



I Z S

INŽENIRSKA ZBORNICA SLOVENIJE



**Avtorja: dr. Bojan Stopar
dr. Tomaž Ambrožič**

SMERNICE ZA UGOTAVLJANJE IN DOLOČANJE PREMIOV Z GEODETSKIMI METODAMI

(SMERNICE ZA GEODETSKI MONITORING)

MATIČNA SEKCIJA GEODETOV

**SMERNICE
ZA UGOTAVLJANJE
IN DOLOČANJE PREMIOV
Z GEODETSKIMI METODAMI
(SMERNICE ZA GEODETSKI MONITORING)**

**Avtorja: dr. Bojan Stopar
dr. Tomaž Ambrožič**

Pregledal: UO MSGeo

**Izdala:
Inženirska zbornica Slovenije
Jarška cesta 10 b, Ljubljana**

**Oblika izdaje:
elektronska verzija, dostopno na www.izs.si**

Ljubljana, avgust 2025



Vsebina

1	Uvod	5
2	SPLOŠNO O UGOTAVLJANJU IN DOLOČANJU PREMIKOV Z GEODETSKIMI METODAMI	6
2.1	Terminologija	6
2.2	Predstavitev geodetskega določanja in ugotavljanja premikov	6
2.3	Objekt geodetskega monitoringa	7
2.4	Izbira merske opreme in metode meritev	8
2.5	Izvedba meritev	9
2.6	Obdelava, izravnava in analiza podatkov meritev	9
2.7	Zmožnosti in omejitve tehnologij in meritev pri določanju premikov	10
2.8	Zmožnosti in omejitve teorij pri določanju premikov	10
2.9	Osnove geodetskega ugotavljanja in določanja premikov	11
2.9.1	Določitev premika na osnovi sprememb posameznih koordinat	12
2.9.2	Določitev premika na osnovi spremembe lege	13
2.10	Dokumentiranje postopkov in ugotovitev geodetskega monitoringa	14
2.11	Zakonodaja in standardi na področju geodetskega monitoringa	15
2.11.1	Standardi ISO	15
2.11.2	Evropski standardi	16
2.11.3	Smernice za geodetske meritve GNSS	16
2.11.4	Druge relevantne smernice	16
3	VZPOSTAVITEV SISTEMA ZA GEODETSKI MONITORING	17
3.1	Geodetska mreža za geodetski monitoring	17
3.2	Določitev referenčnih točk	20
3.3	Določitev kontrolnih točk na objektu	20
4	DOLOČITEV VIŠINSKIH PREMIKOV (DOLOČITEV PREMIKOV V ENORAZSEŽNEM PROSTORU)	22
4.1	Vzpostavitev sistema za določanje višinskih premikov	22
4.2	Geodetski datum in referenčne točke višinske geodetske mreže	23
4.3	Določitev kontrolnih točk na objektu	24

4.4	Metode geodetske izmere za določitev višin točk	24
4.5	Instrumentarij in pribor pri določanju višin	25
4.6	Postopek izračuna višin točk	26
4.7	Določitev višinskih premikov (določitev premikov v enorazsežnem prostoru)	26
5	DOLOČITEV HORIZONTALNIH/RAVNINSKIH PREMIKOV (DOLOČITEV PREMIKOV V DVORAZSEŽNEM PROSTORU)	31
5.1	Vzpostavitev sistema za določanje horizontalnih premikov	31
5.2	Geodetski datum in oblika horizontalne geodetske mreže	32
5.3	Metode terestrične geodetske izmere za določitev horizontalnih koordinat	31
5.4	Instrumentarij in pribor za terestrično geodetsko izmero	33
5.5	Izračun koordinat točk v ravninski geodetski mreži	34
5.6	Določitev horizontalnih premikov (določitev premikov v dvorazsežnem prostoru)	35
6	DOLOČITEV PROSTORSKIH PREMIKOV (DOLOČITEV PREMIKOV V TRIRAZSEŽNEM PROSTORU)	41
6.1	Vzpostavitev sistema meritev GNSS	41
6.2	Določitev geodetskega datuma geodetske mreže GNSS	42
6.3	Izbira točk za izmero GNSS	43
6.4	Statična metoda izmere GNSS	44
6.5	Instrumenti in pribor za izmero GNSS	45
6.6	Cenovno ugodna merska oprema GNSS	46
6.7	Obdelava meritev GNSS	47
6.8	Izračun koordinat točk v geodetski mreži GNSS	49
6.9	Problem povezave terestričnih geodetskih meritev in meritev GNSS	50
6.10	Določitev prostorskih premikov (določitev premikov v trirazsežnem koordinatnem sistemu)	50
7	PRIMERI	56
7.1	Ugotavljanje in določitev višinskih premikov	57
7.2	Ugotavljanje in določitev ravninskih premikov	59
7.3	Ugotavljanje in določitev prostorskih premikov	61
8	ZAKLJUČEK	63

1 Uvod

Geodetske metode ugotavljanja in določanja premikov ali krajše geodetski monitoring so specifične geodetsko-tehnične naloge, ki na osnovi ponavljajočih se ali neprekinjeno potekajočih geodetskih meritev omogočajo določitev sprememb geometrijskih lastnosti naravnih in grajenih objektov.

Ugotavljanje in določanje premikov praviloma izvajamo v okolščinah oz. v povezavi z objekti, ki lahko predstavljajo nevarnost za premoženje in življenje ljudi.

Naloge ugotavljanja premikov zahtevajo visoko stopnjo geodetskega tehničnega znanja, ki vključuje poznavanje geodetskega merskega instrumentarija, postopke izvajanja in obdelave podatkov meritev, postopke vrednotenja kakovosti meritev in računske obdelave meritev ter vrednotenje in interpretacijo dobljenih rezultatov. Dodatno naloge geodetskega monitoringa zahtevajo poznavanje konceptov in praktično vzpostavitev (definicijo in realizacijo) stabilne geodetske koordinatne osnove (geodetskega datuma), v okviru katere lahko ugotavljamo spremembe geometrijskih lastnosti obravnavanega objekta.

V okviru teh smernic bodo predstavljeni postopki geodetskega monitoringa na osnovi periodičnih meritev s klasičnimi geodetskim instrumentarijem in postopki meritev ter klasičnih geodetskih postopkov obdelave, analize in interpretacije meritev. Kljub temu, da ne bomo podrobno predstavljali praktičnih postopkov izvedbe meritev, ki jih uporabljamo v nalogah geodetskega monitoringa, bomo navedli nekaj opozoril glede izvedbe in obdelave meritev, predstavili nekaj postopkov, ki nam omogočajo zagotovitev identičnega geodetskega datuma v posameznih terminskih izmerah, predstavili postopke analize in vrednotenja kakovosti meritev, predstavili osnovne postopke geodetskega določanja premikov ter interpretacijo dobljenih rezultatov, za namen ugotavljanja sprememb geometrije objekta oz. določitev morebitnih premikov le-tega.

2 Splošno o ugotavljanju in določanju premikov z geodetskimi metodami

2.1 Terminologija

S terminom »ugotavljanje in določanje premikov z geodetskimi metodami« oziroma krajše »geodetski monitoring« razumemo skupino geodetsko-tehničnih nalog, ki vključujejo:

- postopke izvedbe geodetskih meritev,
- postopke analize meritev za oceno njihove kakovosti,
- postopke določitve-izračuna količin, ki jih lahko uporabimo za določitev sprememb geometrijskih lastnosti obravnavanega objekta oziroma okolja,
- postopke ugotavljanja in določanja premikov geodetskih točk, ki temeljijo na postopkih statističnega preizkušanja domnev s postopki t. i. geodetske deformacijske analize.

Terminologija na področju geodetskega monitoringa se spreminja z razvojem tehnologije oziroma s pojavljanjem novih merskih senzorjev, instrumentov in tehnologij. Na področju terminologije je zanimivo, da se je v zadnjih letih začelo eksplicitno navajati, da gre za »geodetske« metode določanja premikov, kar pomeni, da gre v tem primeru za uporabo uveljavljenih geodetskih merskih tehnologij, metod geodetskih meritev ter uporabo uveljavljenih postopkov obdelave in vrednotenja kakovosti meritev in vseh na osnovi meritev računsko določenih količin.

2.2 Predstavitev geodetskega določanja in ugotavljanja premikov

Geodetske metode določanja premikov so tiste, pri katerih ugotavljamo premike na osnovi geodetskih meritev in geodetskih postopkov računske obdelave podatkov meritev. Geodetske meritve praviloma izvajamo z natančnimi geodetskimi instrumenti ter tako, da imamo možnost ocene kakovosti meritev in vseh izračunanih vrednosti. Meritve znane kakovosti so osnova za zanesljivo določitev premikov objekta oz. sprememb njegove geometrije.

Druga značilnost geodetskega določanja premikov je, da ugotavljamo in določamo točkovne premike – določamo premike točk, ki predstavljajo obravnavani objekt. Alternativa geodetskemu določanju premikov so metode daljinskega zaznavanja (fotogrametrija, terestrično, zračno in mobilno lasersko skeniranje, opazovanje Zemlje iz Vesolja).

Tretja značilnost geodetskega določanja premikov je, da neposredno določamo premike točk obravnavanega objekta, na katerih je postavljen geodetski merski instrument (teodolit, tahimeter, sprejemnik GNSS) ali pomožni pribor (merski reflektor, merska tarča, nivelmanska lata...) – gre za t. i. kontaktne metode določanja premikov.

Postopki geodetskega določanja premikov praviloma (v okviru zmožnosti uporabljenih tehnologij in obstoječih teorij) zagotavljajo zanesljive rezultate – zagotavljajo pravilnost ugotovitev o velikosti in smeri premikov.

Kot ključno kategorijo pri geodetskem monitoringu obravnavamo razmerje med spremembo merjenih vrednosti in/ali spremembo računsko določenih vrednosti med posameznimi terminskimi izmerami in natančnostjo določitve teh sprememb.

Že na tem mestu omenjamo, da moramo za zanesljivo določitev premikov zagotoviti identičen geodetski datum za celotno obdobje izvajanja geodetskega monitoringa. Pod terminom geodetski datum razumemo način povezave obravnavanega objekta s sistemom meritev za ugotavljanje premikov. Identičen geodetski datum pomeni, da mora biti v sistemu meritev zagotovljena določena množica količin, ki skozi čas ne spreminjajo svojih vrednosti. To pomeni, da moramo imeti v sistemu meritev točke, ki mirujejo in ne spremenijo koordinat skozi celotno obdobje izvajanja meritev ali točke, katerih koordinate se spreminjajo za znane vrednosti.

2.3 Objekt geodetskega monitoringa

Z geodetskim monitoringom ugotavljamo oz. določamo premike naravnih (zemeljski plazovi, območja, ki se premikajo zaradi različnih dejavnikov...) in grajenih objektov (stavbe, infrastrukturi, industrijski objekti...), ki ob zmanjšani stabilnosti – premikanju lahko predstavljajo nevarnost za življenje ljudi in premoženja.

Za uspešno izvedbo geodetskega monitoringa je treba poznati sam objekt in okvirno tudi vzroke, ki povzročajo premike objekta ter velikost oz. hitrost in smer pričakovanih premikov.

Geodetski monitoring lahko razumemo tudi kot nalogo ugotavljanja in določanja sprememb geometrijskih lastnosti objekta. Zaradi narave geodetskih meritev v geodetski monitoring ne moremo vključiti celotnega objekta, zato ga predstavimo z nekaj značilni točkami (točkami, ki ustrezno predstavljajo objekt in njegovo obnašanje). Geodetske točke, ki predstavljajo obravnavani objekt, imenujemo kontrolne točke.

Druga skupina točk pri geodetskem monitoringu so referenčne točke. To so geodetske točke, locirane na stabilnem območju v bližini obravnavanega objekta. Te točke naj se ne bi premikale oz. njihove koordinate naj se skozi čas ne bi spreminjale. Referenčne točke, ki se ne premikajo ali se premikajo za znane vrednosti, v praksi zagotavljajo identičen geodetski datum skozi celotno obdobje izvajanja geodetskega monitoringa.

Obe skupini geodetskih točk (referenčne in kontrolne točke) morata biti stabilizirani tako, da bo omogočena kakovostna izvedba predvidenih meritev na dolgi rok.

Za dolgoročno izvajanje geodetskega monitoringa je treba zagotoviti, da so preprečeni vsi premiki referenčnih točk. V primeru, ko premikov referenčnih točk ne moremo preprečiti, jih je treba določiti na enak način kot premike kontrolnih točk.

Pri postavitvi sistema za geodetski monitoring je ključno sodelovanje geodeta in projektanta ali geologa. Projektant in geolog zagotavljata okvir za oceno nevarnosti, ki jo predstavlja obravnavani objekt, geodet zagotavlja zanesljive podatke za odločanje.

Sodelovanje med geodetom in projektantom/geologom je potrebno tudi zaradi poznavanja in razumevanja projektnih zahtev in geoloških razmer, kar je potrebno za določitev lokacij, območij oz. točk, kjer so premiki in deformacije najbolj verjetni ali kritični za stabilnost in varnost objekta.

Sodelovanje s projektantom oz. geologom omogoča geodetu odločitev glede izbire ustrezne merske opreme in metode meritev, ki bodo ustrezale specifičnim razmeram in zahtevam glede geodetskega monitoringa.

2.4 Izbira merske opreme in metode meritev

V okviru načrtovanja geodetskega monitoringa je treba poznati objekt (naravni, grajeni) in lastnosti objekta oz. območja in vzroke, ki povzročajo premike (zemeljski plaz, obremenitve grajenega objekta...). Pri izbiri merske opreme in metode meritev je potrebno opredeliti način izvajanja meritev oz. ali bodo meritve občasne/periodične oz. bodo potekale stalno/neprekinjeno.

Na osnovi narave premikov (posedanje, horizontalni premiki, zdrsi, zasuki), pričakovane velikosti, hitrosti in smeri premikov ter načina izvajanja meritev geodet izbere vrsto meritev (npr. tahimetrične meritve, nivelmanske meritve, meritve GNSS), ki ustrezajo projektnim zahtevam, razmeram v naravi, pričakovanim premikom ter potrebno natančnost meritev.

Geodetsko mersko opremo predstavljajo merski instrumenti in pomožni pribor. Geodetski instrumenti, ki so primerni za izvajanje nalog geodetskega monitoringa, so elektronski tahimetri, instrumenti GNSS (Global Navigation Satellite System), nivelirji, te tehnologije ne obravnavamo v okviru teh smernici...

Izbrana merska oprema mora biti ustrezne natančnosti, redno kalibrirana in preizkušena. Tudi ves pomožni pribor (merski reflektorji, stativi, podnožja, nosilci reflektorjev, nivelmanske late, merske tarče, termometri, barometri, psihrometri, higrometri...), mora biti ustrezne kakovosti.

2.5 Izvedba meritev

Geodetski monitoring običajno vključuje izvajanje periodičnih ali neprekinjeno potekajočih geodetskih meritev v daljšem časovnem obdobju. V obeh primerih je pomembno, da so meritve v vsaki terminski izmeri izvedene dosledno in po enakih postopkih. S tem je zagotovljena primerljivost podatkov meritev skozi čas oz. med posameznimi terminskimi izmerami.

Med izvajanjem meritev moramo spremljati vrednosti količin, ki vplivajo na meritve (temperatura, zračni tlak, relativna vlažnost zraka). Za vpliv teh vrednosti popravimo izmerjene vrednosti meritev.

Ker so meritve (izmerjene vrednosti) osnovni podatki, na katerih temeljijo vsi zaključki glede stabilnosti obravnavanega objekta/območja, morajo biti meritve izvedene z največjo skrbnostjo in po načelih dobre prakse na področju geodetskega monitoringa.

Pri izvedbi meritev je treba poskrbeti tudi za varnost pri delu, saj velikokrat ugotavljamo premike v težavnih ali nevarnih okoliščinah, npr. na gradbiščih, na strmih pobočjih, v bližini vodnih teles...

2.6 Obdelava, izravnava in analiza podatkov meritev

Kot smo omenili, moramo podatke meritev popraviti za vse znane vplive na meritve in tako odstraniti ali zmanjšati sistematične vplive, kar je nujni pogoj za zagotovitev primerljivosti podatkov meritev v različnih časovnih obdobjih.

Meritve je treba analizirati tudi glede prisotnosti grobih pogreškov. Pri tem uporabljamo postopke analize ponovljenih meritev in/ali postopke preverjanja izpolnjevanja pogojev, ki jih morajo izpolniti podatki meritev.

Ustrezno pripravljene podatke meritev nato izravnamo v geodetski mreži po metodi najmanjših kvadratov (MNK). Rezultat izravnave po MNK so koordinate geodetskih točk, s pripadajočimi variančno-kovariančnimi matrikami za vsako terminsko izmero.

Koordinate geodetskih točk s pripadajočimi variančno-kovariančnimi matrikami koordinat so količine, ki so vključene v postopke ugotavljanja in določanja premikov oz. v postopke deformacijske analize.

Ponavljamo, da morajo biti koordinate vseh geodetskih točk v vseh terminskih izmerah določene v istem koordinatnem sistemu in istem geodetskem datumu. To pomeni, da morajo biti koordinate točk, katerih premike določamo, v vseh izmerah določene ob nespremenjenih koordinatah referenčnih točk.

2.7 Zmožnosti in omejitve tehnologij in meritev pri določanju premikov

V preteklosti je bilo ugotavljanje in določanje premikov ena najbolj zahtevnih inženirsko tehničnih nalog v geodeziji. Težavo je predstavljalo predvsem razhajanje med potrebami po določitvi (po velikosti dokaj majhnih) premikov in tehnološko dosegljivo kakovostjo meritev. Težavo je predstavljala tudi omejena zmožnost obdelave podatkov meritev.

V današnjem času je s kakovostjo meritev manj težav, saj imamo na voljo natančne geodetske instrumente in pribor. Na voljo je tudi dovolj programskih rešitev za obdelavo podatkov geodetskih meritev.

Še vedno pa je težava, da na trgu ni na voljo namenske programske opreme za potrebe geodetskega monitoringa. To težavo lahko ustrezno usposobljeni strokovnjaki rešijo tako, da si programske rešitve za te namene pripravijo tudi sami. Seveda pa je pri tem delu potrebna ustrezna usposobljenost in previdnost.

Pri izvedbi deformacijske analize je tudi treba poskrbeti za ustrezno dokumentiranost uporabljenih postopkov deformacijske analize in uporabljenih programskih rešitev.

V novejšem času predstavlja določeno težavo pojavljanje vedno novih merskih tehnologij in senzorjev, združevanje podatkov meritev, pridobljenih z različnimi merskimi instrumenti in senzorji, njihova stroga skupna obdelava ter interpretacija kakovosti podatkov meritev, kot tudi vseh računsko določenih količin.

