

Predlog geodetske spremljave aktivnih prelomnih con

A Proposition for Geodetic Recording of Active Fault Zones

Ladislav PLACER¹ & Božo KOLER²

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

e-mail: lpplacer@geo-zs.si

²Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

e-mail: bkoler@fgg.uni-lj.si

Ključne besede: recentni tektonski premiki, prelomne cone, geodetske meritve, Slovenija

Key words: recently tectonic movements, fault zones, geodetic measurements, Slovenia

Izvleček

Ugotavljanje recentnega premikanja ob prelomih je pomembna in občutljiva naloga. Večje prelome namreč spremljajo širše prelomne cone, ki zahtevajo specifičen pristop k geodetskimi meritvam premikov prelomnih kril. Vektor premika prelomnih kril ali rezultanta je vektorska vsota diferencialnih premikov znotraj prelomne cone. Zato predlagamo za ugotavljanje premikov stabilizacijo geodetske mreže točk, postavljenih v prelomnih krilih izven prelomne cone. Premik prelomnih kril se odrazi z deformacijo geodetske mreže. Na podlagi njene deformacije je potem mogoče določiti rezultatni vektor premika iz le-tega pa vpad prelomne cone ter smer in velikost premika.

Abstract

Establishing recent displacements along faults is an important and delicate task. Larger faults are accompanied by broader fault zones that require a specific approach to geodetic measurements of fault block displacements. The vector of fault block displacements, or resultant, is a vector sum of differential displacements within the fault zone. For the purposes of recording the displacements we propose the stabilization of a geodetic network of points positioned in fault blocks outside the fault zone, whereby the displacements would be manifested in the deformation of the network. The resultant displacement vector can then be derived from the latter deformation, and from that, the dip and strike of the fault zone as well as the extent of the displacement.

Uvod

V zadnjih letih se v Sloveniji v okviru več projektov izvajajo intenzivne geodetske meritve premikov Zemljinega površja (Weber et al., 2006; Gosar, 2007; Rižnar et al., 2007) in interpretacije premikov na podlagi uporabe metodologije PSInSAR in DInSAR (Komac & Bavec, 2007; Oštir & Komac, 2007). V vseh primerih gre za razveseljiv napredek v raziskovanju in interpretaciji danes dejavne kinematike blokov, ki so

za tektoniko in seizmologijo teoretskega in aplikativnega pomen. Razumljivo je, da imajo posamezne metode različen doseg, ki se ga raziskovalci gotovo zavedajo, vendar bi opozorili na dve izmed uporabljenih metod; na odlično zamisel, da geološko interpretiramo vertikalne premike, ki jih dobimo na podlagi rezultatov izmere ponovljenega preciznega nivelmana, ki je stabiliziran po regionalnih cestah zahodne Slovenije (Rižnar et al., 2007) in na opazovanja mikro-deformacij znotraj prelomne cone ob Idrij-

skem in Raškem prelomu (Gosar, 2007). Projekta formalno nista povezana, dajeta pa dovolj snovi za premislek o nadaljnjem delu, ali bolje rečeno o metodologiji ugotavljanja premikov ob dejavnih prelomnih conah. Razveseljivo je, da bomo s predvideno obnovo nivelmanske mreže, pridobili možnost ponovne določitve vertikalnih premikov na območju Slovenije.

Ugotavljanje danes aktivnih prelomov temelji na geodetskih meritvah premikov in na ugotavljanju hipocentrov potresov znotraj določenih prelomnih con. Drugi način je posreden, saj temelji na majhni natančnosti določanja potresnih žarišč in na bolj ali manj verjetni povezavi določene prelomne cone na površju s prelomno cono v globini, v kateri je prišlo do premika. Natančnejši je prvi način, ki pa zahteva dobro poznavanje geološke zgradbe površja. Geodetske metode, ki temeljijo na državni mreži osnovnih točk GPS (Weber et al., 2006) določajo le splošne trende premikov ne dajejo pa odgovora o velikosti in značaju premikov ob prelomnih conah pomembnih prelomov. Za interpretacijo dinamike recentnih tektonskih procesov je pomembno poznati dinamiko vsake prelomne cone posebej, pa tudi spremembo dinamike vzdolž iste prelomne cone.

Za določitev kinematike in dinamike prelomnih kril določene prelomne cone je treba ob poznavanju regionalnega in širšega tektonskega okvira izvesti tri osnovne postopke: 1. izbrano območje natančno strukturno skartirati, ugotoviti geometrijo prelomnih kril in določiti ustrezno mesto za stabilizacijo geodetskih merskih točk, 2. izvesti ničelno meritev in vsaj dve ponovitvi, na podlagi katerih lahko določimo časovni interval ostalih ponovitev in 3. narediti geološko interpretacijo na podlagi ugotovljenih premikov geodetskih točk.

Prelomne cone

V tem sestavku bomo zanemarili postopke kartiranja in navedli le pogoje za postavitev mreže geodetskih točk.

