

# TESTNE GRAVIMETRIČNE MERITVE ZA POTREBE PROJEKTA NOVE GRAVIMETRIČNE MREŽE SLOVENIJE

Božo Koler\*, Miran Kuhar\*, Klemen Medved\*\*

## Povzetek

Med 7. julijem 2005 in 13. oktobrom 2005 smo na območju Slovenije izvedli testne gravimetrične meritve z relativnim gravimetrom Scintrex CG-3M (Avtomated Gravity Meter) številka 10341. Testne meritve smo navezali na absolutne gravimetrične točke oziroma točke, ki so bile predhodno navezane na absolutne gravimetrične točke. Osnovni namen izvajanja testnih meritev je bil testiranje, spoznavanje instrumenta in pridobivanje ustreznih izkušenj za izmero gravimetrične mreže 1. reda. Meritve smo izvajali na točkah, na katerih je bil težnostni pospešek predhodno izmerjen. To so reperji II. NVN, reperji, na katerih so bile izvedene gravimetrične meritve leta 1995 (izvedene so bile v okviru povezave nivelmanskih mrež Slovenije in Avstrije), ter kalibracijska baza Republike Slovenije, ki je bila izmerjena leta 1998. Vse meritve so bile izrednotene in opravljena je primerjava s prejšnjimi vrednostmi težnostnega pospeška na izmeritvenih točkah.

## Uvod

Testne meritve smo s prekinitvami izvajali od 7. julija 2005 do 13. oktobra 2005 na območju Slovenije. Vse meritve so bile izvedene z relativnim gravimetrom Scintrex CG-3M (Avtomated Gravity Meter) številka 10341, ki je last Geodetske uprave Republike Slovenije. Relativni gravimetri so zelo občutljivi instrumenti, s katerimi je potrebno ravnati pazljivo. Posebno pozornost je potrebno posvetiti transportu instrumenta. Med prevozom je instrument v potovalnem zaboju, ki je nameščen in pritrjen v vozilo (slika 1).



Slika 1 - Instrument v potovalnem zaboju, ki je nameščen v prtljažniku vozila

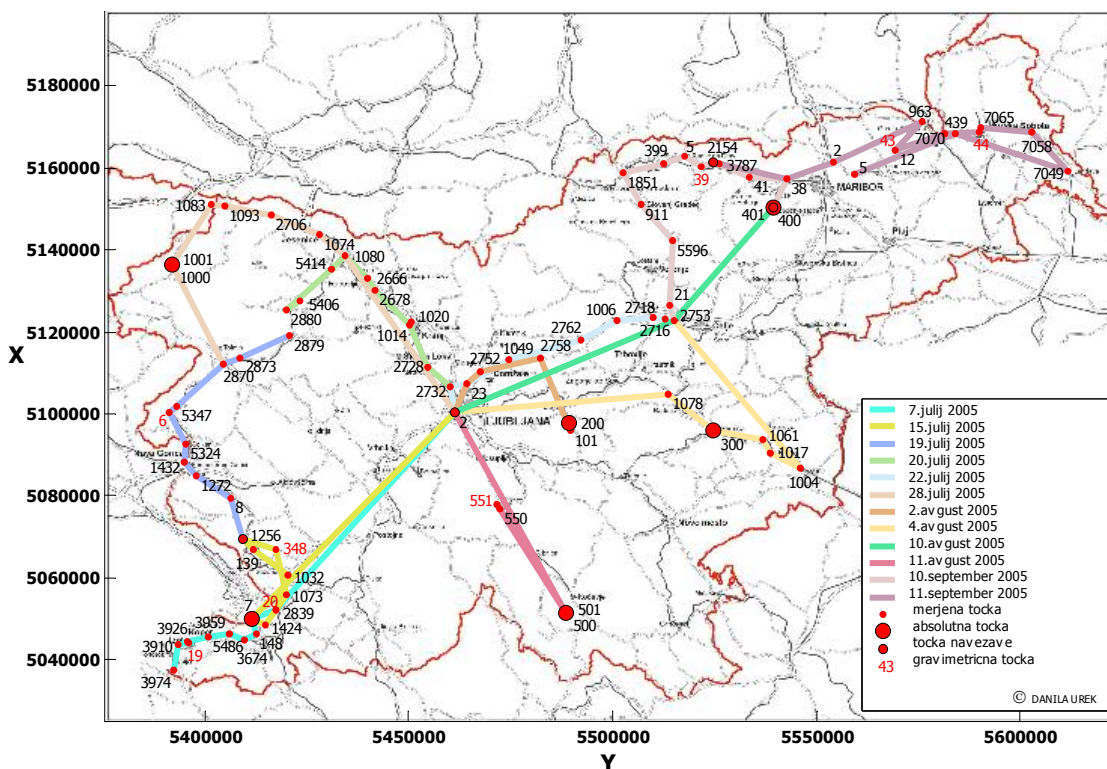
\* doc.dr.Božo Koler, univ.dipl.inž.geod., doc.dr.Miran Kuhar, univ.dipl.inž.geod. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana.

