

# GEODEZIJA V GEOTEHNIKI

GEODESY IN GEOTECHNICS

*Simona Savšek, Tomaž Ambrožič, Dušan Kogoj, Božo Koler,  
Oskar Sterle, Bojan Stopar*

UDK: 528.98:624.13

## POVZETEK

*Geodetske metode so eden od možnih načinov za ugotavljanje stabilnosti geotehničnih objektov. Spremljanje premikov geotehničnih objektov je zaradi velikosti objektov in pričakovanih premikov nekoliko specifično. Pričakovana velikost premikov določa potrebno natančnost določitve premikov, velikost objekta pa določa metodo geodetske izmere. V osnovi izbiramo med terestričnimi metodami in metodami GNSS (globalni navigacijski satelitski sistem). Ker za izvajanje geotehničnih meritev ni ustrezne zakonske podlage, predstavljamo posebnosti posameznih metod in navajamo splošna priporočila za izvedbo geodetskih postopkov pri spremljanju premikov geotehničnih objektov. Priporočila so namenjena projektantom geotehničnih objektov in izvajalcem geodetskih del ter investitorjem, ki jim lahko olajšajo nadzor nad izvajanjem geotehničnih projektov.*

## KLJUČNE BESEDE

*geodetske meritve, prostorske koordinate, geotehnična opazovanja, premik, zahtevana natančnost*

## 1 UVOD

Geodetske metode omogočajo določanje recentnih tektonskih premikov zemeljske skorje, lokalnih premikov zemeljske površine, kot so plazovi, posedanje, ugrezanje zaradi rudarjenja, izsuševanja, črpanja podtalnice, ter ugotavljanje premikov in deformacij zgrajenih objektov, kot so prometnice, mostovi, vodne pregrade in strojne konstrukcije. Na podlagi premikov točk

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.02

## ABSTRACT

*Geodetic methods are one of the possible means of determining the stability of geotechnical objects. The determination of the displacements of the geotechnical objects is specific due to the size and the expected displacements. The expected size of the displacement determines the necessary precision of the displacement determination, whereas the size of the object determines the method of the geodetic measurement. We choose either the terrestrial or the GNSS methods. There is no relevant legal framework for geotechnical measurements. For this reason, we present the characteristics of the single methods and suggest general recommendations regarding the implementation of the geodetic procedures when monitoring the displacements of the geotechnical objects. The recommendations are intended for geotechnical engineers planning the geotechnical objects and the operators of geodetic measurements and investors. The recommendations facilitate supervision of the geotechnical projects.*

## KEY WORDS

*geodetic measurements, spatial coordinates, geotechnical measurements, displacement, required precision*

izračunane deformacije zgrajenih objektov so informacija o lastnostih konstrukcij in materialov in podatki za analizo varnosti delovanja in/ali uporabe objekta. Pri naravnih objektih pa so izmerjeni premiki informacija o morebitni nevarnosti, ki jo pomenijo za okolico, presojo primernosti njihove ekonomske izbire ipd.

V Sloveniji se vrsto let izvaja spremljanje geotehničnih objektov, kot so podporne in oporne konstrukcije, vkopi in nasipi, za katero pa ni ustrezne zakonske podlage. Po veljavnih predpisih SFRJ je bilo spremljanje premikov in deformacij obvezno za vse visoke jezove, katerih gradbena višina presega 15 metrov (Ur. l. SFRJ, 1964), in za vse temeljene objekte, katerih računski posedki presegajo 5 centimetrov (Ur. l. SFRJ, 1990). Redno spremljanje objekta omogoča pravočasno ukrepanje, kar poleg varnosti zagotavlja tudi pomemben prihranek finančnih sredstev.

Za opazovanja z geodetskimi metodami so geotehnični objekti nekoliko specifični, in sicer zaradi svoje velikosti, saj praviloma merijo tudi več sto metrov, poleg tega lahko pričakovani premiki merijo tudi nekaj centimetrov ali več. V prispevku obravnavamo postopke kontaktne geodetske izmere. Ti postopki vključujejo izvedbo meritev z neposrednim fizičnim stikom geodetskega instrumenta ali merske opreme z referenčnimi točkami in točkami obravnavanega objekta. Ne obravnavamo pa brezkontaktnih postopkov, to je fotogrametričnih metod, metod laserskega skeniranja in metod daljinskega zaznavanja.

V praksi spremljamo in ugotavljamo velike in tudi komaj zaznavne premike. Glede na velikost pričakovanih premikov uporabimo ustrezno stabilizacijo, signalizacijo, mersko opremo in metodo izmere, ki zagotavlja določitev premikov z ustrezno gotovostjo. Postopke ugotavljanja premikov geotehničnih objektov razdelimo glede velikosti pričakovanih premikov na dve stopnji:

- I. stopnja natančnosti: premiki velikosti 2 cm–10 cm,
- II. stopnja natančnosti: premiki velikosti 5 mm–2 cm.

V nadaljevanju opredeljujemo postopke, ki vodijo v zanesljivo določitev premikov obeh stopenj natančnosti.

Priporočila za izvedbo geodetskih postopkov določanja premikov v okviru geotehničnih opazovanj lahko uporabljajo projektanti pri projektiranju geotehničnih objektov, izvajalci geotehničnih meritev in investitorji za učinkovitejše spremljanje in nadzor geotehničnih del.

## 2 IZHODIŠČA ZA UGOTAVLJANJE PREMIKOV Z DEFORMACIJSKO ANALIZO

Deformacijska analiza vključuje uporabo metod statistične analize, s katerimi na podlagi geodetskih meritev odkrivamo in določamo premike točk v prostoru ter iz premikov izhajajoče deformacije objekta (Savšek-Safić, 2002). S postopkom deformacijske analize iz geodetskih meritev v dveh ali več terminskih izmerah ugotavljamo, ali se je med terminskimi izmerami spremenil položaj geodetskih točk, ki predstavljajo naraven ali zgrajen objekt. Obravnavani premiki so lahko veliki, lahko pa tudi zelo majhni oziroma po velikosti primerljivi s še določljivo velikostjo premikov glede na natančnost meritev, zato je treba geodetske meritve, oceno natančnosti in statistično analizo izvesti zelo skrbno in pazljivo. Napačne ugotovitve o stabilnosti točk v geodetski mreži imajo lahko hude posledice, tako glede interpretacije izračunanih premikov

kot napovedovanja porušitve objektov.

