

# Geodetska navezava mareografske postaje Koper

B. Stopar\*, B. Koler, D. Kogoj, O. Sterle, T. Ambrožič, S. Savšek-Safić, M. Kuhar, D. Radovan\*\*

## Povzetek

V Kopru je bila pod okriljem Agencije Republike Slovenije za okolje vzpostavljena nova, sodobna mareografska postaja. V prispevku predstavljamo geodetska dela, potrebna za kakovostno določitev lege mareografske postaje v terestričnem koordinatnem sistemu, ki so se izvajala v času poskusnega delovanja postaje od konca leta 2005 do začetka leta 2006.

## Uvod

Agencija RS za okolje – ARSO je v okviru evropskega projekta FP5 ESEAS–RI (Framework Programme 5 European Sea Level Service – Research Infrastructure) in nacionalnega projekta posodobitve hidrološke mreže prenovila in nadgradila mareografsko postajo Koper. Triletni projekt FP5 ESEAS–RI se je začel novembra 2002 z namenom vzpostavitve in razvoja infrastrukture Evropske službe za spremljanje višin morja. Namen projekta je vzpostavitev infrastrukture za izvajanje sodobnih standardiziranih mareografskih in drugih opazovanj v okviru Evropske službe za spremljanje višine morja ESEAS.

V zadnjih desetletjih so se pojavile nove tehnologije za spremljanje nivoja morske gladine. Z geodetskega stališča so pri tem pomembni satelitski navigacijski sistemi GNSS (Global Satellite Navigation System) in kakovostni gravimetrični instrumenti. Uporaba opazovanj v GNSS omogoča določitev lege referenčne točke mareografske postaje ter povezavo opazovanj nivoja morja s terestričnim referenčnim sistemom. Neprekinjena ali ponavljajoča se GNSS- opazovanja omogočajo tudi določitev premikov antene GNSS- sprejemnika (posledično kopnega) kar omogoča ločitev premikov mareografske postaje in opazovanj sprememb nivoja morja. Tako lahko pridobimo »pravi« nivo morja kot funkcijo časa. Z meritvami sprememb težnosti v okolici mareografske postaje pa lahko povsem neodvisno določimo iste višinske premike kopnega.

V Kopru je bila tako konec leta 2005 postavljena nova mareografska postaja (v nadaljnjem besedilu: MP), ki ustreza mednarodnim standardom in zahtevam za registracijo in dolgoročno spremljanje nivoja morja. Postavljena je na Ukmarjevemu trgu, kjer je več desetletij stal stari mareograf. Da ne bi izgubili dolgoletnega neprekinjenega niza opazovanj, ki so bila pridobljena s starim mareografom, smo zagotoviti ustrezno povezavo starega mareografa in nove MP. Ker smo iz raziskav višinske stabilnosti starega mareografa vedeli, da je območje, na katerem je postavljeno nestabilno, je, za zagotovitev čim boljše lokalne stabilnosti, temeljenje objekta nove MP izvedeno s pomočjo pilotov. MP je opremljena s permanentno GPS-postajo, ki je vključena v slovensko omrežje GPS-

---

\* izr.prof.dr.Bojan Stopar, univ.dipl.inž.geod., doc.dr.Božo Koler, univ.dipl.inž.geod.,izr.prof.dr.Dušan Kogoj, univ.dipl.inž.geod., Oskar Sterle, univ.dipl.inž.geod., doc.dr.Tomaž Ambrožič, univ.dipl.inž.geod., asist.dr. Simona Savšek Safić, univ.dipl.inž.geod., doc.dr.Miran Kuhar, univ.dipl.inž.geod., vsi UL - Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

\*\* mag.Dalibor Radovan, univ.dipl.inž.geod., Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, 1000 Ljubljana

postaj SIGNAL, MP pa je vključena tudi v državni višinski sistem. Objekt nove MP je prikazan na Sliki 1.