Prelomne con bodisi zmičnih, narivnih ali normalnih prelomov imajo svoje specifičnosti, vendar nepomembne za naše razglabljanje. Potrebno je le, da predstavlja v splošnem prelomna cona pas, ki zajema notranjo ali zmleto cono (jedro, stržen) znotraj katere leži glavna ali vodilna prelomna plo-

skov in zunanjo ali porušeno cono z vzporednimi in približno vzporednimi prelomi, ki predstavljajo Riedlove prelome. Poleg teh nastopajo še sekundarni prelomi, ki so nastali zaradi geometrijskih anomalij. Premiki v conah aktivnih prelomov se dogajajo znotraj celotne prelomne cone bodisi v strženu ali v zunanji coni. Dogajajo se ob vidnih ploskvah ali po penetrativnih površinah. Vedeti pa je treba, da je aktivnost prelomne cone vezana na celotni presek prelomne cone ali pa na segmente preseka z manjšim trenjem, torej na posamezne strižne ploskve, glavno prelomno ploskev ali dele zdrobljene cone. Opisane vidike premikanja je mogoče opazovati v golicah, zlasti v kamnolomih. Pomemben element premikanja so rotacije večjih in manjših blokov znotraj prelomnih con katerih os vrtenja je lahko pravokotna na smer pomika prelomnih kril ali pa tudi poševna nanjo, odvisno od take ali drugačne geometrije blokov. Zanemariti ne smemo tudi poševnega ali subvertikalnega iztiskanja blokov zaradi transpresijskega stanja ali zaradi same geometrije blokov. V vsakem primeru pa velja, da je vektorska vsota diferencialnih premikov znotraj prelomne cone rezultanta, ki je izražena v premiku prelomnih kril.

Poleg prelomnih con posameznih prelomov je potrebno ločiti tudi cone prelomov, ki jih moramo obravnavati kot enoten strukturni objekt. V Zunanjih Dinaridih so pomembni predstavniki prvega primera Idrijski, Raški in Divaški prelom, značilen predstavnik drugega primera pa je Kraški rob.

Če upoštevamo našeta dejstva, kažejo meritve ob posameznih ploskvah znotraj prelomne cone le na stanje v ploskvi meritve, ne pa v celotni prelomni coni. Zato je mersko korektno le opazovanje premikov obeh prelomnih kril zunaj prelomnih con.

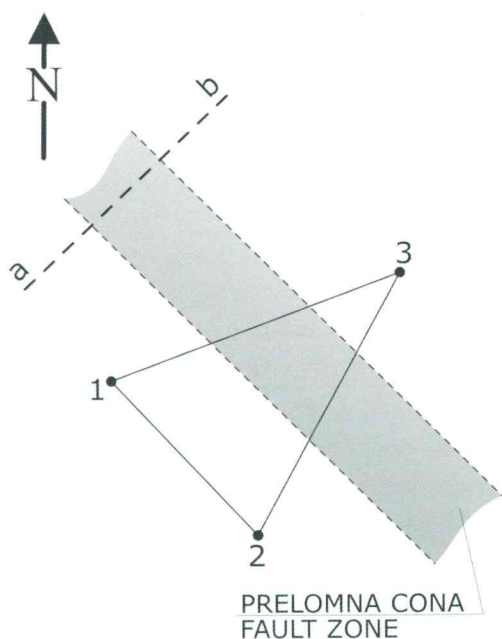
Opisana problematika se je izjemno jasno pokazala pri geološki interpretaciji vertikalnih premikov, ki so rezultat ponovne izmere preciznega nivelmana v zahodni Sloveniji (Rižnar et al., 2007). Meritve so dokazale recentne premike v območju obsežne cone prelomov Kraškega roba ter prelomnih con Divaškega, Raškega in Idrijskega preloma, ki bi jih lahko kvalitetno opazovali le z meritvijo premikov prelomnih kril. Rezultati v osrednji Sloveniji so ravno tako vzpodbudni kot v zahodni, zato je za nadaljnje raziskave potrebno izvesti ustrezne geodetske meritve, ki bi dale kvalitativne in kvantitativne podatke o posameznih aktivnih conah.

Metoda treh točk

S problemi geodetskih meritev aktivnih seizmogenih con se je pri nas prvi intenzivno ukvarjal Ribarič (1978), ki je predlagal metodo opazovanja premikov izven prelomnih con. Te se v svetu intenzivno izvajajo, vendar so prirejene posameznim primerom. Posebej znane so npr. meritve premikov ob prelomu Sv. Andreja v Kaliforniji. Za široke prelomne cone in cone prelomov, ki so značilne za karbonatne kamnine Zunanjih Dinaridov, bi bila najbolj ustrezna metoda treh točk (sl. 1). Predlagana metoda upošteva le geološki vidik meritve premikov, v geodeziji pa obstaja problem izbire lokacije, stabilizacije in uničevanja geodetskih merskih točk. Zato bo treba v praksi to dejstvo upoštevati in postaviti več točk in rezultate meritev obdelati po predlagani metodi treh točk.