V okviru deformacijske analize morata biti izpolnjena naslednja temeljna pogoja (Savšek-Safić et al., 2006):

1. Pogreški, ki se pojavljajo pri merjenju, ne smejo voditi do izračunanih premikov, ki so drugačni od dejanskih. Vzrok za to so lahko pogreški meritev zaradi malomarnosti ali nezadostne strokovnosti opazovalca, pogreški instrumentov, zunanji vplivi, napake v funkcionalnem ali stohastičnem modelu izravnave meritev, izbira neprimerne metode izmere ali instrumentarija in drugo.
2. Zagotovitev zadostne verjetnosti določitve premikov točk geodetske mreže. Pri deformacijski analizi je ključnega pomena zanesljivo določanje stabilnosti oziroma premikov točk na objektu med terminskimi izmerami. Premike točk na objektu namreč določamo glede na referenčne točke geodetske mreže. Nezanesljivo določeni premiki točk geodetske mreže zato nujno vodijo do napačnih ugotovitev glede premikov točk obravnavanega objekta.

Za potrebe deformacijske analize praviloma vzpostavimo geodetsko mrežo, v kateri izvajamo opazovanja v terminskih izmerah. Da bi meritve lahko služile deformacijski analizi, morajo biti izpolnjene naslednje zahteve:

- pravilna izbira položajev referenčnih točk in točk na objektu,
- ustrezna stabilizacija točk,
- meritve so obremenjene samo s slučajnimi pogreški,
- meritve so v vseh terminskih izmerah izvedene z isto mersko opremo in po identičnem planu,
- natančnosti meritev v terminskih izmerah so med seboj primerljive,
- v geodetski mreži imamo dovolj nadštevilnih meritev,
- geodetska mreža ima ugodno geometrijo,
- vse terminske izmere obravnavamo enako in v istem koordinatnem sistemu oziroma istem geodetskem datumu,
- pogostost meritev določa velikost pričakovanih premikov.

Pri stabilizaciji referenčnih točk je treba zagotoviti njihovo stabilnost med meritvami, zato primerna mesta določi geodet skupaj z geologom in gradbenikom. Referenčne točke so koordinatni sistem, v katerem spremljamo premike objekta. Za zanesljivo spremljanje premikov objekta stabiliziramo točke na objektu, ki značilno predstavijo objekt in njegove kritične predele.

Geodetske meritve so vedno obremenjene s slučajnimi pogreški, prisotni pa so lahko tudi grobi in sistematični pogreški. Slednje moramo odstraniti iz meritev, ker lahko povzročajo navidezne premike, kar otežuje pridobitev pravih rezultatov deformacijske analize.

Geodetsko izmero praviloma opravimo z geodetskim instrumentom primerne natančnosti. Ko izvajamo terestrične meritve za ugotavljanje premikov, izbiramo med natančnimi teodoliti in razdaljemerji ter natančnimi nivelirji. Pri izmeri GNSS uporabljamo dvofrekvenčne sprejemnike GNSS. Pri izmeri GNSS več kot natančnost sprejemnika GNSS pove podatke o natančnosti

pridobljenega položaja točke ob uporabi izbrane merske opreme, metode izmere in načina obdelave podatkov meritev.

Geodetske mreže za ugotavljanje premikov praviloma ne omogočajo dobrega nadzora nad grobimi pogreški. Poleg izbire ustreznega instrumenta in ustrezne metode meritev lahko povečamo natančnost določitve premikov točk s povečanjem števila nadštevilnih meritev in primerno geometrijo geodetske mreže.

Nestabilnost referenčnih točk povzroči spremembe datumskih parametrov (premik, zasuk, sprememba merila mreže) geodetske mreže med terminskimi izmerami. Sprememba datumskih parametrov pa povzroči, da izračunani premiki med izmerami niso enaki dejanskim premikom, ker so obremenjeni s spremembo geodetskega datuma.

Časovni presledki med posameznimi terminskimi izmerami so odvisni od pričakovane velikosti premikov, od vrednosti zemljišča ali objekta in posledic, ki bi jih morebitni premiki povzročili.

### 3 GEODETSKE METODE IZMERE ZA UGOTAVLJANJE PREMIKOV

Geodetske meritve za ugotavljanje premikov praviloma izvajamo v geodetski mreži, v katero so povezane referenčne točke in točke obravnavanega objekta.

Izbira položajev točk je odvisna od topografije terena in/ali lastnosti objekta. Število in razporeditev točk na objektu sta povezana z lastnostmi objekta in velikostjo ter smerjo pričakovanih premikov. Za vzpostavitev geodetske mreže sicer veljajo splošna pravila, vendar jih za vsak posamezen problem/objekt prilagodimo dejanskim okoliščinam.

Geodetske metode izmere za ugotavljanje premikov delimo na:

1. metode terestrične izmere in
2. metode izmere GNSS.

Med metode terestrične izmere uvrščamo:

- metode za določitev vertikalnih premikov:
  - geometrični nivelman,
  - trigonometrično višnomerstvo in
- metode za določitev horizontalnih premikov:
  - triangulacijo, trilateracijo,
  - poligonometrijo.

Metode izmere GNSS, ki omogočajo določitev prostorskih premikov, so:

- statična,
- hitra statična
- kinematična,
- metoda izmere RTK.

