

Omrežje GNSS-postaj SIGNAL za spremljanje potresov: primer potresa v Petrinji, december 2020

Oskar Sterle*, Veton Hamza*, Klemen Ritlop*, Stopar Bojan*, Polona Pavlovčič Prešeren*

Povzetek

V novoletnem času leta 2020 je Hrvaško stresel hud potres magnitude 6.1, približno 50 km južno od Zagreba, ki je poleg velike gmotne škode terjal tudi življenja. V pričujočem članku smo analizirali opazovanja GNSS stalno delujočih postaj GNSS omrežja SIGNAL, da bi ugotovili, ali lahko na osnovi opazovanj GNSS zaznamo potres na stalno delujočih postajah GNSS. Analizirali smo dvojne fazne razlike v okviru številnih baznih vektorjev, ki smo jih razdelili v šest skupin. Dvojne fazne razlike smo obdelali v kinematičnem načinu in pridobili spremembe komponent baznih vektorjev skozi čas. Na osnovi rezultatov smo uspešno zaznali potres na vseh uporabljenih postajah omrežja SIGNAL na območju Slovenije, potresa pa nismo mogli zaznati na dveh hrvaških in eni italijanski postaji GNSS. Ugotovili smo, da je potres potreboval približno 70 s, da je prečil Slovenijo, in da se je potres hitreje širil v smeri SV kot v smeri SZ.

Ključne besede: GNSS, omrežje GNSS-postaj SIGNAL, potres, Petrinja, Hrvaška

Keywords: GNSS, GNSS network SIGNAL, earthquake, Petrinja, Croatia

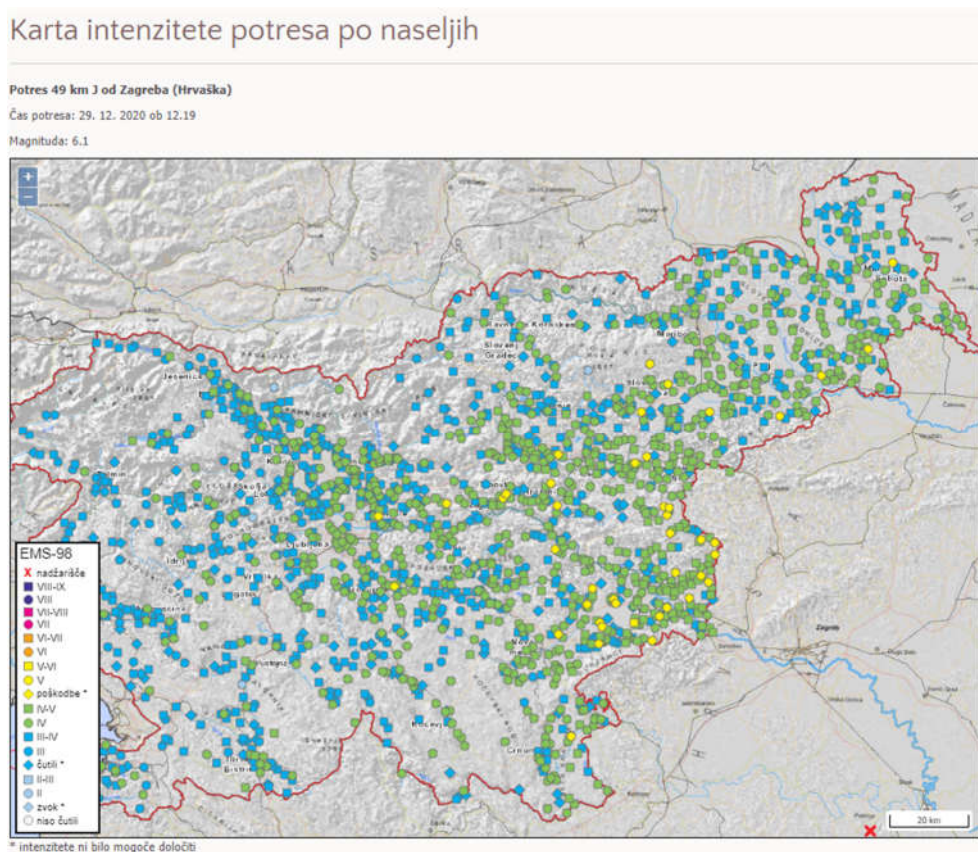
Uvod

V torek, 29. decembra 2020, malo po 12. uri po lokalnem času, je Hrvaško stresel hud potres, ki ga je čutilo okoli šest milijonov ljudi v širši okolici. Posledice potresa so bile smrtne žrtve in izredno velika gmotna škoda. Najbolj sta bili prizadeti naselji Petrinja in Glina, velika gmotna škoda je bila tudi v Sisku (RTV SLO, 2020). Strokovnjaki agencije ARSO so določili magnitudo potresa 6.1, epicenter 49 km J od Zagreba (149 km JV od Ljubljane), blizu naselja Petrinja pri Sisku na Hrvaškem, čas potresa pa je zabeležen ob 12.19 uri po lokalnem času oz. ob 11.19 po času UTC (ARSO, 2020). Glede na izdelano karto intenzitete potresa po naseljih v Sloveniji, ki jo prikazuje slika 1, smo potres čutili na celotnem območju Slovenije, bolj na JV države, manj proti SZ.

Za spremljanje in analiziranje tektonskih premikov se je tehnologija GNSS (angl. Global Navigation Satellite System) začela uporabljati že od samega začetka komercialne izrabe sistema GPS (angl. Global Positioning System) v 80-ih in 90-ih letih prejšnjega stoletja. Raziskave so sprva temeljile na ponovljenih kampanjskih izmerah na geodinamičnih točkah, kjer je bilo nekaj takih izmer izvedenih tudi na območju Slovenije (Vrabec in sod. 2006, Weber in sod. 2010). Z razvojem tehnologije so začeli vzpostavljati stalne postaje in omrežja stalno delujočih postaj GNSS, ki so postopoma nadomeščala kampanjske izmere. Na globalnem nivoju je tako omrežje IGS (angl. International GNSS Service) (Johnston in sod. 2017), na evropskem nivoju omrežje EPN (angl. European Permanent Network) (Ihde in sod. 2011), na območju Slovenije pa omrežje SIGNAL in Kombinirana geodetska mreža 0. reda (Medved in sod. 2018). Omrežje SIGNAL se je začelo izgrajevati že leta 2001, da bi

* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija

zagotovili kakovostno in enotno koordinatno osnovo za uporabo v geodetski praksi, medtem ko se je mreža 0. reda začela graditi leta 2016 z namenom zavarovanja omrežja SIGNAL (Oven in sod. 2019). Postaje omrežja SIGNAL so stabilizirane na stavbah, medtem ko so točke Kombinirane geodetske mreže stabilizirane po vseh pravilih geodinamičnih geodetskih točk, ki zagotavljajo najvišjo kakovost (Oven in sod. 2018). S sistemi GNSS se je pojavila možnost spremljanja posledic potresne aktivnosti, ki se nanašajo na dogajanje na stalnih postajah pred in po potresu. Potresno aktivnost lahko beležimo na osnovi dnevnih izračunov in tudi na postajah med samim potresom (Freymueller 2017, Gualandi in sod. 2017).

