

Prve gravimetrične meritve v okolici Cerknškega jezera

Polona Pavlovčič Prešeren*, Miran Kuhar*

Povzetek

Gravimetrične meritve so izhodišče modeliranja težnostnega polja Zemlje. Razen na absolutnih točkah meritve izvajamo relativno ob upoštevanju posebej določenih pravil izvedbe izmere. Po definiciji je vrednost težnega pospeška v obravnavani točki odvisna od gostote razporeditve zemeljskih mas. V prispevku opisujemo prve gravimetrične meritve v okolici presihajočega Cerknškega jezera, kjer se gostota zemeljskih mas zaradi različnega vodostaja jezera vseskozi spreminja. Območje smo izbrali z namenom empirične določitve vpliva hidroloških sprememb na meritve težnega pospeška v odvisnosti od vodostaja jezera. Vzpostavili smo mrežo točk, kjer bomo z večkratnimi meritvami ob različnih vodostajih preverili, ali lahko zaznamo spremembe v težnem pospešku, ki so posledica nihanja vodostaja jezera. Rezultat ponovljenih meritev bo empirična ocena hidrološkega vpliva na gravimetrične meritve, ki je trenutno ne poznamo.

Ključne besede: gravimetrične meritve, težni pospešek, vodostaj, presihajoče Cerknško jezero

Keywords: gravimetric measurements, gravity, water level, intermittent Lake Cerknica

Uvod

Gravimetri so instrumenti za merjenje težnega pospeška. Gravimetri za kopenske meritve se razlikujejo od gravimetrov za izvedbo meritev na morju ali v zraku. Z gravimetričnimi meritvami pridobimo podatke o težnostnem polju Zemlje. To je pomembno pri geodetskih nalogah določitve oblike Zemlje (npr. za modeliranje ploskve geoida) in izvedbi geodetskih terestričnih meritev ter njihovi povezavo z meritvami GNSS (angl. *Global Navigation Satellite System*). Z gravimetričnimi meritvami lahko določimo velikost sile teže (težni pospešek) in vertikalni gradient težnega pospeška, ki opisuje spremembo težnosti z višino. Težni pospešek se zaradi sploščenosti Zemlje in spremembe centrifugalne sile spreminja z geografsko širino in je istočasno odvisen tudi od nadmorske višine opazovališča. Razlike v izmerjenih težnostih so posledica neenakomerne razporeditve gostot mas v notranjosti Zemlje. Ker razporeditve mas v notranjosti Zemlje ne poznamo, so gravimetrične meritve, ki nam podajo odgovor na to, še toliko bolj pomembne.

Uradno je enota za težni pospešek m/s^2 . V geodeziji še vedno uporabljamo enoto Gal (poimenovana je po Galileju), to je 1 cm/s^2 . Z relativnimi gravimetri lahko na kopnem dosežemo natančnost določitve težnega pospeška nekaj μGal -ov. Dosegljiva natančnost gravimetra Scintrex CG-5, s katerim smo izvajali meritve, je $2,1 \pm 1,1\ \mu\text{Gal}$ (Lederer, 2009).

Merjeno vrednost težnega pospeška g na dani točki opišemo z enačbo (Lederer, 2009):

$$g = \hat{g}_r + \sum o_i + Z(t) \quad (1)$$

Pri tem so:

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova c. 2, Ljubljana

\hat{g}_r	relativna vrednost težnega pospeška,
$\sum o_i$	vsota popravkov in
$Z(t)$	hod gravimetra v odvisnosti od časa.

Enačbo (1) zapišemo bolj podrobno tako, da vplive razdelimo na zunanje in z izvorom v instrumentu:

$$g = \hat{g} \cdot k + \sum o_i^I(t) + \sum o_i^{II} + Z(t) \quad (2)$$

Pri tem so:

\hat{g}	odčitek na gravimetru,
k	merilo ali kalibracijska funkcija,
$\sum o_i^I(t)$	vsota popravkov zaradi zunanjih vplivov (plimovanje Zemlje in oceanov, spremembe v zračnem tlaku) in
$\sum o_i^{II}$	vsota popravkov zaradi delovanja instrumenta (barometrični vpliv in histereza).