Slika 1 - Objekt nove MP v Kopru

### **Zahteve IOC za geodetsko izmero MP**

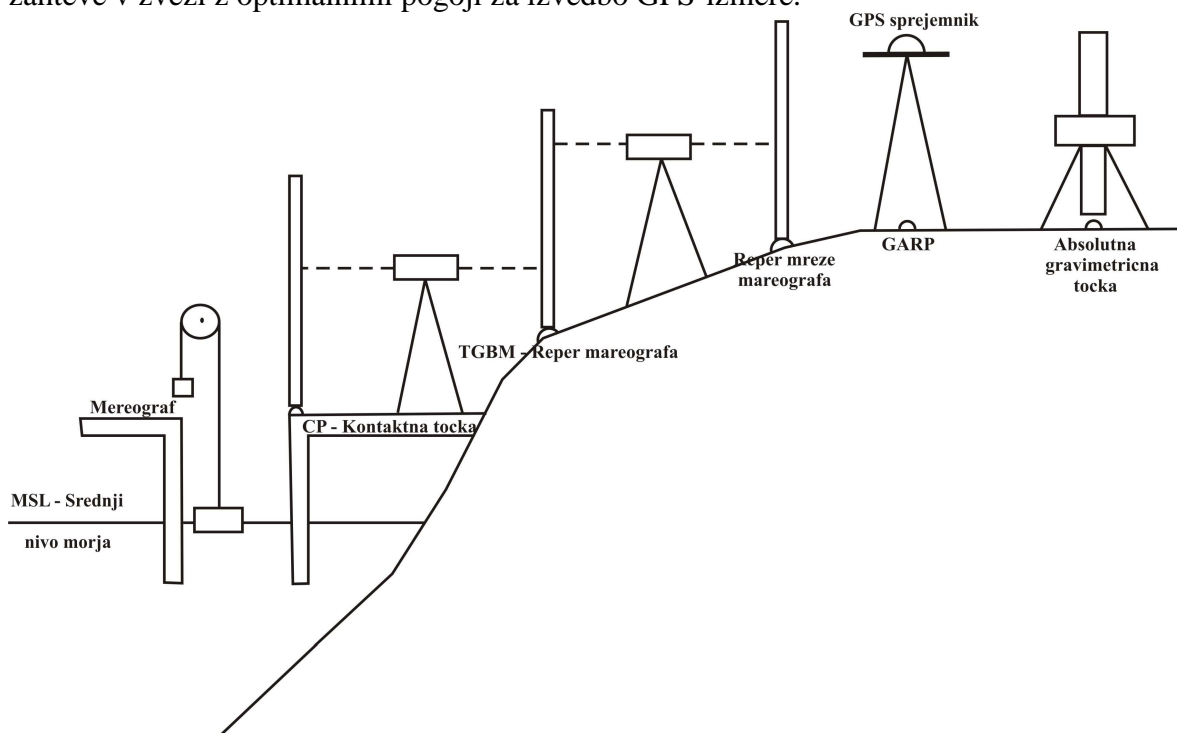
K spremljanju klimatskih sprememb, ki smo jim priča v zadnjih desetletjih, globalnega ogrevanja ozračja ter posledičnega dvigovanja nivoja svetovnih morij lahko v veliki meri prispevajo kakovostni in enotno pridobljeni podatki o globalni razporeditvi nivoja morske gladine. V zadnjem desetletju se tako nove MP praviloma vzpostavljajo po priporočilih medvladne oceanografske komisije IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) (Manual on Sea level Measurement and Interpretation, 1985, 1994, 2002). Med drugimi priporočili IOC je posebej pomembna nedvoumna in kakovostna povezava opazovanj nivoja morja s terestričnimi koordinatnimi sistemi. To je naloga, ki zahteva kakovostno geodetsko izmero karakterističnih točk MP. Z geodetskega stališča so pri MP tako pomembne tri točke (Slika 2):

**Kontaktna točka mareografske postaje** (CP – Contact Point) je reper oziroma ustrezna višinska točka, na katero je možno navezati mareografska opazovanja. Kontaktna točka MP (CP) je povezana z reperjem MP (TGBM).

**Reper mareografske postaje** (TGBM – Tide Gauge Bench Mark) je najpomembnejši reper, ki predstavlja izhodišče za višinsko navezavo mareografskih opazovanj oziroma predstavlja višinski datum mareografskih opazovanj. Po priporočilih IOC je priporočljivo v bližini MP stabilizirati vsaj še štiri reperi, ki so povezani z reperjem MP (TGBM). Tako

imamo možnost, da lahko za višinsko izhodišče izberemo tudi drugi reper, če se reper MP (TGBM) uniči. Za reper MP izberemo najstabilnejšega izmed štirih reperjev. Reper MP (TGBM) predstavlja fundamentalno točko, katere položaj je določen v terestričnem koordinatnem sistemu z GPS-izmero in na katero so navezana vsa mareografska opazovanja.