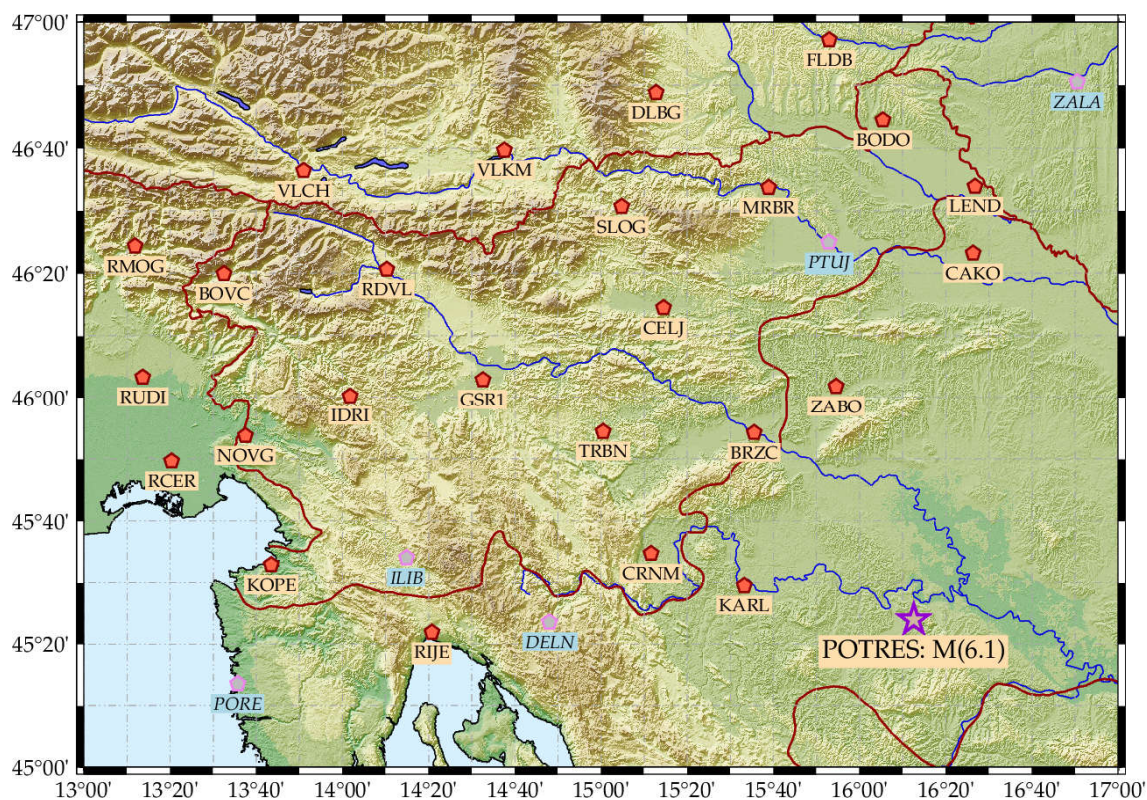


Slika 1: Karta intenzitete potresa po naseljih po potresu na Hrvaškem, pri naselju Petrinja, 29. 12. 2020, objavljena na spletni strani ARSO (2020)

V pričujočem prispevku bomo analizirali opazovanja GNSS postaj omrežja SIGNAL na območju Slovenije, Hrvaške, Avstrije in Italije za čas potresa, ki je prizadel okolico naselja Petrinja, 29. decembra leta 2020. Uporabili bomo podatke od 8. do 12. ure po času GPS z intervalom registracije 1 s. Analizirali bomo dvojne fazne razlike baznih vektorjev in pridobili komponente baznih vektorjev za vsak trenutek zabeleženih opazovanj. Iz časovnih vrst komponent baznih vektorjev bomo prikazali možnost zaznavanja potresa na posamezni postaji GNSS za celotno območje omrežja SIGNAL.

Opazovanja GNSS omrežja SIGNAL

Omrežje SIGNAL sestavlja šestnajst stalno delujočih postaj GNSS na območju Slovenije, tri postaje na območju Italije, ob slovensko-italijanski meji, štiri postaje na območju Avstrije, ob slovensko-avstrijski meji, ena postaja na območju Madžarske, ob slovensko-madžarski meji, in šest postaj na Hrvaškem, ob slovensko-hrvaški meji. Omrežje SIGNAL v celoti sestavlja 30 stalno delujočih postaj GNSS na območju Slovenije in na mejnih območjih sosednjih držav. Slika 2 prikazuje lokacije vseh postaj GNSS in lokacijo potresa pri Petrinji magnitude 6.1.



Slika 2: Lokacija stalnih postaj GNSS omrežja SIGNAL, lokacija obravnavanega potresa, nabor uporabljenih postaj GNSS (rdeči peterkotniki) in izločene postaje GNSS (sivi peterkotniki)

