

OCENA VERTIKALNE STABILNOSTI MAREOGRAFSKE POSTAJE KOPER

ASSESSMENT OF THE VERTICAL STABILITY OF THE KOPER TIDE GAUGE STATION

Oskar Sterle, Miran Kuhar, Bojan Stopar, Polona Pavlovčič Prešeren, Tilen Urbančič, Božo Koler

UDK: 551.46.08:528.38(497.4Koper)
 Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
 Prispelo: 4. 9. 2017
 Sprejeto: 7. 11. 2017

DOI: 10.15292//geodetski-vestnik.2017.04.527-540
 SCIENTIFIC ARTICLE
 Received: 4. 9. 2017
 Accepted: 7. 11. 2017

IZVLEČEK

Z mareografi spremljamo spreminjanje nivoja morja. Ker so običajno postavljeni na pomolih/obali, ki ni stabilna, so v nizu mareografskih opazovanj zajeti tudi vertikalni premiki mareografa. V prispevku obravnavamo stabilnost mareografske postaje Koper, ki smo jo ugotavljali relativno na podlagi izmer nivelmanske mreže, stabilizirane v bližini MP Koper. Za reperje nivelmanske mreže MP Koper smo določili vektorje hitrosti vertikalnih premikov glede na reper mareografa 9000. Stabilnost mareografa smo določili tudi v globalnem referenčnem sistemu z obdelavo opazovanj GNSS na točki KOPE, ki je stabilizirana na MP Koper in je del državnega omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL in državne geodetske mreže 0. reda. Vektor hitrosti vertikalnega premika točke KOPE smo primerjali z vektorji hitrosti vertikalnih premikov na drugih mareografih, ki so postavljeni ob hrvaški obali, in mareografa v Trstu.

ABSTRACT

Tide gauges are used to assess sea level changes. Usually, they are placed on the coast (piers), which can be unstable. Consequently, the vertical movement of the tide gauge should be included in the series of observations. The paper deals with the stability of the tide gauge Station Koper (MP Koper), the stability of which was determined relatively on the basis of the levelling network, which was stabilised nearby. The stability of the individual benchmarks was analysed and the velocity vector of vertical displacement of each benchmark was determined with respect to the benchmark 9000 tide gauge. The stability of the tide gauge was also determined in a global reference system by using the series of GNSS observations of the KOPE continuously operating reference GNSS station. The KOPE station is stabilised at the MP Koper and is included in the Slovenian GNSS network of the SIGNAL continuously operating reference network of permanent stations. The vertical velocity vector of the point KOPE was compared with the vertical velocity vectors at other tide gauges, which are located along the Croatian coast, and the tide gauges in Trieste.

KLJUČNE BESEDE

mareograf, nivo morja, vertikalni premiki, nivelmanska mreža, GNSS

KEY WORDS

tide gauge, sea level, vertical movements, levelling network, GNSS

1 UVOD

Z mareografi spremljamo relativno spreminjanje nivoja morja, saj so običajno postavljeni na pomolih, oziroma obali, ki pa ni vedno stabilna (Blewitt et al., 2010; Meyssignac in Cazenave, 2012; Tamisiea et al., 2014; Han et al., 2015). Kakovost in zanesljivost določitve spreminjanja nivoja morja sta odvisni tudi od časovnega obdobja spremljanja. Zanesljive podatke o spreminjanju nivoja morja dobimo na podlagi 60- in večletnih mareografskih opazovanj. V večini študij se predpostavlja, da so mareografska opazovanja kakovostna, mareografi pa stabilni v prostoru in času. Kljub temu se moramo zavedati, da so bili številni pomoli, na katere so postavljeni ali prestavljeni mareografi, med dolgoletnimi opazovanji nivoja morja obnovljeni, dograjeni ali kako drugače preoblikovani. Za zanesljivo spremljanje spreminjanja nivoja morja potrebujemo dobro dokumentirane podatke o vseh posegih na mareografih in njihovih vertikalnih premikih (Wöppelmann, Zerbini in Marcos, 2006; Hannah, 2010; Deo, Govind in El-Mowafy, 2013).

Vzroki za vertikalno premikanje mareografov so številni. Izvori premikanja so lahko v tektonskem dogajanju, postledenodobnih dviganjih kopnega, lokalnih posedanjih obale, obnovi pomolov, na katere so postavljeni mareografi, itd. Dolgoročni vertikalni premiki so lahko določeni z ledeniško izostatično izravnavo (angl. GIA – *Glacial isostatic adjustment*), modeliranjem geoloških procesov ali neposredno z geodetskimi meritvami GNSS (Zervas, Gill in Sweet, 2013), DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) in absolutno gravimetrijo, ki so izvedene na mareografski postaji in v njeni okolici ter nam omogočajo, da določimo absolutne premike mareografov (Hannah, 2010; Santamaría-Gómez, Bouin in Wöppelmann, 2012). Stabilnost mareografa lahko spremljamo tudi relativno glede na njegovo okolico s periodično izvedenimi meritvami s preciznim geometričnim nivelmanom. V tem primeru moramo imeti v bližnji okolici mareografa stabilizirano nivelmansko mrežo (UNESCO, 2002; Dawidowicz, 2014; Gill, Weston in Smith, 2015). Kot primer navajamo ugotovitve z mareografske postaje Newlyn v Veliki Britaniji, da je geološki vpliv na določitev srednjega nivoja morja velikostnega reda od 0,4 do 0,7 mm/leto, pa čeprav v splošnem velja, da je okolica Newlyna stabilna (Bradshaw et al., 2016).