\*\* Klemen Medved, univ.dipl.inž.geod., Geodetska uprava R. Slovenije, Zemljemerska 12, 1000 Ljubljana.

Tako poskušamo omiliti tresljaje in nezaželjeno premikanje instrumenta, ki bi mu lahko škodovalo. Sama vožnja mora potekati čim bolj tekoče in brez sunkovitih pospeševanj oziroma zaviranj. Testne meritve smo navezali na absolutne gravimetrične točke oziroma točke, ki so bile predhodno navezane na absolutne gravimetrične točke. Osnovni namen izvajanja testnih meritev je bil testiranje, spoznavanje instrumenta in pridobivanje ustreznih izkušenj za izmero gravimetrične mreže 1. reda. Meritve smo izvajali na posameznih točkah, na katerih je bil težnostni pospešek predhodno izmerjen, saj imamo tako možnost primerjati rezultate meritev. Na osnovi primerjave lahko odkrijemo morebitne grobe in sistematične pogreške. V testne meritve smo vključili:

- gravimetrične točke osnovne gravimetrične mreže,
- reperje II. NVN,
- reperje, na katerih so bile izvedene gravimetrične meritve leta 1995, in sicer v okviru povezave nivelmanskih mrež Slovenije in Avstrije,
- kalibracijsko bazo Republike Slovenije, ki je bila izmerjena leta 1998.

### SKICA MERITEV



Slika 2 - Prikaz območja meritev po dnevih

Na sliki 2 je prikazani območje meritev, merjene točke in trase merjenj za posamezen dan.

### Relativni gravimeter Scintrex CG-3M

Scintrex CG-3M je avtomatizirani gravimeter. Delovni razpon gravimetra (brez resetiranja) je 7000 mGal-a ( $1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ ), kar pomeni, da je možno meritve izvajati skoraj na celotni Zemljini obli. Postopek izmere je avtomatiziran. Tako so odpravljeni pogreški operaterja. Meritve se shranjujejo v interni spomin gravimetra.

Relativni gravimeter Scintrex CG-3M ima standardno ločljivost  $1 \mu\text{Gal}$ -a ( $1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ) s standardnim odklonom manjšim od  $5 \mu\text{Gal}$ -a. Visoka natančnost CG-3M

gravimetra je rezultat avtomatizacije merskega procesa, visokokvalitetne izdelave, malega hoda gravimetra ter precizne kalibracije. Gravimetrični senzor CG-3M gravimetra sloni na kvarčnem elastičnem sistemu. Sila, ki je prisotna zaradi težnostnega pospeška na čutilu instrumenta (merska masa), je v uravnovešena z ustrezno vzmetjo in relativno majhno elektrostatično silo kondenzatorja. Autograv CG-3M vsebuje mersko čutilo, nadzorni mehanizem z mikroprocesorjem in baterije v prenosnem ohišju.

Gravimeter CG-3M nenehno odčitava podatke z internega senzorja nagiba. Na osnovi teh meritev CG-3M avtomatično kompenzira meritve zaradi nehorizontalnosti gravimetričnega senzorja. Na podlagi geografskega položaja in časovne cone CG-3M avtomatično računa popravek zaradi plimovanja trdne Zemlje v realnem času, in to za vsak odčitek.