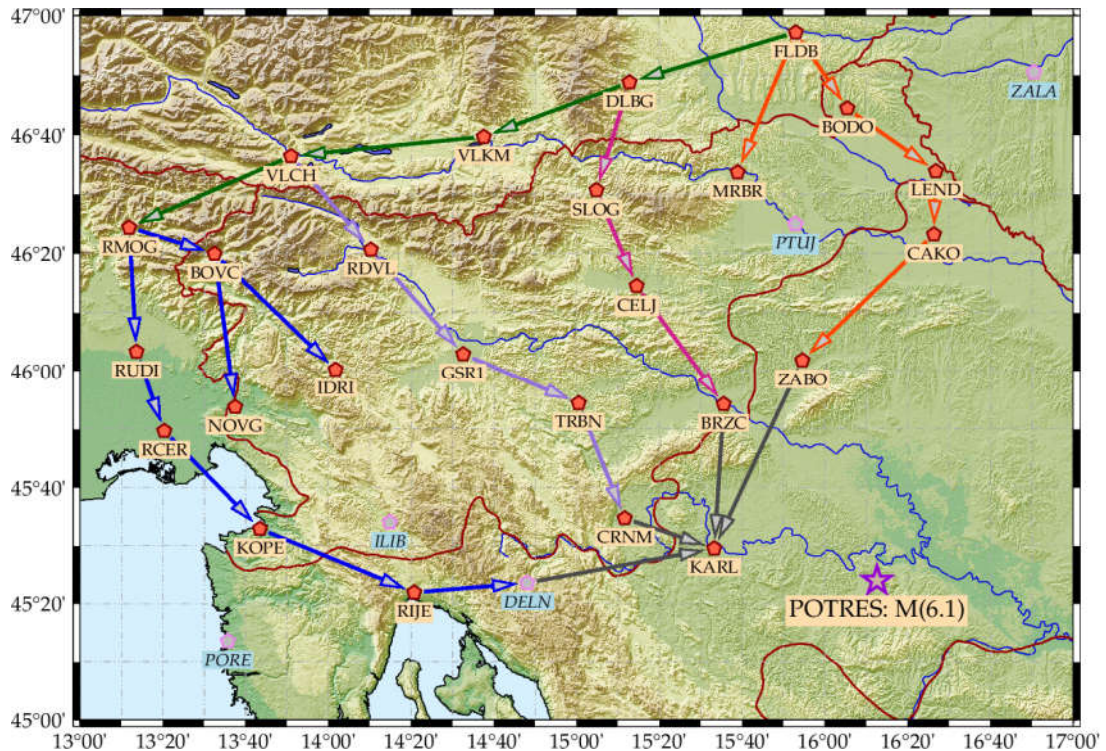
Opazovanja GNSS smo pridobili s spletnega servisa omrežja SIGNAL (<https://gu-signal.si/>), pri izboru opazovanj pa smo upoštevali različne kriterije. Prvi kriterij se je nanašal na zahtevo, da morajo biti opazovanja zabeležena z intervalom registracije vsaj 1 s, saj potresi po navadi trajajo zelo kratek čas. Podatki GNSS postaj Kombinirane geodetske mreže 0. reda se shranjujejo z intervalom registracije 30 s, zato jih v študijo nismo vključili. Drugi kriterij se je nanašal na način obdelave, in sicer smo opazovanja obdelali v relativnem načinu. Razlog za to je dejstvo, da med in takoj po potresu še ni na voljo končnih produktov službe IGS, ki so potrebni za najnatančnejšo absolutno določitev položaja po metodi PPP (angl. Precise Point Positioning) (Sterle 2015, Sterle in sod. 2014). Pri obdelavi dvojnih faznih razlik moramo imeti na voljo dovolj opazovanj GNSS, da lahko ocenimo fazne nedoločenosti v domeni celih števil, kar nam zagotavlja najvišjo dobljeno kakovost ocenjenih koordinat. Zaradi tega smo pri vseh vključenih postajah uporabili vsa opazovanja GNSS od 8. do 12. ure po času UTC (ali od 9. do 13. ure po lokalnem času), torej skupno paket štirih ur, s čimer smo dobili 14.400 trenutkov zabeleženih opazovanj GNSS. Tretji kriterij se je nanašal na kakovost obdelave opazovanj z določenih postaj GNSS omrežja

SIGNAL. Iz preteklih obdelav smo ugotovili, da so opazovanja postaj DELN (Delnice, Hrvaška), PTUJ (Ptuj) in ILIB (Ilirska Bistrica) slabše kakovosti, zato smo postaji ILIB in PTUJ izločili iz nabora uporabljenih postaj, medtem ko smo postajo DELN v obdelavo vključili za ustrezno sestavo baznih vektorjev. V četrtem kriteriju smo upoštevali shemo obdelave opazovanj (pojasnjeno v nadaljevanju), zato v formiranje vektorjev GNSS nismo vključili postaje ZALA (Zalaegerszeg, Madžarska) in postaje PORE (Poreč, Hrvaška). Na sliki 2 so v študiji uporabljene postaje označene z rdečimi peterokotniki, medtem ko so postaje, ki jih nismo uporabili pri obdelavi, označene s sivimi peterokotniki in so zapisane v poševni pisavi na modro-zelenem ozadju (z izjemo DELN).

Metodologija obdelave opazovanj GNSS

Odziv okolice na potres, je tresenje tal, ki se na postaje GNSS prenese kot premik, zabeležen v času. Tu sta pomembna dva vidika, in sicer trenutek, ko se na določeni postaji lahko zazna potres, in velikost ter oblika premika postaje, ki lahko nakazuje na premikanje zemeljske skorje zaradi potresa. Medtem ko prvi vidik vedno nakazuje na pravo informacijo, to je na trenutek, ko je potres »prišel« do postaje, drugi vidik nima tako jasne oblike. Premiki postaje GNSS lahko nastanejo zaradi načina stabilizacije postaje GNSS in so lahko povsem neskladni z dejanskimi premiki zemeljske skorje, ki so se pri potresu zgodili. Postaje omrežja SIGNAL so stabilizirane na strehah stavb, zato ni nujno, da premiki postaj odražajo premike tal. Zato smo se v okviru raziskave osredotočili le na prvi vidik, to je, ali lahko na posamezni postaji ugotovimo tresenje, iz katerega bi lahko določili trenutek, ko je potres »prišel« do določene postaje.

Določitev premikov postaj GNSS na osnovi dvojnih faznih razlik se ugotovi tako, da se skuša ugotoviti spremembo v komponentah baznega vektorja med dvema postajama skozi čas. Iz spremembe komponent baznih vektorjev je praktično nemogoče ugotoviti, katera izmed postaj (ali celo obe) sta se premaknili. Zaradi prisotnosti nemodeliranih sistematičnih pogreškov v opazovanjih GNSS mora biti sprememba komponent baznih vektorjev relativno velika. To sta bila tudi glavna razloga za ustrezno sestavo baznih vektorjev, iz katerih smo skušali določiti, ali je na posamezni postaji mogoče zaznati potres ali ne. Shemo baznih vektorjev prikazuje slika 3.



Slika 3: Shema baznih vektorjev za oceno zmožnosti zaznavanja potresov na postajah GNSS omrežja SIGNAL.

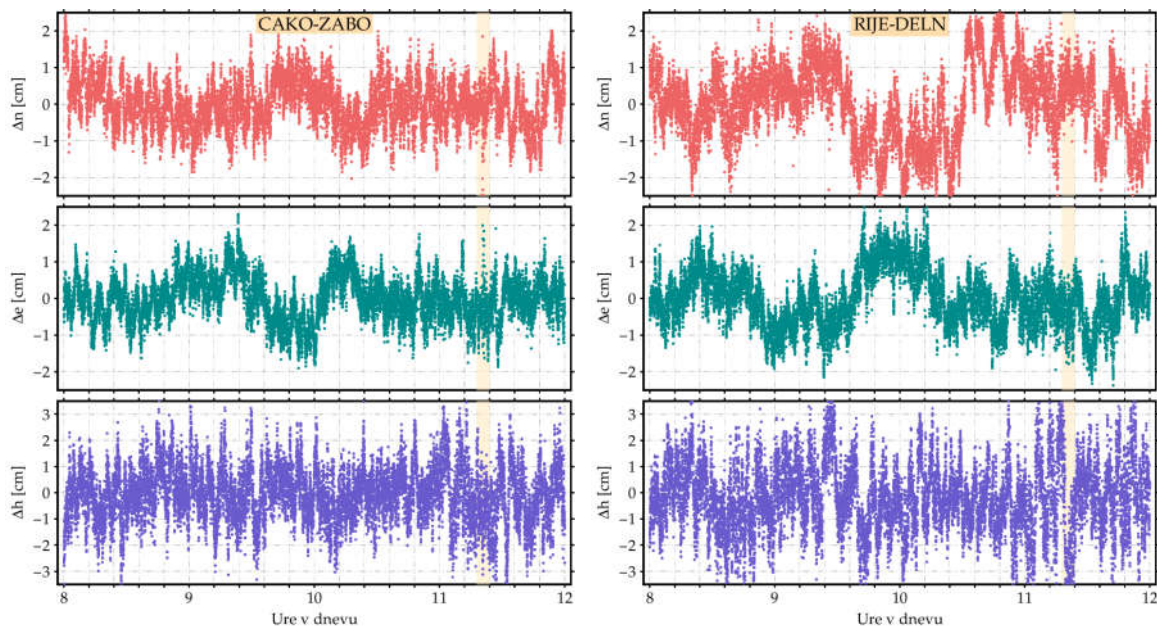
Pri sestavi baznih vektorjev, ki so prikazani na sliki 3, je bilo prvo vodilo, da imamo najkrajše možne bazne vektorje, zato smo z vektorji povezali postaje GNSS sosednjih držav. Vse bazne vektorje smo sestavili tako, da je bazna postaja (dana točka) bolj oddaljena od potresa kot nova točka (»rover«). S tem bo trenutek zaznave potresa baznega vektorja določal trenutek zaznave potresa na postaji »rover«. Ker nas je zanimalo, kje vse je možno zaznati potres, smo sestavili zvezdasti šop baznih vektorjev in pet vlakov baznih vektorjev. Zvezdasti šop baznih vektorjev predstavljajo vektorji na postajo KARL (Karlovac, Hrvaška), ki se je nahajala najbližje potresu (temno sivi vektorji na sliki 3). Predpostavili smo, da bi morali na tej postaji najbolj zanesljivo zaznati potres. Obdelali smo naslednje vlake baznih vektorjev:

- *Vzhodni vlak (V)*, ki povezuje postaje ZABO (Zabok, Hrvaška), CAKO (Čakovec, Hrvaška), LEND (Lendava), BODO (Bodonci), FLDB (Vrbna (Feldbach), Avstrija) in MRBR (Maribor). Bazni vektorji vlaka V so obarvani oranžno.
- *Vlak center vzhod (CV)*, ki povezuje postaje BRZC (Brežice), CELJ (Celje), SLOG (Slovenj Gradec) in DBLG (Lonč (Deutschlandberg), Avstrija). Bazni vektorji v vlaku CV so obarvani vijolično.
- *Vlak center zahod (CZ)*, ki povezuje postaje CRNM (Črnomelj), TRBN (Trebnje), GSR1 (Geoservis Ljubljana), RDVL (Radovljica) in VLCH (Beljak (Villach), Avstrija). Bazni vektorji vlaka CZ so obarvani škrlatno.
- *Zahodni vlak (Z)*, ki povezuje postaje DELN (Delnice, Hrvaška), RIJE (Reka (Rijeka), Hrvaška), KOPE (Koper), RCER (Červinjan (Cervignano del Friuli), Italija), RUDI (Videm (Udine), Italija), RMOG (Mužac (Moggio Udinese), Italija), BOVC (Bovec), IDRI (Idrija) in NOVGO (Nova Gorica). Bazni vektorji vlaka Z so obarvani modro.
- *Zadnji vlak*, ki povezuje postaje RMOG, VLCH, VLKM (Velikovec (Völkermarkt), Avstrija), DBLG in FLDB. Bazni vektorji zadnjega vlaka so obarvani zeleno.

Sestavljeni bazni vektorji, ki jih prikazuje slika 3, so dolgi od slabih 20 km (LEND-CAKO) do dobrih 65 km (ZABO-KARL). V okviru vsakega baznega vektorja smo obdelali fazna opazovanja GNSS v statičnem načinu, da smo dobili ocenjene komponente baznega vektorja za celotno obdobje opazovanj GNSS (štiri ure za vsak bazni vektor). Za izračun rezultatov na osnovi metode najmanjših kvadratov smo uporabili linearno kombinacijo faznih opazovanj L3, ki je skorajda neodvisna od ionosfere. Uporabljene so bile zelo hitre precizne efemeride službe IGS (angl. ultra rapid ephemerides), poleg komponent baznega vektorja pa smo ocenili tudi fazne nedoločenosti dvojnih faznih razlik in parametre zenitne troposferske refrakcije za obe postaji baznega vektorja na vsakih pet minut. Za kakovostno določene fazne nedoločenosti smo poskusili določiti tudi njihove cele vrednosti z zaokroževanje na najbližje celo število in s tem dobili t. i. fiksno rešitev (angl. fixed solution). Na osnovi statične rešitve baznega vektorja smo v drugem koraku izračunali še kinematično rešitev. Pri tem smo uporabili fazne nedoločenosti in parametre troposferske refrakcije iz statične rešitve ter ocenjevali le še komponente baznih vektorjev za vsak trenutek podanih opazovanj. Rešitev nam predstavljajo časovne vrste baznih vektorjev, to so komponente baznih vektorjev, podane v odvisnosti od časa.

Časovne vrste komponent baznih vektorjev

Primera dobljenih časovnih vrst komponent baznih vektorjev prikazuje slika 4. Prikazane so časovne vrste dveh baznih vektorjev, in sicer CAKO-ZABO in RIJE-DELN. Pri obeh grafih je na vrhu razpršenost komponente 'n', nato sledi razpršenost komponente 'e' in v tretji vrsti razpršenost komponente 'h', vse v enotah cm. Med 11. in 12. uro je v ozadju s svetlo rjavo barvo označen tudi približen čas potresa.

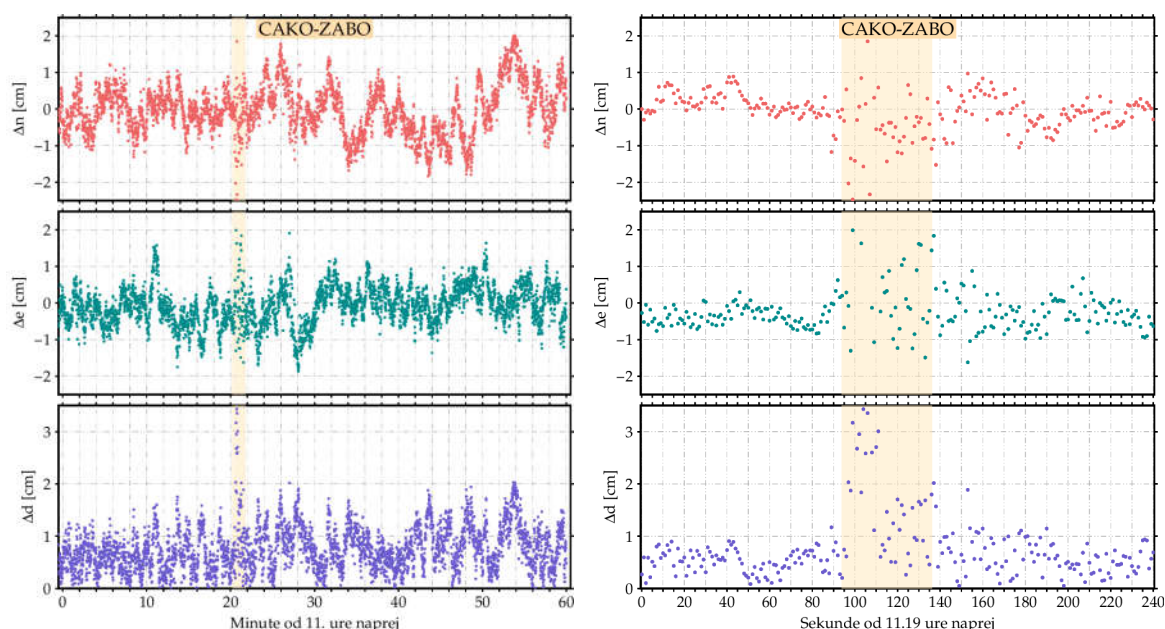


Slika 4: Časovne vrste komponent baznih vektorjev CAKO-ZABO (levo) in RIJE-DELN (desno) za vse tri koordinatne komponente