Ne glede na metodo izmere je vedno potrebna tudi kakovostna obdelava in izravnava opazovanj s celovitim nadzorom nad kakovostjo meritev in pridobljenih rezultatov. V nadaljevanju predstavljamo osnovne lastnosti posameznih metod geodetske izmere glede na zahteve posamezne stopnje natančnosti določitve premikov.

### 3.1 Geodetske terestrične meritve za določitev vertikalnih premikov

Višine točk določamo v okviru tako imenovanih višinskih geodetskih mrež z dvema osnovnima metodama izmere:

- geometrični nivelman (I. in II. stopnja natančnosti),
- trigonometrično višinomerstvo (izjemoma za I. stopnjo natančnosti).

Z obema metodama izmere pridobivamo višinske razlike med točkami, ki jih nato uporabimo za določitev višin točk v mreži. Za II. stopnjo natančnosti uporabimo nivelir, ki zagotavlja natančnost niveliranja vsaj 0,5 mm/km dvojnega nivelmana, za I. stopnjo natančnosti pa nivelir, katerega natančnost niveliranja znaša vsaj 1–2 mm/km dvojnega nivelmana. Pred izmero mora biti nivelir preizkušen skladno s predpisanim postopkom. Uporabljamo le invarne nivelmanske late s kodirano razdelbo oziroma klasične invarne nivelmanske late z dvojno razdelbo, če uporabimo precizni klasični nivelir. Nivelmanske late morajo biti preizkušene, poročilo o preizkusu nivelmanskih lat mora biti priloženo poročilu o izmeri (Kuang, 1996; Vodopivec in Kogoj, 2001).

Za zagotovitev ustreznosti kakovosti višinske geodetske mreže priporočamo:

- niveliranje iz sredine,
- metodo tehničnega nivelmana ali trigonometričnega višinomerstva za I. stopnjo natančnosti,
- metodo natančnega geometričnega nivelmana za II. stopnjo natančnosti,
- dovolj nadštevilnih meritev,
- obojestranske meritve; razlika med obojestransko izmerjeno višinsko razliko nivelmanske linije ne sme preseči dovoljenega odstopanja.

### 3.2 Geodetske terestrične meritve za določitev horizontalnih premikov

S klasičnimi terestričnimi meritvami določamo horizontalne položaje geodetskih točk. Horizontalne koordinate referenčnih točk in točk na objektu praviloma določamo s kombinacijo dveh metod:

- triangulacije (I. in II. stopnja natančnosti) in/ali
- trilateracije (I. in II. stopnja natančnosti).

Če ni mogoče zagotoviti trigonometrične mreže, lahko izjemoma uporabimo tudi poligonometrijo, vendar le za I. stopnjo natančnosti.

Za izmero horizontalnih smeri, zenitnih razdalj in poševnih dolžin uporabimo precizni elektronski tahimeter, ki je namenjen najnatančnejšim meritvam v preciznih terestričnih geodetskih mrežah.

Deklarirani standardni odklon merjenja smeri naj bo vsaj  $\sigma_{\alpha} = (1-2)''$  (za II. stopnjo natančnosti) in  $\sigma_{\alpha} = 3''$  (za I. stopnjo natančnosti), standardni odklon merjenih dolžin pa vsaj  $\sigma_s: 2 \text{ mm}; 2 \text{ ppm}$  (za II. stopnjo natančnosti) in  $\sigma_s: 3 \text{ mm}; 2 \text{ ppm}$  (za I. stopnjo natančnosti). Instrument mora biti preizkušen na pooblaščenem servisu skladno s predpisano metodo in ustrezati deklarirani točnosti (za II. stopnjo natančnosti).

Izmero izvajamo z uporabo klasičnih metod terestrične geodetske izmere (Savšek-Safić et al., 2008).

- Za izmero horizontalnih smeri predlagamo girusno metodo izmere horizontalnih kotov. Rezultat meritev so reducirane smeri, obremenjene s pogreškom začetne smeri.
- Izmero zenitnih razdalj opravimo hkrati z izmero horizontalnih smeri v obeh krožnih legah. Za zmanjšanje vpliva vertikalne refrakcije po možnosti opravimo obojestranske meritve.
- Izmero dolžin opravimo hkrati z merjenjem horizontalnih smeri in zenitnih razdalj.
- Natančno izmerimo višino instrumenta in reflektorja.

Zaradi ustreznega upoštevanja meteoroloških razmer na izmerjene vrednosti dolžin ter za določanje višinskih razlik med točkami je treba izmeriti meteorološke parametre na stojišču instrumenta. Uporabimo termometre in barometre (za I. in II. stopnjo natančnosti) ter psihometre (za II. stopnjo natančnosti). Za signalizacijo točk uporabimo precizne merske prizme in reflektorje istega proizvajalca, kot je instrument (za II. stopnjo natančnosti). Pri meritvah lahko uporabimo navadne ali mini precizne reflektorje (za I. stopnjo natančnosti). Poročilu o meritvah naj bo priloženo potrdilo o določitvi adicijske konstante posameznega reflektorja.

### 3.3 Geodetske meritve GNSS za določitev prostorskih premikov

Izvedba izmere GNSS je povsem odvisna od potrebne natančnosti koordinat točk na objektu oziroma od velikosti pričakovanih premikov točk. Večji kot so pričakovani premiki, večja je izbira instrumentarija in metod dela. Pri vseh vrstah geodetske izmere GNSS je priporočljiva uporaba dvofrekvenčnih sprejemnikov z uporabo zunanjih anten, ki imajo možnost zmanjševanja odboja signala (antene choke-ring), uporaba plošče antene.

Metode izmere GNSS, ki so primerne za spremljanje premikov in deformacij, so:

- statična metoda (I. in II. stopnja natančnosti),
- hitra statična metoda (I. stopnja natančnosti),
- kinematična metoda (I. stopnja natančnosti).

