same izmjere mreža I. i

II. reda. To se ponajprije odnosi na pouzdanost apsolutnih mjerenja, ali i relativnih mjerenja u svrhu određivanja vrijednosti na popunjavajućim točkama, kao i relativnih mjerenja u svrhu određivanja vertikalnih gradijenata.

Može se zaključiti da poznate vrijednosti ubrzanja sile teže na točkama predložene kalibracijske baze nisu dovoljno pouzdane. Naime, apsolutna mjerenja na točkama AGT02 i AGT03 obavljena su prije 14 godina. K tome, vrijednost ubrzanja sile teže na točki AGT02 određena je s nešto slabijom preciznošću. Na ostalim točkama obavljena su samo relativna mjerenja pa je njihova vrijednost određena u sklopu izjednačenja OGM-a (dakle, nedovoljno pouzdano za točke kalibracijske baze), dok na točki 66 vrijednost ubrzanja sile teže u IGSN71 sustavu uopće nije određena (Bašić i dr. 2006).

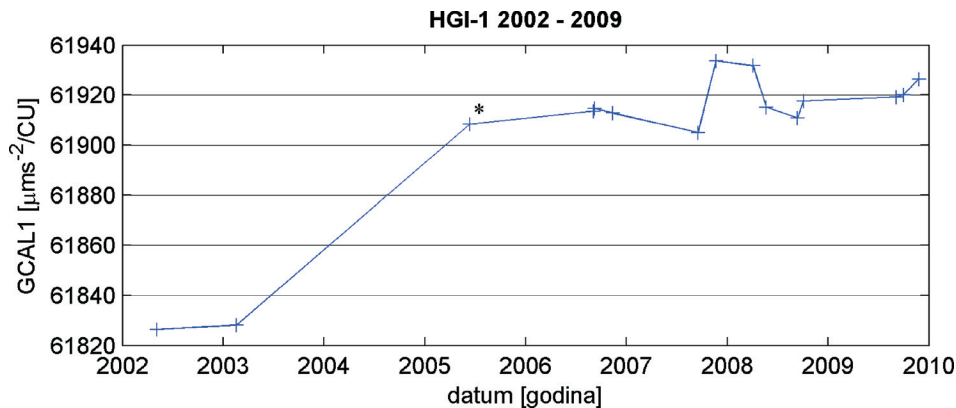
Pomoću internetskog servisa *ViaMichelin* (URL 2) procijenjena je cestovna udaljenost između točaka predložene kalibracijske baze, kao i trajanje putovanja osobnim automobilom (tablica 2). S obzirom na procijenjeno trajanje transporta, ali i na uvjete transporta (pogotovo za točku GT127 na Malom Alanu) teško je očekivati da će se na predloženoj kalibracijskoj bazi moći ostvariti primjerena kontrola hoda, a samim time i potrebna točnost relativnih gravimetrijskih mjerenja.

Tablica 2. Udaljenosti između točaka horizontalne kalibracijske baze predložene 2006. godine.

