

GEODETSKE MERITVE STABILNOSTI TAL OB TEKTONSKIH PRELOMIH NA OBMOČJU SLOVENIJE

prof. dr. Dušan Kogoj*

Izvleček

Seizmološkim raziskavam v Sloveniji se je v 70-ih letih pridružila tudi geodezija. Z instrumenti, ki jih uporablja pri svojih meritvah, merskimi metodami in algoritmi za obdelavo podatkov je mogoče včasih že v krajšem časovnem obdobju sklepati o stabilnosti oz. nestabilnosti nekega območja. Na ozemlju Slovenije so na najzanimivejših območjih vzdolž tektonskih prelomov razvite geodetske mreže, s pomočjo katerih se na osnovi terestričnih meritev ugotavlja sprememba položaja točk v določenih časovnih obdobjih. V zadnjem času se tem klasičnim meritvam pridružujejo in jih dopolnjujejo meritve GPS.

Prispevek predstavlja dogajanje na področju geodetskih meritev tektonskih premikov v Sloveniji od leta 1977 do danes. Izredno natančne meritve, za katere pa velikokrat ni posluha (beri: denarja), potrjujejo stabilnost oz. nestabilnost opazovanega območja in dopolnjujejo seizmološko - geološke raziskave.

KLJUČNE BESEDE:
stabilnost tal, tektonski prelomi, geodetske meritve tektonskih premikov

Abstract

In the seventies, seismological studies in Slovenia were complemented by geodetic measurements. The measuring instruments, measuring methods and data-processing algorithms employed have enabled conclusions on the stability or nonstability of a specific area in sometimes relatively short time periods. Geodetic networks have been set up along tectonic faults and are located in the most interesting parts of Slovenian territory. Changes in the positions of network points are determined on the basis of terrestrial measurements performed in selected time intervals. Recently, these standard measurements have been joined and complemented by GPS measurements.

This contribution presents the development of geodetic measurements of tectonic movements in Slovenia from 1977 to the present with major emphasis on Krško region. Extremely precise measurements, which frequently do not receive sufficient (financial) support, are able to confirm the stability or nonstability of an observed area and complement seismological (geological) hypotheses and theories.

KEYWORDS:
ground stability, tectonic faults, geodetic measurements of tectonic movements

UVOD

Slovenija je dežela z relativno močnimi potresi. Seizmološke raziskave imajo zato že bogato tradicijo. Po potresu leta 1895 je Ljubljana dobila prvo seizmološko postajo na Balkanu. Približno stoletje kasneje - leta 1976 - se je Geodetski zavod v Ljubljani z geodetskimi meritvami prvič vključil v raziskave. Prvi raziskavi premikov na območju Karavank v sodelovanju z Avstrijo so sledile nove raziskave na osnovi geodetskih meritev na drugih območjih Slovenije. Klasičnim terestričnim mrežam so se pridružile tudi novejša mreže GPS.

1. GEOLOŠKA ZGRADBA SLOVENIJE

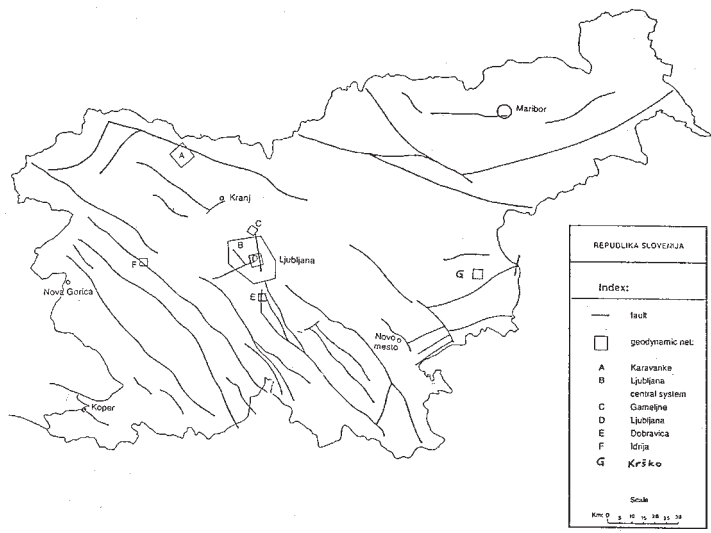
Slovenija je majhna država, leži pa na tektonsko zelo zanimivem področju. Na njenem območju se stikajo tri geološko različne enote: alpska, dinarska in panonska. Največji del Slovenije zavzema alpsko območje, in sicer njen severni in severozahodni del. Manjši, južni del Slovenije s kraškim površjem pripada dinarskemu območju, panonski masiv pa je omejen na vzhodni del - Prekmurje.

Alpsko in dinarsko območje pripadata v terciarni dobi nagubanim evropskim gorovjem. Panonski masiv je po nastanku mnogo starejši in je kot stabilna in odporna gmota vplival na razvoj Alpoidov. Pod njegovim vplivom so se Alpe razklenile v dve veji - karpatsko in dinarsko. Posledica tega so številni prelomi, ob katerih je geološko dogajanje lahko zelo zanimivo. Za naše kraje so najznačilnejši dinarski in prečnodinarski prelomi ter prelomi v smeri sever-jug, ki obdajajo severno obrobje Jadrana (Slika 1).

2. IZBIRA OBMOČJ GEODETSKIH MERITEV

Območja za opazovanje tektonskih premikov so bila določena na osnovi objektivnih kriterijev, določenih po podatkih o geološkem dogajanju, zbranih v zadnjih nekaj sto letih. Izbirale so se najbolj seizmogene cone, ki so zanimive tudi v povezavi s človekovimi dejavnostmi na konkretnem področju. Gre za potresno ranljivost področja. Od parametrov, ki so bili upoštevani, sta bila najpomembnejša verjetnost potresnih stopenj (velikost intenzitete MSK) ter potresna nevarnost. Parametri so bili za območje Slovenije določeni na osnovi podatkov o potresih od leta 792.