Kalibracijska funkcija (ali merilo) je potrebna, da enote merilne naprave (senzorja) gravimetra lahko pretvorimo v enote težnega pospeška. Postopek določitve kalibracijske funkcije se imenuje kalibracija gravimetra. Najbolje je kalibracijo izvesti z meritvami na odprtem – z gravimetričnimi meritvami na točkah z znanimi vrednostmi težnega pospeška (Medved, 2008). Po zagotovilih proizvajalca in izkušnjah uporabnikov zadošča za vse gravimetre Scintrex linearna kalibracijska funkcija.

Sodelavci Geodetske uprave RS opravijo kalibracijo instrumentov na absolutnih gravimetričnih točkah osnovne gravimetrične mreže Slovenije in sicer AGT200 – Gotenica in AGT300 – Sevnica.

Vplivi na izmero z izvorom v instrumentu

Pri delu je pomembno poznati vpliv nagiba in tresljajev gravimetra ter ostalih vplivov iz preglednice 1, na meritve. Lahko bi rekli, da se pravilna izvedba gravimetričnih meritev prične v laboratoriju, nadaljuje s pravilnim transportom in terenskim delom in končna z obdelavo meritev. Vplive iz naslova konstrukcije instrumenta lahko odstranimo, če tekom izmere vedno postopamo na enak način.

Med transportom mora biti gravimeter vseskozi postavljen vertikalno. Pomembno je, da za izmero izberemo lokacije, ki so čim manj obremenjene s tresljaji (prometnice, železnica, bližina rudnika). Sodobni gravimetri, kot je npr. Scintrex CG, sicer upoštevajo popravek nepopolne horizontalnosti instrumenta, vendar to ni v neposredni povezavi z nagibom instrumenta med transportom (angl. *tilt*). Ničelni položaj libel moramo periodično preverjati, zato se popravki meritev zaradi dejanskega nagiba instrumenta lahko upoštevajo, če nagib znaša do okoli 3' (Lederer, 2009). Bolj problematičen je dolgotrajni nagib instrumenta pred izvedbo meritev. Le-tega libele ne zaznajo in lahko se zgodi, da je horizontiran instrument še vedno obremenjen z vplivom daljšega nagiba, ki se je dogajal med transportom, in tega libele ne zaznajo.

Vplivi na elastičnost in dolžino vzmeti, kot so spreminjanje temperature in zračnega tlaka v notranjosti instrumenta, staranje vzmeti ter drugi tresljaji, povzročajo, da gravimeter tekom daljšega obdobja spremeni ničelni odčitek. Pojav imenujemo hod gravimetra (angl. *drift*). V meroslovju pravijo hodu *lezenje* in ga razdelimo na:

- dolgoročni hod, ki je posledica staranja vzmeti, temperaturnih sprememb in sprememb zračnega tlaka. Dolgoročni hod instrumenta znaša od 10 do 100 μGal -ov na dan in se s staranjem instrumenta zmanjšuje;
- kratkoročni hod, ki je posledica tresljajev med transportom instrumenta; kratkoročni hod instrumenta znaša do 100 μGal -ov na uro in je v kratkih časovnih periodah (nekaj ur) skoraj linearen ter je odvisen od instrumenta, načina transporta in zaščite instrumenta.

Zaradi nepoznavanja dnevnega hoda moramo meritve izvajati tako, da lahko v obdelavi hod ocenimo iz odčitkov v različnih delih dneva. Dolgoročni hod instrumenta določajo na eni ali več stabilnih točkah, kije/so neobremenjene s tresljaji, v določenih časovnih intervalih, navadno po preteku vsaj treh mesecev.

Za oceno dnevnega hoda instrumenta moramo meritve pričeti in končati na točki z znano vrednostjo g , zato meritve izvajamo v zaključenih zankah. Za modeliranje hoda iz odčitkov gravimetra uporabimo polinomsko funkcijo (Torge, 1989):

$$z(t) = z(t_0) + a(t - t_0) + b(t - t_0)^2 + c(t - t_0)^3 + \dots \quad (4)$$

t_0 je referenčni trenutek in a, b, c, \dots koeficienti polinoma, ki jih ocenjujemo. Te določimo s ponovitvami meritev na dani točki ob različnih trenutkih v dnevu. Za določitev dnevnega hoda poznamo več shem izvedbe meritev, ki jih podrobneje opisuje Medved (2008). V preglednici 1 podajamo pregled vplivov s pripadajočim velikostnim redom, medtem ko so podrobneje opisani v (Medved in dr., 2009).