Za najnatančnejše določanje koordinat točk (II. stopnja) je najbolj uporabna statična metoda. Izmera na posameznih točkah naj poteka najmanj 24 ur v posamezni seriji, če to ni mogoče, pa vsaj 6–8 ur. V primeru celodnevnih meritev na točki je interval registracije lahko 30 sekund, medtem ko se za krajše serije izmer priporoča interval registracije 15 sekund. Hitra statična metoda je manj natančna od statične metode izmere in jo lahko uporabimo za določitev koordinat točk s centimetrsko natančnostjo, vendar le, ko dolžine baznih vektorjev ne presegajo nekaj kilometrov. V primeru hitre statične metode izmere (10 min + 1 min/km dolžine vektorja) pa

naj bo interval registracije satelitskega signala 5 sekund.

Pri večjih predvidenih premikih (I. stopnja) je mogoča tudi kinematična ali metoda izmere RTK. Kinematične metode zagotavljajo nekajcentimetrovsko natančnost položaja v posamezni določiti položaja, zato je treba večkrat določiti položaj posamezne točke.

Nastavitev minimalnega višinskega kota za registracijo sprejetega signala je povsem odvisna od programske opreme za obdelavo opazovanj GNSS. Pri uporabi tako imenovanih profesionalnih programskih paketov, kjer se poleg koordinat točk ocenjujejo tudi parametri troposfere, je priporočljivo minimalni višinski kot za izvedbo satelitskih meritev nastaviti čim nižje, na primer na  $1^{\circ}$ – $5^{\circ}$ . Pri komercialnih programskih paketih pa je optimalna nastavitev minimalnega višinskega kota  $10^{\circ}$ – $15^{\circ}$ .

Pri geodetski izmeri GNSS za potrebe spremljanja premikov in deformacij se vedno (I. in II. stopnja natančnosti) določajo koordinate točk na podlagi merjene faze nosilnih valovanj, s sestavo dvojnih faznih razlik. Za pridobitev koordinat točk se za krajše bazne vektorje uporabljajo fazna opazovanja na obeh nosilnih valovanjih, pri daljših vektorjih (nad 5 km) se uporablja linearna kombinacija faznih meritev, ki je neodvisna za vpliv ionosfere. V vseh primerih moramo zagotoviti, da je poleg koordinat točk pridobljena tudi realna ocena koordinat točk.

Ne glede na metodo izmere je treba uporabljati kalibrirano in komparirano mersko opremo ter pomožni pribor.

#### 4 POLOŽAJ IN STABILIZACIJA REFERENČNIH TOČK IN TOČK NA OBJEKTU

Referenčne točke naj bodo zaradi zagotovitve potrebne natančnosti določitve premikov točk na objektu stabilizirane zunaj območja pričakovanih premikov, hkrati pa čim bližje obravnavanemu objektu. Mesto za stabilizacijo referenčnih točk določi geodet s pomočjo geologa in gradbenika, saj morajo biti referenčne točke med celotno meritvijo objekta stabilne. Samo odlična oziroma ustrezna stabilizacija na stabilnem terenu izpolnjuje zahteve o stabilnosti referenčnih točk. Referenčne točke predstavljajo koordinatni sistem, v katerem spremljamo premike objekta. Če se referenčna točka premakne, se spremenijo lastnosti koordinatnega sistema, v katerem določamo koordinate in premike točk. Tako ugotovljeni premiki ne bodo ustrezali realni situaciji. Zato morajo biti referenčne točke stabilne celotno obdobje spremljanja stabilnosti obravnavanega objekta. Če se zgodi, da bi ugotovili premik ene od referenčnih točk, bi to točko morali privzeti kot točko na objektu in vse dotedanje izračune ponoviti tako, da te točke ne privzamemo kot referenčne oziroma stabilne.

Točke pri terestrični izmeri morajo biti med seboj vidne, tako da je mogoče zagotoviti ustrezno število povezav med njimi. Tako stanje se mora ohraniti celotno obdobje izmer objekta. Pri izmeri GNSS ni potrebe po medsebojni vidnosti točk, pomembno je, da je točka locirana tako, da na južno stran ni fizičnih ovir (visoki objekti, drevesa, relief), da ni postavljena v bližino problematičnih ravnih površin, ki povzročajo odboje satelitskega signala, da v bližini ni motečih virov elektromagnetnega valovanja (oddajniki, antene, transformatorske postaje ...) in podobno.

#### 4.1 Stabilizacija referenčnih točk

Za geometrični nivelman referenčne točke (reperje) stabiliziramo s čepi sodčkaste oblike iz nerjavečega jekla. Vgradimo jih v dovolj star objekt ali primarno skalo (slika 1), ki pa ne sme biti predaleč in ne na preveliki višinski razliki glede na obravnavani objekt (Koler et al., 2006). Druga možnost je tako imenovana talna stabilizacija reperjev v ustrezno temeljeno podlago. Obakrat izvedemo stabilizacijo tako, da je reper varen pred uničenjem. Referenčne točke morajo biti vgrajene tako, da je na njih mogoče navpično postaviti invarno nivelmansko lato brez težav. Invarna nivelmanska lata je običajno dolga 3 metre.

Če bodo višine točk določene s trigonometričnim višinomerstvom, moramo imeti referenčne točke stabilizirane z nizkim reperjem, na katerega lahko postavimo navadno nivelmansko lato s centimetrsko razdelbo, ali s talnimi reperji, nad katerimi lahko postavimo stativ z instrumentom oziroma reflektor.

Kombinirana izmera z uporabo vseh razpoložljivih merskih tehnologij postaja vse pogostejša. Zato izvedemo stabilizacijo referenčnih točk in točk na objektu tako, da se na njih lahko izvajajo tako meritve GNSS kot terestrične meritve (za II. stopnjo natančnosti). Stabilizacija referenčnih točk je odvisna tudi od geološke sestave tal. Referenčne točke stabiliziramo z armiranobetonskimi stebri (slika 2), ki omogočajo enolično in ponovljivo prisilno centriranje instrumenta, reflektorja in antene GNSS (Kogoj et al., 2009). Merski steber se nam nikakor ne sme lokalno premakniti ali nagniti, zato je treba izvesti kakovostno temeljenje na ustrezno stabilnem terenu. Po potrebi zagotovimo tudi bočna zavarovanja za spremljanje stabilnosti posamezne referenčne točke. Spet je torej pomembno sodelovanje geologa in gradbenika z geodetom.

