



Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko

<http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/>

RAZISKAVE S PODROČJA GEODEZIJE IN GEOFIZIKE 2020

zbornik del

26. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ljubljana, 28. januar 2021

Uredniki:

Miran Kuhar
Polona Pavlovčič Prešeren
Polona Vreča

Recenzije:

Martin Knez
Miha Pavšek
Dušan Polajnar
Tomaž Ambrožič
Petra Jamšek Rupnik
Polona Zupančič
Mladen Živčič
Miran Kuhar

ORGANIZATOR SREČANJA IN ZALOŽNIK

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko
Jamova 2, Ljubljana

E dostop:

http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2021/SZGG_Zbornik_2021_E_publikacija.pdf

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

[COBISS.SI-ID=53030659](https://nuk.ub.uni-lj.si/COBISS.SI-ID=53030659)

ISBN 978-961-95299-0-4 (pdf)

Vsebina

Predgovor	3
Prvi del: recenzirani prispevki	
Manca Volk Bahun - Pojavljanje snežnih plazov v Sloveniji	5
Stanka Šebela - Raziskovalna infrastruktura RI-SI-EPOS na področju krasoslovja.....	13
Mihaela Triglav Čekada - Izračun masnih bilanc ledenikov v času prosto dostopnih satelitskih podatkov	21
Tilen Urbančič, Božo Koler - Geodetski monitoring cerkve sv. Benedikta v Kančevcih...	37
Martina Čarman, Tamara Jesenko, Stanka Šebela, Polona Zupančič, Danijela Birko, Mladen Živčić – Pomen mreže prenosnih potresnih opazovalnic RI-SI-EPOS jugovzhodno od Postojne	51
Martina Čarman - Uporaba navzkrižne korelacije za detekcijo potresov v potresnih nizih	63
Polona Pavlovčič Prešeren, Miha Pajnič, Tomaž Ambrožič, Aleš Marjetič - Georeferenciranje terestričnega laserskega skeniranja z naravnimi tarčami: primer lednega plezališča v Mlačci	75
Bojan Stopar, Koler Božo, Oskar Sterle, Klemen Ritlop, Petra Jamšek Rupnik, Vrabec Marko - Projekt SLOKIN - Geokinematski model ozemlja Slovenije.....	87
Oskar Sterle, Veton Hamza, Klemen Ritlop, Stopar Bojan, Polona Pavlovčič Prešeren - Omrežje GNSS-postaj SIGNAL za spremljanje potresov: primer potresa v Petrinji, december 2020.....	105
Drugi del: razširjeni povzetki	
Sašo Slabajna, Gregor Skok, Andrej Hrabar – Kategorizacija konvektivnih oblakov močnega vertikalnega razvoja iz radarskih meritev	119
Vito Švagelj, Gregor Skok, Anton Zgonc, Benedikt Strajnar - Določanje radialne komponente vetra iz meritev Dopplerjevega radarja.....	121
Anžej Curk, Gregor Skok - Pojavnost kondenzacijskih sledi nad Slovenijo	123

Predgovor

Poslovili smo se od leta 2020, ki so ga zaznamovale velike spremembe v načinu delovanja celotne družbe kot posledica pandemije COVID-19. Spremembe so se seveda dotaknile tudi Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko (SZGG, <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/>), vendar lahko ob pregledu poročil o delu v letu 2020 kot tudi prispevkov v tem zborniku z veseljem zaključim, da je bilo leto 2020 posebno in strokovno zelo uspešno.

SZGG deluje v okviru Mednarodne zveze za geodezijo in geofiziko (International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG, <http://www.iugg.org/>) in je interdisciplinarno združenje, ki povezuje slovenske strokovnjake s področja raziskav planeta Zemlje. SZGG je bilo ustanovljeno leta 1993, leta 1995 pa se je formalno včlanilo v IUGG. Ob jubileju smo organizirali januarja 2020 Slavnostno akademijo ob 25-letnici sprejema nacionalnega komiteja SZGG v IUGG. Poleg članov so se udeležili Slavnostne akademije predstavniki institucij, kjer delujejo člani SZGG, kot posebni gost pa se nam je pridružil generalni tajnik IUGG, dr. Alexander Rudloff. Danes nas na prijeten dogodek spominjajo 25. zbornik del »Raziskave s področja geodezije in geofizike – 2019« s prispevki iz strokovnega posveta in zgodovinskim pregledom delovanja SZGG in sekcij ter fotografije Igorja Karničnika. V 26. zborniku del, ki je pred nami, so zbrani prispevki predstavljeni na strokovnem posvetu »Raziskave s področja geodezije in geofizike – 2020«, ki je potekalo januarja 2021 s pomočjo videokonferenčnega sistema Zoom. V okviru SZGG deluje trenutno sedem različnih sekcij s področja geodezije, seizmologije in fizike notranjosti Zemlje, geomagnetizma, meteorologije in atmosferskih znanosti, hidrologije, fizikalne oceanografije in kriosfere. V letošnjem zborniku del boste našli 10 prispevkov in 2 povzetka iz štirih področij delovanja SZGG in se seznanili s kategorizacijo konvektivnih oblakov močnega vertikalnega razvoja iz radarskih meritev, določanjem radialne komponente vetra iz meritev Dopplerjevega radarja, pojavnostjo kondenzacijskih sledi nad Slovenijo, raziskovalno infrastruktura RI-SI-EPOS na področju krasoslovja, izračunom masnih bilanc ledenikov v času prosto dostopnih satelitskih podatkov, geodetskim monitoringom cerkve sv. Benedikta v Kančevcih, mrežo prenosnih potresnih opazovalnic RI-SI-EPOS jugovzhodno od Postojne, uporabo navzkrižne korelacije za detekcijo potresov v potresnih nizih, georeferenciranjem terestričnega laserskega skeniranja z naravnimi tarčami na primeru lednega plezališča v Mlačci, omrežjem GNSS-postaj SIGNAL za spremljanje potresov s primerom potresa Petrnja, ki smo ga decembra 2020 čutili tudi številni prebivalci Slovenije in projektom SLOKIN o geokinematskem modelu ozemlja Slovenije.

Za uvodni prispevek srečanja smo izbrali delo mlade nagrajenke SZGG 2020, Mance Volk Bahun, ki je bila nominirana kot prva nagrajenka s področja delovanja Sekcije za kriosfero. Raziskovalno delo Mance Volk Bahun je osredotočeno na pojavnost snežnih plazov, o čemer govori tudi njen prispevek v zborniku del.

Kljub podpori članov in donatorjev pandemija COVID-19 vpliva tudi na trenutno finančno stanje SZGG, zato bo zbornik del žal izšel v zelo zmanjšani nakladi, celoten zbornik pa bo tako kot pretekle številke dostopen na spletni strani SZGG (<http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/>), kjer upam, da ga boste z zanimanjem prebrali ter pobrskali tudi po poročilih sekcij in ostalih informacijah o delovanju SZGG.

Ob koncu leta 2020 nas je žal dosegla žalostna vest, da je svojo življenjsko pot zaključil dolgoletni član SZGG, Marjan Jenko (1928-2020), ki je deloval na področju geodetskih referenčnih koordinatnih sistemov kot pedagog in raziskovalec. Prizadeval si je za razvoj in modernizacijo geodetske znanosti in se je do januarja 2020 redno udeleževal tudi srečanj SZGG. Ohranili ga bomo v lepem spominu in kot vzor, da leta niso ovira za radovednega

raziskovalnega duha, medgeneracijsko izmenjavo znanj in aktivno udejstvovanje na področjih, ki nas zanimajo.

Vsem, ki se trudite, da SZGG uspešno nadaljuje pot načrtano pred 28 leti, se iskreno zahvaljujem in upam, da se prihodnje leto na tradicionalnem januarskem srečanju vidimo v živo.

predsednica SZGG

dr. Polona Vreča

Pojavljanje snežnih plazov v Sloveniji

Manca Volk Bahun *

Povzetek

Snežni plazovi so naravni pojav, ki je precej pogost tudi v Sloveniji. Najdemo jih tako na območju Alp oziroma visokogorja, na strmejših pobočjih alpskih hribov, kot tudi na dinarskih planotah in panonskih gričevjih. Glavna pogoja za njihov nastanek sta dovolj debela snežna odeja na strmih pobočjih. Po sobivanju s snežnimi plazovi v predindustrijski dobi in zanemarjanju v industrijski dobi, človek danes vse prepogosto posega na plazovita območja. Sobivanja s to naravno nevarnostjo se moramo zato na novo naučiti in se ji ustrezno prilagoditi. Na območju celotnih Alp se je število prebivalcev v zadnjem stoletju podvojilo, povečale so se potrebe po mobilnosti in dejavnem preživljanju prostega časa, zato se je povečala tudi ogroženost zaradi snežnih plazov oziroma naravnih nesreč nasploh, s tem pa aktualnost tovrstnih raziskav.

V Sloveniji snežni plazovi v povprečju zahtevajo eno do dve smrtni žrtvi na leto. Primerjave kažejo, da imamo več možnosti za preživetje, če smo udeleženi v prometni nesreči, kot če nas zajame snežni plaz. Po drugi strani pa je gmotna škoda, ki jo snežni plazovi povzročijo, precej manjša kot pri ostalih naravnih nesrečah. V Sloveniji so ogroženi predvsem tisti, ki pozimi zahajajo na nevarna območja. Razumevanje lavinskih napovedi, prepoznavanje plazovnih problemov in vzorcev pojavljanja je zato z vidika preventivnega ravnanja izjemnega pomena. Poleg sistema za opozarjanje, ki se v zadnjih letih precej izboljšuje, bomo v prihodnosti morali posvetiti več pozornosti tudi beleženju in analizi snežnih plazov. Le tako bomo lahko bolje razumeli ta naravni pojav, preprečevali nesreče in učinkoviteje upravljali s prostorom.

Ključne besede: geografija, fizična geografija, naravne nesreče, snežni plazovi, plazovni dogodki, lavinski kataster, nevarnostni vzorci, Slovenija

Key words: geography, physical geography, natural hazards, snow avalanche, avalanche events, avalanche cadastre, avalanche danger patterns, Slovenia

Uvod

Snežni plazovi so naravni pojav oziroma proces, pri katerem gmota snega ali ledu zdrsne po pobočju (Šegula, 1986). Tiste, ki zahtevajo človeška življenja in povzročajo premoženjsko škodo, prištevamo k naravnim nesrečam (Rudolf-Miklau in Sauermoser, 2011).

Človek je že od nekdaj obiskoval alpski prostor (Mikša in Zorn, 2016) in ostali vzpeti svet oziroma območja, kjer se lahko prožijo snežni plazovi. Tam je iskal rudo, ugodne pašnike za živino, lovil divjad, izkoriščal gozd in ostale danosti, ki jih to območje ponuja (Novak, 1969; Hodnik, 2016). Svoja bivališča je večinoma prilagodil plazovitim območjem. Človeške navade in potrebe pa so se skozi čas spreminjale in človekovo delovanje je spet bolj poseglo tudi na plazovita območja. Na območju celotnih Alp se je število prebivalcev v zadnjem stoletju podvojilo, hkrati so se povečale potrebe po mobilnosti in pristočasnih dejavnosti, s tem pa se je povečala tudi ogroženost zaradi snežnih plazov (Rudolf-Miklau in Sauermoser, 2011).

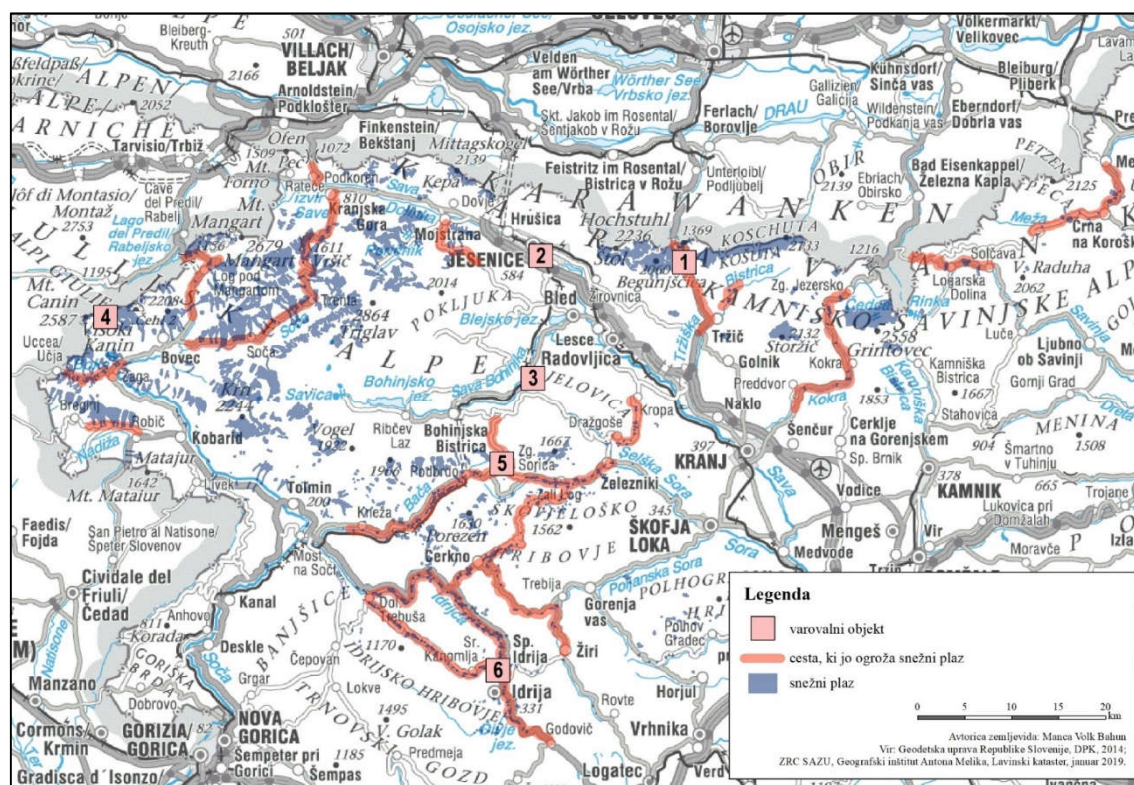
* Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Geografski inštitut Antona Melika, Gosposka ulica 13, 1000 Ljubljana

Snežni plazovi so posebej problematični zaradi svoje krajevne in časovne spremenljivosti (Pavšek, 2002). V letih z močnejšimi snežnimi padavinami povzročajo precejšnjo škodo, v zimah, ko je snega manj, pa nanje hitro pozabimo, sploh če si suhe zime sledijo več let skupaj (Volk Bahun, 2020).

Razumevanje vzrokov za pojavljanje snežnih plazov in analiza plazovnih dogodkov je tako ključnega pomena za izboljšanje napovedi in preprečevanju nesreč.

Snežni plazovi v Sloveniji s poudarkom na dogodkih v obdobju od 1988 do 2018

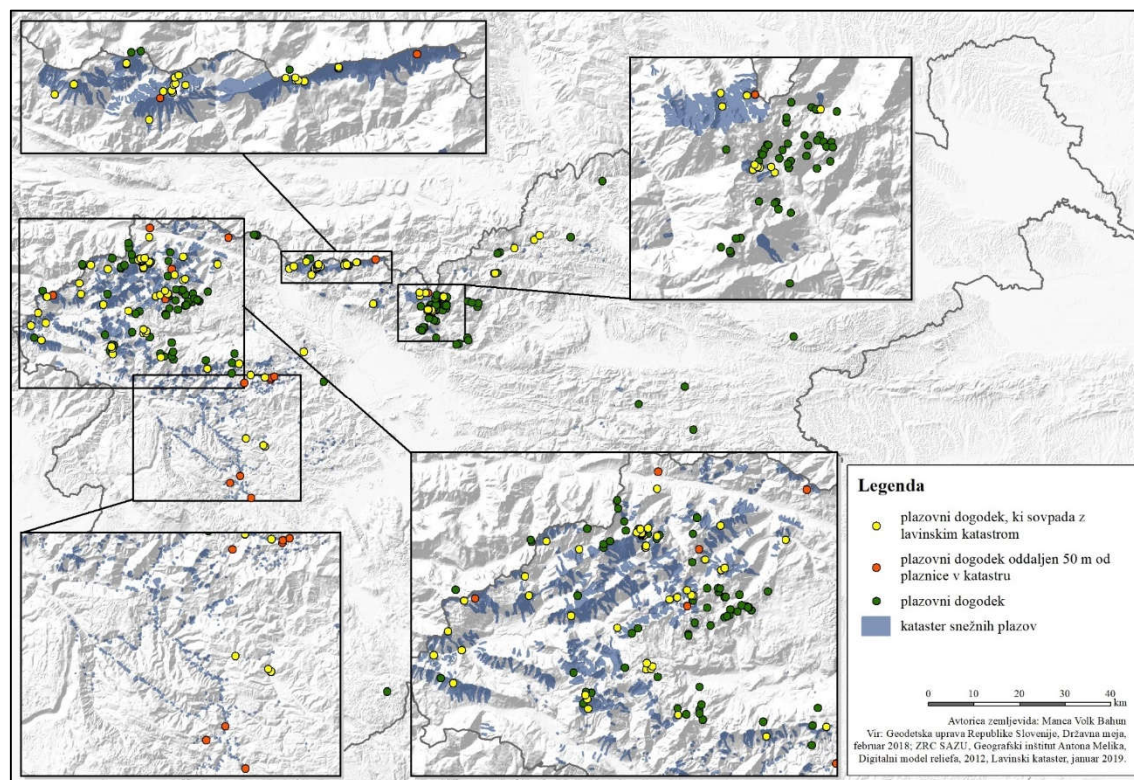
Snežni plazov v Sloveniji so pogost pojav. Kljub temu, da je takšnih plazov, ki ogrožajo infrastrukturo sicer manj, kot v ostalih delih Alp, to še ne pomeni, da niso problem (Volk, 2010). Ko je snega več, so zaradi nevarnosti večkrat zaprti odseki cest in smučišč, saj plazovi bodisi zasujejo del vozišča oziroma smučišča bodisi so prevelika nevarnost za uporabnike (na primer vršiška cesta, smučišči Vogel in Kanin; slika 1) (Volk Bahun, 2020). Velika nevarnost so za ljudi, ki tam živijo, predvsem za tiste, ki na plazovita območja zahajajo v svojem prostem času. Teh je iz leta v leto več (Burnik, 2015), saj tovrstne dejavnosti postajajo tudi del slovenske turistične ponudbe.



Slika 1: Zemljevid nekaterih ogroženih odsekov cest in varovalnih objektov (1 – lavinska galerija na Ljubelju, 2 – zaščitne mreže nad AC Hrušica–Vrba, 3 – lavinska galerija nad železniško progo Jesenice–Bohinjska Bistrica, 4 – sistem Gaz-ex na Kaninu, 5 – zaščitne mreže na cesti Železniki–Soriška planina, 6 – zaščitni mostovi v Spodnji Idriji) (Volk Bahun, 2020).

Za boljše razumevanje pojavljanja snežnih plazov v Sloveniji in učinkovitejše varstvene ukrepe smo zbrali podatke o plazovnih dogodkih in plazovnih nesrečah v Sloveniji. S pregledom različnih zgodovinskih virov smo do leta 2018 zabeležili 499 plazovnih

dogodkov. Z njihovo analizo in primerjavo z obstoječim lavinskim katastrom smo ugotovili, da je plazovitih območij veliko več, kot jih prikazuje obstoječi lavinski kataster in da se pojavljajo tudi na območjih, kjer jih ne bi pričakovali (slika 2).

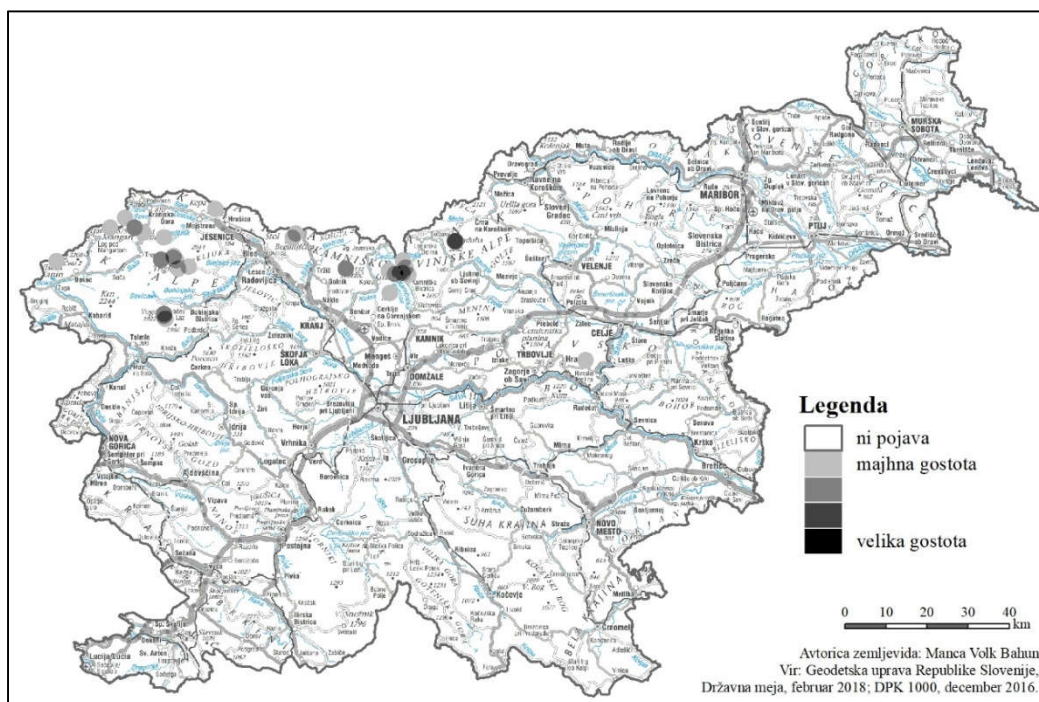


Slika 1: Primerjava plazovnih dogodkov iz baze snežnih plazov in obstoječega lavinskega katastra (Volk Bahun, 2020).

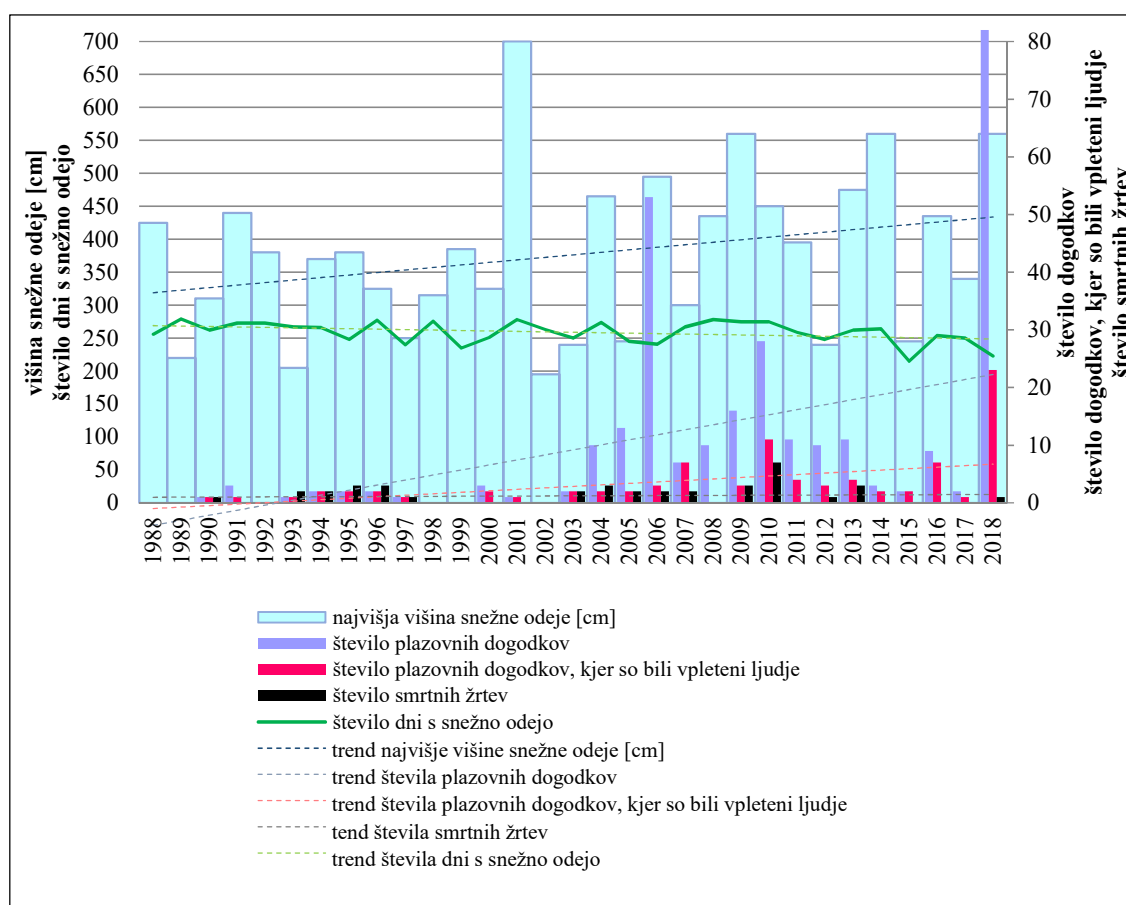
Podrobneje smo preučili dinamiko pojavljanja snežnih plazov predvsem v sezonah od 1988 do 2018, ko smo zabeležili 283 plazovnih dogodkov. Ugotovili smo, da se večinoma beležijo le plazovi, kjer je bil vpleten človek ali je bila povzročena gmotna škoda. Plazovi, ki za sabo ne puščajo hujših posledic, so običajno spregledani. Njihova časovna in prostorska pojavnost je odvisna predvsem od trenutnih vremenskih in snežnih razmer. V Sloveniji prevladujejo v alpskih gorovjih in alpskih hribovjih, pojavljajo pa se tudi v ostalih pokrajinah, kjer so manjši po velikosti in količini gradiva. Po številu žrtev izstopajo Julijske Alpe (15), sledijo Kamniško-Savinjske Alpe (12), Zahodne Karavanke (3) in Posavsko hribovje (1) (slika 3) (Volk Bahun, 2020).

Snežne sezone v obdobju od leta 1988 do leta 2018 so bile zelo raznolike (slika 4), od toplih in milih zim z malo snega v gorah, do nadpovprečno sneženih. Kljub temu da trend najvišje višine snežne odeje narašča, se trend števila dni s snežno odejo rahlo znižuje. To pomeni, da so zime v zadnjem času sicer bolj snežene, vendar snežna odeja obleži manj časa (Volk Bahun, 2020).

Opazimo tudi, da je število plazovnih dogodkov po letu 2000 začelo naraščati. Ta številka ne narašča le zaradi večjega števila nesreč, temveč predvsem zaradi boljše dostopnosti podatkov o posameznih plazovnih dogodkih (Volk Bahun, 2020).



Slika 3: Zgostitve smrtnih nesreč v obdobju 1988–2018. Največja gostota smrtnih primerov je v Kamniško-Savinjskih Alpah (0,02 mrtvih/km²) (Volk Bahun, 2020).



Slika 4: Prikaz najvišje višine snežne odeje (v cm) in števila dni s snežno odejo na Kredarici ter števila plazovnih dogodkov, dogodkov, kjer so bili vpleteni ljudje in število smrtnih žrtev v obdobju od leta 1988 do 2018 (Volk Bahun, 2020).

V obdobju zadnjih 15 let se je v bazi plazovnih dogodkov povečalo število tistih dogodkov, ki niso zahtevali žrtev in škode. Kljub temu, da se število vpisov v bazo razlikuje, vendarle opazimo trend naraščanja števila dogodkov, kjer so bili vpleteni ljudje. Vsako leto se število obiskovalcev gora povečuje, hkrati se povečuje število nesreč tudi v zimskem času (Gorska reševalna zveza Slovenije, 2019b).

Ugotovili smo, da so snežni plazovi v Sloveniji najpogostejši v zimskih (december, januar, februar) in pomladanskih (marec, april, maj) mesecih. Pri snežnih plazovih, kjer je podatek o velikosti znan, prevladujejo srednje veliki plazovi, predvsem na južnih ekspozicijah. V povprečju snežni plazovi v Sloveniji zahtevajo eno do dve žrtvi na leto (1,27 žrtve/leto) (Volk Bahun, 2020).