Časovne vrste baznega vektorja CAKO-ZABO prikazujejo eno izmed ugodnejših situacij, ko je razpršenosti obeh horizontalnih komponent takšna, da s slike vidimo učinek potresa na bazni vektor. V osenčenem delu se jasno vidijo razlike po obeh koordinatah, ki se razlikujejo

od splošne oblike razpršenosti. Po drugi strani pa za višinsko komponento tega ne moremo trditi. Za primerjavo je dan še bazni vektor RIJE-DELN, kjer imamo opazovanja slabše kakovosti, vendar vzroka za to trenutno ne poznamo. Vidimo, da v času potresa iz razpršenosti težko ugotovimo možno značilno spremembo koordinat, kar velja za vse tri koordinatne komponente.

S slike 4 tudi razberemo, da je število določenih položajev izredno veliko, medtem ko je potres kot hipen dogodek viden le na zelo kratkem časovno intervalu. Po drugi strani je zaznavanje potresa možno le v horizontalni ravnini, višinska komponenta je ocenjena s precej slabšo kakovostjo, verjetno pa je tudi, da bo potres povzročil večje horizontalne premike kot višinske, vsaj pri večjih oddaljenostih od potresa, kot je v našem primeru. Prikažimo zato razpršenosti horizontalnih koordinat (n in e) ter razpršenost horizontalne dolžine (d) baznega vektorja CAKO-ZABO za krajše časovno obdobje (slika 5). Na levi strani imamo časovno obdobje od 11. do 12. ure (UTC), medtem ko imamo na desni strani časovno obdobje od 11:19:00 do 11:23:00 ure (UTC).



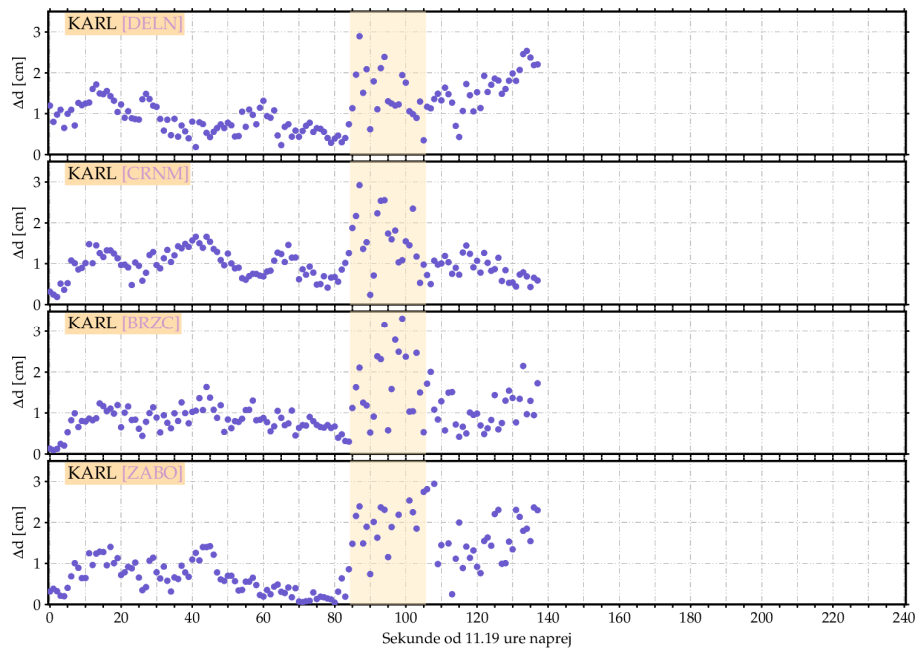
Slika 5: Časovne vrste komponent baznega vektorja CAKO-ZABO za obdobje od 11. do 12. ure (levo) in za obdobje od 11:19:00 do 11:23:00 ure za horizontalni komponenti n in e ter horizontalno razdaljo d

Časovne vrste na sliki 5 prikazujejo razpršenost obeh horizontalnih koordinat (zgornja dva grafa) in razpršenost horizontalne dolžine d. Tudi v tem primeru vidimo, da v časovnem obdobju ene ure (levi graf) potres vidimo v zelo kratkem času. Zato prikazujemo tudi desni graf, ki časovne vrste prikazuje v obdobju štirih minut, torej 240 s. Z desnega grafa jasno vidimo posledico potresa na obeh horizontalnih komponentah. Tresenje tal je do postaje ZABO prišlo okoli 11:20:38 ure, sam bazni vektor pa je bil nestabilen naslednjih približno 30 s. Analiza vsakega posameznega baznega vektorja s slike 3 v časovnem obdobju 240 s, kakor je to prikazano na desni strani slike 5, je osnovno izhodišče za določitev zaznavanja potresa po posamezni postaji in v smeri posameznega vlaka, kot so definirani na sliki 3. Prikažemo lahko razpršenost horizontalne dolžine (spodnji graf), od koder je jasno razvidno,

da je vpliv potresa še bolj viden pri horizontalni dolžini 'd', kot v primerjavi z obema horizontalnima koordinatama.

Časovne vrste baznih vektorjev po vlakih

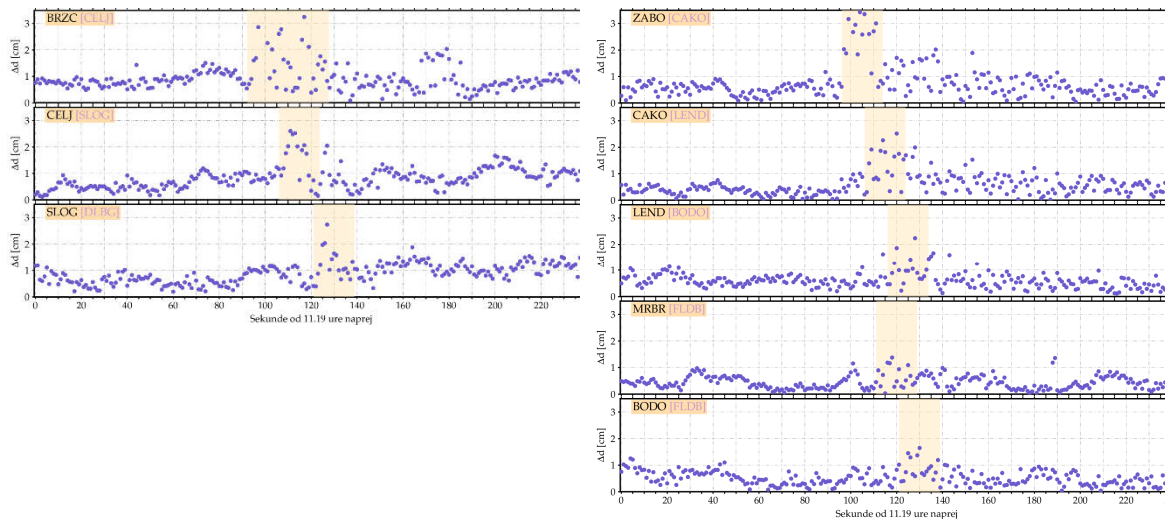
Da ugotovimo, kako se je potres širil preko območja Slovenije, bomo prikazali časovne vrste sprememb dolžine baznih vektorjev za vse sestavljene bazne vektorje s slike 3. Najprej bomo prikazali časovne vrste za vse bazne vektorje, ki se stikajo v postaji KARL.(slika 6).



