

# Projekt SLOKIN – Geokinematski model ozemlja Slovenije

Bojan Stopar\*, Oskar Sterle\*, Klemen Ritlop\*\*\*, Polona Pavlovčič Prešeren\*, Božo Koler\*, Mihaela Triglav Čekada\*\*, Dalibor Radovan \*\*, Niko Fabiani\*\*, Petra Jamšek Rupnik\*\*\*, Jure Atanackov\*\*\*, Miloš Bavec\*\*\*, Marko Vrabec \*\*\*\*

## Povzetek

Cilj projekta je zasnovati geokinematski model aktivnih tektonskih deformacij v severovzhodnem delu Jadransko-Evrazijske kolizijske cone, ki zavzema večino ozemlja Slovenije. Za rešitev naloge bomo uporabili opazovanja GNSS z več kot 60 točk, pridobljena v obdobju več kot 30-ih let, ponovljene meritve državne nivelmanske mreže visoke natančnosti ter arhiv radarskih satelitskih posnetkov v obdobju skoraj 30 let. Omenjeni nizi podatkov bodo osnova za vzpostavitev časovnih vrst koordinat, vektorjev hitrosti premikov ter statistično značilnih premikov, ki bodo vhodni podatek za vzpostavitev prostorskega, to je horizontalnega in višinskega geokinematskega modela obravnavanega območja. Geokinematski model bomo nato uporabili za izdelavo modela aktivnih tektonskih deformacij. Pri tem bomo uporabili različne geološke in geofizikalne podatke, kot so strukturne in tektonske karte, karto aktivnih prelomov Slovenije, podatke o instrumentalni in zgodovinski potresni aktivnosti, ocene dolgoročnih povprečnih hitrosti tektonskih premikov iz geomorfoloških in strukturno-geoloških podatkov ter paleoseizmološke podatke o potresni aktivnosti tektonskih struktur v preteklosti. Geokinematski model in iz njega izvedene produkte, kot sta karta porazdelitve deformacij in hitrostni profili, bomo uporabili za identifikacijo aktivnih tektonskih struktur in kvantifikacijo njihove recentne kinematike. Na podlagi geološke interpretacije geokinematskega modela bomo ozemlje Slovenije razdelili glede na stopnjo tektonske aktivnosti.

**Ključne besede:** GNSS, nivelman, DInSAR, geokinematski model, model aktivnih tektonskih deformacij, tektonska aktivnost, potresna nevarnost

**Key words:** GNSS, levelling, DInSAR, geokinematic model, model of active tectonic deformations, tectonic activity, seismic hazard

## Znanstvena izhodišča ter opredelitev problema

Ozemlje Slovenije in njena širša okolica se nahaja na konvergentnem stiku dveh litosferskih plošč, Jadranske mikroplošče in Evrazijske plošče, ki se zadnjih več 10 milijonov let premikata druga k drugi. Zato na ozemlju Slovenije prihaja do krčenja s hitrostjo nekaj milimetrov na leto (slika 1). Kolizija med ploščama je gonilna sila tektonskih procesov v regiji, ki so na stiku plošč povzročili nastanek Alpskega in Dinarskega orogena. Aktivni tektonski procesi na stiku plošč še vedno potekajo in so vzrok znatni seizmični aktivnosti na ozemlju Slovenije, ki zaradi tega sodi med potresno najbolj ogrožene države v Evropi, čeprav so v globalnem merilu hitrosti deformacij na našem ozemlju razmeroma nizke. Samo v obdobju zadnjih 500 let je ozemlje prizadelo več potresov, ki so imeli katastrofalne učinke na družbo in infrastrukturo.

Aktivni tektonski procesi povzročajo tudi zaznavne deformacije površja, ki so posledica premikanja in rotacije blokov ob prelomih, gubanja in drugih tektonskih premikanj, kot je nabiranje elastičnih deformacij pred potresi. Značilno je, da so tektonske deformacije po

---

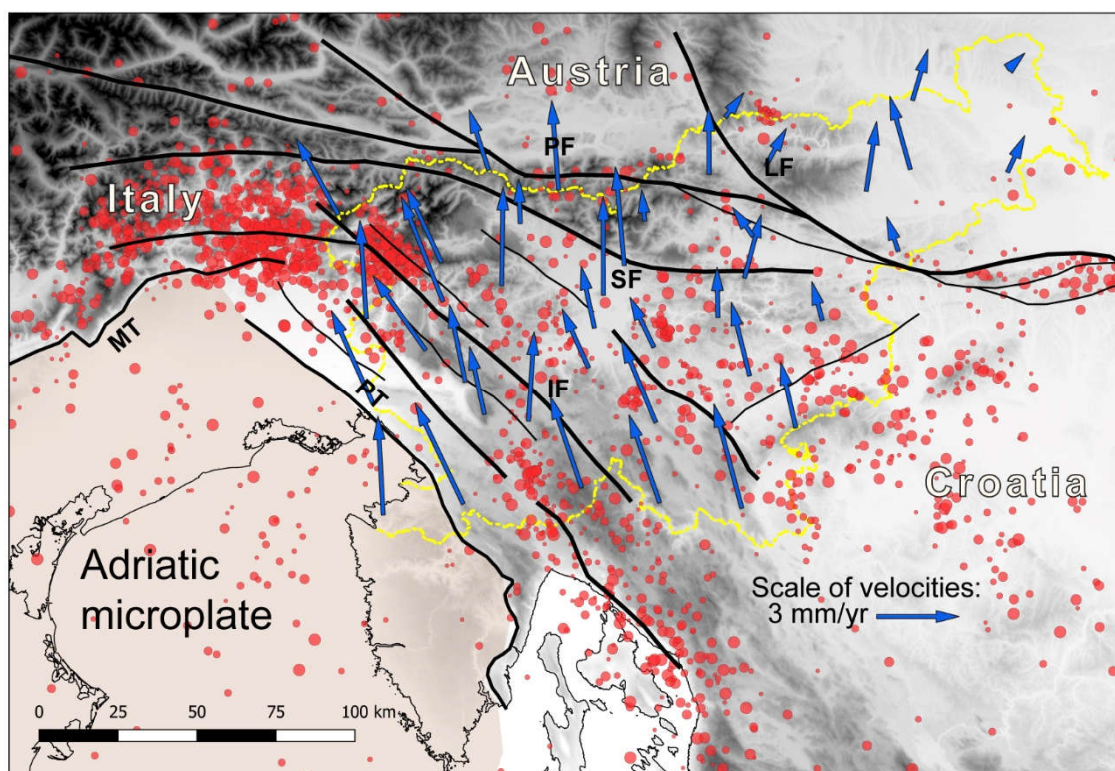
\* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

\*\* Geodetski inštitut Slovenije

\*\*\* Geološki zavod Slovenije

\*\*\*\* Univerza v Ljubljani, Naravoslovno tehniška fakulteta

ozemlju zelo neenakomerno porazdeljene, prostorsko pa so vezane na lego, geometrijo in orientacijo tektonskih struktur. V Sloveniji je po trenutno znanih podatkih identificiranih 92 aktivnih in potencialno aktivnih prelomov, ki akumulirajo krčenje ozemlja (Atanackov et al., 2019). Ob potresno aktivnih prelomih so premiki v času nezvezni, saj so pogojeni s seizmičnim ciklom nabiranja in sproščanjem napetosti, ki traja stotine do tisoče let. Premiki, ki so posledica aktivnih tektonskih deformacij, so dovolj veliki, da jih je s sodobnimi geodetskimi metodami možno izmeriti. Za večino znanih aktivnih prelomov je recentna aktivnost neznana in še ni bila izmerjena.



Slika 1: Vektorji hitrosti v vzhodnih Alpah in na področju Slovenije, na kolizijskem stiku Jadranske mikroplošče in Evrazije. Modri vektorji prikazujejo hitrosti premikov izbranih točk relativno na fiksno Evrazijo (Berk, 2019). Rdeče točke prikazujejo lokacije potresov z  $M > 2,5$ . Glavne tektonske strukture: IF – Idrijski prelom, LF – Labotski prelom, MT – Montellski nariv, PF – Periadriatski prelom, PT – Palmanovski nariv, SF – Savski prelom.