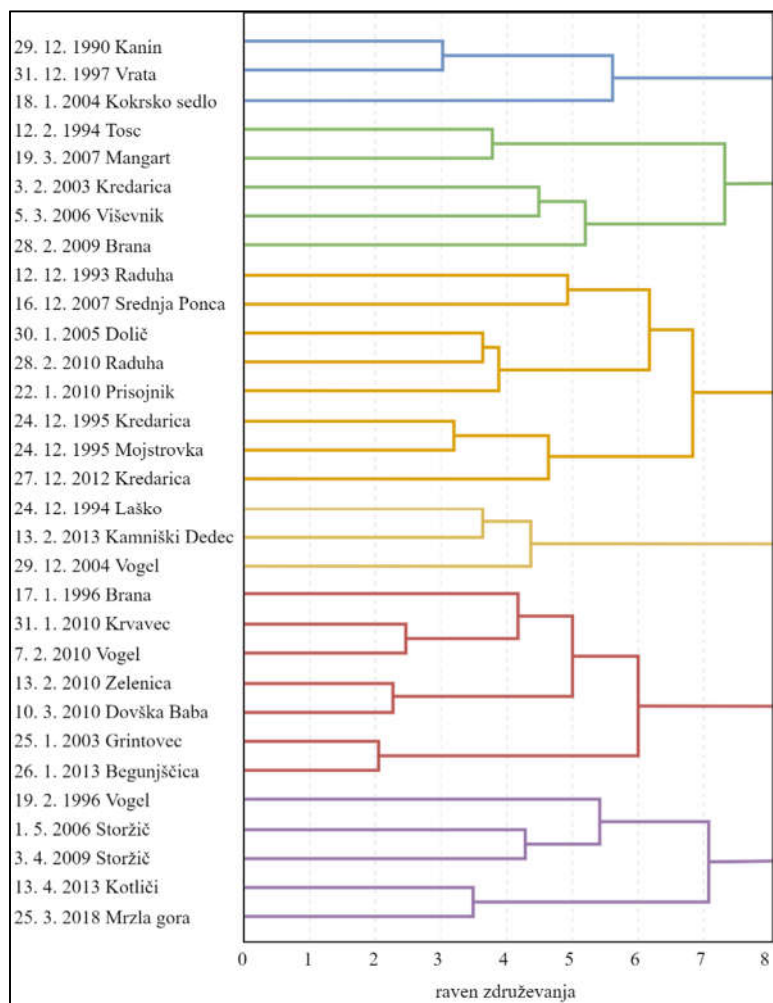
Nevarnostni vzorci snežnih plazov v Sloveniji

Iz pridobljenih podatkov o nesrečah smo poskušali pridobiti tudi nevarnostne vzorce pojavljanja, ki smo jih primerjali s sorodnimi vzorci v tujini. S statističnim razvrščanjem v skupine smo snežne plazove glede na izbrane časovne, morfološke, snežne in vremenske kazalnike razdelili na šest skupin. V vsaki prevladuje določena vrsta snežnih plazov, ki so se sprožili v bolj ali manj podobnih razmerah. Na podlagi analize 31 plazovnih dogodkov smo dobili šest nevarnostnih vzorcev:

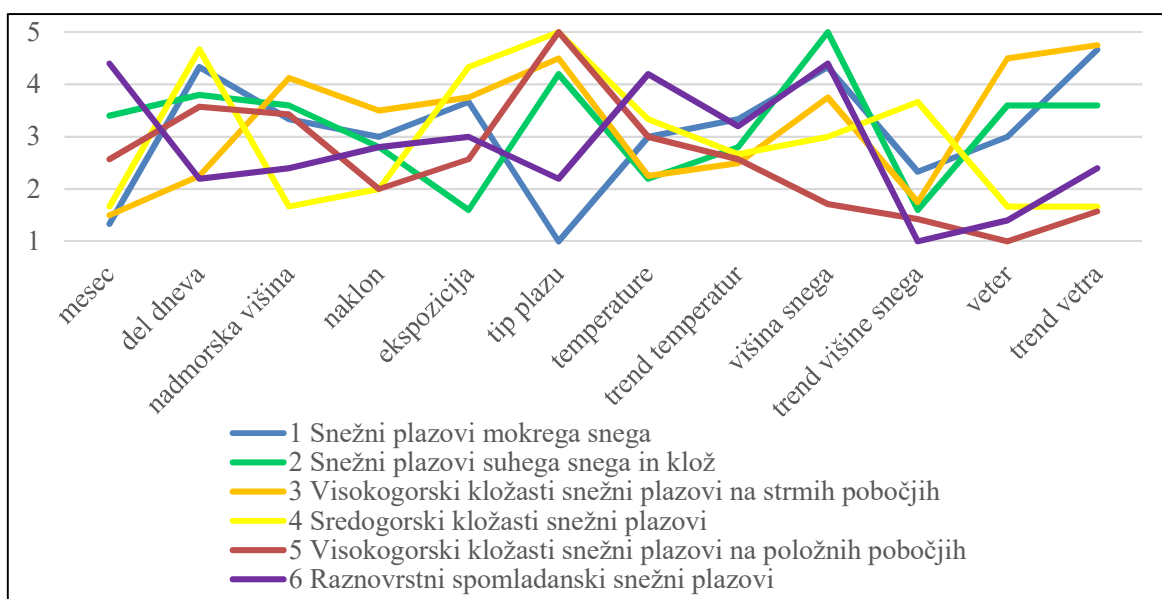
- snežni plazovi mokrega snega (modra barva na sliki 4 in 5),
- snežni plazovi suhega snega in klož (zelena barva na sliki 4 in 5),
- visokogorski kložasti snežni plazovi na strmih pobočjih (oranžna barva na sliki 4 in 5),
- sredogorski kložasti snežni plazovi (rumena barva na sliki 4 in 5),
- visokogorski kložasti snežni plazovi na položnih pobočjih (rdeča barva na sliki 4 in 5),
- raznovrstni spomladanski snežni plazovi (vijoličasta barva na sliki 4 in 5) (Volk Bahun, 2020).

Na podlagi obravnavanega vzorca smo ugotovili, da v Sloveniji med plazovi, ki so ogrozili ljudi ali infrastrukturo, prevladujejo kložasti plazovi na različnih nadmorskih višinah.

Podobne nevarnostne vzorce uporablja tudi tirolska lavinska služba, kjer plazove, glede na vzroke pojavljanja, razvrščajo na deset različnih nevarnostnih vzorcev – šibka plast blizu površja, polzeč sneg, dež na obstoječo snežno odejo, izmenjava mrzlih in toplih plasti v snežni odeji, sneženje po daljšem obdobju mrzlega vremena, mrzel, nesprijet novozapadli sneg in veter, območja z malo snega v s snegom zelo bogati zimi, prekrit površinski srež, prekrit sloj sodre ali babjega pšena in odjuga. Za prihodnje analize predlagamo razširitev in dopolnitev baze plazovnih dogodkov tudi s plazovi, ki niso povzročili večje škode in žrtev. S tem bi dobili širši nabor podatkov in posledično tudi jasnejšo sliko o dejanski prostorski in časovni razporejenosti ugotovljenih plazovnih tipov. V trenutni bazi plazovnih dogodkov je plazov, ki ne povzročajo večje škode, precej malo, saj se le-ti le redko zabeležijo. Glavni razlog za to je njihova neškodljivost. Kljub temu pa se zgodi, da na prvi pogled nedolžni plazovi ob ustrezni kombinaciji razmer lahko postanejo rušilni. Popis teh plazov bi bil koristen tudi z vidika ocene dejanske ogroženosti Slovenije zaradi snežnih plazov (Volk Bahun, 2020).



Slika 4: Dendrogram združevanja plazovnih dogodkov v nevarnostne vzorce (Volk Bahun, 2020).



Slika 5: Skupni graf povprečnih vrednosti vseh slovenskih nevarnostnih vzorcev (Volk Bahun, 2020).

Sklep

Kljub temu, da Slovenija leži na obrobju Alp, vpliv snežnih plazov na naše okolje ni tako zelo obrozen, kot povečini mislimo (Volk Bahun, 2020). Snežni plazovi se lahko sprožijo spontano. Med plazovi, ki zahtevajo žrtve ali povzročijo poškodbe, je do 85 % takšnih, ki jih sprožijo žrtve same (Schweizer in Jamieson, 2001). Za zmanjšanje le-teh je zelo pomembna preventiva. Različni gradbeni posegi so sicer učinkovit ukrep, vendar so primerni predvsem tam, kjer so ogroženi infrastruktura ali bivališča. Takšnih območij je v Sloveniji manj, kot v ostalih deleh Alp. Izven teh območij pa preventivni ukrepi obsegajo še pomembnejše negradbene ukrepe, ki temeljijo predvsem na izobraževanju in ustreznemu opozarjanju oziroma obveščanju, da se lahko morebitni nevarnosti izognemo.

Prostora za izboljšave je v Sloveniji še precej, saj pri lavinski varnosti zaostajamo za alpskimi sosedi. Sistematično beleženje in natančna analiza plazovnih nesreč sta tudi manjkajoč člen pri učinkovitem upravljanju s snežnimi plazovi kot naravno nesrečo. Za napovedovanje in posredovanje ob nesreči je na državni ravni poskrbljeno, medtem ko sta analiza dogodkov in pripravljenost obiskovalcev nevarnih območij pomanjkljiva.

Plazovna dejavnost spada med procese, ki se hitro odzivajo na podnebne spremembe. To pomeni, da lahko v prihodnje pričakujemo še izrazitejše naravne pojave, na primer obilnejša sneženja in deževja ter močne vetrove, večjo pogostost teh pojavov in s tem večjo izpostavljenost snežnim plazovom tudi v na videz manj ogroženih pokrajinah.

Zahvala

Delo je bilo delno financirano v okviru temeljnega raziskovalnega programa P6–0101 Geografija Slovenije, temeljnega raziskovalnega projekta J6–2591 Upravljanje lavinske nevarnosti s pomočjo klasifikacije reliefa, infrastrukturnega programa I0–0031 Naravna in kulturna dediščina Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in projekta Crossrisk v okviru programa Interreg V-A Slovenija-Avstrija.

Literatura

- Burnik, J. (2015). Izbrani turni in alpinistični smuki v Julijskih Alpah in Karavankah ter variantno smučanje. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za šport, 84 p.
- Gorska reševalna zveza Slovenije (2019b). Statistika nesreč. Gorska reševalna zveza Slovenije. https://www.grzs.si/statistika_nesrec.php.
- Hodnik, U. (2016). Planšarstvo v Zgornjih bohinjskih planinah. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, 92 p.
- Mikša, P., Zorn, M. (2016). The beginnings of the research of Slovenian Alps. *Geografski vestnik* 88 (2): 103–131.
- Novak, A. (1969). O zgodovini planšarstva na Gorenjskem. *Planinski vestnik* 1969 (9): 414–418.
- Pavšek, M. (2002). Snežni plazovi v Sloveniji. Založba ZRC, Ljubljana, 209 p.
- Rudolf-Miklau, F., Sauermoser, S. (2011). *Handbuch Technischer Lawinenschutz*. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 464 p.
- Schweizer, J., Jamieson, B. (2001). Snow cover properties for skier triggering of avalanches. *Cold Regions Science and Technology* 33 (2–3): 207–221.
- Šegula, P. (1986). Sneg, led in plazovi: Priročnik za planince, smučarje in druge. Planinska zveza Slovenije, Ljubljana, 301 p.
- Volk Bahun, M. (2020). Mehanizmi pojavljanja snežnih plazov v slovenskih Alpah (Mechanisms of avalanche occurrence in the Slovenian Alps). Doktorska disertacija. Univerza na Primorskem, Fakulteta za humanistične študije, 173 p.

Volk, M. (2010). Snežni plazovi v Karavankah. Diplomsko delo. Univerza na Primorskem, Fakulteta za humanistične študije, 111 p.

Raziskovalna infrastruktura RI-SI-EPOS na področju krasoslovja

Stanka Šebela *

Povzetek

ZRC SAZU je poleg GeoZS, UL FGG in IJS partner v projektu RI-SI-EPOS, ki je namenjen nabavi in razširitvi raziskovalne infrastrukture (RI) na področju geoznanosti. Operacijo sofinancirata Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj. V okviru operacije smo v letu 2020 pridobili pomembno novo raziskovalno infrastrukturo, ki se vključuje v aktivnosti mednarodnega konzorcija EPOS ERIC.

Ključne besede: raziskovalna infrastruktura, RI-SI-EPOS, geoznanosti, krasoslovje, Slovenija.

Keywords: research infrastructure, RI-SI-EPOS, geosciences, karstology, Slovenia.

Uvod

Julija 2019 je ZRC SAZU kot vodilni partner z MIZŠ podpisal pogodbo (št. C3330-19-952056) za izvajanje projekta »RAZVOJ RAZISKOVALNE INFRASTRUKTURE ZA MEDNARODNO KONKURENČNOST SLOVENSKEGA RRI PROSTORA – RI-SI-EPOS« (<https://izrk.zrc-sazu.si/sl/programi-in-projekti/ri-si-epos#v>). Partnerji v projektu, ki se bo zaključil avgusta 2021, so poleg ZRC SAZU tudi GeoZS, UL FGG in IJS. Operacija je uvrščena v Načrt razvojnih programov (NRP) št. 3330-19-1142. Delež prispevka EU je 80%.

Ker so novembra 2018 partnerske države v ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures, <https://www.esfri.eu/esfri-roadmap>) raziskovalni infrastrukturi (RI) EPOS (www.epos-eu.org) ustanovile EPOS ERIC, in ker na slovenskem nacionalnem nivoju konzorcij partnerjev EPOS-SI obstaja že od 2016, smo se raziskovalne organizacije lahko prijavile na poziv MIZŠ. Med ustanovnimi članicami EPOS ERIC je tudi Slovenija. Partnerji v slovenskem konzorciju EPOS-SI so: ZRC SAZU, ARSO, GeoZS, UL FGG in IJS.

Infrastruktura EPOS - European Plate Observing System (https://www.youtube.com/watch?v=ORbPjESluUg&feature=emb_logo) se je razvila z vizijo ustvarjanja vse-Evropske infrastrukture za znanosti o trdni Zemlji, ki temelji na novih e-znanstvenih konceptih, ki omogočajo virtualni dostop do podatkov in servisov, kot tudi na fizičnem dostopu do povezav in institucij za široke skupnosti uporabnikov. Inovativen potencial EPOS infrastrukture omogoča uporabo multidisciplinarnih podatkov na področju znanosti o trdni Zemlji in uporabo servisov, ki temeljijo na nacionalnih raziskovalnih infrastrukturah, ki so razporejene po celotni Evropi.

* ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasa, Titov trg 2, 6230 Postojna

RI-SI-EPOS je namenjen nabavi in razširitvi raziskovalne opreme na področju geoznanosti, 10% vrednosti RI je namenjeno za zaposlitve (uporaba RI, obdelava podatkov, dostop do baz podatkov itd.). Raziskovalna oprema, ki jo je pridobil ZRC SAZU, je nameščena v Vzhodni kohezijski regiji, ostali partnerji pa imajo RI tudi v Zahodni kohezijski regiji.

Operacijo sofinancirata Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa za izvajanje evropske kohezijske politike 2014-2020 v okviru prednostne osi 1: »Mednarodna konkurenčnost raziskav, inovacij in tehnološkega razvoja v skladu s pametno specializacijo za večjo konkurenčnost in ozelenitev gospodarstva«, prednostne naložbe 1.1 »Krepitev infrastrukture za raziskave in inovacije ter zmogljivosti za razvoj odličnosti na tem področju, pa tudi spodbujanje pristojnih centrov, zlasti takšnih, ki so evropskega pomena«, specifičnega cilja 1.1.1 »Učinkovita uporaba raziskovalne infrastrukture ter razvoj znanja/kompetenc za boljše nacionalno in mednarodno sodelovanje v trikotniku znanja«.

Raziskovalna infrastruktura RI-SI-EPOS na področju krasoslovja

Vsa raziskovalna infrastruktura iz RI-SI-EPOS, ki jo upravlja ZRC SAZU se nahaja v Vzhodni kohezijski regiji in je v prvi meri namenjena za področje krasoslovja.

V okviru RI-SI-EPOS je ZRC SAZU pridobil zmogljivo računalniško-strežniško infrastrukturo za potrebe projekta, in sicer za vzpostavitev središča RI-SI-EPOS (povezava med koordinatjem, partnerji in uporabniki opreme ter podatkov) ter za vozlišče določenih raziskovalnih podatkov pridobljenih iz opreme RI-SI-EPOS.

Za potrebe geomorfoloških in geoloških raziskav smo pridobili dron - brezpilotno letalo in programski paket za obdelavo podatkov. Pet sodelavcev IZRK ZRC SAZU je opravilo tudi tečaj pilotiranja in pridobilo izpit. Dron se je že izkazal zelo uporaben tudi za izdelavo natančnega modela reliefa, spremljanje hidroloških razmer na kraških poljih in izviri ter kot izredno sredstvo za fotodokumentacijo.

3D terestični laserski skener (Slika 1) za notranje in zunanje skeniranje – Riegl VZ 2000i je velika pridobitev za skeniranje kraških jam kot tudi površja, saj ima doseg meritev 2-2,5 km. Škocjanske jame so že bile skenirane s pomočjo angleških kolegov (Walter in Zupan Hajna 2020). To skeniranje je pokazalo, da je Martelova dvorana v Škocjanskih jamah enajsta največja jamska dvorana na svetu (2,55 milijona kubičnih metrov). Nov 3D terestični laserski skener smo že uspešno uporabili za spremljanje kriogenih procesov v kraški depresiji na pobočju Snežnika, za spremljanje rasti ledu v Snežni jami na Raduhi, za skeniranje kraških jam in kraškega površja.

Gravimeter Scintrex CG-6 je nameščen v kletnih prostorih IZRK ZRC SAZU v Postojni. V preteklih letih je bil podoben inštrument uporabljen za analize nihanja podzemnih kraških voda na območju Škocjanskih jam, kjer so ugotovili površinske deformacije povzročene s poplavnimi dogodki v podzemnih kraških kanalih (Braitenberg in drugi, 2019).

GNSS sprejemnik Leica GS18T (Slika 2) za določanje koordinat in nadmorskih višin je potreben za natančno določanje kraških objektov (npr. vhodov v jamo, kraških izvirov, ponorov itd.).



Slika 1 – Lasersko skeniranje Postojne z okolico (Sovič in Nanos v ozadju) iz koč Mladike na Pečni rebri nad Postojno, februar 2020, foto S. Šebela.



Slika 2 – Geodetska točka na ploščadi pred Postojnsko jamo, foto S. Šebela.

Že obstoječe lokacije tenziometrov TM 71 za merjenje mikro-premikov v kraških jamah so bile v okviru RI-SI-EPOS posodobljene s petimi novjšimi tenziometri TM 72, ki omogočajo avtomatske meritve in shranjevanje podatkov. Štirje instrumenti TM 72 so od marca 2020 nameščeni v Postojnski jami na dveh dinarsko usmerjenih prelomnih conah, en tenziometer TM 72 pa je nameščen v Kostanjeviški jami (Slika 3). Meritve se opravljajo enkrat dnevno.



Slika 3 – tenziometer TM 72 za merjenje mikro-premikov v Kostanjeviški jami, foto S. Šebela.

V Postojnski jami smo v letu 2020 namestili tudi spektrometer Opsis (nabavljen preko Industrie Automation Graz), za merjenje koncentracij metana v zraku. Gre za prve meritve metana v kraški jami v Sloveniji. Geokemija ogljikovega dioksida in metana se prepletata v ogljikovem ciklu. Naravna ventilacija v kraških jamah je lahko pomemben ponor atmosferskega metana, kar je bilo dokazano v nekaterih raziskavah (Webster in drugi, 2018; Matthey in drugi, 2013).

V sodelovanju z ARSO Urad za seizmologijo smo v letu 2020 na ozemlju med Postojno, Jelšanami in gradom Snežnik v okviru RI-SI-EPOS namestili 6 prenosnih seizmoloških opazovalnic proizvajalca Kinometrics (Pasadena, California, USA). Namen raziskave je določitev potresno aktivnih tektonskih struktur z analizo šibke seizmičnosti v Pivški kotlini in v okolici Snežnika (1796 m). Beleženje šibkih potresov dosežemo z zgostitvijo mreže potresnih opazovalnic, kar je tudi eden od ciljev RI-SI-EPOS (Blatnik in drugi, 2020; Šebela in drugi, 2020a in 2020b). Seizmološki podatki, ki jih beležijo prenosne seizmološke opazovalnice, se zbirajo na ARSO in na IZRK ZRC SAZU.

V Postojnski jami se sicer že od 2010 izvajajo seizmološke meritve (Živčič in drugi, 2014) v umetnem tunelu v Tartarusu. Vzpostavitev mreže prenosnih seizmoloških postaj južno od Postojne je pomembna za določitev aktivnih tektonskih struktur v Pivški kotlini in na območju Snežnika.

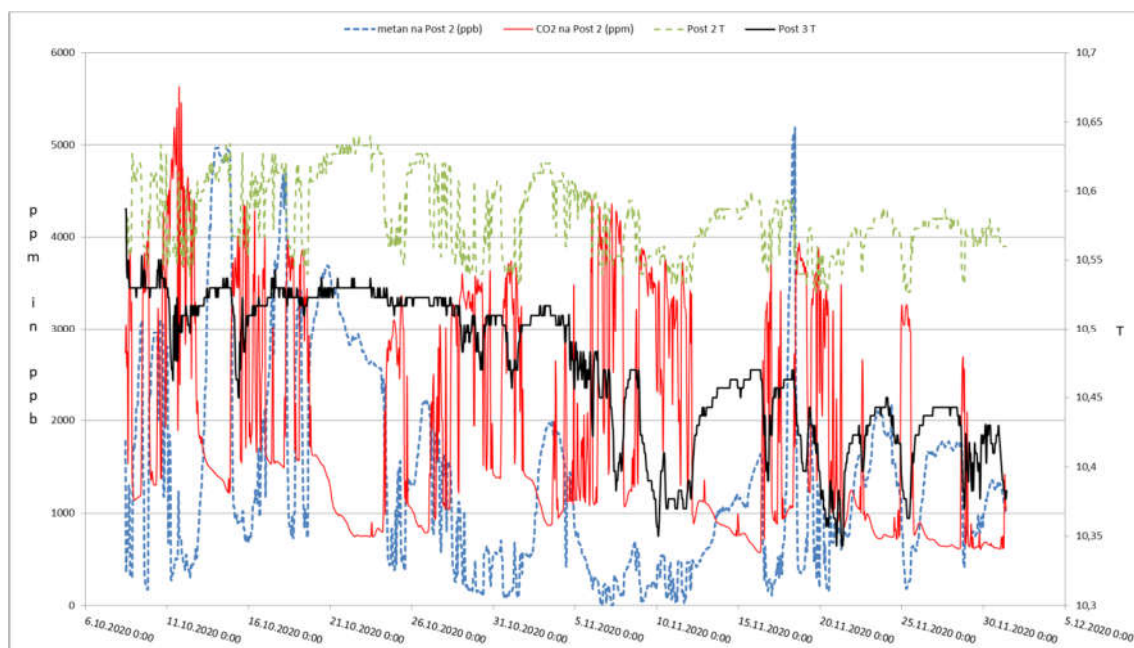
Hkrati je bila na že obstoječo lokacijo ARSO v državni mreži potresnih opazovalnic v Bojancih (Bela krajina) nameščena širokopasovna seizmološka postaja (Nanometrics, Kanada) kupljena v okviru RI-SI-EPOS. Seizmološki podatki z oznako BOJS se pošiljajo v mednarodno bazo podatkov ORFEUS od 3.9.2020 (<https://www.orfeus-eu.org/data/>).

Preliminarni rezultati meritev metana v Postojnski jami

V Postojnski jami v okviru rednega mikro klimatskega monitoring že od leta 2009 merimo temperaturo zraka, ogljikov dioksid, vlago, hitrost in smer ventilacije na več lokacijah v turističnem in neturističnem delu jame.

V Lepih jamah, ki je najbolj turistično obiskan rov v Postojnski jami, merimo temperaturo zraka na dveh mestih (Postojna 2 in 3). Lokacija Postojna 3 je tik ob turistični poti, Postojna 2 pa predstavlja stranski delno umetno izkopen rov (Šebela in Turk 2011; Šebela in Turk 2014; Gregorič in drugi, 2014), ki kaže različne mikro klimatske značilnosti od le nekaj metrov oddaljene lokacije Postojna 3.

Poleg temperature zraka na lokaciji Postojna 2 merimo tudi koncentracije CO₂, od sredine leta 2020 pa tudi metan. Slika 4 kaže urne podatke koncentracije metana (v ppb) in CO₂ (v ppm) ter temperature zraka za obdobje od 8.10.2020 do 1.12.2020. V obdobju zimske ventilacije ($T_{out} < T_{cave}$), ko zunanji hladnejši zrak prodira v jamo in ohlaja tudi zrak v Lepih jamah, se vidi kot nižanje temperature na Postojna 3. Medtem ko na Postojna 2 temperatura ne pada tako izrazito kot na Postojna 3. Koncentracije CO₂ so visoke, dne 11.10.2020 ob 21:00 je bila najvišja vrednost 5600 ppm (Slika 4). V oktobru 2020 je bilo v Postojnski jami zelo malo obiskovalcev. Od 26.10.2020 pa je jama zaprta zaradi pandemije covid-19. Na koncentracije CO₂ v tem obdobju obiskovalci torej ne morejo vplivati in gre za naravne vrednosti. Koncentracije metana v zraku na lokaciji Postojna 2 dosežejo najvišjo vrednost 5100 ppb dne 18.11.2020 ob 11:00. Razmerje med metanom in CO₂ kaže šibko negativno korelacijo.



Slika 4 – Meritve urnih vrednosti metana (ppb), CO₂ (ppm) in temperature zraka na lokacijah Postojna 2 in 3 za obdobje od 8.10.2020 do 1.12.2020.

Za razumevanje vzrokov sprememb koncentracije metana in virov metana v zraku Postojnske jame so potrebne dolgotrajnejše meritve z upoštevanjem jamske ventilacije v Lepih jamah.

Zaključek

V okviru projekta »RAZVOJ RAZISKOVALNE INFRASTRUKTURE ZA MEDNARODNO KONKURENČNOST SLOVENSKEGA RRI PROSTORA – RI-SI-EPOS« smo v letu 2020 na IZRK ZRC SAZU pridobili pomembno novo raziskovalno infrastrukturo (RI): zmogljivo računalniško-strežniško opremo, brezpilotno letalo, 3D terestični laserski skener za notranje in zunanje skeniranje, gravimeter, GNSS sprejemnik, pet tenziometrov TM 72 za merjenje mikro-premikov, spektrometer za merjenje koncentracij metana v zraku, 6 prenosnih seizmoloških opazovalnic in širokopasovno seizmološko opazovalnico. Gre za raziskovalno opremo na področju geoznanosti, ki se vključuje v aktivnosti mednarodnega konzorcija EPOS ERIC. Doprinos nove RI za znanost predstavlja uporabo najsodobnejše opreme na področju aktivnih tektonskih struktur, pridobivanje baz podatkov iz področja geologije, geodezije, seizmologije ter sodelovanje 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

- Blatnik, M., Culver, D. C., Gabrovšek, F., Knez, M., Kogovšek, B., Kogovšek, J., Liu, Hong, Mayaud, C., Mihevc, A., Mulec, J., Aljančič, M., Otoničar, B., Petrič, M., Pipan, T., Prelovšek, M., Ravbar, N., Shaw, T. R., Slabe, T., Šebela, S., Zupan Hajna, N., 2020. Karstology in the classical karst, (Advances in karst science). Cham: Springer, XII, 222 pp., doi: [10.1007/978-3-030-26827-5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26827-5).
- Braitenberg, C., Pivetta, T., Barbolla, D. F., Gabrovšek, F., Devoti, R. in Nagy, I. 2019. Terrain uplift due to natural hydrologic overpressure in karstic conduits. Scientific reports, 9, 3934, 1-10, <https://www.nature.com/articles/s41598-019-38814-1>, doi: [10.1038/s41598-019-38814-1](https://doi.org/10.1038/s41598-019-38814-1).
- Gregorič, A., Vaupotič, J. in Šebela, S. 2014. The role of cave ventilation in governing cave air temperature and radon levels (Postojna Cave, Slovenia). International Journal of Climatology, 34, 1488–1500. DOI: 10.1002/joc.3778
<https://izrk.zrc-sazu.si/sl/programi-in-projekti/ri-si-epos#v> (4.12.2020)
<https://www.orfeus-eu.org/data/> (4.12.2020)
https://www.youtube.com/watch?v=ORbPJESluUg&feature=emb_logo (4.12.2020)
- Mattey, D.P., Fischer, R., Atkinson, T.C., Latin, J.-P., Ainsworth, M., Lowry, D. in Fairchild, L.J. 2013. Methane in underground air in Gibraltar karst. Earth and Planetary Science Letters, 374, 71-80. Doi: 10.1016/j.epsl.2013.05.011
- Šebela, S. in Turk, J., 2011. Local characteristics of Postojna Cave climate, air temperature, and pressure monitoring. Theoretical and Applied Climatology, 105, 371–386. DOI: [10.1007/s00704-011-0397-9](https://doi.org/10.1007/s00704-011-0397-9)
- Šebela, S. in Turk, J. 2014. Natural and anthropogenic influences on the year-round temperature dynamics of air and water in Postojna show cave, Slovenia. Tourism management, 40, 233-243, doi: [10.1016/j.tourman.2013.06.011](https://doi.org/10.1016/j.tourman.2013.06.011).
- Šebela, S., Costa, G., Vaupotič, J., Živčič, M., Viršek Ravbar, N. in Năpăruș-Aljančič, M. 2020a. Postojna Cave as Near Fault Observatory site in SW Slovenia. EGU2020-4657, EGU General Assembly 2020, Abstract 1-2 pp. [egu2020-4657-print.pdf](https://www.egu.eu/abstracts/2020/abstracts/4657-print.pdf)
- Šebela, S., Tasič, I., Živčič, M., Mali, M., Krebelj, M., Čeligoj, J., Pančur, L., Pahor, J., Čarman, M., Zupančič, P. in Gosar, A. 2020b. Mreža prenosnih potresnih opazovalnic južno od Postojne - "RI-SI-EPOS". [Postojna: ZRC SAZU, Inštitut za raziskovanje krasa]. https://izrk.zrc-sazu.si/sites/default/files/prenosne_potresne_opazovalnice_a3_format.pdf

- Živčič, M., Costa, G., Suhadolc, P. in Šebela, S. 2014. Temporary seismological measurements in Postojna cave system. *Acta carsologica*, 43, 1, 149-157, <http://ojs.zrc-sazu.si/carsologica/article/view/569/713>, doi: [10.3986/ac.v43i1.569](https://doi.org/10.3986/ac.v43i1.569).
- Walters, R. in Zupan Hajna, N. 2020. 3D laser scanning of the natural caves: example of Škocjanske Jame. *Geodetski vestnik*, 64, 1, 89-103, http://www.geodetski-vestnik.com/64/1/gv64-1_walters.pdf, doi: 10.15292/geodetski-vestnik.2020.01.89-103.
- Webster, K.D., Drobniak, A., Etiope, G., Mastalerz, M., Sauer, P.E. in Schimmelmann, A. 2018. Subterranean karst environments as a global sink for atmospheric methane. *Earth and Planetary Science Letters*, 485, 9-18, doi: 10.1016/j.epsl.2017.12.025

Izračun masnih bilanc ledenikov v času prosto dostopnih satelitskih podatkov

Mihaela Triglav Čekada¹

Povzetek

Srednje ločljivi prosto dostopni satelitski podatki, kot so Sentinel-2, Landsat-8 in Sentinel-1, omogočajo samodejno prepoznavanje površin ledenikov v multispektralnem spektru in v radarskih intenzitetah. Če k satelitskim posnetkom dodamo še digitalni model reliefa ter privzamemo enotno gostoto za celoten ledenik, lahko iz sprememb v površinah ledenika izračunamo še masno bilanco ledenika. Ne samo iz površine, tudi na temelju znane nadmorske višine kjer je snežna meja konec talilne dobe, ki jo prav tako lahko izmerimo iz multispektralnih ali radarskih satelitskih podatkov, lahko izračunamo masno bilanco. Na primeru zelo majhnih ledenikov, natančneje Triglavskega ledenika in Ledenika pod Skuto, velikega dolinskega ledenika Pastirca v Avstriji ter od vseh teh največjega ledenika Vatnajökull na Islandiji je opisano, na kaj moramo biti pozorni pri obdelavi prosto dostopnih satelitskih posnetkov pri preučevanju ledenikov.