**Referenčna točka GPS-antene** (GARP – GPS Antenna Reference Point) je geodetska točka, ki izpolnjuje zahteve geodetske točke najvišje kakovosti, glede stabilnosti, trajnosti, dokumentacije v zvezi z izmerami in glede dostopnosti. Poleg tega mora izpolnjevati vse zahteve v zvezi z optimalnimi pogoji za izvedbo GPS-izmere.



Slika 2 - Shema MP in karakterističnih geodetskih točk (Vir: Manual on Sea level Measurement and Interpretation, 1994, 2002)

Po priporočilih IOC je potrebno, kadar je to mogoče, anteno GPS-sprejemnika postaviti neposredno na samo MP, tako da sta kontaktna točka MP in GPS-antena stabilizirani na istem objektu. Signal GPS-satelitov naj bi bilo možno sprejemati v čim večjem prostorskem kotu, kakršne koli ovire sprejemanja signala naj bi segle do višinskega kota  $15^\circ$  nad horizontom. Območje mora biti ugodno s stališča pojava večpotja in možnih sevanj radarjev in podobnih naprav. Antena mora biti prisilno centrirana, možni premiki položaja stabilizirane antene so lahko velikosti 0.1 mm. Antena mora biti ena izmed kakovostnih anten, ki zagotavlja čim bolj stabilen položaj faznega centra in čim večjo odpornost na moteče signale in pojav večpotja. GPS-oprema mora tako zagotoviti neprestan sprejem in registracijo GPS-signala. Priporočljivo je, da je GPS-točka na MP vključena v omrežje več permanentnih postaj, katerim se skupaj določa položaj čim bolj pogosto. Za lokalno stabilnost območja MP (nekaj kilometrov) je potrebno s ponavljajočimi se opazovanji (terestričnimi in GPS) opazovati kontrolne točke v bližini MP. Položaj GPS antene MP (in tudi ostalih GPS-točk v mreži) je potrebno določiti s programskim paketom, ki je zmožen določiti položaj z najvišjo možno kakovostjo. Rezultati obdelave morajo za različne programske pakete zagotavljati statistično enake rezultate.

Meritve absolutnega težnostnega pospeška se morajo izvajati v bližini MP. Gravimetrične meritve predstavljajo možnost določitve višinskih premikov v fizičnem prostoru, v polju zemeljske težnosti, medtem ko GPS-opazovanja omogočajo določanje višinskih premikov v geometrijskem prostoru (glede na referenčni elipsoid). Opazovanja se morajo izvajati v temperaturno nadzorovanem prostoru, povezava z reperjem MP pa se izvede z nivelmanom visoke natančnosti. Opazovanja težnosti morajo biti popravljena za vplive plimovanja morja in čvrste Zemlje in drugih sistematičnih vplivov (npr. hod inštrumenta). Glede na natančnost sodobnih gravimetrov lahko z gravimetričnimi opazovanji določimo višinske premike na nivoju natančnosti premikov, pridobljenih z GPS-opazovanji.

V preglednici 1 so podane zahteve IOC v zvezi z natančnostjo izvajanja geodetske izmere za potrebe izvajanja mareografskih opazovanj.

<b>Merska tehnika</b>	<b>Dolžina: natančnost</b>
1. Niveliranje nivelmanske zanke MP	0 – 1 km: $\sigma < 1$ mm
2a. Niveliranje na širšem območju	1 – 10 km: $\sigma < 1$ cm
2b. GPS-izmera na širšem območju	Enako
3. Absolutna gravimetrična izmera v bližini MP	$\sigma < 2$ $\mu$ gal
4. GPS-izmera na točkah v bližini MP	$\sigma < 1$ cm

Preglednica 1 - Zahteve IOC v zvezi z geodetsko izmero za potrebe določitve koordinat točk MP.