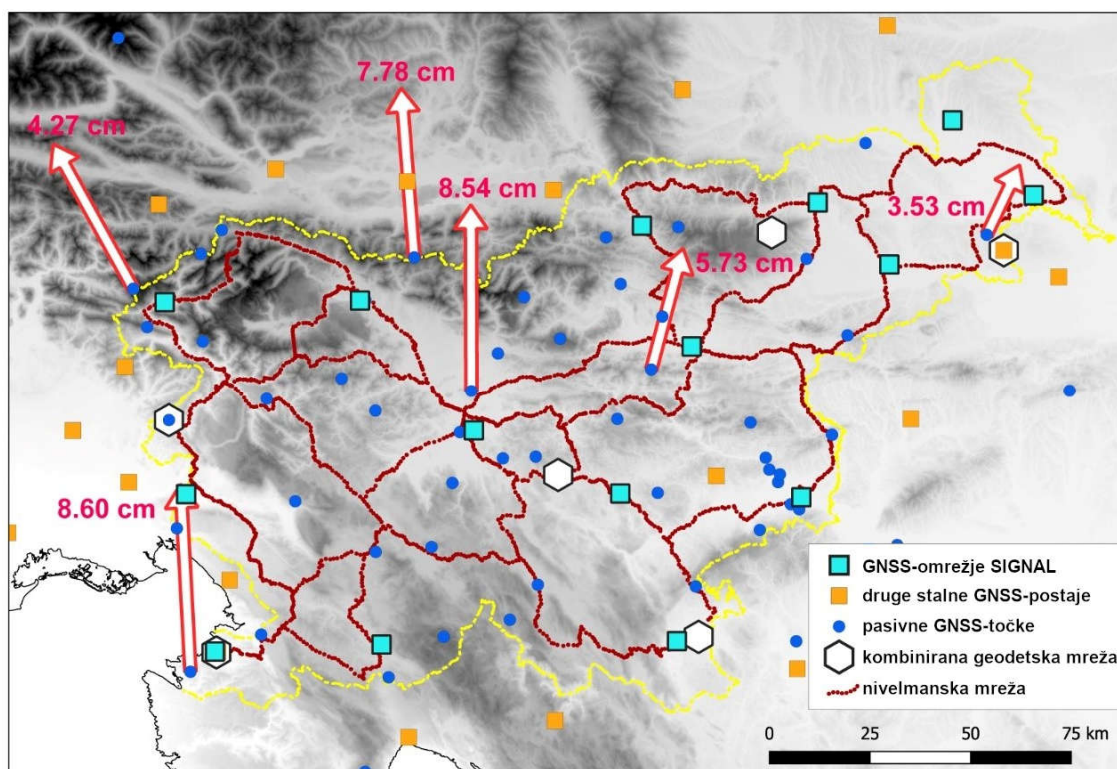
Aktivno geodinamično dogajanje pomeni, da na tektonsko aktivnih ozemljih z geodetsko izmero določene koordinate točk na površju Zemlje niso konstantne, ampak se s časom spreminjajo. S prejšnjimi raziskavami smo ugotovili, da na ozemlju Slovenije hitrosti premikov geodetskih referenčnih točk znašajo tudi do 5 mm/leto glede na stabilno Evrazijo (Weber et al., 2010; Sterle, 2015; Vrabc et al., 2006). Posledično so lahko referenčne točke, uporabljene za praktično realizacijo državnega referenčnega koordinatnega sistema pred 20 leti, trenutno premaknjene do 10 cm glede na stabilno Evrazijo oziroma stabilno referenčno osnovo (slika 2) (Berk, 2020).

Modeliranje tega gibanja je zapleteno, saj so premiki zelo nehomogeni – hitrost in smer premikanja se razlikujeta od točke do točke. Očitno je, da brez uvedbe geokinematskega modela, ki bi natančno predstavljal spreminjanje koordinat s časom, realizacija državnega koordinatnega sistema ne more zagotoviti zadostne kakovosti, tj. centimetrskosti določitve položaja v poljubnem trenutku, za trenutne in prihodnje zahteve gledečnosti

določitve koordinat točk tako v državnem kot tudi v globalnih referenčnih koordinatnih sistemih.

Nenehna digitalna preobrazba družbe in pojav številnih tehnologij, od pametnih mest do avtonomnih vozil, bosta potrebovala dolgoročno prostorsko in časovno obstojno referenčno osnovo za vse vrste pozicioniranja s točnostjo vsaj na centimetrski ravni. Predpogoj za doseg tega cilja pa je, da to zahtevo izpolnjuje tudi realizacija državnega koordinatnega sistema, na katerega neposredno vpliva stalno potekajoče tektonsko dogajanje.

Temelj vzpostavitve geokinematskega modela so časovne spremembe koordinat. Osnova za zanesljivo določitev časovnih sprememb geometrije prostora pa je kakovostna določitev premikov geodetskih točk, ki jih pridobimo z neprekinjeno potekajočimi in/ali ponavljajočimi se geodetskimi meritvami in kakovostna obdelava le-teh.



Slika 2: Pregled geodetskih podatkov (GNSS-postaje, nivelmanski poligoni, absolutne gravimetrične točke), ki so na voljo projektu. Rdeče puščice prikazujejo modeliran premik izbranih geodetskih referenčnih točk glede na stabilno Evrazijo v času od vzpostavitve horizontalnega koordinatnega sistema v letu 1996 do leta 2020 (na podlagi hitrosti premikov iz Berk (2019)) in kažejo na zelo nehomogeno polje hitrosti in na znatno poslabšanje kakovosti državnega referenčnega koordinatnega sistema.

Predlagano območje raziskav predstavlja tudi v širšem merilu idealen naravni laboratorij za študij procesov aktivne tektonike in preučevanje geodinamičnega vpliva na stabilnost geodetskega referenčnega koordinatnega sistema. Obstoječa mreža geodetskih točk na ozemlju Slovenije je ena od gostejših GNSS-geodinamskih mrež v Evropi (slika 2). Za precejšnji del točk mreže imamo na voljo več kot 15 let dolgo časovno serijo kampanjskih meritev GNSS (globalni navigacijski satelitski sistemi), ki jo dopolnjujejo podatki z več kot 40 stalnih postaj GNSS, enakomerno razporejenih po ozemlju Slovenije.

Vpogled v vertikalno komponento tektonskih premikov na območju Slovenije nam bodo omogočili izračuni višinskih premikov reperjev iz ponovljenih izmer slovenskih

nivelmanskih mrež visoke natančnosti v obdobju zadnjih 50 letih v kombinaciji z gravimetričnimi meritvami (slika 2).

Premike oziroma hitrosti premikov v trirazsežnem prostoru, določene na osnovi ponovljenih izmer GNSS, ter višinske premike, določene na osnovi ponovljenih izmer v državni nivelmanski mreži visoke natančnosti, bomo dopolnili s premiki, določenimi s postopki diferencialne radarske interferometrije (DInSAR).

### **Cilji predlagane raziskave**

Projekt SLOKIN bo povezal naše dosedanje aktivnosti na področju določitve horizontalnega geokinematskega modela Slovenije (Weber et al., 2005, 2010; Vrabc et al., 2006, 2010; Sterle 2015) in študij tektonske aktivnosti (npr. Vrabc & Fodor, 2006; Vrabc et al., 2006; Jamšek Rupnik et al., 2012; Moulin et al., 2016; Atanackov et al., 2019). V okviru projekta želimo posodobiti in izboljšati horizontalni geokinematski model, vzpostaviti nov vertikalni geokinematski model in na koncu poenotiti obe komponenti v koherenten trirazsežni geokinematski model ozemlja Slovenije. Glavni cilj projekta je tako izdelava poenotenega trirazsežnega geokinematskega modela aktivnih tektonskih deformacij v severovzhodnem pasu kolizijske cone med Jadransko in Evrazijsko ploščo.

Pomen takšnega geokinematskega modela je dvojen. Prvi je, da bo geokinematski model ključni sestavni del sodobnega geodetskega referenčnega sistema, ki ima velik praktični pomen za uporabo državne geodetske infrastrukture, tako z vidika opredelitve in realizacije koordinatnega sistema kot tudi za določitev geodetskih datumov horizontalne in vertikalne sestavine državnega geodetskega referenčnega sistema. Za realizacijo obeh je potreben visokokakovosten geokinematski model, ki predstavlja realne premike geodetskih referenčnih točk v prostoru in času.

Predlagana raziskava je zanimiv študijski primer, saj Slovenija predstavlja primer majhnega območja z zmerno visokimi relativnimi hitrostmi premikov (~3–4 mm/leto; Weber et al., 2005, 2010; Vrabc et al., 2006, 2010; Sterle 2015), ki s časom vplivajo na kakovost realizacije koordinatnega sistema do te mere, da je ta v desetletju ali dveh pod sprejemljivo ravno kakovosti. Raziskali bomo možnosti vzpostavitve srednjeročne in dolgoročne realizacije statičnih geodetskih datumov ter uvedbo časovno odvisnih koordinat. To se bo verjetno rešilo z ločitvijo časovno neodvisnih »uradnih« koordinat od »časovno odvisnih« koordinat, ki bodo med seboj povezane z geokinematskim modelom. Izziv za prihodnost pa bo ohranjanje dolgoročne kakovosti geokinematskega modela, ki ga bo treba nenehno posodabljanje na osnovi pridobivanja novih podatkov. V tem smislu bo potrebno zasnovati postopke, s katerimi bo opredeljen vpliv sprememb koordinat geodetskih referenčnih točk na kakovost in ponovljivost določitve koordinat katere koli točke v državnem koordinatnem sistemu, v kateremkoli časovnem obdobju. In, nenazadnje, vzpostaviti bo potrebno povezave med našim na novo uvedenim državnim koordinatnim sistemom, koordinatnimi sistemi sosednjih držav ter evropskim koordinatnim sistemom.