Iz seizmološke karte Slovenije ter karte potresne nevarnosti se vidi, da so najzanimivejša področja za opazovanje predvsem Ljubljanska kotlina, pas področja doline Idrije, ki se nadaljuje proti severozahodnemu delu Slovenije ter območje jugovzhodne Slovenije. Tako je bilo na celotnem ozemlju Slovenije od leta 1977 do danes stabiliziranih 5 mikromrež, namenjenih ugotavljanju položajnih premikov ob tektonskih prelomih: **Karavanke, Ljubljanski centralni sistem, Idrija, Ljubljanske mikromreže in Krško.**



Slika 1: Najznačilnejši tektonski prelomi ter položaj geodetskih mikromrež

3. PREGLED DOSEDANJIH MERITEV (brez mreže Krško)

Na področjih, najzanimivejših za opazovanje tektonskih premikov, so bile razvite posebne geodetske mreže. Niz geodetskih točk, postavljenih po točno določenih pravilih, katerih položaj je pogojen z lego preloma in obliko reliefa, določa geodetsko mrežo. V mreži se na osnovi merjenja kotov, dolžin, višinskih razlik ali koordinatnih razlik določa medsebojni položaj točk v nekem časovnem trenutku. Na osnovi primerjave položaja v različnih časovnih trenutkih je mogoče ugotoviti spremembo položaja točke.

Mreža	Število m.	Leto meritev	Instrumentarij	Izvajalec meritev
Karavanke	4	1977 1980 1984 1995	AGA710, Wild T2, GPS	Geodetski zavod Republike Slovenije (GZ)
Ljubljanski centralni sistem	3	1956 1976 1985	AGA710, Wild T2	Geodetski zavod Republike Slovenije
Ljubljanske mikromreže	5	1979 1983 1988 1992 1996	ME3000, ME5000; DKM3, E2	Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (FGG)
Idrija/ Kanomlja	1	1985	AGA710	Geodetski zavod Republike Slovenije
Krško	2	1954 1967 1994 1997	Wild T2, Zeiss TH II, ME5000, GPS	Vojnogeografski inštitut Beograd, GZ, FGG

Tabela 1: Podatki o številu in letu meritev, instrumentariju in izvajalcu meritev

Mreže so bile stabilizirane v različnih letih, tudi število meritev ter časovni intervali med meritvami so različni. Mreže so v osnovi triangulacijsko trilateracijske. V vseh se merijo koti in dolžine z največjo možno natančnostjo. V zadnjem času se klasičnim terestričnim meritvam pridružuje tudi GPS. Praviloma so za meritve uporabljeni najnatančnejši geodetski instrumenti, ki so bili v določenem časovnem obdobju dostopni v Sloveniji.

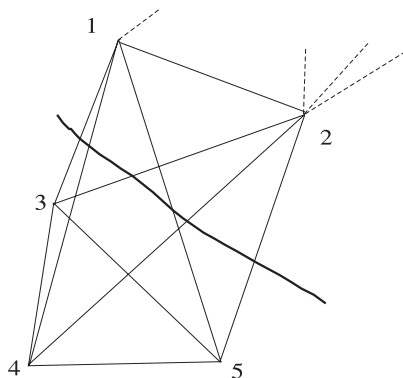
3.1 Mreža Karavanke

Mreža je razvita ob geološkem prelomu, ki deli Dinaride od Vzhodnih Alp. Peradriatični šiv, kot ga tudi imenujemo, se razprostira od Švice preko Italije do naših krajev. Celotna dolžina preloma presega 600 km, na našem ozemlju pa poteka na območju Karavank. Peradriatični šiv spremljajo vzporedni prelomi (med najvažnejšimi je savski prelom). Po geoloških podatkih so prelomi še vedno aktivni.

Oblika mreže

Mreža je razdeljena na slovenski in avstrijski del. Celotno mrežo sestavlja 10 točk, od katerih so 4 v Sloveniji, ena je na meji, 5 pa jih je v Avstriji. Že od leta 1977 dalje so meritve potekale usklajeno na obeh delih mreže in so ju povezovala v enotno celoto. Vendar mreža kot celota ni bila obdelana nikoli; obdelava podatkov se je izvajala v glavnem ločeno na slovenski (GZ SRS) in avstrijski strani (TU Dunaj). Obdelavo za slovenski del je opravil GZ SRS pod vodstvom inž. Marjana Jenka. (Slika 2)

Slika 2: Mreža Karavanke



Meritve in obdelava podatkov meritev

Prva meritev avstrijskega dela je bila že leta 1975. Mreža je bila prvič v celoti merjena leta 1977, nato pa leta 1980 in 1984. V mreži je bilo merjenih 18 smeri ter 8 dolžin. Zadnja meritev je bila opravljena leta 1995. Opazovanja v letu 1995 imajo prelomni značaj, v celotni mreži je bil namreč izvršen prehod

na meritve po metodah GPS, ki so za velike mreže natančnejše in so predvidene tudi v prihodnosti. Poleg GPS izmere mreže so bile ob prehodu na novo metodo izmere v naši mreži opravljene tudi klasične terestrične meritve. Kotne meritve so bile nadomeščene z dolžinskimi, v mreži je bilo izmerjenih 10 dolžin, neodvisno po dvakrat.

Za določitev najverjetnejših vrednosti premikov je bila uporabljena takoimenovana diferenčna izravnava. Vhodni podatki za izravnavo so razlike med homolognimi opazovanji dveh časovnih obdobj, rezultati izravnave pa so koordinatne razlike med tema obdobjema. Tako se eliminirajo skupne sistematične napake.

Zaključek o stabilnosti

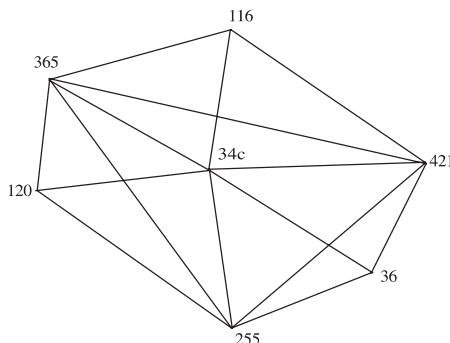
Rezultati dosedanjih meritev in obdelave podatkov kažejo, da so se v obdobju 1977-1995 zgodile nekatere spremembe. Na osnovi podrobne statistične analize je zelo privlačna hipoteza, da je pomik točke 1 - Belščice proti vzhodu po letu 1980 vendarle resničen. Praktično dokazano pa je zanimivo dosledno orientirano "drsenje" Begunjščice (točka 2) proti jugu. Končni zaključek raziskave je, da je pomikanje Begunjščice za 1 do 2 mm na leto proti jugu zelo verjetno (Jenko, 1996).

3.2 Ljubljanski centralni sistem

Ljubljanski centralni sistem obsega sedem predhodno stabiliziranih geodetskih točk državne geodetske mreže. Točke so izbrane tako, da povezujejo obrobja Ljubljanske kotline.