V urbanih naseljih, kjer so armiranobetonski stebri moteči za okolje, za izvedbo terestrične izmere izberemo stabilizacijo referenčnih točk s klini iz nerjavečega jekla z dodatnim ekscentričnim stojiščem (za I. in II. stopnjo natančnosti). Pri stabilizaciji je treba zagotoviti, da so iz vseh ekscentričnih stojišč vidni talni klini z notranjim navojem, ki prav tako omogočajo enolično in ponovljivo prisilno centriranje reflektorja. Klin mora biti stabiliziran v stabilni podlagi. Vrh klina je poravnan s podlago. Notranji navoj omogoča prisilno centriranje reflektorja ali antene



Slika 1: Referenčni reper v primarni skali



Slika 2: Referenčna točka za izmero GNSS in terestrično izmero



GNSS med meritvami ali čepov za varovanje navojev, ko ne izvajamo meritev. Stabiliziramo jih tako, da so varni pred uničenjem v daljšem časovnem obdobju (Vodopivec in Kogoj, 2005).

#### 4.2 Stabilizacija točk na objektu

Pri izbiri točk na objektu sodelujejo projektanti (gradbeniki, geotehniki) in geodeti. Projektant objekta (gradbenik) pozna objekt in njegovo obnašanje ob obremenitvah ter njegove predvidene premike in deformacije. Pozna kritična mesta na objektu, karakteristične točke, ki reprezentirajo obnašanje celotnega objekta, in predlaga izbiro točk na objektu, ki bodo optimalno predstavile celoten objekt ali njegove kritične dele. Projektant tudi določi pričakovane, še sprejemljive in kritične velikosti premikov točk na objektu ter pozna posledice, če premiki prekoračijo te vrednosti.

Geodet pozna geodetske merske tehnike, pravila projektiranja geodetskih mrež in instrumentarij, metode ocenjevanja kakovosti rezultatov, postopke deformacijske analize in vrednotenje pridobljenih rezultatov (premikov), zato predlaga metode izmere in obliko geodetske mreže ter ustrezen instrumentarij, s katerimi bo zagotovljena zahtevana kakovost pridobljenih premikov na obravnavanem objektu. Točke na objektu stabiliziramo na način, ki je varen pred uničenjem, ni moteč za okolje ter zagotavlja ustrezno stabilnost točk in ponovljivost meritev.

Za geometrični nivelman uporabimo čepce sodčkaste oblike iz nerjavečega jekla, ki jih vgradimo v objekt. Nameščeni morajo biti tako, da je na njih mogoče brez težav navpično postaviti nivelmansko lato in v vseh terminskih izmerah omogočajo postavitev nivelmanske late na isto mesto. Če je višinska razlika določena s trigonometričnim višinomerstvom, točke na objektu stabiliziramo z nizkimi reperji, na katere lahko postavimo navadno nivelmansko lato s centimetrsko razdelbo, ali talnimi reperji (slika 3), nad katere postavimo stativ z instrumentom oziroma reflektor (Kogoj et al., 2009).

Za terestrično izmero za določitev horizontalnih koordinat uporabimo talno stabilizacijo s klinom (slika 4, 5) iz nerjavečega jekla (za II. stopnjo natančnosti). Vrh klina je poravnal s okoljskim nivojem, ima notranji navoj, ki omogoča privijanje nastavkov za reflektorje med meritvami ali



Slika 3: Stabilizacija talnega reperja z možnostjo postavitve stativa



Slika 4: Talna stabilizacija točke na objektu s klinom za terestrično izmero



Slika 5: Prilno centriranje reflektorja za terestrično izmero



Slika 6: Prilno centriranje antene GNSS na točki na objektu

čepov za varovanje navojev, ko ne izvajamo meritev (Kogoj et al., 2008; Kogoj et al., 2009). Za I. stopnjo natančnosti je poleg stabilizacije s klini dovoljena tudi običajna stabilizacija s talnimi točkami.

Izbira točk na objektu za izvedbo izmere GNSS je nekoliko drugačna kot pri terestrično izmerjeni geodetski mreži. Lokacija točk na objektu za izmero GNSS mora izpolniti iste zahteve kakor referenčne točke, to je odsotnost fizičnih ovir, odsotnost motečih ravnih površin, odsotnost motečih izvorov elektromagnetnega valovanja. Za izmero GNSS naj bodo točke na objektu stabilizirane z vgrajenim klinom (slika 6), ki omogoča prisilno centriranje antene (za II. stopnjo natančnosti). Čep mora biti poravnan z nivojem okolice, da zmanjšamo možnost uničenja točke. Za I. stopnjo natančnosti točke na objektu stabiliziramo z jeklenimi klini, kjer se anteno GNSS lahko optično centrira nad točko s stativom. Anteno GNSS moramo za II. stopnjo natančnosti nujno prisilno centrirati. Obakrat moramo pri statični izmeri anteno sprejemnika GNSS vedno enako orientirati (praviloma orientacija proti severu) zaradi naknadnega upoštevanja nesovpadanja faznega centra antene z geometričnim centrom antene.