Drugi pomen geokinematskega modela bi lahko opredelili z njegovo združitvijo z obstoječimi geološkimi in geofizikalnimi podatki, ki bo vodila v strukturni model aktivnih tektonskih deformacij v regiji za ovrednotenje smeri in hitrosti aktivnih tektonskih premikov posameznih območij. Z uporabo baze aktivnih prelomov Slovenije (Atanackov et al., 2019), seizmoloških podatkov, ki jih lahko pridobimo pri ustreznih agencijah ali pa so javno dostopni, ter paleoseizmoloških podatkov, ki so na voljo iz doslej izvedenih raziskav (Bavec et al., 2013; Jamšek Rupnik et al., 2015, 2019), bomo uporabili geokinematski model za oblikovanje regionalnega seizmotektonskega modela. Takšen model bo predstavljal ključni prispevek k izboljšanju ocene potresne nevarnosti v državi. Poleg tega bo razumevanje

aktivnih tektonskih mehanizmov, pridobljeno tekom predlagane raziskave, omogočilo izboljšanje geokinematskega modela za uporabo v geodeziji.

Rezultati raziskave bodo prispevali tudi k nekaterim odprtim vprašanjem geodinamike Alp, saj nabor geodetskih podatkov z visoko gostoto predstavlja ključni vir za razumevanje porazdelitve aktivnih regionalnih tektonskih deformacij. Na obravnavanem območju namreč južno usmerjeno narivanje v vzhodnih italijanskih Alpah proti vzhodu na hitro preide v razpršene premike ob desnozmičnih prelomih v Dinaridih. Narava in mehanizmi prenosa deformacij znotraj tega prehodnega območja so trenutno zelo slabo razumljeni. Prav tako ni jasno, ali je deformacija na območju Slovenije razpršena, ali pa je zgoščena ob večjih prelomih in/ali območjih prelomov. Pričakujemo, da bo geokinematski model pomagal poiskati odgovore na ta nerešena vprašanja, s tem pa bo tudi k razumevanju dogajanja v počasi deformirajočih se kontinentalnih conah.

### **Pregled arhiva obstoječih geodetskih podatkov**

V nadaljevanju predstavljamo prostorsko in časovno razporeditev podatkov meritev, ki jih bomo uporabili za določitev časovnih vrst koordinat, premikov in hitrosti premikov.

#### **Geodetske in geodinamične kampanjske izmere GNSS**

Kot vhodni podatek v izdelavo geokinematičnega modela Slovenije bomo vključili kar se da veliko število točk na ozemlju Slovenije in njene okolice, na katerih so bile opravljene izmere GNSS. Ogrodje bo predstavljalo državno omrežje stalno delujočih postaj GNSS SIGNAL, ki ga bodo dopolnjevale stalne postaje kombinirane geodetske mreže in številne točke, na katerih so bile izvedene kampanjske izmere GNSS. Mreža točk bo dodatno dopolnjena tudi s tistimi bolj oddaljenimi stalno delujočimi GNSS postajami tujih omrežij GNSS, katerih podatki so prosto dostopni. Sem spadajo predvsem podatki evropskega omrežja EPN (*EUREF Permanent GNSS Network*) in globalnega omrežja IGS (*International GNSS Service*), regionalnega omrežja FReDNet (*Friuli Regional Deformation Network*) ter podatki nekaterih državnih omrežij sosednjih držav. Ker govorimo o veliki količini podatkov, tj. veliko število dnevniških datotek iz različnih stalno delujočih postaj GNSS in kampanjsko izmerjenih točkah v različnih časovnih obdobjih, bomo morali definirati protokol urejanja in shranjevanja tako datotek z opazovanji GNSS kot tudi metapodatkov o posamezni točki oziroma postaji. Tu se bomo naslonili na protokol shranjevanja podatkov v analiznih centrih službe IGS ter tudi na svoje lastne izkušnje. Na ta način si bomo poenostavili postopke nadaljnjih obdelav opazovanj GNSS.

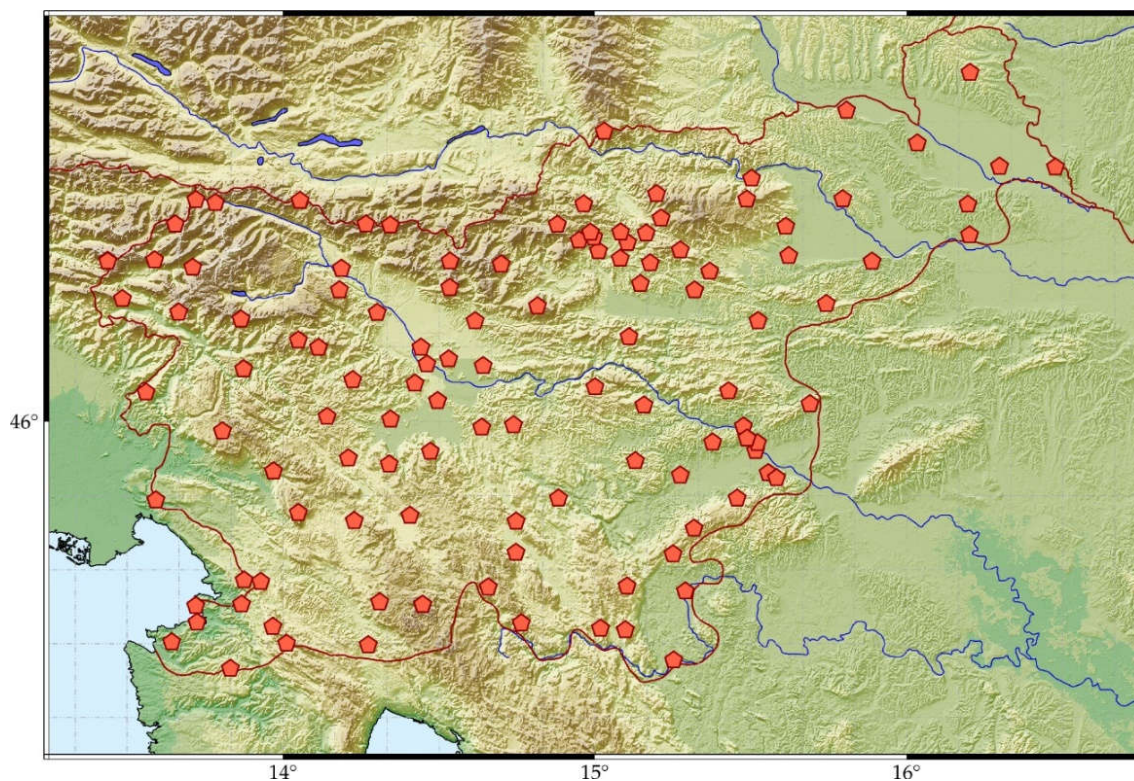
Do sedaj smo že izvedli analizo arhiva opazovanj GNSS, ki ga hranimo na Katedri za matematično in fizikalno geodezijo UL FGG (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo). V arhivu hranimo 4288 datotek RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), ki so bile pridobljene v številnih kampanjskih izmerah na skupno 341 geodetskih geodinamičnih točkah. Te točke so različnih vrst, od geodinamičnih geodetskih točk, trigonometričnih točk 1. reda, trigonometričnih točk nižjih redov do točk, ki so bile vzpostavljene le za začasne potrebe. Točke se nahajajo na območju Slovenije ter tudi v njeni bližnji in širši okolici. V nadaljevanju poglavja prikazujemo prostorsko razporeditev točk, na katerih so bila v preteklosti opravljena dovolj kakovostna opazovanja GNSS za potrebe ugotavljanja geodinamičnega dogajanja, časovno razporeditev izmer na posamezni točki ter način stabilizacije, ki tudi definira, ali je neka točka primerna za vključitev v izdelavo geokinematičnega modela. Analiza je namenjena identifikaciji tistih geodinamičnih točk na

katerih bi bilo v okviru projekta SLOKIN smiselno izvesti ponovno izmero GNSS. V analizo so tako vključene zgolj točke, na katerih so bile izvedene kampanjske izmere GNSS, ne pa tudi stalno delujoče postaje GNSS državnega omrežja SIGNAL in kombinirane geodetske mreže (na teh točkah se izmera GNSS izvaja neprestano).

### Prostorska razporeditev izmer GNSS

Kot smo že omenili, imamo v arhivu podatke, zbrane s 341 točk, na katerih so bile v preteklosti izvedene kampanjske izmere GNSS. Če se osredotočimo le na točke na območju Slovenije, imamo na voljo 139 točk. Izmed teh 139 točk niso vse točke zadostne kakovosti za uporabo v geodetske namene – ostane nam 121 točk, na katerih je bila do leta 2016 izvedena vsaj ena kampanjska izmera GNSS (slika 3). Teh 121 točk smo vključili v analizo lastnosti izmer GNSS, pri čemer smo analizirali tri vidike, in sicer:

- i)* način stabilizacije točke,
- ii)* število izmer na posamezni točki ter
- iii)* časovni razpon med prvo in zadnjo izmero na posamezni točki.