Ključne besede: ledeniki, masna bilanca ledenikov, daljinsko zaznavanje, Sentinel-2, Sentinel-1, Landsat, prosto dostopni satelitski podatki

Key words: glaciers, glacier mass balance, remote sensing, Sentinel-2, Sentinel-1, Landsat, freely accessible satellite data

Uvod

Globalne podnebne spremembe so termin, ki ga skoraj vsakodnevno zasledimo v različnih medijih. Najočitnejši vidni kazalec, kaj podnebne spremembe dejansko pomenijo v regionalnem in globalnem smislu so spremembe na ledenikih. Ti se tanjšajo in manjšajo. Na 2300 ledenikih, kar je le številčno približno 2 % vseh svetovnih ledenikov, najpogosteje, že vse od 19. stoletja naprej, spremljajo dolžinsko umikanje čel ledenikov, kasneje, večinoma sredi 20. stoletja in v veliko manjšem obsegu, so začeli spremljati še spremembe v površinah ledenikov ter na nekaterih ledenikih tudi hitrosti premikanja ledenikov (Zemp et al., 2015). Na svetovni ravni pokrivajo ledeniki skupaj 10 % kopnega (Cuffey in Paterson, 2010; Pfeffer et al., 2014), zato so zelo primerni tudi za preučevanje s pomočjo različnih tehnik daljinskega zaznavanja. Še bolj pomembno kot spremljanje površinskih sprememb, pa je spremljanje sprememb v masah ledenikov. Če bi stalili vso maso, ki je shranjena v ledenikih širom po svetu, bi se morje dvignilo za 66,1 m, pri čemer bi ledeniki na Antarktiki in Grenlandiji prispevali 65,7 m, drugi pa le 0,4 m (Hock et al., 2019). Zato je pri preučevanju ledenikov bolj kot preučevanje njihovih površinskih ali prostorninskih sprememb, pomembno spremljanje sprememb v njihovih masah. V glaciologiji poznamo termin masna bilanca ledenika, ki pove, za koliko se je zmanjšala ali povečala masa določenega ledenika v preučevanem obdobju. Spremembe masne bilance ledenikov so neposredno primerljive med različni ledeniki, saj je ta najpogosteje opisana z višino vodnega stolpca, v katerega bi se stalila masa zapadlega snega ali izhlapela masa različnih plasti na ledeniku v preučevanem obdobju (višina vodnega ekvivalenta). Masno bilanco lahko uporabimo tudi za preučevanje hidrološkega potenciala ledenikov (koliko vode je

¹Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, 1000 Ljubljana in Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana.

uskladiščene v ledeniku) ter tudi za izračun teoretične višine dviga morske gladine, če bi se popolnoma stalil določen delež ledenikov (Benn in Evans, 2010).

Masno bilanco lahko spremljamo na različne načine (Benn in Evans, 2010; Cuffey in Paterson, 2010; Rabatel et al., 2008; Fischer, 2011; Paul et al., 2016; Winsvold et al., 2018; Wouters et al., 2019):

- glaciološko s terenskimi meritvami debeline in gostote v posamezni plasti na ledeniku,
- geodetsko z izmero sprememb v prostornini ledenika in povzemanjem verjetne gostote v tej prostornini,
- hidrološko z merjenjem spreminjanja odtokov izpod ledenika in upoštevanjem hidroloških modelov,
- gravimetrično, kjer s pomočjo satelitskih gravimetričnih meritev posredno merimo spremembe v masi na določenem območju ter
- posredno, kjer s pomočjo optičnih in radarskih satelitskih posnetkov iz katerih lahko merimo obseg ledenikov ali pa nadmorsko višino meje med večnim snegom in razkritim ledenikom ob koncu talilne dobe ter ob upoštevanju modela izračunamo masno bilanco.

Neposredno glaciološko masno bilanco merijo le na 260 ledenikih sveta, kar predstavlja le 0,2 % vseh ledenikov, le na 37 ledenikih merijo glaciološko masno bilanco že dlje kot 40 let (Rabatel et al., 2013). Posredne meritve masne bilance vedno dajo nekoliko drugačne vrednosti kot neposredno glaciološko izmerjena masna bilanca (Zemp et al., 2010; Fischer 2011; Huss 2013). Vendar žal za nazaj lahko merimo masne bilance le posredno, prek sprememb v prostorni, ki jih lahko zaznamo iz arhivskih fotografij ali posnetkov daljinskega zaznavanja. Tako smo tudi za Triglavski ledenik izmerili spremembe v geodetski masni bilanci le na osnovi izmere sprememb v prostorninah ledenika iz arhivskih stereoposnetkov cikličnega aerofotografiranja Slovenije (Triglav Čekada in Zorn, 2020).

V zadnjem desetletju smo z izstrelitvijo srednje ločljivih multispektralnih senzorjev Sentinel-2 in Landsat-8 ter radarskega Sentinel-1 dobili neposreden vpogled v hitre spremembe, ki se dogajajo na ledenikih, saj so podatki teh senzorjev prosto dostopni in imajo tudi visoko časovno ločljivost. Zato bomo v tem članku predstavili predvsem novosti, ki jih je doba prosto dostopnih satelitskih posnetkov prinesla v preučevanje ledenikov.

Masna bilanca ledenika

Na ledenikih ne merimo samo njihovega umikanja, površine in hitrosti premikanja, preučujemo predvsem spremembe v njihovi masni bilanci. Zato moramo najprej vedeti kaj je masna bilanca.

Masna bilanca (enačba 1) je zmnožek spremembe v prostornini ΔV in gostote mase ρ v tej spremenjeni prostornini v preučevanem obdobju (Benn in Evans, 2010; Cuffey in Paterson, 2010; Fischer, 2011). Preučevano obdobje je lahko obdobje več let ali pa eno ledeniško leto (obdobje med dvema zaporednima koncema talilnih dob). Če za izračun masne bilance uporabimo eno ledeniško leto, to masno bilanco imenujemo **neto masna bilanca**. Neto masna bilanca je razlika med zimsko masno bilanco in poletno masno bilanco, kjer prva opisuje, koliko mase je ledenik pridobil v redilni dobi, druga pa, koliko mase je ledenik izgubil v talilni dobi.

$$B = \Delta V \cdot \rho \quad (1)$$

Masno bilanco moramo na večjih ledenikih gledati ločeno po višinskih pasovih, saj je na zgornjem delu ledenika, torej nekje nad snežno mejo, kjer se ledenik večinoma debeli, ta pozitivna, na spodnjem delu, torej pod snežno mejo, pa je negativna. Takšno masno bilanco, ki je opredeljena s površino (A) na kateri jo merimo, imenujemo **specifična masna bilanca** (enačba 2):

$$b_a = B/A = \Delta h \cdot \rho / A \quad (2)$$

Ker je razlika površine enaka zmnožku površine in višine snega/ledu (Δh), nam pri specifični masni bilanci po krajšanju ostane le $b_a = \Delta h \cdot \rho$. Torej bomo pri kakršnikoli posredni metodi izračuna masne bilance iskali način, kako izmeriti le spremembo v debelini določene plasti snega, firna ali ledu na ledeniku.

Obstoj ledenika je zelo odvisen od razmerja med ledom, ki se stali z ledenika in novozapadlim snegom nad snežno mejo, ki se v nekaj letnem oz. nekaj desetletnem obdobju spremeni v nov ledeniški led. Sneg oziroma plasti snežne odeje se vse bolj stiskajo in iz snega se iztisnejo zračni mehurčki. Zato ima novo zapadli sneg gostoto med 50–200 kg/m³, firn, ki opisuje sneg, ki je preživel vsaj eno talilno obdobje, ima gostoto med 400–830 kg/m³, ledeniški led pa 830–917 kg/m³. Večinoma za ledeniški led privzamejo gostoto 850 kg/m³ (Huss, 2013; Zemp et al., 2015) ali 900 kg/m³ (Rabatel et al., 2008; Pfeffer et al., 2014). Da se ledenik ohrani mora v redilni dobi (jesen, zima in pomlad) zapasti dovolj snega, da ta nadomesti ves staljeni sneg, firn in led, ki je izginil v talilni dobi (poletje). Če v redilni dobi pade na ledenik več snega, kot se z njega stali snega, firna in ledu čez talilno dobo, pravimo da ima ledenik pozitivno masno bilanco. Če pa se v talilni dobi stali več snega, firna in ledu kot pa zapade v redilni dobi snega, ima ledenik negativno masno bilanco. Dolgoročno pomeni negativna masna bilanca skorajšnje izginotje ledenika.

Enota, v kateri opisujemo masno bilanco ledenika je višina stolpca odtekle vode, ki ga opišemo z metri vodnega ekvivalenta (angleško zapisana enota: m w.e.), ki je z ledenika odtekel ali izhlapel v preučevanem obdobju. Dobimo jo tako, da enačbo 2 delimo z gostoto vode. Ta enota je neposredno primerljiva z mero za padavine, ki je podana v milimetrih vodnega stolpca, kar ustreza litru padavin na kvadratni meter.

S povprečno specifično masno bilanco opišemo skupni prirastek ali padec mase na ledeniku v daljšem časovnem obdobju, rečemo ji tudi **kumulativna masna bilanca**. Za lažjo primerjavo velikokrat tako dobljeno masno bilanco delimo s številom let med dvema meritvama in na ta način dobimo **letno (neto) specifično masno bilanco**. V tem primeru podamo rezultat v enotah metri vodnega ekvivalenta na leto (m w.e. a⁻¹). Če hočemo ostati pri enotah, ki v osnovi opisujejo spremembe v masi, lahko letno specifično masno bilanco zapišemo tudi v giga tonah na leto (Gt a⁻¹). Slednjo enoto uporabljajo večinoma raziskovalci velikih ledenih plosč ter obsežnejših regijskih ali svetovnih modelov masnih bilanc.

Pojasnimo še povezavo med masno bilanco in višino snežne meje konec talilne dobe ledenika. Snežna meja je nadmorska višina na ledeniku, na kateri sta zimska in poletna masna bilanca enaki. Torej tukaj pade toliko mase v obliki snega pozimi, kot se poleti stali snega, firna in ledu. Letna specifična masna bilanca na tej višini je torej nič. Nad snežno mejo je letna specifična masna bilanca pozitivna, pod njo pa negativna (Cuffey in Paterson, 2010). Snežna meja konec talilne dobe je nadmorska višina, do katere zapade konec talilne dobe prvi sneg na ledeniku in se potem ne stali več. Ker masna bilanca celotnega ledenika ni v ravnovesju, se višina snežna meja med leti premika. Snežno mejo lahko enostavno prepoznamo na satelitskih posnetkih in jo uporabimo za izračun masne bilance ob upoštevanju različnih modelov za njen izračun (Rabatel et al., 2008, 2013; Huss in Farinotti, 2012; Paul et al., 2016; Winsvold et al., 2018).

Masno bilanco lahko izračunamo tudi samo iz sprememb v površini ledenika, če upoštevamo empirično razmerje med prostornino in površina ledenika. Osnovno empirično razmerje prostornina proti površina ledenika sta podala že Chen in Ohmura (1990):

$$V = 28,5 A^{1,357} \quad (3)$$

Kasnejše raziskave (Lambrecht in Kuhn, 2007; Bahr in Radić, 2012) govorijo o istem empiričnem razmerju, a podajajo drugačne vrednosti za številske koeficiente v enačbi 3. To empirično razmerje velikokrat uporabijo za izračun masnih bilanc na osnovi izmerjenih površin ledenikov iz satelitskih posnetkov (Huss in Farinotti, 2012; Pfeffer et al., 2014; Hock et al., 2019).

Za modelski izračun masne bilance velikokrat uporabijo več različnih modelov hkrati. Na primer Huss in Farinotti (2012) sta uporabila tako razmerje prostornina površina, višino snežne meje konec talilne dobe, kot tudi meteorološke podatke.

Pregledovalniki prosto dostopnih optičnih in radarskih satelitskih podatkov

Na spletu najdemo kar nekaj pregledovalnikov prosto dostopnih satelitskih posnetkov. Optične satelitske posnetke Landsat in Sentinel-2 lahko preglejemo v *Landlook* pregledovalniku (<https://landlook.usgs.gov/landlook/>), samo Sentinel-2 v *Sentinel2look* pregledovalniku (<https://landlook.usgs.gov/sentinel2/viewer.html>), različne radarske in optične satelitske posnetke v *Earth Explorer*-ju (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) ter posnetke Landsat, Sentinel-2, MODIS in radarske Sentinel-1 v *Sentinel HUB* pregledovalniku (www.sentinel-hub.com), ki ga je razvilo slovensko podjetje Sinergize d.o.o. *Sentinel HUB* ima na voljo dva pregledovalnika: *Sentinel Playground* in *EO Browser*. Že prvi nam omogoča, da hitro pregledujemo različne satelitske posnetke ter samodejno izdelane indekse, s pomočjo katerih si lahko pomagamo pri prepoznavanju vegetacije (normaliziran diferencialni vegetacijski indeks – NDVI), vlage v zemlji (indeks vlažnosti) ter območij pokritih s snegom (normaliziran diferencialni indeks snega – NDSI). V nadaljevanju članka predstavljene preglede satelitskih posnetkov, smo izdelali s pomočjo orodja *Sentinel Playground*.

Optično daljinsko zaznavanje

Multispektralne optične senzorje daljinskega zaznavanja že zelo dolgo uporabljajo za preučevanje ledenikov, saj so prvega Landsata izstrelili leta 1972. Prvi Landsati so imeli prostorsko ločljivost 60 m × 80 m, z Landsatom-4 se je ta izboljšala na 30 m, najnovejša Landsat-7 (izstreljen aprila 1999) in Landsat-8 (izstreljen februarja 2013) pa imata že prostorsko ločljivost 15 m (Oštir, 2006; Paul et al., 2016). Landsatovi satelitski posnetki so postali prosto dostopni leta 2008 (Wulder et al., 2012; Zhu et al., 2019). S tem se je njihova uporaba zelo povečala. Tako so pred oktobrom 2008, ko so bili posnetki še plačljivi, uporabniki prenesli največ 3000 posnetkov na mesec, v letu 2011 pa že okoli 258.000 posnetkov na mesec (Wulder et al., 2012). V juniju 2015 se je Landsatom pridružil še prvi Kopernikov multispektralni satelitski senzor, prav tako prosto dostopni Sentinel-2A s prostorsko ločljivostjo 10 m. Drugega Sentinel-2B pa so utirili v orbito februarja 2017 (Veljanovski et al., 2014; Copernicus, 2020).

Prosta dostopnost Landsatovih podatkov je omogočila tudi zelo hitro izdelavo novega svetovnega seznama ledenikov imenovanega Randolphov ledeniški seznam (Randolph Glacier Inventory – RGI) (Pfeffer et al., 2014). V njem so predstavili površine vseh

ledenikov in ledenih plošč sveta, kot so bile vidne predvsem na Landsatovih posnetkih iz obdobja 1999–2010. Osnovni vir so bili podatki satelitov Landsat-5 in -7, ponekod so si pomagali še z multispektralnimi posnetki satelitov Aster, Ikonos in Spot 5. Ugotovili so, da je v prvem desetletju enaindvajsetega stoletja nekaj manj kot 200.000 ledenikov pokrivalo površino 726.800 km² s 5 % napako površine. Večino ledenikov so zajeli samodejno ali polsamodejno, pri čemer so uporabili normaliziran diferencialni indeks snega (ang. NDSI), o njem več v nadaljevanju. Na začetku so zajemali samo ledenike, večje od 0,01 km². Paul et al. (2013) so izvedli oceno točnosti izmerjenih površin s primerjavo rezultatov samodejne določitve obodov ledenikov in klasične fotointerpretacije iz istih virov. Ugotovili so, da lahko pri samodejni določitvi ledenikov, ki niso zasuti z gruščem ali so v senci, pričakujemo okoli 5 % napako površine ledenika. Ta napaka opisuje večinoma podcenjeno površino, saj samodejni postopki obdelave največkrat dajo podcenjene površine ledenikov, ker mešanih slikovnih elementov večina algoritmov ne klasificira v osnovi razred. Večje napake površine, tudi do 30 %, pa so zaznali pri samodejnem zajemu površin ledenikov, ki so pokriti z gruščem ali zakriti z močnimi sencami gora (primer močno zagruščenega ledenika je največji avstrijski ledenik Pastirca v Visokih Turah na sliki 1). Burns in Nolin (2014) sta prav tako odkrila za nezagruščene in lepo vidne ledenike, da iz surovih Landsatovih posnetkov izmerita do 5 % manjše površine, kot če sta uporabila izboljšane Landsatove posnetke, kjer sta upoštevala še atmosferske popravke. Ne smemo pozabiti tudi na pravilno zakrivanje oblačnih delov posnetkov oz. delov posnetkov, ki so v močnih sencah, saj samodejni postopki neodstranjene oblake zelo hitro uvrstijo med s snegom pokrite ledenike, v močnih sencah pa velikokrat tudi napačno prepoznajo površine ledenikov (Selkowitz in Forster, 2016).

V Randolphovem ledeniškem seznamu so ledenike osrednje Evrope najprej izmerili iz Landsatovih posnetkov iz leta 2003 (RGI verzija 6; RGI Consortium, 2017). Kasneje so dodali obode nekaterih manjših ledenikov, med katerimi sta tudi Triglavski in Ledenik pod Skuto, ter popravili obode ledenikov Francije in Italije na stanje iz let 2005–2012 (RGI verzija 6). Pri zajemu in za izračun višinske razporeditve evropskih ledenikov so uporabili prevzorčeni digitalni model reliefa (DMR) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) z velikostjo celice 60 m × 60 m in zapolnjenimi vrzelmi (RGI Consortium, 2017). Evropski ledeniki, ki so jih izmerili za srednje leto 2003 (RGI verzija 1), so pokrivali 2060 km² (Pfeffer et al., 2014). Slabih trideset let prej, leta 1975, je njihova površina merila za slabo tretjino več oz. 2909 km² (Huss in Farinotti, 2012; Bach et al., 2018). Med letom 2003 in 2017 so evropski ledeniki izgubili še dodatnih 223 km² (Zekollari et al., 2019). Če ostanemo v Evropi, omenimo še, da so raziskovalci na osnovi Landsat-posnetkov preučevali še podroben razvoj posameznih večjih ledenikov v daljšem časovnem obdobju: kot sta na primer ledenika Marmolada in Mer de Glace v Franciji med leti 1984–2013 (Nistor, 2014) ter ledeniki v Visokih Turah v Avstriji med 1969–2013 (Robson et al., 2016).

Površine ledenikov iz Randolphovega ledeniškega seznama so skupaj z DMR uporabili še za izračun višinske razporejenosti ledenikov ter za izračun sprememb v masnih bilanci (Pfeffer et al., 2014). Ugotovili so, da se površinsko večina svetovnih ledenikov nahaja na nadmorskih višinah pod 2000 m, pri čemer prednjačijo ledeniki Antarktike in Zahodne Kanade ter ZDA. Na višjih nadmorskih višinah med 4000 m in 6000 m pa je površinsko največ ledenikov v Aziji (Himalaja in njena okolica).

Predobdelava optičnih satelitskih posnetkov

V raziskavah, kjer preučujejo večja gorovja ali celoten svet, pa seveda celotne obdelave satelitskih posnetkov ne delajo sami. Največkrat raziskovalci uporabljajo že prav tako prosto dostopne ortorektificirane izdelke. Vendar se moramo pri uporabi ortorektificiranih

Landsatovih in Sentinelovih izdelkov zavedati tudi njihovih slabosti. Med njihovo največjo slabost štejemo napake v horizontalnem položaju, zaradi napak v uporabljenem DMR za ortorektifikacijo. Največkrat uporabijo DMR SRTM, ki ima slabo prostorsko ločljivost (90 m ali 30 m), ponekod tudi lokalne napake in je že zastarel, saj je bil posnet leta 2000 (Žagar in Berk, 2009; Huss in Farinotti, 2012; Kääb et al., 2016, Paul et al., 2016; 2017). Za ortorektifikacijo Sentinel-2 sicer uporabljajo DMR PlanetDEM 90, ki v osnovi tudi temelji na SRTM (Kääb et al., 2016). Za ortorektifikacijo novejših Landsatov uporabljajo kombinacijo DMR-jev, ki vključujejo tudi SRTM (Landsat, 2020), za starejše pa so uporabljali različne državne DMR-je s prostorsko ločljivostjo od 30 m do 1 km (Tucker, 2004). Višine v prvi verziji SRTM, ki je imel prostorsko ločljivost 90 m, so na območju Julijskih Alp povprečno odstopale za $\pm 11,9$ m od državnega DMR s prostorsko ločljivostjo 12,5 m, medtem ko so na ravnem terenu povprečno odstopale le za $\pm 1,5$ m. Največja odstopanja so na območju Julijskih Alp merila tudi do 200 metrov (Žagar in Berk, 2009). Največja pričakovana horizontalna odstopanja za Sentinel-2 posnetke si lahko izračunamo s pomočjo enostavne enačbe $d \approx \Delta h/5,4$ iz Kääb et al. (2016), kjer je največje možno horizontalno odstopanje od prave lege d in Δh višinska napaka DMR. Pri Landsatovih posnetkih si pomagamo z enačbo $d \approx \Delta h/7,8$ (Kääb et al., 2016). Iz povprečnega višinskega odstopanja SRTM za Julijske Alpe dobimo največje povprečno horizontalno odstopanje za Sentinel-2 $\pm 2,2$ m, iz največjega odstopanja pa kar ± 37 m. Za Landsat pa dobimo veliko manjše vrednosti. Tudi zastarelost SRTM, predvsem na velikih alpskih dolinskih ledenikih, lahko prinese kar veliko višinsko in posledično horizontalno napako, saj ni redko, da taki ledeniki izgubijo po višini tudi okoli 5 m/leto (Kääb et al., 2016). Horizontalna odstopanja vplivajo na napačno lokacijo samodejno izmerjenega oboda ledenika. Vplivajo tudi na horizontalno in višinsko izmerjeno lokacijo snežne meje, ki jo lahko uporabimo za modelski izračun masne bilance. Ne nazadnje ta napaka posredno vpliva tudi na napako izmerjene hitrosti premikanja ledenikov.

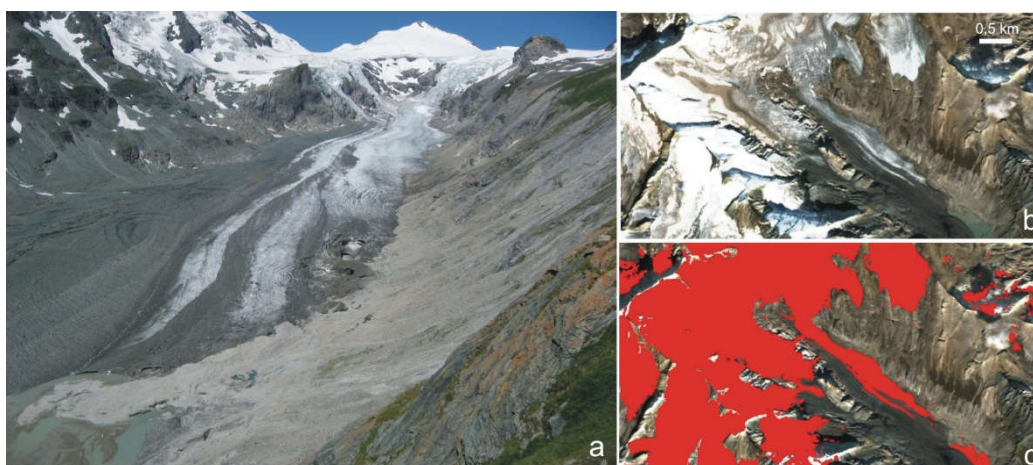
Prosto dostopni ortorektificirani posnetki Landsat in Sentinel-2 so zapisani v UTM projekciji na elipsoidu WGS84 (Paul et al., 2017).

Določanje površine ledenika na optičnih satelitskih posnetkih

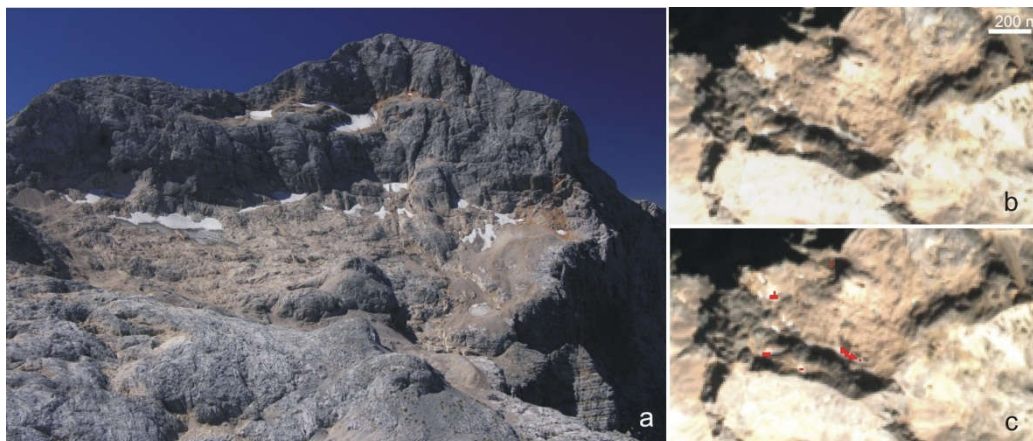
Kmalu po izstrelitvi prvega Landsata so ugotovili, da je sneg zelo slabo odbojen v kratkovalovnih infrardečih valovnih dolžinah (SWIR), v primerjavi z vidnimi in bližnjimi infrardečimi valovnimi dolžinami (VNIR), zato se ga da zelo enostavno prepoznati na satelitskih posnetkih tudi sorazmerno slabe prostorske ločljivosti (Paul et al., 2004; Wulder et al., 2012). To spektralno razliko so uporabili za samodejno klasifikacijo območji, ki jih pokrivajo ledeniki – torej za izmero površin ledenikov. Rezultat te spektralne razlike najlažje vidimo na normaliziranem diferencialnem indeksu snega (NDSI), ki predstavlja razmerje med razliko odboja v rdečem vidnem delu spektra in infrardečem delu spektra ter njuno vsoto. Na sliki 1b je predstavljen NDSI na nam najbližjem dolinskem ledeniku Pastirca v Visokih Turah v Avstriji, ki je samodejno izdelan iz Sentinel-2B posnetkov v *Sentinel HUB*. Opazimo, da je med sneg napačno uvrščeno tudi ledeniško jezero (slika 1c glej spodaj desno), oblaki pa so izločeni (slika 1c glej na desni strani na sredini). Če preverimo NDSI, ki je izdelan še za Triglavski ledenik (slika 2), ugotovimo, da dobimo zelo nezanesljive rezultate – samo nekaj slikovnih elementov velika območja. To je posledica tega, da se NDSI računa s pomočjo spektralnih kanalov, ki imajo ločljivost le 20 m, na slab rezultat pa močno vpliva tudi prisotnost senc, v katerih je ledenik ob koncu talilne dobe. Na sliki 2 vidimo še, da NDSI prepozna samo zasnežen del ledenika, odkritega ledu pa ne. Ne nazadnje je razlika med poledenitvijo okoli Velikega Kleka oz. Großglocknerja (slika 1) in okoli Triglava

(slika 2) ogromna, saj je na prvi predstavljenih okoli 17 km² ledenikov (Robson et al., 2016), na Triglavskih podih skupna vsota snežišč in ledenika ni večja kot 0,02 km².