2.8 Zmožnosti in omejitve teorij pri določanju premikov

Postopke ugotavljanja in določanja premikov v okviru geodetskega monitoringa imenujemo s skupnim imenom »deformacijska analiza«. Metode deformacijske analize so se začele razvijati v 60-ih letih pr. st., kmalu po pojavu elektronskih računalnikov in računalniških programov za izravnavo geodetskih meritev. Oboje je močno izboljšalo in pospešilo obdelavo in analizo podatkov meritev. Pravi razmah so metode doživele v 70-ih letih pr. stoletja, ko so se v geodetsko izmero začeli vključevati tudi elektronski razdaljemerji, ki so omogočili izvedbo dolžinskih meritev. Kombinacija kotnih in dolžinskih meritev je namreč omogočila rešitev klasičnih nalog določitve koordinat z veliko manj težavami, kot je bilo to mogoče samo na osnovi kotnih meritev.

Navedeno je omogočilo določitve koordinat z visoko natančnostjo, strogi izračun natančnosti in zanesljivosti meritev in računsko dobljenih rezultatov, kar je bila osnova za razvoj metod deformacijske analize. Tako je nastalo več postopkov deformacijske analize, ki so dobili imena po univerzah, na katerih so bili razviti. Tako imamo metode deformacijske analize Hannover, München, Delft, Karlsruhe, Fredericton. Kasneje se je tem petim metodam pridružilo še nekaj metod, na primer metode Caspary, Mihajlović, robustne metode, metode, ki temeljijo na postopkih linearnega programiranja...

Vsem metodam je skupno, da temeljijo na izravnavi meritev v geodetski mreži in zahtevajo določitev koordinat in informacij o natančnosti referenčnih in kontrolnih točk v vseh terminskih izmerah v istem geodetskem datumu. Meritve naj bi bile tudi izvedene z istimi merskimi instrumenti (instrumenti enake natančnosti) in po istem načrtu meritev (isti geometriji geodetske mreže). Na ta način naj bi dobili rezultate (koordinate točk) in pripadajoče variančno-kovariančne matrike koordinat točk, ki se nanašajo na isti geodetski datum in isti sistem meritev, kar naj bi bilo zagotovilo, da so dobljeni rezultati meritev in računsko določenih količin med seboj primerljivi. Osnovna zahteva metod deformacijske analize je namreč, da med seboj lahko primerjamo samo količine, ki imajo enake statistične lastnosti (enake pričakovane vrednosti in enako disperzijo, ki pa so t. i. datumsko odvisne količine).

Vhodni podatek v postopke deformacijske analize so tako koordinate točk in njim pripadajoče variančno-kovariančne matrike, določene v istem koordinatnem sistemu in istem geodetskem datumu. Isti geodetski datum določajo koordinate točk, ki so v vseh terminskih izmerah enake. Glede na to, da pa imamo opravka z nalogo določanja premikov, je za pričakovati, da se bodo točke, ki so predmet geodetskega monitoringa, tako referenčne kot tudi kontrolne, premikale v času, kar bo oteževalo (v določenih primerih tudi onemogočilo) izvedbo geodetskega monitoringa.

Teorije in interpretacije premikanja točk, ki so v ozadju geodetskega monitoringa, bo zato treba včasih tudi ustrezno prilagoditi, predvsem takrat, ko bo prišlo do znatnih sprememb v legi referenčnih točk. V takšnih primerih bo treba poiskati načine, s katerimi bi geodetski datum tekoče terminske izmere, kolikor je mogoče, izenačili oz. približali geodetskemu datumu predhodnih izmer. V takšnih primerih je treba ustrezno prilagoditi tudi vsa merila kakovosti določitve koordinat (variančno-kovariančne matrike koordinat) in tudi postopke ugotavljanja premikov. Vse te prilagoditve morajo biti tudi vključene v tehnična poročila o geodetskem monitoringu.

Postopki, ki so v ozadju postopkov zagotovitve identičnega geodetskega datuma, ko imamo opravka s premikanjem referenčnih točk, zaradi kompleksnosti in obsežnosti, presegajo namen in obseg teh smernic. So pa ti postopki opisani in na voljo v strokovni literaturi.

2.9 Osnove geodetskega ugotavljanja in določanja premikov

Ker na tržišču ni na voljo komercialne programske opreme za potrebe geodetskega monitoringa, si jo moramo, kot izvajalci tovrstnih dejavnosti, izdelati sami. Zaradi nedoslednosti, ki se pojavljajo pri geodetskem monitoringu v praksi, predstavljamo v nadaljevanju nekaj osnovnih korakov izračuna količin, ki so ključne pri ugotavljanju in določanju premikov.

Predstavljene osnovne relacije med količinami, ki jih srečamo pri ugotavljanju in določanju premikov, lahko služijo kot podlaga za izdelavo programskih orodij za ugotavljanje in določanje premikov geodetskih točk.

Pogoj za ugotavljanje premikov so, kot smo že navedli, kakovostne meritve, obdelane in izravnane na običajen način z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov, kakovost meritev in računsko pridobljenih rezultatov je ustrezno ovrednotena. Vse naštetu vključuje običajne postopke izvedbe, obdelave in analize meritev in računsko pridobljenih količin, ki jih uporabljamo v geodeziji.

Za ugotavljanje premikov moramo imeti meritve, opravljene v več terminskih izmerah. V vsaki terminski izmeri moramo meritve izravnati v geodetski mreži, ob istem geodetskem datumu. Po ugotovitvi, da so meritve in računsko pridobljene količine glede geodetskega datuma in po kakovosti ustrezne, začnemo s postopkom ugotavljanja in določanja premikov.

Pri določanju premikov imamo dve možnosti:

- določitev premika na osnovi analize spremembe posameznih koordinat ali
- določitev premika na osnovi spremembe lege točke v dvo- oz., trirazsežnem prostoru.

Obe možnosti predstavljamo v nadaljevanju.

Pred začetkom predstavitve postopka določitve premika ponovno poudarjamo, da so koordinate geodetskih točk odvisne od geodetskega datuma geodetske mreže, v katerem so določene. Zato je ključno, da smo v vseh terminskih izmerah določili koordinate vseh točk v istem (identičnem) geodetskem datumu.

2.9.1 Določitev premika na osnovi sprememb posameznih koordinat

Spremembo/razliko koordinat med terminskima izmerama lahko, če so določene v identičnem geodetskem datumu, obravnavamo kot premik točke.

Za predstavitev osnovne ideje, kdaj razumeti spremembo koordinate, kot premik, obravnavamo spremembo $dx_{k(i+1,i)}$ koordinate x_k točke k , ki smo jo določili v (i) –ti in $(i+1)$ – terminski izmeri. Imamo torej koordinati $x_{k(i)}$ in $x_{k(i+1)}$ točke k , sprememba–razlika teh koordinat $dx_{k(i+1,i)}$ med terminskima izmerama je:

$$dx_{k(i+1,i)} = x_{k(i+1)} - x_{k(i)}$$

Za ugotovitev ali sprememba $dx_{k(i+1,i)}$ koordinate x_k predstavlja tudi premik, spremembo koordinate $dx_{k(i+1,i)}$ primerjamo s pripadajočim standardnim odklonom $\sigma_{dx_{k(i+1,i)}}$.

Da bi lahko z veliko gotovostjo trdili, da sprememba koordinate $dx_{k(i+1,i)}$ predstavlja premik, mora biti sprememba koordinate $dx_{k(i+1,i)}$ od 3 do 20 krat večja od pripadajočega standardnega odklona $\sigma_{dxk(i+1,i)}$:

$$3 < \frac{dx_{k(i+1,i)}}{\sigma_{dxk(i+1,i)}} < 20$$

Oziroma veljati mora:

$$3 \cdot \sigma_{dxk(i+1,i)} < dx_{k(i+1,i)} < 20 \cdot \sigma_{dxk(i+1,i)}$$

Poleg te, dokaj grobe ocene, ali gre pri spremembi koordinate dejansko za premik ali ne, imamo, poleg razmerja med spremembo koordinate in standardnega odklona spremembe koordinate, na voljo tudi bolj stroge postopke, ki temeljijo na statističnem preizkušanju domnev, ki jih navajamo v nadaljevanju.

2.9.2 Določitev premika na osnovi spremembe lege

Namesto ugotavljanja in določanja premika na osnovi sprememb posameznih koordinat lahko obravnavamo tudi spremembo lege točke v eno-, dvo- ali trirazsežnem koordinatnem sistemu. V enorazsežnem prostoru je sprememba lege točke, kar sprememba koordinat točke, v dvo- in trirazsežnem prostoru je sprememba lege dana kot dolžina vektorja spremembe lege oz. spremembe koordinat točke med terminskima izmerama.

Odločitev, ali gre za premik je sedaj utemeljena z razmerjem med velikostjo (dolžino) premika

$\Delta Pj_{k(i+1,i)}$, $j = 1, 2, 3$, v eno- ($j = 1$), dvo- ($j = 2$) ali trirazsežnem ($j = 3$) koordinatnem sistemu

in standardnim odklonom velikosti (dolžine) premika $\sigma_{\Delta Pjk(i+1,i)}$, $j = 1, 2, 3$ med terminskima izmerama.

Količnik med velikostjo premika $\Delta Pj_{k(i+1,i)}$, $j = 1, 2, 3$ in pripadajočim standardnim odklonom

$\sigma_{\Delta Pjk(i+1,i)}$, $j = 1, 2, 3$ naj bi bil tudi v tem primeru med 3 in 20:

$$3 < \frac{\Delta Pj_{k(i+1,i)}}{\sigma_{\Delta Pjk(i+1,i)}} < 20, j = 1, 2, 3$$

Način določitve spremembe lege točke $\Delta P_{jk(i+1,i)}$, $j = 1, 2, 3$ in pripadajočega standardnega odklona premika $\sigma_{\Delta P_{jk(i+1,i)}}$, $j = 1, 2, 3$ v eno-, dvo- in trirazsežnem koordinatnem sistemu bomo podrobneje predstavili v nadaljevanju.

Na splošno lahko rečemo, da je naloga geodetskega monitoringa težavna in zahtevna naloga ravno zaradi zahteve, da moramo za določitev premikov zagotoviti identičen geodetski datum geodetske osnove (geodetske mreže) v vseh terminskih izmerah. Pri dolgotrajnih meritvah ali pri zelo velikih objektih je lahko izpolnitev te zahteve težko izvedljiva in lahko tudi onemogoči kakovostno izvedbo geodetskega monitoringa.

Čeprav je naloga geodetskega monitoringa usmerjena v ugotavljanje in določanje premikov, pa je ena od ključnih nalog geodetskega monitoringa ugotovitev (potrditev) stabilnosti referenčnih točk oziroma zagotovitev identičnega geodetskega datuma geodetske mreže, v katerem določamo premike.

Za pridobitev zanesljivih rezultatov geodetskega monitoringa je tako ključnega pomena, da se referenčne točke skozi čas se ne premikajo, da niso podvržene naravnim in drugim dejavnikom, ki vplivajo na njihovo lego. Ko je premikanje referenčnih točk neizogibno dejstvo in ga ne moremo preprečiti, moramo za zagotovitev identičnega geodetskega datuma v vseh terminskih izmerah določiti in upoštevati znane premike referenčnih točk ter tako zagotoviti zanesljivo določitev premikov kontrolnih točk.

2.10 Dokumentiranje postopkov in ugotovitev geodetskega monitoringa

Postopke meritev, obdelavo podatkov meritev, izračun koordinat točk in ugotovitve o stabilnosti oz. premikih točk je treba dokumentirati v tehničnih poročilih, ki morajo biti jasna in razumljiva.

V vseh fazah dela je pomembno upoštevati veljavno dobro prakso in predpise z drugih področij, kot je npr. gradbeništvo, geotehnika, upravljanje kritične infrastrukture..., ki se nanašajo na geodetski monitoring.

Pomembno je poskrbeti, da so vsi podatki meritev pravilno arhivirani za kasnejšo morebitno uporabo. To vključuje shranjevanje surovih podatkov meritev, rezultate obdelave podatkov meritev, rezultate računskih postopkov in poročil v ustrezni obliki in dostopnih naročniku.

Kot smo omenili, na tržišču ni splošno dostopne namenske programske opreme za geodetski monitoring, ki bi vključevala stroge postopke deformacijske analize. V praksi tako največkrat uporabljamo kombinacijo komercialne programske opreme za izravnavo meritev in programsko opremo lastne izdelave za ugotavljanje in določanje premikov.

Ker so naloge geodetskega monitoringa velikokrat povezane z določenimi nevarnostmi in tveganji, je pomembno, da so vsi postopki ustrezno dokumentirani, na katerih temelji izdelava lastne programske opreme.

Geodetski monitoring je obsežen proces, ki zahteva dosledno in strokovno ravnanje v vseh fazah dela. Le tako naj bi se zmanjšala možnost napak in zagotovila kakovostna izvedba, s čimer bo dosežen osnovni namen in cilj, to je pridobitev zanesljivih ugotovitev glede sprememb geometrije obravnavanega objekta in z njim povezanimi nevarnostmi za življenje ljudi in premoženja.

2.11 Zakonodaja in standardi na področju geodetskega monitoringa

Področje geodetskega monitoringa ni urejeno z mednarodno sprejetimi standardi. V posameznih državah pa je sprejetih nekaj priporočil za geodetski monitoring, ki so običajno specifično namenjena izvajanju točno določene skupine nalog.

Glede na to, da je geodetski monitoring povezan s kakovostno izvedbo meritev in analizo podatkov, je pomembno upoštevati standarde, ki zagotavljajo kakovost izvedbe teh nalog.

V nadaljevanju navajamo nekaj standardov, ki jih deloma lahko uporabimo tudi za geodetski monitoring.

2.11.1 Standardi ISO

ISO 9001 Standard za vodenje kakovosti: lahko ga uporabimo tudi za zagotavljanje kakovosti pri praktično vseh geodetskih storitvah.

ISO 17123 Preverjanje natančnosti optičnih, elektronskih in drugih merilnih instrumentov. Standard določa metode za preverjanje natančnosti geodetskih instrumentov, kot so elektronski tahimetri, sprejemniki GNSS, nivelirji in drugi instrumenti, ki se uporabljajo v geodetskem monitoringu.

ISO 19157 Kakovost geoinformacij: standard opredeljuje zahteve in smernice za zagotavljanje kakovosti geoinformacij, kar vključuje natančnost geodetskih podatkov, kar je ključno za zanesljive rezultate geodetskega monitoringa.

2.11.2 Evropski standardi

EN 1997-1:2004 (Eurocode 7 – Geotehnična projektiranja): standard določa smernice za geotehnične raziskave, vključno z monitoringom premikov in deformacij tal.

EN 1992-1-1:2004 (Eurocode 2 – Projektiranje betonskih konstrukcij): standard obravnava spremljanje deformacij in obremenitev betonskih konstrukcij, kar so pogosto naloge v okviru geodetskega monitoringa pri večjih infrastrukturnih projektih.

2.11.3 Smernice za geodetske meritve GNSS

IGS (International GNSS Service) – IGS ponuja smernice in priporočila za uporabo GNSS tehnologije, ki so ključne pri geodetskem monitoringu.

Navodila za RTK/RTN meritve – Real-time kinematična (RTK) in Real-time mrežna (RTN) tehnologija sta lahko delno vključeni v geodetski monitoring, ker omogočata visoko natančnost pozicioniranja v realnem času.

2.11.4 Druge relevantne smernice

Mednarodna zveza geodetov (FIG) je 2020 izdala dokument *Models and terminology for the analysis of geodetic monitoring observations*, avtorjev M. Welscha in O. Heuneckeja, ki predstavlja koncepte in terminologijo s področja geodetskega monitoringa, ki je nastal v okviru FIG delovne skupine 6.1 Deformation Monitoring in je na voljo na spletnem naslovu FIG (<https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub25/figpub25.asp>)

Ker torej nimamo na voljo standardov za geodetski monitoring, lahko standarde, ki so sicer namenjeni drugim dejavnostim na področju geodezije in drugih strok, ki se ukvarjajo z ugotavljanjem premikov – stabilnosti naravnega in grajenega okolja, smiselno prilagodimo potrebam izvedbe geodetskega monitoringa. Za geodetski monitoring je namreč ključno, da se upoštevajo razpoložljivi standardi in priporočila, ki zagotavljajo natančnost, točnost in zanesljivost vseh opravil v okviru geodetskega monitoringa. Na tak način je zagotovljena sledljivost in kakovost vseh dejavnosti, ki so ključne pri spremljanju stabilnosti objektov, ki lahko predstavljajo nevarnost za življenje in premoženje ljudi.

3 Vzpostavitev sistema za geodetski monitoring

Kot smo omenili, je geodetski monitoring zahtevna geodetska naloga, ki zahteva pravilno izvedbo meritev z ustreznimi geodetskimi merskimi postopki, instrumenti in tehnologijami, ustrezno obdelavo, vrednotenje in interpretacijo meritev ter ustrezno izvedbo postopkov deformacijske analize.

Sistem za geodetski monitoring tako sestavljajo:

- geodetska mreža, namensko vzpostavljena za ugotavljanje in določanje premikov,
- geodetski merski instrumenti ustrezne kakovosti,
- metode meritev, ki omogočajo pridobitev podatkov meritev ustrezne natančnosti in zanesljivosti,
- postopki obdelave meritev ter izvedba postopkov deformacijske analize.

V tem poglavju predstavljamo skupne značilnosti geodetskih mrež za geodetski monitoring, v poglavjih v nadaljevanju pa ločeno obravnavamo instrumente, pribor, izvedbo in obdelavo meritev ter postopke za ugotavljanje in določitev premikov v eno-, dvo- in trirazsežnem koordinatnem sistemu.