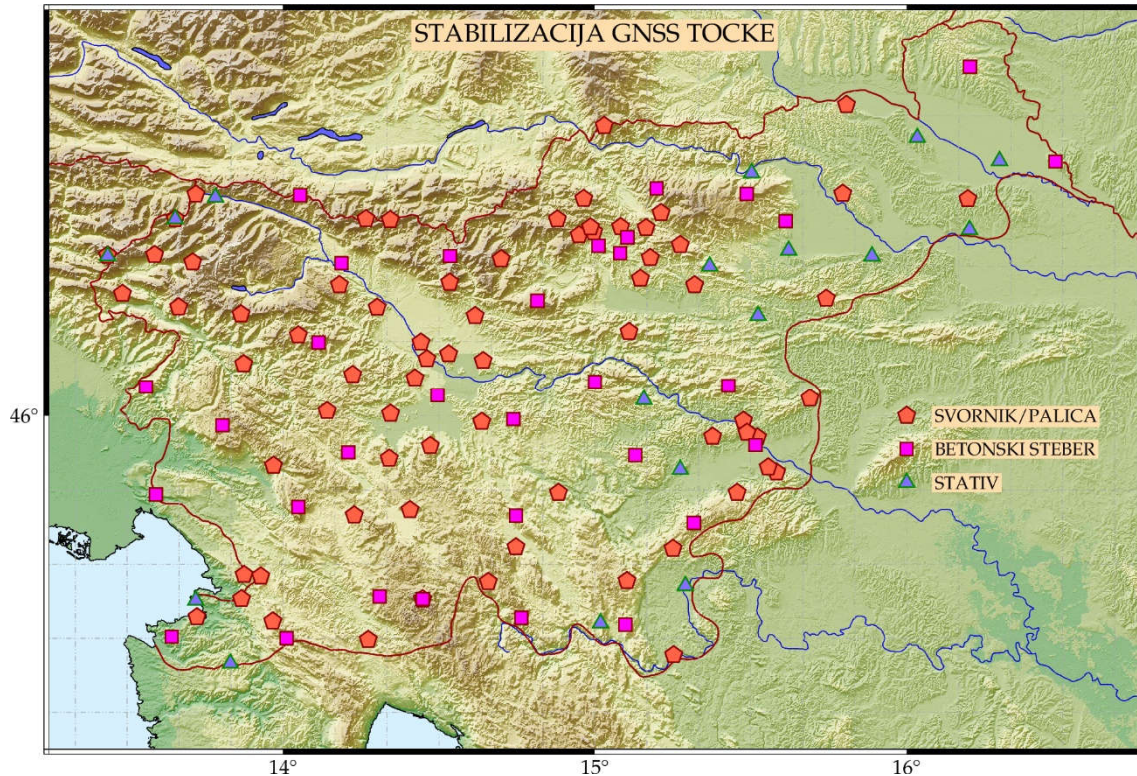
Slika 3: Končni niz geodetskih točk GNSS na območju Slovenije, ki so potencialne za ponovne izmere GNSS (121 točk)

### Analiza načinov stabilizacije geodetskih točk GNSS

Pri analizi stabilizacije geodetskih točk GNSS smo točke razvrstili v tri skupine:

- i)* stabilizacija s kovinskim svornikom (čep), vgrajenim v skalo: 72 točk,
- ii)* stabilizacija na betonskem stebru (z navojem ali z »luknjico«): 32 točk,
- iii)* geodetska točka, stabilizirana na tleh (betonski kamen, granitni kamen ...): 17 točk.

Prvi dve izvedbi stabilizacije sta primerni za geodinamične raziskave, saj omogočata visoko ponovljivost postavitve merskega instrumenta na točko. Pri tretjem načinu stabilizacije je potrebno postaviti merski instrument na lesen stativ, kar za potrebe ugotavljanja premikov ni primerno. Imamo torej 104 točke, ki so primerne za geodinamične raziskave (stabilizacija ali s svornikom ali z betonskim stebrom), in 17 točk, ki za geodinamične raziskave niso primerne (stabilizacija s stativom) in so zato izločene iz nadaljnje analize (slika 4).

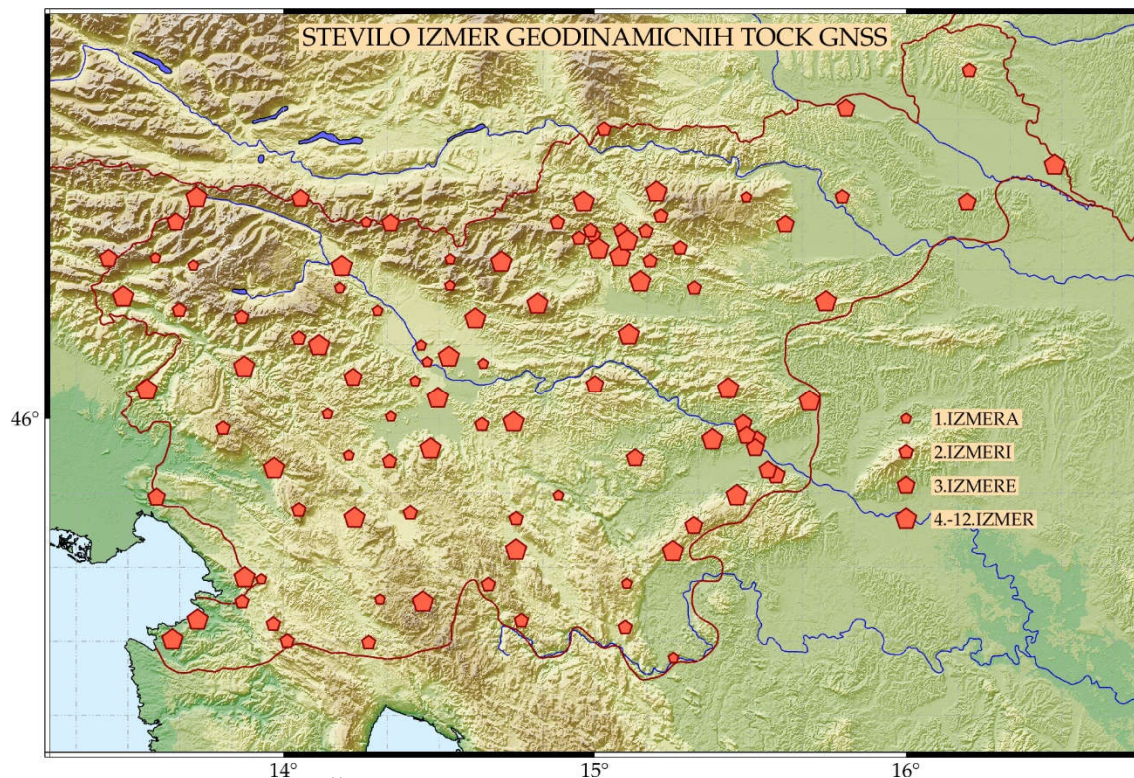


Slika 4: Vrsta stabilizacije geodetskih točk GNSS na območju Slovenije

#### Analiza števila izmer posamezne točke GNSS

Kakovost določitve premika točke je odvisna od števila izmer na posamezni točki. Večje, kot je število izmer in daljši kot je časovni interval med prvo in zadnjo izmero, bolj kakovostno bo določena velikost oziroma hitrost premika točke. Število izmer na posameznih točkah je med eno samo izmero (takih je 21 točk) do 12 izmer na točki FGG3, oziroma 11 na točki Malija. Grafični prikaz števila izmer na posameznih točkah je predstavljen na sliki 5. Točke so razvrščene v štiri skupine, in sicer:

- i)* točke, izmerjene enkrat: 21 točk,
- ii)* točke, izmerjene dvakrat: 30 točk,
- iii)* točke, izmerjene trikrat: 19 točk,
- iv)* točke, izmerjene štirikrat ali večkrat: 34 točk.



Slika 5: Število izmer GNSS na posamezni točki GNSS

#### Analiza časovnega razpona med prvo in zadnjo izmero GNSS

Poleg kakovostne stabilizacije točke, kakovostnih opazovanj GNSS, dovolj dolgega časovnega trajanja meritev v okviru posamezne izmere ter dovolj velikega števila izmer na posamezni točki je pomembno tudi časovno obdobje med prvo in zadnjo izmero GNSS. Ob izpolnjevanju naštetega velja, da naj bi bil minimalni časovni razpon med prvo in zadnjo izmero vsaj 3 leta. Kot smo omenili, je bila na 21 točkah izvedena samo ena izmera, za ostalih 83 točk pa je časovni razpon med prvo in zadnjo izmero (slika 6):

- i)* manj kot 3 leta: 10 točk,
- ii)* med 3 in 5 let: 4 točke,
- iii)* med 5 in 10 let: 17 točk,
- iv)* več kot 10 let: 51 točk.