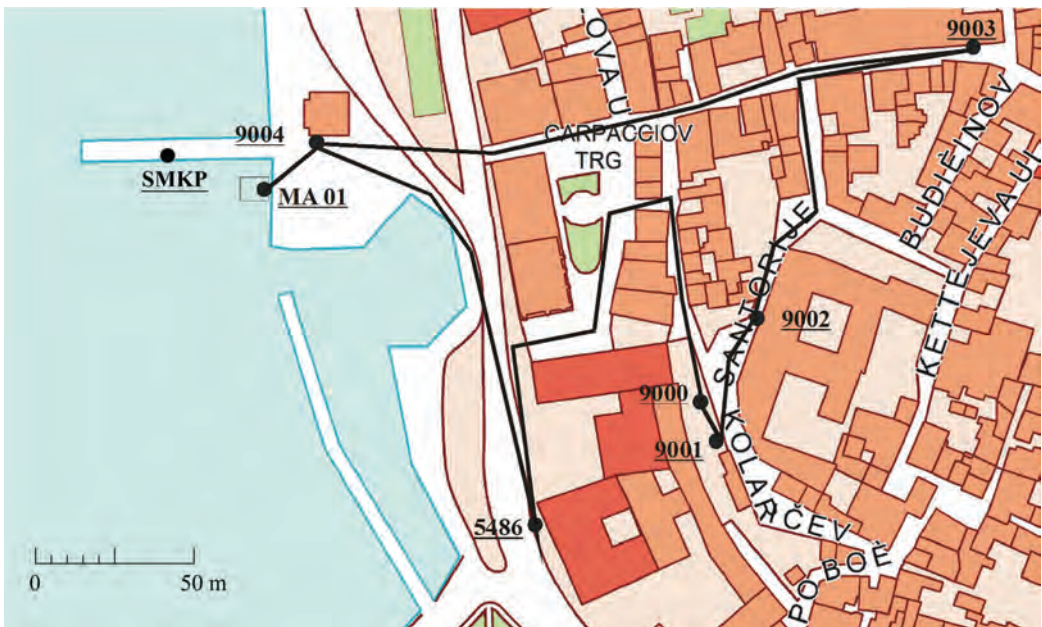
Stabilnost obale in mareografa torej lahko spremljamo na različne načine. Prve analize stabilnosti mareografov so bile izvedene na podlagi precizne nivelmanske izmere. V Veliki Britaniji nivelmansko izmero prva tri leta po postavitvi nove mareografske postaje izvajajo vsako leto in nato na dve leti oziroma redkeje, če se izkaže, da je območje mareografa stabilno. Po letu 1990 so nivelmansko izmero na mareografu v Newlynu nadomestili z absolutno gravimetrično izmero in izmero GNSS, ki jo izvajajo v trajanju petih dni. Vertikalni premiki znašajo $-0,7 \pm 0,2$ mm/leto. Z absolutnimi gravimetričnimi izmerami so dobili vrednost vertikalnih premikov $-1,1 \pm 0,8$ mm/leto (Bradshaw et al., 2016).

2 NIVELMANSKA MREŽA MP KOPER

V preteklosti so stabilnost številnih mareografov spremljali z večkratnimi izmerami nivelmanske mreže, v kateri so bili reperji oddaljeni manj kot 1,6 kilometra od mareografa. S tem so upoštevali priporočila, naj se vertikalni premiki spremljajo na območju 500 metrov od mareografa (Wöppelmann, Zerbini in Marcos, 2006). Nivelmansko mrežo MP Koper so stabilizirali za potrebe spremljanja stabilnosti starega mareografa, ki so ga postavili leta 1957 (Stopar et al., 2006). S povezavo MP Koper v nivelmansko mrežo smo pridobili:

- možnost nadzora nad kakovostjo posameznih izmer,
- možnost izravnave merjenih višinskih razlik,
- z merjenimi višinskimi razlikami, izravnanimi nadmorskimi višinami reperjev, ki jih dobimo s posamezno izmero in oceno natančnosti izmere višinskih razlik oziroma višin reperjev, pridobimo možnost kakovostne ocene stabilnosti reperjev oziroma morebitnih vertikalnih premikov.

Nivelmanska mreža naj bi bila ponovno izmerjena po preteku 1,5 leta oziroma vsako leto v daljšem obdobju od 10 do 20 let (Bevis, Scherer in Merrifield, 2002; Deo, Govind in El-Mowafy, 2013; Gill, Weston in Smith, 2015). Podobno kot tiste v Kopru številnih nivelmanskih mrež mareografov ne merijo tako pogosto. Nivelmanska mreža stare mareografske postaje Koper (slika 1) je bila prvič izmerjena leta 2001 v več delih, in sicer 14. 2., 28. 3. in 8. 10. 2001. Leta 2005 je bila v Kopru postavljena nova mareografska postaja, ki je bila vključena v izmero nivelmanske mreže MP Koper dvakrat leta 2006 (13. 1. in 21. 12.), po enkrat v letih 2010 (16. 2.) in 2013 (8. 4.) ter dvakrat leta 2015 (9. 2. in 15. 12.).

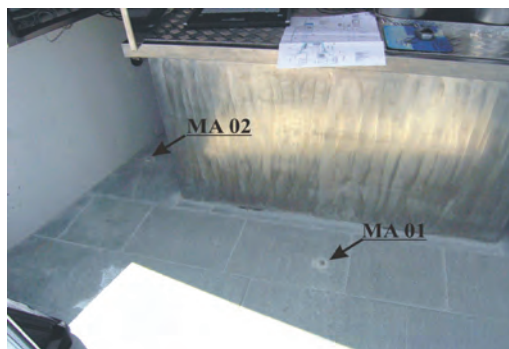


Slika 1: Skica nivelmanske mreže MP Koper (vir kartografske podlage: DPK–1000 GURS).

Nivelmansko mrežo MP Koper sestavljata dva reperja mestne nivelmanske mreže Koper (R11 in R24 oziroma 9003 in 9002 (preglednica 1)), reper 5486, ki je bil vključen v izmero II. NVN, in reper 3002, ki je predstavljal reper starega mareografa v Kopru. Reper 3002, ki je bil stabiliziran na stavbi ministrstva za infrastrukturo, Uprave Republike Slovenije za pomorstvo, je bil za izvedbo nivelmanske izmere vgrajen previsoko. Težavo smo odpravili tako, da smo konec decembra 2005 v njegovi neposredni bližini stabilizirali nov reper 9004 (slika 2).



Slika 2: Reper 3002, ki smo ga nadomestili z reperjem 9004.



Slika 3: Talni reper MA01, stabiliziran na MP Koper.

V nivelmansko mrežo MP Koper je vključen tudi reper MA01, ki je stabiliziran v talni betonski plošči objekta MP Koper (slika 3).

Ob postavitvi novega objekta MP Koper smo reperijske mreže MP Koper (slika 1) preštevilčili. Razlog je bil, da je navedena nivelmanska mreža eden od temeljev novega višinskega koordinatnega sestava Republike Slovenije. V preglednici 1 so zbrani podatki o novih in starih oznakah reperjev nivelmanske mreže MP Koper.