3.1 Geodetska mreža za geodetski monitoring

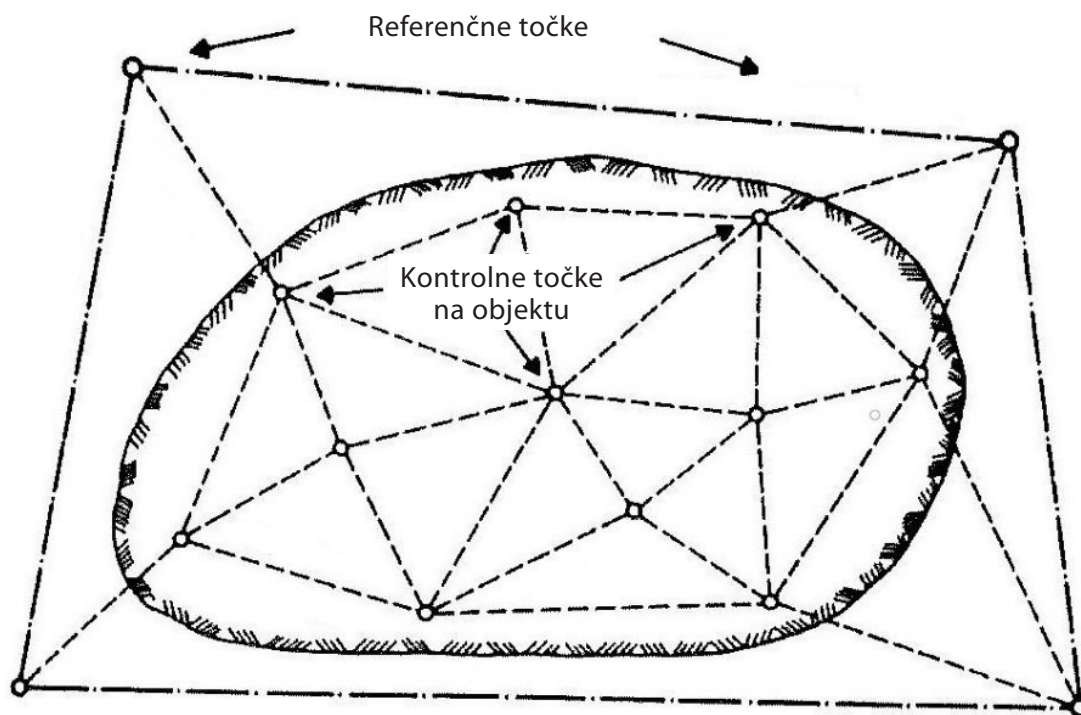
Osnova sistema za geodetski monitoring je namensko vzpostavljena geodetska mreža. Geodetsko mrežo za geodetski monitoring v osnovi sestavljata dve skupini geodetskih točk:

- referenčne točke v okolici obravnavanega objekta/območja,
- kontrolne točke na objektu.

Referenčne točke so točke, ki zagotavljajo geodetsko osnovo za določanje premikov. Locirane naj bodo čim bližje objektu/območju, katerega stabilnost ugotavljamo ter hkrati tudi dovolj oddaljene, da morebitno premikanje objekta/območja ne vpliva na stabilnost teh točk.

Kontrole točke na objektu naj omogočajo pridobitev podatkov o premikih oz. stabilnosti obravnavanega objekta.

Nekatere lastnosti obeh vrst geodetskih točk bomo bolj podrobno predstavili v nadaljevanju.



Slika: Shematska predstavitev geodetske mreže za geodetski monitoring

Glede na merjene količine ločimo naslednje vrste geodetskih mrež:

- nivelmanske mreže,
- geodetske mreže trigonometričnega višinomertva,
- trigonometrične mreže, v katerih merimo samo horizontalne smeri ali horizontalne kote
- trilateracijske mreže, v katerih merimo samo dolžine,
- kombinirane (triangulacijsko-trilateracijske) mreže, v katerih merimo horizontalne smeri in/ali kote in dolžine – v današnjem času, ko so sodobni elektronski tahimetri dostopni, uporabljamo predvsem te vrste geodetskih mrež,
- samostojne mreže GNSS,
- kombinirane terestrične in mreže GNSS.

Geodetska mreža mora zagotoviti zanesljivo določitev koordinat referenčnih točk in kontrolnih točk na objektu, za kar je treba zagotoviti:

- v geodetski mreži naj bo dovolj povezav/vizur med geodetskimi točkami,
- po možnosti naj bi bila zagotovljena neposredna medsebojna povezava referenčnih točk,
- vzpostaviti moramo dovolj povezav med referenčnimi in kontrolnimi točkami na objektu,
- v izjemnih primerih lahko namesto geodetske mreže vzpostavimo tudi priklepni poligon, zaključeni poligon, v predorih slepi poligon, ki ga praviloma nadgradimo v dvojni poligon, sestavljen iz geodetskih četverokotnikov.

Pred začetkom geodetskega monitoringa je treba vedeti, katere premike je potrebno določiti: višinske, horizontalne ali prostorske in kakšna je njihova pričakovana velikost v celotnem obdobju izvajanja geodetskega monitoringa. Predvideti je treba časovni interval med posameznimi terminskimi izmerami.

Pred vzpostavitvijo sistema geodetskega monitoringa je potrebno izdelati projekt geodetske mreže. Osnova za vse naslednje korake pa je potrebna/zahtevana natančnost določitve višin/koordinat točk, ki izhaja iz pričakovane velikosti premikov.

Nadalje je treba določiti vrsto mreže, ali bo mreža samo višinska/nivelmanska mreža, ali bo kombinirana horizontalna mreža, ki bo vključevala trigonometrično višinomerstvo, ali bo samostojna mreža GNSS, ali bo kombinirana terestrična in GNSS mreža...

Pri projektiranju si pomagamo s postopki t. i. predhodne analize meritev, uporabimo simulacije meritev, lahko opravimo t. i. predhodno izravnavo meritev, s katero ugotovimo ali lahko dosežemo zahtevano natančnost določitve koordinat. V poštev pride tudi optimizacija geodetske mreže glede na zahtevano natančnost in zanesljivost.

V fazi projektiranja moramo v geodetski mreži predvideti dovolj veliko število nadštevilnih meritev ter geodetsko mrežo analizirati glede notranje in zunanje zanesljivosti.

Meritve v geodetski mreži izvedemo z instrumenti in priborom, ki omogočajo doseganje želene/potrebne natančnosti in točnosti meritev. Natančnost/točnost meritev izhaja iz potrebne natančnosti/točnosti določitve koordinat oziroma velikosti pričakovanih premikov.

Za doseganje potrebne natančnosti in točnosti meritev je treba opraviti meritve z ustrezno kakovostnimi instrumenti in priborom. Za nadzor nad pojavljanjem sistematičnih vplivov na meritve je treba spremljati okoliščine, v katerih opravljamo meritve in opraviti meritve tistih količin, katerih vpliv na merjene vrednosti lahko upoštevamo. Te količine so predvsem meteorološki parametri.

Metode meritev morajo omogočati nadzor nad pojavom grobih pogreškov ter tudi zagotavljajo možnosti za zmanjšanje sistematičnih vplivov na podatke meritev. Izbira ustrezne metode meritev zahteva, ne samo dobro poznavanje instrumentov in pribora, temveč tudi teorije, na kateri temelji zanesljiva izvedba geodetskega monitoringa.

3.2 Določitev referenčnih točk

Referenčne točke so točke, ki zagotavljajo geodetski datum geodetske mreže skozi daljše časovno obdobje. Lokacije referenčnih točk je treba zato pazljivo izbrati. Koordinate referenčnih točk naj se ne bi spreminjale – stabilne naj bi bile celotno obdobje izvajanja geodetskega monitoringa. Če se izkaže, da referenčne točke niso stabilne, je treba ugotoviti njihove premike in jih upoštevati, ter tako zagotoviti identični geodetski datum skozi daljše časovno obdobje.

Lokacijo referenčnih točk naj določi geodet skupaj z geologom, fizično postavitve referenčnih točk (stabilizacijo) pa z gradbenikom oz. projektantom.

Za referenčne točke velja:

- predstavljajo referenčno osnovo geodetske mreže – zagotavljajo geodetski datum geodetske mreže,
- navadno so stabilizirane tako, da je mogoče prisilno centriranje instrumenta in pribora – z geodetskimi merskimi stebri ali s talnim jeklenim drogom,
- na vrhu merskega stebra je plošča iz nerjavečega jekla z vijakom za prisilno centriranje,
- na vrhu talnega jeklenega droga je navoj, ki omogoča enolično pritrditev nastavka/nosilca preciznega reflektorja (ko ne izvajamo meritev pa pokrovčka, ki ščiti navoj),
- na referenčnih točkah praviloma izvajamo geodetske meritve,
- v izravnavi meritev v geodetski mreži jih privzamemo kot dane točke,
- predhodno moramo ugotoviti njihov stabilnost oziroma ugotoviti in določiti njihove morebitne premike.

3.3 Določitev kontrolnih točk na objektu

Določitev geodetskih kontrolnih točk na objektu opravimo, glede na vrsto objekta, v sodelovanju s projektantom objekta ali geologom. Kontrole točke na objektu naj bi bile izbrane tako, da omogočajo pridobitev ključnih podatkov o stabilnosti objekta. Kontrolne točke na objektu so navadno nestabilne, v času spremljanja objekta se njihov položaj navadno spreminja.

Za kontrolne točke velja:

- so točke, ki predstavljajo obnašanje objekta,
- kontrolne točke na objektu so navadno nestabilne v času spremljanja objekta se njihovi položaji spreminjajo,
- število kontrolnih točk na objektu je odvisno od velikosti in geometrije objekta ter mora biti dovolj veliko, da ne izgubimo pomembnih informacij o premikih objekta,
- njihove lokacije/položaje izberemo skupaj s projektantom objekta ali geologom,
- stabilizirane naj bodo tako, da je mogoče enolično privitje nastavka/nosilca preciznega reflektorja (ko ne izvajamo meritev pa pokrovčka, ki ščiti navoj),
- navadno jih signaliziramo s preciznimi reflektorji,
- če se iz katerega koli razloga kontrolna točka na objektu uniči, jo nadomestimo z novo,
- navadno na njih ne izvajamo meritev,
- v izravnavi meritev jih privzamemo kot nove točke, po izravnavi dobijo popravke koordinat s pripadajočimi variančno-kovariančnimi matrikami.

Pravilna zasnova sistema za geodetski monitoring, to je vzpostavitev geodetske mreže, z dovolj povezavami med vsemi vrstami točk v mreži, pravilna razporeditev in izbira referenčnih točk, optimalna določitev kontrolnih točk, pravilna izvedba, obdelava, analiza in interpretacija meritev ter računsko dobljenih količin so osnova za zanesljivo ugotavljanje in določanje premikov.

4 Določitev višinskih premikov (določitev premikov v enorazsežnem koordinatnem sistemu)

Višinske premike lahko določimo na več načinov, odvisno od izbrane metode meritev in vrste geodetske mreže, v kateri bomo izravnali meritve.

Za določitev višinskih premikov imamo na voljo naslednje vrste meritev:

- geometrični nivelman,
- trigonometrično višinomerstvo,
- meritve GNSS.

Izbira metode meritev je odvisna od pričakovane velikosti premikov, iz te izhajajoče zahtevane/potrebne natančnosti določitve premikov, razgibanosti terena, velikosti geodetske mreže/objekta za spremljanje višinskih premikov, velikosti in oblike terena/objekta...

4.1 Vzpostavitev sistema za določanje višinskih premikov

Pred začetkom izvajanja geodetskega monitoringa je treba narediti projekt geodetskega monitoringa, v okviru katerega je treba določiti vrsto geodetske mreže in se odločiti, ali bo mreža samo višinska/nivelmanska mreža, ali bo kombinirana horizontalna in višinska mreža, ki bo vključevala trigonometrično višinomerstvo, določiti moramo vrsto meritev, potrebno je določiti časovni interval meritev v mreži... Kot smo že omenili, si pri projektiranju lahko pomagamo s t. i. predhodno analizo meritev, lahko uporabimo simulacijami meritev s t. i. predhodno izravnavo meritev, s katero ugotovimo, ali lahko dosežemo zahtevano natančnost določitve višin ter tudi optimizacija geodetske mreže.

Glede na izbran način določitve višinskih premikov izberemo način stabilizacije točk/reperjev:

- trigonometrično višinomerstvo:
 - referenčne in kontrolne točke so običajno stabilizirane z armiranobetonskimi merskimi stebri,
 - na vrhu stebra je plošča iz nerjavečega jekla z vijakom za prisilno centriranje,
 - vrh vijaka za prisilno centriranje iz nerjavečega jekla mora imeti obliko krogelnega odseka, na vrh katerega se nanaša višina,
 - na enolično določen vrh vijaka lahko postavimo nivelmansko lato ali izmerimo višino podnožja z globinskim merilom;
- geometrični nivelman:
 - referenčne in kontrolne točke so navadno stabilizirane s klasičnimi nizkimi reperji sodčaste oblike iz nerjavečega jekla,
 - obe vrsti točk sta lahko stabilizirani tudi s talnimi reperji z vrhom v obliki krogelnega odseka iz nerjavečega jekla (na vrhu talnega reperja ne smemo imeti luknjice za morebitno optično centriranje tahimetra),
 - na enolično določeno najvišjo točko reperja postavimo nivelmansko lato;
- meritve GNSS:
 - na osnovi meritev GNSS določamo koordinate v trirazsežnem koordinatnem sistemu, kjer je višina ena od komponent položaja.

V vseh primerih moramo vzpostaviti geodetsko mrežo, v kateri lahko opravimo zadostno število nadštevilnih meritev.

4.2 Geodetski datum in referenčne točke višinske geodetske mreže

V vseh vrstah geodetskih mrež je potrebno vzpostaviti referenčne točke, ki zagotavljajo geodetski datum za ugotavljanje in določanje premikov.

Pri tem velja:

- geodetski datum geodetske mreže določajo stabilne referenčne točke/reperji, ki morajo biti v celotnem času spremljanja stabilnosti objekta stabilne/i,
- njihove lokacije/položaje določimo skupaj z geologom ali geomehanikom,
- v izravnavi meritev v geodetski mreži privzamemo referenčne točke kot dane točke,
- njihovo stabilnost moramo v vsaki ponovni izmeri ugotoviti z metodami deformacijske analize,
- če je le možno, vzpostavimo za posamezen objekt vsaj 3 referenčne točke/reperje (ena zagotavlja s svojo konstantno višino višinsko izhodišče, dve dodatni točki predstavljata zavarovanje višinskega izhodišča),
- položaje referenčnih točk moramo izbrati/določiti tako, da so varni pred uničenjem (kar je tudi razlog za vzpostavitev dodatnih referenčnih točk).

4.3 Določitev kontrolnih točk na objektu

Kontrolne točke morajo biti izbrane tako, da predstavljajo obnašanje objekta, katerega premike ugotavljamo oz. določamo. Kontrolne točke določi skupaj s projektantom objekta ali geologom.

Pri tem velja:

- kontrolne točke/reperji na objektu so navadno nestabilne/i, predstavljajo obnašanje objekta, njihove višine se spreminjajo skozi čas,
- lokacije/položaje kontrolnih točk izberemo skupaj s projektantom objekta oz. ustreznim strokovnjakom (gradbenik, geomehanik, geolog...) ter tako, da bomo z izbranim merskim instrumentom in metodo meritev dobili meritve potrebne/ustrezne kakovosti,
- v izravnavi privzamemo kontrolne točke kot nove točke/reperje, po izravnavi dobijo višine in informacijo o natančnosti določitve višin,
- položaje kontrolnih točk/reperjev moramo tako izbrati, da so varni pred uničenjem.

4.4 Metode geodetske izmere za določitev višin točk

Glede na izbran način določitve višinskih premikov izberemo metodo izmere:

- trigonometrično višinomerstvo:
 - uporabno za geodetske mreže manjše velikosti (200 – 300 m) – pri večjih velikostih geodetske mreže postane vpliv vertikalne atmosferske refrakcije neobvladljiv – prevelik,
 - med referenčnimi točkami merimo višinske razlike obojestransko, med referenčnimi točkami in kontrolnimi točkami na objektu pa navadno enostransko,
 - če viziramo ročno, naredimo 3 ponovitve meritev zenitnih razdalj in poševnih dolžin v obeh krožnih legah, če viziramo samodejno s sistemom AVT (avtomatsko viziranje tarče), naredimo 7 ponovitev,
 - višino instrumenta oz. reflektorja izmerimo z globinskim merilom (glej točko 4.1.);
- geometrični nivelman:
 - pred niveliranjem opravimo preizkus nivelirja,
 - niveliramo obojestransko (tja in nazaj),
 - upoštevati moramo pravila za precizno niveliranje (višina vizure najmanj 0.5 m nad tlemi, največji odčitek na lati 2.8 m, dolžina vizure od 20 do 30 m, razlika dolžin spredaj-zadaj na stojšču manjša od 0.5 m, razlika vsot dolžin spredaj-zadaj v nivelmanski liniji do 1 m),
 - niveliramo po utrjeni površini, če niveliramo po mehki površini, nog stativa in žabe ne pohodimo preveč,
 - izogibamo se zaplatam asfalta,
 - temperiramo instrument in nivelmanski lati (2 minuti za 1 °C temperaturne razlike med instrumentom in okoljem),
 - niveliramo v primernih vremenskih pogojih,
 - če je le možno, se izogibamo strmim vzponom,
 - na latah čitamo po časovno simetričnem zaporedju čitanja ZSSZ (zadaj-spredaj-spredaj-zadaj), če uporabimo klasične kompenzacijske nivelirje,

- na letih lahko čitamo ZS (zadaj-spredaj), če uporabimo elektronske nivelirje,
- če uporabimo elektronske nivelirje, uporabimo vgrajene možnosti za spremljanje natančnosti odčitka in po vsaki meritvi spremljamo trenutni standardni odklon posamezne meritve, trenutni standardni odklon aritmetične sredine in trenutno razpršenost meritev,
- dovoljeno odstopanje pri niveliranju tja in nazaj je (d je dolžina nivelmanske linije v km)

$$\Delta_{dov} = 2 \cdot \sqrt{d + 0.04 \cdot d^2}$$

- dovoljeno odstopanje pri zapiranju nivelmanske zanke je

$$\Delta_{dov} = 1 \cdot \sqrt{d + 0.04 \cdot d^2}$$

- dovoljeno odstopanje pri niveliranju nivelmanskega vlaka med danima reperjema je

$$\Delta_{dov} = 1.5 \cdot \sqrt{d + 0.04 \cdot d^2}$$

- meritve GNSS:
 - na osnovi meritev GNSS določamo koordinate v trirazsežnem koordinatnem sistemu, kjer je višina ena od komponent položaja. Določitev višine je pri tovrstnih meritvah del naloge določitve koordinat, ki jo bomo predstavili v poglavju o določanju premikov v trirazsežnem koordinatnem sistemu.

Pri načrtovanju meritev v geodetski mreži za trigonometrično višinomerstvo, kot tudi v nivelmanski mreži poskrbimo, da bomo lahko opravili dovolj nadštevilnih meritev. Poleg meritev med referenčnimi in kontrolnimi točkami ter med kontrolnimi točkami moramo predvideti tudi neposredne meritve med referenčnimi točkami/reperji.