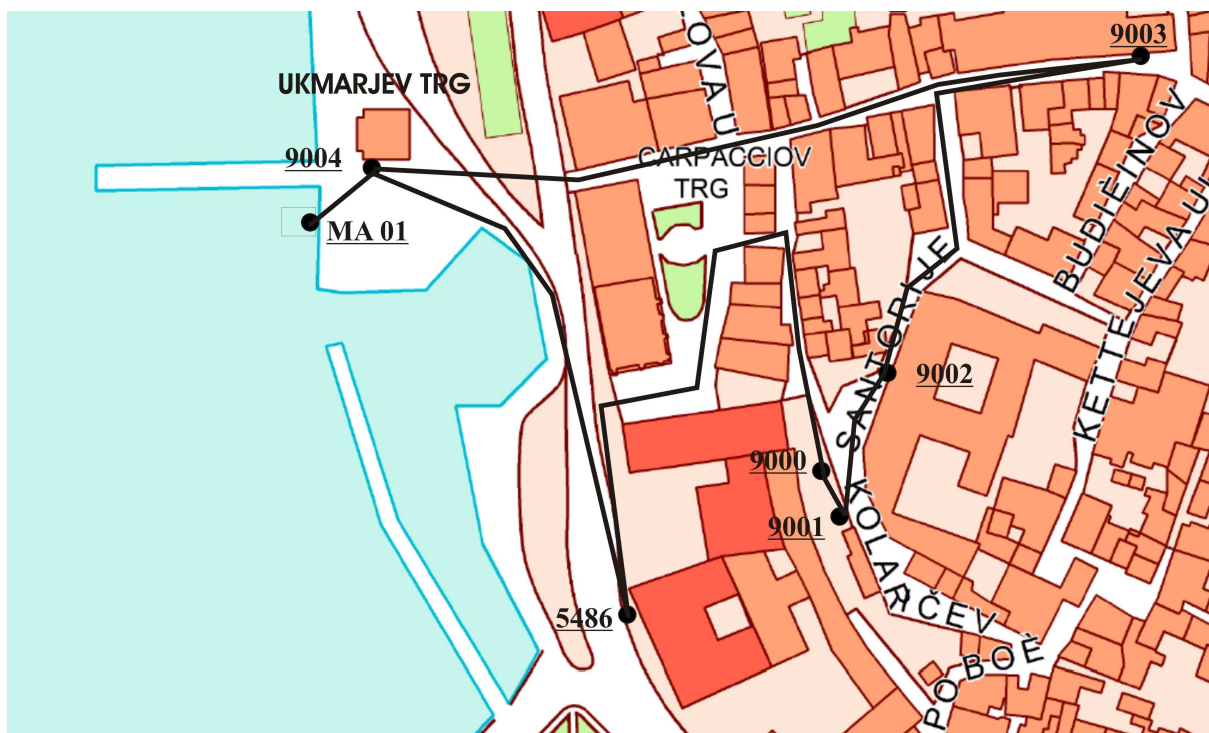
### **Geodetska izmera MP Koper**

Če želimo obravnavati MP kot geodetsko referenčno točko (točko omrežja SIGNAL ter točko višinskega sistema), ki bo hkrati izpolnjevala zahteve IOC, mora biti referenčna točka MP lokalno stabilna oziroma moramo poznati njen premik v času. Zato moramo spremljati horizontalno in višinsko stabilnost referenčne točke MP. Kontrolne meritve v nivelmanski zanki MP so bile izvedene za spremljanje stabilnosti MP v višinskem smislu. V na novo vzpostavljeni mikro mreži smo izvajali terestrična in GPS-opazovanja predvsem za kontrolo stabilnosti nosilca GPS-antene na MP, saj je le-ta zaradi fizičnih ovir v okolici (ladje, jambori, ...) visok okoli štiri metre. Geodetska dela so, poleg GPS-opazovanj, terestričnih opazovanj za potrebe spremljanja lokalne stabilnosti in gravimetričnih opazovanj, vsebovala tudi geometrični nivelman in gravimetrična opazovanja. Z nivelmanom visoke natančnosti in gravimetrijo smo povezali reperje MP in kontaktno točko MP z državno višinsko mrežo (Stopar et al., 2006).