Preglednica 1: Stare in nove označbe reperjev nivelmanske mreže MP Koper.

Stara številka reperja	Nova številka reperja
3001	9001
3000	9000
R24	9002
R11	9003
Namesto 3002	9004

2.1 Ocena natančnosti izmer nivelmanske mreže MP Koper

Nivelmanska mreža MP Koper je bila izmerjena po pravilih za izmero nivelmanskih mrež visoke natančnosti. Za vse izmere nivelmanske mreže MP Koper smo izvedli a-priori in a-posteriori oceno natančnosti meritev (preglednica 2). A-priori ocena natančnosti je bila izvedena na podlagi odstopanj obojestransko niveliranih nivelmanskih linij in na podlagi odstopanj pri zapiranju nivelmanske zanke MP Koper. A-posteriori ocena natančnosti temelji na referenčni varianci, določeni na podlagi popravkov merjenih višinskih razlik po izravnavi proste mreže MP Koper.

Iz preglednice 2 vidimo, da znašajo odstopanja pri zapiranju nivelmanske zanke MP Koper (Δ) od $-0,27$ (5. izmera) do $0,51$ mm (0. izmera) in so vsa manjša od dovoljenega odstopanja (Δ_{dov}) za zapiranje nivelmanskih zank visoke natančnosti (RGU, 1981). Ocena natančnosti iz odstopanj obojestransko niveliranih nivelmanskih linij (σ_L) znaša od $0,14$ mm (5. izmera) do $0,44$ mm (0. izmera) in zapiranju nivelmanske zanke (σ_Z) od $0,01$ mm (2. izmera) do $0,56$ mm (0. izmera). A-posteriori ocena standardnega odklona ($\hat{\sigma}_0$) znaša od $0,01$ mm (2. izmera) do $0,55$ mm (0. izmera). A-posteriori standardni odklon je podobne velikosti kot odstopanja pri zapiranju nivelmanske zanke, saj znaša dolžina nivelmanske zanke okoli 860

m. Standardni odkloni določitve višine točke (σ_H) znašajo od 0,00 mm (2. izmera) do 0,16 mm (0. izmera). Na podlagi ocen natančnosti posameznih izmer lahko ugotovimo, da so dosežene natančnosti primerne za oceno natančnosti stabilnosti reperjev nivelmanske mreže MP Koper.

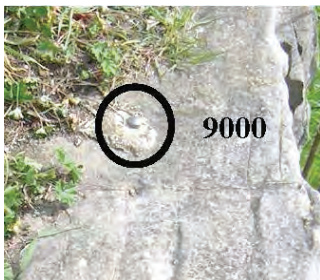
Preglednica 2: Odstopanje merjenih višinskih razlik v nivelmanski mreži in a-posteriori standardni odkloni posameznih izmer nivelmanske mreže MP Koper.

Datum izmere	Številka izmere [n]	Δ [mm]	Δ_{dov} [mm]	σ_L [mm]	σ_Z [mm]	$\hat{\sigma}_0$ [mm]	σ_H [mm]
14. 2., 28. 3. 8. 10. 2001	0	0,51	0,94	0,44	0,56	0,55	0,12–0,16
13. 1. 2006	1	0,15	0,94	0,32	0,12	0,17	0,04–0,05
21. 12. 2006	2	0,01	0,94	0,32	0,01	0,01	0,00–0,00
16. 2. 2010	3	-0,11	0,94	0,29	0,07	0,12	0,02–0,04
8. 4. 2013	4	-0,23	0,94	0,21	0,23	0,25	0,05–0,07
9. 2. 2015	5	-0,27	0,94	0,14	0,29	0,37	0,08–0,11

2.2 Analiza stabilnosti reperjev nivelmanske mreže MP Koper

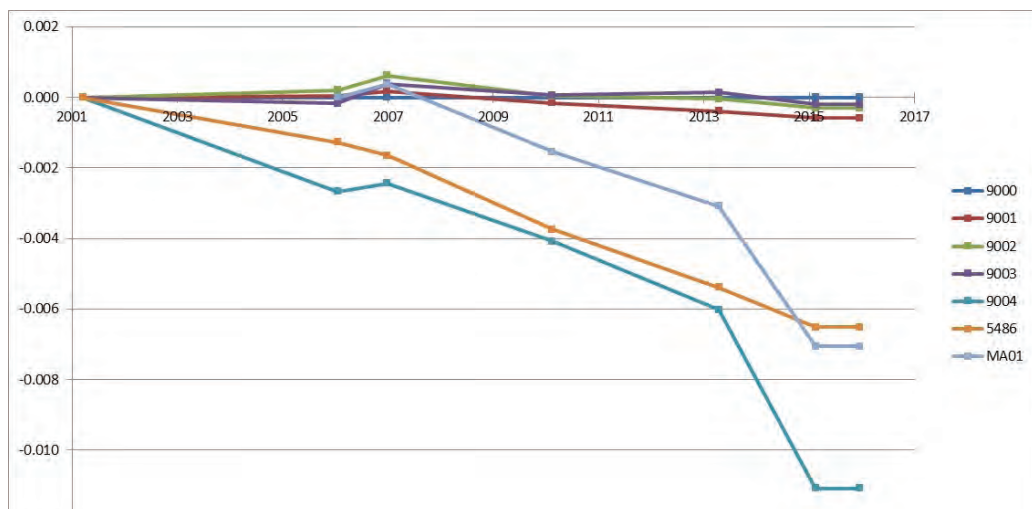
Z oceno hitrosti vertikalnih premikov relativno na stabilen reper so se ukvarjali v številnih študijah. Težava pa nastane, ko izbrani domnevno stabilni reper ni tudi dejansko stabilen. Takrat je pomembno, da najprej določimo stabilne reperje v nivelmanski mreži (Deo, Govind in El-Mowafy, 2013). Med izvedbo projekta *Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav* smo v okviru podprojekta *Razvoj geodetskega referenčnega sistema 2014* opravili analizo stabilnosti reperjev na podlagi razlik višin reperjev, ki jih pridobimo s prosto izravnavo nivelmanske mreže in razlik merjenih višinskih razlik med posameznimi reperji. Zaradi obsežnosti analize, ki je v celoti predstavljena v Stopar et al. (2015), v prispevku predstavljamo le končne rezultate.