4.5 Instrumentarij in pribor pri določanju višin

Glede na izbran način določitve višinskih premikov izberemo instrumentarij in pribor:

- trigonometrično višinomerstvo:
 - elektronski tahimeter s $\sigma_{\text{ISO-THEO}} \leq 1''$ (ISO 17123-3), $\sigma_{\text{ISO-EDM}} \leq 1 \text{ mm}$; 1 ppm (ISO 17123-4) s poročilom o kalibraciji, ki naj ne bi bilo starejše od enega leta,
 - če izvedemo viziranje samodejno s sistemom AVT (avtomatsko viziranje tarče), izberemo elektronski tahimeter s $\sigma_{\text{ISO-THEO-AVT}} \leq 1''$ (ISO 17123-3),
 - precizni reflektorji z znanimi adicijskimi konstantami,
 - termometer, barometer, psihrometer/higrometer, globinsko merilo,
- geometrični nivelman:
 - digitalni ali klasični nivelir s $\sigma_{\text{ISO-LEV}} \leq 0.5 \text{ mm/km}$ dvojnega nivelmana (ISO 17123-2), s poročilom o kalibraciji, ki naj ne bi bilo starejše od enega leta,
 - invarne nivelmanske late s poročilom o kalibraciji, ki naj ne bi bilo starejše od enega leta,
 - žabe/podložke, stojala/podpirala za late, termometer.
- meritve GNSS:
 - sprejemnik in antena GNSS ustrezne kakovosti.

4.6 Postopek izračuna višin točk

Izračun višin točk je odvisen od vrste opravljenih meritev:

- trigonometrično višinomerstvo:
 - izračunamo sredine zenitnih razdalj in sredine poševnih dolžin in drugih pomožnih meritev,
 - vrednosti meritev popravimo za znane vplive (meteorološki vplivi),
 - višinske razlike med točkami izračunamo z uporabo ustreznih enačb (enostransko, dvostransko merjenje),
 - ocenimo a priori natančnost iz meritev;
- geometrični nivelman:
 - merjene višinske razlike nivelmanske linije med reperji popravimo za pogreške metra late, peto late, vpliv temperature,
 - razlike dvojnih merenj v nivelmanski linije in zapiranja zank morajo biti manjše od dovoljenega odstopanja,
 - ocenimo a priori natančnost iz razlik dvojnih meritev, zapiranja zank;
- meritve GNSS:
 - glej poglavje GNSS.

Ustrezno pripravljene podatke meritev višinskih razlik, v vseh primerih, po pravilih določitve uteži določimo uteži meritev, meritve izravnamo v geodetski mreži po metodi najmanjših kvadratov. Datum geodetske mreže v izravnavi določajo stabilne referenčne točke/reperji.

Rezultate testiramo glede na prisotnost grobih pogreškov po znanih postopkih:

- globalni test modela, da ugotovimo morebitno prisotnost grobih pogreškov v meritvah in/ali morebiti napačno določene uteži meritev,
- Baardova, Popeova, danska metoda za lociranje grobih pogreškov.

V višinskih mrežah s pričakovanimi majhnimi premiki bi morala biti natančnost določitve višin večja od enega milimetra oziroma standardni odklon določitve višin bi moral biti manjši od enega milimetra $\sigma_H \leq 1 \text{ mm}$.

4.7 Določitev višinskih premikov (določitev premikov v enorazsežnem prostoru)

Osnova za ugotavljanje premikov so višine točk, določene v posamezni terminski izmeri s pripadajočo informacijo o natančnosti. Razlika višin točk med posameznimi terminskimi izmerami nam skupaj z informacijo o natančnosti višine omogoča določitev premika med terminskima izmerama.

V (i) – ti terminski izmeri smo z izravnavo meritev določili vektor koordinat (višine) $\mathbf{x1}_{k(i)}$ točke k ter pripadajočo variančno-kovariančno matriko $\Sigma_{\mathbf{x1x1}k(i)}$:

$$\mathbf{x1}_{k(i)} = \begin{bmatrix} H_{k(i)} \end{bmatrix} \sim \Sigma_{\mathbf{x1x1}k(i)} = \begin{bmatrix} \sigma_{Hk(i)}^2 \end{bmatrix}$$

in v ($i+1$) – ti terminski izmeri vektor koordinat (višine) $\mathbf{x1}_{k(i+1)}$ točke k ter pripadajočo variančno-kovariančno matriko $\Sigma_{\mathbf{x1x1}k(i+1)}$:

$$\mathbf{x1}_{k(i+1)} = \begin{bmatrix} H_{k(i+1)} \end{bmatrix} \sim \Sigma_{\mathbf{x1x1}k(i+1)} = \begin{bmatrix} \sigma_{Hk(i+1)}^2 \end{bmatrix}.$$

Sedaj sestavimo skupni vektor koordinat–višin $\mathbf{x1}_{k(i+1,i)}$ točke k , določenih v obeh terminskih izmerah in temu vektorju pripadajočo variančno-kovariančno matriko $\Sigma_{\mathbf{x1x1}k(i+1,i)}$:

$$\mathbf{x1}_{k(i+1,i)} = \begin{bmatrix} \mathbf{x1}_{k(i)} \\ \mathbf{x1}_{k(i+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{k(i)} \\ H_{k(i+1)} \end{bmatrix} \sim \Sigma_{\mathbf{x1x1}k(i+1,i)} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\mathbf{x1x1}k(i)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_{\mathbf{x1x1}k(i+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{Hk(i)}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{Hk(i+1)}^2 \end{bmatrix}$$

Ker so višine, določene v obeh terminskih izmerah med seboj neodvisne, je variančno-kovariančna matrika $\Sigma_{\mathbf{x1x1}k(i+1,i)}$ skupnega vektorja koordinat $\mathbf{x1}_{k(i+1,i)}$ blok-diagonalna matrika.

Tako pripravljeni podatki so osnova za ugotavljanje in določitev premikov.

V nadaljevanju predstavljamo določitev višinskih premikov, glede na razmerje med velikostjo premika in premiku pripadajočega standardnega odklona, ki ga 1. primerjamo s primerno izbranim količnikom, ali 2. uporabimo v postopku statističnega preizkušanja domnev.

1. Ugotavljanje in določanje višinskih premikov na osnovi razmerja med spremembo višine in pripadajočega standardnega odklona

Sprememba višine točke k med $(i+1)$ –to in (i) –to terminsko izmero je

$$\Delta H_{k(i+1,i)} = H_{k(i+1)} - H_{k(i)}$$

Sprememba višine točke je enaka razliki višine točke med terminskima izmerama

$\Delta H_{k(i+1,i)} = d\mathbf{x}1k(i+1,i) = \Delta P1_{k(i+1,i)}$, zato je variančno-kovariančna matrika razlike višin

$$\Sigma_{d\mathbf{x}1k(i+1,i)}$$

(glej poglavje 2.9):

$$\Sigma_{d\mathbf{x}1k(i+1,i)} = \Sigma_{\Delta Hk(i+1,i)} = \Sigma_{\Delta P1k(i+1,i)}$$

Variančno-kovariančno matriko razlike – spremembe višine $\Delta P1_{k(i+1,i)}$ točke k določimo z uporabo zakona o prenosu varianc in kovarianc:

$$\Sigma_{\Delta P1k(i+1,i)} = \mathbf{J}_1 \cdot \Sigma_{\mathbf{x}1\mathbf{x}1k(i+1,i)} \cdot \mathbf{J}_1^T$$

kjer je:

$$\mathbf{J}_1 = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix}$$

in kakor smo navedli že zgoraj:

$$\Sigma_{\mathbf{x}1\mathbf{x}1k(i+1,i)} = \begin{bmatrix} \sigma_{Hk(i)}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{Hk(i+1)}^2 \end{bmatrix};$$

Variančno-kovariančna matrika $\Sigma_{\Delta P1k(i+1,i)}$ spremembe višine točke

$\Delta P1_{k(i+1,i)}$ vsebuje le varianco razlike višin točke, določene v obeh terminskih izmerah:

$$\Sigma_{\Delta P1k(i+1,i)} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta P1k(i+1,i)}^2 \end{bmatrix}$$

kjer je:

$$\sigma_{\Delta P1k(i+1,i)}^2 = \sigma_{Hk(i)}^2 + \sigma_{Hk(i+1)}^2$$

iz česar izhaja standardni odklon razlike višin točke:

$$\sigma_{\Delta P1k(i+1,i)} = \sqrt{\sigma_{Hk(i)}^2 + \sigma_{Hk(i+1)}^2} = \sigma_{\Delta Hk(i+1,i)}$$

Ko imamo izračunano razliko višin $\Delta P1_{k(i+1,i)}$ in pripadajoči standardni odklon

$\sigma_{\Delta P1k(i+1,i)}$, imamo za ugotovitev, ali gre pri spremembi višine točke za statistično značilen premik dve možnosti.

Ker v tem poglavju obravnavamo razmerje med velikostjo spremembe višine in pripadajočega standardnega odklona, trdimo, da je do premika prišlo, če je vrednost količnika med absolutno vrednostjo premika $|\Delta P1_{k(i+1,i)}|$ in standardnim odklonom $\sigma_{\Delta P1k(i+1,i)}$ premika večja od 3 oziroma, če velja:

$$\frac{|\Delta P1_{k(i+1,i)}|}{\sigma_{\Delta P1k(i+1,i)}} > 3$$

Če je vrednost gornjega količnika manjša od 3, ne moremo trditi, da je premik značilno večji od standardnega odklona (natančnosti) s katerim je določen.

Gornji način določanja in ugotavljanja premikov je sicer približen, kljub temu pa se v praksi izkaže kot dokaj uporaben in ga uporabljamo pri manj zahtevnih nalogah ugotavljanja in določanja premikov.

2. Ugotavljanje in določanje višinskih premikov s preizkušanjem domnev o statistično značilnih premikih

Kot bolj strog postopek določanja premikov uporabimo postopek preizkušanja domnev, pri katerem izberemo stopnjo značilnosti testa α , postavimo ničelno in alternativno domnevo, izračunamo vrednost testne statistike $T1$, ki jo primerjamo s kritično vrednostjo $T1_{krit}$, in sprejmemo odločitev o premiku glede na postavljeno ničelno domnevo.

V tem primeru spet uporabimo razmerje med absolutno vrednostjo premika $|\Delta P1_{k(i+1,i)}|$ in standardnim odklonom $\sigma_{\Delta P1_{k(i+1,i)}}$, ki ga uporabimo za določitev testne statistike $T1$:

$$T1 = \frac{|\Delta P1_{k(i+1,i)}|}{\sigma_{\Delta P1_{k(i+1,i)}}}.$$

Ker vedno privzamemo, da so meritve normalno porazdeljene, in ker razliko koordinat/spremembo višin reperjev povezuje linearna zveza, je njena porazdelitev verjetnosti tudi normalna porazdelitev. Zato v tem primeru za izbrano stopnjo značilnosti testa α preberemo kritično vrednost $T1_{krit}$ iz tabel (standardizirane) normalne porazdelitve ali jo izračunamo s programskim orodjem Excel [=NORM.S.INV(1-alfa/2)] ali Matlab [=norminv(1-alfa/2)].

Glede na postavljeno ničelno domnevo, ki pravi, da se točka/reper med izmerama ni premaknila, vrednost testne statistike $T1$ primerjamo s $T1_{krit}$. Odločitev, ki jo ob izbrani stopnji značilnosti testa α sprejmemo, je odvisna od vrednosti testne statistike $T1$ in kritične vrednosti $T1_{krit}$:

- če je $T1 \leq T1_{krit}$, ne moremo zavrnila ničelne domneve ob tveganju α in privzamemo, da premik točke/reperja ni statistično značilen,
- če je $T1 > T1_{krit}$, zavrnilo ničelno domnevo ob tveganju α in privzamemo, da je premik točke/reperja statistično značilen.

Ta postopek ugotavljanja in določanja premikov je statistično strog in objektivni postopek, ki se uporablja tudi v večini bolj kompleksnih postopkov deformacijske analize. V praksi ga uporabljamo v bolj zahtevnih nalogah določanja premikov, ko želimo svoje odločitve nasloniti na teoretično stroga in objektivna merila odločanja.

3. Ugotavljanje in določanje višinskih premikov s postopki deformacijske analize

Za določitev stabilnosti točk/reperjev v višinskem smislu lahko uporabimo tudi metode deformacijske analize, npr.: metode Hannover, Delft, Karlsruhe, München, Fredericton, Caspary, Mihajlović, robustne metode...

Ti postopki ugotavljanja in določanja premikov so dokaj kompleksni in zahtevni za praktično uporabo. Uporabljamo jih, ko gre za najbolj zahtevne naloge (naloge, pri katerih so odločitve o stabilnosti oziroma premikanju objekta/območja lahko povezane s hudimi posledicami). Ker so tudi v te postopke vključeni postopki statističnega preizkušanja domnev, pa so, do določene mere, vendarle podobni postopku, ki smo ga opisali v točki 2. V primeru, ko imamo na voljo preizkušeno programsko orodje, za katerega od navedenih postopkov deformacijske analize, vsekakor priporočamo njegovo uporabo, kadar koli je mogoče.

Navedeni postopki deformacijske analize so dokaj kompleksni in obsežni in presegajo obseg in namen teh smernic, zato jih ne predstavljamo.

5 Določitev horizontalnih/ ravninskih premikov (določitev premikov v dvorazsežnem koordinatnem sistemu)

Pod nalogo določanja horizontalnih premikov razumemo nalogo določanja premikov v horizontalni smeri oziroma v ravnini. Ta ravnina je na majhnem območju lahko ravnina lokalnega horizonta, na večjih območjih je ta ravnina ravnina kartografske projekcije.

5.1 Vzpostavitev sistema za določanje horizontalnih premikov

Za ugotavljanje in določanje horizontalnih premikov zopet vzpostavimo geodetsko mrežo, ki vključuje referenčne in kontrolne točke. Referenčne točke naj bi bile zopet dovolj oddaljene od objekta ali območja, katerega premike ugotavljamo, hkrati pa dovolj blizu, da s preveliko oddaljenostjo od referenčnih točk ne zmanjšujemo natančnosti določitve koordinat kontrolnih točk.

5.2 Geodetski datum in oblika horizontalne geodetske mreže

Kot smo že večkrat omenili je v nalogah ugotavljanja in spremljanja premikov ključno, da zagotovimo identičen geodetski datum geodetske mreže skozi celotno obdobje spremljanja premikov. Geodetski datum določajo koordinate referenčnih točk, velja pa tudi:

- geodetski datum geodetske mreže določajo točke, ki morajo biti v celotnem času spremljanja stabilnosti (premikov) objekta stabilne (pri miru),
- lokacije/položaje referenčnih točk izberemo skupaj z geologom, projektantom,
- položaje referenčnih točk moramo tako izbrati, da so varni pred uničenjem; morebitno uničenje referenčne točke je mnogo večja težava, kot uničenje kontrolne točke, zato je potrebno posvetiti izbiri lokacije referenčne točke dovolj pozornosti in jo po potrebi tudi fizično zaščititi pred uničenjem,

- zelo pomembna je izbira načina stabilizacije in signalizacije referenčnih točk, saj moramo zagotoviti, da je postavljanje merskega instrumenta in pribora skozi celotno obdobje izvajanja geodetskega monitoringa enako,
- referenčne točke v izravnavi meritev v geodetski mreži obravnavamo kot dane točke,
- stabilnost referenčnih točk moramo ugotoviti v vsaki terminski izmeri,
- v izravnavi privzamemo kontrolne točke kot nove točke, po izravnavi dobijo popravke koordinat ter pripadajočo informacijo o natančnosti določitve koordinat.

Pred samo vzpostavitvijo geodetske mreže za spremljanje premikov je potrebno narediti projekt geodetskega monitoringa. Pri projektiranju zopet (kakor smo navedli v poglavju 4.1. za primer višinske geodetske mreže) uporabimo t. i. predhodno analizo meritev, simulacije meritev, t. i. predhodno izravnavo meritev, s katero ugotovimo, ali lahko v dani geometriji, z izbranimi vrstami ter natančnostmi meritev dosežemo zahtevano natančnost določitve koordinat kontrolnih točk. V poštev pride tudi optimizacija meritev v geodetski mreži glede na zahtevano natančnost in zanesljivost. Projekt geodetskega monitoringa mora zagotoviti doseganje namena in ciljev geodetskega monitoringa.

5.3 Metode terestrične geodetske izmere za določitev horizontalnih koordinat

Pri izbiri instrumentov in metod geodetske izmere je potrebno izhajati iz projekta geodetskega monitoringa predvsem pa pričakovane velikosti premikov. Ta ponovno določa potrebno natančnost meritev, na njeni osnovi bo zagotovljena natančnost določitve koordinat, ta pa bo zagotovila potrebno natančnost določitve premikov. V povezavi s pričakovano velikostjo premikov je pomemben tudi izbor ustreznega merskega instrumentarija in pribora, metoda izmere in oblika geodetske mreže.

V geodetski mreži izvajamo meritve med referenčnimi točkami, med referenčnimi točkami in kontrolnimi točkami na objektu in med kontrolnimi točkami na objektu. Vsako izmed teh meritev opravimo s potrebno natančnostjo in zanesljivostjo.

Glede na vrsto terestričnih geodetskih mrež imamo na voljo naslednje vrste meritev:

- meritve v trigonometričnih mrežah:
 - girusna metoda: klasično viziranje 3 girusi, avtomatsko viziranje 7 girusov,
 - izberemo $p_{\alpha} = 1$ (isti operater, isti instrument, »isti« pogoji, ista metoda),
 - vse meritve v geodetski mreži izravnamo hkrati;
- meritve v trilateracijskih mrežah:
 - klasično viziranje 3 ponovitve, samodejno viziranje 7 ponovitev,
 - med referenčnimi točkami izvajamo meritve obojestransko, z referenčnih do kontrolnih točk pa enostransko,
 - ob geodetskih meritvah opravimo meritve meteoroloških parametrov (temperatura, zračni tlak, relativna vlažnost),

- izberemo $p_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \approx 1$ (isti instrument, »isti« pogoji, podobno dolge dolžine),
- vse meritve v geodetski mreži izravnamo hkrati.
- meritve v kombiniranih triangulacijsko-trilateracijskih mrežah:
 - girusna metoda z istočasnim merjenjem poševnih dolžin (zenitne razdalje merimo zaradi redukcije dolžin): klasično viziranje 3 girusi, avtomatsko viziranje 7 girusov,
 - med referenčnimi točkami izvajamo meritve obojestransko, z referenčnih do kontrolnih točk pa enostransko,
 - ob geodetskih meritvah opravimo meritve meteoroloških parametrov (temperatura, zračni tlak, relativna vlažnost),
 - za smeri izberemo $p_\alpha = \frac{k}{\sigma_\alpha^2} = \frac{\sigma_\alpha^2}{\sigma_\alpha^2} = 1$,
 - za dolžine izberemo $p_s = \frac{k}{\sigma_s^2} = \frac{\sigma_\alpha^2}{\sigma_s^2}$,
 - vse meritve v geodetski mreži izravnamo hkrati.
- meritve GNSS:
 - horizontalne/ravninske koordinate lahko določamo tudi na osnovi meritev GNSS. Meritve GNSS nam omogočajo določitev koordinat v trirazsežnem koordinatnem sistemu, kjer sta horizontalni/ravninski koordinati dve od treh komponent položaja (dve od treh koordinat).