### **Nivelmanska izmera MP Koper**

Za potrebe spremljanja višinske stabilnosti tedanje MP smo v sodelovanju z Geodetsko upravo Republike Slovenije leta 2000 na območju Kopra izvedli rekognosciranje terena. Tako smo z geologom pregledali reperje, ki so stabilizirani na območju Kopra. Pri oceni

kakovosti objektov, v katerih so stabilizirani reperji, je bilo upoštevano stanje objektov in na kakšnih tleh so objekti temeljeni, kar je seveda povezano s stabilnostjo objektov oziroma reperjev. Na osnovi ogleda geologa je bilo ugotovljeno, da so reperji, ki so stabilizirani v bližini MP, stabilizirani v objekte, ki so večinoma temeljeni na nasutih ali močvirnatih mehkih podlagah, in da so torej verjetno nestabilni. Zato smo v skalo, za katero je geolog zagotovil, da je stabilna, stabilizirali dva nova reperja 9000 in 9001, ki predstavljata t. i. reper MP (TGBM). Reperja nadomeščata reper 5486, na katerega so bila navezana mareografska opazovanja starega mareografa. Trenutno imamo v okolici MP stabiliziranih šest reperjev in reper na MP, ki so povezani v nivelmansko zanko.



Slika 3 - Nivelmanska zanka MP Koper (Vir: DPK-1000 GURS)

Z izmero, ki je bila izvedena leta 2001, je bilo potrjeno, da je širše območje Kopa nestabilno. Tako je za potrebe določitve višin MP v državnem višinskem sistemu, nivelmansko zanko MP potrebno navezati na reper, ki je stabiliziran v Dekanah.

Za potrebe spremljanja višinske stabilnosti MP so bili v času izgradnje MP v talno ploščo objekta, v katerem je postavljen MP, stabilizirani trije talni reperji in kontaktne točke (CP), ki so vključene v izmero nivelmanske zanke MP.

Višine točk nivelmanske mreže MP so določene z metodo geometričnega nivelmana. Višinske razlike med reperji so izmerjene s preciznim digitalnim nivelirjem Leica NA3000 in kompariranimi invarnimi nivelmanskimi latami. Kvaliteto nivelmanske izmere ocenimo na osnovi analize natančnosti, temelječi na odstopanjih, ki jih dobimo pri dvakratnem niveliranju višinskih razlik nivelmanskih linij, na odstopanjih pri zapiranju nivelmanske zanke in na osnovi popravkov merjenih količin, ki jih dobimo po izravnavi nivelmanske zanke. Rezultat izravnave nivelmanske zanke so ocenjene nadmorske višine reperjev in natančnost ocene določitve nadmorske višine posameznega reperja. Višine točk in njihova natančnost, ki so bile določene v različnih časovnih obdobjih, so osnova za izračun



višinskih premikov in natančnost ocene določitve višinskih premikov reperjev nivelmanske zanke MP.

### **Gravimetrična izmera MP Koper**

Nivelmanska mreža RS je z evropsko nivelmansko mrežo – UELN95 (United European Levelling Network 95) povezana preko vozliščnih reperjev in povezav nivelmanske mreže Slovenije z nivelmanskimi mrežami sosednjih držav. Na območju Kopra imamo stabiliziran vozliščni reper 5486 (7010 – oznaka v UELN95), ki ima v UELN95 določeno geopotencialno koto in normalno višino. Določeni sta v višinskem datumu Amsterdam. Da lahko določimo razliko v višinskih datumih nivelmanske mreže Slovenije (Trst) in evropske nivelmanske mreže UELN95 (Amsterdam), moramo reperjem nivelmanske zanke MP določiti geopotencialne kote in normalne višine.

Geopotencialne kote reperjev in točk so določene na osnovi niveliranih višinskih razlik in srednje vrednosti izmerjenega težnostnega pospeška med dvema točkama. Težnostni pospešek na posameznih točkah določimo z relativno gravimetrično izmero, ki smo jo izvedli z relativnim gravimetrom Scintrex CG 3M. Po priporočilih IOC bi morali izvajati absolutna gravimetrična opazovanja, vendar smo izvajali relativna, saj v Republiki Sloveniji nimamo absolutnega gravimetra. Relativno gravimetrično izmero smo navezali na absolutno gravimetrično točko Socerb AGT500 oziroma na ekscenter omenjene absolutne gravimetrične točke Socerb AGT501.