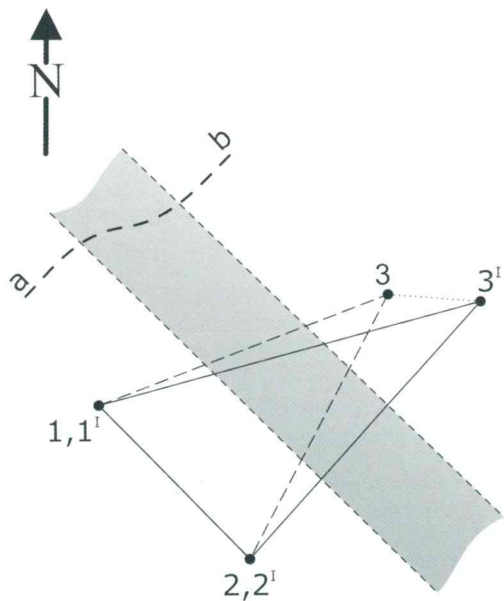
Za ugotavljanje aktivne tektonske dinamike je potrebno poznati prostorsko lego prelomnih con v katerih se premiki dogajajo in smer premikov prelomnih kril. Te podatke je mogoče dobiti s postavitvijo geodetske mreže z najmanj tremi točkami, ki so stabi-

lizirane izven prelomne cone; dveh v enem prelomnem krilu in ene v nasprotnem, pri pogoju, da med točkama v istem krilu ni prečnih prelomov ali drugih porušitev. Na sl. 1 je narisana tudi hipotetična trasa a-b pravokotno na prelomno cono, ki ponazarja nepremaknjeno stanje prve izmere. Premik prelomnih kril (sl. 2) se odraža v deformaciji trikotnika, ki jo je mogoče določiti z izmero horizontalne in vertikalne komponente premikov dveh ogliščnih točk glede na določeno navidezno stabilno ogliščno točko trikotnika, v našem primeru točke 1. Premik je ponazorjen tudi z deformacijo hipotetične trase a-b, ki ponazarja deformacijo zaradi diferencialnih premikov znotraj prelomne cone. Vloga glavne prelomne ploskve in drugih prelomnih ploskev je tu zanemarjena, ker je za prikaz metode nepomembna. V kinematskem smislu je bistven premik enega prelomnega krila nasproti drugemu, zato je za izmero potrebno poznati premik točke 3 nasproti točkama 1 in 2. Na sl. 2 je prikazano idealno stanje, ki se izraža v stabilnem in nespremenjenem odnosu daljice med točkama 1 in 2. Imenujmo jo osnovna daljica.



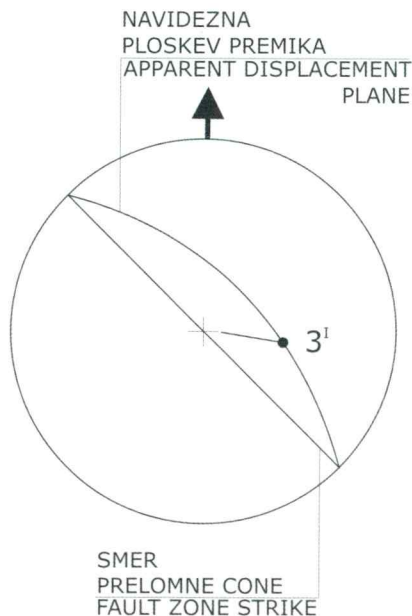
Sl. 1. Lega merskega trikotnika nasproti prelomni coni; a-b hipotetična trasa pravokotno na prelomno cono

Fig. 1. Position of the metric triangle with respect to the fault zone; a-b hypothetical course perpendicular to the fault zone



Sl. 2. Deformacija merskega trikotnika po prvi ponovitvi izmere; a-b deformacija hipotetične trase zaradi desnega premika

Fig. 2. Deformation of the metric triangle after the first repeated measurement; a-b deformation of the hypothetical course due to a right shift

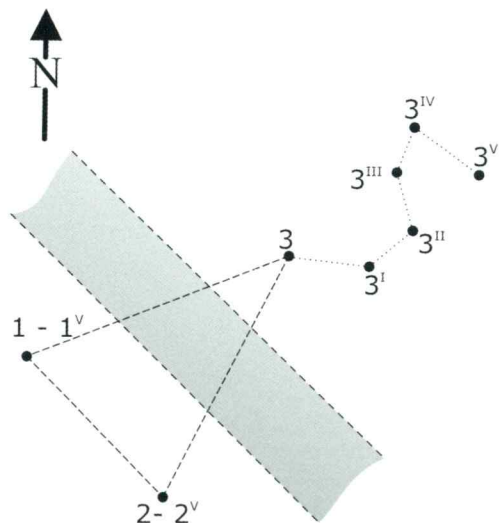


Sl. 3. Grafična konstrukcija navidezne ploskve premika po prvi ponovitvi izmere

Fig. 3. Graphic construction of the apparent plane after the first repeated measurement

Večjo deformacijo daljice 1-2 bi morali obravnavati kot znak neprimerno izbrane lokacije za stabilizacijo geodetskih točk, zato ležita točki 2 in 2^I na istem mestu. Tolerančni premik točke 2 nasproti točki 1 bi bil potemtakem odvisen od velikosti premika točke 3. Pri pogoju, da je premik prelomnih kril dovolj velik, je po prvi izmeri premika točke 3 do 3^I mogoče določiti hipotetično lego navidezne ploskve premika, za katero domnevamo, da je vzporedna prelomni coni. Zato je njuna slemenitev vzporedna. Legu navidezne ploskve premika je mogoče določiti analitično in grafično. Grafično je predstavljena na projekcijski polkrogli na sl. 3, kjer je navidezna ploskev premika določena s slednico prelomne cone in prebodiščem daljice $3-3^I$. Za natančnejšo določitev lege navidezne ploskve premika pa je potrebno izvesti več ponovitev izmer v ustreznih časovnih intervalih, odvisno pač od velikosti premikov in stopnje natančnosti določitve premikov.