## 5 ANALIZA KAKOVOSTI GEODETSKE MREŽE

Merila kakovosti geodetskih mrež za potrebe deformacijske analize so enaka običajnim merilom kakovosti geodetske mreže. Analiza kakovosti geodetske mreže vedno vključuje analizo natančnosti, zanesljivosti in občutljivosti geodetske mreže. Razlika je le v tem, da imamo sedaj geodetsko mrežo, v kateri smo opazovanja izvedli večkrat, v več terminskih izmerah. Zato imamo pri deformacijski analizi opravka tudi s količinami, ki jih uporabljamo za vrednotenje premikov točk v geodetski mreži. Premike točk vrednotimo s statistično analizo, s katero z izbrano verjetnostjo dokazujemo, ali je ugotovljeni premik statistično značilen ali ne. Pri tem je

pomembna izbira ustreznih stopenj značilnosti, ki jih uporabimo pri testih prisotnosti grobih pogreškov v meritvah, skladnosti terminskih izmer in vrednotenju premikov točk v deformacijski analizi (Welsch in Heunecke, 2001).

Kakor vedno moramo tudi v teh primerih pred izravnavo opazovanj sestaviti stohastični model izravnave. Ker verjetnostnih lastnosti meritev nikoli ne poznamo popolnoma natančno, lahko sestavimo le stohastični model, ki je približek dejanskih verjetnostnih lastnosti meritev. Natančnost meritev predstavlja matrika uteži, natančnost ocenjenih neznank pa kovarijančna matrika neznank. Neznanke v geodetski mreži so koordinate točk, to je koordinate referenčnih točk in točk na objektu.

Izravnavo po metodi najmanjših kvadratov zahteva meritve, iz katerih smo odstranili grobe pogreške in sistematične vplive. Odkrivanju in izločanju grobo pogrešenih meritev moramo zato posvetiti ustrezno pozornost, saj neodkriti grobi pogreški vplivajo na oceno vseh količin v matematičnem modelu ter s tem na oceno koordinat in ugotovljenih premikov točk.

Globalno natančnost in zanesljivost geodetske mreže v posamezni terminski izmeri vrednotimo z globalnim testom modela, s katerim potrdimo ali ovržemo prisotnost grobo pogrešenih meritev v mreži ter ustreznost a-priori ocenjene natančnosti opravljenih meritev. Za ugotavljanje prisotnosti grobo pogrešenih meritev in njihovo lociranje je predlaganih več postopkov (Grigillo in Stopar, 2003). Ko poznamo a-priori referenčno varianco (natančnost meritev), je najprimernejša Baardova metoda oziroma tako imenovana »tehnika pregleda meritev« (angl. data snooping). Če a-priori referenčne variance ne poznamo, uporabimo Popovo metodo oziroma tako imenovani » $\tau$ -test« (angl. data screening). Grobe pogreške v meritvah je mogoče odkriti tudi s tako imenovano »dansko metodo«, ki edina ne sloni ne na matematični statistiki ne na predpostavkah. Vse tehnike odkrivanja grobih pogreškov so v odkrivanju grobo pogrešenih meritev le delno uspešne.

Na zmožnost odkrivanja grobih pogreškov v posameznih opazovanjih se nanašata pojma zanesljivosti in občutljivosti posamezne meritve ali celotne geodetske mreže (Kuang, 1996; Caspary, 2000). Zanesljivost posamezne meritve je spodnja meja še ugotovljivih grobih pogreškov v opazovanjih, občutljivost pa se nanaša na vpliv neodkritih grobih pogreškov v opazovanjih na ocenjene vrednosti neznank (koordinat točk). Obe merili kakovosti sta povezani s številom nadštevilnosti posameznih opazovanj. Števila nadštevilnosti posameznih meritev lahko ugotovimo že v fazi načrtovanja mreže in s tem odkrijemo predele nizke zanesljivosti mreže. Slabše določene predele v mreži lahko izboljšamo s postopki optimizacije. Poudariti je treba, da so mreže za ugotavljanje premikov in deformacij praviloma mreže z nizko občutljivostjo, kar izhaja iz specifičnih geometrijskih lastnosti geodetske mreže za spremljanje premikov in deformacij. Od dobro projektirane geodetske mreže smemo zahtevati, da so vplivi neodkritih grobih pogreškov na rezultate izravnave in posebej na koordinatne neznanke čim manjši.

Z zanesljivostjo in občutljivostjo geodetske mreže vrednotimo tako imenovano robustnost mreže, ki podaja odziv mreže na majhne neskladnosti (grobe pogreške) v meritvah, medtem ko se merila natančnosti nanašajo samo na slučajne pogreške. Visoka zanesljivost in občutljivost mreže pomeni, da je odziv mreže na neodkrita groba pogreška zanemarljiv.

## 6 POSTOPEK UGOTAVLJANJA PREMIKOV TOČK V GEODETSKI MREŽI

Postopek deformacijske analize razdelimo v več faz (Savšek-Safić et al., 2006):

1. vzpostavitev geodetske mreže optimalne geometrije in izvedba meritev po predvidenem načrtu;
2. izravnava meritev v posamezni terminski izmeri;
3. analiza kakovosti geodetske mreže;
4. testiranje homogenosti natančnosti meritev v obeh terminskih izmerah;
5. testiranje značilnosti premikov;
6. globalni test skladnosti mreže med dvema terminskima izmerama;
7. testiranje stabilnosti referenčnih točk in določitev nestabilnih točk;
8. testiranje premikov točk na objektu.

Geometrija geodetske mreže za ugotavljanje premikov in deformacij naj bi bila čim bolj idealna, pri njenem praktičnem oblikovanju pa imamo pogosto kar nekaj težav. Te so povezane z lego referenčnih točk, ki morajo biti locirane na stabilnem območju in zunaj vplivnega območja premikov objekta, hkrati pa dovolj blizu, da bomo lahko dosegli potrebno natančnost določitve premikov. V praksi imamo tako opravka z geodetskimi mrežami, ki so vzpostavljene kot kompromis med idealno in izvedljivo obliko mreže. Kljub temu pa se pogosto zgodi, da vzpostavimo mrežo slabih geometrijskih lastnosti. S primernim načrtom meritev v mreži nato skušamo doseči želeno kakovost določitve koordinat točk, kar bo podlaga za pridobitev realnih premikov točk v geodetski mreži.