Določitev horizontalnih koordinat bomo predstavili v poglavju o določanju premikov v trirazsežnem koordinatnem sistemu.

5.4 Instrumentarij in pribor za terestrično geodetsko izmero

Glede na izbrano metodo meritev izberemo ustrezen instrumentarij in pribor.

1. Trigonometrične mreže:
 - elektronski teodolit s $\sigma_{\text{ISO-THEO}} \leq 1''$ (ISO 17123-3), s poročilom o kalibraciji, ki naj ne bi bilo starejše od enega leta,
 - če izvedemo viziranje samodejno s sistemom AVT (avtomatsko viziranje tarče), izberemo elektronski tahimeter s $\sigma_{\text{ISO-THEO-AVT}} \leq 1''$ (ISO 17123-3),
 - precizni reflektorji/precizne tarče;

2. Trilateracijske mreže:

- elektronski razdaljemer s $\sigma_{\text{ISO-EDM}} \leq 1 \text{ mm}$; 1 ppm (ISO 17123-4) s poročilom o kalibraciji, ki naj ne bi bilo starejše od enega leta,
- precizni reflektorji z znanimi adicijskimi konstantami, termometer, barometer, psihrometer/higrometer, globinsko merilo;

3. Kombinirane triangulacijsko-trilateracijske mreže:

- elektronski tahimeter s $\sigma_{\text{ISO-THEO}} \leq 1''$ (ISO 17123-3), $\sigma_{\text{ISO-EDM}} \leq 1 \text{ mm}$; 1 ppm (ISO 17123-4) s poročilom o kalibraciji, ki naj ne bi bilo starejše od enega leta,
- če izvedemo viziranje samodejno s sistemom AVT (avtomatsko viziranje tarče), izberemo elektronski tahimeter s $\sigma_{\text{ISO-THEO-AVT}} \leq 1''$ (ISO 17123-3),
- precizni reflektorji z znanimi adicijskimi konstantami, termometer, barometer, psihrometer/higrometer, globinsko merilo.

5.5 Izračun koordinat točk v ravninski geodetski mreži

Projekt geodetskega monitoringa vključuje tudi geodetsko mrežo, vrsta geodetske mreže je odvisna od vrste in natančnosti. Določen mora biti način izravnave meritev in izračuna koordinat točk v geodetski mreži.

Glede na izbrano vrsto meritev izberemo postopek izračuna horizontalnih koordinat:

- trigonometrične mreže:
 - izračunamo sredine horizontalnih smeri,
 - višinske razlike med točkami izračunamo z uporabo ustreznih enačb (enostransko, dvostransko merjene zenitne razdalje oz. višinski koti),
 - ocenimo a priori natančnost meritev;
- trilateracijske mreže:
 - izračunamo sredine poševnih dolžin, sredine zenitnih razdalj in drugih pomožnih meritev,
 - na osnovi sredin merjenih dolžin izračunamo horizontalne dolžine (na površini referenčnega elipsoida, za $h = 0$ ali drugi izbrani višini nad referenčnim elipsoidom, v ravnini kartografske projekcije) med točkami izračunamo z uporabo ustreznih enačb,
 - ocenimo a priori natančnost meritev;
- kombinirane triangulacijsko-trilateracijske geodetske mreže:
 - izračunamo sredine merjenih smeri/kotov na osnovi meritev horizontalnih smeri/kotov, sredine merjenih vrednosti poševnih dolžin, sredine merjenih vrednosti zenitnih razdalj in drugih pomožnih meritev,
 - na osnovi sredin merjenih dolžin izračunamo horizontalne dolžine (na površini referenčnega elipsoida, za $h = 0$ ali drugi izbrani višini nad referenčnim elipsoidom, v ravnini kartografske projekcije) med točkami izračunamo z uporabo ustreznih enačb,
 - ocenimo a priori natančnost meritev.

V vseh primerih izravnamo izmerjene vrednosti po metodi najmanjših kvadratov, uteži izberemo po pravilih za določitev uteži. Prisotnost grobih pogreškov preverjamo v vseh fazah obdelave meritev: med izmero, pred izravnavo in po izravnavi meritev v geodetski mreži, kjer analiziramo meritve po znanih postopkih:

- globalni test modela, da ugotovimo morebitno prisotnost grobih pogreškov med meritvami in/ali morebiti napačno določene uteži meritev,
- Baardova, Popeova, danska metoda za lociranje grobo pogrešenih meritev.

V horizontalnih/ravninskih mrežah s pričakovanimi majhnimi premiki bi morala biti natančnost določitve koordinat boljša od enega milimetra: $\sigma_x = \sigma_y \leq 1 \text{ mm}$.

5.6 Določitev horizontalnih premikov (določitev premikov v dvorazsežnem prostoru)

Določitev premikov v dvorazsežnem prostoru (v ravnini horizonta ali v ravnini kartografske projekcije) poteka na osnovi koordinat točk, ki smo jih določili/izračunali z izravnavo meritev v dveh terminskih izmerah. Z izravnavo meritev v posamezni terminski izmeri smo določili ravninske koordinate točk ter njim pripadajoče variančno-kovariančne matrike. V nadaljevanju predpostavljamo, da imamo ravninske koordinate (e, n) točk določene v ravnini prečne Mercatorjeve projekcije (Transverse Mercator–TM).

V (i) – ti terminski izmeri smo z izravnavo meritev določili vektor ravninskih koordinat $\mathbf{x}_{2k(i)}$ točke k ter pripadajočo variančno-kovariančno matriko $\Sigma_{\mathbf{x}_{2k(i)}}$:

$$\mathbf{x}_{2k(i)} = \begin{bmatrix} e_{k(i)} \\ n_{k(i)} \end{bmatrix} \sim \Sigma_{\mathbf{x}_{2k(i)}} = \begin{bmatrix} \sigma_{ek(i)}^2 & \sigma_{enk(i)} \\ \sigma_{enk(i)} & \sigma_{nk(i)}^2 \end{bmatrix}$$

in v $(i+1)$ – ti terminski izmeri vektor koordinat $\mathbf{x}_{2k(i+1)}$ ter pripadajočo variančno-kovariančno matriko $\Sigma_{\mathbf{x}_{2k(i+1)}}$:

$$\mathbf{x}_{2k(i+1)} = \begin{bmatrix} e_{k(i+1)} \\ n_{k(i+1)} \end{bmatrix} \sim \Sigma_{\mathbf{x}_{2k(i+1)}} = \begin{bmatrix} \sigma_{ek(i+1)}^2 & \sigma_{enk(i+1)} \\ \sigma_{enk(i+1)} & \sigma_{nk(i+1)}^2 \end{bmatrix}.$$

V gornjih izrazih sta $\left(e_{k(i)}, n_{k(i)}\right)$ ravninski koordinati točke k , določeni v (i) -ti terminski izmeri, $\sigma_{ek(i)}^2$, $\sigma_{nk(i)}^2$ varianci koordinat $\left(e_{k(i)}, n_{k(i)}\right)$, $\sigma_{enk(i)}$ je kovarianca med koordinatama $e_{k(i)}$ in $n_{k(i)}$. Enakovredno velja za koordinati $\left(e_{k(i+1)}, n_{k(i+1)}\right)$, določeni v $(i+1)$ -ti terminski izmeri, kjer sta $\sigma_{ek(i+1)}^2$ in $\sigma_{nk(i+1)}^2$ varianci in $\sigma_{enk(i+1)}$ kovarianca med obema ravninskima koordinatama.

Ponovno sestavimo skupni vektor koordinat $\mathbf{x}_{2k(i+1,i)}$ točke k , določenih v obeh terminskih izmerah in temu vektorju pripadajočo variančno-kovariančno matriko $\Sigma_{\mathbf{x}_{2k(i+1,i)}}$:

$$\mathbf{x}_{2k(i+1,i)} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{2k(i)} \\ \mathbf{x}_{2k(i+1)} \end{bmatrix} \sim \Sigma_{\mathbf{x}_{2k(i+1,i)}} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\mathbf{x}_{2k(i)}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_{\mathbf{x}_{2k(i+1)}} \end{bmatrix}$$

Ker sta koordinati, določeni v obeh terminskih izmerah med seboj neodvisni, je variančno-kovariančna matrika $\Sigma_{\mathbf{x}_{2k(i+1,i)}}$ skupnega vektorja koordinat $\mathbf{x}_{2k(i+1,i)}$ blok-diagonalna.

Ti podatki so zopet osnova za ugotavljanje premikov. V nadaljevanju predstavljamo določitev premikov na osnovi razmerja med velikostjo spremembe posamezne koordinate točke in tej spremembi pripadajočega standardnega odklona, ki ga primerjamo s primerno izbranim številom. Kot drugo možnost predstavljamo določitev premika na osnovi velikosti (dolžine) premika in pripadajočega standardnega odklona, kot tretjo možnost predstavljamo postopek statističnega preizkušanja domnev, kjer kot testno statistiko zopet uporabimo razmerje med velikostjo premika in pripadajočega standardnega odklona. Četrta možnost za določanje premikov ponovno temelji na postopkih deformacijske analize.

1. Ugotavljanje in določanje ravninskih premikov na osnovi razmerja med spremembo koordinat in pripadajočih standardnih odklonov

Če ugotavljamo in določamo premike točke k na osnovi absolutnih vrednosti sprememb posameznih koordinat $\left| \Delta e_{k(i+1,i)} \right|$ in $\left| \Delta n_{k(i+1,i)} \right|$ je postopek določanja premikov enak kot v že predstavljenem postopku določanja sprememb višin točk, s tem, da ga uporabimo za vsako koordinato vsake točke posebej (glej vse tri možnosti ugotavljanja in določitve premikov na osnovi sprememb višin v poglavju 4.7).

2. Ugotavljanje in določanje ravninskih premikov na osnovi razmerja med spremembo lege točke in pripadajočega standardnega odklona

Če presodimo, da je premike točk v dvorazsežnem koordinatnem sistemu bolje ugotavljati na osnovi velikosti (dolžine) premika točke, določimo velikost (dolžino) premika točke $\Delta P2_{k(i+1,i)}$ ter pripadajoči standardni odklon $\sigma_{\Delta P2_{k(i+1,i)}}$.

Premik $\Delta P2_{k(i+1,i)}$ točke k v dvorazsežnem ravninskem koordinatnem sistemu med dvema terminskima izmerama je:

$$\Delta P2_{k(i+1,i)} = \sqrt{\left(\Delta e_{k(i+1,i)} \right)^2 + \left(\Delta n_{k(i+1,i)} \right)^2}$$

Variančno-kovariančno matriko $\Sigma_{\Delta P2_{k(i+1,i)}}$ premika $\Delta P2_{k(i+1,i)}$ določimo z zakonom o prenosu varianc in kovarianc:

$$\Sigma_{\Delta P2_{k(i+1,i)}} = \mathbf{J}_2 \cdot \Sigma_{\mathbf{x}2\mathbf{x}2_{k(i+1,i)}} \cdot \mathbf{J}_2^T$$

kjer je $\mathbf{J}_2$ Jacobijeva matrika:

$$\mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta e_{k(i+1,i)}}{\Delta P2_{k(i+1,i)}} & \frac{\Delta n_{k(i+1,i)}}{\Delta P2_{k(i+1,i)}} & -\frac{\Delta e_{k(i+1,i)}}{\Delta P2_{k(i+1,i)}} & -\frac{\Delta n_{k(i+1,i)}}{\Delta P2_{k(i+1,i)}} \end{bmatrix}$$

kar vodi do variančno-kovariančne matrike $\Sigma_{\Delta P2k(i+1,i)}$ premika $\Delta P2_{k(i+1,i)}$ v dvorazsežnem koordinatnem sistemu:

$$\Sigma_{\Delta P2k(i+1,i)} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\Delta e_{k(i+1,i)}}{\Delta P2_{k(i+1,i)}} \right)^2 \left(\sigma_{ek(i)}^2 + \sigma_{ek(i+1)}^2 \right) + \left(\frac{\Delta n_{k(i+1,i)}}{\Delta P2_{k(i+1,i)}} \right)^2 \left(\sigma_{nk(i)}^2 + \sigma_{nk(i+1)}^2 \right) + \\ + 2 \left(\frac{\left(\Delta e_{k(i+1,i)} \right) \left(\Delta n_{k(i+1,i)} \right)}{\Delta P2_{k(i+1,i)}^2} \right) \left(\sigma_{enk(i)} + \sigma_{enk(i+1)} \right) \end{bmatrix}$$

Variančno-kovariančna matrika $\Sigma_{\Delta P2(i+1,i)}$ premika $\Delta P2_{(i+1,i)}$ vsebuje samo varianco premika $\sigma_{\Delta P2k(i+1,i)}^2$:

$$\Sigma_{\Delta P2k(i+1,i)} = \left[\sigma_{\Delta P2k(i+1,i)}^2 \right].$$

Na osnovi variance premika $\sigma_{\Delta P2k(i+1,i)}^2$ določimo standardni odklon premika $\sigma_{\Delta P2k(i+1,i)}$.

Izračunano dolžino premika $\Delta P2_{k(i+1,i)}$ in standardni odklon dolžine premika $\sigma_{\Delta P2k(i+1,i)}$ spet uporabimo za ugotovitev ali je dolžina premika »dovolj« velika glede na standardni odklon premika.

Pri tem trdimo, da je premik točke značilen, če velja $\frac{\Delta P2_{k(i+1,i)}}{\sigma_{\Delta P2k(i+1,i)}} > 3$.

O premiku torej zopet govorimo takrat, ko je velikost premika vsaj 3–krat večja od standardnega odklona premika. V nasprotnem primeru ne moremo trditi, da je natančnost določitve premika dovolj velika (standardni odklon premika je dovolj majhen), da bi lahko govorili o premiku točke.

3. Ugotavljanje in določanje ravninskih premikov s preizkušanjem domnev o statistično značilnih premikih

Če se odločimo, da bomo za ugotavljanje premikov uporabili postopek statističnega preizkušanja domnev, določimo testno statistiko:

$$T2 = d\mathbf{x}2k_{(i+1,i)}^T \Sigma_{d\mathbf{x}2k_{(i+1,i)}}^{-1} d\mathbf{x}2k_{(i+1,i)}$$

ki se porazdeljuje po porazdelitvi χ^2_2 z dvema prostostnima stopnjama.

V izrazu za $T2$ je $d\mathbf{x}2k_{(i+1,i)}$ vektor spremembe koordinat za točko k :

$$d\mathbf{x}2k_{(i+1,i)} = \begin{bmatrix} e_{k(i+1)} \\ n_{k(i+1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{k(i)} \\ n_{k(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{k(i+1)} - e_{k(i)} \\ n_{k(i)} - n_{k(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta e_{k(i+1,i)} \\ \Delta n_{k(i+1,i)} \end{bmatrix}$$

in variančno-kovariančna matrika koordinatnih razlik za posamezno točko, ki je dana z:

$$\begin{aligned} \Sigma_{d\mathbf{x}2k_{(i+1,i)}} &= \Sigma_{\mathbf{x}2\mathbf{x}2k(i)} + \Sigma_{\mathbf{x}2\mathbf{x}2k(i+1)} = \begin{bmatrix} \sigma_{ek(i)}^2 & \sigma_{enk(i)} \\ \sigma_{enk(i)} & \sigma_{nk(i)}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{ek(i+1)}^2 & \sigma_{enk(i+1)} \\ \sigma_{enk(i+1)} & \sigma_{nk(i+1)}^2 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_{ek(i)}^2 + \sigma_{ek(i+1)}^2 & \sigma_{enk(i)} + \sigma_{enk(i+1)} \\ \sigma_{enk(i)} + \sigma_{enk(i+1)} & \sigma_{nk(i)}^2 + \sigma_{nk(i+1)}^2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Za izbrano stopnjo značilnosti testa α pridobimo kritično vrednost $T2_{\text{krit}}$ iz tabel porazdelitve χ^2_2 (χ^2_2) ali jo izračunamo s programskim orodjem Excel [=CHISQ.INV(1-alfa;2)=CHISQ.INV.RT(alfa;2)] ali Matlab [=chi2inv(1-alfa,2)].

Vrednost testne statistike $T2$ primerjamo z vrednostjo $T2_{\text{krit}}$ in, glede na postavljeno ničelno domnevo, ki pravi, da se točka med izmerama ni premaknila, velja:

- če je $T2 \leq T2_{\text{krit}}$, ne moremo zavrni ničelne domneve ob tveganju α in privzamemo, da premik točke ni statistično značilen,
- če je $T2 > T2_{\text{krit}}$, zavrnemo ničelno domnevo ob tveganju α in privzamemo, da je premik točke statistično značilen.

Kot smo že omenili pri določanju višinskih premikov, je ta postopek ugotavljanja in določanja premikov statistično strog in objektivni, ki se uporablja tudi pri bolj kompleksnih postopkih deformacijske analize. Uporabljamo ga, ko želimo svoje odločitve nasloniti na stroga in objektivna merila odločanja.

4. Ugotavljanje in določanje ravninskih premikov na osnovi postopkov deformacijske analize

Za ugotovitev stabilnosti oziroma ugotovitev in določitev premikov točk lahko uporabimo t.i. klasične metode deformacijske analize: uporabimo lahko metodo Hannover, Delft, Karlsruhe, München, Fredericton, Caspary, pa tudi metode, ki temeljijo na t. i. robustni statistiki.

Te postopke ugotavljanja in določanja premikov uporabljamo, ko gre za najbolj zahtevne naloge oz. naloge povezane s hudimi posledicami. Ko imamo na voljo preizkušeno programsko orodje, za katerega od teh postopkov deformacijske analize, priporočamo njegovo uporabo, kadar koli je mogoče.

6 Določitev prostorskih premikov (določitev premikov v trirazsežnem koordinatnem sistemu)

Za določitev premikov v trirazsežnem koordinatnem sistemu lahko uporabimo terestrične geodetske meritve (triangulacija in trilateracija ter meritve zenitnih razdalj oz. višinskih kotov), meritve GNSS ali kombinacijo meritev GNSS in terestričnih geodetskih meritev.