Ugotovili smo, da so na objektih ali skali stabilizirani reperji, ki so na primarnem (nekdanjem) otoku, na katerem je stari del mesta Koper, stabilni (9000, 9001, 9002, 9003 – slika 1). Reperji, stabilizirani na objektih, ki stojijo na nasutem delu obale, niso stabilni (5486, 9004 in MA01 – slika 1). Z uporabo nivelmanskih meritev v vseh mogočih kombinacijah izračunov vertikalnih premikov smo največkrat ocenili kot stabilen reper 9000, ki smo ga zato tudi določili za novi reper mareografske postaje v Kopru (slika 4).



Slika 4: Reper MP Koper – 9000.

Z izravnnavami nivelmanske mreže MP Koper z navezavo na reper 9000 smo pridobili nadmorske višine reperjev v posamezni izmeri skupaj z oceno natančnosti določitve nadmorskih višin. V nadaljevanju smo nato ocenili vertikalne premike posameznih reperjev ter analizirali njihovo stabilnost (slika 5).



Slika 5: Vertikalni premiki reperjev v nivelmanski mreži MP Koper.

S slike 5 je razvidno, da med izmerama v letu 2015 ni zaznati vertikalnih premikov, zato smo v nadaljnjo analizo vključili le izmero, izvedeno 9. 2. 2015. Na sliki 5 lahko vidimo, da se je vertikalni premik reperjev 5486 in 9004 ter reperja MA01 od 3. izmere (2010) zelo povečal. Poleg tega se je na reperjih 9004 in MA01 vrednost vertikalnega premika med izmerama v letih 2013 in 2015 močno spremenila. Posledično sta tudi vektorja hitrosti posedanja teh reperjev relativno velika in znašata $-0,79$ mm/leto za reper 9004 in $-0,64$ mm/leto za reper MA01 (preglednica 3). Predvidevamo, da je ta sprememba hitrosti premikov teh dveh točk posledica urejanja obale v okolici MP Koper v letu 2013 in pred tem (slika 6). Če iz sprememb višin reperjev na sliki 5 izvzamemo veliko spremembo hitrosti premikov med letoma 2013 in 2015, ugotovimo, da se višine reperjev 5486, 9004 in MA01 spreminjajo linearno.



Slika 6: Urejanje Ukmarjevega trga v okolici MP Koper.

Višino poljubnega reperja v poljubnem trenutku t lahko obravnavamo kot linearno funkcijo, ki je predstavljena z višino točke v izbranem referenčnem trenutku s pripadajočim konstantnim vektorjem hitrosti spreminjanja višine. Obe količini (v_H in σ_{v_H}) lahko na podlagi ocenjenih višin v različnih terminskih izmerah določimo po metodi najmanjših kvadratov.

Preglednica 3: Vektorji hitrosti vertikalnih premikov za reperje nivelmanske mreže MP Koper glede na reper MP Koper 9000.

Reper	Vse izmere (6)				Brez zadnje izmere (5)			
	v_H [mm/leto]	σ_{v_H} [mm/leto]	Testna statistika Z	α_Z	v_H [mm/leto]	σ_{v_H} [mm/leto]	Testna statistika Z	α_Z
9001	- 0,05	0,02	2,50	1 %	- 0,03	0,01	3,00	0 %
9002	- 0,04	0,04	1,00	32 %	- 0,01	0,03	0,33	74 %
9003	- 0,02	0,06	0,33	74 %	0,01	0,05	0,20	84 %
9004	- 0,79	0,06	13,17	0 %	- 0,49	0,05	9,80	0 %
5486	- 0,49	0,06	8,17	0 %	- 0,46	0,05	9,20	0 %
MA01	- 0,64	0,07	9,14	0 %	- 0,46	0,06	7,67	0 %

Nadalje želimo ugotoviti, ali je izračunan vektor hitrosti statistično značilen, kar testiramo s stopnjo značilnosti $\alpha = 5 \%$. Testno statistiko določimo kot: Testna statistika je normalno porazdeljena in jo primerjamo s kritično vrednostjo $Z_{krit} = 1,96$. Če je izpolnjen pogoj, da je lahko trdimo, da je reper stabilen (Savšek-Safić et al., 2008). Iz preglednice 3 vidimo, da je reper 9001 nestabilen. Pri tem velja poudariti, da je reper 9001 od referenčnega reperja 9000 oddaljen približno 16 metrov, zato je natančnost določitve njegove višine in s tem tudi vektorja hitrosti izredno visoka. Realno gledano, vektorja s premikom - 0,03 mm/leto, kljub drugačnemu izidu statističnega testa, ne moremo sprejeti za statistično značilnega.

3 SPREMLJANJE STABILNOSTI MAREOGRAFA Z GNSS

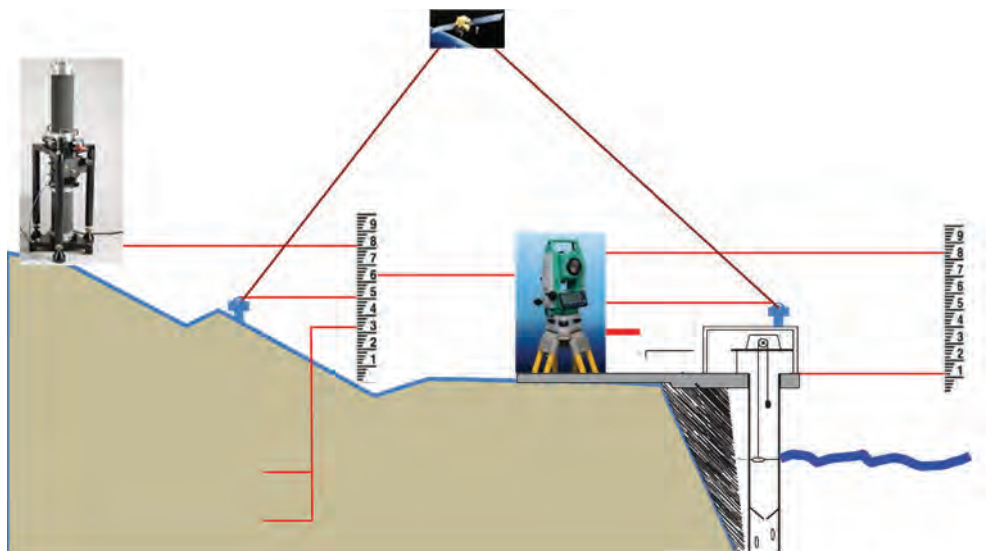
Določitev nivoja morske gladine v globalnem terestričnem koordinatnem sistemu ITRS (International Terrestrial Reference System) s satelitsko altimetrijo obravnavamo kot določitev absolutnega nivoja morske gladine. Vertikalni premik obale, morskega dna oziroma splošno litosfere, ki ga določimo v globalnem koordinatnem sistemu ITRS, obravnavamo kot absolutni vertikalni premik zemeljske skorje. Ker z mareografi spremljamo relativni nivo morja, moramo za določitev absolutnega spreminjanja nivoja morja poznati absolutni vertikalni premik mareografa in ga izločiti iz niza mareografskih opazovanj. Če spremljamo stabilnost mareografa z GNSS in nivelmansko izmero, lahko preračunamo relativni nivo morja v absolutnega in nasprotno (Bevis, Scherer in Merrifield, 2002). Po Janssensu et al. (2013) je povzeta preglednica 4, kjer terestrične metode geodetske izmere primerjamo z izmero GNSS.