Celotno površino tako majhnih ledenikov, kot sta Triglavski in Ledenik pod Skuto, lepo pokaže indeks vlažnosti, saj je konec talilne dobe na ledenikih prisotno močno taljenje. Zato smo na slikah 3, 4 in 5 raje prikazali samodejno izdelani indeks vlažnosti kot indeks snega. Na Triglavskem ledeniku in Ledeniku pod Skuto opazimo, da so bolj vlažne vse kotanje, v katerih se najdlje zadržuje sneg, vlažni so tudi oblaki (slika 4: zadnja vrstica 3. 9. 2019 – glej zgoraj desno) ter vegetacija (slika 5 – glej zgoraj desno). Na Triglavskem ledeniku smo prikazali celotno serijo posnetkov 2015–2019, medtem ko za Ledenik pod Skuto ne, saj je zanj zelo težko najti posnetke, na katerih bi se v istem letu videl ledenik tako na Sentinel-2 in Landsat-8 posnetkih ter da ledenik ne bi bil hkrati zakrit s senco ali oblaki.



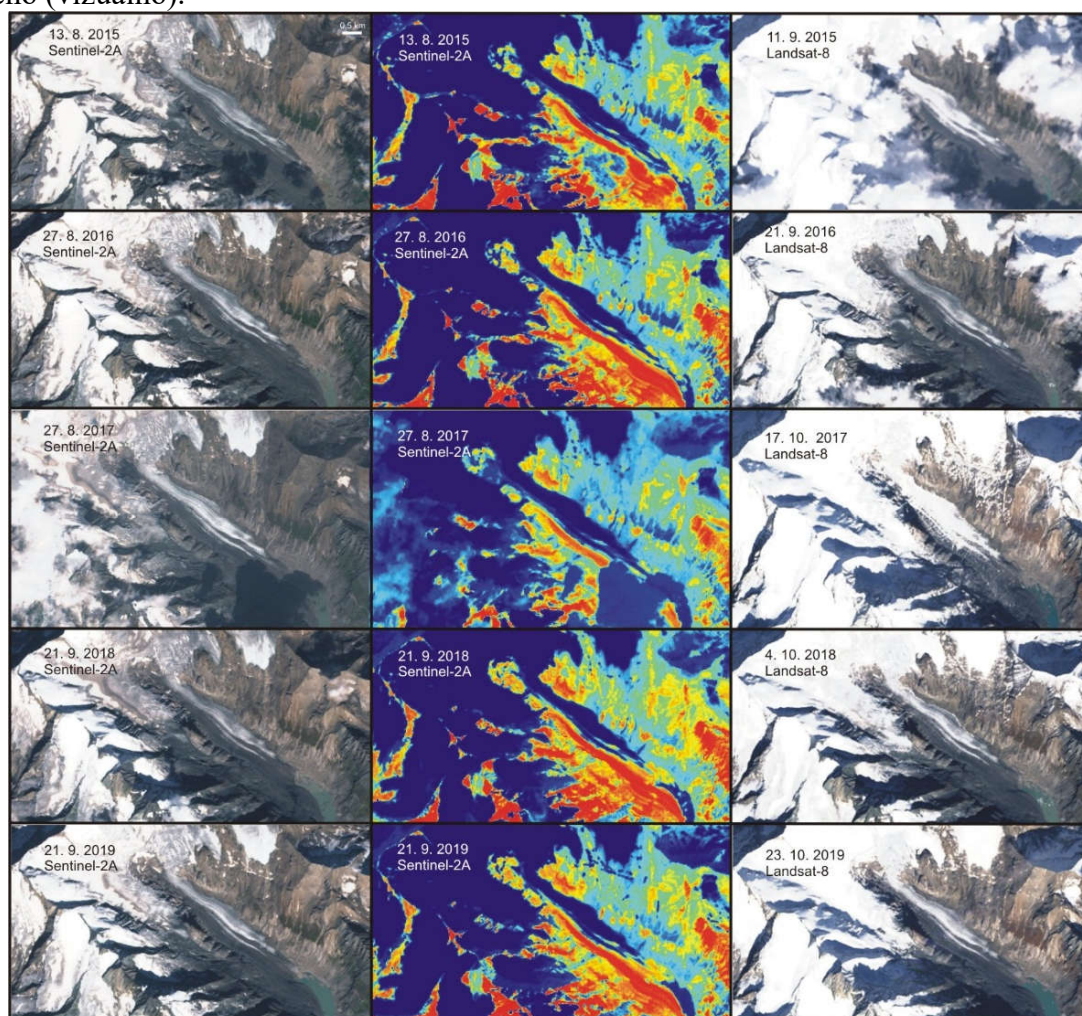
Slika 1: Pastirca v Visokih Turah, Avstrija: a) stanje v naravi 1. 8. 2013 (foto: Mihaela Triglav Čekada) ter 21. 9. 2018 na Sentinel-2B b) prikaz v naravnih barvah in c) normaliziran diferencialni indeks snega (NDSI) za isti satelitski posnetek (vir: Sentinel HUB).



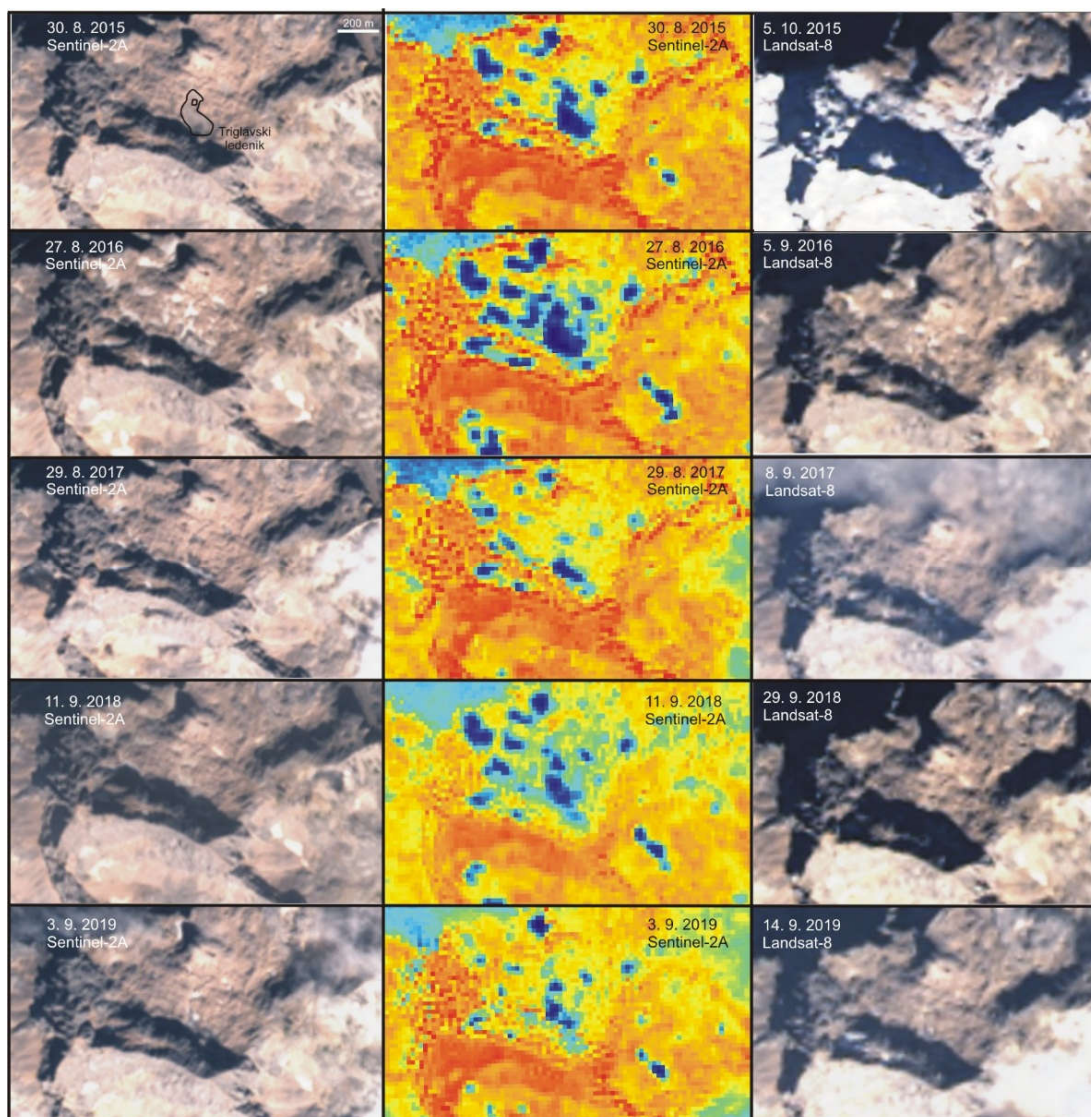
Slika 2: Triglavski podi: a) stanje v naravi konec avgusta 2017 (foto: Miha Pavšek) ter 24. 8. 2017 na Sentinel-2B b) prikaz v naravnih barvah in c) normaliziran diferencialni indeks snega (NDSI) za isti satelitski posnetek (vir: Sentinel HUB).

Indeks vlažnosti pa ni tako zelo uporaben na večjih ledenikih, kot je primer Pastirce na sliki 3, saj prepozna tudi oblake (glej vrstico 27. 8. 2017 – oblaki na levem robu in senca oblaka spodaj desno), vegetacijo in jezera. Če primerjamo slike 1 in 3 za leto 2018, ugotovimo, da ne indeks snega in ne indeks vlažnosti, ne podata pravilnega obsega ledenika, saj ne določita ledenika tam, kjer se ta skriva pod debelo plastjo grušča. Na indeksu vlažnosti debelo plast grušča na Pastirci hitro vidimo kot zelo suho (rdeča barva). Če ne

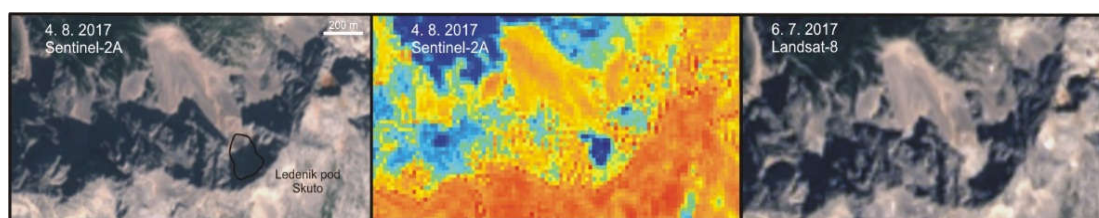
prištejemo k ledeniku zagrúščenega dela, bomo tudi na Pastirci hitro pridobili 30 % napako površine, ki jo omenja Paul et al. (2013) za samodejno satelitsko razpoznavo zagrúščenih ledenikov. Zato se raziskovalci po samodejni identifikaciji zasneženih in zaledenelih površin, lotevajo tudi samodejne razpoznave zagrúščenih ledenikov, kjer poleg multispektralnih posnetkov že pri samodejni klasifikaciji uporabljajo tudi DMR-je (Paul et al., 2004; Bhambri et al., 2011; Alifu, et al., 2015; Robson et al., 2016). Njihove metode večinoma temeljijo na geomorfološkem ločevanju robov med ravnimi površinami ledenika in strmimi pobočji ter odstranjevanju površin, pokritih z vegetacijo. Zagrúšчени ledenik je največkrat od pobočja ločen s strmim robom morene, na njem pa ni vegetacije. Źal samodejni postopki v takih primerih prištejejo k ledenikom tudi kamnite ledenike in plazove. Zato Paul et al. (2013) menijo, da je zajem zagrúščenih ledenikov še vedno najbolj smiselno izvajati ročno (vizualno).



Slika 3: Ledenik Pastirca v Visokih Turah, Avstrija, med leti 2015 in 2019 na multispektralnih satelitskih posnetkih Sentinel-2A levo prikaz v naravnih barvah, v sredini samodejno izračunan indeks vlažnosti iz Sentinel-2A in desno izostren Landsat-8 (pansharpened) posnet približno mesec dni kasneje – po prvem sneženju (vir: Sentinel HUB).



Slika 4: Triglavski ledenik med leti 2015 in 2019 na multispektralnih satelitskih posnetkih Sentinel-2A levo prikaz v naravnih barvah, v sredini samodejno izračunan indeks vlažnosti iz Sentinel-2A in desno izostren Landsat-8 (pansharpened) posnet teden do mesec dni kasneje (vir: Sentinel HUB).



Slika 5: Ledenik pod Skuto na multispektralnem satelitskem posnetku Sentinel-2A iz leta 2017: levo prikaz v naravnih barvah, v sredini samodejno izračunan indeks vlažnosti iz Sentinel-2A in desno izostren Landsat-8 (pansharpened) posnet mesec dni prej (vir: Sentinel HUB).

Največja slabost preučevanja ledenikov s pomočjo optičnih multispektralnih satelitskih senzorjev je, da so ledeniki v visokogorju, kjer se zelo hitro naberejo oblaki, ki preprečujejo zajem objektov pod njimi. Že, če preverimo na *Sentinel HUB*, na koliko satelitskih posnetkih Sentinel-2 med avgustom in oktobrom sta vidna ledenik Pastirica v Avstriji in Triglavski ledenik, hitro ugotovimo, da se ledenika vidita le na polovici posnetkov. Tudi na posnetkih, za katere je zabeleženo, da imajo majhen delež oblačnosti, je skoraj pravilo, da tistih nekaj

odstotkov oblakov pokriva ravno vrhove gora. Če preverimo še Ledenik pod Skuto, hitro ugotovimo, da so ne samo oblaki, temveč tudi močne sence, v katerih so tovrstni krniški ledeniki večino leta in so bistvene za njihovo preživetje, pri čemer močno ovirajo možnost njihove enostavne prepoznave. Prav zato smo na sliki 5 prikazali samo stanje Ledenika pod Skuto iz leta 2017, pa še to iz začetka julija in avgusta, torej na sredi talilne dobe, ko ledenik še ni bil v senci; sneg pretekle zime je v tem letu kmalu skopnel. Kljub temu, da je konec talilne dobe v Alpah večinoma nekje na začetku oktobra in so takrat ledeniki najbolj razkriti in enostavni za določanje njihovega oboda, pa se takrat ledeniki, ki so praviloma na severnih pobočjih, že precej dobro skriti v dolgih sencah. Zato Paul et al. (2017) priporočajo zajem ledenikov iz satelitskih posnetkov, narejenih konec avgusta ali najkasneje do srede septembra, ko ti še niso v dolgih sencah. Zaradi enakih razlogov smo za najlepšo predstavitev Triglavskega ledenika za vseh pet let delovanja Sentinelov-2 izbrali posnetke iz konca avgusta, saj so ti skoraj istočasno brez premočnih senc in oblakov (slika 4). Kot vidimo na Landsatovih posnetkih z dne 5. 10. 2015 in 29. 9. 2018 takrat tudi Triglavski ledenik že zakrivajo močne sence.

Če primerjamo Sentinel-2 in Landsat-8 posnetke na Triglavskem ledeniku (slika 4) in Ledeniku pod Skuto (slika 5), hitro ugotovimo, da so na meji zmogljivosti za fotointerpretacijo tako majhnih ledenikov. Če na Sentinel-2 še razpoznamo sneg in led (prostorska ločljivost 10 m), pa tega ne moremo več z gotovostjo zatrditi za Landsat-8 (ločljivost 15 m).

Določanje snežne meje na optičnih satelitskih posnetkih

Na sliki Pastirce (slika 3) so na desni strani predstavljeni Landsatovi posnetki, ki so narejeni mesec dni po razkritem stanju ledenika, ki je viden na Sentinel-2A. Na njih prepoznamo že prvi jesenski sneg. Zato bi te Landsatove posnetke lahko uporabili tudi za določitev snežne meje v posameznem letu, torej stanja, kjer je letna masna bilanca enaka nič in nam lahko pomaga pri izračunu masne bilance prek modela.

Rabate et al. (2013) so s pomočjo satelitskih posnetkov Landsat, SPOT in Aster ter DMR-jev s prostorsko ločljivostjo 30 m oz. 20 m izmerili, kako se je višina snežne meje spreminjala med letoma 1984 in 2010 na ledenikih Zahodnih Alp v Franciji. Na 43 ledenikih se je snežna meja dvignila za 170 m. Na 145 ledenikih Visokih Tur v Avstriji pa se je snežna meja med 1985 in 2013 dvignila za 92 m, kar so Robson et al. (2016) preučevali s pomočjo Landsatovih posnetkov in lidarskega DMR-ja, ki je imel prostorsko ločljivost 10 m.

Radarski posnetki Sentinel-1

Radarski senzorji daljinskega zaznavanja sodijo med aktivne senzorje, kar pomeni, da lahko snemajo tudi ponoči. Uporabljajo mikrovalovne valovne dolžine, ki lahko prodirajo skozi oblake, meglice in prah. Zato so še posebej koristni za spremljanje ledenikov v visokogorju, ki je velikokrat zakrito z oblaki ter ledenikov na polih, kjer zaradi polarne noči kar polovico leta ne moremo uporabljati optičnih senzorjev. Umetno odprtinski radarji (InSAR), kot je Sentinel-1, sestavijo v en posnetek več zaporednih odbojev, ki jih prejmejo na svoji orbiti in na ta način svojo razmeroma kratko anteno podaljšajo na celotno dolžino poti, na kateri so sestavljali odboje. Pri tem sestavljajo odboje, ki so zaradi Dopplerjevega pojava frekvenčno premaknjeni glede na oddani pulz, saj se v eni točki orbite objektu približujemo, v drugi pa od njega oddaljujemo (Oštir, 2007). Tako pridobljene podatke lahko uporabimo kot sliko intenzitet odbitega valovanja, za obdelavo katerih lahko uporabimo različne postopke samodejne klasifikacije posnetkov, podobne kot za optične satelitske posnetke. Druga možnost uporabe InSAR posnetkov pa je, da sestavimo dva posnetka v

diferencialni interferogram, ki omogoča preučevanje majhnih višinskih razlik (znotraj ene valovne dolžine radarja) ter preučevanje vodnatosti snega (Conde et al., 2018). V tem sestavku se bomo omejili samo na uporabo intenzitet odbitega radarskega valovanja, kjer je koncept obdelave enak kot pri obdelavi optičnih satelitskih posnetkov. Slike intenzitet radarskega odboja lahko opisujejo vrnjeno intenziteto v isti smeri polarizacije, kot je bila oddana z oddajnika, vertikalno-vertikalno (VV) ali v nasprotni smeri, kot je bil polariziran pulz na oddajniku, vertikalno-horizontalno (VH).

Sentinel-1A, ki so ga izstrelili aprila 2014, in Sentinel-1B aprila 2016, delujeta v radarskem C-pasu s srednjo valovno dolžino 5,5 cm ter frekvenco 5,4 GHz. Oba satelita skupaj imata časovno ločljivost 6 dni (Conde et al., 2019; Copernicus, 2020). Nekateri izdelki radarskih Sentinelov-1, ki kažejo različne posnetke intenzitet odbitega valovanja, so prosto na razpolago tudi na *Sentinel HUB*. Med njimi so tudi posnetki intenzitet v polarizacijah VV in VH ter njune ortorektificirane izpeljanke, ki imajo ločljivost $5\text{ m} \times 20\text{ m}$. Za preučevanje snega na osnovi Sentinel-1 je še posebej primerna VV-polarizacija (Nagler et al., 2016; Lievens et al., 2019).

Določanje snežne meje na radarskih posnetkih

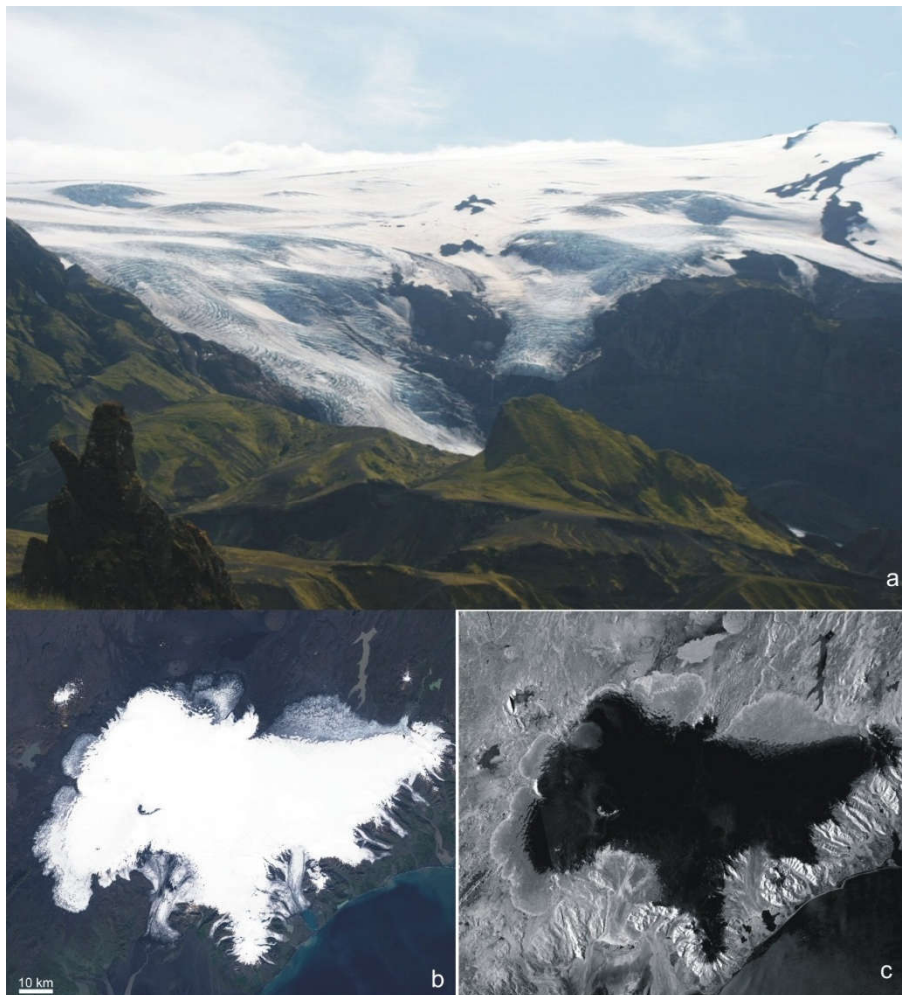
Preučevanje časovnih vrst intenzitet radarskih posnetkov omogoča analiziranje obsega ledu, snega, preučevanje deleža zraka in vode v snegu, saj poleg odboja od površja prikazujejo tudi t. i. prostorninski odboj (ang. volume scattering), to je odboj iz notranjosti snovi (suh sneg, led) oz. objektov (vegetacija), kjer se radarsko valovanje najprej delno odbije od vrhnje plasti (npr. od mejne plasti med zrakom in snegom), delno prodira v objekte ter se na poti odbija in se na koncu še delno odbije nazaj od neke končne mejne plasti (npr. od mejne plasti med snegom in kameninsko podlago) (Lievens et al., 2019). Princip je podoben kot pri lidarskem prodiranju skozi vegetacijo, le da moramo pri radarju upoštevati, da se to dogaja v snegu in tudi v zemlji. Tako radarski valovi iz C-pasu prodirajo do 20 m v suh sneg ter samo 3 cm v moker sneg. Moker sneg večino radarskega valovanja absorbira, suh pa odbije iz notranjosti snega (Nagler et al., 2016). Zato so intenzitete, ki prikazujejo moker sneg temne, intenzitete, v katerih je prikazan suh sneg ali led pa svetle. To dejstvo, da lahko z radarskimi opazovanji ločimo moker sneg od suhega oz. od razkrite zemlje, že od 80. let 20. stoletja naprej uporabljajo za določanje lokacije snežne meje na ledenikih (Winsvold et al., 2018). Višino snežne meje dobijo enako kot pri optičnih posnetkih, torej si pomagajo z DMR.

Na sliki 6 je prikazan ledenik Vatnajökull na Islandiji, ki leži na planoti, visoki med 300 m in več kot 2000 m. Za predstavitev smo si izbrali stanje ledenika ob koncu avgusta 2017, ker takrat ledenik ni bil pokrit z oblaki tudi na optičnem satelitskem posnetku Sentinel-2, kar omogoča najlepšo primerjavo s sliko radarskih intenzitet v VV-polarizaciji. Moker sneg je prikazan na radarskem posnetku v temnih barvah (slika 6c). Če primerjamo Sentinel-2 (slika 6b) in Sentinel-1 (slika 6c) posnetka hitro vidimo, da samo najvišje ležeče dele ledenika prekriva moker sneg, nižje ležečih ledeniških jezikov pa ne. Iz tega lahko sklepamo, da radarski posnetek prikazuje novozapadli moker sneg konec poletja. Meja med mokrim in razkritim ledom je na radarskem posnetku zelo ostra, zato bi lahko že samo z vizualno interpretacijo enostavno določili položaj snežne meje konec talilne dobe na osnovi enega takega radarskega posnetka.

Žal pri posnetkih topografsko razgibanih terenov, kot so Alpe, radarske intenzitete ne dajo tako enostavno prepoznavnih rezultatov, ker vpliva na samo intenziteto odboja še višinska komponenta, ki se s približevanjem in oddaljevanjem satelita k tarči spreminja in povzroča topografske vplive, ki bi jih morali pred samo vizualno interpretacijo odstraniti. Tudi na velikih dolinskih ledenikih, kot je že omenjena Pastirca v Visokih Turah, na

nobenem ortorektificiranem posnetku Sentinel-1 na *SentinelHub* ne boste mogli vizualno določiti položaja ledenika, saj na njih ni odstranjen vpliv topografije.

Različne vrste snega lahko preučujemo le tam, kje ni gozdov ali druge visoke vegetacije, saj radarski valovi prodirajo tudi v vegetacijo. Zato je pred preučevanjem snega najbolj smiselno območja, ki so pokrita z gostim gozdom, odstraniti iz analize (Nagler et al., 2018).



Slika 6: Ledenik Vatnajökull na Islandiji: a) del ledenika v naravi leta 2006 (foto: Blaž Barborič), ter 30. 8. 2017 b) na Sentinel-2A in c) na ortorektificiranem Sentinel-1 v VV-polarizaciji (vir: Sentinel HUB). Na sliki c) temna barva prikazuje moker sneg in vodo.

Radarske posnetke intenzitet lahko uporabimo še za preučevanje različnih območij na ledeniku ter za preučevanje debeline suhega snega. Zaradi različne hrapavosti v valovni dolžini radarja (višinska razlika 0,2 cm v C-pasu predstavlja gladko površino) in različne vsebnosti vode v vrhnji plasti snega ali spodnji plasti ledu lahko na radarskih posnetkih ledenikov ločimo po intenzitetah od najtemnejše do najsvetlejše (Winsvold et al., 2018; Marin et al., 2020): območje na ledeniku, kjer se tali sneg, ki je najtemnejše, moker ali suh led, s suhim snegom pokrit led ter suh sneg in firn, ki sta najsvetlejša. Razmejitev ledenika na ta območja pomaga tudi pri izračunu specifične masne bilance, saj za vsako območje uporabimo svoje predpostavke o gostotah. Ne nazadnje lahko uporabimo različno hrapavost snega tudi za prepoznavo območij, kjer so se sprožili snežnimi plazovi, saj je površina plazu veliko bolj hrapava kot okoliški sneg (Nagler et al., 2018).

S pomočjo preučevanja razmerij v intenzitetah polarizacij VV in VH lahko preučujemo tudi debelino suhega snega. Lievens et al. (2019) so ugotovili, da intenzitete suhega snega v

polarizaciji VH počasi rastejo (postajajo svetlejšje), ko se snežna plast suhega snega debeli, saj je znotraj debelejšje plasti suhega snega več odbojnikov (npr. ledeni kristali), kot znotraj tanjše plasti suhega snega. Intenzitete suhega snega v VV-polarizaciji so sorazmerno enotne (enotno svetle), dokler je sneg suh. Glavni odbojnik pri VV-polarizaciji je plast zrak-sneg, zato odbojniki v notranjosti snežne plasti v tem primeru ne pridejo do izraza. Ko je sneg moker, absorbira radarske valove in dobimo temnejšo intenziteto. Razmerje polarizacij VH/VV je še bolj korelirano z debelino suhega snega kot same intenzitete v VH-polarizaciji. Ta dejstva so Lievens et al. (2019) uporabili za izmero debeline suhega snega na celotni severni polobli. Njihovi rezultati so bili primerljivi s terenskimi meritvami debeline snega.

Sklep

Masna bilanca ledenika ni samo sprememba mase na ledeniku v preučevanem obdobju, pač pa jo lahko izračunamo tudi z uporabo različnih modelov. Pri tem upoštevamo spreminjanje površine ledenikov, spreminjanje višine snežne meje konec talilne dobe ter preučujemo spreminjanje različnih območij na ledeniku (ledenik pokrit s snegom, ledenik pokrit s firnom, ledenik pokrit z gruščem, razgaljen ledenik). V članku smo pokazali, kako lahko s prosto dostopnimi ortorektificiranimi satelitskimi posnetki, kot so optični Sentinel-2, Landsat in radarski Sentinel-1, spremljamo vse te parametre v 2D-prostoru. Višinsko komponento, ki jo potrebujemo za določitev višine, na kateri je določen pojav, pa pridobimo s pomočjo prav tako prosto dostopnih DMR-jev. Zato se danes velikokrat problem preučevanja masne bilance omeji na problem 2D-določitve oboda ledenika ali snežne meje konec talilne dobe.