Oblika mreže

Ljubljanski centralni sistem je primer geodetske mreže, ki ni bila razvita z namenom ugotavljanja stabilnosti tal. Mreža je okvir triangulacijske mreže mesta Ljubljana, razvite v letih 1955/56. Šest obodnih točk skupaj s centralno točko tvori šesterkotni centralni sistem (Slika 3). Dolžine stranic v mreži so od 5 do 10 km.



Slika 3: Ljubljanski centralni sistem

Meritve in obdelava podatkov meritev

Prvotne kotne meritve iz leta 1955 niso bile uporabljene za ugotavljanje stabilnosti področja. Primerjava teh meritev z dolžinskimi meritvami iz leta 1976 (v mreži je bilo merjenih vseh 12 stranic) je pokazala pričakovane deformacije merila državne triangulacijske mreže, samostojni izravnavi obeh meritev pa sum na premike treh točk (421, 255 in 34c).

Leta 1985 so bile meritve mreže ponovljene. Merjene so bile dolžine z dodatkom treh diagonal. Z uspeho izravnavo so bile dobljene nove definitivne koordinate točk mreže, ki so se primerjale z leta 1976 določenimi koordinatami. Kot metoda za odkrivanje položajnih sprememb se je uporabljala Helmertova transformacija. Izbrane so bile različne kombinacije danih količin, saj na osnovi znanih geotektonskih informacij in zaradi majhne količine merskih podatkov določenega števila točk ni mogoče grupirati tako, da bi te točke predstavljale relativno nepomičen sistem in bi bile hkrati dovolj oddaljene druga od druge.

Zaključek o stabilnosti

Za obravnavano področje obstaja premalo geotektonskih informacij, prav tako pa je tudi merskih informacij premalo za določitev oz. odločitev o skupini fiksnih (stabilnih) točk in skupini premičnih točk. Ugotovljen pa je nedvoumen premik točke 255 za približno 9 cm (smer SV), ki je rezultat nestabilnosti tal te barjanske točke v obdobju 1976–1985, in verjeten, čeprav še ne potrjen premik točke 421 za nekaj cm (Jenko, 1986).

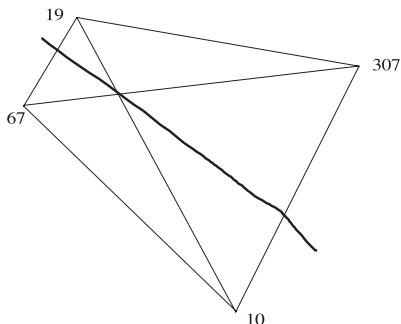
3.3 Mreža Idrija/Kanomlja

Mreža Kanomlja se razprostira ob enem zanimivejših prelomov v Sloveniji, to je idrijskem prelomu. Po daljšem iskanju optimalne rešitve je bilo za opazovanje izbrano širše območje Idrije vzdolž doline Kanomlje.

Oblika mreže

Mreža ima obliko klasičnega geodetskega četverokotnika, določenega s štirimi točkami, ki so med seboj vidne. Tri točke mreže predstavljajo obnovljene stabilizacije obstoječih točk trigonometrične mreže III. glavnega reda, četrta pa je bila stabilizirana na novo. Dolžine trigonometričnih stranic so približno 7 km, razen ene, ki je krajša. (Slika 4)

Slika 4: Mreža Idrija/Kanomlja



Meritve in obdelava podatkov meritev

Za ugotavljanje tektonskih premikov je bila opravljena samo ničelna meritev. V letu 1985 so bile v mreži izmerjene vse dolžine. Mreža je bila izravnana. Primerjava s starimi meritvami triangulacije ni bila opravljena. Presoja o stabilnosti točk mreže bo mogoča šele po prvi ponovitvi meritve mreže. Upamo, da bo le-ta kmalu vključena v program raziskav FGG – Oddelka za geodezijo.

Mreža Idrija/Kanomlja je bila le eden od sedmih geodetskih poligonov za geodinamična opazovanja, osnovanih v letih 1980-1985. Trije od njih, in sicer

- Vodice – Velika Kepa – Leskovec – Orljek – Vodice na podkumskem prelomu
- Košenjak – Velika Kopa – Basališče ob mislinjskem prelomu
- Ljubljanski grad – Rašica – Rožnik ob domnevnem ljubljanskem prelomu,

so v omenjenem obdobju doživeli tudi prvo ponovitev (Jenko, 1986). Rezultati, doseženi po posebni metodi merjenja dolžin (med 7 in 19 km), so sicer vzpodbudni, a žal je kasneje zmanjkalo pobude za nadaljevanje opazovanja. Sedaj že opešani razdaljemer AGA 710 bi v morebitnih ponovitvah morali nadomestiti – deloma tudi z uvedbo GPS metod.

3.4 Ljubljanske mikromreže

Analiza potresnih področij v Sloveniji je pokazala, da je najbolj seizmogenska cona prav gorenjsko-ljubljanska cona. Na podlagi seizmoloških raziskav je bilo predlagano, da bi se geodetske meritve opravile vzdolž ljubljanskega preloma. Idealno bi bilo merjenje vzdolž celotnega preloma, vendar zaradi številnih objektivnih razlogov to ni bilo izvedljivo. Zato so bile projektirane tri mreže. Predlagano je bilo, naj imajo mreže obliko geodetskega četverokotnika.

Oblika mreže

Mreža Gameljne

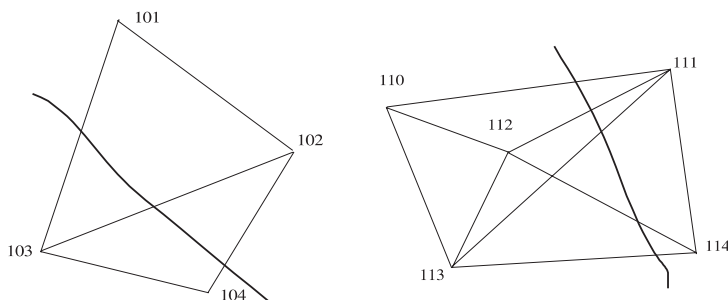
Mreža leži najseverneje in ima obliko četverokotnika z le eno diagonalo. Dve točki ležita na različnih straneh preloma (Debeli hrib pod Šmarno goro in Mali vrh na obronkih Rašice), dve pa na ravninskem območju (Blato in Skaručna). (Slika 5)