Da bi eliminirali vplive sprememb zračnega tlaka in temperature, je celotni merilni sistem hermetično zaprt v aluminijastem ohišju. Termostat vzdržuje konstantno temperaturo, najboljčutiljivejši elementi (vzmet, občutiljive elektronske naprave, analogno digitalni pretvornik, libeli) pa so v dvojnem vakumskem ohišju. To zmanjšuje vpliv zunanjih temperaturnih sprememb za faktor  $10^4$ .

Gravimeter na zaslonu prikazuje in shranjuje v spomin naslednje podatke: popravljeno meritve, standardni odklon, naklona okoli x-osi in y-osi, vrednost temperaturnega senzorja, popravek za plimovanje trdne Zemlje, trajanje meritev, čas začetka merjenja, in osnovne informacije o privzetih parametrih merjenja.

## **Postopek izmere**

Na točkah osnovne gravimetrične mreže smo po postavitvi in horizontiranju instrumenta višino instrumenta izmerili trikrat (ob vsaki nogi stativa – v obdelavi se nato upošteva aritmetična sredina izmerjenih višin), saj se podatek o merjenem  $g$  nanaša na ploskev. Zaradi tresljajev, ki so prisotni pri prevozu in prenosu instrumenta, smo po horizontiranju instrumenta počakali 10 minut, da se merilni sistem umiri. Po 10 minutah smo pričeli z izmero. Na točkah osnovne gravimetrične mreže smo izvedli 5 meritev.

Na reperjih II. NVN je bila višina od vrha instrumenta do reperja izmerjena le enkrat, ker se podatek o merjenem  $g$  nanaša na najvišjo točko reperja. Ker so predhodne meritve na nivelmanskih reperjih II. NVN podane na  $10 \mu\text{Gal}$  natančno, smo izvedli 3 meritve, in to takoj po postavitvi in horizontiranju instrumenta.

## **Obdelava merskih podatkov gravimetrične izmere**

Pri meritvah težnostnega pospeška so prisotni številni vplivi. Vse vplive na izmerjene vrednosti težnostnega pospeška lahko razdelimo v dve skupini (Torge, 1989):

1. vplivi zaradi nepopolnosti instrumenta – instrumentalni pogreški,
2. zunanji vplivi okolice.

Instrumentalni pogreški so posledica konstrukcije gravimetra. V to skupino sodijo pogreški čitanja (v primeru, da gravimeter nima avtomatiziranega postopka izmere in odčitavanja merjene vrednosti), pogrešek zaradi nepravilnega horizontiranja, elastična histereza, nestabilna napetost v instrumentu ter kalibracijska funkcija. Elastična histereza ali zmanjšanje (popušcanje) napetosti vzmeti nastane zaradi spremembe dolžine vzmeti po določenem času. Vpliv se lahko zmanjša ( $< 0,001 \text{ mGal}$ ) z načinom dela.

Pri stacionarnem in terenskem delu z gravimetrom prihaja do sprememb v ravnotežju sistema vzmeti. Zaradi tega se spreminja ničelni položaj čutila (ang. zero position), kar je

znano kot hod gravimetra (ang. gravimeter drift). S hodom gravimetra imamo opravka zaradi sprememb nemodeliranih zunanjih vplivov in popuščanja napetosti sistema vzmeti. S posebnim načinom dela in uvedbo ustreznega popravka za merjene vrednosti lahko upoštevamo vpliv hoda na opazovanja, predvsem v daljšem časovnem obdobju.

Vse vplive upoštevamo z uvedbo ustreznih popravkov. Pred izračunom ustreznih popravkov moramo iz rezultatov izmere odstraniti periodični vpliv plimovanja trdne Zemlje. Gravimeter Scintrex Autograv CG-3M omogoča avtomatski izračun in upoštevanje plimskega popravka, lahko pa plimovanje odpravimo z ustreznimi programi po meritvah.

Od naštetih vplivov ima lahko hod gravimetra največjo vrednost, posebej če se meritve izvajajo dalj časa. Pri naših meritvah smo upoštevali naslednje popravke.