Preglednica 1: Pregled vplivov na gravimetrične meritve (Lederer, 2009)

Vpliv	Velikostni red [μGal]	Odstranitev [μGal]	Odvisno od
plimovanje	280	< 1	kakovosti modela
spmembe tlaka	več deset enot	< 1	vrednosti tlaka
hidrološki vplivi	nekaj enot	~ 5	hidroloških razmer
kalibracijska funkcija	več deset enot	1...10/100 mGal	razlik v težnosti
periodični vplivi	več deset enot	1 do 5	gravimetra
hod gravimetra	več sto enot	1 do 5	gravimetra
dolgotrajni nagib	nekaj enot	< 2	pazljivosti operaterja
barometrični vpliv	več deset enot	nekaj enot	zračnega tlaka
histereza	1 do 3	< 1	gravimetra
temperaturna nihanja	več deset enot	nekaj enot	temperature
magnetno polje	nekaj enot	< 1	orientacije
ostali vplivi	nekaj enot	1 do 2	gravimetra
vertikalni gradient	več deset enot	1 do 2	gravimetra in terena

Zunanji vplivi na gravimetrično izmero

Med zunanje vplive uvrščamo:

- plimovanje oceanov in trdne Zemlje,
- vpliv zračnega tlaka in
- hidrološke vplive.

Plimovanje je podrobno razloženo v (Pavlovčič Prešeren in Kuhar, 2016). Spremembe v zračnem tlaku moramo upoštevati in jih iz meritev odstraniti. Za to uporabimo enačbo:

$$\Delta g_p = 0,3(p - p_n) \quad (5)$$

Pri tem je p na vsaki točki izmerjeni zračni tlak v hPa in p_n normalni zračni tlak mednarodne standardne atmosfere (ISA). Iz enačbe (5) sledi, da sprememba 1 hPa glede na standardno atmosfero povzroči spremembo v meritvah velikosti 0,3 μ Gal.

Odstranitev hidroloških vplivov je zelo problematično, zato jih običajno meritve še vedno vsebujejo. V literaturi vpliv podtalnice obravnavajo v odvisnosti od letnega časa (Seigel, 1994). Vpliv je težko oceniti, razen če izmero večkrat zaporedoma ponovimo na območjih, kjer se velikost vodnih mas spreminja. V kolikor se želimo v največji meri izogniti hidrološkemu vplivu in ne moremo pridobiti hidroloških podatkov, je najbolje, da gravimetrične meritve ponavljamo v času, ko so na opazovališčih podobne razmere.

Hidrološki vplivi na gravimetrične meritve

Na meritve težnega pospeška imajo hidrološke spremembe v okolici meritev vpliv, ki ga ne bi smeli zanemariti. Pomemben predvsem tekom izvedbe izmer daljšega časovnega obdobja, kot so primer regionalne gravimetrične mreže. Čeprav vemo, da je velikostni red hidrološkega vpliva precej večji od natančnosti meritev in bi ga morali upoštevati, obstajajo omejitve pri njegovem obravnavanju. Glede na to, da je spremembe v nivoju podtalnice težko zaznati, je težko tudi vzpostaviti matematično zvezo med hidrološkimi spremembami in povezavo le-teh na spremembo težnega pospeška. Lederer (2009) navaja, da kakršnekoli hidrološke spremembe v oddaljenosti 1 km od točke, kjer izvajamo gravimetrične meritve, že vplivajo na rezultate gravimetrične izmere. V kolikor v bližini točke lahko pridobimo meritve vlažnosti zemljine in višine podtalnice, lahko podatke obravnavamo kot dodatne informacije o spremembi zemeljskih mas. Hidrološki popravek predstavimo s preprosto enačbo (Lederer, 2009):