Pomemben rezultat analize predstavljajo točke, na katerih je bila do sedaj izmera GNSS izvedena le enkrat in točke, pri katerih je razpon med prvo in zadnjo izmero GNSS krajši od treh let. Takšnih točk je 31 in so potencialne kandidatke za izvedbo nove kampanjske izmere GNSS v okviru projekta SLOKIN.





Slika 6: Časovni razpon med prvo iz zadnjo izmero na posamezni točki GNSS

### Obdelava podatkov GNSS

Opazovanja GNSS bomo obdelali s profesionalnim programskim paketom Bernese GNSS Software (BGNSS; Dach et al. 2015), ki predstavlja standard za tovrstno obdelavo opazovanj GNSS. Uporabili bomo tudi programsko orodje lastne izdelave, ki temelji na postopku absolutne določitve položaja s faznimi opazovanji (koncept *Precise Point Positioning* – PPP). Koncept obdelave opazovanj PPP temelji na obdelavi opazovanj enega samega sprejemnika GNSS, zato je včasih celo bolj uporaben kot obdelava s programskim paketom BGNSS, ki temelji na določitvi relativnega položaja sprejemnikov, ki hkrati izvajajo opazovanja GNSS. Na osnovi preliminarnih izračunov je metoda PPP dala primerljive rezultate kot program BGNSS (Sterle, 2015). Obdelava opazovanj GNSS bo potekala ob upoštevanju vseh priporočil služb IGS in IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*). Cilj je pridobiti natančne in točne koordinate geodetskih točk za vsak dnevni niz opazovanj v enotnem globalnem koordinatnem sistemu.

Pridobljene dnevne koordinate, t. i. časovne vrste koordinat bomo nadalje analizirali glede spremenljivosti koordinat točk v odvisnosti od časa. Za pridobitev vektorjev hitrosti sprememb koordinat bomo izvedli obsežno analizo dobljenih časovnih vrst koordinat. Tako koordinate kot tudi vektorje hitrosti bomo predstavili v globalnem koordinatnem sistemu ITRS (*International Terrestrial Reference System*).

### Nivelmanske izmere na območju Slovenije

Za potrebe vzpostavitve višinskega geokinematskega modela bomo uporabili podatke nivelmanskih izmer v nivelmanski mreži visoke natančnosti, ki so bile izmerjene v

preteklosti (Koler et al., 2004) oziroma so bile ponovno izmerjene v okviru izmere nove nivelmanske mreže Slovenije (Koler et al., 2019).

Tudi za kakovostno določitev premikov v višinskem smislu moramo zagotoviti za vse izmere enotni referenčni koordinatni sistem. Višinske pomike na območju Slovenije lahko določimo na osnovi stare (slika 7) in ponovne izmere nivelmanske mreže 1. reda Slovenije (slika 9).

#### Oblika stare nivelmanske mreže – Slovenski višinski sistem 2000 (SVS2000/Trst)

Kot je razvidno s slike 7, sestavlja (staro) nivelmansko mrežo 7 nivelmanskih zank in slepi nivelmanski poligon NVN 4 od Lesc do Rateč, skupne dolžine 2198 km. Skupna značilnost nivelmanskih zank od 1 do 4 je, da so vsi reperji, ki so vključeni v omenjene zanke, stabilizirani na območju Republike Slovenije. Nivelmanske zanke 5, 6 in 7 vključujejo tudi reperje, ki so stabilizirani na območju Republike Hrvaške.



Slika 7: Stara nivelmanska mreža Slovenije – SVS2000/Trst

Staro nivelmansko mrežo Slovenije sestavljajo nivelmanski poligoni, ki so bili izmerjeni v času II. izmere nivelmanske mreže visoke natančnosti leta 1971, nivelmanski poligoni I. reda, ki so bili izmerjeni v 80. letih prejšnjega stoletja in nivelmanski poligon I-5 (Postojna–Matulji), ki je bil izmerjen leta 1950 (Koler et al., 2004).

V preglednici 1 so zbrani osnovni podatki o dolžini nivelmanskih zank, odstopanjih izmerjenih višinskih razlik v sklenjenih nivelmanskih zankah (slika 7) in dovoljeno odstopanje za posamezno nivelmansko zanko ter odstotek dovoljenega odstopanja, ki ga doseže odstopanje v posamezni nivelmanski zanki. Vidimo lahko, da so vsa odstopanja bistveno manjša od dovoljenega odstopanja, ki je izračunano po enačbi za sklenjene nivelmanske zanke nivelmana velike natančnosti (Republiška geodetska uprava, 1981):

$$\Delta_{dov} = 1 \cdot \sqrt{d + 0,04 \cdot d^2} \quad (1)$$

kjer je:

$d$  ... dolžina nivelmanske zanke v km (preglednica 1).

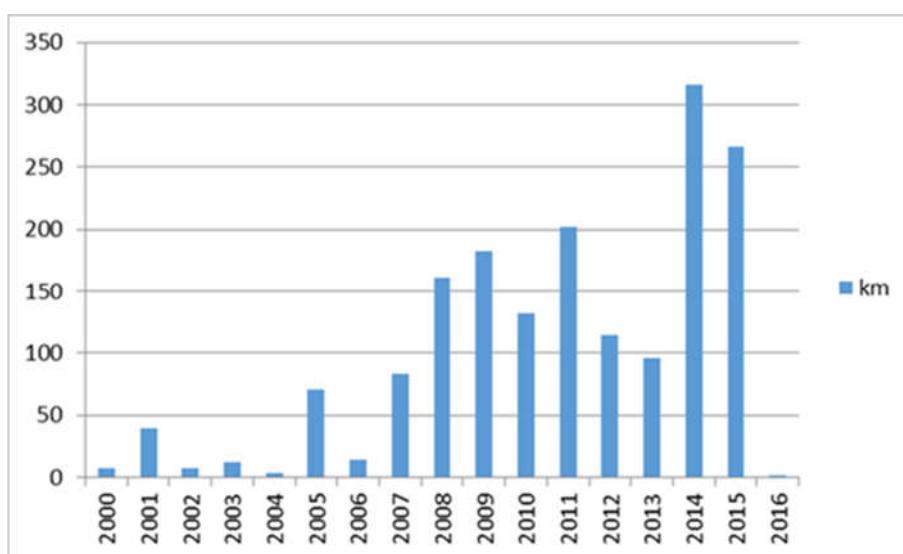
Preglednica 1: Osnovni podatki o stari nivelmanski mreži – SVS2000/Trst

Nivelmanska zanka	Dolžina [km]	Odstopanje [mm]	Dovoljeno odstopanje [mm]	Odstopanje/dovoljeno odstopanje
1	202,13	-19,94	± 42,85	46,5 %
2	208,78	26,74	± 44,18	60,5 %
3	275,88	7,25	± 57,62	12,6 %
4	186,03	-5,57	± 39,63	14,1 %
5	398,60	0,41	± 81,99	0,5 %
6	546,18	-0,87	± 111,71	0,8 %
7	335,72	16,82	± 69,60	24,2 %

Odstopanja pri zapiranju nivelmanskih zank znašajo od +26,74 mm (zanka 2) do -19,49 mm (zanka 1). Če primerjamo odstopanja z dovoljenim odstopanjem, ugotovimo, da odstopanje znaša od 0,5 % (zanka 5) do 60,5 % (zanka 2) dovoljenega odstopanja za nivelman visoke natančnosti. Na osnovi navedenih podatkov lahko zaključimo, da je bila izmera stare nivelmanske mreže 1. reda Slovenije izvedena kakovostno in da so rezultati zelo dobri.