Mreža Dobravica

Mreža Dobravica predstavlja južno mrežo. Postavljena je na obronkih Mokrc. Opazuje se mišjedolski prelom. Mreža ima obliko četrkotnika s centralno točko Dobravica. Točki mreže sta pri Sv. Rupertu (111) in na Dolgih njivah (114) pri vasi Sarsko, dve (110, 113) pa sta ob cesti Ig-Golo. (Slika 6)

Slika 5: Mreža Gameljne

Slika 6: Mreža Dobravica



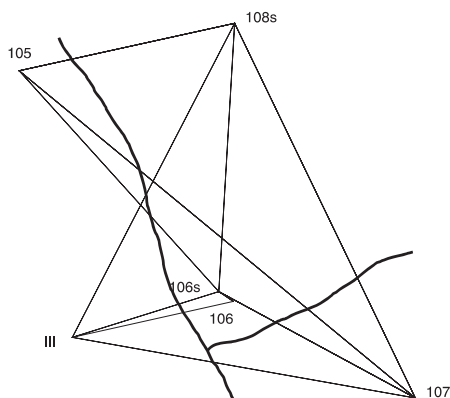
Mreža Ljubljana

Na območju mesta Ljubljana (centralna mreža) so pogoji za postavitev mreže zelo neugodni. Mrežo tvori 5 točk, kar omogoča povezavo Golovca (107) s Šišenskim hribom (105) prek Gradu (106) do točk na visokih zgradbah v mestu - Petrol (108) in FGG (III). Mreža ima glede na pogoje optimalno obliko. (Slika 7)

Dosedanje raziskave

Raziskovalna naloga je bila začeta leta 1978. Prve meritve so bile opravljene leta 1979. Domnevali so, da je štiriletni časovni interval dovolj dolgo obdobje, v katerem je velikost tektonskih premikov na mrežah že zaznavna. Po prvi ponovitvi meritev leta 1983 pa je bilo ugotovljeno, da je potrebno geodetska merjenja razširiti in povečati natančnost. Leta 1987 in 1988 je bila opravljena tretja serija merjenj, v letih 1991 in 1992 pa četrta serija. Zadnji meritvi sta bili opravljene v letih 1995 in 1996. Letos se predvideva ponovna izmera.

Slika 7: Mreža Ljubljana



Meritve in obdelava podatkov meritev

V vseh treh mrežah so merjene vse dolžine, zenitne razdalje ter opazovane smeri. Mreže so dodatno orientirane na oddaljene geodetske točke. Definitivne vrednosti koordinat so določene z izravnavo vsake mreže posebej. Uporabljena je bila izravnava z minimalnim številom danih količin, ki definirajo koordinatni sistem. Primerjava rezultatov posameznih serij meritev je bila izvedena z dodatnimi izračuni (prosta mreža, transformacija).

Zaključek o stabilnosti

Iz končnih rezultatov ni mogoče podati jasnih ugotovitev. Velikost vektorjev premikov ne presega bistveno srednje elipse pogreškov določitve položaja posameznih točk mreže, zato s statističnega vidika ne moremo govoriti o dejanskih premikih. Dogajanje v mreži pa kaže določene tendence. Za njihovo potrditev bodo potrebna dodatna merjenja.

4. MREŽA KRŠKO

4.1 Ponovna izravnava meritev iz leta 1954

Ugotavljanje recentnih premikov na osnovi geodetskih meritev na področju Krškega se je začelo v letih 1994/95. V želji po čimprejšnji določitvi stabilnosti območja je bila mreža definirana na osnovi državne trigonometrične mreže. Tako je bila mogoča primerjava meritev v državni mreži iz leta 1954 z novimi meritvami. Predpostavljeno je bilo, da bo daljša časovna baza nadomestila manjšo natančnost prvotnih meritev. (Slika 8)

Obravnavana trigonometrična mreža Krško54 (Slika 8) se razprostira na levem in desnem bregu reke Save na območju mesta Krško. Mreža točk, stabiliziranih večinoma leta 1954, je bila razvita za namen zgotovitve mreže 2. in 3. reda iz leta 1949. Oblika mreže Krško54 je dokaj pravilna, tudi opazovanja so dobro razporejena. V mreži je bilo opravljenih 67 kotnih opazovanj. Najkrajša dolžina trigonometrične stranice v mreži povezuje točki 118 in 123c in znaša 638 m, najdaljša pa točki 78 in 119 ter znaša 3412 m. Po Pravilniku o tehničnih normativih (Republiška geodetska uprava, 1981) se mreža Krško54 uvršča v trigonometrično mrežo 4. reda.

4.1.1 Stabilizacija in signalizacija trigonometričnih točk

Trigonometrične točke mreže Krško54 so stabilizirane z betonskimi ali granitnimi kamni in imajo po dva podzemna centra. Ekscentrični signali so večinoma cerkveni zvoniki, le točka 124c je tovarniški dimnik. V času meritev so centre signalizirali s štiri metre visokimi talnimi t.i. švicarskimi signali.

4.1.2 Metoda izmere in uporabljeni instrumentarij

Podobno kot večina osnovnih državnih mrež v tujini je bila tudi mreža Krško prvotno določena na osnovi klasičnih terestričnih kotnih meritev. Klasične meritve nam omogočajo bodisi ločeno določitev ravninskih koordinat (x,y) in višin teh točk (H) , bodisi skupno določitev prostorskih koordinat (x,y,H) . Glede na merjene količine (koti, dolžine ali oboje) govorimo o triangulacijskih, trilateracijskih ali kombiniranih mrežah. Koordinate točk računamo in podajamo v globalnem ali privzetem lokalnem npr. GK (Gauss-Krügerjevem) ravninskem koordinatnem sistemu.

Koordinate trigonometričnih točk v klasični geodeziji določamo posamično ali v skupini po dve, tri ali več točk. Čas, potreben za izračun trigonometričnih točk, ni premosorazmeren številu točk v skupini. V preteklosti, ko ni bilo elektronskih računalnikov, je veljalo pravilo, da je lažje in hitreje izračunati posamično nekaj točk kot vse naenkrat v skupini. Iz razloga ekonomičnosti je veljalo tudi pravilo, da se točke določajo posamično, če se s tem znatno ne okrne homogenosti in kvalitete mreže.

V mreži nižjih redov, kamor spada tudi mreža Krško54, so smeri opazovali po girusni metodi v treh, ponekod tudi v štirih girusih. Meritve v mreži 3. in 4. reda na območju Krškega sta opravljala Geodetski zavod iz Ljubljane, ki je uporabljal teodolit ZEISS Th II, in Vojno geografski inštitut JLA iz Beograda, ki je uporabljal instrument WILD T2.