$$\Delta g_{hidro} = f(P, E, Q) \quad (3)$$

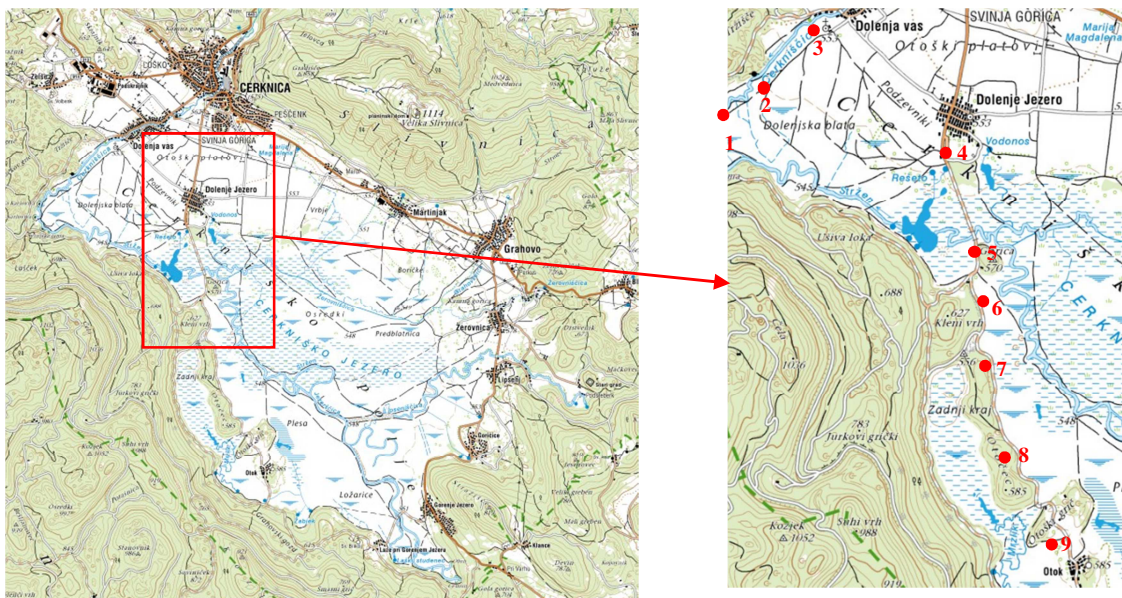
pri čemer je P vsebnost vode v zemljini, E izhlapevanje in Q pretok vode na danem območju. Kratkoročne spremembe v težnosti (zaradi padavin) so lahko velikostnega reda tudi do nekaj 10 μ Gal-ov (Torge, 1989, Harnisch in Harnisch, 2002) in naj bi bile odvisne od letnega časa.

Hipotezo, da spremembe vodnih mas vplivajo na izmerjeni težni pospešek, je v večini primerov zaradi pomanjkljivih informacij težko empirično potrditi. Zato so meritve na območju periodičnega poplavljanja večje površine, kjer lahko enostavno pridobimo tudi podatke o vodnih masah, za študije še toliko bolj pomembne. Da bi pridobili empirično oceno vpliva, smo v okolici presihajočega Cerkniškega jezera (slika 1) vzpostavili točke, kjer bomo v prihodnosti izvajali gravimetrične meritve ob različnih vodostajih jezera. Točke se nahajajo na območju med Dolenjo vasjo, Dolenjim Jezerom in Otokom (slika 1).

Praktična izvedba meritev

Gravimetrične meritve smo pričeli in končali na točki v kleti Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, na Jamovi cesti 2 v Ljubljani (slika 2), ki ima znano vrednost težnega pospeška. Meritve smo izvajali po metodi profila, zato smo za določitev dnevnega hoda gravimetra meritve ponavljali na točkah 3 in 8 (slika 2), (Koler, Kuhar in Medved, 2006).

Na terenu smo počakali okoli 20 minut, da se je instrument Scintrex CG-5M umiril in nato naredili pet zaporednih meritev s trajanjem 60 s na točkah. Za nadaljnje izmere in ustrezno obdelavo podatkov, kot je plimovanje trdne Zemlje in izračun zračnega tlaka na določeni višini, smo le-tem z GNSS-RTK metodo izmere določili koordinate v koordinatnem sistemu D96/TM oz. ETRS89.



Slika 1: Območje Cerklješkega jezera z oznakami točk, na katerih smo izvajali gravimetrične meritve

Na terenu smo gravimetrične meritve izvajali tudi v neposredni bližini late vodomernegega mesta *Dolenje Jezero* vodotoka Stržen (ARSO, 2017), slika 3. Cilj v nadalje je vzpostaviti empirični model povezave višine vodostaja in sprememb v izmerjenem težnem pospešku.



Slika 2: Točki FG1 in 3, na katerih smo ponavljali meritve. Točka 3 je služila za oceno hoda.