Slika 6: Časovne vrste sprememb horizontalne dolžine d vseh baznih vektorjev, ki se stikajo na postaji KARL

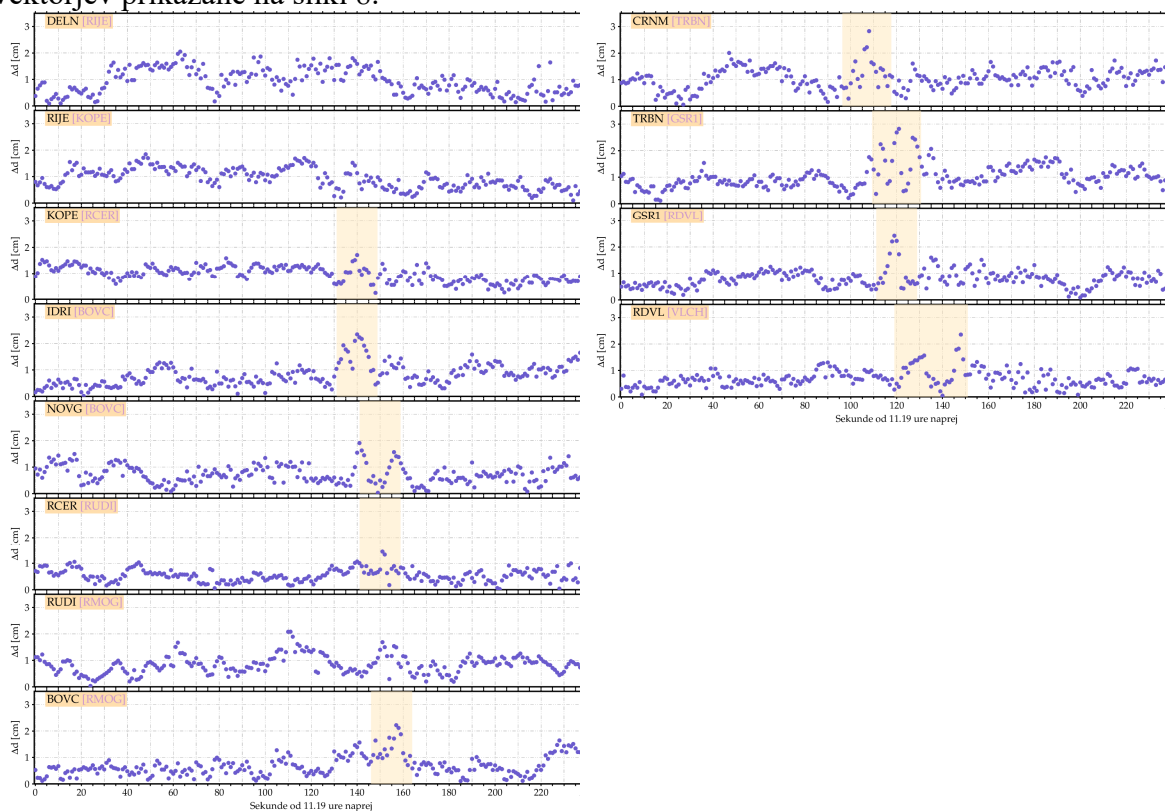
Slika 6 prikazuje vpliv potresa na delovanje postaje KARL, ki je najbližja postaja potresa. Pri vseh štirih baznih vektorjih vidimo, da je vpliv potresa jasno viden v istem časovnem obdobju. Potres v Karlovcu je bil tako silovit, da je postaja nekaj minut po potresu nehala delovati. S slike je razvidno, da je potres trajal vsaj 20 s, postaja pa je bila verjetno še nekaj časa nestabilna.

Dodatno nas je zanimalo, kako se je potres širil preko območja Slovenije, zato so v nadaljevanju prikazane časovne vrste, podobno kot na sliki 6, le da so tu prikazane za vseh pet vlakov preko (in v ozadju) Slovenije (glej shemo vlakov baznih vektorjev na sliki 3). Na sliki 7 prikazujemo vzhodni centralni in vzhodni vlak.



Slika 7: Časovne vrste sprememb horizontalne dolžine d treh baznih vektorjev vzhodnega centralnega vlaka (levo) in petih baznih vektorjev vzhodnega vlaka (desno)

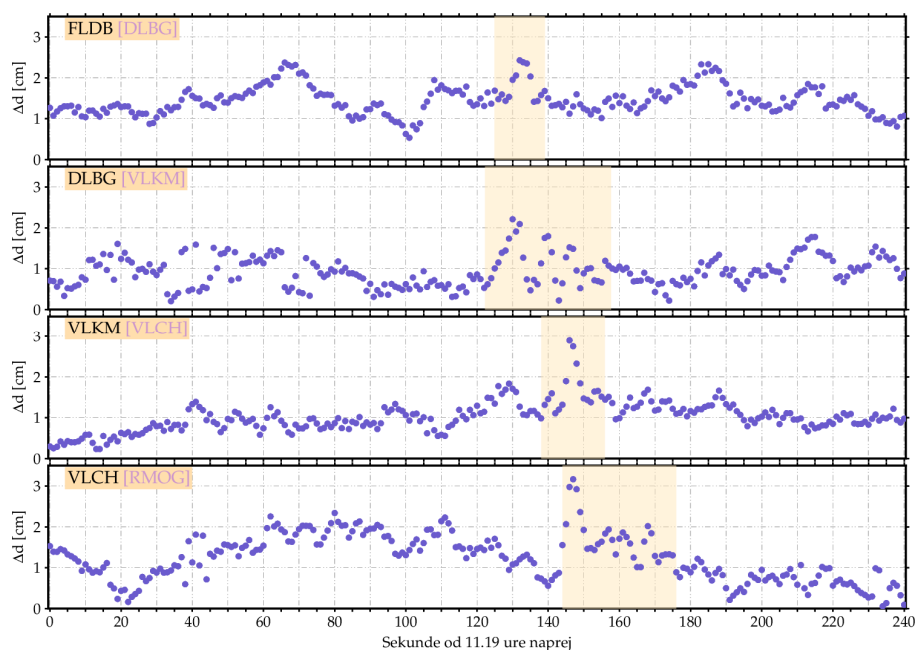
Na sliki 7 vidimo, da je potres zaznan na vseh petih baznih vektorjih vzhodnega vlaka kakor tudi na vseh treh baznih vektorjih vzhodnega centralnega vlaka. Časovno območje možne zaznave potresa na »rover« postaji baznega vektorja je obarvano v ozadju prikaza, vidi pa se tudi, da bolj kot je postaja oddaljena od potresa, kasneje je bil potres na postaji zaznan. Za zahodni in zahodno-centralni vlak so časovne vrste sprememb dolžine baznih vektorjev prikazane na sliki 8.