4.1.3 Ponovna izravnava mreže Krško54

Osnovni namen skupne izravnave trigonometrične mreže v okolici Krškega je bil izboljšati kvaliteto in homogenost obstoječe mreže. Bistveni prednosti skupne izravnave sta:

- vsako opazovanje nastopi v izravnavi le enkrat in
- število novih točk je bistveno večje od števila danih točk, zato mreža pridobiva delne značilnosti prostih mrež, hkrati pa se zmanjšuje vpliv danih količin na iskane.

Rezultat takšne izravnave je enakomernejša porazdelitev popravkov opazovanj. A posteriori standardni odklon opazovane smeri je manjši od povprečja pogreškov, izpeljanih iz posameznih izravnav. Sorazmerno s tem se zmanjšajo tudi pogreški po koordinatnih oseh in polosi srednjih elips pogreškov. Različno pogojene skupne izravnave (glede na število in položaj danih količin) nam dajo informacijo o tem, koliko in kako so položaji točk v obstoječi mreži napačni zaradi izravnave po metodi izravnave posameznih točk ali izravnave v manjših skupinah. Zelo pomembna je tudi informacija o položajni natančnosti točk po skupni izravnavi ter o realni natančnosti opazovanj.

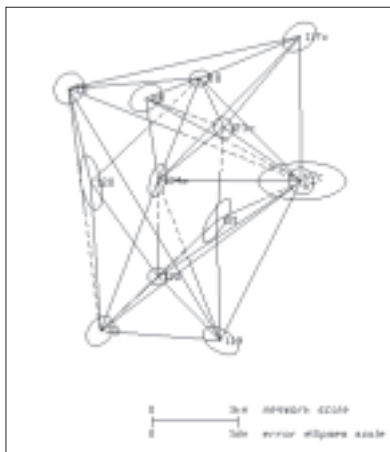
Mreža Krško54 je izravnana po metodi posredne izravnave kot prosta mreža. Analizo ocene kvalitete mreže izvedemo s pomočjo statističnega testiranja. Iskanje in izločanje grobih pogreškov v mreži nam omogočata globalni test modela in Popeova metoda.

4.1.4 Analiza ocene kvalitete mreže Krško54

Ali je mogoče trigonometrično mrežo Krško54 uporabiti za ugotavljanje potresne ogroženosti področja, na katerem leži jedrska elektrarna Krško? Primerjava položaja točk v mreži na osnovi ponovnih meritev s stanjem leta 1954 (Krško54) bi lahko dala odgovor o obstoju in velikosti tektonskih premikov na tem področju. Osnovna zahteva za to primerjavo je analiza natančnosti mreže Krško54. Da bi celoviteje ocenili kvaliteto mreže Krško54, smo obravnavali vse tri tehnične kriterije: natančnost, zanesljivost in občutljivost mreže.

4.1.4.1 Natančnost mreže Krško54

Absolutno natančnost mreže presojava z lokalnimi in globalnimi merami. Lokalne mere absolutne natančnosti predstavljajo standardni odkloni koordinat in elementi standardnih elips zaupanja. Lahko ugotovimo, da sta najbolj natančno določeni točki 118 in 122, obe s srednjim standardnim odklonom obeh koordinat 1,07 cm. Najmanj natančno pa je določena točka 67c s srednjim standardnim odklonom 3,91 cm. Verjetnost, da se točka nahaja znotraj standardne elipse zaupanja, je odvisna od števila nadštevilnih opazovanj. V primeru mreže Krško54 je verjetnost, da se točke nahajajo znotraj standardnih elips zaupanja 38,85% (maksimalno možno 39,35%). Verjetnost je torej precej visoka, kar kaže na zadostno število nadštevilnih opazovanj v mreži.



Slika 8: Geometrija mreže Krško54 z elipsami pogreškov

Absolutna natančnost mreže Krško54 je zelo dobra, kar kažejo tako lokalne kot tudi globalna mera natančnosti. Tudi stopnja verjetnosti, da se točke nahajajo znotraj standardnih elips zaupanja, je precej visoka. Ne moremo pa trditi, da je homogena in izotropna, saj oblika standardnih elips zaupanja ni enaka za vse nove točke mreže, pa tudi natančnost točk ni enaka v vseh smereh. Poudariti je potrebno, da čim večja je triangulacijska mreža, tem težje je zagotoviti njeno izotropnost.

4.1.4.2 Zanesljivost mreže Krško54

Globalna mera zanesljivosti mreže je standardni odklon enote uteži. V primeru obravnavane mreže znaša 0,99, torej izpolnjuje zahtevo, da mora biti standardni odklon uteži čim bliže 1. To po drugi strani pomeni, da je bila ocena natančnosti opazovanj dobra. Opravljena testna statistika potrjuje domnevo, da v mreži Krško54 ni grobo pogrešenih opazovanj. To lahko trdimo, saj je tveganje, da najmanj zanesljivo opazovanje (opazovanje z največjim standardiziranim popravkom: 124c in 73) izločimo iz mreže, bistveno preveliko. Ugotovimo lahko, da smemo mrežo Krško54 obravnavati kot zanesljivo.

Analiza ocene zanesljivosti mreže Krško54 je pokazala, da je geometrija mreže dobra, kar kažejo izračunane vrednosti lokalne in globalne občutljivosti. Zaključimo lahko torej, da ima mreža sposobnost samokontrole, torej se uspešno odziva na morebitni pojav grobih pogreškov v njej. Doseženo povprečno število nadštevilnosti 0,45 kaže na zelo zadovoljivo občutljivost mreže kot celote, še posebej, ker običajne triangulacijske mreže to stopnjo občutljivosti le s težavo dosežejo.