Osnovni namen izvajanja izmer GNSS na mareografskih postajah je določiti položaj mareografske postaje in predvsem spremljati vertikalno stabilnost mareografske postaje in morskega dna v globalnem referenčnem koordinatnem sistemu, kot je na primer ITRS (Bevis, Scherer in Merrifield, 2002; Wöppelmann, Zerbini in Marcos., 2006; Tervo, Poutanen in Koivula, 2007). Sprejemnik GNSS je najbolje stabilizirati na mareografski postaji tako, da lahko njegove vertikalne premike povežemo z vertikalnimi premiki mareografske postaje oziroma mareografa. Če je sprejemnik GNSS nameščen v bližini mare-

ografa, moramo referenčno točko GNSS vključiti v nivelmansko mrežo mareografa (slika 7). Ker so v preteklosti stabilnost mareografa spremljali z izmero nivelmanske mreže, je treba na izhodiščnem reperju oziroma reperju mareografa izvesti statično izmero GNSS, ki omogoča določitev absolutne stabilnosti reperja v globalnem koordinatnem sistemu. Izmero izvedemo na tri do pet let, odvisno od stabilnosti lokacije (Australian Government, 2017; Gill, Weston in Smith, 2015).

Preglednica 4: Primerjava terestričnih geodetskih metod izmere z izmero GNSS za določitev vertikalnih premikov

Naloga/operacija	Terestrične metode	GNSS
Monitoring	periodičen/občasen	kontinuiran
Referenčni okvir	lokalni	globalni
Vertikalni premiki	relativni	absolutni
Podatki	interni/obdelani lokalno	deljeni/posredovani/ neodvisna obdelava
Točnost	v splošnem fiksna	izboljšuje se s časom/algoritmi
Natančnost	odvisna od metode izmere	homogena
Arhiviranje podatkov	ročno in centralizirano	avtomatsko in razpršeno
Delovna intenzivnost/izid	intenzivna/določen in omejen	avtomatizirano/več uporabnikov z različnim izidom
Opozorjanje	ni mogoče	skoraj v realnem času



Slika 7: Skica mareografske postaje in geodetskih točk, ki so povezane z izmero mareografske postaje (vir: D. Pugh, P. Woodworth, sea-level science, Cambridge University Press, 2014).

Ker želimo ločiti spreminjanje nivoja morja, ki ga spremljamo z mareografi, in vertikalne premike mareografa, so številne mareografske postaje opremljene s stalno delujočimi sprejemniki GNSS, ki so nameščeni

na mareografski postaji ali v njeni bližini (Hannah, 2010). V bližini mareografov so bile prve stalno delujoče postaje GNSS (GPS) postavljene leta 1994. Leta 1997 so v Pasadeni izvedli prvo delavnico na temo povezovanja opazovanj GNSS z vertikalnimi premiki mareografa (Schöne, Schön in Thaller, 2009). Kasneje so ugotovili, da so za kakovostno določitev vertikalnih premikov zelo pomembna jasna navodila v zvezi s postavitvijo stalno delujočih postaj na mareografu ali v njegovi bližini ter enolična obdelava opazovanj GNSS. Tako so v okviru IGS (angl. *International GNSS Service*) in GLOSS-a (*The Global Sea Level Observing System*) leta 2001 začeli izvajati projekt TIGA (angl. IGS – *Tide Gauge Benchmark Monitoring Pilot Project*), v katerega sta vključena 102 mareografa. Osnovni cilj je obdelava opazovanj GNSS, da bi določili vertikalne premike z visoko natančnostjo (Wöppelmann, Zerbini in Marco, 2006; Schöne, Schön in Thaller, 2009; Dawidowicz, 2014).

Seveda je pomembno, da z izmero GNSS določimo višino mareografa z ustrezno natančnostjo. Določitev višine mareografa z natančnostjo enega centimetra glede na dobro določen globalni koordinatni sistem je kar precejšen izziv, ki pa je rešljiv z obdelavo nekajletnega niza neprekinjenih opazovanj GNSS. Velika težava je določitev hitrosti premika mareografa z natančnostjo 1 mm/leto, tudi če imamo na voljo večdesetletni niz opazovanj GNSS. Težava so tudi lokalno nestabilne mareografske postaje, saj je vertikalni premik lahko posledica lokalne nestabilnosti površinskih plasti zemeljske skorje, na katerih je postavljen/zgrajen mareograf. Znano je, da se pomoli posedajo, in ti lokalni premiki običajno niso povezani z nestabilnostjo litosfere. Takrat je smiselno stalno delujoče postaje GNSS postaviti v bližini mareografov, na območja, kjer so vertikalni premiki povezani s premiki litosfere (Bevis, Scherer in Merrifield, 2002; Wöppelmann, Zerbini in Marcos et al., 2006; Buble, Bennett in Hreisdóttir, 2010; Deo, Govind in El-Mowafy, 2013; Dawidowicz, 2014). Pomembno je tudi, da je referenčna točka GNSS povezana z nivelmansko mrežo mareografa z ustrezno natančno geodetsko izmero (Bevis, Scherer in Merrifield, 2002).