### Vpliv zračnega tlaka

Sprememba zračnega tlaka povzroči spremembo mase zračnega stolpa nad merjeno gravimetrično točko. Vpliv zračnega tlaka na spremembo težnosti v  $\mu\text{Gal}$ ih je podan z enačbo (Schüler, 2000):

$$\Delta g_p = 0,30 \cdot (p - p_n)$$

$$p_n = 1013,25 \cdot \left( 1 - \frac{0,0065 \cdot H}{288,15} \right)^{5,2559}$$

kjer so:

- p merjeni zračni tlak na stojišču v hPa oz. mbar,
- $p_n$  izračunani normalni zračni tlak na stojišču v hPa oz. mbar,
- H nadmorska višina gravimetrične točke v metrih.

Spremembe težnosti so torej odvisne od vremena (stabilnosti zračnega tlaka), v praksi pa se upoštevajo le pri najnatančnejših izmerah (v mikrogravimetričnih mrežah) ob nestabilnem vremenu, saj se pri spremembi tlaka za 1 hPa spremeni merjena težnost le za 0,3 - 0,4  $\mu\text{Gal}$ . Zračni tlak na stojišču smo merili z Meteo Station HM 30 švicarskega proizvajalca REVUE THOMMEN AG. Resolucija instrumenta je 0.1 hPa in standardni odklon 1 hPa.

### Vpliv gibanja polov

Popravek vpliva gibanja pola kompenzira dolgoročne vplive zaradi spremembe trenutnega položaja pola glede na CIO (Conventional International Origin) (Torge, 2001):

$$\Delta g_{\text{pol}}(t) = -1,16 \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \sin 2\varphi \cdot (x(t) \cdot \cos \lambda - y(t) \cdot \sin \lambda) \quad [\text{ms}^{-2}]$$

kjer so:

- $\omega$  kotna hitrost Zemlje ( $2\pi/\text{dan}$ ),
- R radij Zemlje,
- $\varphi, \lambda$  geografski koordinati opazovališča,
- $x(t), y(t)$  koordinati trenutnega položaja pola glede na CIO – podatki so dostopni v elektronskem biltenu International Earth Rotation Service (IERS) oziroma na medmrežju na URL-naslovu: <http://hpiers.obspm.fr/eoppc/bul/bulb/>.

## Vpliv hoda instrumenta

Hod instrumenta v grobem razdelimo na dve vrsti:

- Dolgoročni hod: je posledica staranja vzmeti, temperaturnih sprememb in sprememb pritiska; dolgoročni hod instrumenta znaša od 10 do 100  $\mu\text{Gal}$  na dan in se s staranjem instrumenta zmanjšuje.
- Kratkoročni hod: je posledica tresljajev med transportom instrumenta; kratkoročni hod instrumenta znaša do 100  $\mu\text{Gal}$  na uro in je v kratkih časovnih periodah (nekaj ur) skoraj linearen, odvisen pa je od instrumenta, načina transporta in zaščite instrumenta.

Določanje hoda temelji na Taylorjevi vrsti merjene vrednosti  $g$  v odvisnosti od časa  $t$ :

$$g(t) = g(t_0) + \left(\frac{\partial g}{\partial t}\right)_0 (t - t_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 g}{\partial t^2}\right)_0 (t - t_0)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 g}{\partial t^3}\right)_0 (t - t_0)^3 + \dots$$

kjer  $t_0$  predstavlja čas začetka meritve.

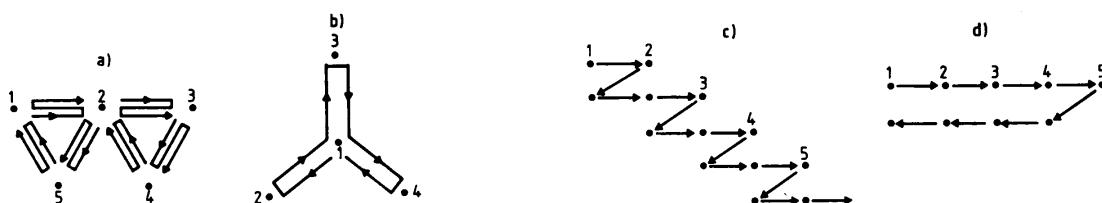
Vpeljemo koeficiente hoda in enačbo pretvorimo v polinom:

$$\begin{aligned} g(t) &= g(t_0) + d_1(t - t_0) + d_2(t - t_0)^2 + d_3(t - t_0)^3 + \dots \\ &= g(t_0) + \sum_{p=1}^s d_p (t - t_0)^p = g(t_0) + D(t) \end{aligned}$$

kjer  $g(t_0)$  predstavlja začetno meritev.