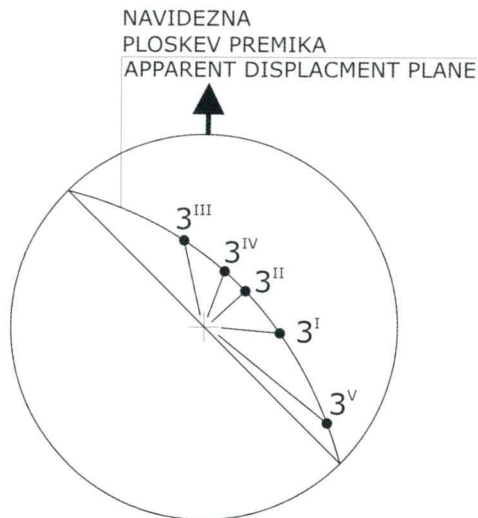
Premiki točke 3 so lahko linearni ali pa poligonalni. Pri linearni usmeritvi je postopek določitve navidezne ploskve premika enak kot na sl. 3, pri poligonalni usmeritvi (sl. 4) pa obstojata dve možnosti. Če se premiki dogajajo v eni ali več vzporednih ploskvah znotraj prelomne cone, se bodo pre-



Sl. 4. Deformacija merskega trikotnika pri nelinearnem premikanju po več izmerah

Fig. 4. Deformation of the metrical triangle in the case of nonlinear displacements after several repeated measurements

bodišča stranic poligona ($3-3^I-3^{II}-3^{III}-3^{IV}-3^V$) razvrstila v eni navidezni ploskvi premika (sl. 5), katere slemenitev je vzporedna slemenitvi prelomne cone. Tak primer bi utegnil biti običajen. Drugače je, če so točke



Sl. 5. Grafična konstrukcija navidezne ploskve premika pri nelinearnem premikanju po več izmerah

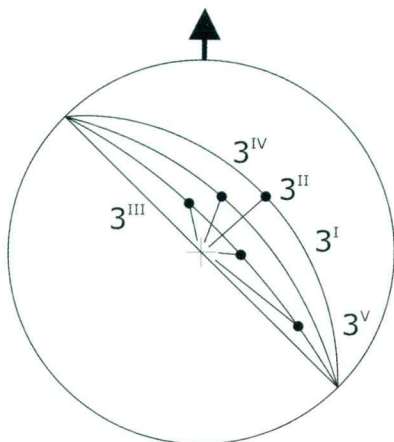
Fig. 5. Graphic construction of the apparent plane in the case of nonlinear displacements after several repetitions

prebodišč stranic geodetske mreže razmeta-ne v prostoru, tedaj domnevamo, da se pre-miki dogajajo ali po ravninah katerih sled-nice so vzporedne slednici prelomne cone (sl. 6) ali pa bi morali upoštevati tolerančna kota slemenitve in vpada prelomnih ploskev znotraj prelomne cone, ki smo ju prej dolo-čili s statistično obdelavo prelomne cone in poiskati ustrezne rešitve. V obeh primerih bi šlo za hipotetična ugibanja. Verjetno bi se anomalije pojavljale tudi zaradi majhnih premikov, ki bi bili blizu ali v mejah natanč-nosti določitev premikov oziroma statistič-no neznačilni. V takšnem primeru bi morali podaljšati čas med posameznimi izmerami. Pri statistično značilnih premikih pa bi bilo vzroke mogoče iskati v heterogeni zgradbi prelomnih con, npr. zaradi zožitve prelom-ne cone pri iztiskanju klinastega bloka, ki bi lahko povzročil premik prelomnega krila pravokotno na prelomno cono in podobno. V takih primerih bi morali obravnavati iz-brano mesto za stabilizacijo geodetskih točk kot neprimerno.

Pri postavitvi več točk (sl. 7) lahko pri-merjamo rezultate večjega števila trikotni-kov, vsekakor pa se vzporedno s številom poveča tudi zahtevnost izbire lokacij.

Projekt PIVO (Weber et al., 2006) daje odgovor na trende globalnega premikanja Jadranske mikroplošče. Za ugotavljanje ki-nematike manjših blokov znotraj mikroplo-šče, je potrebno izvesti ustrezne geodetske izmere na manjšem območju. Predlagana metoda sledi temu namenu. Precizne nepo-sredne meritve znotraj prelomne cone Ra-škega in Idrijskega preloma (Gosar, 2007) dajejo le odgovor o aktivnosti ene od plo-skev znotraj prelomne cone, bodisi glavne, bodisi vzporedne, na pomembno vprašanje o smeri premikov prelomnih kril pa ne daje-jo odgovora. Metoda je primerna le za ozke prelomne cone z izrazito glavno prelomno ploskvijo, ki so pogostejše v metamorfnih in magmatskih kamninah kot v karbonatnih. Bi pa uporabljena metodologija utegnili biti pomembna vzporedna merilna metoda pri ugotavljanju premikov v seizmogenih pre-lomnih conah, ker omogoča permanentno spremljanje dogajanja pred, med in po po-tresnih dogodkih.