Na primeru prosto dostopnih posnetkov, predstavljenih v *SentinelHub* smo pokazali, da sta naša dva ledenika, Triglavski ledenik in Ledenik pod Skuto, premajhna, da bi lahko s pomočjo prosto dostopnih samodejno izdelanih izdelkov iz optičnih posnetkov Sentinel-2 in Landsat pridobili kakšne koristne informacije. Premajhna in preveč skrita v razgibani topografiji sta tudi za preučevanje na prosto dostopnih radarskih posnetkih Sentinel-1. Vendar moramo poudariti, da je prosta dostopnost optičnih in radarskih satelitskih posnetkov zdaj tudi nam omogočila, da se lahko ukvarjamo z večjimi tujimi ledeniki ter na njihovi osnovi preučujemo globalne podnebne spremembe, ki vplivajo tudi na nas.

Zahvala

Delo je nastalo v okviru aplikativnega raziskovalnega projekta L2-1826, ki ga sofinancirajo Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, Ministrstvo za obrambo in Geodetska uprava Republike Slovenija.

Literatura

- Alifu, H., Tateishi, R., Johnson, B. (2015). A new band ratio technique for mapping debris-covered glaciers using Landsat imagery and a digital elevation model. *International Journal of Remote Sensing*, 36:8, 2063–2075.
- Bahr, D. B., Radić, V. (2012). Significant contribution to total mass from very small glaciers, *The Cryosphere*, 6.
- Bach, E., Radić, V., Schoof, C. (2018). How sensitive are mountain glaciers to climate change? Insights from a block model. *Journal of Glaciology*, 64(244), 247–258.
- Benn, D.I., Evans, D.J.A. (2010). *Glaciers & glaciation*. Routledge London and New York.
- Burns, P., Nolin, A. (2014). Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, 140, 165–178.

- Bhambri, R., Bolch, T., Chaujar, R.K. (2011). Mapping of debris-covered glaciers in the Garhwal Himalayas using ASTER DEMs and thermal data. *International Journal of Remote Sensing*, 32:23, 8095–8119.
- Chen, J., Ohmura, A. (1990). Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. *Hydrology in Mountainous Regions. I – Hydrological Measurements; the Water Cycle*, IAHS Publ. 193, 127–135.
- Copernicus (2020). http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4
- Cuffey, K.M., Paterson, W.S.B. (2010). *The Physics of Glaciers*. – 4. izdaja, Elsevier.
- Fischer, A. (2011). Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale. *The Cryosphere*, 5.
- Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B., Giesen, R., Hirabayashi, Y., Huss, M., Radić, V., Slangen, A. (2019). GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology*, 65(251), 453–467.
- Huss, M., Farinotti, D. (2012). Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of geophysical research*, 117.
- Huss, M. (2013). Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere*, 7, 877–887.
- Kääb, A., Winsvold, S.H., Altena, B., Nuth, C., Nagler, T., Wuite, J. (2016). Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part I: Radiometric and Geometric Performance, and Application to Ice Velocity. *Remote Sensing*, 8, 598.
- Lambrecht, A., Kuhn, M. (2007). Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. *Annals of Glaciology*, 46, 177–184.
- Landsat (2020). https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-collection-1?qt-science_support_page_related_con=1#qt-science_support_page_related_con
- Lievens, H., Demuzere, M., Marshall, H.-P., Reichle, R. H., Brucker, L., Brangers, I., de Rosnay, P., Dumont, M., Giroto, M., Immerzeel, W. W., Jonas, T., Kim, E. J., Koch, I., Marty, C., Saloranta, T., Schöber, J., and De Lannoy, G. J. M. (2019). Snow depth variability in the Northern Hemisphere mountains observed from space. *Nature Communications*, 10, 4629.
- Marin, C., Bertoldi, G., Premier, V., Callegari, M., Brida, C., Hürkamp, K., Tschiersch, J., Zebisch, M., and Notarnicola, C. (2020): Use of Sentinel-1 radar observations to evaluate snowmelt dynamics in alpine regions, *The Cryosphere*, 14, 935–956.
- Nagler, T., Rott, H., Ripper, E., Bippus, G., Hetzenecker, M. (2016). Advancements for Snowmelt Monitoring by Means of Sentinel-1 SAR. *Remote Sensing*, 8(4), 348.
- Nagler, T., Rott, H., Schwaizer, G., Ossowska, J., Nemec, J., Fasching, U. (2018). Operational monitoring of Alpine snow cover within the european copernicus programe. *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, Avstrija*, 348-352.
- Nistor, M.M. (2014). Using Landsat images and GIS to assess the changes of Mer de Glace and Marmolada glaciers in the last three decades. *Studia ubb geographia*, 1, 65–76.
- Oštir, K. (2006). *Daljinsko zaznavanje*. Založba ZRC.
- Paul, F., Bolch, T., Briggs, K., Kääb, A., McMillan, M., McNabb, R., Nagler, T., Nuth, C., Rastner, P., Strozzi, T., Wuite, J. (2017). Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers_cci project. *Remote Sensing of Environment*, 203, 256–275.
- Paul, F., Winsvold, S.H., Kääb, A., Nagler, T., Schwaizer, G. (2016). Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part II: Mapping Glacier Extents and Surface Facies, and Comparison to Landsat 8. *Remote Sensing*, 8, 575.
- Paul, F., Barrand, N., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., . . . Winsvold, S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 54(63), 171–182.
- Paul, F., Huggel, C., Kääb, A. (2004). Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers. *Remote Sensing of Environment*, 89:4, 510–518.
- Paul, F., Kääb, A., Misch, M., Kellenberger, T., Haeberli, W. (2004). Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophysical Research Letters*, 31.
- Pfeffer, W. T., Arendt, A.A., Bliss, A., et al. (2014). The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *Journal of Glaciology*, 60, 221.
- Rabatel, A., Letréguilly, A., Dedieu, J.-P., Eckert, N. (2013). Changes in glacier equilibrium-line altitude in the western Alps from 1984 to 2010: evaluation by remote sensing and modeling of the morpho-topographic and climate controls, *The Cryosphere*, 7, 1455–1471.
- Rabatel, A., Dedieu, J., Thibert, E., Letréguilly, A., & Vincent, C. (2008). 25 years (1981–2005) of equilibrium-line altitude and mass-balance reconstruction on Glacier Blanc, French Alps, using remote-sensing methods and meteorological data. *Journal of Glaciology*, 54(185), 307–314.

- RGI Consortium, (2017). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. GLIMS Technical Report. Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA.
- Robson, B.A., Hölbling, D., Nuth, C., Strozzi, T., Dahl, S.O. (2016). Decadal Scale Changes in Glacier Area in the Hohe Tauern National Park (Austria) Determined by Object-Based Image Analysis. *Remote Sensing*, 8, 67.
- Selkowitz, D.J., Forster, R.R. (2016). An Automated Approach for Mapping Persistent Ice and Snow Cover over High Latitude Regions. *Remote Sensing*, 8, 16.
- Triglav Čekada, M., Zorn, M. (2020). Spremembe debeline in geodetske masne bilance Triglavskega ledenika v obdobju 1952–2016. *Acta geographica Slovenica*, 60/2, v tisku.
- Tucker, C.J., Grant, D.M., Dykstra, J.D. (2004). NASA's global orthorectified Landsat data set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70, 313–322.
- Veljanovski, T., Švab Lenarčič, A., Oštir, K. (2014). Sateliti Sentinel - vesoljska komponenta Evropskega programa za opazovanje zemlje Copernicus. *Geodetski vestnik*, 58, 3, 583–588.
- Winsvold, S. H., Kääb, A., Nuth, C., Andreassen, L. M., van Pelt, W. J. J., Schellenberger, T. (2018). Using SAR satellite data time series for regional glacier mapping, *The Cryosphere*, 12, 867–890.
- Wouters, B., Gardner, A.S., Moholdt, G. (2019). Global Glacier Mass Loss During the GRACE Satellite Mission (2002-2016). *Frontiers in Earth Science*, 7, 96.
- Wulder, M.A., Masek, J.G., Cohen, W.B., Loveland, T.R., Woodcock, C.E. (2012). Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 122, 2–10.
- Zekollari, H., Huss, M., Farinotti, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble, *The Cryosphere*, 13, 1125–1146.
- Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S., Hoelzle, M., Paul, F., Haeberli, W., Denzinger, F., Ahlstrøm, A. P., Anderson, B., Bajracharya, S., Baroni, C., Braun, L. N., Cáceres, B. E., Casassa, G., Cobos, G., Dávila, L. R., Delgado Granados, H., Demuth, M. N., Espizua, L., Fischer, A., Fujita, K., Gadek, B., Ghazanfar, A., Hagen, J. O., Holmlund, P., Karimi, N., Li, Z., Pelto, M., Pitte, P., Popovnin, V. V., Portocarrero, C. A., Prinz, R., Sangewar, C. V., Severskiy, I., Sigurdsson, O., Soruco, A., Usubaliev, R., Vincent, C. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61–228.
- Zemp, M., Jansson, P., Holmlund, P., Gärtner-Roer, J., Koblet, T., Three, P., Haeberli, W. (2010). Reanalysis of multi-temporal aerial images of Storglaciären, Sweden (1959-99) - Part 2: Comparison of glaciological and volumetric mass balance. *The Cryosphere*, 4, 333–343.
- Zhu, Z., Wulder, M.A., Roy, D.P., Woodcock, C.E., Hansen, M.C., Radeloff, V.C., Healey, S.P., Schaaf, C., Hostert, P., Strobl, P., Pekel, J., Lymburner, L., Pahlevan, N., Scambos, T.A. (2019). Benefits of the free and open Landsat data policy. *Remote Sensing of Environment*, 224, 382–385.
- Žagar, T., Berk, S. (2009). Primerjava podatkov SRTM z DMV Slovenije. V: KUJAR, Miran (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008 : zbornik predavanj. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. 77–86.

Geodetski monitoring cerkve sv. Benedikta v Kančevcih

Tilen Urbančič*, Božo Koler*

Povzetek

Posegi pri obnovi cerkve sv. Benedikta v Kančevcih niso bili narejeni povsem po pravilih stroke. Rezultat predolgo odkopanih temeljev na delu objekta so deformacije na skoraj celotnem objektu, ki se v vizualnem smislu kažejo kot razpoke. V letu 2017 smo začeli z geodetskim monitoringom, ki je del obsežnejših analiz stanja objekta. Za spremljanje deformacij smo uporabili klasično geodetsko izmero, nivelmansko izmero in terestrično lasersko skeniranje. V prispevku predstavljamo izvedbo geodetskih izmer, ugotovljene premike in izračunane deformacije iz podatkov treh terminskih izmer. Ugotovili smo, da se je v dveh letih severovzhodna stena posedla od -1,80 mm (reper 7) do -2,92 mm (reper 10) in da se je ladja cerkve v osrednjem delu razprla za 7 mm.

Ključne besede: monitoring, cerkev, premik, deformacija, nivelman, terestrično lasersko skeniranje

Key words: monitoring, church, displacement, deformation, levelling, terrestrial laser scanning

Uvod

Geodetski monitoring izvajamo zato, da periodično spremljamo nek objekt in tako ugotavljamo velikosti ter smeri premikov ali drugih sprememb geometrije. Najpogosteje gre za spremljanje stabilnosti objektov v času gradnje ali v času obratovanja. Geodetski monitoring izvajamo na zgrajenih objektih in v naravnem okolju. Skupno vsem primerom geodetskega monitoringa je to, da moramo za izvajanje izmer zagotoviti stabilne dane točke izven vplivnega območja premikov, ki predstavljajo datum geodetske mreže (Savšek et al., 2010) izbrati primerno metodo izmere in instrumentarij, ki omogoča zaznavanje pričakovanih premikov. V primeru točkovnega spremljanja premikov je potrebno poskrbeti tudi za primeren način stabilizacije merskih točk. Deformacije, ki so rezultat delovanja sil na objekt, določamo iz obdelave podatkov večkratnih izmer.

Najpogostejše metode izmer za potrebe geodetskega monitoringa so nivelmanska izmera (de Lacy et al., 2017; Sterle et al., 2017), klasična terestrična izmera (Luo et al. 2016; Yu et al., 2017), izmera GNSS (Yu et al., 2020; Šegina et al. 2020) in terestrično lasersko skeniranje (Kregar et al., 2017; Mihevc, Urbančič, 2017; Suchocki, Katzer, 2018). Pri nivelmanski izmeri ugotavljamo samo višinske premike. S klasično terestrično izmero ali izmero GNSS lahko določimo 2D in 3D premike točk. Iz oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja lahko z izračuni razdalj med oblaki ali z izračunom parametrov matematično opisljivih geometrijskih oblik določamo deformacije na večjem območju oz. na površinah objektov.

V obravnavanem primeru smo geodetski monitoring izvedli z uporabo nivelmanske izmere, klasične terestrične izmere in terestričnega laserskega skeniranja. Z nivelmansko izmero smo določili vertikalne premike vgrajenih reperjev. S klasično geodetsko izmero smo vzpostavili koordinatno osnovo za georeferenciranje oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja (TLS), s terestričnim laserskim skeniranjem pa smo določili spremembe geometrije nosilnih in nenosilnih elementov objekta. Obravnavamo podatke treh terminskih izmer v obdobju 15 mesecev.

* UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

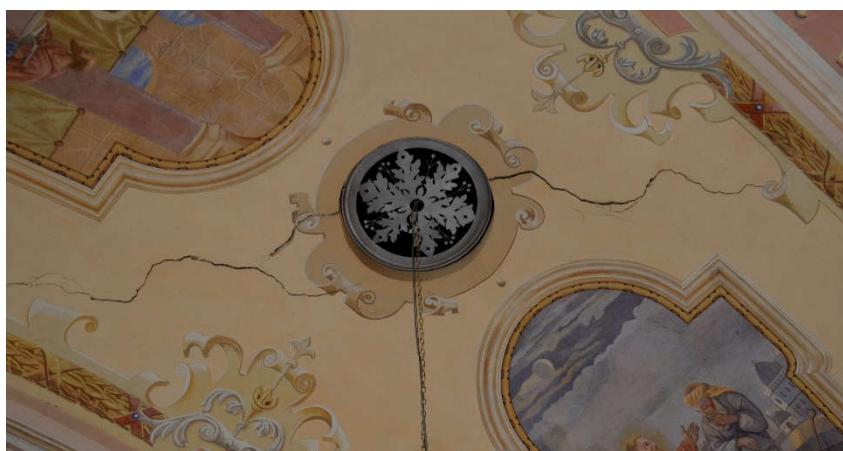
Opis delovišča

Cerkev sv. Benedikta leži v vasi Kančevci v občini Moravske Toplice (Slika 2). Prvi zapisi o cerkvi na tem območju segajo v leto 1208 in sicer kot »benedečka« oz. kančevska cerkev. Cerkev je bila v sedanji obliki zgrajena leta 1896. Zadnja obnovitvena dela so na objektu potekala med letoma 1996 in 2000 (Urbančič et al., 2019). Cerkev je od 4. 6. 2014 vpisana v register kulturne dediščine kot spomenik lokalnega pomena (Register kulturne dediščine, 2020).

V letu 2016 so se na objektu začele pojavljati poškodbe na stopu in zidovih, pretežno v obliki večjih razpok. Najbolj opazne razpoke so na stropu ladje (Slika 3), zunanji severovzhodni steni objekta in na spoju med ladjo ter zvonikom (Slika 2). Strokovnjaki s področja gradbeništva zagovarjajo, da je razlog v podkopavanju temeljev in neustrezni sanaciji. Zaradi čim hitrejšega ukrepanja in preprečitvijo dodatnih poškodb smo bili za spremljanje premikov in drugih deformacij objekta v monitoring vključeni tudi geodeti (Urbančič et al., 2019).



Slika 2: Cerkev sv. Benedikta v Kančevcih (vir: Gorazd Prašnikar).



Slika 3: Razpoke na stropu ladje (vir: Gorazd Prašnikar).

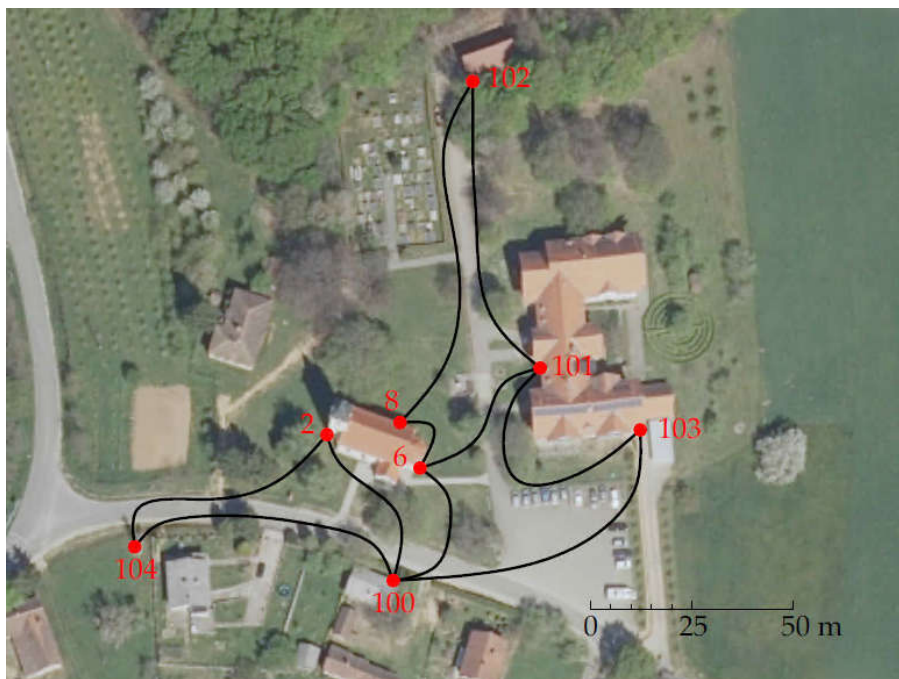
Terenske izmere smo opravili v obdobju 15 mesecev in sicer 20. 11. 2017 (0. izmera), 29. 5. 2018 (1. izmera) in 14. 2. 2019 (2. izmera). V prispevku predstavljamo ugotovljene premike in druge deformacije objekta iz podatkov precizne nivelmanske izmere ter terestričnega laserskega skeniranja, ki smo jih izvedli v vseh treh terminskih izmerah.

Uporabljene metode izmere in instrumentarij

Precizna nivelmanska izmera

Nivelmanska izmera velja za eno najenostavnejši in hkrati najnatančnejših metod geodetske izmere. Uporabljamo jo za določitev vertikalnih premikov. Pri izmeri smo uporabili precizen nivelir Leica DNA03 in komparirane nivelmanske late različnih dolžin (Leica GPCL2, Leica GWCL182 in Leica GWCL92).

Z uporabo nivelirja, ki zagotavlja horizontalno vizuro os, in para nivelmanskih lat, določamo posamezne višinske razlike med stabiliziranimi reperji. Višinsko razliko med dvema reperjema, ki ju povezuje nivelmanska linija, določimo z vsoto višinskih razlik na posameznem stojišču. S povezavo nivelmanskih linij dobimo nivelmansko mrežo. Del nivelmanske mreže, kjer je objekt povezan z reperji, stabiliziranimi na sosednjih objektih (reperji 100 do 104), prikazujemo na Slika 4. Ostale vgrajene reperje na zunanjem delu cerkve in zvonika prikazujemo na Slika 5.



Slika 4: Nivelmanska mreža (vir slikovne podlage: GURS).

Nivelmansko izmero smo izvedli po pravilih precizne nivelmanske izmere. Uporabili smo preizkušen instrument in komparirane nivelmanske late. Nivelirali smo iz sredine. Med izmero smo kakovost meritev nadzorovali s preverjanjem odstopanj pri niveliranju nivelmanskih linij v obeh smereh in odstopanj pri zapiranju nivelmanskih zank. Pri obdelavi merjenih vrednosti smo upoštevali popravka metra in pete late ter temperaturni popravek.

Rezultati posamezne nivelmanske izmere so popravljene merjene višinske razlike in dolžine nivelmanskih linij. Omenjeni podatki predstavljajo vhodne podatke za izravnavo nivelmanske mreže. Za izravnavo smo uporabili program VimWin (Ambrožič in Turk, 2016).



Slika 5: a) Vgrajeni reperji v cerkvi. b) Reper 5.

Prvi del analize rezultatov višinske izravnave je bil namenjen določitvi stabilnih reperjev. Izravnane višine reperjev in njihove natančnosti so vhodni podatek za izračun premikov. Ker smo v posameznih izmerah dosegli izredno visoko natančnost določitve višin reperjev, so zato visoke tudi natančnosti določitve vertikalnih premikov. Ker srednja natančnost razlike višin med 0. in 1. izmero znaša 0,08 mm, 0. in 2. izmero 0,10 mm in 1. in 2. izmero 0,07 mm, je smiselno, da je statistično značilen premik, če je $\Delta H \geq 3 \cdot \sigma_{\Delta H}$, ker je $\Delta H = H_{i+1} - H_i$ in $\sigma_{\Delta H} = \sqrt{\sigma_{H_i}^2 + \sigma_{H_{i+1}}^2}$, indeks i predstavlja številko izmere.

V preglednici 1 so zbrani podatki o izmerjenih višinskih razlikah nivelmanskih linij med reperji, ki so stabilizirani v objekte v okolici cerkve. Povprečna natančnost merjenja višinskih razlik, ki jo ocenimo na osnovi odstopanj obojestransko merjenih višinskih razlik po spodnji enačbi, znaša 0,22 mm (preglednica 2):

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot n_l} \cdot \sum \frac{\Delta_l^2}{s}},$$

kjer so:

n_l ... število nivelmanskih linij,

Δ_l ... odstopanje obojestransko merjenih višinskih razlik v mm,

s ... dolžina nivelmanske linije v km.

Preglednica 1: Razlike merjenih višinskih razlik v posamezni terminski izmeri med reperji, ki so stabilizirani v objekte v okolici cerkve.

Nivelmanska linija		ΔH med terminskimi izmerami [m]			Razlika ΔH med terminskimi izmerami [mm]		
		0.	1.	2.	1 - 0	2 - 0	2 - 1
101	100	-0,08781	-0,08731	-0,08765	0,50	0,16	-0,34
101	103		-2,51983	-2,52004			-0,22
103	100		2,43251	2,43239			-0,12
102	101	2,32440	2,32163	2,33165	-2,77	7,25	10,02
104	100		4,92530	4,92549			0,19

Ker je razlika merjenih višinskih razlik med reperjem 101 in reperji 100 in 103 (preglednica 1) manjša od trikratnika natančnosti merjenja višinskih razlik (0,66 mm), smo za navezavo nivelmanske mreže izbrali reper 101.



a)

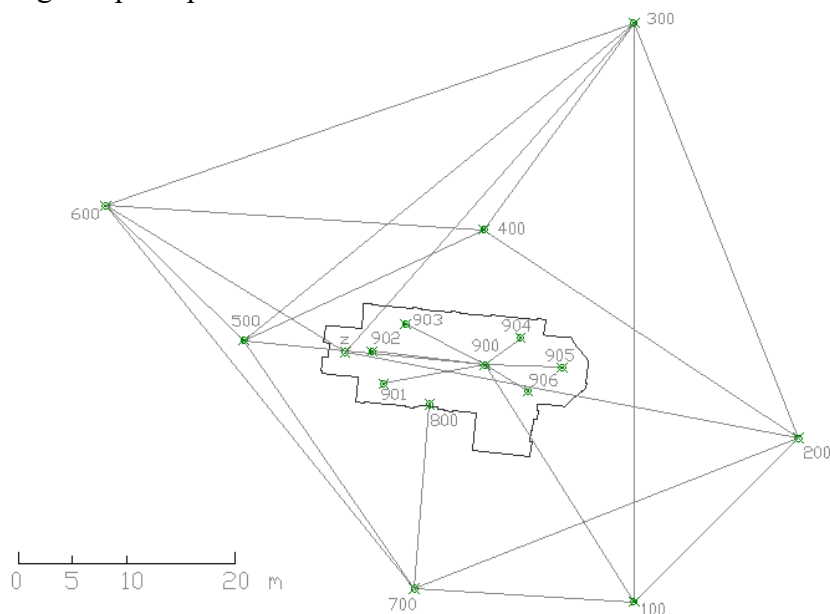


b)

Slika 6: a) Objekt, v katerega je vgrajen reper 101. b) Reper 101.

Geodetska mreža

Rezultate večkratnih izmer v različnih časih lahko po legi v prostoru med seboj primerjamo in analiziramo, kadar so v istem geodetskem datumu (Savšek S. et al., 2010). V primeru izmere s TLS na cerkvi sv. Benedikta, smo geodetski datum zagotovili z vzpostavitvijo lokalne geodetske mikro mreže (slika 6). Pri izmeri smo uporabili tahimeter Leica Nova MS50 in precizne prizme Leica GPH1P. Do vseh vidnih točk geodetske mreže smo na posameznem stojišču izmerili horizontalne smeri, zenitne razdalje in poševne dolžine v obeh krožnih legah v petih ponovitvah.



Slika 7: Geodetska mreža 1. terminske izmere.

Iz reduciranih dolžin in sredin merjenih horizontalnih smeri smo z izravnavo v programu GEM4 (Ambrožič in Turk, 1997) določili horizontalne koordinate točk. Višine smo točkam

določili z izravnavo izračunanih višinskih razlik v programu VimWin (Ambrožič in Turk, 2016).

Ker stabilizirane talne točke geodetske mreže (točke 100 – 700) direktno ne omogočajo signalizacije tako, da bi omogočale njihovo prepoznavo v oblaku točk, smo oslonilne točke za vsako izmero TLS določili tako zunaj kot znotraj cerkve z vključitvijo oslonilnih točk v razširjeno geodetsko mrežo (Slika 7).

Točke 100 – 300 in 700 so stabilizirane v asfaltu, točke 400 – 600 pa na travnati površini. Njihov način in mesto stabilizacije sta zahtevala, da tudi v primeru geodetske mreže najprej določimo stabilne točke. Iz rezultatov proste izravnave točk geodetske mreže smo stabilne točke določili z deformacijsko analizo Hannover, s programom DahWin (Ambrožič in Turk, 1996) in jih uporabili kot dane za končno izravnavo koordinat točk.

Terestrično lasersko skeniranje (TLS)

Poškodbe na obravnavanem objektu so nas vodile v zaključek, da spremljanje položajev posameznih točk na objektu ne omogoča popolnega vpogleda v deformacije objekta. Tudi vgradnja večjega števila 3D merskih točk tega verjetno ne bi omogočala. Celovitejša analiza je mogoča z izmero s terestričnim laserskim skeniranjem, predvsem, ker smo želeli deformacije objekta ugotavljati tako zunaj kot znotraj objekta in ker so nas zanimale spremembe geometrije na večjih površinah objekta. Za skeniranje smo uporabili terestrični laserski skener Riegl VZ-400 (Slika 8).



Slika 8: Terestrični laserski skener VZ-400 (vir: Gorazd Prašnikar).

V posamezni terminski izmeri smo zunanost skenirali s štirih stojišč, notranost pa iz treh stojišč. Lokacije stojišč smo prilagodili površinam, ki smo jih želeli skenirati in oviram v okolici cerkve (drugi objekti in drevesa) in v njej (stebri). Za registracijo oblakov točk smo uporabili Riegllove odsevne valje velikosti 10 cm, ravne odsevne tarče okrogle oblike s premerom 5 cm in okrogle odsevne tarče Leica HDS 6". Leicine tarče smo uporabili tudi za georeferenciranje oblakov točk. Registracijo, georeferenciranje, brisanje odvečnih točk in filtriranje oblakov točk smo naredili v programu RiSCAN Pro. V postopku filtriranja smo oblak točk razredčili z octree filtrom na 5 mm.

Pri analizi geometrije objekta iz oblakov točk, ki smo jo naredili v programu Cyclone 3DR, smo se osredotočili na dva dela objekta. Pri delu je najbolj obremenjena zunanja stena, drugi pa notranjost cerkve. Zunanjo severovzhodno steno sestavlja 5 nosilnih stebrov in med njimi štiri polnila. Pri analizi deformacij polnil smo do glavnih zaključkov prišli z izračunom razdalj med oblaki točk zaporednih terminskih izmer. Notranjost objekta smo v geometrijskem smislu analizirali z izračunom razlik prečnih razdalj med nosilnimi stebri.

Rezultati

Vertikalni premiki

Kakovost izmere smo s primerjavo dejanskih in dovoljenih odstopanj pri niveliranju v dve smeri preverjali med samo izmero. Za dovoljeno odstopanje smo uporabili kriterij $\Delta_{dop} = 2 * \sqrt{d + 0,04 * d^2}$, kjer je d dolžina nivelmanke linije v kilometrih. Oceno natančnosti nivelmanskih izmer smo naredili na osnovi odstopanj obojestransko merjenih višinskih razlik nivelmanskih linij in odstopanj pri zapiranju nivelmanskih zank (preglednica 2):

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot n_z} \cdot \sum \frac{\Delta_z^2}{s}},$$

kjer so:

n_z ... število nivelmanskih linij,

Δ_z ... odstopanje pri zapiranju nivelmanskih zank v mm,

s ... dolžina nivelmanske linije v km.

Referenčni standardni odklon po izravnavi $\hat{\sigma}_0$ in natančnost določitve višin reperjev σ_H v posamezni izmeri prav tako predstavljamo v Preglednica .

Preglednica 2: Ocena natančnosti nivelmanske izmere.