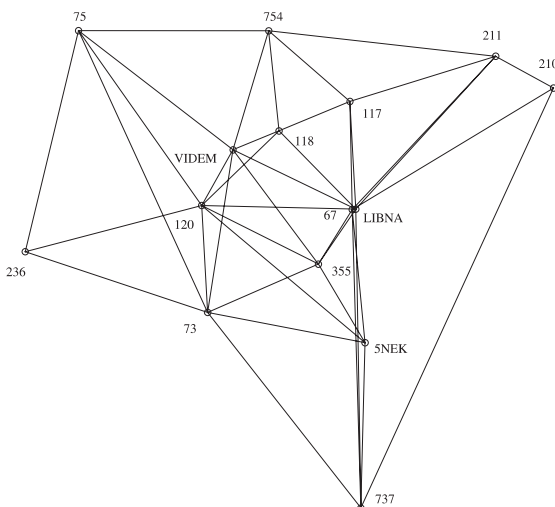
4.1.5 Zaključek o kvaliteti mreže Krško54

Poleg tega, da je mreža služila kot testni primer v postopku presoje o kvaliteti mreže, vidimo praktični pomen ponovne izravnave predvsem v tem, da je s korektno izravnavo dana možnost ugotavljanja stabilnosti obravnavanega območja. Na območju Krškega (v okolici JE) poteka nova izmera z GPS metodo prav z namenom določitve premikov. Mreži sta med seboj primerljivi, če vključujeta vsaj nekaj zanesljivih identičnih točk in bosta transformirani na skupni datum (npr. s S-transformacijo). Težavno je predvsem obravnavanje identičnih točk, saj GPS izmera zahteva upoštevanje posebnih kriterijev o primernosti točk, hkrati pa nudi koordinate v 3D koordinatnem sistemu. Naloga nadaljnjih raziskav je torej določiti kriterije in razviti postopke, da bosta terestrična mreža in GPS mreža med seboj primerljivi. Rezultat njune primerjave bo ugotovitev morebitnih premikov na tem območju oziroma potrditev stabilnosti tega območja.

Stare meritve v mreži so bile ponovno izravnane tudi v prvotnem računskem zaporedju. Rezultati niso pokazali bistvenih odstopanj od uradno veljavnih koordinat.

4.2 Geodinamična mreža Krško

Na širšem območju jedrske elektrarne Krško je bila na osnovi obstoječe državne geodetske mreže definirana geodetska mreža za opazovanje tektonskih premikov. Izbrana je bila GPS metoda izmere. Tako definirano mrežo Krško imenujemo geodinamična mreža. Mrežo, ki je bila razvita leta 1993, je prvotno definiralo 9 točk (od teh le tri iz mreže Krško54). Leta 1997 ob drugi meritvi je bila mreža dopolnjena s tremi točkami, stabiliziranimi na področju, kjer je bilo s prvo izmero ugotovljeno največje odstopanje novo določenih koordinat mreže od uradno veljavnih koordinat. Mrežo sedaj tvori 12 točk državne geodetske mreže, ki imajo dane koordinate v državnem koordinatnem sistemu. Dodatne točke so bile izbrane tako, da dopolnjujejo geometrijo mreže. Stabilizirane so na območjih, kjer je zagotovljena lokalna geološka stabilnost. Mrežo prikazuje slika 9.



Slika 9: Geodinamična mreža Krško

4.2.1 Meritve geodinamične mreže Krško

Geodinamična mreža Krško je bila izmerjena dvakrat. Prva meritev je bila izvedena leta 1993, druga pa leta 1997. Časovna baza je torej približno 4 leta. Uporabljeni so bili GPS sprejemniki firm Ashtech in Trimble, pri drugi meritvi pa so bili uporabljeni sodobnejši GPS sprejemniki firme Trimble. Metoda izmere je bila relativna statična metoda. Predvsem pri prvi meritvi leta 1993 je bilo veliko pozornosti potrebno posvetiti planiranju meritev, predvsem zaradi manjšega števila sprejemnikov ter manjšega števila razpoložljivih satelitov. Čas zajemanja podatkov je bil pri prvi meritvi 6 ur, pri drugi pa 2 uri. Obakrat je bil registriran satelitski signal nad višinskim kotom 150. Zaradi specifičnih zahtev GPS meritev so bili na nekaterih točkah sprejemniki stabilizirani ekscentrično.

4.2.2 Obdelava GPS opazovanj

Podatki opazovanj so bili obdelani s programsko opremo, ki jo nudi proizvajalec sprejemnikov (GPS, GPSurvey, Trimble). Z obdelavo GPS opazovanj pridobimo koordinatne razlike baznega vektorja med dvema stojiščema in nato z upoštevanjem faz GPS valovanja geocentrične koordinate opazovališč v koordinatnem sistemu WGS 84. Skupno je bilo pri meritvi leta 1993 obdelanih 73 baznih vektorjev, pri ponovitvi meritev leta 1997 pa 42 baznih vektorjev. Pri izračunu je bila obakrat upoštevana le frekvenca L1, leta 1997 pa so bile upoštewane tudi natančne efemeride tirnic satelitov CODE.

Definitivni položaji točk mreže so bili dobljeni na osnovi izravnave. Mreža je bila v obeh serijah meritev izravnana kot prosta mreža tako, da je bila ena točka privzeta kot dana. Tak način izravnave omogoča najrealnejšo oceno natančnosti izmerjenih koordinatnih razlik med točkami v mreži. Izravnava je v tem primeru namreč neodvisna od kvalitete danih točk. Izravnani položaji novih točk so v tem primeru določeni relativno glede na izhodiščno (dano) točko.

Vhodni podatki izravnave so bili vsi izračunani bazni vektorji. V prvi seriji meritev pa so bile za določitev merila mreže upoštewane tudi tri dolžine, natančno izmerjene z elektronskim razdaljmerom Kern Mekometer ME5000.

Rezultat izravnave prostorske mreže na elipsoidu so definitivne koordinate točk geodinamične mreže – izravnane geodetske koordinate (geografska širina j , geografska dolžina l in elipsoidna višina h).

4.2.3 Transformacija GPS mreže v državni koordinatni sistem

Položaje točk, definiranih z geografskimi koordinatami, transformiramo v ravninske koordinate Gauss-Kruegerjeve projekcije na izbranem referenčnem elipsoidu v Gauss-Kruegerjevem koordinatnem sistemu. Poleg transformacije koordinat moramo transformirati tudi informacijo o natančnosti položajev. Standardne deviacije položajev točk v smeri vzporednika in poldnevnikarja z zadovoljivo natančnostjo privzamemo za standardne deviacije Gauss-Kruegerjevih koordinat.

Izravnane Gauss-Kruegerjeve koordinate točk, izračunane v GPS mreži, smo nato primerjali z uradno veljavnimi koordinatami identičnih točk državne mreže. Ta primerjava je bila izvedena s pomočjo Helmertove ravninske transformacije. Transformacija ravninske GPS mreže v ravninski koordinatni sistem državne mreže je bila izvedena tako, da so koordinate širih stabilnih točk po transformaciji ostale nespremenjene. Stabilne točke so bile izbrane s sodelovanjem geologov. Odstopanja na drugih točkah lahko v danem primeru obravnavamo kot premike točk, relativno glede na stabilne točke.