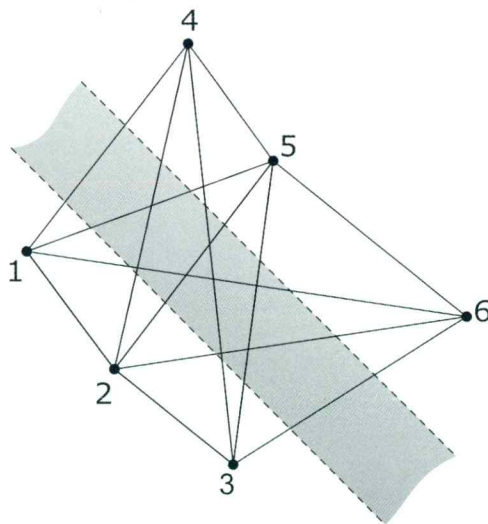
Glede na majhne premike ob prelomnih conah na območju Slovenije, je potrebno računati na dolgoletno opazovanje in več-kratne izmere, zato je izbira območij za postavitev geodetske mreže točk zahtevna. Potrebno je izdelati natančno strukturno



Sl. 6. Prikaz nelinearnega premikanja prelomnega krila v različnih navideznih ploskvah premikov ob predpostavki, da slemenijo v smeri prelomne cone

Fig. 6. Demonstration of nonlinear displacement of fault block in various apparent displacement planes, based on the premise that they have the same strike as the fault zones

geološko karto območja na katerem bi iz-vajali geodetske meritve in določiti geome-trijo blokov ter postaviti ustrezno geodetsko mrežo tako, da se izločijo tisti sekundarni premiki, ki bi utegnili zabrisati generalni premik prelomnih kril. Izbira območja za stabilizacijo geodetskih točk zahteva torej



Sl. 7. Metoda treh točk v mreži več geodetskih merskih točk

Fig. 7. Three-points method within the network of several geodetic measurement points

detajlno poznavanje strukturnih razmer na območju, kjer bomo izvajali geodetske meritve, ki ga lahko dosežemo z detajlnim kartiranjem.

Geodetski vidik

Geodezija je veda, ki se ukvarja z merjenjem in predstavitvijo Zemlje, vključno z njenim gravitacijskim poljem. Položaj posamezne točke v 3D prostoru določimo v horizontalni in vertikalni ravnini na osnovi izmere geodetske mreže točk. Če na posameznih točkah izvajamo izmero v različnih časovnih obdobjih, potem lahko določimo premike teh točk. V tem primeru morajo biti točke geodetske mreže trajno in kakovostno stabilizirane, da zagotavljajo enolično ponovitev terminskih izmer.

Lego točk lahko določimo na osnovi terestične geodetske izmere ali z uporabo sistema meritev GNSS (globalni navigacijski satelitski sistem) oziroma GPS izmero. Če uporabimo metodo terestične geodetske izmere, potem določimo lego točk v horizontalni in vertikalni ravnini z različnimi geodetskimi merskimi metodami. Lego točk v horizontalni ravnini lahko določimo na osnovi kotnih opazovanj (triangulacija), merjenju dolžin (trilateracija) ali kombinaciji obeh tipov opazovanj. Lega točke v vertikalni ravnini je določna z višino točke nad neko izhodiščno, primerjalno ploskvijo. Z geodetskimi merskimi metodami določimo višino točke na osnovi opazovanih zenitnih razdalj in dolžin med točkami (trigonometrično višinomerstvo) ali z metodo geometričnega nivelmana, ki spada med najnatančnejše geodetske merske metode. Če izvedemo geodetske meritve z GNSS, potem določimo lego točke v horizontalni in vertikalni ravnini istočasno. Katero geodetsko izmero uporabimo za določitev lege točk, je odvisno od velikosti in oblike geodetske mreže, zahtevane natančnosti in namena izvajanja geodetske izmere.

Poleg izmere geodetske mreže točk, so v geodeziji pomembne tudi raziskave metod statistične analize odkrivanja in določanja premikov ter deformacij v geodetskih mrežah. Te metode so poimenovali metode deformacijske analize. Deformacijska analiza je postopek, ki na osnovi geodetskih meritev, z metodami statistične analize, odkrije in določi premike točk v prostoru ter iz premikov izhajajoče deformacije geometrije

geodetske mreže. S postopkom deformacijske analize iz geodetskih meritev v dveh ali več terminskih izmerah ugotavljamo, ali se je med terminskimi izmerami spremenila (relativna) lega geodetskih točk, ki v idealizirani obliki predstavljajo naraven ali zgrajen objekt.

V okviru deformacijske analize morata biti izpolnjena naslednja temeljna pogoja:

1. *Pogreški, ki se pojavljajo pri merjenju ne smejo voditi do izračunov premikov, ki so drugačni od dejanskih premikov.* Vzrok temu dejstvu so lahko bodisi pretirano veliki pogreški meritev kot posledica malomarnosti ali nezadostne strokovnosti opazovalca, pogreškov instrumentov, zunanjih vplivov, napak v funkcionalnem ali stohastičnem modelu izravnave meritev v geodetski mreži, neprimerne izbire metode izmere ali instrumentarija in drugo.
2. *Zagotovitev zadostne verjetnosti določitve domnevno stabilnih točk.* Pri deformacijski analizi je ključnega pomena zanesljivo določanje stabilnosti točk v času med ponovitvami terminskih izmer. V postopku določanja premikov točk namreč velikost premikov določamo glede na stabilne (najstabilnejše) točke v geodetski mreži. Neizpolnjevanje tega pogoja nujno vodi do napačnih zaključkov v prikazu dejanskih premikov. Pri tem nam dodatne informacije drugih znanosti in strok lahko pomagajo pri interpretaciji ugotovljenih premikov.