Osnova za ugotavljanje in določitev premikov je zopet razmerje med velikostjo spremembe koordinat in njej pripadajočo informacijo o natančnosti. Tudi v tem primeru je osnova za ugotavljanje in določanje premikov določitev koordinat kontrolnih točk v geodetski mreži ob identičnem geodetskem datumu geodetske mreže v vseh terminskih izmerah.

Na osnovi klasičnih geodetskih meritev lahko hkrati določimo horizontalne oz. ravninske koordinate in višine točk (e, n, h) , lahko pa določimo koordinate točk v trirazsežnem prostoru tudi na osnovi ločene določitve ravninskih koordinat (e, n) in višin (h) , ki jih združimo v trojico koordinat (e, n, h) .

Določitev premikov na osnovi klasičnih terestričnih geodetskih meritev (horizontalnih/ravninskih ter višinskih) smo že predstavili, zato v nadaljevanju predstavljamo določitev koordinat ter premikov na osnovi meritev GNSS.

6.1 Vzpostavitev sistema meritev GNSS

Meritve v okviru GNSS nam omogočajo določitev koordinat v trirazsežnem, globalnem koordinatnem sistemu in tako poteka tudi določitev premikov v tem koordinatnem sistemu.

Meritve GNSS lahko uporabimo za določitev koordinat z različno natančnostjo in točnostjo, osnova za visoko točnost koordinat pa je kakovostna merska oprema, statična metoda meritev, dovolj dolga dolžina trajanja meritev ter ustrezna obdelava podatkov meritev.

Osnovni rezultat obdelave meritev GNSS je t. i. bazni vektor – vektor koordinatnih razlik med dvema točkama. V primeru, da poznamo koordinate enega krajišča baznega vektorja, lahko na osnovi baznega vektorja določimo tudi koordinate drugega krajišča. Koordinate določenega števila novih točk lahko določimo, če imamo na voljo vsaj eno (bolje pa več) dano točko, to je točko, ki ima koordinate predhodno določene in ustrezno število baznih vektorjev med točkami.

Kot smo omenili, je v nalogah ugotavljanja premikov ključno, da so točke, ki predstavljajo geodetsko osnovo – referenčne točke tudi stabilne. Tehnologija GNSS nam omogoča, da preverimo stabilnost referenčnih točk med vsako terminsko izmero z določitvijo koordinat teh točk z navezavo na geodetske točke, katerih stabilnost je zagotovljena. Za ugotovitev stabilnosti referenčnih točk lahko uporabimo točke, katerih koordinate so kakovostno določene s strani državne geodetske službe oz. Geodetske uprave Republike Slovenije (GURS). Stabilnost referenčnih točk lahko ugotavljamo tudi na osnovi vseh tistih pasivnih geodetskih točk GNSS, ki predstavljajo državni koordinatni sistem (za seznam teh točk, glej spletne strani GURS).

Poleg nekaj deset t. i. pasivnih državnih geodetskih točk GNSS, ki predstavljajo državni koordinatni sistem, se mnogo bolj uporabljajo stalno delujoče postaje GNSS državnega omrežja postaj GNSS v Republiki Sloveniji – omrežja SIGNAL (Slovenija, Geodezija, Navigacija, Lokacija). Postaje omrežja SIGNAL imajo kakovostno določene koordinate v državnem koordinatnem sistemu, zato jih lahko uporabimo kot osnovo za ugotovitev stabilnosti referenčnih pa tudi kontrolnih točk.

Za potrebe določanja premikov v trirazsežnem koordinatnem sistemu na večjem območju je tako najbolje navezati naše meritve GNSS na državni koordinatni sistem ter določiti koordinate referenčnih in kontrolnih točk na objektu oz. območju v državnem koordinatnem sistemu. Da imamo koordinate vseh točk določene v državnem koordinatnem sistemu, je smiselno tudi zato, ker je državni koordinatni sistem tudi redno vzdrževan, saj kakovost koordinat vseh geodetskih točk GNSS GURS redno nadzira.

6.2 Določitev geodetskega datuma geodetske mreže GNSS

Za ugotavljanje premikov s tehnologijo GNSS praviloma uporabimo statično metodo izmere GNSS, v geodetski mreži GNSS, ki jo sestavljajo postaje omrežja SIGNAL in naše referenčne točke. Dane koordinate postaj omrežja SIGNAL in kakovostno določeni bazni vektorji med postajami omrežja SIGNAL in referenčnimi točkami omogočajo določitev koordinat naših referenčnih točk.

Glede na to, da se zemeljska skorja nenehno deformira, se koordinate vseh geodetskih točk nenehno spreminjajo. Premike postaj omrežja SIGNAL redno (na dnevni osnovi) ugotavlja in določa GURS, v nalogah ugotavljanja premikov pa treba določiti tudi premike referenčnih točk (oz. točk, ki določajo geodetski datum geodetske mreže). Na ta način lahko, kljub spreminjanju koordinat referenčnih točk, zagotavljamo identičen geodetski datum geodetske mreže v posameznih terminskih izmerah oz. v daljšem časovnem obdobju.

Za zagotovitev identičnega geodetskega datuma mreže GNSS imamo več možnosti. Geodetski datum predstavljajo t. i. datumski parametri, to so parametri, ki določajo lego, orientacijo in merilo koordinatnega sistema izmere GNSS, glede na nadrejeni – v našem primeru državni koordinatni sistem. Zato problem geodetskega datuma razumemo tudi kot problem povezave dveh koordinatnih sistemov.

V primeru, ko se koordinate geodetskih točk, ki predstavljajo koordinatni sistem, spreminjajo, se spreminjajo tudi parametri geodetskega datuma. V nalogah določanja premikov s pomočjo tehnologije GNSS se tako lahko srečamo s premiki referenčnih točk, katerih vpliv moramo izločiti iz premikov geodetske mreže in tako tudi kontrolnih točk na objektu.

Izravnavo meritev (baznih vektorjev) izvedemo v geodetskem datumu tekoče terminske izmere. Za zagotovitev identičnega geodetskega datuma med tekočo terminsko izmero v geodetski datum predhodnih izmer uporabimo podobnostno transformacijo, ki jo opravimo na osnovi referenčnih točk. Po podobnostni transformaciji vzpostavimo geodetski datum tekoče terminske izmere, ki je v povprečju identičen z geodetskim datumom predhodne izmere. Po transformaciji so koordinate ter njim pripadajoče informacije o natančnosti (koordinate točk in pripadajoče variančno-kovariančne matrike) nato predmet analize za ugotovitev in določitev premikov kontrolnih točk na objektu.

Te smernice ne omogočajo podrobnejše predstavitve konceptov za zagotovitev identičnega geodetskega datuma v več terminskih izmerah, ko imamo referenčne točke, katerih koordinate se spreminjajo skozi čas. Za podrobnosti glede zagotavljanja geodetskega datuma v takšnih okoliščinah naj se bralec obrne na ustrezno strokovno literaturo.

6.3 Izbira točk za izmero GNSS

Pri določitvi koordinat na osnovi tehnologije GNSS je pomembno, da se geodetske točke nahajajo v ugodnih razmerah za sprejem signala GNSS, zato moramo zagotoviti:

- odprt pogled proti nebu (ovire za vidno svetlobo so ovire tudi za signal GNSS),
- odsotnost odbojnih površin za signal GNSS (bližina kovinskih ali betonskih konstrukcij, bližina vodnih površin),
- odsotnost virov elektromagnetnih sevanj (daljnovodi, radijski oz. TV oddajniki, bazne postaje mobilnih komunikacijskih omrežij)
- izogibamo se bližini območij zelo gostega prometa (ceste železnice).

Prisotnost fizičnih ovir ter drugih motečih dejavnikov za sprejem signala GNSS močno zmanjša kakovost meritev GNSS in močno poveča število neznank, ki jih je treba določiti v postopku obdelave opazovanj GNSS.

S tem, ko zagotavljamo visoko kakovost izvedbe meritev GNSS, zagotovimo, da bodo tudi vsi nadaljnji potrebni koraki v obdelavi meritev GNSS lahko kakovostno opravljeni, kar bo vodilo do višje natančnosti in zanesljivosti koordinat, kar je naš končni cilj.

Pri izmeri GNSS se torej izogibajmo neugodnim okoliščinam za sprejem signala GNSS. Posledično to pomeni, da je pogosto treba metode meritev GNSS kombinirati s klasičnimi terestričnimi metodami geodetske izmere.

6.4 Statična metoda izmere GNSS

Za določanje in ugotavljanje premikov na osnovi meritev GNSS je primerna le statična metoda izmere. To je metoda izmere, pri kateri z mirujočim sprejemnikom GNSS v določenem časovnem trajanju (praviloma več ur) izvajamo meritve GNSS (meritve vrednosti količin v okviru signala GNSS). Statična metoda izmere naj poteka v ugodnih razmerah za sprejem signala GNSS, kakor smo jih opredelili v podpoglavju 6.3.

Meritve s statično metodo izmere GNSS potekajo v t. i. serijah. Serija je situacija, pri kateri z določenim številom sprejemnikov (r) na (r) točkah mreže GNSS izvajamo statične meritve GNSS. Ker je število sprejemnikov, ki jih imamo na voljo (r), praviloma manjše od števila točk mreže (n), izvedemo meritve v mreži, v kateri je (n) točk v več serijah (s). Število potrebnih serij meritev (s) za izmero (n) točk mreže je odvisno še od števila neodvisnih izmer posamezne točke (m). Število neodvisnih izmer posamezne točke (m) je odvisno od potrebne natančnosti in zanesljivosti določitve koordinat in je med 2 in 4 ($2 < m < 4$).

Število potrebnih serij (s) za določitev koordinat (n) točk v mreži GNSS s statično izmero, ki jo izvajamo z (r) sprejemniki, kjer je izmera vsake točke opravljena neodvisno (m) –krat, določimo z:

$$s = \frac{m \cdot n}{r}$$

Če je izračunano število serij (s) realno število, ga zaokrožimo na prvo večje naravno število.

Rezultat obdelave statične metode izmere GNSS so bazni vektorji med pari točk geodetske mreže. Skupno število vektorjev (v) v mreži, v kateri je (n) točk je:

$$v = \frac{n \cdot (n - 1)}{2}$$

Pri izmeri z (r) sprejemniki GNSS pridobimo v vsaki seriji skupaj (b) vektorjev:

$$b = \frac{r \cdot (r - 1)}{2}$$

Če izvajamo izmero z (r) sprejemniki dobimo v vsaki seriji $(r - 1)$ linearno neodvisnih baznih vektorjev.

V (s) serijah tako dobimo skupaj (t) linearno neodvisnih vektorjev:

$$t = s \cdot (r - 1)$$

Število vseh vektorjev (p) , določenih v (s) serijah, je:

$$p = s \cdot b = \frac{s \cdot r \cdot (r - 1)}{2}$$

V novejšem času praviloma izračunamo vse vektorje med točkami mreže, na katerih smo opravili meritve v vseh serijah. Skupno število vseh baznih vektorjev, ki jih uporabimo za izračun koordinat točk v mreži GNSS, je v tem primeru enako (p) .

V fazi projektiranja geodetske mreže moramo poskrbeti, da je vsaka točka neodvisno izmerjena večkrat ($2 < m < 4$) ter, da je skupno število obdelanih vektorjev (t) oziroma (p) dovolj veliko za določitev $(u) = (n - 1)$ novih točk v mreži GNSS (koordinate ene točke v mreži GNSS moramo imeti dane ali jih privzamemo kot dane). Veljati mora torej:

$$t > u \text{ oziroma } p > u$$

Za kakovostno izvedbo statične izmere GNSS se moramo pred terensko izmero ustrezno pripraviti oziroma meritve ustrezno prostorsko in časovno razporediti. Oznaka u se v gornjih enačbah nanaša na število novih točk in ne na število koordinat novih točk.

6.5 Instrumenti in pribor za izmero GNSS

Pri določanju in ugotavljanju premikov v trirazsežnem koordinatnem sistemu je ključna tehnologija GNSS. Uporabljamo jo tako za zagotovitev geodetskega datuma geodetske mreže, kot tudi za ugotavljanje in določanje premikov točk.

V splošnem velja, da so naloge določanja premikov naloge, kjer je ključna visoka natančnosti določitve koordinat, za kar pa je osnova kakovostna merska oprema. Poleg tega nam le dobro poznavanje merske opreme omogoča ustrezno vrednotenje kakovosti meritev kot tudi vseh na osnovi meritev določenih količin.

Pod pojmom merska oprema razumemo sprejemnike GNSS in antene GNSS. V nekaterih primerih sta antena in sprejemnik GNSS fizično ločena, v nekaterih sta združena v istem ohišju. V nekaterih primerih je sestavni del merske opreme tudi enota, ki omogoča komunikacijo s sprejemnikom.

V nalogah ugotavljanja in določanja premikov uporabljamo mersko opremo, ki mora omogočati izvedbo kodnih in faznih opazovanj. Poleg tega je pomembno, da merska oprema omogoča izvajanje meritev na več (vseh) razpoložljivih frekvencah nosilnih valovanj ter v okviru vseh razpoložljivih sistemov GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU).

Zelo pomembno je tudi, da uporabljamo le kalibrirane antene GNSS. Pri tem pa ni pomembno, ali gre za individualno kalibrirane antene ali za antene s tipsko kalibracijo, veljavno za posamezen tip antene.

Kalibracijo anten lahko zagotovi proizvajalec antene GNSS, lahko pa jo naročimo pri pooblašeni organizaciji tudi sami.

Ker poteka določitev koordinat v nalogah določanja premikov na osnovi opazovanj GNSS praviloma z naknadno obdelavo podatkov meritev, moramo podatke meritev med samo izmero shraniti v pomnilniški enoti in jih naknadno prenesti v ustrezno programsko okolje za obdelavo meritev.

6.6 Cenovno ugodna merska oprema GNSS

V zadnjih letih se je na trgu pojavila t. i. nizkocenovna, tudi cenovno ugodna, cenovno dostopna oprema GNSS (angl. Low Cost GNSS, Cost Affordable GNSS, Cost Effective GNSS). Ta merska oprema (sprejemniki in antene) GNSS je po kakovosti sicer nekoliko slabša, kot mnogo dražja geodetska oprema GNSS, se pa tudi kakovost te opreme hitro izboljšuje. V primerih, ko ta oprema vključuje kalibrirane antene GNSS in sprejemnike GNSS, ki so sposobni sprejemati signal vseh razpoložljivih sistemov GNSS, na vseh frekvencah, lahko s tovrstno mersko opremo praviloma določimo koordinate le malo slabše kakovosti od tistih, določenih z geodetsko opremo GNSS.

Zaradi nizke cene tovrstno mersko opremo GNSS lahko uporabljamo v veliko večjem obsegu ali jo postavljamo tudi na zelo izpostavljena mesta (kjer lahko pričakujemo uničenje opreme), kar nam omogoča pridobivanje podatkov tudi na lokacijah, na katerih geodetske merske opreme GNSS sicer ne bi uporabili (nevarna območja zemeljskih plazov, visoki dimniki v obratovanju...).

Nižja cena merske opreme GNSS lahko zagotavlja dokaj visoko kakovost meritev in računsko pridobljenih količin, vendar praviloma ob bolj kakovostno izvedeni obdelavi podatkov meritev, kot pri geodetski merski opremi GNSS. Obdelava podatkov meritev, opravljenih s cenovno ugodno opremo GNSS je praviloma bolj zahtevna, manj samodejna in zahteva izkušenega strokovnjaka (odločitve strokovnjaka med obdelavo močno vplivajo na pridobljene rezultate). Zaradi nekoliko nižje kakovosti je treba podatke meritev, dobljene s tovrstno opremo kombinirati z drugimi, neodvisno pridobljenimi podatki meritev...

Tehnološki razvoj na področju določanja položaja (koordinat) v prostoru bo v prihodnosti zagotovo prinašal vedno nove merske senzorje, instrumente in tehnologije. Lahko pričakujemo, da bo v prihodnosti potrebno veliko truda namenjati za pridobivanje izkušenj za delo z novo opremo, razvojem postopkov terenskih meritev, izdelavo programske opreme za obdelavo podatkov meritev... Takrat bo potrebno novi tehnologiji prilagoditi tudi postopke za geodetski monitoring.

Za zdaj pa velja, da poteka delo s cenovno ugodno mersko opremo GNSS na terenu na enak način kot z geodetsko mersko opremo GNSS. Obdelava podatkov meritev pa je zahtevna in obsežna ter zahteva dobro usposobljenega strokovnjaka, ki zna podatke meritev optimalno izkoristiti ter verodostojno oceniti njihovo kakovost ter računsko dobljenih količin.

6.7 Obdelava meritev GNSS

Z obdelavo podatkov meritev statične metode izmere dobimo bazne vektorje med pari točk. Bazne vektorje lahko izračunamo samo med tistimi točkami, na katerih smo meritve GNSS opravili hkrati. Obdelavo opravimo s komercialnimi programskimi paketi, ki jih ponujajo vsi proizvajalci merske opreme GNSS. Na trgu je na voljo tudi nekaj t. i. neodvisnih in odprtokodnih programskih rešitev.

Pri postopku obdelave podatkov meritev GNSS moramo fizično združiti podatke meritev vseh sprejemnikov, s katerimi smo meritve opravili hkrati (meritve z vsemi sprejemniki v isti seriji). Pri prenosu podatkov meritev v programsko okolje moramo poskrbeti, da navedemo pravilno vrsto sprejemnikov in anten GNSS. Poleg tega moramo za kakovostno določitev baznih vektorjev uporabiti natančne efemeride satelitov GNSS. Poskrbeti moramo za uporabo ustreznega modela troposferske in ionosferske refrakcije, pri čemer sledimo priporočilom izdelovalca programske opreme za obdelavo meritev GNSS.

Pred obdelavo meritev GNSS moramo v programski opremi navesti vrste meritev, meritve sistemov GNSS, ki naj se obdelajo, določiti višinski kot, nad katerim naj se meritve obdelajo, in podobno.

Rezultat obdelave podatkov meritev GNSS so bazni vektorji med pari točk, pri tem pa moramo za vsako serijo meritev izračunati linearno neodvisne vektorje in/ali vse vektorje.

Kot omenjeno, za vsako serijo meritev, opravljenih z (r) sprejemniki, dobimo ($r - 1$) linearno neodvisnih vektorjev, katerih število je dano z:

$$b = \frac{r \cdot (r - 1)}{2}$$

Rezultat obdelave meritev GNSS, opravljenih z (r) sprejemniki v (s) serijah je tako

$$t = s \cdot (r - 1)$$

linearno neodvisnih baznih vektorjev oziroma

$$p = \frac{s \cdot r \cdot (r - 1)}{2}$$

vseh vektorjev s pripadajočimi variančno-kovariančnimi matrikami.