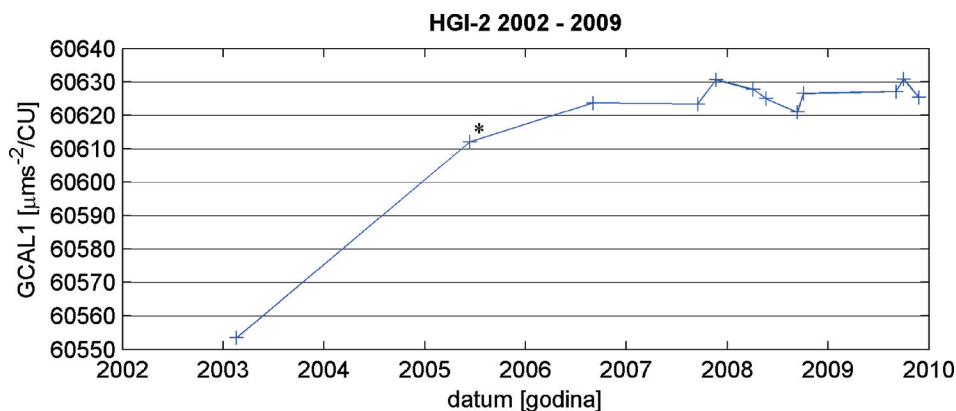
Broj točke	g (IGSN71) [μms^{-2}]	Δg (IGSN71) [μms^{-2}]	Zračna udaljenost [km]	Cestovna udaljenost [km]	Vremenska udaljenost [hh:mm]
AGT03	9 805 104.40				
AGT02	9 806 622.59	-1518.19	9.76	25	1:30
GT117	9 806 583.83	38.76	18.59	30	0:45
GT118	9 806 386.58	197.25	38.67	55	0:45
stara 66				30	0:30
GT125	9 804 638.71	1747.87*	68.07*	55	0:45
GT127	9 802 842.33	1796.38	65.86	90	1:45
GT130	9 804 952.15	-2109.82	59.52	130	1:45
GT132	9 804 649.19	302.96	40.12	60	1:00
AGT05E	9 804 058.59	590.60	74.26	90	1:45
ukupno		3780.26		565	10:30

*razlika od točke GT188

Kako horizontalna kalibracijska baza još nije uspostavljena, kalibracija relativnih gravimetara prije i nakon svake mjerne kampanje obavlja se na provizornoj vertikalnoj kalibracijskoj bazi koju čine gravimetrijske točke 0. reda AGT02 (Zagreb – Maksimir) i AGT03 (Zagreb – Puntijarka). Slika 2 i slika 3 prikazuju promjene kalibracijskih konstanti određenih na provizornoj vertikalnoj kalibracijskoj bazi dvaju relativnih gravimetara Scintrex Autograv CG-3M u vlasništvu DGU-a



Slika 2. Kalibracijska konstanta gravimetra HGI-1.



Slika 3. Kalibracijska konstanta gravimetra HGI-2.

(nekad u vlasništvu HGI-a) od početka njihova rada do 2010. godine. S tim da je 2002. godine gravimetar HGI-1 kalibriran na kalibracijskoj bazi Scintrexa u Kanadi. Skokovi koji se daju primijetiti iz grafičkog prikaza promjena kalibracijskih konstanti preveliki su da bi se pripisali samo realnoj promjeni mjernog sustava gravimetra (deklarirana promjena linearne kalibracijske konstante je 1 do 2 ppm po danu (Scintrex 1998)). Nadalje, skokovi su najčešće istog trenda kod oba gravimetra, ali ne i istih iznosa. Na temelju navedenog, može se zaključiti da su skokovi vjerojatno uzrokovani neprimjerenim načinom kalibracije, a ne nestabilnošću gravimetara. Uzrok takvom ponašanju kalibracijskih konstanti gravimetara još uvijek nije do kraja razjašnjen. Naime, stručnjaci HGI-a sumnjali su u nestabilnost vrijednosti ubrzanja sile teže na točki AGT02 (Zagreb – Maksimir) i na nedostatnu točnost relativnih mjerenja, zbog loših uvjeta transporta gravimetara. Međutim, za sada još neobjavljena istraživanja obavljena u HGI-u pokazuju da bi uzrok takvom kolebanju kalibracijskih konstanti mogao biti sustavni utjecaj atmosferskog tlaka, koji je izražen pogotovo kod gravimetra HGI-1.

Iako uzrok opisanom ponašanju kalibracijskih konstanti gravimetara još uvijek nije potvrđen, ono neosporno upućuje na nužno određivanje kalibracijskih konstanti u okviru izjednačenja osnovne gravimetrijske mreže, kako bi se one odredile na temelju što više mjerenja i na temelju što više točaka s poznatom vrijednosti ubrzanja sile teže. Takvo rješenje prihvatljivo je dok se ne uspostavi primjerena kalibracijska baza i ne propišu odgovarajući mjerni i računski postupci kalibriranja relativnih gravimetara te dok se ne obave potrebna istraživanja sustavnih utjecaja atmosferskih čimbenika na očitavanja relativnih gravimetara.