Neizpolnitev temeljnih pogojev za optimalno rešitev problema deformacijske analize vodi v napačno interpretacijo rezultatov, ki se posledično izražajo v nepravilno izračunanih premikih in nepravilno interpretiranih deformacijah obravnavanega območja (Stopar et al., 2007).

Sklep

Meritve po satelitski metodi GPS na območju Gumina-Gemone (Schmitt & Marchesini, 1999) in opazovanja v jedru prelomne cone Idrijskega preloma (Placer, 1982) kažejo, da premiki na območju severozahodnega dela Jadranske mikroplošče niso vedno linearni. To razlagamo z domnevno interpretacijo, da se v tem delu Jadranska mikroplošča podirja pod Južne Alpe in drsi

ob dinarsko usmerjenih prelomih. Pri tem je drsenje ob prelomih NW–SE lahko povezano s podiranjem ali pa se dogaja samostojno, npr. ob Idrijskem in Ravenskem prelomu, ki sekata Južnoalpsko naravno mejo. Poligonalnost utemeljujemo torej z domnevo, da se posamezni načini premikanja lahko dogajajo istočasno in zaporedoma (Placer et al., 1999; Zupančič et al., 2001). Premiki verjetno tudi niso istosmerni ali enako intenzivni na celotni dolžini preloma. Zato menimo, da je treba strategijo geodetskih meritev na obravnavanem območju prilagoditi tem hipotetičnim predpostavkam.

S tem utemeljujemo potrebo po izvedbi ustreznih geodetskih meritev za določitev premikov in smeri premikov aseizmično in seizmično aktivnih prelomov Slovenije. Pri slednjih predlagane geodetske metode izmere omogočajo opazovanje in primerjavo premikov na površju in v hipocentrih, kjer je smer pomika mogoče določiti iz potresnega mehanizma. Postavitev smiselno razporejenih točk geodetske mreže ob danes dejavnih aseizmičnih in seizmičnih prelomnih conah in conah prelomov bi morala postati dolgoročna stalnica Slovenije, saj ima znanstveni in infrastrukturni pomen.

Kot zanimiv preizkusni objekt se ponuja idrijsko rudišče živega srebra, ki je preseka s Idrijskim prelomom. Oba dela prvotno enotnega rudišča, idrijski in ljubevški del, sta desnozmerno zamaknjena za 1950 m (Mlakar, 1964; Placer, 1982). Na površju nad rudnikom in v bližnji okolici je bilo stabiliziranih več geodetskih točk in sicer izhodiščne za jamsko izmero in tiste za ugotavljanje posredkov zaradi odkopavanja in plazenja. Nekatere geodetske točke znotraj in izven vplivnega območja odkopavanja so bile tekom 20. stoletja enkrat ali večkrat izmerjene, tako da obstaja možnost računske kontrole starih izmer in vključevanje ohranjenih starih geodetskih točk v izvajanje novih izmer. Zato predstavlja območje idrijskega rudnika enkratni poligon za postavitev izhodiščne geodetske mreže pri čemer bi lahko uporabili katero od starih točk v kombinaciji z novimi. Idejo smo pred leti že sprožili, vendar je na žalost zaspala. Idrijski prelom je pomemben strukturni objekt na meji med Južnimi Alpami in Dinariidi, njegov severozahodni del pa tvori mejo Jadranske mikroplošče. S tega vidika je poleg Ravenskega preloma pomemben objekt seizmotektonskih raziskav v zahodni Sloveniji.

A Proposition for Geodetic Recording of Active Fault Zones

Extended Summary

The area of the north-eastern part of the Adriatic microplate and broader in Slovenia has witnessed, within the frames of several projects in recent years, intense geodetic measurements of displacements of Earth's surface (Weber et al., 2006; Gosar, 2007; Rižnar et al., 2007). Alongside measurements, interpretations of displacements were also given using the PSInSAR and DInSAR methodologies (Komac & Bavec, 2007; Oštir & Komac, 2007). All this represents a well-coming advance in both research and interpretation of the presently active cinematics of blocks that are of considerable theoretic and applicative importance for tectonics and seismology. Having said that, it is clear that different methods have different ranges. In that respect, we would like to draw particular attention to two methods that were applied. The first one is the excellent idea of repeated precise levelling along regional roads of western Slovenia (Rižnar et al., 2007), which is still in progress, and the second one is observations of microdeformations within the fault zone along the Idrija and Raša faults (Gosar, 2007). Although the two projects are formally unconnected, they nevertheless offer enough material for pondering on the future work, or better, on the methodology of establishing the displacements at the active fault zones.

The presently active faults are based on the geodetic measurements of displacements and on the determinations of earthquake hypocentres within the fault zones. The second method for establishing these faults is indirect, based on a low accuracy of determining the earthquake foci and on a more or less probable connection of individual fault zones at the surface with those in the depth, where the movement occurred. The first of the two methods is more accurate, but it requires good knowledge of the geologic structure of the surface. Geodetic methods based on the GPS national network of basic points (Weber et al., 2006) determine only the general trends of displacements without giving information on the extent and character of displacements along the zones of important faults. The interpretation of the dynamics of recent tectonic processes, however, requires the knowledge of the dynamics of each fault

zone separately as well as the variations of the dynamics along the same fault zone.