Pred nadaljnjo uporabo baznih vektorjev moramo pregledati meritve, vrednosti faktorjev DOP, obdobja neprekinjenih meritev s posameznih satelitov, časovno trajanje meritev za obdelavo posameznega baznega vektorja, vrste rešitev faznih nedoločenosti, popravke meritev, variančno-kovariančne matrike in standardne odklone komponent vseh izračunanih baznih vektorjev.

Ko ugotovimo, da v meritvah GNSS ni grobo pogrešenih meritev, da so fazne nedoločenosti določene v obliki t.i. fiksnih rešitev (fazne nedoločenosti so izračunane kot naravna števila; izjema so le zelo dolgi vektorji) in, da so natančnosti izračunanih baznih vektorjev ustrezne, lahko bazne vektorje uporabimo za izračun koordinat točk v geodetski mreži.

Pri tem moramo vedeti, da je formalno izračunana natančnost komponent baznih vektorjev praviloma močno precenjena (za faktor 10 do 50), saj se v primeru dolgotrajnih statičnih meritev GNSS, ki jih praviloma uporabljamo v nalogah določanja premikov, močno poveča število nadštevilnih opazovanj, kar vodi do zmanjšanja vrednosti referenčne variance a-posteriori in s tem manjših vrednosti varianc in standardnih odklonov komponent baznih vektorjev od dejansko doseženih.

6.8 Izračun koordinat točk v geodetski mreži GNSS

Za določitev koordinat točk izravnamo izračunane bazne vektorje v mreži GNSS po metodi najmanjših kvadratov.

Bazne vektorje najprej izravnamo v prosti geodetski mreži GNSS. S to vrsto izravnave dobimo rezultate, na katere nimajo vpliva dane količine (dane oz. predhodno določene koordinate točk). Namen izravnave je pridobitev ocene kakovosti baznih vektorjev in geodetske mreže GNSS kot celote. Rezultate izravnave analiziramo z običajnimi postopki glede morebiti prisotnih grobih pogreškov in določitve realne ocene natančnosti opazovanj. V ta namen opravimo globalni test modela in pregled opazovanj (data snooping – Baardova metoda), s katerim testiramo referenčno varianco a-posteriori in standardizirane popravke opazovanj (popravke komponent vseh baznih vektorjev) oz. opravimo tau-test (Popeova metoda) za izračunane popravke.

Če so rezultati ustrezni in ocenimo, da med vhodnimi podatki opazovanj (baznimi vektorji) ni grobo pogrešenih ter da je informacija o natančnosti baznih vektorjev, kakor jo predstavlja variančno-kovariančna matrika opazovanj, ustrezna, lahko bazne vektorje uporabimo tudi v izravnavi t. i. vklopljene mreže GNSS, s katero izračunamo koordinate kontrolnih točk v želenem geodetskem datumu. Pri tej izravnavi uporabimo predhodno določene koordinate referenčnih točk kot dane. Kot dane referenčne točke obravnavamo tiste, za katere predvidevamo, da so stabilne, ali tiste, za katere poznamo spremembe koordinat med dvema terminskima izmerama. Po izravnavi ponovno ovrednotimo podatke in rezultate izravnave na enak način kot po izravnavi proste mreže.

Rezultat izravnave baznih vektorjev v geodetski mreži GNSS so koordinate in variančno-kovariančne matrike koordinat vseh kontrolnih točk v mreži v koordinatnem sistemu in geodetskem datumu, v katerem smo podali koordinate referenčnih točk.

Za izračun variančno-kovariančnih matrik in standardnih odklonov koordinat točk praviloma uporabimo referenčno varianco a-posteriori. Za izračun referenčne variance a-posteriori uporabimo dejanske podatke opazovanj in z izravnavo določene popravke opazovanj. Ocenjujemo, da izračunana referenčna varianca a-posteriori, izračunana na osnovi rezultatov izravnave geodetske mreže GNSS daje bolj realno oceno natančnosti kot referenčna varianca a-priori. Razlog za to je praviloma precenjena a-priori natančnost baznih vektorjev (glej komentar o natančnosti rezultatov obdelave podatkov meritev). Ob uporabi referenčne variance a-posteriori pa moramo biti prepričani, da med meritvami (baznimi vektorji) nimamo grobo pogrešenih opazovanj.

6.9 Problem povezave terestričnih geodetskih meritev in meritev GNSS

V praksi je običajno, da na osnovi opazovanj GNSS določimo koordinate določenemu številu točk, nato pa na osnovi klasičnih terestričnih geodetskih meritev določimo koordinate še preostalih točk.

V primeru, da imamo na voljo odklone navpičnic, popravimo terestrično izmerjene zenitne razdalje in/ali višinske kote tudi za ta vpliv. Če podatkov o odklonih navpičnic nimamo na voljo, uporabimo podatke terestričnih meritev na običajen način, kar pomeni, da jih popravimo za vplive instrumenta in pribora, meteorološke vplive ter višin instrumenta in reflektorjev.

Tako pripravljene podatke terestričnih geodetskih meritev nato izravnamo v geodetski mreži v trirazsežnem koordinatnem sistemu. Najprej zopet opravimo izravnavo terestričnih meritev v prosti mreži, ovrednotimo dobljene rezultate in nato ponovimo izravnavo z danim določenim številom koordinat, ponovimo izravnavo v vklopljeni mreži ter ponovno ovrednotimo pridobljene rezultate.

Rezultat izravnav so tako koordinate točk (referenčnih in/ali kontrolnih), s pripadajočimi variančno-kovariančnimi matrikami v trirazsežnem koordinatnem sistemu, kar so tudi vhodni podatki v nalogo ugotavljanja in določanja premikov.

6.10 Določitev prostorskih premikov (določitev premikov v trirazsežnem koordinatnem sistemu)

Na osnovi trirazsežnih koordinat točk, določenih v posameznih terminskih izmerah, lahko obravnavamo razlike koordinat kot morebitne premike, če so določeni v istem koordinatnem sistemu in istem geodetskem datumu. Če je ta zahteva izpolnjena, določimo premike v trirazsežnem prostoru na smiselno enak način kot v dvo- ali enorazsežnem koordinatnem sistemu.

Za določitev premikov točk zopet uporabimo koordinate točke k $\mathbf{x}_{k(i)}$, s pripadajočo variančno-kovariančno matriko $\Sigma_{\mathbf{x}\mathbf{x}k(i)}$, določene v (i) – ti terminski izmeri:

$$\mathbf{x}_{k(i)} = \begin{bmatrix} X_{k(i)} \\ Y_{k(i)} \\ Z_{k(i)} \end{bmatrix} \sim \Sigma_{\mathbf{x}\mathbf{x}k(i)} = \begin{bmatrix} \sigma_{Xk(i)}^2 & \sigma_{XYk(i)} & \sigma_{XZk(i)} \\ \sigma_{YXk(i)} & \sigma_{Yk(i)}^2 & \sigma_{YZk(i)} \\ \sigma_{ZXk(i)} & \sigma_{ZYk(i)} & \sigma_{Zk(i)}^2 \end{bmatrix},$$

ter koordinate $\mathbf{x}_{k(i+1)}^3$ s pripadajočo variančno-kovariančno matriko $\Sigma_{\mathbf{x}^3\mathbf{x}^3k(i+1)}$, določene v $(i+1)$ – terminski izmeri:

$$\mathbf{x}_{k(i+1)}^3 = \begin{bmatrix} X_{k(i+1)} \\ Y_{k(i+1)} \\ Z_{k(i+1)} \end{bmatrix} \sim \Sigma_{\mathbf{x}^3\mathbf{x}^3k(i+1)} = \begin{bmatrix} \sigma_{Xk(i+1)}^2 & \sigma_{XYk(i+1)} & \sigma_{XZk(i+1)} \\ \sigma_{YXk(i+1)} & \sigma_{Yk(i+1)}^2 & \sigma_{YZk(i+1)} \\ \sigma_{ZXk(i+1)} & \sigma_{ZYk(i+1)} & \sigma_{Zk(i+1)}^2 \end{bmatrix},$$

V gornjih izrazih so $(X_{k(i)}, Y_{k(i)}, Z_{k(i)})$ koordinate točke k , določene v trirazsežnem koordinatnem sistemu v (i) –ti terminski izmeri, $\sigma_{Xk(i)}^2$, $\sigma_{Yk(i)}^2$ in $\sigma_{Zk(i)}^2$ variance koordinat $(X_{k(i)}, Y_{k(i)}, Z_{k(i)})$, $\sigma_{XYk(i)}$, $\sigma_{XZk(i)}$, $\sigma_{YZk(i)}$ so kovariance med koordinatami $X_{k(i)}$ in $Y_{k(i)}$, med $X_{k(i)}$ in $Z_{k(i)}$ ter med koordinatama $Y_{k(i)}$ in $Z_{k(i)}$. Enakovredno velja za koordinate $(X_{k(i+1)}, Y_{k(i+1)}, Z_{k(i+1)})$, določene v $(i+1)$ –ti terminski izmeri, njihove variance in medsebojne kovariance.

Ponovno sestavimo skupni vektor koordinat $\mathbf{x}_{k(i+1,i)}^3$ točke k , določenih v obeh terminskih izmerah in temu vektorju pripadajočo variančno-kovariančno matriko $\Sigma_{\mathbf{x}^3\mathbf{x}^3k(i+1,i)}$:

$$\mathbf{x}_{k(i+1,i)}^3 = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k(i)}^3 \\ \mathbf{x}_{k(i+1)}^3 \end{bmatrix} \sim \Sigma_{\mathbf{x}^3\mathbf{x}^3k(i+1,i)} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\mathbf{x}^3\mathbf{x}^3k(i)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_{\mathbf{x}^3\mathbf{x}^3k(i+1)} \end{bmatrix}$$

Ker so koordinate, določene v obeh terminskih izmerah med seboj neodvisne, je variančno-kovariančna matrika $\Sigma_{\mathbf{x}^3\mathbf{x}^3k(i+1,i)}$ skupnega vektorja koordinat $\mathbf{x}_{k(i+1,i)}^3$ zopet blok-diagonalna.

Gornji vektorji koordinat in pripadajoče variančno-kovariančne matrike so ponovno osnova za ugotavljanje premikov. V nadaljevanju spet predstavljamo postopke za določitev premikov na osnovi razmerja med spremembo posamezne koordinate in pripadajočega standardnega odklona, ki ga primerjamo s primerno izbrano vrednostjo. Druga možnost je ugotovitev ali gre za premik na osnovi razmerja med velikostjo premika in pripadajočega standardnega odklona, kot tretjo možnost spet predstavljamo statistično preizkušanje domnev, kjer kot testno statistiko uporabimo razmerje med velikostjo premika in standardnim odklonom premika. Četrto možnost za določanje premikov, ki temelji na postopkih deformacijske analize, ponovno samo omenimo.

1. Ugotavljanje in določanje premikov v trirazsežnem prostoru na osnovi razmerja med spremembo koordinat in pripadajočih standardnih odklonov

Če ugotavljamo in določamo premike točke k na osnovi absolutnih sprememb posameznih koordinat $|\Delta X_{k(i+1,i)}|$, $|\Delta Y_{k(i+1,i)}|$ in $|\Delta Z_{k(i+1,i)}|$, je postopek določanja premikov enak kot v že predstavljenem postopku določanja sprememb višin točk, s tem, da ga, kakor v primeru določanja ravninskih premikov, uporabimo za vsako koordinatno komponento posebej (glej vse tri možnosti ugotavljanja in določitve premikov na osnovi sprememb višin oziroma sprememb posameznih koordinat v ravnini v poglavjih 4.7. in 5.6.).

2. Ugotavljanje in določanje premikov v trirazsežnem prostoru na osnovi razmerja med spremembo lege točke in pripadajočega standardnega odklona

Prostorski premik $\Delta P3_{k(i+1,i)}$ točke k je določen kot:

$$\Delta P3_{k(i+1,i)} = \sqrt{\Delta X_{k(i+1,i)}^2 + \Delta Y_{k(i+1,i)}^2 + \Delta Z_{k(i+1,i)}^2}$$

Za določitev variančno-kovariančne matrike $\Sigma_{\Delta P3k(i+1,i)}$ prostorskega premika $\Delta P3_{k(i+1,i)}$ ponovno uporabimo skupni vektor koordinat $\mathbf{x}3_{k(i+1,i)}$ ter pripadajočo variančno-kovariančno matriko $\Sigma_{\mathbf{x}3\mathbf{x}3k(i+1,i)}$:

$$\mathbf{x}3_{k(i+1,i)} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}3_{k(i)} \\ \mathbf{x}3_{k(i+1)} \end{bmatrix} \sim \Sigma_{\mathbf{x}3\mathbf{x}3k(i+1,i)} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\mathbf{x}3\mathbf{x}3k(i)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_{\mathbf{x}3\mathbf{x}3k(i+1)} \end{bmatrix}$$

Variančno-kovariančno matriko premika določimo z:

$$\Sigma_{\Delta P3k(i+1,i)} = \mathbf{J}_3 \cdot \Sigma_{\mathbf{x}3\mathbf{x}3k(i+1,i)} \cdot \mathbf{J}_3^T$$

kjer je Jacobijeva matrika $\mathbf{J}_3$:

$$\mathbf{J}_3 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta X_{k(i+1,i)}}{\Delta P3_{k(i+1,i)}} & \frac{\Delta Y_{k(i+1,i)}}{\Delta P3_{k(i+1,i)}} & \frac{\Delta Z_{k(i+1,i)}}{\Delta P3_{k(i+1,i)}} & -\frac{\Delta X_{k(i+1,i)}}{\Delta P3_{k(i+1,i)}} & -\frac{\Delta Y_{k(i+1,i)}}{\Delta P3_{k(i+1,i)}} & -\frac{\Delta Z_{k(i+1,i)}}{\Delta P3_{k(i+1,i)}} \end{bmatrix}$$

In variančno-kovariančna $\Sigma_{\Delta P3k(i+1,i)}$ premika $\Delta P3_{k(i+1,i)}$ v trirazsežnem koordinatnem sistemu je določena z:

$$\Sigma_{\Delta P3k(i+1,i)} = \left[\begin{aligned} &\left(\frac{\Delta X_{k(i+1,i)}}{\Delta P3_{k(i+1,i)}} \right)^2 \left(\sigma_{Xk(i)}^2 + \sigma_{Xk(i+1)}^2 \right) + \left(\frac{\Delta Y_{k(i+1,i)}}{\Delta P3_{k(i+1,i)}} \right)^2 \left(\sigma_{Yk(i)}^2 + \sigma_{Yk(i+1)}^2 \right) + \\ &+ \left(\frac{\Delta Z_{k(i+1,i)}}{\Delta P3_{k(i+1,i)}} \right)^2 \left(\sigma_{Zk(i)}^2 + \sigma_{Zk(i+1)}^2 \right) + 2 \left(\frac{(\Delta X_{k(i+1,i)})(\Delta Y_{k(i+1,i)})}{\Delta P3_{k(i+1,i)}^2} \right) \left(\sigma_{XYk(i)} + \sigma_{YXk(i+1)} \right) + \\ &+ 2 \left(\frac{(\Delta X_{k(i+1,i)})(\Delta Z_{k(i+1,i)})}{\Delta P3_{k(i+1,i)}^2} \right) \left(\sigma_{XZk(i)} + \sigma_{ZXk(i+1)} \right) + 2 \left(\frac{(\Delta Y_{k(i+1,i)})(\Delta Z_{k(i+1,i)})}{\Delta P3_{k(i+1,i)}^2} \right) \left(\sigma_{YZk(i)} + \sigma_{ZYk(i+1)} \right) \end{aligned} \right]$$

Variančno-kovariančna matrika $\Sigma_{\Delta P3k(i+1,i)}$ premika $\Delta P3_{k(i+1,i)}$ zopet vsebuje le varianco premika $\sigma_{\Delta P3k(i+1,i)}^2$:

$$\Sigma_{\Delta P3k(i+1,i)} = \left[\sigma_{\Delta P3k(i+1,i)}^2 \right]$$

Izračunano dolžino premika $\Delta P3_{k(i+1,i)}$ in standardni odklon dolžine premika $\sigma_{\Delta P3k(i+1,i)}$ spet uporabimo za ugotovitev ali je dolžina premika »dovolj« velika glede na standardni odklon premika.

Trdimo, da je premik točke značilen, če velja $\frac{\Delta P3_{k(i+1,i)}}{\sigma_{\Delta P3k(i+1,i)}} > 3$.

O premiku spet govorimo, ko je dolžina premika vsaj 3–krat večja od standardnega odklona premika. V nasprotnem primeru ne moremo trditi, da je natančnost določitve premika dovolj velika (standardni odklon premika je dovolj majhen), da bi lahko govorili o spremembah koordinat kot o premiku točke.

3. Ugotavljanje in določanje premikov v trirazsežnem prostoru s preizkušanjem domnev o statistično značilnih premikih

Če se odločimo, da bomo za ugotavljanje premikov uporabili statistično preizkušanje domnev, izračunamo testno statistiko:

$$T3 = d\mathbf{x}_{3k(i+1,i)}^T \Sigma_{d\mathbf{x}_{3k(i+1,i)}}^{-1} d\mathbf{x}_{3k(i+1,i)}$$

ki se porazdeljuje po porazdelitvi χ^2_3 s tremi prostostnimi stopnjami.

V izrazu za $T3$ je $d\mathbf{x}_{3k(i+1,i)}$ vektor razlik koordinat v trirazsežnem prostoru za posamezno točko k :

$$d\mathbf{x}_{3k(i+1,i)} = \begin{bmatrix} X_{k(i+1)} \\ Y_{k(i+1)} \\ Z_{k(i+1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{k(i)} \\ Y_{k(i)} \\ Z_{k(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{k(i+1)} - X_{k(i)} \\ Y_{k(i+1)} - Y_{k(i)} \\ Z_{k(i+1)} - Z_{k(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{k(i+1,i)} \\ \Delta Y_{k(i+1,i)} \\ \Delta Z_{k(i+1,i)} \end{bmatrix}$$

in variančno-kovariančna matrika koordinatnih razlik za posamezno točko:

$$\Sigma_{d\mathbf{x}_{3k(i+1,i)}} = \Sigma_{\mathbf{x}_{3k(i)}} + \Sigma_{\mathbf{x}_{3k(i+1)}} = \begin{bmatrix} \sigma_{Xk(i)}^2 + \sigma_{Xk(i+1)}^2 & \sigma_{XYk(i)} + \sigma_{XYk(i+1)} & \sigma_{XZk(i)} + \sigma_{XZk(i+1)} \\ \sigma_{YXk(i)} + \sigma_{YXk(i+1)} & \sigma_{Yk(i)}^2 + \sigma_{Yk(i+1)}^2 & \sigma_{YZk(i)} + \sigma_{YZk(i+1)} \\ \sigma_{ZXk(i)} + \sigma_{ZXk(i+1)} & \sigma_{ZYk(i)} + \sigma_{ZYk(i+1)} & \sigma_{Zk(i)}^2 + \sigma_{Zk(i+1)}^2 \end{bmatrix}$$

Za izbrano stopnjo značilnosti testa α pridobimo kritično vrednost $T3_{krit}$ iz tabel za porazdelitev χ^2 (χ^2_3) ali jo izračunamo s programskim orodjem Excel [=CHISQ.INV(1-alfa;3)=CHISQ.INV.RT(alfa;3)] ali Matlab [=chi2inv(1-alfa,3)].