Slika 4 - Ekscenter AGT501 absolutne gravimetrične točke Socerb AGT500

### **GPS-izmera MP Koper**

Permanentna GPS-postaja KOPE je opremljena je z GPS-sprejemnikom Leica GRX1200 in GPS anteno Leica AT504 ter deluje kot permanentna postaja v sklopu slovenskega omrežja permanentnih postaj SIGNAL. Točka je stabilizirana in opremljena po priporočilih za vzpostavitev permanentnih GPS-postaj, medtem ko so ostale točke GPS-

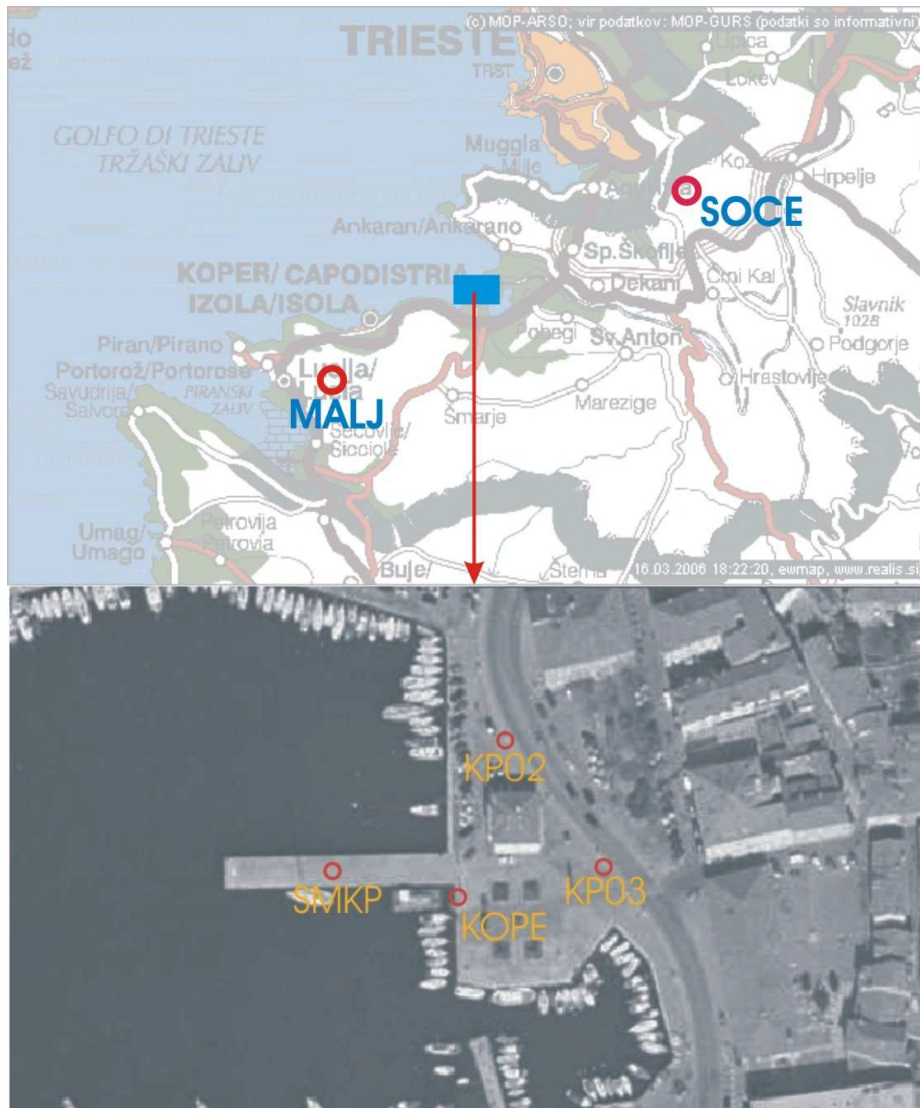
mrež MP stabilizirane kot geodinamične točke: medeninast ali jeklen drog vzdigan v čvrsto podlago.