Fault zones may be active in their entirety or only in some of their segments. Displacements within them may be linear (unidirectional) or polygonal (multidirectional), depending upon rotations and geometry of internal blocks. In any case, it holds true that the vector sum of differential movements within the fault zone equals the resultant expressed by the displacement of the fault blocks. It is therefore correct to record only the displacements of fault blocks and not the differential microdeformations within the fault zone.

Geodetic measurements of displacements along fault zones are widely performed around the world, but are being modified to suit individual circumstances. The displacement measurements along the St. Andreas fault in California, for example, are particularly well known. The most appropriate method for the broad fault zones and zones of faults typical for carbonate rocks of the External Dinarides that comprise the north-eastern part of the Adriatic microplate appears to be the three-points method (fig. 1). The proposed method considers only the geological aspect of displacement measurements. For geodesy, on the other hand, this leaves the problem of site selection as well as stabilization and destruction of the geodetic measurement points. Hence these problems should be considered in practice and a sufficient number of points positioned, while the measuring results should be processed according to the proposed three-points method.

Establishing active tectonic dynamics requires the knowledge on the spatial position of fault zones, in which displacements occur, as well as on the direction of fault block displacements. These data can be obtained by creating a geodetic network of at least three points that are stabilized outside the fault zone; two in one fault block and one in the opposite block, providing that no cross-faults or other deformations occur between the points in the same fault block. Fig. 1 shows also the hypothetical a-b course, which is drawn perpendicularly to the fault zone that represents the undisturbed state of the first measurement. Displacement of fault blocks (fig. 2) is manifested in the deformation of the triangle that can be determined by measuring the horizontal and vertical components of displacements of two corner points with

respect to the determined apparent stable corner point of the triangle, in this case Point 1. Displacement is illustrated also by the deformation of the hypothetical a-b course that represents deformation due to the differential displacements within the fault zone. The role of the principal fault plane and other fault planes is here neglected, since it is not important for the demonstration of the method. Essential in the cinematic sense, on the other hand, is the displacement of one fault block with respect to the other block, whereby it is necessary to know the displacement of Point 3 with regard to Points 1 and 2. Figure 2 shows the ideal state that is reflected in a stable and constant character of the line between Points 1 and 2. Let us call it the basic line. A larger deformation of Line 1-2 should be considered as a sign of inappropriate selection of the location for stabilizing geodetic points, and the cause of Points 2 and 2' lying on the same spot. Tolerance displacement of Point 2 with respect to Point 1 should thus depend upon the size of the displacement of Point 3. Providing that the displacement of fault blocks is large enough, it is possible to determine, after the first measurement of the displacement of Points 3 to 3', the hypothetical position of the apparent displacement plane that is considered parallel to the fault zone. Their strikes are thus parallel. The position of the apparent displacement plane can be determined analytically or graphically. The plane is graphically represented on the projection hemisphere on fig. 3, where the apparent displacement plane is determined with the strike of the fault zone and the point of intersection of Line 3-3'. For a more accurate determination of the position of the apparent displacement plane, several repeated measurements in appropriate time intervals are necessary, depending upon the magnitude of displacements and degree of accuracy in displacement determination.

Displacements of Point 3 can be linear or polygonal. When linear, the procedure of determining the apparent displacement plane is equal to that shown on fig. 3, whereas in the polygonal displacement (fig. 4) two possibilities exist. If displacements occur in one or several parallel planes within the fault zone, the points of intersection of polygon sides ($3 - 3^I - 3^{II} - 3^{III} - 3^{IV} - 3^V$) lie in one apparent displacement plane (fig. 5), the strike of which is parallel to the strike of the fault zone. Such might be the usual case. The

situation is different if intersection points of sides of the geodetic network are scattered in space; in that case the displacements are supposed to occur in planes, the directions of which are parallel to the directions of the fault zone (fig. 6). Either that or the tolerance angles of strike and dip of the fault planes within the fault zone should have been considered, which had previously been determined by statistical processing of the fault zone, and thereby find the correct solutions. Both cases would involve hypothetical guesswork. Anomalies would most probably appear also owing to small and statistically insignificant displacements close to or within the limits of detection in measuring the displacements. In that case, the time interval between individual measurements should be increased. In the case of statistically significant displacements, however, the causes could be sought in the heterogeneous structure of the fault zones, e.g. due to the narrowing of the fault zone caused by the expression of a wedge-shaped block that could result in a shift of the fault block perpendicularly to the fault zone. In such cases the selected sites for stabilization of geodetic points should be considered as inappropriate.

When a larger number of points is positioned (fig. 7), the results of a larger number of triangles could be compared. An increase in number, however, also causes the selection of point positions to become more demanding.

Measurements according to the satellite GPS method in the Gemona area (Schmitt & Marchesini, 1999) and observations in the core of the fault zone of the Idrija fault (Placer, 1982) furnished indications that displacements in the north-western part of the Adriatic microplate are not always linear. This is explained by the hypothetical interpretation of the Adriatic microplate being underthrust in this part under the Southern Alps and sliding along the faults of the Dinaric strike. Sliding along the NW–SE striking faults can either be associated with underthrusting or it occurs independently, e.g. along the Idrija and Ravne faults that cut through the Southern Alpine thrust front. Polygonality is hence based on a hypothesis on simultaneous or successive occurrence of individual kinds of displacements (Placer et al., 1999; Zupančič et al., 2001). Displacements are most probably not of the same direction and intensity along the entire fault length. We therefore believe

that the strategy of geodetic measurements on the territory in question must be adapted to these hypothetical assumptions.