Vrednost testne statistike $T3$ primerjamo s $T3_{krit}$ in glede na postavljeno ničelno domnevo, ki pravi, da se točka med izmerama ni premaknila, velja:

- če je $T3 \leq T3_{krit}$, ne moremo zavrniti ničelne domneve ob tveganju α in privzamemo, da premik točke ni statistično značilen
- če je $T3 > T3_{krit}$, zavrnemo ničelno domnevo ob tveganju α in privzamemo, da je premik točke statistično značilen.

Kot smo že omenili, je ta postopek določanja premikov statistično strog in objektivni, uporablja se pri kompleksnih postopkih deformacijske analize. V praksi ga uporabljamo, ko želimo svoje odločitve nasloniti na teoretično stroga in objektivna merila odločanja.

4. Ugotavljanje in določanje premikov v trirazsežnem prostoru s postopki deformacijske analize

Za ugotovitev stabilnosti oziroma ugotovitev in določitev premikov točk lahko uporabimo že večkrat omenjene klasične metode deformacijske analize: uporabimo lahko metodo Hannover, Delft, Karlsruhe, München, Fredericton, Caspary, pa tudi metode, ki temeljijo na t. i. robustni statistiki.

Ko imamo na voljo preizkušeno programsko orodje, za katerega od navedenih postopkov deformacijske analize, priporočamo njegovo uporabo, vedno, ko je to mogoče.

Komentar:

Še enkrat poudarjamo, da poteka določitev koordinat (X_k, Y_k, Z_k) v trirazsežnem prostoru v geodetskem koordinatnem sistemu. Te koordinate je treba nato preračunati v geodetske koordinate $(\varphi_k, \lambda_k, h_k)$ na referenčnem elipsoidu, geodetske koordinate (φ_k, λ_k) pa nato še v ravnino kartografske projekcije (n_k, e_k) :

$$\mathbf{x3}_{(XYZ)} = \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{x3}_{(\varphi\lambda h)} = \begin{bmatrix} \varphi_k \\ \lambda_k \\ h_k \end{bmatrix}_{\text{BESSEL GRS-80}} \rightarrow \mathbf{x2} = \begin{bmatrix} e_k \\ n_k \end{bmatrix}_{\text{GK TM}}$$

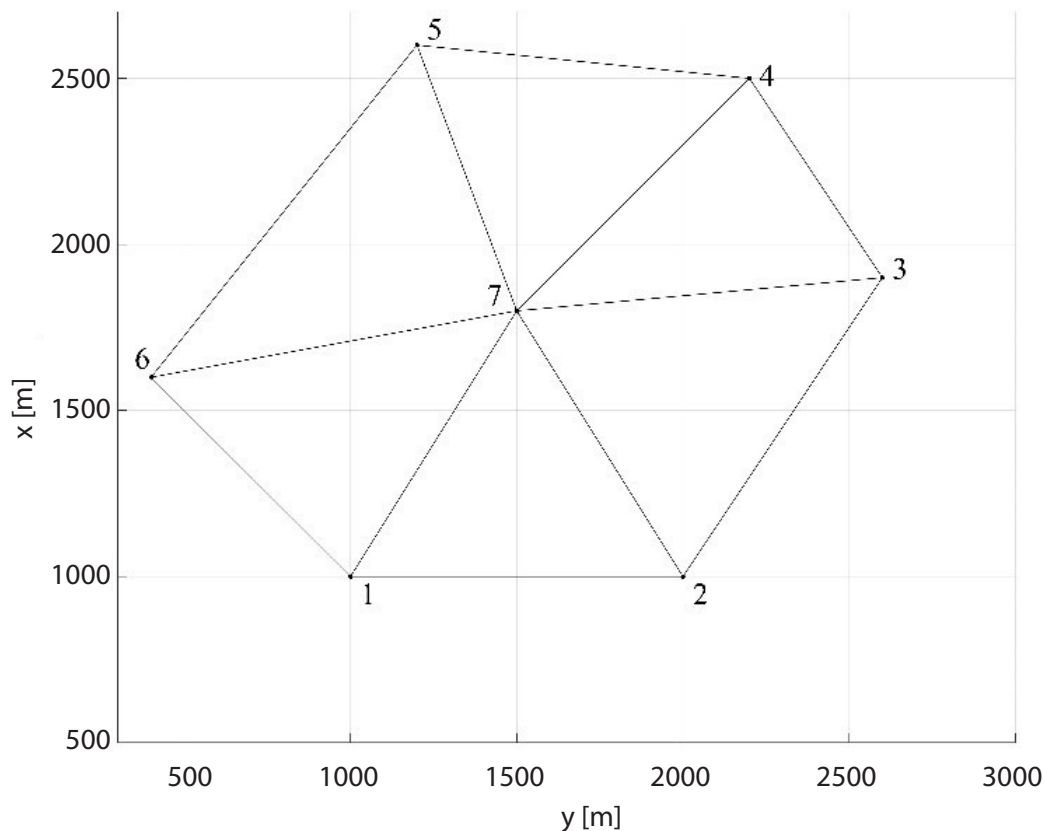
Seveda je treba poleg preračuna koordinat iz geodetskega koordinatnega sistema v koordinatni sistem v ravnini opraviti tudi preračun variančno-kovariančnih matrik:

$$\begin{aligned} \Sigma_{\mathbf{x3x3k}(i)_{(XYZ)}} &= \begin{bmatrix} \sigma_{Xk}^2(i) & \sigma_{XYk}(i) & \sigma_{XZk}(i) \\ \sigma_{YXk}(i) & \sigma_{Yk}^2(i) & \sigma_{YZk}(i) \\ \sigma_{ZXk}(i) & \sigma_{ZYk}(i) & \sigma_{Zk}^2(i) \end{bmatrix} \rightarrow \Sigma_{\mathbf{x3x3k}(i)_{(\varphi\lambda h)}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\varphi k}^2(i) & \sigma_{\varphi\lambda k}(i) & \sigma_{\varphi h k}(i) \\ \sigma_{\lambda\varphi k}(i) & \sigma_{\lambda k}^2(i) & \sigma_{\lambda h k}(i) \\ \sigma_{h\varphi k}(i) & \sigma_{h\lambda k}(i) & \sigma_{h k}^2(i) \end{bmatrix}_{\text{BESSEL GRS-80}} \rightarrow \\ &\rightarrow \Sigma_{\mathbf{x2x2k}(i)} = \begin{bmatrix} \sigma_{ek}^2(i) & \sigma_{enk}(i) \\ \sigma_{nek}(i) & \sigma_{nk}^2(i) \end{bmatrix}_{\text{GK TM}} \end{aligned}$$

Enačbe za te preračune presegajo obseg teh smernic, so pa na voljo v strokovni literaturi.

7 Primeri

V tem poglavju bomo prikazali primer uporabe ugotavljanja in določanja premikov točk v geodetskih mrežah v eno-, dvo- in trirazsežnem koordinatnem sistemu. Mreža točk za ugotavljanje in določevanje premikov bo enaka v vseh treh primerih. Vrednosti meritev v obeh terminskih izmerah smo določili s simulacijami in jih za posamezno terminsko izmero izravnali po metodi najmanjših kvadratov. Med vrednostmi meritev ni bilo grobo pogrešenih, zato smo korak ugotavljanja grobo pogrešenih meritev z globalnim testom modela in lociranje grobo pogrešenih meritev z Baardovo, Popeovo ali dansko metodo izpustili. Geometrijo mreže in imena točk prikazujemo na naslednji sliki.



Slika: Skica geodetske mreže za ugotavljanje in določanje premikov

7.1 Ugotavljanje in določitev višinskih premikov

V tej mreži smo s simulacijami določili vrednosti meritev višinskih razlik med točkami v geodetski mreži za dve terminski izmeri in jih izravnali. Opravili smo analizo višinskih premikov, ki jih podajamo v spodnji preglednici.

Premiki 1D

1 ... podatki prve izmere

2 ... podatki prve izmere

* ... v datoteki je višina reperja podana

- ... v datoteki ni višine tega reperja

Reper	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	*	*																												
2	*	*																												
3	*	*																												
4	*	*																												
5	*	*																												
6	*	*																												
7	*	*																												

Višinske razlike reperjev in statistična analiza.

Stopnja značilnosti testa (tveganje) alfa je 0.050 (= 5.00 %).

dH ... razlika koordinat (premik) reperja med dvema izmerama

sigma_dH ... standardna deviacija premika reperja

T ... testna statistika

T_krit ... kritična vrednost testne statistike pri izbrani alfa

alfa_dej ... dejansko tveganje za zavrnitev ničelne hipoteze

dH>3*sigma_dH ... izpis "***", če je dH>3*sigma_dH (T_krit=3 pri alfa=0.27 %)

T>T_krit ... izpis "da", če je T>T_krit = N(alfa/2)

Vsa pojasnila najdemo v članku: Savšek S. (2017). An alternative approach to testing displacements in a geodetic network. Alternativna metoda testiranja premikov v geodetski mreži. Geodetski vestnik, 61 (3), 387-411.

Izračun med datotekama (izmerama) 1 in 2.

Reper	dH (m)	sigma_dH (m)	T	T_krit	alfa_dej %	dH>3*sigma_dH	T>T_krit
1	-0.0161	0.0027	6.0600	1.9600	0.00	*	da
2	-0.0274	0.0027	10.3256	1.9600	0.00	*	da
3	0.0136	0.0027	5.1233	1.9600	0.00	*	da
4	-0.0067	0.0027	2.5165	1.9600	1.19		da
5	-0.0149	0.0027	5.5973	1.9600	0.00	*	da
6	0.0016	0.0027	0.6169	1.9600	53.73		
7	-0.0402	0.0017	23.1112	1.9600	0.00	*	da

Iz preglednice vidimo:

- po različnih kriterijih ugotavljanja in določitve premikov točk dobimo za večino točk enake rezultate, za točko 4 pa različne rezultate,
- če upoštevamo kriterij

$$\frac{\Delta P1_{(i+1,i)}}{\sigma_{\Delta P1_{(i+1,i)}}} > 3,$$

se točka 4 ni premaknila (v stolpcu dH>3*sigma_dH pri točki 4 ni '*'),

- če uporabimo postopek preizkušanja domnev, se je pri izbrani stopnji značilnosti testa 5 % točka 4 premaknila (v stolpcu T>T_krit pri točki 4 je 'da'),
- strokovnjak odloči, kateri kriterij bo izbral za ugotovitev ali gre za premik točke.

7.2 Ugotavljanje in določitev ravninskih premikov

V tej mreži smo s simulacijami določili vrednosti meritev horizontalnih smeri in dolžin med točkami v geodetski mreži v dveh terminskih izmerah in jih izravnali. Na osnovi rezultatov izravnave smo opravili analizo horizontalnih premikov, ki jih podajamo v spodnji preglednici.

Premiki 2D

1 ... podatki prve izmere

2 ... podatki prve izmere

* ... v datoteki sta koordinati točke podani

- ... v datoteki ni koordinat te točke

Točka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	*	*																												
2	*	*																												
3	*	*																												
4	*	*																												
5	*	*																												
6	*	*																												
7	*	*																												

Koordinatne razlike, smerni koti premikov, premiki točk in statistična analiza.

Stopnja značilnosti testa (tveganje) alfa je 0.050 (= 5.00 %).

Kritična vrednost hi^2_{krit} je 2.448.

dy, dx ... razlika koordinat točke med dvema izmerama

ni_d ... smerni kot premika točke

d ... premik točke med dvema izmerama

sigma_d ... standardna deviacija premika točke

$d > 3 * \sigma_d$... izpis "*", če je $d > 3 * \sigma_d$ ($T_{krit}=3$ pri alfa = 1.11 %)

$dT * Sdd - 1 * d$... kvadratna forma $dT * \Sigma_{dd} - 1 * d$ premika in variančno-kovariančne matrike

$dT * Sdd - 1 * d > hi^2_{krit}$... izpis "da", če je $dT * \Sigma_{dd} - 1 * d > hi^2_{krit}$

Vsa pojasnila najdemo v članku: Savšek S. (2017). An alternative approach to testing displacements in a geodetic network. Alternativna metoda testiranja premikov v geodetski mreži. Geodetski vestnik, 61 (3), 387-411.

Izračun med datotekama (izmerama) 1 in 2.

Točka	dy (m)	dx (m)	ni_d (°)	d (m)	sigma_d (m)	d>3*sigma_d	dT*Sdd-1*d	dT*Sdd-1*d>hi^2
1	-0.0108	-0.0441	194.	0.0454	0.0028	*	275.4301	da
2	-0.0295	0.0518	330.	0.0596	0.0030	*	391.5545	da
3	0.0220	-0.0358	148.	0.0420	0.0027	*	240.9003	da
4	-0.0040	0.0051	322.	0.0065	0.0026		6.4193	da
5	-0.0064	-0.0071	222.	0.0096	0.0026	*	13.4434	da
6	0.0033	-0.0106	163.	0.0111	0.0027	*	17.4614	da
7	0.0255	0.0408	32.	0.0481	0.0020	*	613.9365	da

Iz preglednice vidimo:

- po različnih kriterijih ugotavljanja in določitve premikov točk dobimo za večino točk enake rezultate, za točko 4 pa različne rezultate,
- če upoštevamo kriterij

$$\frac{\Delta P2_{k(i+1,i)}}{\sigma_{\Delta P2k(i+1,i)}} > 3,$$

se točka 4 ni premaknila (v stolpcu d>3*sigma_d pri točki 4 ni '*'),

- če uporabimo postopek preizkušanja domnev, se je pri izbrani stopnji značilnosti testa 5 % točka 4 premaknila (v stolpcu dT*Sdd-1*d>hi^2 pri točki 4 je 'da'),
- strokovnjak je tisti, ki se odloči, kateri kriterij bo izbral za ugotovitev ali gre za premik točke.

7.3 Ugotavljanje in določitev prostorskih premikov

V tej mreži smo s simulacijami določili vrednosti meritev horizontalnih smeri in dolžin ter višinskih razlik med točkami v posamezni izmeri, jih izravnali in opravili analizo prostorskih premikov, ki jih podajamo v spodnji preglednici.

Premiki 3D

1 ... podatki prve izmere

2 ... podatki prve izmere

* ... v datoteki sta koordinati točke podani

- ... v datoteki ni koordinat te točke

Točka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	*	*																												
2	*	*																												
3	*	*																												
4	*	*																												
5	*	*																												
6	*	*																												
7	*	*																												

Koordinatne razlike, premiki točk in statistična analiza.

Stopnja značilnosti testa (tveganje) alfa je 0.050 (= 5.00 %).

Kritična vrednost hi^2_{krit} je 7.815.

dy, dx, dH ... razlika koordinat točke med dvema izmerama

d ... premik točke med dvema izmerama

sigma_d ... standardna deviacija premika točke

$d > 3 \cdot \sigma_d$... izpis "*", če je $d > 3 \cdot \sigma_d$ ($T_{krit}=3$ pri alfa=39.16 %)

$dT \cdot S_{dd} - 1 \cdot d$... kvadratna forma $dT \cdot \Sigma_{dd} - 1 \cdot d$ premika in kovariančne matrike

$dT \cdot S_{dd} - 1 \cdot d > hi^2_{krit}$... izpis "da", če je $dT \cdot \Sigma_{dd} - 1 \cdot d > hi^2_{krit}$

Vsa pojasnila najdemo v članku: Savšek S. (2017). An alternative approach to testing displacements in a geodetic network. Alternativna metoda testiranja premikov v geodetski mreži. Geodetski vestnik, 61 (3), 387-411.

Izračun med datotekama (izmerama) 1 in 2.

Točka	dy (m)	dx (m)	dH (m)	d (m)	sigma_d (m)	d>3*sigma_d	dT*Sdd-1*d	dT*Sdd-1*d>hi^2
1	-0.0108	-0.0441	-0.0010	0.0454	0.0029	*	251.8466	da
2	-0.0295	0.0518	-0.0020	0.0596	0.0027	*	471.2795	da
3	0.0220	-0.0358	-0.0030	0.0421	0.0028	*	234.5280	da
4	-0.0040	0.0051	-0.0040	0.0076	0.0028		7.6724	
5	-0.0064	-0.0071	-0.0030	0.0100	0.0030	*	11.3660	da
6	0.0033	-0.0106	-0.0020	0.0113	0.0028	*	16.3260	da
7	0.0255	0.0408	-0.0010	0.0481	0.0029	*	277.1995	da

Iz preglednice vidimo:

- po različnih kriterijih ugotavljanja in določitve premikov točk dobimo za vse točke enake rezultate,
- če upoštevamo kriterij

$$\frac{\Delta P_{3k(i+1,i)}}{\sigma_{\Delta P_{3k(i+1,i)}}} > 3$$

se točka 4 ni premaknila (v stolpcu d>3*sigma_d pri točki 4 ni '*'),

- če uporabimo postopek preizkušanja domnev, se pri izbrani stopnji značilnosti testa 5 % točka 4 ni premaknila (v stolpcu dT*Sdd-1*d>hi^2 pri točki 4 ni 'da').

8 Zaključek

Smernice za ugotavljanje in določanje premikov z geodetskimi metodami povzemajo bistvene značilnosti geodetskega pristopa k ugotavljanju in določanju premikov.

Upava, da jih, kljub nekaj enačbam, nisva preobremenila s teoretičnimi vsebinami, saj so namenjene predvsem praktični uporabi.

Smernice so namenjene izvajalcem geodetskega monitoringa pa tudi naročnikom, ki naj od izvajalcev zahtevajo dokazila, da so njihove ugotovitve pravilne.

Za dosego temeljnega cilja geodetskega monitoringa – varovanja življenj in zaščite premoženja – je nujna njegova strokovna in kakovostna izvedba.

Zanesljivost rezultatov in pravilnost ugotovitev sta ključna za pravočasno zaznavanje tveganj ter učinkovito ukrepanje.



Inženirska zbornica Slovenije

Jarška cesta 10/b, 1000 Ljubljana, Slovenija

T: +386 (0)1 547 33 40

E: izs@izs.si / **I:** www.izs.si