Slika 8: Časovne vrste sprememb horizontalne dolžine d osmih baznih vektorjev zahodnega centralnega vlaka (levo) in štirih baznih vektorjev zahodnega centralnega vlaka (desno)

Slika 8 prikazuje časovne vrste sprememb dolžine vseh osmih baznih vektorjev na zahodu (levo) in v zahodnem centralnem vlaku, kjer so štirje bazni vektorji (desno). V primeru zahodnega centralnega vlaka je potres zaznan na vseh štirih baznih vektorjih, čas zaznave pa spet sovпада z oddaljenostjo postaje GNSS od potresa. Po drugi strani pa na zahodni strani pri treh vektorjih ne moremo ugotoviti zaznave potresa, to je na postajah DELN, RIJE (Hrvaška) in RUDI (Italija), medtem ko je pri ostalih petih postajah potres dokaj jasno zaznan. Večja amplituda je na postajah IDRI, NOVG in BOVC, manjši pa sta na postajah KOPE in RCER. Vzroka, zakaj potresa ni bilo možno zaznati na treh postajah, ne poznamo, zato bi geodetskega stališča bi bilo v prihodnje pomembno analizirati kakovost opazovanj GNSS na teh postajah.

Na sliki 9 prikazujemo vlak štirih baznih vektorjev v zaledju Slovenije, to so bazni vektorji zadnjega vlaka. S slike je razvidno, da je potres zaznan na vseh postajah na območju Avstrije, za Karavankami, kjer je trenutek zaznave potresa spet odvisen od oddaljenosti postaje od potresa. Tudi časovno trajanje zaznave potresa na posameznem baznem vektorju je vsaj 15 sekund.



Slika 9: Časovne vrste sprememb horizontalne dolžine d štirih baznih vektorjev zadnjega vlaka

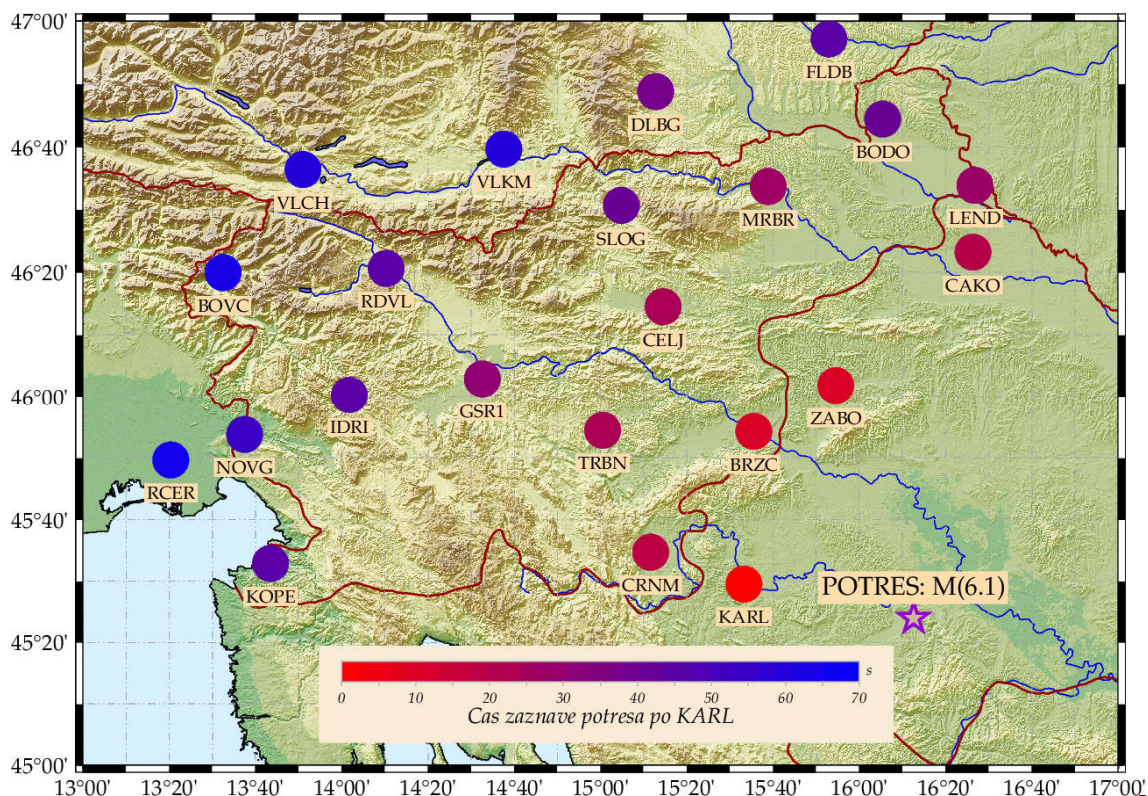
Zaznavnost potresa na stalno delujočih postajah GNSS omrežja SIGNAL

Na osnovi prikazov sprememb horizontalne dolžine d na posameznih baznih vektorjih na slikah 6, 7, 8 in 9 lahko ugotovimo, da smo potres zaznali na kar 23-ih postajah, ki so vključene v omrežje SIGNAL, medtem ko potresa na treh postajah nismo zaznali (slika 10).



Slika 10: Prikaz 23 postaj omrežja SIGNAL, kjer je bil potres zaznan (rdeči peterkotniki), in treh postaj, kjer potresa nismo zaznali (sivi peterkotniki)

S slike 10 vidimo, da je potres bilo mogoče zaznati na celotnem območju Slovenije, kar je skladno s sliko 1, ki prikazuje rezultate anket ljudi, ki so potres občutili. Zanimivo je, da potresa nismo zaznali na zahodnih postajah območja Hrvaške in na postaji RUDI v Italiji. Vzroke za to, da potresa nismo zaznali, lahko gledamo tako z geodetskega stališča (ustrezna izbira makro/mikro lokacije za postavitve postaje), kot tudi s stališča ostalih strok/znanosti; geologija (ustrezna geološka osnova okolice postaje), gradbeništvo (ustrezna stabilizacija postaje), seizmologija (ali je potres sploh prišel do točke) itd. Na koncu prikažimo še okvirne čase, kdaj je bil potres zaznan na posamezni postaji, kar vsebuje slika 11.