Na temelju opisanog stanja gravimetrijske kalibracijske baze RH predložene 2006. godine, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Vrijednosti ubrzanja sile teže na točkama horizontalne kalibracijske baze predložene 2006. godine nisu dovoljno pouzdano određene.
- Horizontalna kalibracijska baza predložena 2006. godine nepovoljna je za preciznu relativnu gravimetrijsku izmjeru zbog duljine i kvalitete puta između točaka.
- Provizorna vertikalna kalibracijska baza na kojoj se obavlja kalibracija relativnih gravimetara od 2002. godine ne omogućuje određivanje kalibracijskih konstanti s potrebnom pouzdanošću.

4. Prijedlog nove gravimetrijske kalibracijske baze RH

Kako se u R. Hrvatskoj pri uspostavi gravimetrijske osnove koriste samo relativni gravimetri Scintrex CG-3M, odnosno CG-5, s kvarcnim senzorom, kojih je kalibracijska funkcija linearna, dovoljno je uspostaviti kalibracijsku bazu s dvije krajnje točke određene apsolutnim gravimetrima te po potrebi međutočkama određenim visokopreciznim relativnim gravimetrijskim mjerenjima.

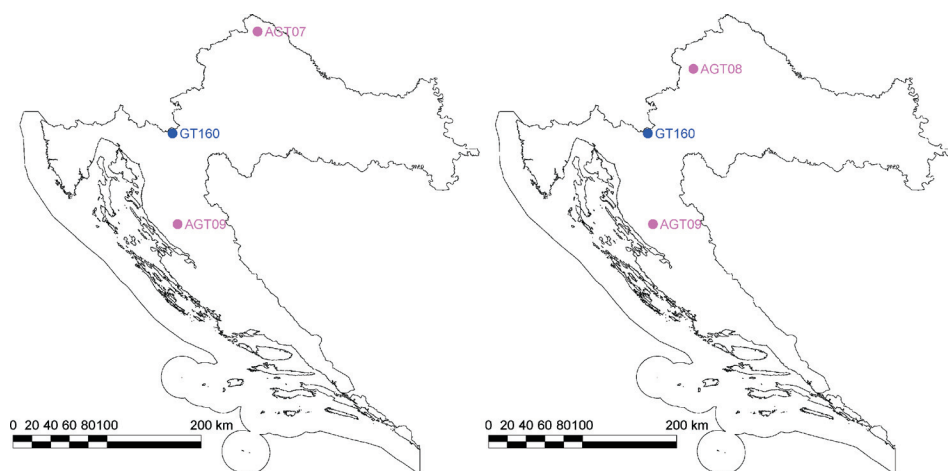
Pri odabiru lokacija za gravimetrijske točke koje će biti sastavni dio horizontalne ili vertikalne kalibracijske baze, treba voditi računa da se apsolutnim točkama pokrije što veći raspon ubrzanja sile teže, a da pritom trajanje transporta gravimetara bude što kraće, te da uvjeti transporta budu povoljni za relativnu gravimetriju. Pritom treba iskoristiti prednost autoceste Zagreb – Ravča, koja prilikom prošlog prijedloga horizontalne kalibracijske baze (Bašić i dr. 2006) još nije bila izgrađena.