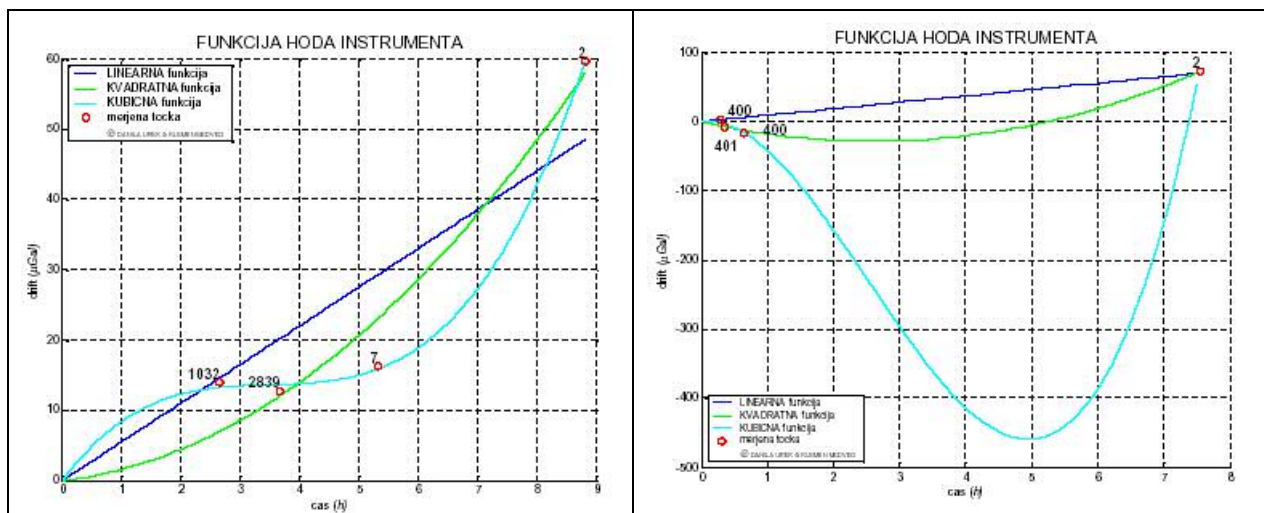
Koeficiente polinoma izračunamo z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov. Koeficienti hoda se lahko določijo s ponovljenimi meritvami na istih točkah. Ponavljanja naj bodo čim enakomerneje časovno razporejena, odvisna pa so od tipa hoda (linearen, nelinearen, preskoki), velikosti hoda in zahtevane natančnosti meritev. Poznamo več metod merjenj (Torge, 1989):

- Metoda razlik (ang. difference method): kontrola hoda v realnem času na končnih točkah; zaporedje točk: 1-2-1-2, 2-3-2-3, 3-4-3-4, 4-2-4-2, itd. (slika 3 a),
- metoda zvezde (ang. star method): povezava na centralno točko in kontrolo hoda v realnem času; zaporedje točk: 1-2-1-3-1-4-1 (slika 3 b),
- metoda korakov (ang. step method): najmanj trikratno zaporedno merjenje na posamezni točki; zaporedje točk: 1-2-1-2-3-2-3-4-3-... (slika 3 c) in
- metoda profilov (ang. profile method): enkratno, dvakratno ali večkratno merjenje na posamezni točki profila; zaporedje točk: 1-2-3-4-...-4-3-2-1 (slika 3 d).