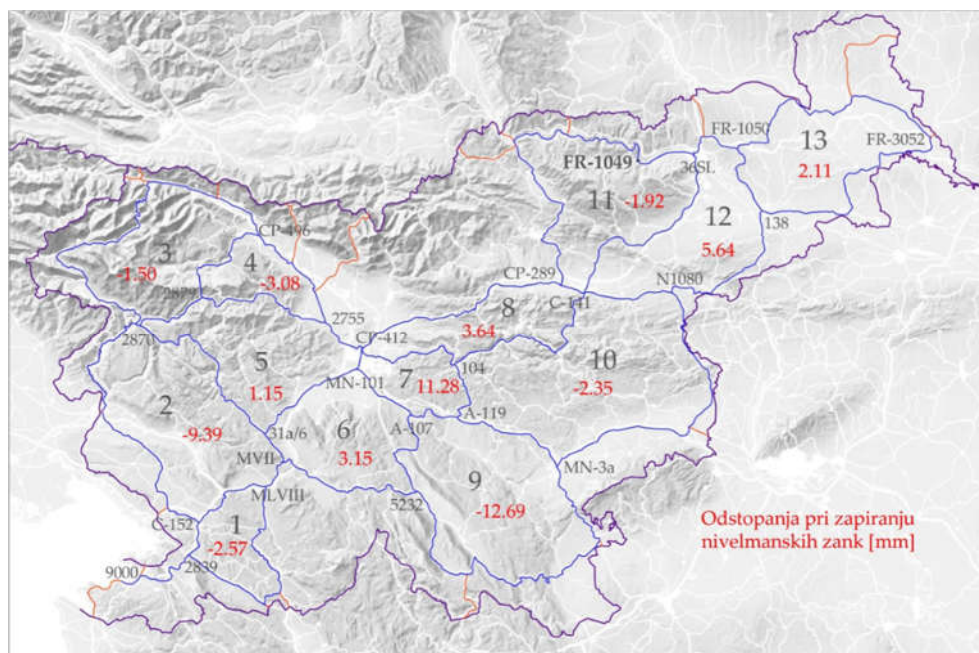
#### Oblika nove nivelmanske mreže – Slovenski višinski sistem 2010 (SVS2010/Koper)

Geodetska uprava RS je od leta 2000 sistematično izvajala sanacijo nivelmanske mreže 1. reda (slika 8, Koler et al., 2007). Izmera nove nivelmanske mreže 1. reda je bila uspešno zaključena leta 2016. Večino meritev so izvedle terenske ekipe sodelavcev Geodetske uprave RS, v zaključnem obdobju pa so sodelovali tudi zunanji izvajalci v okviru projekta »Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav«, podprojekta »Geodetski referenčni sistem«, ki se je izvajal med leti 2013 in 2016 v okviru Finančnega mehanizma Evropskega gospodarskega prostora (Režek, 2017).



Slika 8: Izmera nivelmanske mreže Slovenije v posameznem letu

Na sliki 9 je prikazan končni potek nove nivelmanske mreže 1. reda. Sestavljena je iz 13 nivelmanskih zank, ki so sklenjene znotraj ozemlja Slovenije. Skupna dolžina nivelmanskih poligonov je 1673 km, sestavlja jo 2036 reperjev. V nivelmansko mrežo 1. reda so v mrežo vključene tudi navezave s sosednjimi državami (130 km) in navezave točk državne kombinirane geodetske mreže oziroma državne geodetske mreže 0. reda (48 km). Odstopanja višinskih razlik v zaključenih nivelmanskih zankah v sistemu normalnih višin znašajo od -12,69 mm (zanka 9) do +11,28 mm (zanka 7) (Stopar et al., 2016).



Slika 9: Nova nivelmanska mreža 1. reda Slovenije – SVS2010/Koper

V preglednici 2 so zbrani osnovni podatki o dolžini nivelmanskih zank, odstopanjih v sklenjenih nivelmanskih zank (slika 9) in dovoljena odstopanja za posamezno nivelmansko zanko.

Preglednica 2: Statistični podatki o novi nivelmanski mreži – SVS2010/Koper

Nivelmanska zanka	Dolžina [km]	Odstopanje [mm]	Dovoljeno odstopanje [mm]	Odstopanje/dovoljeno odstopanje
1	110,01	-2,57	± 24,37	10,6 %
2	200,10	-9,39	± 42,45	22,1 %
3	187,28	-1,50	± 39,88	3,8 %
4	115,76	-3,08	± 25,53	12,1 %
5	185,41	1,15	± 39,50	2,9 %
6	145,41	3,13	± 31,48	9,9 %
7	129,94	11,28	± 28,38	39,7 %
8	168,56	3,64	± 36,13	10,1 %
9	211,79	-12,69	± 44,79	28,3 %
10	269,83	-2,35	± 56,41	4,2 %
11	196,84	-1,92	± 41,79	4,6 %
12	181,52	5,64	± 38,72	14,6 %
13	170,39	2,11	± 36,49	5,8 %

Če primerjamo odstopanja z dovoljenimi odstopanji, ugotovimo, da odstopanja znašajo od 2,9 % (zanka 5) do 39,7 % (zanka 7) dovoljenega odstopanja za nivelman visoke natančnosti. Na osnovi navedenih podatkov lahko zaključimo, da je bila izmera nove nivelmanske mreže 1. reda Slovenije izvedena kakovostno in da so rezultati odlični.

### Izravnava in analiza natančnosti nivelmanske mreže

Nivelmanski mreži sta bili navezani na star avstro-ogrski t. i. fundamentalni reper B. W. H. Nr. 147 (oziroma FR-1049), ki je bil postavljen leta 1878, ki je stabiliziran v kraju Smolnik pri Rušah (slika 10). Stara nivelmanska mreža je bila izravnana v višinskem datumu Trst, ker so bile tudi stare višine reperjev podane v tem višinskem datumu (SVS2000/Trst). Nova nivelmanska mreža 1. reda je bila izravnana v višinskem datumu Koper (SVS2010/Koper).



Slika 10: Avstro-ogrski fundamentalni reper B. W. H. Nr. 147 oziroma FR-1049 (levo), napis na reperju (sredina) in zglajena plošča tonalita, ki predstavlja fundamentalni reper (desno) (vir: Geodetska uprava Republike Slovenije in Geodetska družba d.o.o.)

Kakovost izmere nivelmanskih mrež in določitve nadmorskih višin reperjev ocenimo na osnovi *a-priori* in *a-posteriori* ocene natančnosti meritev. Za obe nivelmanski mreži je bila opravljena *a-priori* ocena natančnosti (preglednica 3) na podlagi odstopanj pri zapiranju zaključenih nivelmanskih zank po enačbi:

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \left[ \frac{\Delta_z^2}{d} \right]} \quad (2)$$

kjer so:

$n$  ... število nivelmanskih zank,

$\Delta_z$  ... odstopanje pri zapiranju nivelmanskih zank v mm,

$d$  ... dolžina nivelmanske linije v km.

Če želimo določiti višinske pomike reperjev v nivelmanskih mrežah, morajo biti merjene višinske razlike izravnane v istem referenčnem sistemu oziroma istem geodetskem datumu. Tako kakor novo smo zato tudi meritve v okviru stare nivelmanske mreže izravnali s programom VimWin (Ambrožič & Turk, 2016) v višinskem datumu Koper. Rezultat izravnave obeh nivelmanskih mrež sta *a-posteriori* ocena natančnosti merjenih višinskih razlik  $\hat{\sigma}_0$  ter izravnane nadmorske višine reperjev z oceno natančnosti določitve nadmorske višine  $\sigma_H$  (preglednica 3).

Preglednica 3: *A-priori* ( $\sigma_z$ ) in *a-posteriori* ( $\hat{\sigma}_0$ ) ocena natančnosti nivelmanske mreže ter oceno natančnosti določitve nadmorske višine ( $\sigma_H$ )

Ocena natančnosti	SVS2000/Koper [mm]	SVS2010/Koper [mm]
$\sigma_z$	0,97	0,44
$\hat{\sigma}_0$	0,88	0,50
$\sigma_H$	3,12 – 11,83	1,82 – 6,08

Iz preglednice 3 vidimo, da je nova nivelmanska mreža (SVS2010/Koper) bolj kakovostna kot stara nivelmanska mreža (SVS2000/Koper), saj vse mere natančnosti kažejo za približno dvakrat manjše vrednosti, kot v stari nivelmanski mreži. Kljub temu ocenjujemo, da imamo na voljo dovolj kakovostno osnovo za določitev višinskih pomikov reperjev v državni nivelmanski mreži na območju Slovenije.

### Podatki za določitev premikov površja s pomočjo radarske interferometrije

Načrtujemo tudi, da bi v modeliranje geokinematičnega dogajanja na območju Slovenije vključili tudi podatke satelitske radarske diferencialne interferometrije (DInSAR). Opravili bi diferencialno interferometrično analizo časovne serije radarskih satelitskih posnetkov s permanentnimi sipalci. Pri tem bi uporabili tako arhiv posnetkov ERS<sup>1</sup>, ki vsebuje podatke od leta 1991 do 2003, kot tudi najnovejše podatke, ki jih od leta 2014 zagotavljata satelita misije Sentinel-1<sup>2</sup>. Z uporabo podatkov diferencialne radarske interferometrije bi v raziskavo vključili tudi enega izmed trenutno najbolj popularnih in z vidika gostote karakterističnih točk najbolj zmogljivih podatkovnih virov. Z združitvijo časovnih vrst, dobljenih z obdelavo posnetkov ERS in Sentinel bi pridobili trideset let dolgo časovno vrsto premikov površja. Za določitev premikov velikega števila karakterističnih točk načrtujemo uporabo programske opreme ENVI SARscape<sup>3</sup> in servisa Geohazards Exploitation Platform<sup>4</sup>. Premike karakterističnih točk bomo časovno in prostorsko harmonizirali ter jih primerjali s premiki točka, dobljenih z drugimi tehnologijami.