4.1. Kalibracijska baza RH

S obzirom na raspon geodetske širine koji R. Hrvatska pokriva, OGM pokriva relativno veliki raspon ubrzanja sile teže ($4334 \mu\text{ms}^{-2}$). Uzrok je toga velika reljefna razvijenost. Tako je npr. točka s minimalnom vrijednošću ubrzanja sile teže upravo GT127, točka na velebitskom prijevoju Mali Alan. Zbog visine točke od 1048 m, ubrzanje sile teže na toj točki čak je $716 \mu\text{ms}^{-2}$ manje od najjužnije točke OGM-a GT136 u Popovićima. Međutim, lokacije s minimalnom vrijednošću ubrzanja sile teže nalaze se u najčešće u nepristupačnim područjima u odnosu na lokacije na sjeveru, kojih je vrijednost ubrzanja sile teže maksimalna, pa kao takve nisu pogodne za uspostavu kalibracijske baze. Lokacije su ili povezane lošim cestama (npr. Mali Alan), ili su pak smještene relativno blizu autoceste, ali je cestovna udaljenost

tolika da onemogućuje višestruka ponavljanja relativnih gravimetrijskih mjerenja tijekom jednog dana (npr. Makarska, Dubrovnik). Lokacija predložena za apsolutnu gravimetrijsku točku AGT09 u Gospiću pokazala se kao idealan kompromis. Vremenska udaljenost od lokacija predloženih za apsolutne točke na sjeveru (AGT07 u Čakovcu i AGT08 u Zaboku) relativno je mala, dok je raspon ubrzanja sile teže, zbog visine lokacije u Gospiću od približno 560 m dovoljno velik (tablica 4).

Sukladno navedenom i u skladu s prijedlogom dopune gravimetrijske mreže 0. reda, za krajnje točke službene kalibracijske baze Republike Hrvatske predlažu se nove točke gravimetrijske mreže 0. reda. Poblje, predlažu se apsolutna gravimetrijska točka AGT07 u Čakovcu (ako bude uspostavljena) ili AGT08 u Zaboku (u slučaju da točka u Čakovcu ne bude uspostavljena) te apsolutna gravimetrijska točka AGT09 u Gospiću (slika 4, tablica 3, tablica 4). Cestovna udaljenost između točaka predložene kalibracijske baze i trajanje putovanja osobnim automobilom procijenjena je pomoću internetskog servisa *ViaMichelin* (URL 2). Radi kontrole hoda relativnih gravimetara, predložena je i jedna međutočka GT160 u Bosiljevu, i to crkva sv. Mavre. Njezinu vrijednost ubrzanja sile teže bit će potrebno naknadno odrediti višestrukim relativnim gravimetrijskim mjerenjima.



Slika 4. Prijedlog službene kalibracijske baze RH (lijevo: verzija A, desno: verzija B).

Treba imati na umu da ovakva kalibracijska baza, iako je horizontalna (jer se promjena ubrzanja sile teže postiže s promjenom geodetske širine), uključuje i promjenu ubrzanja sile teže s promjenom visine. Zbog toga je, prije uspostave same kalibracijske baze, potrebno ispitati utjecaj promjene atmosferskog tlaka na očitavanja relativnih gravimetara, na koji upućuju istraživanja obavljena u HGI-u. Opisano kalibracijsku bazu moguće je dodatno proširiti do predložene lokacije apsolutne gravimetrijske točke AGT10 u Splitu. Međutim, takvim produljenjem raspon ubrzanja sile teže povećao bi se samo za približno $326 \mu\text{ms}^{-2}$, dok bi se transport gravimetara produljio za 220 km, odnosno 2 sata i 15 minuta (ne računajući potrebnu dodatnu međutočku). Dakle, takvo produljenje isplati se samo ako se eventualni sustavni utjecaj promjene atmosferskog tlaka na očitavanja gravimetara ne može ukloniti ni modelirati.

Tablica 3. Točke predložene gravimetrijske kalibracijske baze RH.