Koordinate točk MP v koordinatnem sestavu ITRF2000 smo določili s skupno obdelavo GPS-opazovanj na referenčnih točkah IGS (International GNSS Service) ter opazovanj na vseh točkah GPS-mreže MP. GPS-mrežo MP sestavlja 6 točk, poleg permanentne GPS-postaje KOPE še dve točki Malija (MALJ) in Socerb (SOCE), ki sta oddaljeni od MP nekaj kilometrov, ter tri točke: SMKP, KP02 in KP03, ki so od permanentne GPS-postaje KOPE oddaljene nekaj deset metrov. Rezultat obdelave GPS-opazovanj so koordinate vseh točk s pripadajočimi natančnostmi v koordinatnem sestavu ITRF2000, kot ga definirajo znani položaji IGS-točk. Ker pa so položaji točk, določeni v koordinatnem sestavu ITRF2000 obremenjeni z globalno geodinamiko (na območju Slovenije okoli 2.5 cm/leto v smeri SV), so bile koordinate točk preračunane v koordinatni sestav ETRF89 (European Terrestrial Reference Frame 1989). Poleg samih položajev se v ponovljenih GPS-izmerah ocenjuje tudi vektorje hitrosti tako v ITRF2000, kot tudi v koordinatnem sestavu ETRF89. Za dobro oceno vektorja hitrosti neke točke morajo biti na voljo opazovanja v časovnem obdobju nekaj let.



Slika 5 - Referenčne IGS točke v GPS izmeri MP Koper.

IGS točke, ki smo jih uporabili za določitev koordinat točke KOPE v ITRF2000 prikazujemo na Sliki 5. Na Sliki 6 prikazujemo GPS-točke v okolici MP.



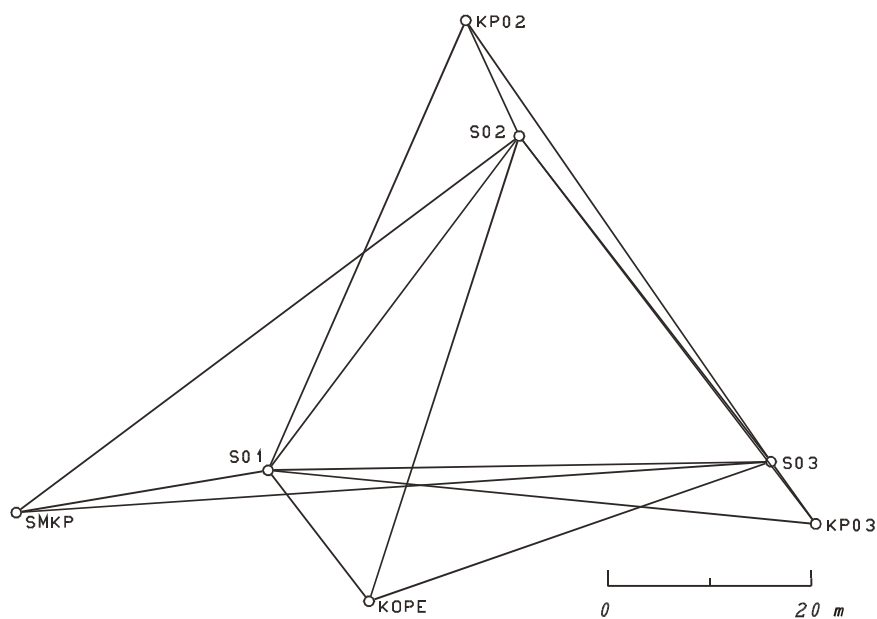
Slika 6 - GPS mreža MP Koper.

### **Terestrična izmera mikro mreže MP Koper**

Z namenom spremljanja lokalne stabilnosti MP je na območju MP vzpostavljena lokalna geodetska mikro mreža. Majhne dimenzije mreže, zahtevana visoka natančnost določitve koordinat točk mreže in urbano območje narekujejo poseben način stabilizacije točk mreže. Izbrana je bila talna stabilizacija z ekscentričnim stojiščem. Poleg GPS-izmere mikro mreže MP smo namreč v mreži izvedli tudi klasična terestrična opazovanja.

Referenčne točke terestrične mikro mreže so talne točke SMKP, KP02, KP03, ki omogočajo prisilno centriranje nastavkov za reflektor. Meritve smo izvedli na ekscentričnih stojiščih S01, S02, S03, ki ležijo na oddaljenosti od 5 do 15 m od referenčnih točk. Ekscentrično stojišče zagotavlja stativ, približno centriran na kovinski čep, ki označuje točko. Stativi so v času meritev fiksni, prisilno centriranje zagotavlja trinožni podstavek. S posameznega stojišča so vidne vse druge točke mreže.





Slika 7 - Mikro mreža MP Koper.