### Vzpostavitev geokinematskega modela

Vzpostavitev geokinematskega modela Slovenije bo potekala v dveh korakih. V prvem koraku bosta ločeno vzpostavljeni horizontalna in višinska komponenta, ki bosta nato v drugem koraku združeni v enoten koherenten trirazsežni geokinematski model ozemlja Slovenije.

Temelj za vzpostavitev horizontalnega geokinematskega modela bodo predstavljale točke GNSS z izračunanimi horizontalnimi vektorji hitrosti, medtem ko bodo temelj za vzpostavitev višinske komponente predstavljali reperji nivelmanski mrež oziroma njihove hitrosti višinskih premikov, ki pa bo dopolnjen z višinsko komponento vektorjev hitrosti točk GNSS. V izdelavo obeh modelov nameravamo vključiti tudi premike, določene na osnovi diferencialne radarske interferometrije. Tako bomo, v primerjavi zgolj z nivelmanskimi meritvami in meritvami GNSS, pridobili podatke o premikih za bistveno

<sup>1</sup> [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/ERS\\_overview](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/ERS_overview)

<sup>2</sup> <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

<sup>3</sup> <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI-SARscape>

<sup>4</sup> <https://geohazards-tep.eu/#/>

večje število točk v trirazsežnem smislu, kar bo dodatno izboljšalo geokinematski model. Primerjava rezultatov, pridobljenih z različnimi metodami, bo omogočila navzkrižno preverjanje veljavnosti in kakovosti vsakega nabora podatkov. Poleg tega bo velika prostorska gostota ter zelo visoka časovna in prostorska ločljivost interferometrično določenih premikov omogočila vpogled v prehodne deformacije na posameznih tektonskih prelomih, povezane s seizmičnim ciklom, zato bo mogoča ločitev lokaliziranih kratkoročnih deformacij od dolgoročnih trendov, kar je pomembno za geokinematski model.

Geokinematski model Slovenije bo določen kot vektorsko polje ocenjenih vektorjev hitrosti na diskretnem nizu točk in bo definiran za širše območje Slovenije. Za namen določitve vektorja hitrosti v poljubni točki izven diskretnega niza točk bomo uporabili statistične postopke interpolacije, kot sta kolokacija po metodi najmanjših kvadratov in membranska metoda, ki temelji na metodi končnih elementov.

### **Geološka interpretacija geokinematskega modela**

Za dopolnitev geodetskih podatkov bomo ustvarili zemljevid potencialno aktivnih prelomov in drugih tektonskih struktur z uporabo najnovejših neobjavljenih rezultatov in podatkov iz že objavljenih del. Te izdelke bomo analizirali in povezali, da bomo dobili tektonski model aktivnih deformacij, ki bo identificiral aktivne strukture in ocenil njihovo hitrost premikanja iz geodetskih podatkov. Geološki podatki o dolgoročni tektonski aktivnosti, pridobljeni iz strukturno-geoloških podatkov, paleoseizmoloških in tektonsko-geomorfoloških raziskav, bodo nato uporabljeni za kritično analizo geokinematskega modela v smislu primerjave med trenutno geodetsko izmerjeno deformacijo in geološkimi dolgoročnimi hitrostmi. S tem lahko v geokinematskem modelu odkrijemo tektonske strukture, ki kratkoročno kažejo primanjkljaj aktivnosti glede na dolgoročni trend, kar lahko nakazuje, da se nahajajo v mirujočem obdobju seizmičnega cikla in tako pomenijo potencialno potresno nevarnost.

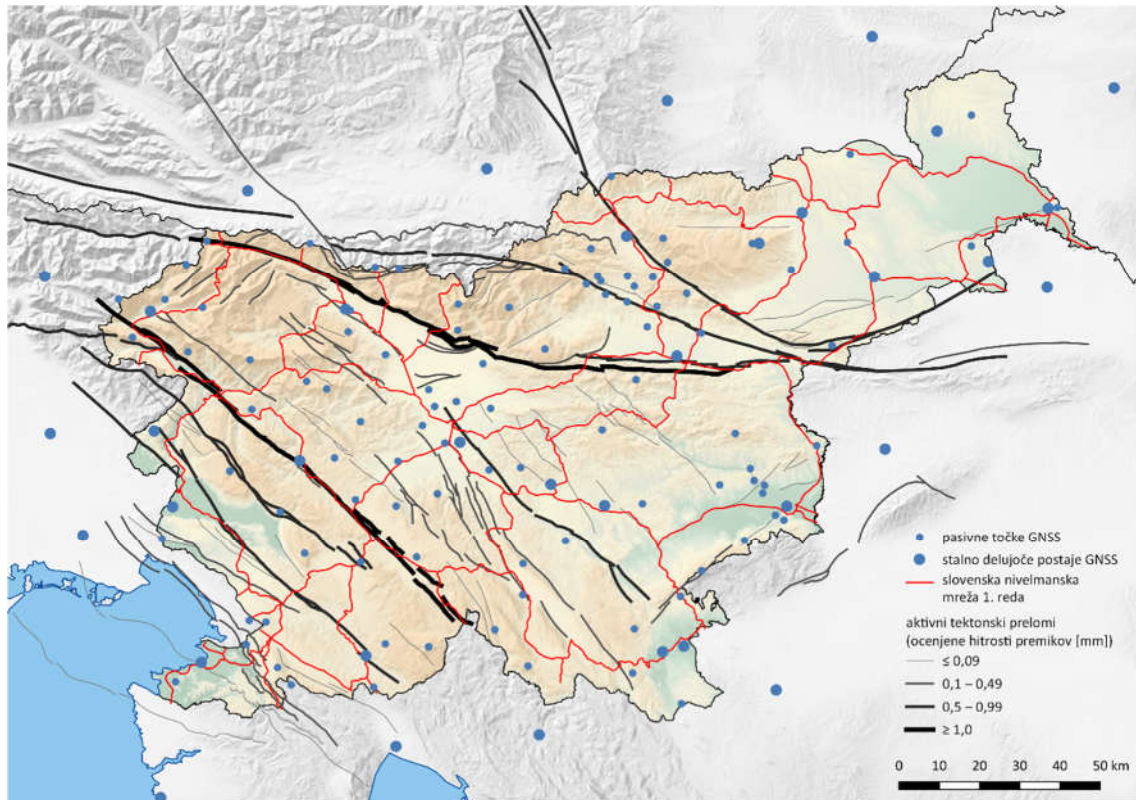
Pri interpretaciji višinskega geokinematskega modela bo opravljena primerjava višinskega geokinematskega modela z geološkimi in geofizikalnimi podatki, kot so karta potencialno aktivnih tektonskih struktur in geomorfološki indikatorji vertikalnih premikov površja. Na podlagi korelacije bo hitrostno polje vertikalnih premikov interpretirano z vidika aktivnosti posameznih tektonskih struktur kakor tudi obsežnejših vertikalnih premikov skorje, ki so posledica izostazije ali dinamike Zemljinega plašča. Rezultat bo izdelan tektonski model aktivnih vertikalnih deformacij na podlagi višinskega geokinematskega modela.

### **Zaključek**

Dosedanje delo na projektu je zajemalo predvsem zbiranje in analiziranje že obstoječih podatkov. Rezultat tega je karta (slika 11), na kateri so prikazani aktivni tektonski prelomi ter tiste točke GNSS in nivelmanski vlaki, ki so (potencialno) primerni za vključitev v izdelavo geokinematičnega modela.

Na področju geokinematike je interdisciplinarno povezovanje geodetov in geologov ključnega pomena. Geodeti lahko zagotovimo kakovostne podatke o premikih točk oziroma njihove vektorje hitrosti, ne moremo pa oceniti primernosti točk z vidika geokinematskih raziskav. Vloga geologov je tako izredno pomembna že pri oceni lokalne stabilnosti geodetskih točk, izbiri lokacij permanentnih sipalcev ter izločanju tistih točk, ki ne ustrezajo pogojem za vzpostavitev geokinematskega modela, ker se nahajajo v bližini tektonskih

prelomov ali na plazovitih območjih. Le tako lahko zagotovimo kakovosten vhod v geokinematski model. Druga izredno pomembna vloga geologov pa je interpretacija geokinematskega modela – geokinematski model pridobi praktično vrednost, ko je ustrezno geološko interpretiran, kar vključuje izdelavo kart regionalne porazdelitve deformacij ter orientacijo in velikost komponent deformacijskega tenzorja. Poleg tega bosta pripravljena tudi karta vektorjev hitrosti za geodetske točke in hitrostni profili, ki kažejo komponente hitrosti, pravokotne na glavne tektonske strukture na območju.