Slika 11: Čas zaznave potresa na postajah GNSS omrežja SIGNAL od trenutka zaznave potresa na postaji KARL

Na sliki 11 prikazujemo čas zaznave potresa na postajah GNSS omrežja SIGNAL od trenutka, ko je bil potres zaznan na postaji KARL, ki je bila najbližja postaja potresu in je bilo posledično mogoče najhitreje zaznati potres, kar smo pridobili iz slik 6, 7, 8 in 9. Vidimo lahko, da se je potres hitreje širil v smeri SV kot v smeri SZ ali smeri Z, v celoti pa je potres potreboval približno 70 sekund, da je prešel Slovenijo. Postaje, ki so zadnje zaznale potres, so bile zahodne postaje v Avstriji in severne postaje Italije. Postajo RMOG smo iz analize izpustili, saj je bila vedno bazna postaja (nikoli »rover« postaja), zato za to postajo nismo določili trenutka zaznave potresa.

Zaključne ugotovitve

Pričujoča raziskava predstavlja prvo uporabo opazovanj GNSS za analizo potresne aktivnosti v samem času potresa na območju Slovenije. Analizirali smo komponente baznih vektorjev, iz katerih smo poskušali ugotoviti, ali lahko opazovanja GNSS stalno delujočih postaj uporabimo za zaznavo potresa. Kar lahko na osnovi rezultatov raziskave zaključimo, je to, da je bil potres v okolici Petrinj, 29. decembra 2020 ob 12.19 uri po lokalnem času, tako močan, da smo ga zaznali na skoraj vseh postajah omrežja SIGNAL. Tresenje tal je bilo možno občutiti po vsej Sloveniji (slika 1), zato tudi na postajah GNSS (slika 10).

Rezultati nam predvsem odpirajo številna nova vprašanja, saj so (naše) izkušnje s podobnimi dogodki in načini analize dokaj skopi. Postavlja se vprašanje, ali so omrežja stalnih postaj GNSS sploh primerno orodje za zaznavanje in analize potresne dejavnosti v času potresa? Ali je omrežje SIGNAL uporabno za take namene? Kakšna je zmožnost stalnih postaj GNSS Kombinirane geodetske mreže 0. reda, za katere vemo, da so kakovostno

vzpostavljene? Ali bi bilo potrebno na postaje GNSS omrežij dodatno postaviti še dodatne senzorje, npr. inklinometre, da bi dobili boljše rezultate?

Opazovanja GNSS bo potrebno v prihodnosti obdelati na različne načine, v absolutnem načinu (metoda PPP (angl. Precise Point Positioning)) in na osnovi vseh končnih produktov službe IGS za čas trajanja potresa. Za daljše časovno obdobje pa nas bo zanimalo, ali je potres povzročil stalno spremembo geometrije ozemlja Slovenije oziroma tudi glede na celotno Zemljo.

Zahvala

Raziskava je nastala (tudi) v sklopu projekta CRP V2-1944, ki ga financirata ARRS in GURS.

Raziskava je nastala (tudi) v sklopu projekta J2-2489 (A), ki ga financira ARRS.

Raziskava je nastala (tudi) v sklopu projekta »RAZVOJ RAZISKOVALNE INFRASTRUKTURE ZA MEDNARODNO KONKURENČNOST SLOVENSKEGA RRI PROSTORA – RI-SI-EPOS«, ki ga financirajo Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport Republike Slovenije in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Literatura

- ARSO (2020). Potres 49 km J od Zagreba (Hrvaška) 29. 12. 2020 ob 12.19. <http://potresi.arso.gov.si/potres/762855> Pridobljeno 5. 1. 2020.
- Freymueller, J. (2017). Geodynamics. V T. P.J., M. O. (Ured.). Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, str. 1063-1106. Springer Handbooks. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-42928-1_37.
- Gualandi, A., Avouac, J.-P., Galetzka, J., Genrich, J. F., Blewitt, G., Adhikari, L. B., Koirala, B. P., Gupta, R., Upreti, B. N., Pratt-Sitaula, B., Liu-Zeng, J. (2017). Pre- and post-seismic deformation related to the 2015, Mw 7.8 Gorkha earthquake, Nepal. *Tectonophysics*, 714-715, str. 90-106. doi: 10.1016/j.tecto.2016.06.014.
- Ihde, J., Habrich, H., Sacher, M., Söhne, W., Altamimi, Z., Brockmann, E., Bruyninx, C., Caporali, A., Dousa, J., Fernandes, R., Hornik, H., Kenyeres, A., Lidberg, M., Mäkinen, J., Poutanen, M., Stangl, G., Torres, J.A., Völksen, C. (2011). EUREF's Contribution to National, European and Global Geodetic Infrastructures. V Rizos, C., Willis, P. (Ured). Proceedings of the IAG General Assembly, Melbourne, Avstralija. 28. junij – 2. julij, 2011. International Association of Geodesy Symposia, 139, str. 189-196. DOI 10.1007/978-3-642-37222-3_24.
- Johnston, G., Riddell, A., Hausler, G. (2017). The International GNSS Service. V T. P.J., M. O. (Ured.). Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, str. 967-982. Springer Handbooks. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-42928-1_33.
- Medved, K., Berk, S., Sterle, O., Stopar, B. (2018). Izzivi in dejavnosti v zvezi z državnim horizontalnim koordinatnim sistemom Slovenije. *Geodetski vestnik*, 62 (4), str. 567–586. doi:http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2018.04.567-586
- Oven, K., Ritlop, K., Triglav Čekada, M., Pavlovčič Prešeren, P., Sterle, O., Stopar, B. (2019). Vzpostavitev Kombinirane geodetske mreže v Sloveniji in analiza njenega delovanja v obdobju 2016 –2018. *Geodetski vestnik*, 63 (4), 491-513. doi:10.15292/geodetskivestnik.2019.04.491-513.
- Oven, K., Ritlop, K., Triglav Čekada, M., Sterle, O., Stopar, B. (2018). Analiza kakovosti operativnega delovanja točke kombinirane geodetske mreže Kog. V K. M. in sod. (Ured). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018: zbornik del. 24. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 31. januar 2019. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2019. Str. 131–140. Url: http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2019/SZGG_2019-Oven_in_drugi.pdf

- RTV SLO (2020). Umrlo najmanj sedem ljudi – v razrušenih Petrinji in Glini iščejo preživele, pomoč prihaja od povsod. <https://www.rtv slo.si/svet/evropa/umrlo-najmanj-sedem-ljudi-v-razrusenih-petrinji-in-glini-iscejo-prezivele-pomoc-prihaja-od-povsod/547241> Pridobljeno 5. 1. 2020.
- Sterle, O. (2015). Časovno odvisne geodetske mreže in koordinatni sistemi. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Slovenija, Ljubljana. Pridobljeno iz <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=86314&lang=slv>
- Sterle, O., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P. (2014). Metoda PPP pri statični izmeri GNSS. Geodetski vestnik, 58 (3), 466–481. doi:<https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2014.03.466-481>
- 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: international geological journal* 57 (1), str. 57–65.
- 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), str. 214-222. doi: 10.1016/j.tecto.2009.09.001.