Broj točke	Ime točke	Red	φ (HTRS96)	λ (HTRS96)	H (HVR571) [m]	g (IGSN71) [μms^{-2}]	Δg (IGSN71) [μms^{-2}]
Verzija A: AGT07 – GT160 – AGT09							
AGT07a	Čakovec	0	46°23'16"	16°26'20"	165	9 807 063	
GT160	Bosiljevo	I	45°24'38"	15°17'19"	201	9 805 869	1194
AGT09a	Gospić – DHMZ	0	44°33'02"	15°22'22"	560	9 804 070	1799
ukupno							2993
Verzija B: AGT08 – GT160 – AGT09							
AGT08a	Zabok	0	46°01'49"	15°54'35"	160	9 806 825	
GT160	Bosiljevo	I	45°24'38"	15°17'19"	201	9 805 869	956
AGT09a	Gospić – DHMZ	0	44°33'02"	15°22'22"	560	9 804 070	1799
ukupno							2755

Tablica 4. Udaljenosti između točaka predložene kalibracijske baze RH.

Broj točke	g (IGSN71) [μms^{-2}]	Δg (IGSN71) [μms^{-2}]	Zračna udaljenost [km]	Cestovna udaljenost [km]	Vremenska udaljenost [hh:mm]
Verzija A: AGT07 – GT160 – AGT09					
AGT07a	9 807 063				
GT160	9 805 869	1194	140.59	176	1:45
AGT09a	9 804 070	1799	95.80	126	1:15
ukupno		2993		302	3:00
Verzija B: AGT08 – GT160 – AGT09					
AGT08a	9 806 825				
GT160	9 805 869	956	84.15	103	1:10
AGT09a	9 804 070	1799	95.80	126	1:15
ukupno		2755		229	2:25

Sukladno predloženoj kalibracijskoj bazi, relativna gravimetrijska mjerenja za potrebe određivanja kalibracijske konstante bit će vremenski zahtjevna. Ako se koristi metoda profila, koja je najmanje vremenski zahtjevna, a kojom se postiže najslabija kontrola dnevnog hoda, mjerenja bi trebala trajati najmanje 12 sati. Ako se koriste točnije metode, mjerenja će trajati dva ili više dana. Zbog toga nije ekonomično pri razvoju gravimetrijske mreže I. i II. reda prije i nakon svake mjerne kampanje gravimetre kalibrirati na predloženoj kalibracijskoj bazi, kao što je propisano Pravilnikom o načinu izvođenja osnovnih geodetskih radova (NN 87/2009). U tu se svrhu u nastavku predlaže pomoćna relativna kalibracijska baza. Ipak, na predloženoj bazi bit će potrebno kalibrirati gravimetre periodično, prema uputi proizvođača, ili po potrebi ako mjerenja na pomoćnoj vertikalnoj kalibracijskoj bazi ukažu na znatne promjene kalibracijske konstante.

4.2. Pomoćna vertikalna kalibracijska baza RH

Do sada su se relativni gravimetri prije i nakon svake mjerne kampanje kalibrirali na provizornoj kalibracijskoj bazi koju čine točke AGT02 (Zagreb – Maksimir) i AGT03 (Zagreb – Puntijarka). Predlaže se i nadalje za kontrolu kalibracijskih konstanti prije i nakon mjerne kampanje korištenje vertikalne kalibracijske baze. Međutim, zbog neodgovarajuće stabilizacije točke AGT02, za novu vertikalnu kalibracijsku bazu predlaže se točka AGT03 i nova točka AGT08 u Zaboku (tablica 5, tablica 6). Osim što je raspon ubrzanja sile teže predložene vertikalne kalibracijske baze nešto veći od provizorne baze koja se do sada koristila, cesta je pogodnija za relativna gravimetrijska mjerenja, a transport gravimetara je vremenski znatno kraći. Dakle, pretpostavlja se da će se na toj kalibracijskoj bazi moći ostvariti bolja točnost određivanja kalibracijskih konstanti.

Tablica 5. Točke predložene vertikalne gravimetrijske kalibracijske baze RH.