Ključno vlogo pri odločitvi, ali je odstopanje dejansko premik točke ali ne, ima podatek o natančnosti določitve "premika", ki ga določimo na osnovi položajne natančnosti točk v primerjanih serijah meritev.

4.2.4 Zaključki o stabilnosti območja geodinamične mreže Krško

Rezultati geodetskih GPS meritev geodinamične mreže Krško in njihova primerjava z meritvami iz leta 1954 in 1967 statistično kažejo na obstoj horizontalnih recentnih premikov na območju Krškega.

Razlaga ni enostavna. Skupno z geologi je bilo krško območje razdeljeno na 4 cone. Na osnovi obravnave premikov po conah so bile iz študije izvzete točke, katerih spremembe koordinat kažejo na nesmiselne premike. Domnevni premiki so bili obravnavani ločeno po conah in na osnovi analize je bilo ugotovljeno, da so spremembe položajev nekaterih točk posledica lokalnih dogajanj mikrolokacije točke. Torej jih ne moremo uporabiti za študijo premikov ob prelomu. Na osnovi ponovnega izračuna brez teh točk so bile dobljene nove vrednosti premikov nekaterih točk, ki kažejo na zelo verjetne in smiselne premike ob prelomu.



Slika 10: Zaključki o premikih na območju geodinamične mreže Krško

Rezultati primerjav in ponovnega izračuna so določili mikrolokacijo možnega območja največje nestabilnosti in sicer v dveh conah: SZ delu in JV delu glede na orliški prelom. Študija je pokazala, da se plošči, ki se stikata ob prelomu,

po vsej verjetnosti razmikata. Dvom v gotovost te trditve vnaša verjetno premajhno število točk, na osnovi katerih so bili premiki računani.

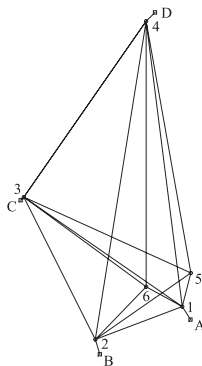
Rezultati GPS meritev in njihova primerjava z meritvami iz leta 1954 so pokazali, da je potrebno dogajanja ob orliškem prelomu natančneje raziskati.

4.3 Mikromreža Libne

Izhodišče za izbiro lokacije za spremljanja premikov na ožjem lokalnem področju območja Krškega je predhodna geološka študija. Študija kaže, da je najprimernejše območje vznožje hriba Libna na SV robu mesta. Zelo verjetna je domneva, da je teren na tem območju zgrajen iz rečne terase srednje pleistocenske starosti, ki je naknadno porušena zaradi tektonskih premikov. Nova mikrotrigonometrična mreža, ki je stabilizirana na tem področju, je namenjena opazovanju stabilnosti kontrolnih točk ob orliškem prelomu. Obliko mreže, ki jo pogojuje relief ter položaj kontrolnih talnih točk preloma določa šest točk, ki jih imenujemo "vezne" točke. Mreža ima obliko nepravilnega peterokotnika (pet obodnih točk od 1 do 5), točka 6 pa je vezna točka, ki poveča zanesljivost mreže. Vse točke se med seboj vidne (izjema je povezava 5 - 6) in predstavljajo geometrično osnovo za določitev položajev talnih točk A, B, C, in D. Talne točke so v bistvu ekscentri točk 1, 2, 3, in 4. Obliko mreže prikazuje slika 11.

68

Slika 11: Mikromreža Libne pri Krškem



Velikost mreže opišemo s površino mnogokotnika obodnih točk, ki znaša približno 4,27 ha. Najdaljša dolžina v mreži je med točkama 2 in 4 in sicer 385 m, najkrajša pa dolžina med točkama 5 in 6, ki znaša 40 m. Oddaljenosti ekscentrov so od 5 do 19 m. Maksimalna višinska razlika je 17 m.

4.3.1 Meritve mikromreže Libne

V mikromreži Libne je bila opravljena ničelna meritev. Ničelna meritev je bila določena na osnovi dveh enakovrednih in neodvisnih terenskih meritev in

ustreznega izračuna. Posamezna merska serija je obsegala popolno izmero in izračun mikromreže. Smeri so bile opazovane s teodolitom Kern E2, dolžine pa izmerjene s preciznim razdaljemerom Kern Mekometer ME5000 .

4.3.2 Obdelava terestričnih meritev in izravnava

Vhodni podatek kotnih meritev za izravnavo so sredine šestih girusov opazovanih smeri na posameznih stojščih. Natančnost merjenja horizontalnih kotov je bila ocenjena z metodo a posteriori ocene uteži za vsako serijo meritev ločeno. Zenitne razdalje so bile uporabljene za redukcijo dolžin na izbrano nivojsko ploskev. Kontrolirane so bile na osnovi izračunane višinske razlike, določene v obeh smereh z metodo trigonometričnega višinomerstva. Standardni odklon višinske razlike je bil 0,8 mm. Koordinate točk so bile določene na nivoju najnižje točke mreže. Dolžine je bilo torej potrebno reducirati na nivo točke 3.

Modulacijska frekvenca določa dolžinsko merilo razdaljemera. Modulacijska frekvenca Mekometra ME5000 je bila izmerjena na Katedri za geodezijo FGG s certificiranim (26.10.1998) frekvenčnim merilnikom HP5335A. Meteorološke parametre smo merili s preciznim elektronskim barometrom ter klasičnim psihrometrom. Na osnovi psihrometrijskih meritev na obeh končnih točkah dolžine je bila določena srednja temperatura v času meritve dolžine ter velikost delnega tlaka vodne pare. Srednji zračni tlak je bil določen na osnovi meritev na stojšču instrumenta ter izračunane višinske razlike.

Seriji meritev sta bili obravnavani ločeno. Mreža je bila obkraj izravnana kot prosta mreža. Predpostavljeno je bilo, da so tako kotne kot tudi dolžinske meritve v posamezni seriji opravljene z enako natančnostjo. Dolžine so kratke, zato predpostavimo, da na natančnost meritev vpliva predvsem začetni pogrešek, ki je neodvisen od velikosti merjene dolžine. Natančnost grup kotnih in dolžinskih meritev je bila določena s predhodno izravnavo obeh serij meritev z a posteriori metodo ocene uteži po Ebnerju. Tako določene uteži posameznih skupin opazovanj so bile vhodni podatek skupne izravnave obeh serij meritev.