Slika 11: Karta aktivnih tektonskih prelomov ter (potencialno) primernih točk GNSS in nivelmanskih linij

Horizontalni in višinski model aktivnih tektonskih deformacij bosta združena v integralni model aktivnih tektonskih deformacij na preučevanem ozemlju kot rezultat sinteze obeh geokinematskih modelov in njunih geoloških interpretacij z vsemi razpoložljivimi geološkimi in geofizikalnimi podatki o aktivnih tektonskih deformacijah. Pri tem bomo uporabili tudi podatke v lasti sodelujočih inštitucij, objavljene podatke v znanstvenih publikacijah ter podatke, ki jih zbirajo raziskovalne in vladne inštitucije s ciljem identifikacije in opredelitve lastnosti aktivnih struktur za oceno potresne nevarnosti. Rezultat bo model aktivne tektonike in regionalne geodinamike SLOKIN v obliki karte in pripadajoče podatkovne baze v okolju GIS, ki bo prosto dostopen na svetovnem spletu. Različne zainteresirane strani bodo nato uporabile model SLOKIN za identifikacijo in karakterizacijo aktivnih struktur kot glavnega prispevka za oceno potresne nevarnosti.

Z vidika geodezije pa bo geokinematski model predstavljal velik korak naprej na področju razvoja državnega geodetskega referenčnega sistema. Ker je aktualni državni koordinatni sestav D96 definiran na statičen način – vsako točko obravnavamo koordinate točk kot konstantne v času, bomo na osnovi rezultatov obdelave opazovanj GNSS v koordinatnem sestavu ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) testirali in ovrednotili vpliv nepoznavanja časovnih sprememb koordinat geodetskih točk na kakovost državnega



koordinatnega sistema v daljšem časovnem obdobju. Na osnovi te analize bomo opredelili skrajni časovni rok »veljavnosti« koordinatnega sestava oziroma opredelili potrebno časovno pogostnost ponovnih realizacij koordinatnega sistema. Praktično bo to pomenilo, da bomo določili periodo za ponovna izvajanja izmer EUREF (*Reference Frame Sub-Commission for Europe*) v pasivnem omrežju geodetskih točk za stalni nivo natančnosti in točnosti koordinatnega sestava na nivoju centimetra.

## Zahvala

Temeljni raziskovalni projekt SLOKIN – Geokinematski model ozemlja Slovenije J2-2489, v obdobju od 1. 9. 2020 do 31. 8. 2023 sofinancira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna. Vodilni partner projekta je UL FG, sodelujoče raziskovalne institucije so UL NTF, Geološki zavod Slovenije in Geodetski inštitut Slovenije.

Delo je nastalo deloma tudi v okviru projekta »Razvoj raziskovalne infrastrukture za mednarodno konkurenčnost slovenskega RRI prostora – RI-SI-EPOS« v okviru katerega smo v letu 2020 na UL FG pridobili pomembno novo raziskovalno opremo. Pridobljena oprema bo prispevala k raziskavam na področju geodezije, geologije, seizmologije ter sodelovanju z mednarodno skupnostjo na področju geoznanosti. Projekt sofinancirata Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport Republike Slovenije in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

## Literatura in viri

- Ambrožič, T., Turk, G. (2016). Navodila za uporabo programa Vim.Win, Ver. 5.1, mar. 16. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Celarc, B., Jež, J., Novak, M., Milanič, B., Markelj, A. (2019). Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije, 6. del. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije, 282 str.
- Bavec, M., Atanackov, J., Celarc, B., Hajdas, I., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Kastelic, V., Milanič, B., Novak, M., Skaberne, G. and Žibret, G. (2013). Evidence of Idrija fault seismogenic activity during the Late Holocene including the 1511 Mm 6.8 earthquake. Proceedings of the 4th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology (PATA), Aachen, 23–26.
- Berk, S. (2019). Obdelava GNSS-kampanje »EUREF Slovenija 2016«. Končno poročilo, 1106 str. + 12 prilog. Ljubljana (2. oktober 2019): Geodetska uprava Republike Slovenije.
- Berk, S., Sterle, O., Medved, K., Stopar, B. (2020). ETRS89/D96-17 – Rezultat GNSS-izmere EUREF Slovenija 2016. Geodetsk vestnik, 64 (1), 43-67, doi:10.15292/geodetski-vestnik.2020.01.43-67.
- Dach, R., S. Lutz, P. Walser, P. Fridez (Eds). (2015). Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. doi: 10.7892/boris.72297.
- Jamšek Rupnik, P., Atanackov, J., Skaberne, D., Jež, J., Milanič, B., Novak, M., Lowick, S., Bavec, M. (2015). Paleoseismic evidence of the Vodice fault capability (Ljubljana Basin, Slovenia). 6th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archaeoseismology, Pescina, 423–426.
- Jamšek Rupnik, P., Benedetti, L., Bavec, M., Vrabc, M. (2012). Geomorfni indikatorji kvartarne aktivnosti Savskega preloma med Golnikom in Preddvorom. RMZ – Material and Geoenvironment 59, 2/3: 299–314.

- Jamšek Rupnik, P., Žebre, M., Jež, J., Preusser, F., Zajc, M., Monegato, G. (2019) Deformed Pleistocene deposits in Most na Soči, W Slovenia. 24. Posvetovanje Slovenskih geologov, Ljubljana, 4 p.
- Koler, B., Breznikar, A. (2004). Računska obrada nivelmanske mreže Republike Slovenije. Geodetski list, 58 (4), Zagreb.
- Koler, B., Medved, K., Kuhar, M. (2007). Uvajanje sodobnega višinskega sistema v Sloveniji. Geodetski vestnik, 51 (4), 777–792. [http://www.geodetski-vestnik.com/51/4/gv51-4\\_777-792.pdf](http://www.geodetski-vestnik.com/51/4/gv51-4_777-792.pdf).
- Koler, B., Stopar, B., Sterle, O., Urbančič, T., Medved, K. (2019) Nov slovenski višinski sistem SVS2010 = New Slovenian height system SVS2010. Geodetski vestnik, 63 (1), 27–40. [http://geodetski-vestnik.com/63/1/gv63-1\\_koler.pdf](http://geodetski-vestnik.com/63/1/gv63-1_koler.pdf).
- Moulin, A., Benedetti, L., Rizza, M., Jamšek Rupnik, P., Gosar, A., Bourles, D., Keddadouche, K., Aumaître, G., Arnold, M., Guillou, V., Ritz, J. F. (2016). The Dinaric fault system: Large-scale structure, rates of slip, and Plio-Pleistocene evolution of the transpressive northeastern boundary of the Adria microplate. *Tectonics*, 35(10), 2258–2292, doi:10.1002/2016TC004188.
- Republiška geodetska uprava. (1981). Pravilnik o tehničnih normativih za mreže temeljnih geodetskih točk. Ljubljana.
- Režek, J. (2017). Ob zaključku projekta »Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav«. Geodetski vestnik, 61 (1), 115–124. [http://www.geodetski-vestnik.com/61/1/gv61-1\\_rezek.pdf](http://www.geodetski-vestnik.com/61/1/gv61-1_rezek.pdf).
- Sterle, O. (2015). Časovno odvisne geodetske mreže in koordinatni sistemi, doktorska disertacija, UL FGG, 194 str.
- Stopar, B., Koler, B., Kogoj, D., Ambrožič, T., Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., Sterle, O., Kregar, K., Štebe, G., Urbančič, T., Goršič, J., Mencin, A., Berk, S., Fabiani, N., Mesner, N., Caserman, M., Bric, V., Triglav Čekada, M., Karničnik, I., Janežič, M., Oven, K. (2016). Implementacija kombinirane geodetske mreže in višinske komponente ESRS v državni geodetski referenčni sistem : končno poročilo. Sklop 1. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: Geodetski inštitut Slovenije, 216 str.
- Vrabec, M., Fodor, L. (2006). "Late Cenozoic tectonics of Slovenia: structural styles at the Northeastern corner of the Adriatic microplate" in N. Pinter, N. Grenczy, J. Weber, S. Stein, D. Medak, Eds., *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards*. Springer, Dordrecht, 151–168.
- Vrabec, M., Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. (2006). GPS study (1996–2002) of active deformation along the Periadriatic fault system in northeastern Slovenia: tectonic model. *Geologica Carpathica*. 57 (1), 57–65.
- Vrabec, M., Tomljenović, B., Sterle, O., Bačić, Ž., Marjanović, M., Stopar, B. (2010). GPS meritve gibanja Jadranske mikroplošče in aktivnih tektonskih deformacij v Dinaridih. Slovenski geološki kongres, Povzetki in ekskurzije, Bovec, str. 54.
- Weber, J., Vrabec, M., Pavlovčič Prešeren, P., Dixon, T., Jiang, Y., Stopar, B. (2010). GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 483 (3–4), 214–222, doi:10.1016/j.tecto.2009.09.001.
- Weber, J., Vrabec, M., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P., Dixon, T. (2005). Študija premikov Jadranske mikroplošče in aktivnih tektonskih deformacij v Sloveniji in Istri na osnovi GPS-opazovanj. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2004 : zbornik predavanj, Ljubljana, 87–89.