Naslednja težava je način ocene kakovosti posamezne terminske izmere. Izravnava meritev v posamezni terminski izmeri omogoča izračun neznank z oceno natančnosti in izračun natančnosti meritev po izravnavi. Te količine so v nadaljevanju predmet številnih primerjav in testiranj. Pri tem je pomembno, da so neodvisne od izbire geodetskega datuma. Temu pogoju ustrezajo količine, ki jih izračunamo z izravnavo prostih geodetskih mrež ali izravnavo geodetskih mrež, kjer privzamemo v izravnavo le toliko datumskih parametrov, kot jih, glede na dimenzijo prostora (1-D, 2-D, 3-D) in tip opravljenih meritev, nujno potrebujemo. O splošnih priporočilih glede globalne in lokalne natančnosti ni mogoče govoriti, saj je odvisna od vrste in namena mreže za ugotavljanje premikov in deformacij.

V četrti fazi opravimo testiranje homogenosti natančnosti obravnavanih terminskih izmer. Izmeri, ki nista homogene natančnosti, med seboj namreč nista primerljivi. To je še posebej problematično prav v mrežah za ugotavljanje premikov in deformacij, saj bi bile vse ugotovitve o možnih premikih, na podlagi primerjave dveh nehomogenih mrež, nerealne. Homogenost natančnosti dveh terminskih izmer lahko ugotavljamo le, ko obe izmeri temeljita na identičnem geodetskem datumu, to je kadar pred izravnavo meritev v posamezni terminski izmeri privzamemo enake približne koordinate točk za obe terminski izmeri. Te zahteve praviloma ni težko izpolniti, razen ko se položaj točke v eni od terminskih izmer precej spremeni ali točka iz izmere celo izpade. V prvem primeru sistem lineariziranih enačb popravkov opazovanj, ki ga sestavimo pred začetkom izravnave, lahko ni več dober približek za lineariziran problem. Težavo rešimo tako,

da privzamemo druge približne koordinate točk za obe terminski izmeri. Drugi primer pa je sprememba geodetskega datuma mreže, ki ga rešimo s podobnostno oziroma tako imenovano transformacijo  $S$ . S primerjavo a-posteriori referenčnih varianc med terminskima izmerama lahko dobimo zanesljivo oceno homogenosti natančnosti meritev dveh terminskih izmer, ob domnevi, da je bila a-priori varianca obkrožno enaka oziroma primerljiva (natančnost meritev v obeh terminskih izmerah je bila statistično enaka).

V peti fazi testiramo značilnosti premikov točk mreže na podlagi razmerja  $d/\sigma_d$ , ki predstavlja razmerje med premikom točke in standardno deviacijo premika. Tako dobimo prvo informacijo o skladnosti obravnavane mreže v dveh terminskih izmerah. Po izravnavi najmanj dveh terminskih izmer lahko izračunamo premike in natančnosti premikov za vsako posamezno točko. Ker sta to dve količini, ki ju običajno izračunamo pred podrobno deformacijsko analizo, definiramo testno statistiko kot razmerje med premikom in standardno deviacijo premika  $Y = d/\sigma_d$ . Pri geodetskih mrežah za ugotavljanje premikov, ob privzeti stopnji značilnosti testa  $\alpha$  med 1 % in 5 %, točko obravnavamo kot nestabilno, če vrednost testne statistike  $Y$  presega 3. Predlagana testna statistika je zelo preprost in učinkovit pripomoček za ugotavljanje premikov točk v geodetskih mrežah (Šavšek-Safić et al., 2006).

V šesti fazi testiramo globalno skladnost koordinat točk v obravnavanih terminskih izmerah. V testni statistiki za testiranje globalne skladnosti terminskih izmer nastopajo vektorji premikov vseh točk v mreži, zato je toliko bolj pomembno, da so ocene neznank nepristranske. To pomeni, da temeljijo na opazovanjih, obremenjenih samo s slučajnimi pogreški, in na identični definiciji geodetskega datuma v obeh izmerah.

V sedmi fazi se lahko zgodi dvoje. V prvem primeru sta definirani dve skupini točk, in sicer referenčne točke in točke na objektu. V drugem pa imajo vse točke enak status in jih obravnavamo kot referenčne točke. V praksi imamo včasih na voljo informacijo o domnevno stabilnih referenčnih točkah, pogosto pa tudi ne. Če nimamo verodostojnih informacij o stabilnosti referenčnih točk, je varneje, da se o tem ne odločimo subjektivno. Učinkovita metoda za ugotavljanje stabilnosti mora izločiti domnevno nestabilne točke iz skupine referenčnih točk. Če s testom zavrnilo hipotezo o stabilnosti referenčnih točk, potrdimo prisotnost nestabilnih točk med referenčnimi točkami. V nadaljevanju s testiranjem postopno izločamo nestabilne točke iz skupine referenčnih točk. Ta faza deformacijske analize je ena najbolj kritičnih, saj se prav tu oblikuje skupina točk, za katere ne moremo trditi, da so se premaknile, in jih zato v nadaljevanju obravnavamo kot stabilne.

V osmi fazi se z enako testno statistiko, kot smo jo uporabili pri testiranju stabilnosti referenčnih točk, testirajo premiki točk na objektu. Da lahko govorimo o nepristranski oceni premikov, morajo biti tudi količine, ki jih testiramo, statistično ocenljive, torej neodvisne od izbire danih količin oziroma geodetskega datuma mreže.

Pomembno je, da postopek ugotavljanja premikov razumemo kot sosledje potrebnih faz, ki zagotavljajo zanesljivo določanje stabilnosti referenčnih točk in premikov točk na objektu. Obstaja več postopkov deformacijske analize, ki se med seboj razlikujejo tako po računskih postopkih kakor po uporabi primernih testnih statistik pri statističnem testiranju hipotez (Šavšek-Safić,

2002). Opisan postopek je torej le ena od možnosti za zanesljivo obravnavo geodetskih meritev za določanje premikov točk v geodetski mreži.