Za določitev horizontalnega položaja točk v mreži MP smo uporabili metodo triangulacije in trilateracije, za določitev višin točk pa metodo trigonometričnega višinomerstva. Višine referenčnih točk smo določili v državnem višinskem sistemu, zato so te točke vključene v izmero nivelmanske zanke MP.

Pri terestričnih opazovanjih v geodetski mikro mreži MP smo uporabili precizni elektronski tahimeter Leica Geosystems TC2003 (natančnost kotnih opazovanj:  $\sigma_{DIN18723-Theo}$  je 0,5'' in natančnost dolžinskih meritev:  $\sigma_S$  je 1 mm ; 1 ppm). Za signalizacijo smo uporabili originalne precizne reflektorje tipa Leica ter precizni psihrometer in barometer za merjenje meteoroloških podatkov.

Horizontalne koordinate točk smo določili na osnovi opazovanj horizontalnih smeri in reduciranih dolžin med točkami. Mrežo smo izravnali kot prosto mrežo in jo nato s transformacijo S transformirali na referenčne točke SMKP, KP02 in KP03, ki določajo datum terestrične mikro mreže. Rezultata izravnave so ocenjene horizontalne koordinate točk in ocena natančnosti določitve koordinat točk. Ocenjene višine točk smo določili na osnovi izmere vseh količin, ki omogočajo določitev višinskih razlik med točkami. Tudi višinsko mrežo smo izravnali po posredni metodi kot prosto mrežo in jo nato s transformacijo S transformirali na referenčne točke. Rezultata izravnave so ocenjene višine točk z ocenjeno natančnostjo višin točk.

Ocenjene koordinate točk in njihova natančnost so osnova za izračun sprememb koordinat točk v mreži in vektorjev premikov med posameznimi serijami meritev tako v horizontalnem kot višinskem smislu. S pomočjo statističnega testiranja smo ugotavljali stabilnost referenčnih točk in morebitni značilni premik točke KOPE. Zaradi pričakovanih majhnih premikov ocenjujemo, da bo za zanesljivo ugotavljanje stabilnosti potrebno stalno spremljanje v daljšem časovnem intervalu.

### Zaključek

Republika Slovenija je z vzpostavitvijo nove MP pridobila kakovostno infrastrukturo za spremljanje nivoja morja, ki je primerljiva s sodobnimi MP po svetu. Vzpostavitev MP,

dolgotrajne in natančne meritve nivoja morja ter spremljajoča geodetska dela predstavljajo izredno zanimivo nalogo s stališča hidrografije, oceanografije in predvsem geodezije. MP izpolnjuje vse standarde IOC za kakovostno in nepristransko določitev srednjega nivoja morja, tako s stališča opazovanj nivoja morja kot tudi s stališča vključitve MP v državni koordinatni sistem z geodetskimi deli, predstavljenimi v prispevku.

MP so imele v preteklosti nalogo definirati ničelno nivojsko ploskev, ki je definirala višinski sistem določene regije oziroma države. S poenotenjem višinskih sistemov v Evropi na UELN95, MP nima več naloge določitve lege višinske izhodiščne ploskve, temveč omogoča določitev višine geoida oziroma kvazigeoida glede na referenčni elipsoid. Kakovostni srednji nivo morja dobimo le z odstranitvijo znanih sprememb lege kopnega v višinski smeri, kar lahko ocenimo s ponovljenimi GPS in gravimetričnimi meritvami. Določitev višinskih premikov je možna le ob navezavi GPS-vektorjev, nivelmanskih in gravimetričnih nivelmanov na točke, ki ležijo na tektonsko stabilnih območjih.

### **Literatura**

- Manual on Sea level Measurement and Interpretation – Volume I: Basic Procedures (1985). Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO.
- Manual on Sea level Measurement and Interpretation – Volume II: Emerging Technologie. (1994). Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO.
- Manual on Sea level Measurement and Interpretation – Volume III: Reappraisals and Recommendations as of the year 2000 (2002). Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO.
- Stopar, B., Kogoj, D., Koler, B., Ambrožič, T., Savšek-Safić, S., Sterle, O., Kuhar, M., Radovan, D. (2006). Izvedba geodetskih dela na modernizirani mareografski postaji Koper. Tehnično poročilo, Geodetski inštitut Slovenije.