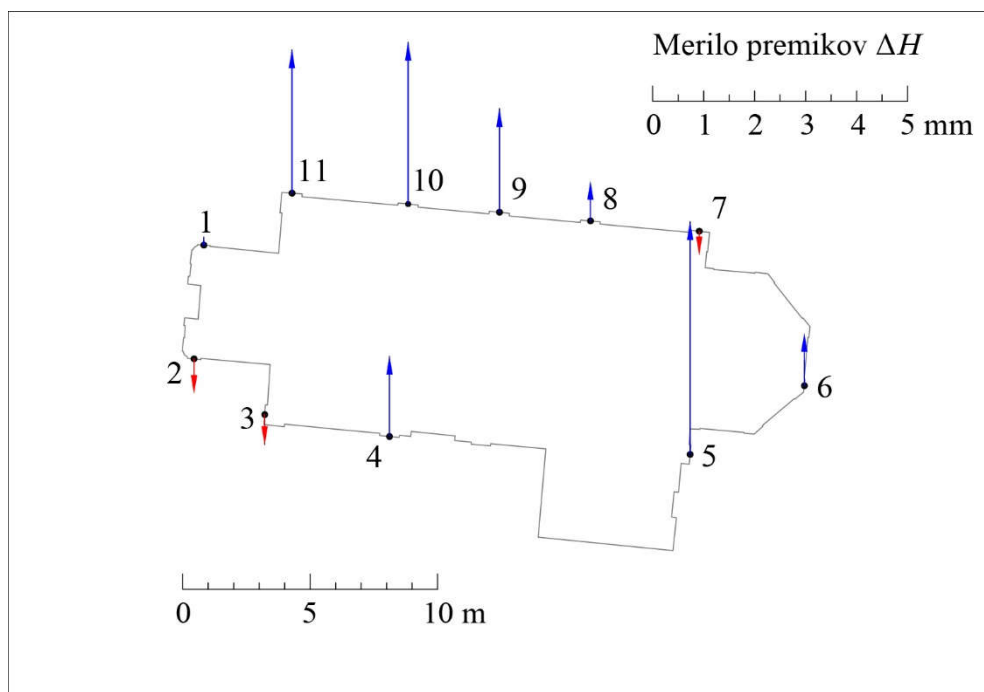
Terminska izmera	σ_l [mm]	σ_z [mm]	$\hat{\sigma}_0$ [mm]	σ_H [mm]
0.	0,24	0,21	0,44	0,05 – 0,07
1.	0,17	0,16	0,29	0,03 – 0,06
2.	0,25	0,31	0,49	0,06 – 0,10
Povprečna vrednost	0,22	0,23	0,41	0,06

Iz preglednice 2 vidimo, da smo dosegli pričakovane natančnosti precizne nivelmanske izmere, ki se kažejo tudi v izredno visoki natančnosti določitve višin reperjev.

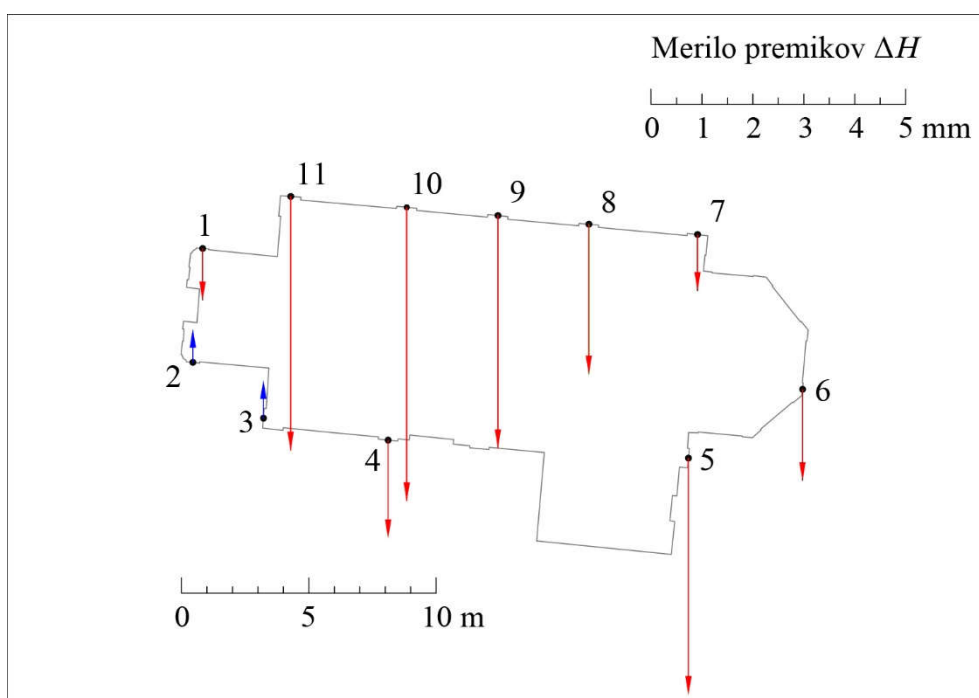
Končni rezultati obdelave podatkov nivelmanske izmere so vertikalni premiki reperjev in statistična analiza njihove stabilnosti (kriterij $\Delta H \geq 3 \cdot \sigma_{\Delta H}$). Velikosti premikov med vsemi terminskimi izmerami prikazujemo v preglednici 3 in na slikah 8, 9 in 10.

Preglednica 3: Višine in vertikalni premiki reperjev z oceno natančnosti.

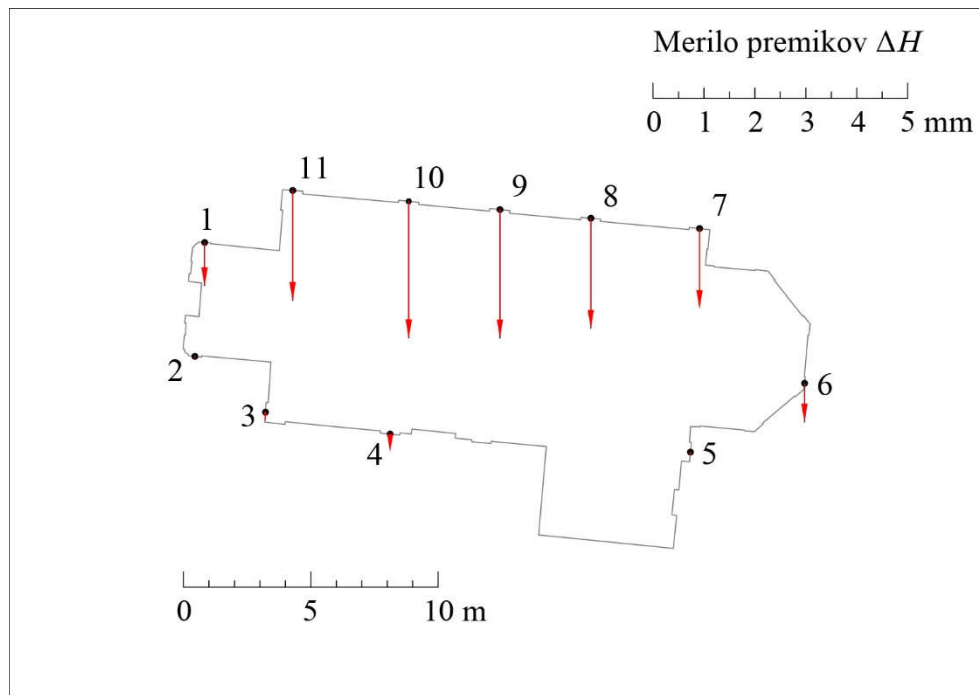
Reper	Višine reperjev z oceno natančnosti						Vertikalni premiki med posameznimi izmerami z oceno natančnosti					
	0. izmera		1. izmera		2. izmera		1 - 0			2 - 1		
	H [m]	σ_H [mm]	H [m]	σ_H [mm]	H [m]	σ_H [mm]	ΔH [mm]	$\sigma_{\Delta H}$ [mm]	Stab.	ΔH [mm]	$\sigma_{\Delta H}$ [mm]	Stab.
100	99,91211	0,06	99,91269	0,04	99,91235	0,07	0,58	0,07	Ne	-0,34	0,08	Ne
102	97,67561	0,07	97,67842	0,05	97,66820	0,08	2,81	0,09	Ne	-10,22	0,09	Ne
103			97,48017	0,05	97,47995	0,08				-0,22	0,09	Da
104			94,98729	0,06	94,98688	0,10				-0,41	0,12	Ne
R1	101,16269	0,07	101,16285	0,04	101,16184	0,07	0,16	0,08	Da	-1,01	0,08	Ne
R2	101,13804	0,07	101,13736	0,04	101,13801	0,07	-0,68	0,08	Ne	0,65	0,08	Ne
R3	101,17049	0,07	101,16990	0,04	101,17064	0,07	-0,59	0,08	Ne	0,74	0,08	Ne
R4	101,14395	0,07	101,14553	0,04	101,14361	0,07	1,58	0,08	Ne	-1,92	0,08	Ne
R5	101,22435	0,06	101,22893	0,04	101,22429	0,07	4,58	0,07	Ne	-4,64	0,08	Ne
R6	101,13908	0,05	101,14011	0,03	101,13832	0,06	1,03	0,06	Ne	-1,79	0,07	Ne
R7	101,16880	0,06	101,16833	0,04	101,16723	0,06	-0,47	0,07	Ne	-1,10	0,07	Ne
R8	101,16124	0,06	101,16202	0,04	101,15908	0,06	0,78	0,07	Da	-2,94	0,07	Ne
R9	101,17492	0,06	101,17696	0,04	101,17240	0,07	2,04	0,07	Ne	-4,56	0,08	Ne
R10	101,16387	0,06	101,16705	0,04	101,16119	0,07	3,18	0,07	Ne	-5,86	0,08	Ne
R11	101,19918	0,07	101,20200	0,04	101,19702	0,07	2,82	0,08	Ne	-4,98	0,08	Ne



Slika 9: Vertikalni premiki med 0. in 1. terminsko izmero.



Slika 10: Vertikalni premiki med 1. in 2. terminsko izmero.



Slika 11: Vertikalni premiki med 0. in 2. terminsko izmero.

Iz preglednice 3 lahko vidimo, da znašajo vertikalni premiki reperjev med 1. in 0. izmero od -0,68 mm (reper 2) do 4,58 mm (reper 5) in da je statistično stabilen le reper 1 (0,16 mm) – slika 8. Med 1. in 2. izmero znašajo vertikalni premiki od -5,86 mm (reper 10) do 0,74 mm (reper 3). Vsi vertikalni premiki reperjev so statistično značilni (slika 9). Med 0. in 2. izmero znašajo vertikalni premiki od -2,68 mm (reper 10) do 0,15 mm (reper 3). Statistično stabilni so reperji 2 (-0,03 mm), 3 (0,15 mm) in 5 (-0,06 mm) (slika 10). Iz preglednice 3 in Slika 9 in 9 lahko vidimo, da se na najbolj aktivnem delu objekta pojavijo premiki, ki so med 0. in 1. izmero ter 1. in 2. izmero različno predznačeni.

Spremembe geometrije objekta iz oblakov točk TLS

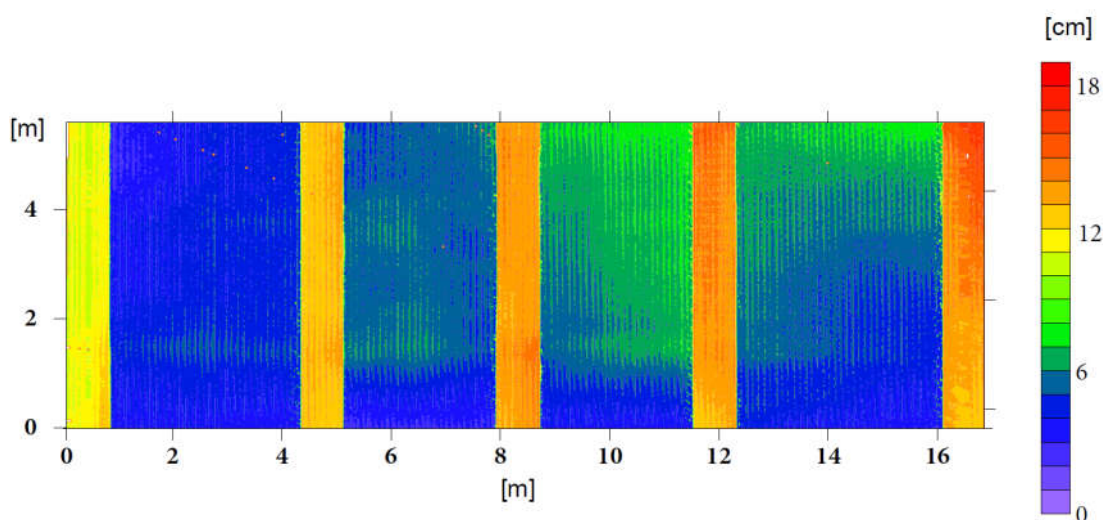
Za spremljanje sprememb notranje geometrije objekta iz oblakov točk TLS, smo morali najprej zagotoviti stabilne točke za georeferenciranje oblakov točk. Oslonilne točke so bile v vseh izmerah razporejene podobno in izmerjene na enak način. Izhajali smo iz vzpostavljene geodetske mreže. Z deformacijsko analizo Hannover smo ugotovili, da so stabilne točke vse, ki so stabilizirane v asfaltu (100, 200, 300 in 700), kar je glede na ostali točki, ki sta stabilizirani na travni površini tudi pričakovano. Z izravnavo opazovanj na te štiri dane točke smo dobili koordinate vseh ostalih točk geodetske mreže in oslonilnih točk za izmero TLS. Srednje natančnosti koordinat točk po izravnavi z upoštevanjem pogreška centriranja 0,5 mm in pogreška merjenja višine instrumenta 1 mm prikazujemo v Preglednica .

Preglednica 4: Srednje natančnosti koordinat točk geodetske mreže.

Izmera	$\bar{\sigma}_{Hz}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
0.	0,65	1,01
1.	0,82	1,04
2.	0,79	1,03

Za registracijo in georeferenciranje oblakov točk smo na točkah geodetske mreže, kjer smo imeli centriran in horizontiran instrument na stativu, za signaliziranje uporabili Leicine HDS 6" tarče. Poleg teh tarč smo za registracijo uporabili tudi 6 odsevnih valjev in v notranjosti cerkve 6 odsevnih nalepk premera 5 cm. Srednji standardni odkloni georeferenciranja iz odstopanj koordinat na oslonilnih točkah so za posamezne izmere znašali 3,8 mm, 2,9 mm in 2,6 mm.

Prvi del obdelav oblakov točk TLS smo namenili analizi zunanje severovzhodne stene. Steno sestavlja pet stebrov in med njimi štiri polnila. Na Slika 12 vidimo, da so stebri in polnila na levi polovici (smer proti oltarju) vertikalni, na desni polovici (smer proti zvoniku) pa je rahlo nagnjeni navzven. Največji nagib je 6,3 cm na 5,2 m višine. Nagib je enako velik tako na polnilih kot na nosilnih stebrih. Iz barvnih kontrastov zelene in modre barve lahko ugotovimo tudi, da je stena nekoliko zvita oz. napeta. Del deformacije lahko gotovo pripišemo tudi izvajalcem zaključnih gradbenih del, ne znamo pa oceniti vpliva na končni rezultat. Glede na dejstvo, da se tovrstni objekti gradijo vertikalno ali z rahlim nagibom navznoter, je bila ta stena kar močno deformirana že pred našo 0. izmero.

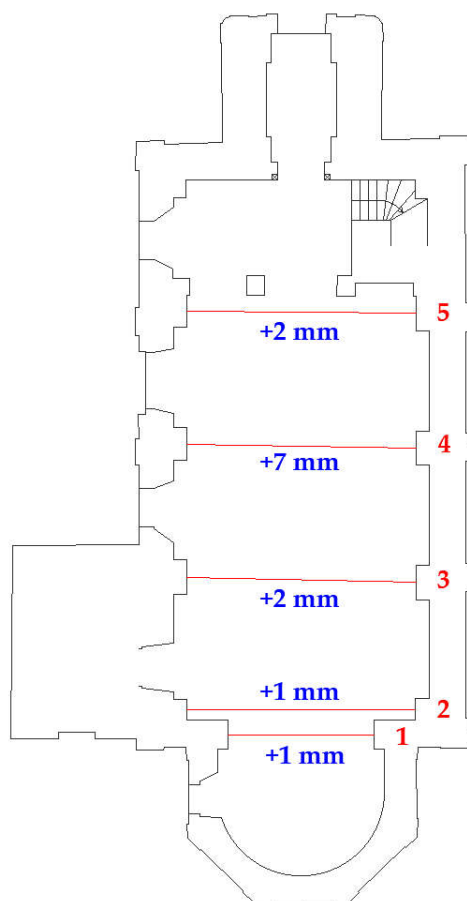


Slika 12: Vertikalnost severovzhodne zunanje stene v 0. izmeri.

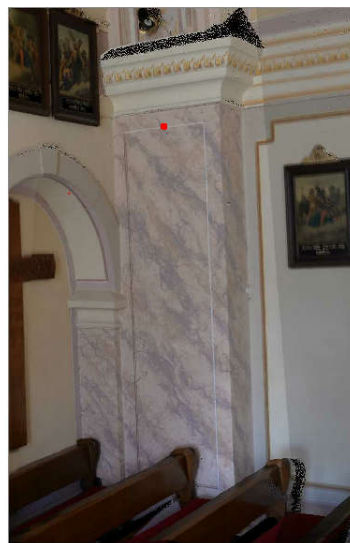
Z dodatno analizo rezultatov 1. in 2. izmere smo ugotovili, da se je nagib na levi strani stene zmanjšal za 1 - 2 mm (stena se je nagnila navznoter), na desni strani pa je ostal enak. Tako majhne spremembe v geometriji so znotraj natančnosti skeniranja in jih ne moremo obravnavati kot statistično značilne.

V notranjosti cerkve smo kot glavno lastnost spreminjanja geometrije obravnavali razmikanje nosilnih stebrov. Obravnavali smo 5 parov stebrov (Slika 13). Na vsakem smo iz oblaka točk izrezali točke, ki pripadajo le površini, orientirani proti sredini cerkve. Skozi izbrane točke smo z metodo najmanjših kvadratov izravnali ravnino. Na višini 3,95 m od tal smo na sredini stebrov v prečni smeri določili točke na izravnani ravnini med katerimi smo izračunali razdalje. Lokacijo točke na enem od stebrov prikazujemo na Slika 13 b).

Med 0. in 2. terminsko izmero smo največjo spremembo razdalje zaznali na sredini ladje in sicer kar 7 mm.



a)



b)

Slika 13: Premiki znotraj cerkve: a) sprememba razdalje med nosilnimi stebri med 0. in 2. izmero; b) lokacija točke na enem od nosilnih stebrov za izračun razdalje.

Zaključek

Spremljanje stabilnosti objektov oz. geodetski monitoring je ena od nalog inženirske geodezije. Za geodetski monitoring cerkve v Kančevcih smo uporabili nivelmansko izmero in terestrično lasersko skeniranje, za določitev koordinat oslonilnih točk za izmero s TLS pa tudi klasično terestrično izmero geodetske mreže. Po obdelavi in izravnavi merjenih vrednosti smo najprej določili stabilne reperje in točke geodetske mreže. Dobro definirano in stabilno koordinatno izhodišče je pogoj za kakovostne končne rezultate oziroma določitev premikov objektov. To nam omogočajo tudi zelo velike natančnosti izravnanih vrednosti, ki so plod primerne metode izmere in uporabljenega instrumentarija ter pribora.

Z obdelavo podatkov nivelmanskih izmer in opravljenimi analizami smo ugotovili, da so vertikalni premiki med 0. in 2. izmero znašali od -0,6 mm do -2,86 mm.

Iz oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja 0. izmere smo ugotovili, da je bila cerkev dodobra deformirana že pred našo izmero. To na terenu kažejo same razpoke, iz oblaka točk pa smo to potrdili z izračunom vertikalnega nagiba vzdolž severovzhodne stene.

Škoda, ki je že povzročena na cerkvi sv. Benedikta v Kančevcih, je velika. Še toliko večja je, ker je bila obnova cerkve tako rekoč ravno zaključena. Z večkratnimi geodetskimi izmerami lahko določimo velikosti in smeri premikov ter druge deformacije, ki predvsem strokovnjakom s področja gradbeništva podajajo dodaten vpogled v dogajanje in pravilnejše odločanje o nadaljnjih ukrepih.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega programa Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije (P2-0227) Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS.

Literatura in viri

- Ambrožič, T., Turk, G. (2016). Navodila za uporabo programa VimWin, Ver. 5.1, mar. 16. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Ambrožič, T., Turk, G. (1996). Navodila za uporabo programa DAH, Ver. 1.0, jun. 96. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Ambrožič, T., Turk, G. (1997). Navodila za uporabo programa Ram ver. 3.2, avg. 96 in GeM ver. 3.1, mar. 97. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Bacco, M. et al. (2020). Monitoring Ancient Buildings: Real Deployment of an IoT System Enhanced by UAVs and Virtual Reality. *IEEE Access*, 8: 50131-50148.
- de Lacy, M., Ramos, M., Gil, A.J., Franco, Ó.D., Herrera, A.M., Avilés, M., Domínguez, A., Chica, J. (2017). Monitoring of vertical deformations by means high-precision geodetic levelling. Test case: The Arenoso dam (South of Spain), *Journal of Applied Geodesy*, 11, 1: 31-41.
- Kregar, K., Štebe, G., Marjetič, A. (2017). Preverjanje stabilnosti ploskovnega objekta s terestričnim laserskim skeniranjem. *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018: zbornik del*, Ljubljana, 26. januar 2017, 81-92.
- Luo, Y., Chen, J., Xi, W., Zhao, P., Qiao, X., Deng, X., Liu, Q. (2016). Analysis of tunnel displacement accuracy with total station. *Measurement*, 83: 29-37.
- Mihevc, A., Urbančič, T. (2019). Spreminjanje premikov in oblikovanja poligonalnih tal v Skedneni jami s terestričnim laserskim skeniranjem. *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018: zbornik del*, Ljubljana, 31. januar 2019, 121-130.
- Pieraccini, M. (2013). Monitoring of Civil Infrastructures by Interferometric Radar: A Review. *The Scientific World Journal*, 786961.
- Register kulturne dediščine. (2020). Register kulturne dediščine. <http://giskd2s.situla.org/rkd/Opis.asp?Esd=3056>. Pridobljeno 2. 12. 2020.
- Savšek-Safić, S., Ambrožič, T., Stopar, B., Kogoj, D. (2008). Local stability monitoring of the Koper tide gauge Station. *AVN*, 6: 210-216.
- Savšek, S., Ambrožič, T., Kogoj, D., Koler, B., Sterle, O., Stopar, B. (2010). Geodezija v geotehniki. *Geodetski vestnik*, 54, 1: 31-45.
- Sterle, O., Kuhar, M., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P., Urbančič, T., Koler, B. (2017). Ocena vertikalne stabilnosti mareografske postaje Koper. *Geodetski vestnik*, 61, 4: 527-540.
- Suchocki, C., Katzer, J. (2018). TLS Technology in Brick Walls Inspection. *Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*, Olsztyn, 2018, pp. 359-363.
- Šegina, E., Peternel, T., Urbančič, T., Realini, E., Zupan, M., Jež, J., Caldera, S., Gatti, A., Tagliaferro, G., Consoli, A., González, J.R., Auflič, M.J. (2020). Monitoring Surface Displacement of a Deep-Seated Landslide by a Low-Cost and near Real-Time GNSS System. *Remote Sensing*, 12, 3375.
- Urbančič, T., Bosiljkov, V., Bokan-Bosiljkov, V., Štukovnik, P., Koler, B. (2019). Advanced monitoring of the church of st. Benedict in Kančevci (Slovenia). V: Mikoš, M. (ur.), Bezak, N. (ur.). *Buildings and infrastructure resilience: WCF2019 Book of abstracts with programme*. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, pp. 103-104.
- Yu, J., Meng, X., Yan, B., Xu, B., Fan, Q., Xie, Y. (2020). Global Navigation Satellite System-based positioning technology for structural health monitoring: a review. *Structural Control Health Monitoring*, 27, e2467.
- Yu, J., Zhu, P., Xu, B., Meng, X. (2017). Experimental assessment of high sampling-rate robotic total station for monitoring bridge dynamic responses. *Measurement*, 104: 60-69.

Pomen mreže prenosnih potresnih opazovalnic RI-SI-EPOS jugovzhodno od Postojne

Martina Čarman*, Tamara Jesenko*, Stanka Šebela**, Polona Zupančič*,
Danijela Birko*, Mladen Živčič*

POVZETEK

Območje jugovzhodno od Postojne je potresno eno bolj aktivnih v Sloveniji. Z novo postavljeno opremo lokalne mreže RI-SI-EPOS ne bomo le določali lokacije in globine potresov z večjo natančnostjo, temveč locirali številne šibke potrese, katerih z dosedanjimi mrežami nismo bili zmožni locirati zaradi nezadostnega števila zapisov. Začasne opazovalnice so v obdobju od maja do konca novembra 2020 zabeležile 92 potresov. Na vzorcu 46 smo pokazali, da so izračuni lokacij in globin žarišč izboljšani. Pričakujemo, da bomo s še večjim številom zabeleženih potresov lahko raziskali aktivne strukture tega območja, kar posledično prispeva k izdelavi bolj natančne karte potresne nevarnosti.

Ključne besede: RI-SI-EPOS, seizmologija, Zunanji Dinaridi, Slovenija.

Keywords: RI-SI-EPOS, seismology, External Dinarides, Slovenia.

Uvod

V okviru projekta »RAZVOJ RAZISKOVALNE INFRASTRUKTURE ZA MEDNARODNO KONKURENČNOST SLOVENSKEGA RRI PROSTORA – RI-SI-EPOS«, je vodilni partner ZRC SAZU kupil seizmološko opremo za spremljanje potresne aktivnosti v severozahodnem delu Zunanjih Dinaridov v Sloveniji, v področju jugovzhodno od Postojne (RI-SI-EPOS, 2018, Šebela et al. 2020, Šebela, 2021).

Namen mreže je beležiti potresno aktivnost v opazovanem območju in prispevati zapise, ki bodo omogočili podrobne študije aktivnih tektonskih struktur tega dela ozemlja. S takšno mrežo bomo zagotovili določanje lokacije in drugih parametrov potresov z zadostno natančnostjo za opredelitev kinematike in dinamike aktivnih prelomov v tem področju.

Strateški cilj seizmološkega dela projekta je pridobiti in domači ter svetovni strokovni in raziskovalni skupnosti omogočiti uporabo sodobnih seizmoloških zapisov zajetih na ozemlju Slovenije in s tem pospešiti raziskave procesov v potresnih žariščih in strukturi Zemljine notranjosti, tako globalno kot tudi na območju Slovenije.