Broj točke	Ime točke	Red	φ (HTRS96)	λ (HTRS96)	H (HVR571) [m]	g (IGSN71) [μms^{-2}]	Δg (IGSN71) [μms^{-2}]
AGT08a	Zabok	0	46°01'49"	15°54'35"	160	9 806 825	
AGT03	Zg – Puntijarka	0	45°54'26"	15°58'05"	988	9 805 104	1720

Tablica 6. Udaljenosti između točaka predložene vertikalne kalibracijske baze RH.

Broj točke	g (IGSN71) [μms^{-2}]	Δg (IGSN71) [μms^{-2}]	Zračna udaljenost [km]	Cestovna udaljenost [km]	Vremenska udaljenost [hh:mm]
AGT08a	9 806 825				
AGT03	9 805 104	1720	14.38	27	0:45

4.3. Nastavak radova na uspostavi kalibracijske baze RH

Prije uspostave novih točaka gravimetrijske mreže 0. reda trebalo bi za svaku lokaciju zatražiti mišljenje Hrvatskoga geološkog instituta o stabilnosti lokacija, te provesti testna relativna gravimetrijska mjerenja. Tim mjerenjima trebala bi se ispitati sezonska stabilnost predloženih lokacija te utvrditi s kojom je točnošću moguće obaviti relativna gravimetrijska mjerenja na kalibracijskim bazama. Nadalje, kako istraživanja obavljena u HGI-u pokazuju da je uzrok kolebanja kalibracijskih konstanti gravimetara upravo sustavni utjecaj promjene atmosferskog tlaka, trebalo bi u što kraćem roku obaviti ispitivanje istog, ali i ostalih sustavnih utjecaja na očitavanja relativnih gravimetara. Tek na temelju ispitivanja moguće je utvrditi mogu li se relativni gravimetri Scintrex CG-3M/5 kalibrirati na kalibracijskim bazama koje uključuju promjenu ubrzanja sile teže s visinom ili je potrebno kalibrirati ih na horizontalnim bazama. Također, na temelju rezultata ispitivanja treba propisati odgovarajuće mjerne i računске postupke kalibriranja relativnih gravimetara.

5. Zaključak

Uspostava nove službene kalibracijske baze Republike Hrvatske, sukladno opisanim prijedlogu, omogućila bi znatno poboljšanje točnosti kalibracije u odnosu na raniji prijedlog kalibracijske baze, uz neusporedivo manje troškove terenskih radova. To proizlazi iz znatnog smanjenja vremena transporta gravimetara i mjerenja te poboljšanja kvalitete transporta, unatoč smanjenju raspona ubrzanja sile teže od 20%. Iako bi danim prijedlogom opseg terenskih radova bio znatno smanjen u odnosu na ranije predloženu kalibracijsku bazu, kalibracija relativnih gravimetara pri razvoju mreže I. i II. reda prije i nakon svake mjerne kampanje na takvoj kalibracijskoj bazi nije ekonomična. U tu svrhu predložena je pomoćna kalibracijska vertikalna baza. Sukladno prijedlogu, na službenoj bazi relativni gravimetri kalibrirali bi se periodično prema uputi proizvođača te po potrebi, ako mjerenja na pomoćnoj kalibracijskoj bazi ukažu na znatne promjene kalibracijske konstante. Dakle, pomoćna vertikalna kalibracijska baza zamijenila bi provizornu kalibracijsku bazu koja je u upotrebi. Time bi se također omogućilo poboljšanje točnosti kalibracije, zbog smanjenja vremena transporta gravimetara i poboljšanja kvalitete istog te nešto većeg raspona ubrzanja sile teže, ali i zbog toga što bi se apsolutne vrijednosti ubrzanja sile teže mogle odrediti s većom pouzdanošću.

NAPOMENA. Rad je nastao na temelju istraživanja obavljenog u Hrvatskom geodetskom institutu i ne predstavlja službeni stav Državne geodetske uprave.