3.1 Vertikalni premiki mareografov, določeni na podlagi opazovanj GNSS

Z GNSS-določitvijo vertikalnih premikov mareografov so se ukvarjali številni avtorji. Tako so Santamaría-Gómez, Bouin in Wöppelmann (2012) obdelali opazovanja od januarja 1996 do decembra 2008 na 316 postajah GNSS, ki so nameščene na mareografskih postajah. Opazovanja GNSS so obdelali s programoma ULR3 in ULR4, ki so ju razvili na Univerzi La Rochelle (ULR). Primerjava izračunanih hitrosti vertikalnih premikov na 170 GNSS-postajah, ki so imele vsaj 4,5-letni niz opazovanj, obdelanih z obema programoma, je pokazala, da so razlike v izračunanih hitrostih vertikalnih premikov večinoma manjše od $1,0 \pm 0,8$ mm/leto, njihova srednja vrednost pa je $0,16 \pm 0,06$ mm/leto. Razlike so bile manjše od natančnosti takrat aktualnega globalnega koordinatnega sestava ITRF2005.

3.2 Stabilnost MP Koper

Stalno delujoča GNSS-postaja KOPE je bila vzpostavljena leta 2005 in jo upravlja Služba za GNSS Geodetskega inštituta Republike Slovenije (<http://www.gu-signal.si/>, Stopar et al., 2006). Med pisanjem prispevka je opremljena s sprejemnikom GNSS Leica GR25 in anteno Leica AR20 LEIM (<http://www.gu-signal.si/log>). Točka je stabilizirana in opremljena po priporočilih za vzpostavitev stalno delujočih postaj GNSS ter locirana na samem objektu MP Koper (slika 8). Je del slovenskega državnega omrežja stalno delujočih GNSS-postaj SIGNAL in tudi del na novo vzpostavljene državne geodetske mreže 0. reda (Stopar et al., 2015).



Slika 8: Stalna GNSS-postaja KOPE na MP Koper.

Vertikalne premike stalno delujoče GNSS-postaje KOPE smo določili v sklopu obdelave opazovanj postaj omrežja SIGNAL. V obdelavo smo vzeli vse takrat razpoložljive podatke omrežja SIGNAL, in sicer do leta 2010. Za GNSS-postajo KOPE smo imeli na voljo podatke od sredine leta 2006 do začetka 2010, torej za tri leta in pol. Obdelavo smo izvedli na dva načina, s programskim paketom *Bernese GNSS Software*, ki deluje na osnovi dvojnih faznih razlik, in s programskim paketom lastne obdelave gPPP, ki deluje po metodi Precise Point Positioning (PPP). Rezultat so bile časovne vrste prostorskih koordinat vseh postaj, s katerih je bilo mogoče izračunati vektorje hitrosti in tako pridobiti tudi vertikalne premike postaj (Sterle, 2015). Za točko KOPE smo dobili vrednosti $-1,6$ mm/leto z metodo PPP oziroma $0,2$ mm/leto s programskim paketom *Bernese GNSS Software*. Za točko SMKP državne geodetske mreže 0. reda Slovenije (slika 1), ki je stabilizirana na mednarodnem pomolu v bližini MP Koper in je bila vključena v posamezne GNSS-izmere, je vektor hitrosti vertikalnega premika $-0,2$ mm/leto. Pri tem je treba poudariti, da opazovanja GNSS trenutno podajo natančnost višinske komponente vektorja hitrosti z nekaj mm/leto, čemur ustrezajo tudi razpršene vrednosti iz preglednice 5. Vektorji hitrosti vertikalnih premikov, določeni na podlagi opazovanj GNSS, so v primerjavi s pripadajočo natančnostjo relativno majhni, zato jih nikakor ne moremo opredeliti drugače, kot da niso statistično značilni.

Rezultate vertikalne stabilnosti MP Koper smo primerjali z rezultati podobnih analiz, ki so jih na podlagi stalno delujočih postaj GNSS, postavljenih v bližini mareografskih postaj ob jadranski obali ali na njih

pridobili drugi avtorji (preglednica 5). V preglednici 5 lahko vidimo, da izračunane vrednosti hitrosti vertikalnih premikov na vzhodni jadranski obali znašajo od -3,4 mm/leto (Trst 0) do 0,0 mm/leto (Trst), čeprav izračuni med seboj niso povsem enakovredni.

Preglednica 5: Vektorji hitrosti vertikalnih premikov za stalno delujoče postaje na mareografih ali v njihovi bližini vzdolž jadranske obale

GNSS-točka	$V_{\Delta H}$ [mm/leto]	Vir podatkov
Koper (oznaka KOPE)	-1,6	izračun z metodo PPP (obdobje 2006–2010; Sterle, 2015)
	0,2	izračun s programskim paketom <i>Bernese GNSS Software</i> (isti podatki kot PPP; Sterle, 2015)
SMKP	-0,2	izračun s programskim paketom <i>Bernese GNSS Software</i> (Marjanović, 2009)
	0,1	izračun s programskim paketom <i>Bernese GNSS Software</i> (isti podatki kot PPP; Sterle, 2015)
Trst	0,0	ITRF2000 (FReDNet, 2017)
	-2,5	ETRF (FReDNet 2017)
Trst 0	-1,5	ITRF2000 (FReDNet, 2017)
	-3,4	ETRF (FReDNet, 2017)
Poreč	-0,5	ETRF2000 (EPN, 2017)
Zadar	-0,4	ETRF2000 (EPN, 2017)
Zadar	-1,0	izračun s programskim paketom <i>Bernese GNSS Software</i> (Marjanović, 2009)
Dubrovnik 2	-2,0	ETRF2000 (EPN, 2017)
Dubrovnik	-1,8	izračun s programskim paketom <i>Bernese GNSS Software</i> (Marjanović, 2009)
Mareograf Dubrovnik	-1,2	izračun s programskim paketom <i>Bernese GNSS Software</i> (Marjanović, 2009)
Rovinj	-0,4	izračun s programskim paketom <i>Bernese GNSS Software</i> (Marjanović, 2009)
Split	-2,1	izračun s programskim paketom <i>Bernese GNSS Software</i> (Marjanović, 2009)