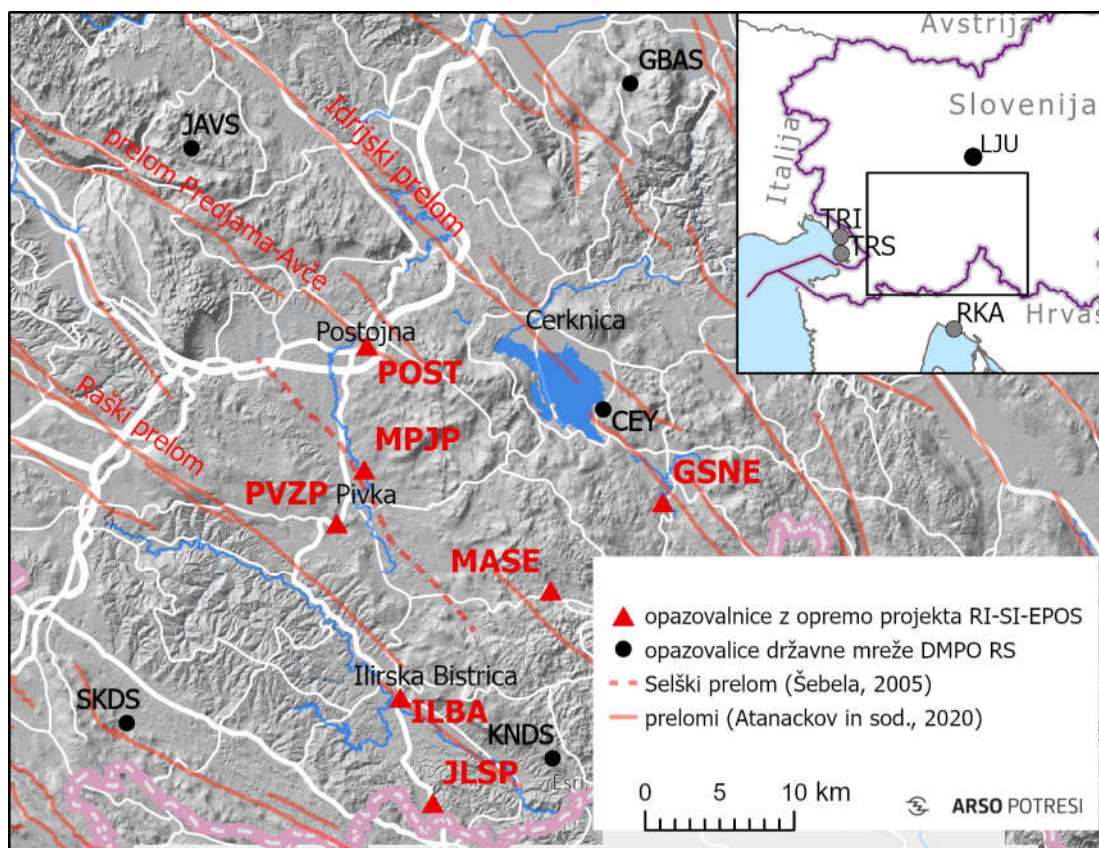
Tektonika

V tektonskem smislu pripada jugovzhodna Slovenija Zunanjim Dinaridom (Placer 1981, Placer, 1999; Poljak, 2000), ki se nahajajo na aktivnem stiku Jadranske mikroplošče z Evrazijsko ploščo. Aktivne deformacije na tem delu se v največji meri dogajajo vzdolž desno-zmičnih prelomov dinarske smeri (SZ-JV) in ob narivih proti jugozahodu. V reliefu najbolj opazen in najdaljši je Idrijski prelom. To je desno-zmični prelom dožine približno

* Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

** ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasi, Titov trg 2, 6230 Postojna

100 km, njegova trasa je segmentirana in poteka v smeri severozahod-jugovzhod. V zadnjih letih in desetletjih ni bil najbolj potresno aktiven, leta 1511 pa je mogoče na njem nastal najmočnejši potres do sedaj v Sloveniji (Živčič in sod., 2011a). Številne raziskave preloma kažejo, da se povprečne hitrosti premikov ob prelomu spreminjajo glede na lokacijo, pa tudi glede na časovno okno (Moulin in sod. 2014–, Moulin in sod., 2016). Atanackov in sod. (2020) ocenjujejo povprečno hitrost premikov ob prelomu 1mm/leto. V okolici sta pomembna še Raški prelom in prelom Predjama-Avče, ki sta tudi prepoznana kot aktivna preloma, na katerih lahko nastanejo potresi magnitude 5,8 ali več (Atanackov in sod., 2020, slika 1). Skozi Pivško kotlino poteka Selški prelom, ki ga je določil Gospodarič (1989). Prelom se iz Prestranškega ravnika nadaljuje proti JV vse do Koritnic in domnevno še naprej proti JV v zahodno pobočje Snežnika. JV od Prestranka je potek Selškega preloma skladno z Gospodaričem (1989) določil tudi Poljak (2000). Na sliki 1 je prikazan potek Selškega preloma povzet po Šebela (2005). Številne potrese, ki so se v zadnjih 25-ih letih zgodili na tem območju, lahko pripišemo tem prelomom (npr. Vičič in sod., 2019). Vendar so tudi potresi in potresni nizi, ki jih dinarsko usmerjeni prelomi ne morejo razložiti. Tak je na primer niz potresov, ki je sledil potresu 22. aprila 2014 (Živčič in sod., 2016) in kaže na nastanek ob levo-zmičnem prelomu v smeri SV-JZ. Prelomi prečno-dinarske smeri na tem območju niso bili kartirani in prepoznani kot aktivni. Gospodarič (1989) jih omenja kot krajše, a zato številnejše v območju Slavine, Selc in Pivke, kjer sečejo narivnico, delijo karbonatne sklade v posamezne bloke in dajejo strukturno zasnovo številnim grapam,



Slika 1 – Položaji potresnih opazovalnic nameščenih v letu 2020 v okviru projekta RI-SI-EPOS (RI-raziskovalna infrastruktura, SI-Slovenija, EPOS-European Plate Observing System/Sistem opazovanja Evropske plošče). Opazovalnice so POST (IZRK ZRC SAZU, Postojna), MPJP (Ekomuzej Pivških presihajočih jezer, Slovenska vas), PVZP (Park vojaške zgodovine, Pivka), JLSP (OŠ Jelšane, Jelšane), MASE (Mašun), GSNE (Grad

Snežnik), ILBA (Ilirska Bistrica). Aktivni, verjetno in potencialno aktivni prelomi daljši od 5 km na katerih lahko nastanejo potresi magnitude 5.8 ali več po Atanackov in sod. (2020).

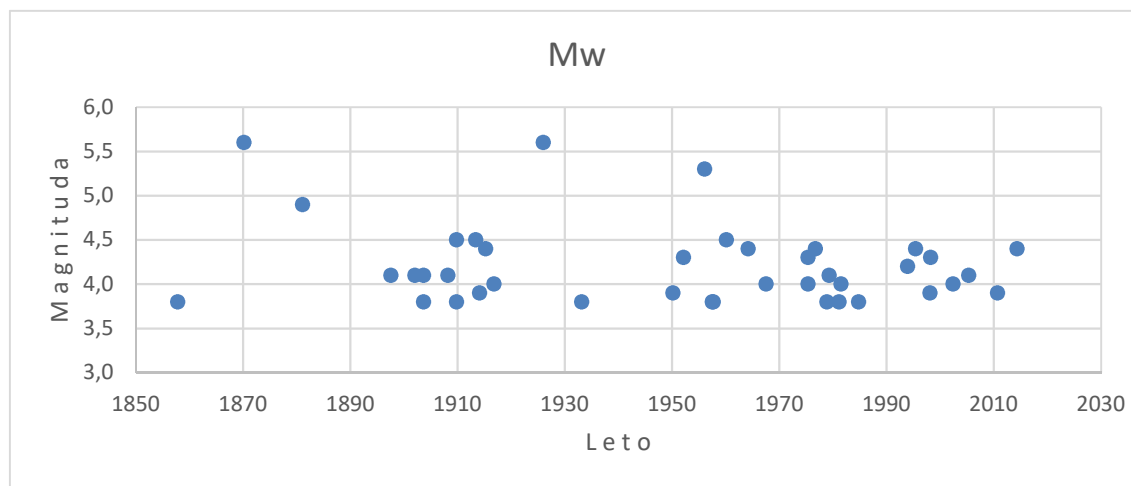
Trasa Selškega preloma je povzeta po Šebela (2005).

ki se stekajo v Pivško kotlino. V članku Poljak in sod. (2010) je poimenovan Pivški prelom, ki je omenjen kot sekundarna struktura med Idrijskim in Raškim prelomom, vendar trasa preloma ni opisana. Novo postavljene potresne opazovalnice v Pivški kotlini (POST, MPJP in PVZP na sliki 1) bodo bistveno pripomogle k natančnejšemu spremljanju potresne aktivnosti na tem območju in k bolj natančnemu prostorskemu lociranju ter posledično k odkrivanju novih aktivnih struktur na tem območju. To so pomembni podatki za razumevanje tektonike tega območja in za izdelavo karte potresne nevarnosti.

Na območju Jelšan deluje potresna opazovalnica JLSP, ki je pomembna za spremljanje in lociranje potresov na območju južno od Snežnika. Potresna opazovalnica MASE na Mašunu pokriva širši predel severno od Snežnika, opazovalnica GSNE v gradu Snežnik pa južni del Idrijske prelomne cone.

Seizmičnost

Območje jugovzhodno od Postojne vse do slovensko-hrvaške meje sodi med seizmično bolj dejavna območja v Sloveniji. Letno z napravami Državne mreže potresnih opazovalnic RS (DMPO RS) (Vidrih in sod., 2006) na tem območju zabeležimo povprečno trideset potresov magnitude 1,5 in večje. V katalogu potresov v Sloveniji (ARSO, 2020) sta kot najmočnejša potresa tega območja navedena potres leta 1870 pri Klani na Hrvaškem in leta 1926 potres pod Javorniki, oba z magnitudo 5,6. Dinamika pojavljanja potresov magnitude 3,8 in večjih je prikazana na sliki 2. V zadnjih 120 letih, za katera lahko domnevamo, da imamo zbrane podatke o vseh potresih te jakosti in močnejših, se izmenjujejo obdobja večje in manjše aktivnosti.



Slika 2 – Potresi magnitude 3,8 in močnejši, ki so se zgodili na območju jugovzhodno od Postojne in so zavedeni v katalogu potresov v Sloveniji (ARSO, 2020).

V začetku 20. stoletja sta bili temu področju najbližji potresni opazovalnici na Reki (začela delovati 1901) in v Trstu (začela delovati 1898). Delovali sta do leta 1918, vendar zapisi niso ohranjeni. Leta 1931, po več kot desetletni prekinitvi, je v Trstu začela delovati

opazovalnica TRS, ki je delovala do leta 1965. V Trstu od leta 1963 neprekinjeno deluje opazovalnica TRI. Na slovenskih tleh je bila vse do leta 1975 temu področju najbližja opazovalnica na Astronomsko-geofizikalnem observatoriju v Ljubljani z oznako LJU, ki je začela potrese beležiti leta 1958. Opazovalnica CEY, nameščena na jugovzhodnem robu Cerknškega jezera, neprekinjeno deluje od leta 1975. Med izgradnjo DMPO RS v letih 2001–2006 je bila opazovalnica CEY posodobljena, dodatno pa sta bili zgrajeni opazovalnici KNDS (leta 2003) in SKDS (leta 2006), ki sta sedaj temu področju najbližji opazovalnici DMPO RS (Slika 1).

Za zanesljivo določitev lokacije potresa, ki bi omogočala ugotoviti, na katerem prelomu je potres nastal, so za večino opazovanega območja te opazovalnice še vedno preveč oddaljene. To še posebej velja za opredelitev globine potresnega žarišča, točnost katere je bistveno pogojena z oddaljenostjo najbližje opazovalnice od nadžarišča potresa. Zato so delavci tedanje Uprave RS za geofiziko (URSG) v začetku devetdesetih let prejšnjega stoletja dobavili tudi nekaj prenosnih potresnih opazovalnic, namenjenih začasnemu opazovanju v primeru povečane potresne aktivnosti. Prva taka postavitve na tem območju je bila po dveh močnih potresih leta 1995 (magnituda $M_w = 4,0$ in $M_w = 4,2$), ki sta se v razmaku ure in pol zgodila v bližini Ilirske Bistrice. Opazovalnica, takrat »začasno« nameščena v Ilirski Bistrici, deluje še danes in je sedaj s posodobljeno opremo del mreže potresnih opazovalnic RI-SI-EPOS. V kasnejših letih so zaposleni na URSG in pozneje ARSO še večkrat postavili prenosne opazovalnice, takoj po močnejšem potresu ali v primeru povečane potresne aktivnosti. V preglednici 1 smo zbrali nekaj primerov začasnih postavitve z opisom potresnega niza in dinamiko postavljanja potresnih opazovalnic.

Pomen prenosnih potresnih opazovalnic

Namen postavitve mreže potresnih opazovalnic jugovzhodno od Postojne je dopolniti mrežo DMPO RS in tako omogočiti čim natančnejšo opredelitev potresnih parametrov ter hkrati zagotoviti, da imamo v primeru povečane potresne aktivnosti v zadostni bližini vsaj eno opazovalnico, ki zabeleži celoten niz potresov. Pomen goste mreže potresnih opazovalnic, ki kontinuirano beleži potrese območja, bomo v nadaljevanju prikazali na primeru potresa magnituda $M_w = 4,3$, ki se je zgodil 22. aprila 2014 ob 9.58 UTC nekaj km jugovzhodno od Pivke.

Potres se je zgodil med delovnim časom na delovni dan v času, ko je bila na Uradu za seizmologijo na ARSO na razpolago le ena delujoča prenosna opazovalnica. Ostale so bile še vedno začasno nameščene na območju Suhe Krajine, kjer so beležile popotresno aktivnost po potresu, ki se je tam zgodil marca 2014. Delavci Urada za seizmologijo so se v najkrajšem možnem času odpravili v Suho Krajino, demontirali opremo dveh opazovalnic ter se z njo odpravili na področje Pivke. Prva potresna opazovalnica je potrese začela beležiti že 3 ure in 45 minut po glavnem potresu na lokaciji v Trnju. To lokacijo smo že koristili, ko smo beležili roj potresov v začetku leta 2013. Tako je bil dogovor o postavitvi z lastnikom stavbe lažji in hitrejši. Ostali dve opazovalni mesti je bilo treba še določiti, poiskati primerno stavbo ter se dogovoriti z lastnikom ali upravnikom. Za vse to je bil potreben čas. Kljub temu nam je v petih urah in pol po potresu uspelo zagotoviti še dve mesti in skupno postaviti tri potresne opazovalnice, ki v oddaljenosti do pet km lepo obkrožajo nadžarišče glavnega potresa.

Hitro postavljanje in hiter začetek beleženja popotresne aktivnosti je izjemno pomemben. Znano je, da je v večini primerov popotresni niz časovno razporejen po tako imenovanem modificiranem Omorijevem zakonu (Utsu, 1992; Utsu in Ogata, 1997), po katerem število

popotresov v enoti časa eksponentno pada. Pri modeliranju zakonitosti časovnega pojemanja števila popotresov smo zajeli 227 zabeleženih popotresov magnitude M_{LV} enake 0,7 ali večje v obdobju 94 dni po glavnem potresu. Ta magnituda predstavlja spodnji prag, za katerega smo ocenili, da smo zabeležili vse potrese nad njim. Prileganje modelirane krivulje

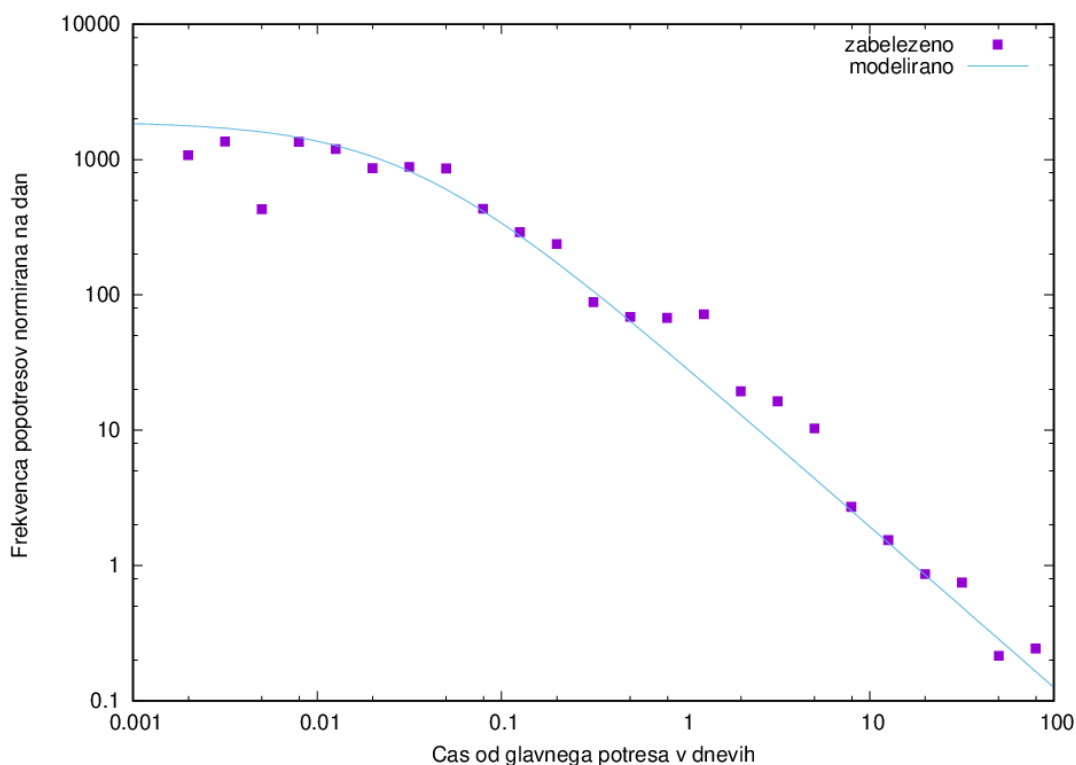
Preglednica 1 – Potresni nizi in prenosne opazovalnice, ki so bile postavljene v bližino niza takoj po močnejšem potresu ali v primeru povečane potresne aktivnosti.

Datum najmočnejšega potresa v nizu	Lokacija potresnega niza	Trajanje povečane potresne aktivnosti [dni]	Število lociranih potresov	Magnituda M_{LV} najmočnejšega potresa	Spodnja M_{LV} meja lociranih potresov	Začasne potresne opazovalnice (od tega nove)	Nove začasne potresne opazovalnice in čas postavitve
22. 5. 1995	Koritnice	8	16	4,7	1,6	2 (2)	ILBA (isti dan) KRTS (isti dan), PDGS (naslednji dan)
2. 6. 2002	Ratečevo Brdo - Koritnice	25	18	3,8	0,4	2 (1)	KRTS (6 ur in 14 min po potresu)
24. 4. 2005	Jasen – Ilirska Bistrica	99	37	3,8	0,1	3 (2)	NOKE (18 ur in 6 min po potresu), GZME (16 ur in 10 min po potresu)
15. 1. 2010	Veliki Otok	155	396	3,7	-0,4	3 (3)	POST (13.1. 2010), STUP (15. 1. 2010) VGPI (27. 1. 2010)
6. 1. 2013	Slovenska vas	18	11	2,9	-0,2	3 (1)	TRNP (3 dni 23 ur in 24 min po potresu)
22. 4. 2014	Drskovče	94	435	4,3	-0,4	6 (3)	JURE (4 ure in 48 min po potresu), TRNP (3 ure in 45 min po potresu), ZAGP (5 ure in 35 min po potresu)
5. 12. 2018	Juršče	24	22	3,4	-0,3	2 (2)	JURE (17 ur in 24 min po potresu), MASP (15 ur in 53 minut po potresu)
14. 2. 2019	Juršče	14	53	1,7	-0,3	2 (2)	KRTS (isti dan), PVZP (15. 2. 2020 ob 11.00)
1. 10. 2019	Snežnik	6	90	3,4	-0,4	1(1)	MASP (11 ur po potresu)

dejanskemu pojemanju števila zabeleženih popotresov je prikazano na sliki 3. Do postavitve začasne mreže potresnih opazovalnic se je zgodilo že 86 potresov (od 227), vendar so lokacije teh potresov določene z večjo negotovostjo kot lokacije potresov, ki so jim sledili. Če bi opazovalnice postavili naslednji dan, 30 ur po glavnem potresu, bi bilo potresov s

slabše določenimi parametri 148, torej bi zamudili več kot polovico vseh lociranih potresov. Dodatna vrednost začasnih potresnih opazovalnic je tudi, da lahko s pomočjo dobro opredeljenih parametrov potresov zabeleženih na le-teh z npr. relativno metodo časovnih prehitkov oz. zaostankov pri določanju žarišč (Double-Difference Hypocenter determination – HypoDD, Waldhauser in Ellsworth, 2000; Waldhauser, 2001) popravimo tudi parametre potresov, ki jih začasne opazovalnice zaradi poznejše postavitve še niso mogle zabeležiti, vendar so jih zabeležile stalno delujoče potresne opazovalnice DMPO RS.

Pri začasno postavljenih opazovalnicah se je v primeru tega potresa izkazalo, kako pomembno je beležiti potrese kontinuirano. Ena od treh opazovalnic, JURE, je potrese beležila v prožilnem načinu, kar pomeni, da se shrani le tisti del zapisa, kjer amplituda zapisa preseže mejno vrednost. Ta način delovanja je bil nujen dokler so bili zapisi hranjeni na za današnji čas majhnih spominskih enotah. Vendar pa je zato opazovalnica JURE zgrešila številne šibke potrese ter zabeležila bistveno manj popotresov, kot sta jih začasni potresni opazovalnici ZAGP in TRNP, ki sta seizmičnost beležili kontinuirano. Vse opazovalnice mreže RI-SI-EPOS beležijo potresno aktivnost kontinuirano.

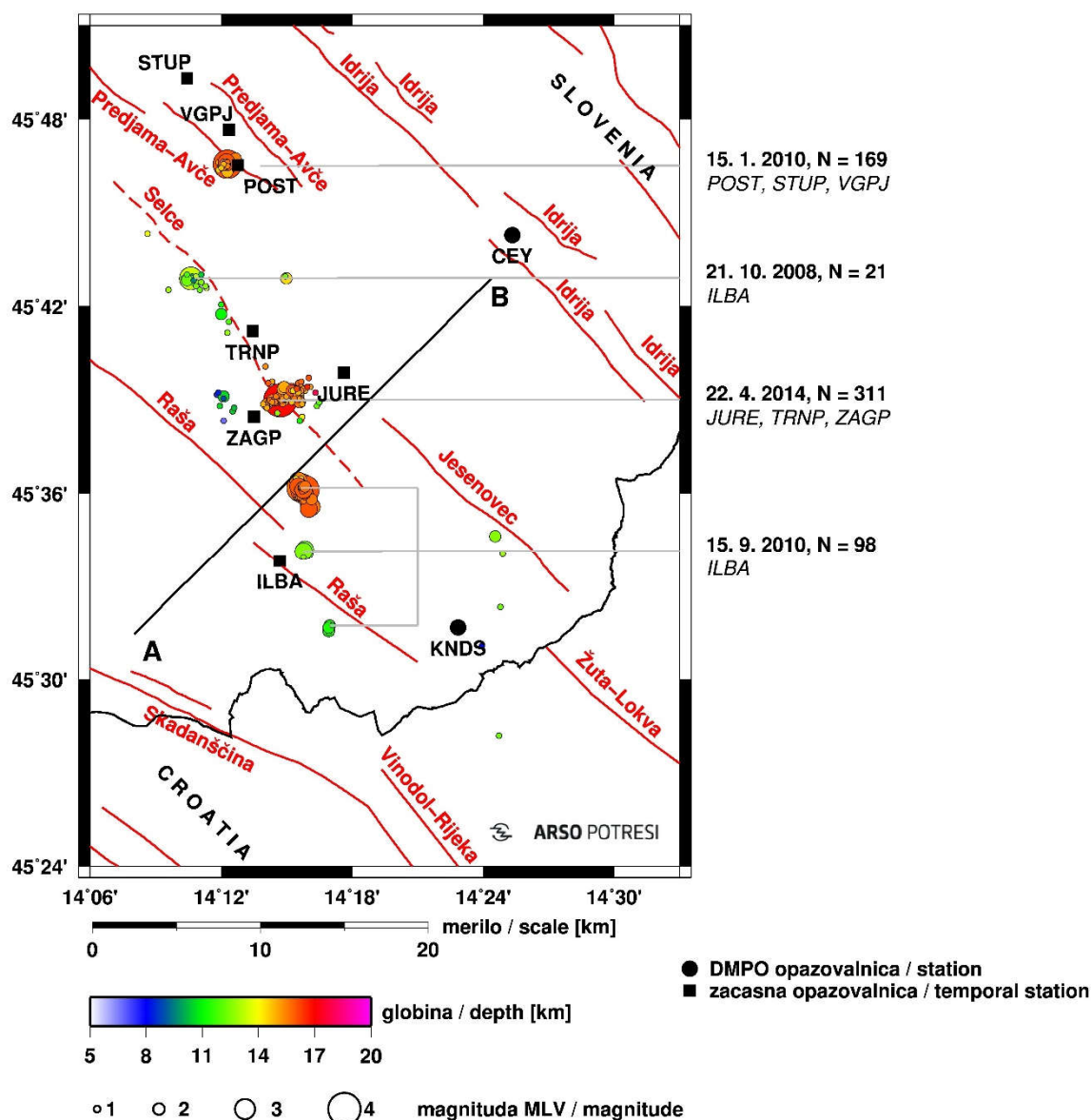


Slika 3 – Časovno pojemanje števila popotresov po glavnem potresu pri Pivki dne 22. 4. 2014 magnitude večje ali enake 0,7 normirano na en dan (violetni kvadrati) in pojemanje števila popotresov po modificiranem Omorijevem zakonu (modra črta).

Hitra postavitve začasnih opazovalnic na nadžariščno območje nam je v primeru tega potresa omogočila vpogled v žariščno dogajanje. Prostorska porazdelitev žarišč popotresnega niza 311-ih potresov kaže na skoraj navpičen potresno dejaven del preloma na globini med 15 in 17,5 kilometri. Prelomna ploskev ima prečno-dinarsko smer JZ-SV

(približno N70°E), ob glavnem potresu pa je prišlo ob njej do levega znika (Živčić in sod., 2016).

Od leta 2003, ko je na raziskovanem območju v okviru izgradnje DMPO RS posodobljena potresna opazovalnica CEY in na novo postavljena potresna opazovalnica KNDS, se je



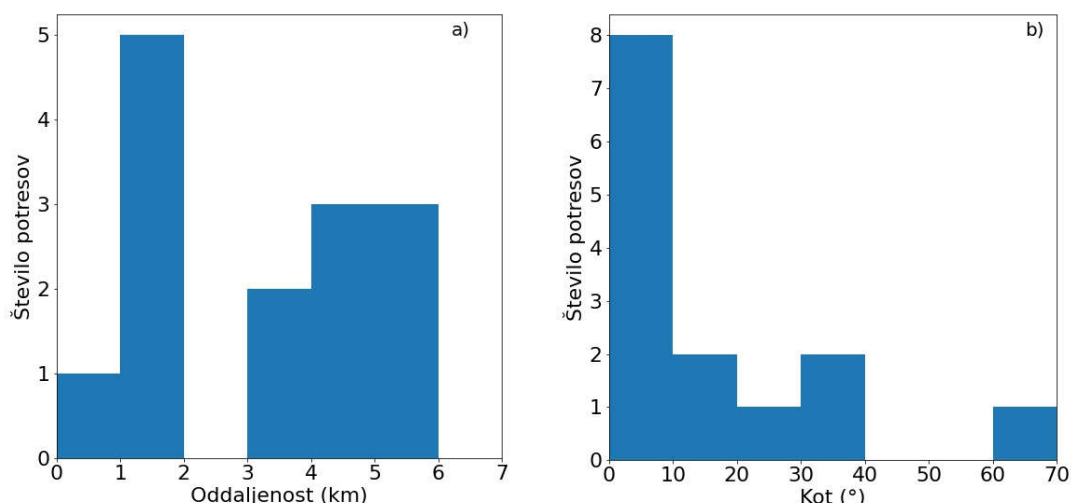
Slika 4 – Potresni nizi na raziskovanem območju, ki so bili relocirani v študijah Ložar Stopar in sod. (2009), Čarman in sod. (2011), Živčić in sod. (2011b, 2016). Poleg opazovalnic DMPO RS so na sliki označene začasno postavljene potresne opazovalnice. Ob desni strani zemljevida je za vsako gručo naveden datum glavnega potresa v gruči, število potresov in začasno postavljene opazovalnice, ki so seizmičnost po potresu beležile. Rdeče polne črte prikazujejo trase prelomov v Sloveniji in prelomnih potresnih izvorov na Hrvaškem po Atanackov in sod. (2020). Rdeča prekinjena črta predstavlja traso Selškega preloma povzeto po Šebela (2005).

zgodilo nekaj številčnejših potresnih nizov. Nekatere smo podrobneje opisali v Ložar Stopar in sod. (2009), Čarman in sod. (2011), Živčić in sod. (2011, 2016). Rezultati študij so zbrani

in prikazani na sliki 4. Vsaka gruča je bila podrobno proučena, medsebojne lokacije potresov v gruči pa izboljšane z relativno metodo časovnih prehitkov oz. zaostankov pri določanju žarišč (Waldhauser in Ellsworth, 2000; Waldhauser, 2001). Boljšo opredelitev globine potresnega niza so nam omogočile opazovalnice postavljene v bližini potresnega niza, saj v primeru, da se opazovalnica nahaja skoraj nad žariščem, celotno oddaljenost žarišča od opazovalnice lahko pripišemo žariščni globini. Tako smo potresom leta 2010 na območju Ilirske Bistrice globino določili s pomočjo opazovalnice ILBA v Ilirski Bistrici, ki je tam delovala od leta 1995. V dveh primerih, to je po potresu 15. januarja 2010 pri Postojni in po potresu 22. aprila 2014 pri Pivki, pa smo v bližino potresnih nizov začasno postavili po tri potresne opazovalnice. Dodatno so po potresu v Postojni 27. januarja 2010 seizmologi z Dipartimento di geoscienze z Univerze v Trstu v sodelovanju z ARSO ter z IRK ZRC SAZU ter ob privolitvi takratnega upravljavca Postojnske jame Turizma Kras d.d. v Postojnski jami postavili prenosno potresno opazovalnico VGPI. Na zemljevidu slike 4 so poleg potresov, za katere menimo, da so potresni parametri zanesljivo določeni, izrisani tudi začasno – za čas povečane seizmične aktivnosti - postavljene potresne opazovalnice.