The above serves as the base for justifying the need for performing appropriate geodetic measurements in order to establish displacements and displacement directions of aseismically and seismically active faults in Slovenia. The proposed geodetic measurement methods permit observation and comparison of displacements on the surface and in hypocentres, where the direction of displacement can be determined from the seismic mechanism. The positioning of appropriately distributed points of geodetic network at currently active aseismic and seismic fault zones and zones of faults should become a constant and long-term obligation for Slovenia due to its scientific and infrastructural importance.

An interesting test feature for this purpose is the Idrija mercury ore deposit, which is cut by the Idrija fault. The two parts of the originally single deposit, the Idrija and the Ljubevč part were shifted dextrally for 1950 metres (Mlakar, 1964; Placer, 1982). Several geodetic points were stabilized on the surface above the mine and in the immediate surroundings, which were the starting points for underground measurements and points for recording subsidence caused by mining and landslides. Certain geodetic points within and outside the area of influence of mining were measured during the 20th century on a number of occasions, thus creating the possibility of calculation control of old measurements and inclusion of the preserved old geodetic points into the process of taking new measurements. Consequentially, the Idrija mine area represents a unique polygon for establishing a basic geodetic network in which some of the old points could be used in combination with the new ones. We already advanced this idea several years ago, but it was unfortunately not realized. In that respect we should emphasize that the Idrija fault is an important structural feature at the boundary between the Southern Alps and Dinarides, and its north-western part represents the boundary of the Adriatic microplate. From this point of view, the Idrija fault represents, alongside the Ravne fault, an important feature of seismotectonic research in western Slovenia.

Reference – References

- Gosar, A. 2007: Monitoring of micro-deformations along Idrija and Raša faults in W Slovenia (Opazovanje mikro-deformacij ob Idrijskem in Raškem prelomu v zahodni Sloveniji). – *Geologija* 50/1, 45–54, Ljubljana.
- Komac, M. & Bavec, M. 2007: Opazovanje vertikalnih komponent recentnih premikov v Julijskih Alpah s PSInSAR metodo (Application of PSInSAR for observing the vertical component of the recent surface displacements in Julian Alps). – *Geologija* 50/1, 97–110, Ljubljana.
- Mlakar, I. 1964: Vloga postrudne tektonike pri iskanju novih orudenih con na območju Idrije. – *Rudarsko-metalurški zbornik*, 1, 18–25, Ljubljana.
- Oštir, K. & Komac, M. 2007: PSInSAR and DInSAR methodology comparison and their applicability in the field of surface deformations – A case of NW Slovenia (Primerjava uporabe metodologije PSInSAR in DInSAR za opazovanje premikov površja – primer SZ dela Slovenije). – *Geologija*, 50/1, 77–96, Ljubljana.
- Placer, L. 1982: Tektonski razvoj idrijskega rudišča (Structural history of the Idrija mercury deposit). – *Geologija*, 25/1, 7–94, Ljubljana.
- Placer, L., Poljak, M., Živčič, M. & Bajc, J. 1999: Potres 12. aprila 1998 v zgornjem Posočju, Seizmotektonska interpretacija (The earthquake on April 12, 1998 in the upper Soča Territory, Seismotectonic interpretation). *Potresi v letu 1998 (Earthquakes in 1998)*, 91–100, Uprava RS za geofiziko (Geophysical Survey), Ljubljana.
- Placer, L. 2007: Vzroki nastanka recentnih in subrecentnih plazov na Rebrnicah – geohazard z vidika kompleksnosti geoloških procesov. – *Geološki zbornik*, 19, 82–84, Ljubljana.
- Ribarič, V. 1978: Študija izvedbe preciznih geodetskih meritev v seizmogenih conah Slovenije s testnim primerom Ljubljane. – *Seizmologija*, 1–37, Ljubljana.
- Rižnar, I., Koler, B. & Bavec, M. 2007: Recentna aktivnost regionalnih geoloških struktur v zahodni Sloveniji (Recent activity of the regional geologic structures in western Slovenia). – *Geologija*, 50/1, 111–120, Ljubljana.
- Stopar, B., Ambrožič, T., Koler, B., Savšek Safič, S., Sterle, O. & Kogoj, D. 2007: Smernice za izvedbo geotehničnega opazovanja (geodetski del), delovno gradivo, Ljubljana.
- Schmitt, G., & Marchesini, C. 1999: Geodetic Activities with Respect to Geocinematics in Friuli and the Eastern Alps. *Proceedings, Second Inter. Symp., Geodynamics of the Alps-Adria Area by Means of Terrestrial and Satellite Methods*, 283–292, Univ. Zagreb and Tech. Univ. Graz, Zagreb, Graz.
- Zupančič, P., Ceci, I., Gosar, A., Placer, L., Poljak, M. & Živčič, M. 2001: The earthquake of 12 April 1998 in the Krn Mountains (Upper Soča valley, Slovenia) and its seismotectonic characteristics. – *Geologija*, 44/1, 169–192, Ljubljana.
- Weber, J., Vrabec, M., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P. & Dixon, T. 2006: The PIVO-2003 experiment: a GPS study of Istria peninsula and Adria microplate motion, and active tectonics in Slovenia. In: Pinter, N. et al. (eds.): *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics, and Hazards*, 305–320, Springer.