## 7 ZAKLJUČEK

Geodetske metode izmere so v okviru opazovanj geotehničnih objektov široko uporabne, saj omogočajo ugotavljanje in spremljanje premikov v absolutnem smislu, to je neodvisno od obravnavanega objekta. Spremljanje premikov je nujno za zagotavljanje varnosti delovanja in uporabe objektov in za ocenjevanje potencialne nevarnosti, ki jih predstavljajo za okolico. Ker trenutno veljavna zakonodaja ne vključuje zahtev in možnosti, ki jih ponujajo sodobne tehnologije in merski postopki, je kot taka uporabna le za nekatere geotehnične objekte, večinoma pa zastarela in nezadostna. Tako so projektanti pri projektiranju objektov in izvajalci geotehničnih opazovanj pogosto prepuščeni samim sebi. Prav tako imajo težave investitorji pri spremljanju in nadzoru geotehničnih del.

Da bi projektanti geotehničnih objektov lažje zagotovili varno in stabilno delovanje projektiranih objektov, morajo biti z zahtevami pri projektiranju in gradnji geotehničnih objektov dovolj dobro seznanjeni tudi investitorji, ki bodo znali pravilno oblikovati svoje zahteve in oceniti še sprejemljivo tveganje. Izvajalci geotehničnih opazovanj, ki med gradnjo in po njej izvajajo meritve za ugotavljanje stabilnosti zgrajenega objekta, morajo s pravilno izbiro metode izmere in merske opreme ter vseh uporabljenih postopkov obdelave in analize meritev in pridobljenih rezultatov zagotoviti zadovoljivo kakovost določitve premikov skladno z zahtevano natančnostjo.

## Zahvala

Izhodišča za izvedbo geodetskih opazovanj geotehničnih objektov so plod sodelovanja pri raziskovalni nalogi Smernice za izvedbo geotehničnega opazovanja, ki smo jo izvedli v sodelovanju s Katedro za mehaniko tal UL FGG, Zavodom za gradbeništvo in Družbo za državne ceste. Nalogo je financirala Družba za avtoceste republike Slovenije. Vsem se iskreno zahvaljujemo.

## Literatura in viri

Caspary, W. F. (2000). *Concepts of Network and Deformation Analysis, School of Surveying. Kensington: The University of New South Wales.*

Grigillo, D., Stopar, B. (2003). *Metode odkrivanja grobih pogreškov v geodetskih opazovanjih. Geodetski vestnik, 47(4), 387-403.*

Kogoj, D., Marjetič, A., Ambrožič, T., Stegenšek, B. (2008). *Tehnično poročilo II. izmere horizontalne in vertikalne geodetske mreže za kontrolo stabilnosti jezovne zgradbe HE Boštanj. Ljubljana: UL FGG, Katedra za geodezijo.*

Kogoj, D., Marjetič, A., Ambrožič, T., Stegenšek, B., Trlep, D. (2009). *Geodetske meritve stabilnosti odlagalnišča rudniške jalovine Jazbec, ničelna meritev. Ljubljana: UL FGG, Katedra za geodezijo.*

Koler, B., Goršič, J., Jaklič, S., Stegenšek, B. (2006). *Sanacija nivelmskega poligona med HE Medvodami in HE Vrhovo, tehnično poročilo. Ljubljana: UL FGG, Katedra za inženirsko geodezijo.*

Kuang, S. (1996). *Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications, Ann Arbor Press, Inc., Chelsea, Michigan.*

Savšek-Safić, S. (2002). *Optimalna metoda določanja stabilnih točk v deformacijski analizi. Doktorska disertacija. Ljubljana: UL FGG, Oddelek za geodezijo.*

Savšek-Safić, S., Ambrožič, T., Stopar, B., Turk, G. (2006). Determination of Point Displacements in the Geodetic Network. *Journal of Surveying Engineering, ASCE, 132(2)*, 58–63.

Savšek-Safić, S., Ambrožič, T., Stopar, B., Kogoj, D. (2008). Local stability monitoring of the Koper tide gauge station. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 115(6)*, 210–215.

Welsch, W., Heunecke, O. (2001). *Models and Terminology for the Analysis of Geodetic Monitoring Observations. Official Report FIG Working Group, Institute of Geodesy, Hannover.*

Vodopivec, F., Kogoj, D. (2005). Nov način precizne stabilizacije geodetskih točk za opazovanje premikov. *Geodetski vestnik, 49(1)*, 9–17.

Vodopivec, F., Kogoj, D. (2001). Ein neuer Komparator für die Kalibrierung von Nivellierlatten auf der Basis eines optischen Encodersystems. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 108(8/9)*, 296–301.

Uradni list SFRJ (1964)

Uradni list SFRJ (1990)

**Prispelo v objavo: 13. november 2009**

**Sprejeto: 3. marec 2010**

**doc. dr. Simona Savšek, univ. dipl. inž. geod.**

UL, FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: simona.savsek@fgg.uni-lj.si

**izr. prof. dr. Tomaz Ambrožič, univ. dipl. inž. geod., univ. dipl. inž. rud.**

UL, FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: tomaz.ambrozic@fgg.uni-lj.si

**izr. prof. dr. Dušan Kogoj, univ. dipl. inž. geod.**

UL, FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: dusan.kogoj@fgg.uni-lj.si

**doc. dr. Božo Koler, univ. dipl. inž. geod.**

UL, FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: bozo.koler@fgg.uni-lj.si

**asist. mag. Oskar Sterle, univ. dipl. inž. geod.**

UL, FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: oskar.sterle@fgg.uni-lj.si

**izr. prof. dr. Bojan Stopar, univ. dipl. inž. geod.**

UL, FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: bojan.stopar@fgg.uni-lj.si