Buble, Bennett in Hreisdóttir (2010) navajajo, da posamezni izostatični modeli za vzhodno jadransko obalo kažejo na posredanja s hitrostjo 0,3–0,5 mm/leto. Hkrati obstajajo raziskave, ki kažejo na dvig vzhodne jadranske obale od 0,2–0,3 mm/leto. Na podlagi obdelave GNSS-opazovanj v ITRF2005 so določili hitrosti vertikalnih premikov mareografov v Trstu $1,5 \pm 0,2$ mm/leto, Splitu $0,4 \pm 0,3$ mm/leto ter Dubrovniku $0,2 \pm 0,1$ mm/leto (Buble, Bennett in Hreisdóttir, 2010). Razlike so posledica različnih načinov obdelave podatkov in različnih kriterijev pri ocenjevanju kakovosti podatkov, na podlagi katerih so izračunani vertikalni premiki, določeni z GNSS. Vilibić et al. (2005) navajajo, da znaša hitrost vertikalnih premikov ob jadranski obali okoli 1 mm/leto, vendar je odvisna od posamezne lokacije. Na podlagi 3,5-letnega niza neprekinjenih opazovanj GNSS so na mareografu v Benetkah določili vektor premika

-2,77±0,70 mm/leto. Opozoriti je treba, da tako kratek niz opazovanj GNSS ne zadošča za kakovostno in zanesljivo določitev linearnega trenda vertikalnih premikov (Wöppelmann, Zerbini in Marcos, 2006).

4 SKLEP

Z mareografi spremljamo spreminjanje nivoja morja, vendar so v mareografska opazovanja zajeti tudi vertikalni premiki mareografa. To je posledica dejstva, da so mareografi običajno postavljeni na pomolih/obali, ki niso stabilni. Prvi mareograf je bil v Kopru postavljen leta 1957. Leta 2001 je bila na območju starega mareografa Koper vzpostavljena nivelmanska mreža z namenom spremljanja njegove stabilnosti. Leta 2005 je bila v Kopru zgrajena nova mareografska postaja, ki je bila z reperjem MA01 vključena v nivelmansko mrežo MP Koper. Nivelmanska mreža MP Koper je bila prvič izmerjena leta 2001, dvakrat leta 2006, enkrat leta 2011, enkrat leta 2013 in dvakrat leta 2015. Stabilnost reperjev smo določili na podlagi merjenih višinskih razlik in višin reperjev, izračunanih s prosto izravnavo nivelmanske mreže. Z analizo smo ugotovili, da so reperji 9000, 9001, 9002 in 9003, ki so stabilizirani na območju primarnega otoka, na katerem stoji staro mestno jedro Kopra, stabilni. Reperji ob obali 5486, 9004 in MA01 so nestabilni, saj so stabilizirani na objektih, temeljenih na nasutem delu obale, ki ni stabilen. Vektorji vertikalnih premikov so določeni relativno glede na reper MP Koper z oznako 9000.

MP Koper je opremljena tudi s stalno GNSS-postajo KOPE, ki je del slovenskega državnega omrežja stalno delujočih GNSS-postaj SIGNAL. Z vzpostavitvijo mreže 0. reda je postaja KOPE tudi del te mreže, enako velja za točko SMK P državne geodetske mreže 0. reda Slovenije, ki je stabilizirana na mednarodnem pomolu v bližini MP Koper. Z mareografskimi opazovanji in določeno hitrostjo vertikalnega premikanja na podlagi opazovanj GNSS v globalnem referenčnem sistemu lahko določimo tudi absolutno spreminjanje nivoja morja, vendar potrebujemo daljši niz opazovanj, zato naša rezultata nista statistično značilna, saj opazovanja GNSS trenutno omogočajo določitev vertikalne komponente hitrosti s stopnjo natančnosti nekaj milimetrov na leto.

Zahvala

Del prispevka je nastal na podlagi rezultatov projektov *Vzpostavlanje evropskega referenčnega sistema v Sloveniji* ter *Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav*, ki sta bila podprta s finančnim mehanizmom EGP, sredstvi Geodetske uprave Republike Slovenije ter raziskovalnega programa ARRS P2-0227 *Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije*.

Literatura in viri:

- Australian Government (2017). Geoscience Australia, Levelling connections between GNSS sites and tide gauges. <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/gnss-networks/levelling-connections-between-gnss-sites-and-tide-gauges>, pridobljeno 12. 4. 2017.
- Bevis, M., Scherer, W., Merrifield, M. (2002). Technical issues and recommendations related to the installation of continuous GPS stations at tide gauges. *Marine Geodesy*, 25, 87–99. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/014904102753516750>
- Blewitt, G., Altamimi, Z., Davis, J., Gross, R., Kuo, C., Lemoine, F., Neilan, R., Plag, H. P., Rothacher, M., Shum, C. K., Sideris, M. G., Schöne, T., Tregoning, P., Zerbini, S. (2010). Geodetic observations and global reference frame contributions to understanding sea-level rise and variability. V: J. A. Church, P. L. Woodworth, T. Aarup, W. S. Wilson (ur.). *Understanding sea-level rise and variability*, str. 256–284. London, UK: Wiley-Blackwell. http://www.mari-odu.org/people/hpplag/pubs/2006_blewitt_etal_WCRP_Paris.pdf, pridobljeno 11. 5. 2017.
- Bradshaw, E., Woodworth, P. L., Hibbert, A., Bradley, L. J., Pugh, D. T., Fane, C., Bingley, R. M. (2016). A Century of Sea Level Measurements at Newlyn, Southwest England. *Marine Geodesy*, 39 (2), 115–140. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2015.1121175>