Slika 3: Meritve na terenu (levo) in meritve ob potoku Stržen, vodomerno mesto *Dolenje jezero* (desno)

Obdelava meritev

Plimovanje trdne Zemlje (Pavlovčič Prešeren in Kuhar, 2016) smo iz gravimetričnih meritev odstranili z Longmanovim modelom, prav tako smo odstranili vplive zračnega tlaka ter upoštevali kalibracijsko funkcijo. Oceno hoda smo naredili po postopku, opisanem v (Schüler, 2000; Urek, 2002). Za oceno smo privzeli linearno funkcijo. Za tako obdelane gravimetrične meritve smo predpostavili, da so obremenjene le z zunanjimi vplivi. Med temi naj bi bili izhodišče obravnave vplivi zaradi spremembe gostote razporeditve zemeljskih mas.

Prvi rezultati meritev

Prve meritve smo izvedli v marcu 2016, ko je vodostaj jezera na merilni postaji Dolenje Jezero znašal 486 cm. Druge meritve smo izvedli v septembru 2016, v času nizkega vodostaja (101 cm). Iz ponovljenih meritev ob srednjem vodostaju smo ugotovili precejšnje odstopanje marčevskih meritev iz leta 2016. Te so lahko bile posledica precej neprimernih vremenskih razmer za izvedbo gravimetričnih meritev (vetrovno vreme). Zato imamo v nadalje v načrtu izvesti še nekaj izmer, da bi imeli na voljo kakovostne rezultate, iz katerih bomo v nadalje potrdili v začetku postavljene hipoteze.

Zaključek

Če ne upoštevamo vseh dejavnikov, ki vplivajo na gravimetrične meritve, je zelo težko doseči ustrezno kakovost meritev in iz teh izvedenih modelov. Na rezultate meritev vplivajo zunanji vplivi kot tudi dejavniki, ki nastanejo zaradi konstrukcije gravimetra. Dobro poznavanje in primerno upoštevanje vplivov je pomembno tudi pri nadaljnjih

izračunih gravimetričnega modela geoida. Ravno zato vseskozi spremljamo lastnosti gravimetra, ki se s časom spreminjajo. Kljub vsemu pa o nekaterih zunanjih vplivih na gravimetrične meritve lahko le sklepamo. Zato so empirične ocene zunanjih vplivov na območjih, kjer lahko spremljamo in modeliramo vzroke za spremembe, zelo pomembne. S primerno interpretacijo terensko pridobljenih gravimetričnih podatkov in korelacijo le-teh s fizičnim stanjem v naravi lahko šele dobimo kakovostne podatke za nadaljnja modeliranja.

Zahvala

Avtorja se zahvaljujeva kolegom z Geodetske uprave Republike Slovenije za možnost izposoje gravimetra Scintrex CG-5.

Literatura

- ARSO (2017). Arhiv hidroloških podatkov - dnevni podatki:
http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (pridobljeno 25. 10. 2017)
- Harnisch, M. in Harnisch, G. (2002). Seasonal variations of hydrological influences on gravity measurements at Wettzel. Bulletin d'Information, št. 137, 10937–10951.
http://www.eas.slu.edu/GGP/BIM_Recent_Issues/bim137-2002/harnisch_harnisch_seasonal_hydrology_Wettzellr_bim137_02.pdf (pridobljeno 24.10. 2017)
- Koler B., Medved K., Kuhar M. (2006). Testne gravimetrične meritve za potrebe projekta nove gravimetrične mreže Slovenije. Referat Zbornika SZGG, 2006.
- Lederer, M. (2009). Accuracy of the relative gravity measurement. Acta Geodyn. Geomater. 6 (3) (155), 383–390.
- Medved, K. (2008). Osnovna gravimetrična mreža Slovenije. Magistrska naloga. UL FGG, Ljubljana.
- Medved K., Koler B., Kuhar M. (2009). Izračun osnovne gravimetrične mreže Slovenije. V: Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008: zbornik predavanj. V Ljubljani: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2009, str. 49-58.
- Torge, W. (1989). Gravimetry, Berlin – New York, Walter de Gruyter.
- Schüler, T., 2000. Conducting and Processing Relative Gravity Surveys. University FAF Munich, Institute of Geodesy and Navigation, Germany.
- Pavlovčič Prešeren, P. in Kuhar, M. (2016). Modeliranje plimovanja trdne Zemlje za geodetsko določanje 3D-položaja točk kombinirane geodetske mreže. V: Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016: zbornik predavanj. V Ljubljani: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2016, str. 93-102.
- Seigel, H. O. (1994). A guide to high precision land gravimeter surveys. Scintrex Limited, Concord, ON: Scintrex Ltd.
- 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.