Za določitev ničelnih koordinat značilnih točk ob prelomu so bile meritve obeh serij združene. Mreža je bila izravnana kot prosta mreža z upoštevanjem vseh meritev prve in druge serije. Zaradi načina stabilizacije ter načina centriranja in glede na lokalno stabilnost točk so bile točke mreže razvrščene v dve skupini:

- Vezne točke mreže 1, 2, 3, 4, 5 in 6:

Centriranje na točke je optično, stabilnost je slaba. Točke v obeh serijah meritev ne jemljemo kot identične točke. Vsaka točka bo imela določena dva para koordinat.

- Talne točke mreže A, B, C, in D:

Predpostavimo, da točke med obema serijama meritev niso spremenile položajev. Lokalna stabilnost je zagotovljena z načinom stabilizacije, za značilen tektonski premik je časovni interval prekratek. Stabilnost točk potrjuje tudi ločena predhodna izravnava in transformacija druge meritve na prvo. Koordinate talnih točk, določene s skupno izravnavo, so definitivne koordinate ničelne meritve. Natančnost določitve položaja točk je zelo velika, saj le na točki C velikost velike polosi standardne elipse pogreškov znaša 0,3 mm, na ostalih točkah pa 0,2 mm. Velikost male polosi je na vseh točkah 0,1 mm.

4.3.4 Ocena rezultatov ničelne meritve mikromreže Libne

Način stabilizacije točk mreže ter postopek meritev, obdelave podatkov in izravnave sta bila izbrana tako, da so končni rezultati optimalni. Položaj karakterističnih točk ob prelomu je določen z zelo veliko natančnostjo. Polosi standardnih elips so minimalne. Kljub zaradi konfiguracije terena nekoliko slabše oblike mreže so končni rezultati dobri. Kombinacija natančnih dolžinskih in kotnih merjenj to pomanjkljivost mreže odpravlja.

Ponovna izmera mreže Libne je predvidena. Obstaja možnost, da predvsem zaradi izredno visoke natančnosti meritev že prva ponovitev meritev pokaže na morebitne spremembe položajev talnih točk mreže.

5. ZAKLJUČKI

Dejavnosti, s katerimi se ukvarja sodobna geodezija, lahko bistveno pripomorejo k razjasnjevanju in razumevanju dogajanja na področjih, s katerimi se ukvarja geologija. Določanje stabilnosti nekega območja na osnovi geodetskih meritev je največkrat uspešno, je pa velikokrat povezano s številnimi problemi, ki zamegljujejo sliko in onemogočajo definiranje dejanskih sprememb. To so združevanje oz. primerjava meritev zelo različne kvalitete, kar je posledica izredno hitrega tehnološkega razvoja merske tehnike. Med meritvami je zaradi želje po čimprejšnjem definiranju rezultatov običajno relativno kratek časovni interval. Nenazadnje se za določanje premikov uporablja enostavne geodetske mreže, ki so cenejše in ne zagotavljajo zadostne kontrole meritev.

Izkušnje, pridobljene z dosedanjim delom, so dobra popotnica za nadaljnje raziskave na tem področju.

Literatura

- BAUMANN E.:** *Vermessungskunde*; Dümmler Verlag, Bonn 1985
- EBNER H.:** *A-posteriori Varianzschätzungen für die Koordinaten unabhängiger Modelle*; ZfV Nr.4/1972
- JENKO M.** *Meritve recentnih tektonskih gibanj v SRS*, Zbornik raziskovalnih nalog Inštituta GZ na temo opazovanja tektonskih premikov, Ljubljana 1986.
- JENKO M.** *Tehnično in analitično poročilo o četrnih meritvah recentnih tektonskih gibanj v Karavankah*, Ljubljana, 23.6.1996
- JOECKL R., STOBER M.:** *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*, Verlag Konrad Wittwer GmbH, Stuttgart 1989
- KOGOJ D.:** *Izbira najprimernejše metode a-posteriori ocene uteži merjenih količin geodetskih mrež*, disertacija, Ljubljana, februar 1992.
- KOGOJ D., B.STOPAR, F.VODOPIVEC,** *The Use of GPS in the Fourth Epoch Measurements of Crustal Movements along Ljubljana Fault*, *Journal of Geodynamics*, Volume 18, Exeter, Anglija 1993, Numbers 1-4, strani 123 do 133, ISSN 0264-3707.
- MIHAILOVIĆ K.:** *Geodezija 2 - 1. deo*, Izdavačko proizvođačko Građevinska knjiga, Beograd 1974
- PELTZER H.:** *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieur- vermessung II*; Kontaktstudium 1985, Konrad Witter, Salzburg 1985
- SELLGE H.:** *Statistische Probleme bei der Ausgleichung direkter, unabhängiger, normalverteilter Beobachtungen mit Geschätzten Gewichten*; DGK- Reihe C: Dissertationen, Heft Nr.213, München 1975
- VODOPIVEC F., A. BREZNIKAR, D. KOGOJ, B. KOLER, M. KUCHAR,** *Določitev premikov zemeljske skorje v testnih mrežah Ljubljane*, Ministrstvo za znanost in tehnologijo, pogodba C2-3550-792-92, Ljubljana 1993, 93 strani.
- VODOPIVEC F., D. KOGOJ, B. KOLER, B. STOPAR, P. MIOČ** (*Geološki zavod Ljubljana*), *Projekt geodetskega določevanja aktivnih tektonskih prelomnic*, Ministrstvo za znanost in tehnologijo, pogodba P2-340792-93, Ljubljana 1994, 97 strani.
- VODOPIVEC F., D. KOGOJ, B. KOLER, M. KUCHAR, B. STOPAR, S. SAVŠEK-SAFIĆ,** *Projekt geodetskega določevanja aktivnih tektonskih prelomnic*, Ministrstvo za znanost in tehnologijo, pogodba P2-5234-0792-94, Ljubljana 1995, 91 strani.
- VODOPIVEC F., A. BREZNIKAR, D. KOGOJ, B. KOLER, B. STOPAR, M. KUCHAR,** *Projekt geodetskega določevanja aktivnih tektonskih prelomnic*, Ministrstvo za znanost in tehnologijo, pogodba L2-7681-6792-96, Ljubljana 1996, 152 strani.
- VODOPIVEC F., A. BREZNIKAR, D. KOGOJ, B. KOLER, B. STOPAR, M. KUCHAR,** *Projekt stalnega določanja tektonskih premikov v okolici JE Krško*, Ministrstvo za znanost in tehnologijo, pogodba L2-7681-6792-96, Ljubljana 1996-1997.

Recenzija: Marjan Jenko

Prispelo v objavo: 2000-01-13