- Buble, G., Bennett, R. A., Hreisdóttir, S. (2010). Tide gauge and GPS measurements of crustal motion and sea level rise along the eastern margin of Adria. *Journal of Geophysical research*, 115, 1–13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2008JB006155>
- Dawidowicz, K. (2014). Sea level changes monitoring using GNSS technology – a review of recent efforts. *Acta Adriatica*, 55 (2), 145–162. <http://hrcak.srce.hr/file/199292>, pridobljeno 17. 4. 2017.
- Deo, M. N., Govind, R., El-Mowafy, A. (2013). The Stability of Tide Gauges in the South Pacific Determined from Multiepoch Geodetic Levelling, 1992 to 2010. *Marine Geodesy*, 36, 261–284. DOI: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01490419.2013.786003>
- EPN 2017. Spletna stran: http://www.epncb.oma.be/_productsservices/coordinates/, pridobljeno 7. 8. 2017.
- FReDNet 2017. Spletna stran: <http://frednet.crs.inogs.it/EnglishSite/XFReDNetHomeENG.htm>, pridobljeno 7. 8. 2017.
- Gill, S., Weston, N., Smith, D. (2015). NOAA Guidance Document for Determination of Vertical Land Motion at Water Level Stations Using GPS Technology. NOAA Technical Report NOS 139, Silver Spring, Maryland. https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/NOS_Tech_report_139.pdf, pridobljeno 23. 5. 2017.
- Han, G., Ma, Z., Chen, N., Yang, J., Chen, N. (2015). Coastal sea level projections with improved accounting for vertical land motion. *Scientific Reports*, 5, 1–5. <https://www.nature.com/articles/srep16085>, pridobljeno: 16. 5. 2017.
- Hannah, J. (2010). The Difficulties in Using Tide Gauges to Monitor Long-Term Sea Level Change. https://www.fig.net/resources/monthly_articles/2010/july_2010/july_2010_hannah.pdf, pridobljeno 10. 12. 2016.
- Janssen, V., Commins, R., Watson, P., McElroy, S. (2013). Using GNSS CORS to Augment Long-Term Tide Gauge Observations in NSW. Proceedings of the Surveying and Spatial Sciences Conference, 15–19 April, Canberra, Australia. http://eprints.utas.edu.au/16394/1/2013_Janssen_etal_SSSC2013_proceedings_version.pdf, pridobljeno 10. 5. 2017.
- UNESCO (2002). UNESCO, IOC-Intergovernmental Oceanographic Commission (2002): Manuals and Guides 14: Manual on Sea level Measurement and Interpretation – Volume III – Reappraisals and Recommendations as of the year 2000. <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001251/125129e.pdf>, pridobljeno 25. 5. 2017.
- Marjanović, M. (2009). Primjena GPS mjerenja za određivanje horizontalnih i vertikalnih pomaka Jadranske mikroplače. Doktorska disertacija. Zagreb, Hrvatska, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet.
- Meysignac, B., Cazenave, A. (2012) Sea level: a review of present-day and recent-past changes and variability. *Journal of Geodynamics*, 58, 96–109. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2012.03.005>
- Republiška geodetska uprava (RGU) (1981). Pravilnik o tehničnih normativih za mreže temeljnih geodetskih točk.
- Santamaría-Gómez, A., Bouin, M.-N., Wöppelmann, G. (2012). Improved GPS Data Analysis Strategy for Tide Gauge Benchmark Monitoring. V: S. Kenyon et al. (ur.), *Geodesy for Planet Earth* (str. 11–18), International Association of Geodesy Symposia 136. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20338-1_2
- Savšek-Safić, S., Ambrožič, T., Stopar, B., Kogoj, D. (2008). Local stability monitoring of the Koper tide gauge Station. *AVN*, 115 (6), 210–216.
- Schöne, T., Schön, N., Thaller, D. (2009). IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Pilot Project (TIGA): scientific benefits. *Journal of Geodesy*, 83, 249–261. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-008-0269-y>
- Sterle, O. (2015). Časovno odvisne geodetske mreže in koordinatni sistemi. Doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Stopar, B., Koler, B., Kogoj, D., Sterle, O., Ambrožič, T., Savšek-Safić, S., Kuhar, M., Radovan, D. (2006). Geodetska dela na novi mareografski postaji Koper. *Geodetski vestnik*, 50 (4), 609–619. http://www.geodetski-vestnik.com/50/4/gv50-4_609-619.pdf, pridobljeno 25. 5. 2015.
- Stopar, B., Koler, B., Kogoj, D., Ambrožič, T., Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Kregar, K., Štebe, G., Urbančič, T., Goršič, J., Mencin, A., Berk, S., Bajec, K., Mesner, N., Fabiani, N., Caserman, M., Bric, V., Triglav Čekada, M., Karničnik, I., Janežič, M., Oven, K. (2015). Razvoj geodetskega referenčnega sistema 2015 – Zaključni elaborat, Univerza v Ljubljani fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Geodetski inštitut Slovenije.
- Tamisiea, M. E., Hughes, C. W., Williams, S. D. P., Bingley, R. M. (2014). Sea level: measuring the bounding surfaces of the ocean. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 372, 1–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2013.0336>
- Tervo, M., Poutanen, M., Koivula, H. (2007). Tide gauge monitoring using GPS. V: P. Tregoning (ur.), C. Rios (ur.), *Dynamic Planet-Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools*. IAG Symposium-Volume 130 (str. 75–79). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-49350-1_13#page-3, pridobljeno 26. 5. 2017.
- Vilibić, I., Orlić, M., Čupić, S., Domijan, N., Leder, N., Mihanović, H., Pasarić, M., Pasarić, Z., Srdelić, M., Strinić, G. (2005). A new approach to sea level observations in Croatia. *Geofizika*, 22, 21–57. http://hrcak.srce.hr/index.php?id_clanak_jezik=256&show=clanak, pridobljeno 25. 5. 2017.
- Wöppelmann, G., Zerbini, S., Marcos, M. (2006). Tide gauges and Geodesy: a secular synergy illustrated by three present-day case studies. *C. R. Geoscience*, 338, 980–991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.07.006>
- Zervas, C., Gill, S., Sweet, W. (2013). Estimating Vertical Land Motion from Long-Term Tide Gauge Records. Technical Report NOS CO-OPS 065. noaa National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, National Ocean Service, Center for Operational Oceanographic Products and Services. https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Technical_Report_NOS_CO-OPS_065.pdf, pridobljeno 3. 3. 2017.



Sterle O., Kuhar M., Stopar B., Pavlovčič Prešeren P., Urbančič T., Koler B. (2017). Ocena vertikalne stabilnosti mareografske postaje Koper. Geodetski vestnik, 61 (4), 527-540. DOI: 10.15292//geodetski-vestnik.2017.04.527-540

Asist. dr. Oskar Sterle, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: Oskar.Sterle@fgg.uni-lj.si

Doc. dr. Miran Kuhar, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: Miran.Kuhar@fgg.uni-lj.si

Prof. dr. Bojan Stopar, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: Bojan.Stopar@fgg.uni-lj.si

Doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: Polona.Pavlovcic@fgg.uni-lj.si

Asist. dr. Tilen Urbančič, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: Tilen.Urbancic@fgg.uni-lj.si

Doc. dr. Božo Koler, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: Bozo.Koler@fgg.uni-lj.si