Literatura

- Bašić, T., Markovinović, D., Rezo, M. (2006), Osnovna gravimetrijska mreža Republike Hrvatske, Geodetski list, 2, 73–91.
- Csapó, G., Kis, M., Völgyesi, L. (2003): Different adjustment methods for the Hungarian part of the unified European Gravity Network, 23. IUGG-ov generalni skup, 2003, Sapporo, Japan.
- Flury, J., Peters, T., Schmeer, M., Timmen, L., Wilmes, H., Falk, R. (2007): Precision gravimetry in the new Zugspitze gravity meter calibration system, Proceedings of IAG Gravity Field Service Symposium Istanbul 2006.
- IAG, SSG 3.37 (1983): Report on High Precision Gravimetry, Volume II, Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt a.M.
- LaCoste & Romberg (2004): Instruction Manual Model G & D Gravity Meters, LaCoste & Romberg, Austin, Texas, SAD.
- Narodne novine (87/2009): Pravilnik o načinu izvođenja osnovnih geodetskih radova, Državna geodetska uprava, Zagreb.
- Scintrex (1998): CG-3/3M Gravity Meter User's Guide, Scintrex Limited, Canada.
- Seigel, H. O. (1995): High Precision Gravity Survey Guide, Scintrex Limited, Canada.
- Timmen, L., Flury, J., Peters, T., Gitlein, O. (2006): A new absolute gravity base in the German Alps, u: M. Hvoždara and I. Kohúh (urednici): Contributions to Geophysics and Geodesy, Vol. 36, 2nd Workshop on International Gravity Field Research (specijalno izdanje).

- Torge, W. (1989): Gravimetry, de Gruyter, Berlin – New York.
- Van Camp, M., Hendrickx, M., Richard, P., Thies, S., Hinderer, J., Amalvict, M., Luck, B., Falk, R. (2003): Comparisons of the FG5#101, #202, #206 and #209 absolute gravimeters at four different European sites, u Proc. IMG-2002 (Instrumentation and Metrology in Gravimetry) Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg.
- Vitushkin, L., Jiang, Z., Becker, M., Francis, O. (2003): Analysis of the results of the Sixth International Comparison of Absolute Gravimeters ICAG-2001, Gravity and Geoid 2002, ZITI.
- URL 1: FG5 Features and Specifications, <http://www.microglacoste.com/fg5specs.htm>, (28.1.2010.).
- URL 2: ViaMichelin – Internetski servis za planiranje cestovnih putovanja, <http://www.viamichelin.com/web/Itineraires>, (4.2.2010.).

Proposal of Gravity Calibration Line of the Republic of Croatia

ABSTRACT. The paper depicts proposal of gravity calibration line of the Republic of Croatia and auxiliary vertical calibration line. Particularly, the paper lays down procedures of relative gravity meter calibration and gives relevant mathematical foundation, with respect to relative gravity meters used for fundamental gravity survey in the Republic of Croatia. The accuracy of relative gravity meter calibration has been analysed. Furthermore, present calibration line has been examined. At last, proposal of new gravity calibration line of the Republic of Croatia, which is horizontal, but partly vertical also, is given, as well as auxiliary vertical calibration line. In accordance, gravity calibration line should comprise two absolute and one intermediate relative gravity station. As extreme stations, locations in Čakovec (or alternatively Zabok) and Gospić are foreseen. Predicted gravity range amounts $2993 \mu\text{ms}^{-2}$ (or alternatively $2755 \mu\text{ms}^{-2}$), with transport time of 3 hours on highway (or alternatively 2 and a half). Furthermore, auxiliary vertical calibration line should comprise two absolute stations: one on mountain Medvednica near Zagreb and other in Zabok. Predicted gravity range amounts $1720 \mu\text{ms}^{-2}$, with transport time of 45 minutes on district road. Proposal should provide significant increase in calibration accuracy of relative gravity meters.

Keywords: relative gravity meter calibration, gravity calibration line, relative gravimetry, Scintrex Autograv CG 3/3M, CG-5.

Primljeno: 2013-01-22

Prihvaćeno: 2013-03-06