Slika 3 - Metode izmere in določanja hoda instrumenta (Torge, 1989)

V našem primeru smo vse meritve izvedli po metodi profila. Meritve smo popravili s polinomskimi funkcijami 1. 2. ali 3. stopnje. Dva karakteristična primera določitve hoda sta podana na sliki 4. Leva stran kaže dan 17. 07. 2005, desna pa 10. 08. 2005. Očitno se pri slednjem kubična funkcija hoda prilega točkam, vendar je zaradi neenakomerne časovne razporeditve večkratnih opazovanj na točkah bolj smiselno uporabiti linearni hod.



Slika 4 - funkcija hoda instrumenta za 15. 07. 2005 in 10. 08. 2005

### Pregled rezultatov meritev in primerjava s predhodnimi gravimetričnimi izmerami

Z meritvami smo določili težnostni pospešek na 8 točkah nekdanje osnovne gravimetrične mreže Jugoslavije in na več kot 60 reperjih II NVN. V preglednici 1 so podani absolutni težnostni pospeški na merjenih točkah osnovne gravimetrične mreže iz leta 2005 in iz leta 1967 v Potsdamskem sistemu ter razlika med njimi.

TOČKA	Težnostni pospešek – sistem IGSN71 (μGal)	Težnostni pospešek – Potsdamski sistem (μGal)	Razlika med sistemoma 2005-1967 (μGal)
	2005	1967	
GT19	980661757	980676854	- 15097
GT20	980547723	980562846	- 15123
GT348	980573154	980588193	- 15039
GT6	980630888	980645657	- 14769
GT21	980558032	980573321	- 15289
GT39	980678011	980693177	- 15166
GT43	980701702	980716566	- 14864
GT44	980715784	980730865	- 15081

Preglednica 1 - Rezultati meritev težnostnega pospeška na točkah osnovne gravimetrične mreže Jugoslavije

Med sistemom IGSN71 in Potsdamskim sistemom težnosti je bil izmerjen zamik - 14 mGal. Vendar pa so na osnovi naknadnih meritev na območju bivše Jugoslavije, ki so bile izvedene v Beogradu in Zagrebu, dobili zamik v velikosti - 15,13 mGal do -15,10 mGal (Zbornik instituta za geodezijo, 1984), kar se tudi ujema z razlikami, ki smo jih dobili na osnovi testne gravimetrične izmere. Podatke o vrednosti težnostnega pospeška na točkah osnovne gravimetrične mreže Jugoslavije smo pridobili iz topografij.

Pri primerjavi merjene vrednosti težnosti na reperjih II. NVN, ki je bila opravljena leta 1971, in naše testne izmere, smo dobili razlike okoli - 1100  $\mu$ Gal. Ne glede na dejstvo, da so bile primerjane meritve izvedene v sistemu IGSN71, je omenjena razlika posledica dejstva, da so pri gravimetrični izmeri II. NVN upoštevali razliko med Potsdamskim sistemom in IGSN71 v velikosti - 14 mGal.

### **Zaključek**

Testne gravimetrične meritve, ki smo jih izvedli na celotnem ozemlju Slovenije v 12 delovnih dneh, so v popolnosti izpolnile naša pričakovanja. Tako smo pridobili številne merske podatke, ki nam bodo omogočali nadaljnje analize v zvezi z merilom instrumenta (ponovna izmera kalibracijske baze R Slovenije) in določitvijo funkcije hoda instrumenta. Izbira funkcije hoda instrumenta ima namreč največji vpliv na rezultate meritev, saj je sam postopek izmere avtomatiziran. Poleg tega se je gravimeter Scintrex Autograv CG-3M izkazal kot zanesljiv in za uporabo enostaven instrument.

### **Literatura**

- II. Nivelman visoke točnosti Jugoslavije. Svezak 1. Geodetski fakultet sveučilišta u Zagrebu, Zavod za višu geodeziju.
- Medved, K. 2001. Gravimetrične meritve za potrebe določitve geopotencialnih kot EUVN točk. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Geodetska smer: 90 str.
- Seigel, H.O. 1995. SCINTREX CG-3/3M Gravity Meter: Operator manual. Canada.
- Torge, W. 1989. Gravimetry. Berlin, New York.
- Urek, D. 2005. Avtomatska obdelava in analiza testnih meritev z relativnim gravimetrom Scintrex CG-3M. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Geodetska smer: 106 str.