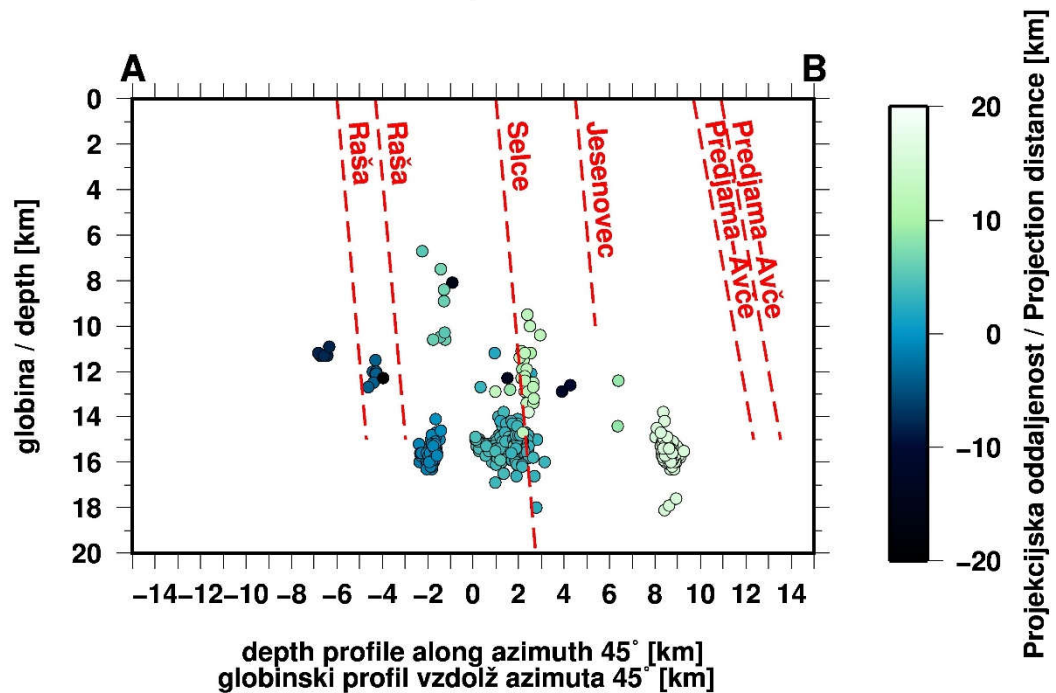
Prvi rezultati delovanja prenosnih potresnih opazovalnic RI-SI-EPOS

Območje med Postojno in slovensko-hrvaško mejo je nenehno seizmično aktivno. Gostota opazovalnic DMPO RS omogoča točnost določanja lege žarišč le na nekaj kilometrov natančno, kar je premalo, da bi žarišča lahko povezovali s potresnimi izvori. Na sliki 5 smo pokazali porazdelitev oddaljenosti žarišč potresov, za katere imamo določene žariščne mehanizme, od najbližjega preloma (slika 5a) in oceno razlike (predstavljeno s kotom po Kagan, 1991) med predvidenim premikom na prelomu in rešitvijo žariščnega mehanizma (slika 5b). Oddaljenosti več kot polovice potresov so med 3 in 6 km. V nekaterih primerih so oddaljenosti in ustrezne napake do dveh najbližjih prelomov podobne, zato ne moremo z gotovostjo trditi, na katerem prelomu se je potres zgodil. Razlike v mehanizmih so majhne kljub precejšnji oddaljenosti večine žarišč potresov od najbližjega znanega preloma.



Slika 5 – a) Histogram oddaljenosti žarišč z opredeljenimi žariščnimi mehanizmi od najbližjega aktivnega preloma v KAP (Atanackov in sod., 2020); b) Razlika v žariščnem mehanizmu in parametri (slemenitev, naklon, premik) prideljenimi potresu najbližjemu prelomu.

Šele lokacije predstavljenih potresnih nizov, ki so bili zabeleženi na opazovalnicah v neposredni bližini, so določene dovolj zanesljivo, da bi jih lahko povezali z aktivnimi prelomi. Na zemljevidu slike 4 so prikazani položaji prelomov kot so določeni na karti aktivnih prelomov v Sloveniji (Atanackov in sod., 2020). Označeno traso globinskega profila (daljica AB na sliki 4) smo izrisali na sliki 6. Vidimo lahko, da potresov zaenkrat ne moremo pripisati nobenemu sedaj opredeljenemu prelomu. Gruč je premalo, da bi njihovi položaji orisali potek preloma. Glede na nenehno potresno aktivnost območja pa pričakujemo, da bo lokalna mreža RI-SI-EPOS omogočila spoznati aktivne prelomne strukture predvsem prek šibke seizmičnosti.



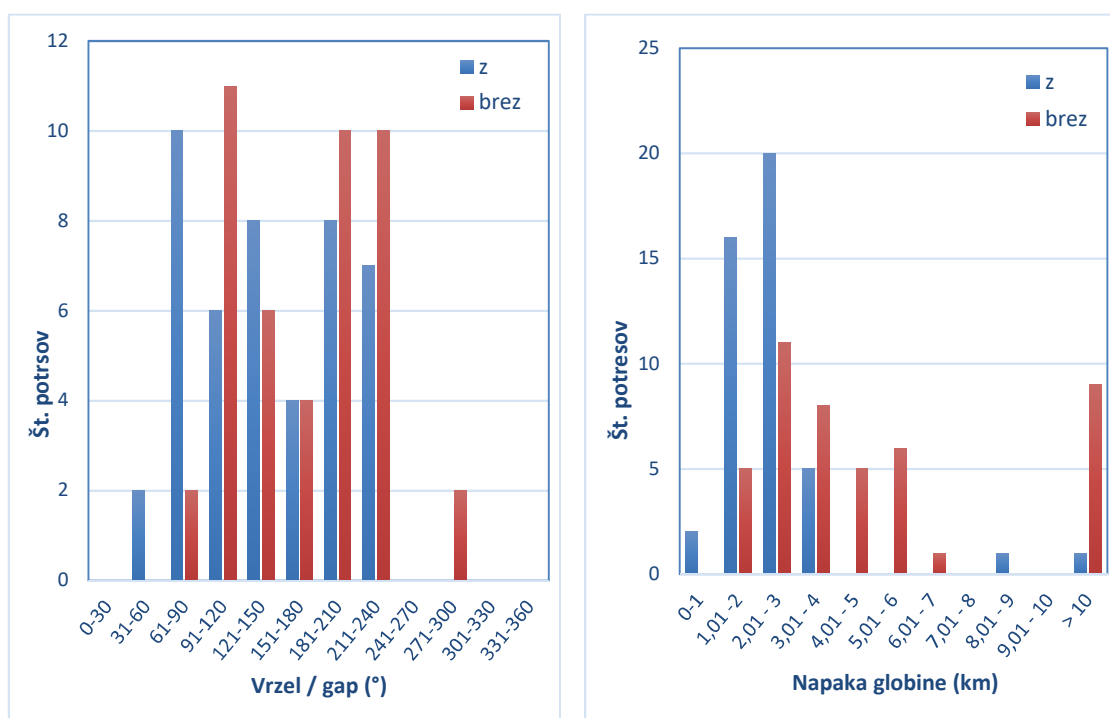
Slika 6 – Žarišča izbranih potresnih nizov, prikazanih na sliki 4, izrisana na globinskih prerezi vzdolž daljice AB oziroma azimuta N45°E. Trasa globinskega profila je označena na sliki 4. Barva krogcev ponazarja oddaljenost potresa od projekcijske ravnine. Rdeče prekinjene črte označujejo globinski potek prelomov z upoštevanjem najboljše ocene naklona po Atanackov in sod. (2020). Pri tem ni interpretirano verjetno spreminjanje naklona ploskev z globino. Globinski prerez seka Raški prelom, medtem ko je prelom Jesenovec od prereza oddaljen 2 kilometra, prelom Predjama-Avče pa 14 kilometrov. Naklon Selškega preloma smo povzeli po Vičič in sod. (2019).

Od maja do konca novembra 2020 se je v raziskovanem območju zgodilo 92 potresov, katere je zabeležila vsaj ena od začasno postavljenih opazovalnic. Izbrali smo tiste (46), pri katerih je bila ena izmed teh opazovalnic najbližja nadžarišču potresa. Nato smo primerjali rezultate, ki jih dobimo, če podatke z začasnih opazovalnic upoštevamo ali ne. Brez podatkov opazovalnic mreže RI-SI-EPOS enemu potresu nismo mogli izračunati lokacije, saj smo imeli podatke le z dveh opazovalnic, za izračun lokacije pa potrebujemo vsaj tri.

Cilj je natančnejši izračun lokacije, kar dosežemo tudi z zgostitvijo mreže. Za natančnejši izračun lokacije žarišča je ugodno, da so mu opazovalnice blizu in enakomerno razporejene okoli njega. Če potegnemo daljice med nadžariščem in opazovalnicami, želimo, da je največji kot med dvema sosednjima daljicama za posamezen potres čim manjši (vrzel ali angl. gap). Ker tokrat začasne opazovalnice niso, kot npr. v primeru potresa 22. aprila 2014,

razporejene okoli določenega nadžarišča potresa, ampak so postavljene približno enakomerno na območju, ki ga raziskujemo, nas je zanimalo, če se temu cilju približujemo. Na levem histogramu slike 7 lahko vidimo, da se, če pri izračunu upoštevamo opazovalnice do 50 km od nadžarišča, vrzel brez začasnih opazovalnic poveča. Pri 22 potresih je večja od 180° , kar zelo slabo vpliva na natančnost lokacije. V dveh primerih se je vrzel povečala celo za več kot 160° , izračunana lokacija nadžarišča pa, zaradi neugodne razporeditve opazovalnic, zamaknila za več kot 30 kilometrov.

Naslednji cilj, ki ga z mrežo želimo doseči je boljša določitev globine žarišča. V ta namen morajo biti opazovalnice nameščene čim bližje žarišču, v najboljšem primeru tik nad žariščem. Mreža RI-SI-EPOS ima tudi v tem primeru pomemben prispevek (desni histogram na sliki 7), saj se je napaka pri izračunu globine žarišča z upoštevanjem podatkov s teh opazovalnic precej zmanjšala.



Slika 7 – Porazdelitev vrzeli (levo) oz. napake globine (desno) potresov, ki so bili leta 2020 zabeleženi na mreži RI-SI-EPOS in je bila ena izmed njenih opazovalnic najbližja nadžarišču potresa. Z modro so predstavljeni rezultati izračuna z opazovalnicami mreže RI-SI-EPOS, z rdečo pa brez njih.

Že v preteklosti smo na tem območju opažali, da se potresi pogosto dogajajo v gručah, kar pomeni v zelo omejenem prostoru in času, ter so si med seboj podobni. Tudi v obdobju delovanja mreže RI-SI-EPOS sta se zgodili dve manjši gruči šibkih in podobnih potresov, prva 10. in 11. oktobra 2020 pod južnim pobočjem Snežnika in druga od 12. do 19. novembra 2020 južno od Jelšan. Za take primere smo pripravili orodje, ki z navzkrižno korelacijo seizmičnih zapisov išče podobne potrese (Čarman, 2021). Pri tem uspešno najde tudi zelo šibke potrese na posamezni opazovalnici. Ker nam lokalna mreža danes omogoča, da so tudi šibkejši potresi zabeleženi na več opazovalnicah, jih tako lahko zanesljivo lociramo. V zgornjih dveh primerih gruč smo z navzkrižno korelacijo odkrili vse potrese v posamezni gruči, ki jih je predhodno že analiziral seizmolog, obenem pa še številne šibkejše. Vsaka gruča potresov, bodisi popotresi po močnem potresu bodisi roj šibkih potresov brez močnega

potresa, običajno aktivira le del preloma. Vendar pa je gruč šibkih potresov bistveno več, zato si obetamo, da bo predvsem šibka seizmičnost tista, s katero bomo iz fragmentov aktiviranih delov prelomne ploskve hitreje ugledali traso preloma.

Zaključek

Zapisi mreže potresnih opazovalnic dobavljenih v okviru projekta »RAZVOJ RAZISKOVALNE INFRASTRUKTURE ZA MEDNARODNO KONKURENČNOST SLOVENSKEGA RRI PROSTORA – RI-SI-EPOS«, ki v področju jugovzhodno od Postojne delujejo od maja 2020, bodo omogočili natančnejše opredelitve lokacij nadžarišč potresov in žariščne globine. S kontinuiranim beleženjem potresne aktivnosti bomo zabeležili celotne potresne nize in s tem prispevali k poznavanju globlje zgradbe Zemeljske skorje in medsebojne interakcije prelomov v sistemu tega dela Zunanjih Dinaridov. S pričakovano izboljšano natančnostjo določanja lokacij žarišč potresov in možnostjo kakovostne obdelave tudi manjših potresov bomo v prihodnje poskušali ugotoviti obstoj manjših seizmično aktivnih prelomov in lastnosti medsebojnih povezav med večjimi prelomi v sistemu.

Zahvala

Za možnost namestitve prenosnih potresnih opazovalnic se zahvaljujemo Občini Pivka (Ekomuzej Pivških presihajočih jezer in Park vojaške zgodovine), OŠ Jelšane, Narodnemu muzeju Slovenije (Grad Snežnik), Geoinformatiki Črt Rudman s.p. in Občini Ilirska Bistrica. RI-SI-EPOS operacijo sofinancirata Republika Slovenija, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Literatura

- ARSO (2020). Katalog potresov na ozemlju Slovenije za obdobje 1511-2020. Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Ljubljana.
- Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Celarc, B., Jež, J., Novak, M., Milanič, B., Markelj, A. (2020). Izdelava seizmotektonskih kart za leto 2020 - Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov in potresnih virov Slovenije, 7. del (1/2), rev 0. Geološki zavod Slovenije, 224 p.
- Čarman, M. (2021). Uporaba navzkrižne korelacije za detekcijo potresov v potresnih nizih. V: Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2020: zbornik predavanj, 26. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Čarman, M., Živčič, M., Ložar Stopar, M. (2011). Potresi pri Ilirski Bistrici leta 2010, Potresi v letu 2010 (ur. A. Gosar). Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, 97–109. https://www.arso.gov.si/potresi/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/potresi%20v%20letu%202010_1.pdf (11. 12. 2020)
- Gospodarič, R. (1989). Prispevek k vodnogospodarskim osnovam Pivke. Acta carsologica 18, 21–38, Ljubljana.
- Kagan, Y.Y. (1991). 3-D rotation of double-couple earthquake sources, Geophys. J. Int., 106, 709–716.
- Ložar Stopar, M., Živčič, M., Zupančič, P. (2009). Potresi pri Pivki septembra in oktobra 2008, Potresi v letu 2008 (ur. R. Vidrih). Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, 66–73. <https://www.arso.gov.si/potresi/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/Potresi%20v%20letu%202008.pdf> (11. 12. 2020)

- Moulin, A., Benedetti, L., Gosar, A., Jamšek Rupnik, P., Rizza, M., Bourlès, D., Ritz, J.-F. (2014). Determining the present-day kinematics of the Idrija fault (Slovenia) from airborne LiDAR topography, *Tectonophysics*, Volume 628, p. 188-205.
- Moulin, A., Benedetti, L., Rizza, M., Jamšek Rupnik, P., Gosar, A., Bourlès, 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, 2258–2292, doi:[10.1002/2016TC004188](https://doi.org/10.1002/2016TC004188).
- Placer, L. (1981). Geologic structure of southwestern Slovenia. *Geologija* 24/1, 27–60, Ljubljana.
- Placer, L. (1999). Contribution to the macrotectonic subdivision of the border region between Southern Alps and External Dinarides.- *Geologija* 41, 223–255 (1998), Ljubljana.
- Poljak, M. (2000). Strukturno-tektonska karta Slovenije, izdelana po podatkih Osnovne geološke karte SFRJ 1:100.000, Mladinska knjiga tiskarna d.d., Ljubljana.
- Poljak, M., Gosar, A., Živčič, M. (2010). Active tectonics in Slovenia: *GeoActa*, 3, 15–24.
- RI-SI-EPOS (2018). <https://izrk.zrc-sazu.si/sl/programi-in-projekti/ri-si-epos#v> (4.12.2020)
- Šebela, S. (2005). Tectonic sights of the Pivka basin. *Acta carsologica*, 34, 3, 566-581.
- Šebela, S. (2021) Raziskovalna infrastruktura RI-SI-EPOS na področju krasoslovja. V: Kuhar, M. (ur.). *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2020: zbornik predavanj*, 26. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Šebela, S., Tasič, I., Živčič, M., Mali, M., Krebelj, M., Čeligoj, J., Pančur, L., Pahor, J., Čarman, M., Zupančič, P. in Gosar, A. (2020). Mreža prenosnih potresnih opazovalnic južno od Postojne - "RI-SI-EPOS". [Postojna: ZRC SAZU, Inštitut za raziskovanje krasa]. https://izrk.zrc-sazu.si/sites/default/files/prenosne_potresne_opazovalnice_a3_format.pdf. (15. 12. 2020)
- Utsu, T. and Y. Ogata (1997). Statistical analysis of seismicity. V: Healey, J.h., V.I. Keilis-Borok and W.H.K. Lee, *Algorithms for earthquake statistics and prediction*. IASPEI software library, Vol. 6, 13–94.
- Utsu, T. (1992). On the nature of three Alaskan aftershock sequences of 1957 and 1958. *Bull. Seis. Soc. Am.* 52(2), 279–297.
- Vičič, B., Aoudia, A., Javed, F., Foroutan, M., in Costa, G. (2019). Geometry and mechanics of the active fault system in western Slovenia. *Geophysical Journal International* 217 (3), 1755–1766.
- Vidrih, R., Sinčič, P., Tasič, I., Gosar, A., Godec, M., Živčič, M. (2006). Državna mreža potresnih opazovalnic = Seismic network of Slovenia. Ur. Vidrih, R. Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, 287 p.
- Waldhauser, F. (2001). HypoDD – A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations. U. S. Geol. Surv. Open File Rep. 01–113, 25 p.
- Waldhauser, F., Ellsworth, W. L. (2000). A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault. *Bull. Seism. Soc. Am.* 90, 1353–1368.
- Živčič, M., Čarman, M., Gosar, A., Jesenko, T. in Zupančič, P., (2011a) Potresi ob Idrijskem prelomu, Idrijski razgledi, LVI-1, 119–126.
- Živčič, M., Čarman, M., Ložar Stopar, M. (2011b). Potres 15. januarja 2010 pri Postojni, Potresi v letu 2010 (ur. A. Gosar). Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, 76–86. https://www.arso.gov.si/potresi/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/potresi%20v%20letu%202010_1.pdf (11. 12. 2020)
- Živčič, M., Čarman, M., Ložar Stopar, M. (2016). Potres 22. aprila 2014 pri Pivki in popotresi. Potresi v letu 2014 (ur. A. Gosar). Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, 76–84. <https://www.arso.gov.si/potresi/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/Potresi%20v%20letu%202014.pdf> (11. 12. 2020)

Uporaba navzkrižne korelacije za detekcijo potresov v potresnih nizih

Martina Čarman*

Izvleček

Na območju jugovzhodno od Postojne je bila sredi leta 2020 v okviru raziskovalnega projekta RI-SI-EPOS postavljena mreža potresnih opazovalnic, ki dopolnjuje beleženje potresov Državne mreže potresnih opazovalnic Republike Slovenije. Gostejša mreža obeta zmožnost beleženja in lociranja šibkih potresov na tem območju in zanesljivejše opredeljevanje potresnih parametrov. Zanesljive lokacije, četudi šibkih potresov, orišejo aktivni del prelomne strukture in so zato neprecenljive vrednosti. V študiji smo pozornost posvetili gručam številčnih podobnih potresov, ki so pogoste, npr. popotresi, ki sledijo močnejšemu potresu ali roji potresov brez predhodnega močnejšega potresa. Pripravili smo orodje za strojno analizo tovrstnih gruč, ki temelji na metodi navzkrižne korelacije in naredili analizo občutljivosti. Ugotovili smo, da z ustrezno izbiro parametrov pri navzkrižni korelaciji bistveno znižamo magnitudni prag detekcije/lociranja ter na ta način pripravimo podatke za pomoč seizmologu pri analizi seizmogramov in nadaljnji obdelavi potresov.

Ključne besede: navzkrižna korelacija, RI-SI-EPOS, seizmologija, Slovenija.

Keywords: cross-correlation, RI-SI-EPOS, seismology, Slovenia.

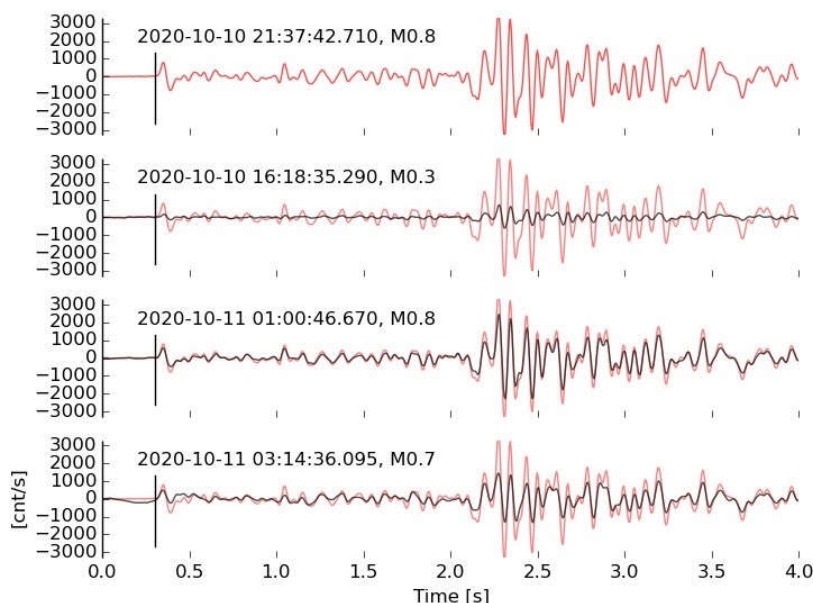
Uvod

Cilj te študije je bil pripraviti orodje, ki nam bo pomagalo poiskati podobne potrese nastale na omejenem prostoru in v kratkem časovnem oknu. Skozi leta beleženja potresov ugotavljamo, da se podobni potresi ponavljajo pogosto. Lahko gre za popotrese močnejšega potresa ali za potresne roje (ang. swarms) brez predhodnega močnejšega potresa. Dokler je mreža redka, predvsem šibkih potresov ne zabeležimo na več opazovalnicah hkrati in tako ti ostanejo nelocirani. Četudi so šibki, pa so njihove lokacije, če so zanesljivo določene, izjemno dragocene. Ker se potresi dogajajo na aktivnih prelomih nam lahko zarišejo območje oz. površino aktivirane prelomne strukture. Da bi jih zabeležili, je zgostitev mreže potresnih opazovalnic na raziskovalnem območju nujna. S tem namenom je bila na območju med Postojno in Snežnikom v okviru projekta RI-SI-EPOS (RI-SI-EPOS, 2018; Šebela in sod., 2020; Šebela, 2021) postavljena mreža potresnih opazovalnic, ki poleg opazovalnic Državne mreže potresnih opazovalnic Republike Slovenije (v nadaljevanju DMPO RS; Vidrih in sod., 2006) beleži potrese. Gosta mreža potresnih opazovalnic omogoča zanesljivejše opredeljevanje potresnih parametrov ter uspešnejše lociranje številčnih šibkih potresov (Čarman in sod., 2021).

Za potresni niz oz. ponavljajoče potrese na zelo omejenem območju in v omejenem času je značilno, da potresi nastanejo ob isti prelomni strukturi zelo blizu skupaj in imajo običajno podoben žariščni mehanizem. Seizmično valovanje prepotuje od žarišča potresa do izbrane opazovalnice iste geološke strukture, zato imajo seizmični zapisi izbrane opazovalnice podobno obliko. Na sliki 1 so prikazani izbrani potresi potresnega niza, ki je nastal pod južnim pobočjem Snežnika 10. in 11. oktobra 2020. Do razlik lahko prihaja zaradi seizmičnega nemira, ki je v času potresa prisoten na opazovalnicah, tako civilizacijskega kot

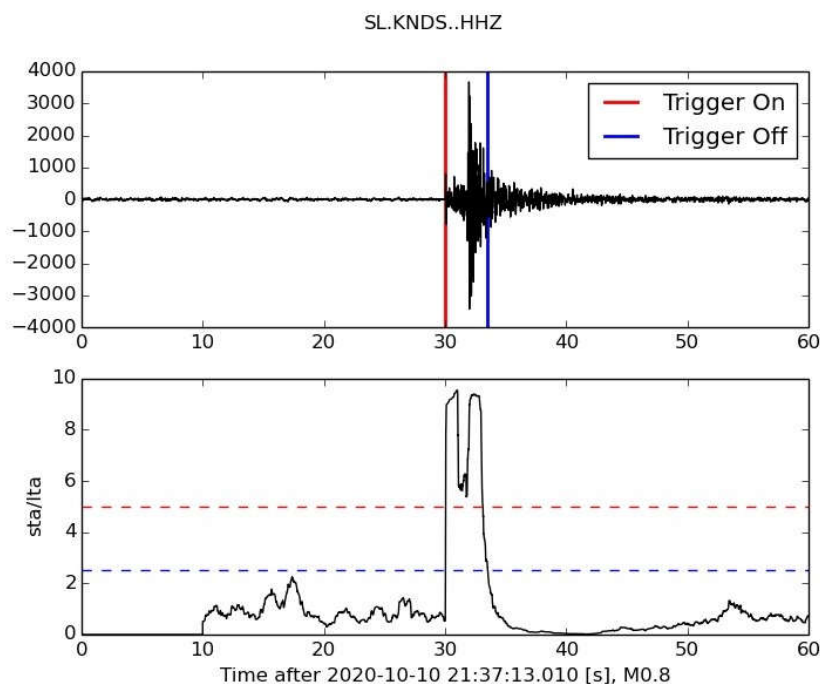
* Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

naravnega, ter zaradi razlik v magnitudah teh potresov. Pri manjših magnitudnih razlikah se oblika zapisa bistveno spremeni le v amplitudi, pri večjih magnitudnih razlikah, pa je opazna tudi sprememba oblike zapisa zaradi drugačne frekvenčne sestave valovanja. Na sliki 1 lahko vidimo, da so si zapisi zelo podobni in da do razlik prihaja predvsem v amplitudi.



Slika 1 – Seizmični zapisi izbranih podobnih potresov, ki so se zgodili pod južnim pobočjem Snežnika 10. in 11. oktobra 2020, zapisani na vertikalni komponenti opazovalnice KNDS. Za primerjavo smo prvi seizmični zapis rdeče izrisali tudi pri ostalih potresih. Seizmogrami so poravnani z označenim in izpisanim vstopnim časom vzdolžnega valovanja na potresno opazovalnico.

Takoj ko seizmični zapisi po računalniškem medmrežju pridejo v središče za obdelavo podatkov na sedež Urada za seizmologijo, jih zajamejo moduli programskega paketa Antelope (BRTT, 2020) in analizirajo z algoritmom STA/LTA. Gre za preprost algoritem, ki izračunava povprečno vrednost signala v krajšem časovnem oknu (ang. short term average – STA), npr. v 1 sekundi, in povprečno vrednost signala v daljšem časovnem oknu (ang. long term average – LTA), npr. v 10 sekundah. Povečano razmerje teh dveh vrednosti algoritem označi kot možen vstopni čas seizmičnega valovanja. Primer takšne detekcije vstopa potresnega valovanja na opazovalnico KNDS je prikazan na sliki 2. V primeru, da na različnih opazovalnicah najde več časovno usklajenih možnih vstopov, jih program skuša zložiti v dogodek. Zaradi računalniške nekritičnosti za končno določanje parametrov seizmolog te dogodke vedno tudi ročno pregleda in presodi ali gre za naravne ali umetno povzročene potrese.



Slika 2 – Primer uporabe STA/LTA algoritma za detekcijo potresa 10. oktobra 2020 ob 21:37 UTC z magnitudo 0,8 na vertikalni komponenti zapisa opazovalnice KNDS. Za detekcijo potresa smo uporabili parametre, ki jih na Uradu za seizmologijo uporabljamo pri samodejnem lociranju potresov v stvarnem času, in sicer 1 s za kratko časovno okno, 10 s za dolgo časovno okno, razmerje STA/LTA enako 5 za detekcijo in razmerje STA/LTA enako 2,5 za izklop detekcije.

Kot vsak računalniški algoritem ima tudi algoritem STA/LTA nekaj pomanjkljivosti. Težave ima z detekcijo predvsem šibkih potresov na opazovalnicah, kjer je prisotno veliko seizmičnega nemira. Obenem tudi ne zmore razločevanja med različnimi dogodki, npr. civilizacijskim nemirrom in potresi. Nekatere pomanjkljivosti lahko izboljšamo z dodatnimi zahtevami, ki jim mora algoritem zadostiti. Kljub pomanjkljivostim je njegov princip delovanja zelo preprost in časovno nepotraten, tako da je danes najpogosteje uporabljen algoritem za zaznavanje, posebej še pri obdelavi seizmičnih zapisov v stvarnem času.

V potresnem nizu se običajno poleg nekaj močnejših potresov zgodi tudi veliko šibkih. Amplitude zapisa so velikokrat primerljive amplitudam šuma, zato vstopne čase potresnega valovanja tako seizmolog kot STA/LTA algoritem težko prepoznata. Ker vemo, da so njihovi zapisi na posamezni opazovalnici podobni, lahko pri detekciji izberemo alternativno pot – navzkrižno korelacijo (ang. cross-correlation) – kjer merimo podobnost signalov. V primeru, da se v kratkem časovnem oknu ujemanje zgodi na več opazovalnicah, detekcije združimo v dogodek. Ta algoritem je uporabljen tudi za detekcijo potresov v stvarnem času, če imamo že pripravljen nabor vzorčnih potresov. Druga možnost je, da ga uporabimo takoj, ko pri analizi ugotovimo, da se je zgodil niz podobnih potresov. V nadaljevanju smo navzkrižno korelacijo uporabili na dveh potresnih nizih, predvsem z namenom, da odkrijemo zmožnosti in omejitve algoritma ter možnosti njegove uporabe.

Navzkrižna korelacija seizmičnih zapisov

Seizmično gibanje tal posnamemo z občutljivimi instrumenti in digitaliziramo, kar pomeni, da shranimo le vrednosti zajete v enakomernih časovnih razmikih. Posledično je neprekinjeno seizmično gibanje, $u(t)$, lahko izpisano le kot vektor N zaporednih merjenih vrednosti, $\mathbf{u}_{N,\Delta t}(t_0)$, kjer je t_0 čas prve zabeležene vrednosti, Δt pa čas med dvema zaporednima odčitkoma:

$$\mathbf{u}_{N,\Delta t}(t_0) = [u(t_0), u(t_0 + \Delta t) \dots u(t_0 + (N - 1)\Delta t)]^T.$$

Skalarni produkt med signaloma $\mathbf{u}_{N,\Delta t}(t_u)$ in $\mathbf{v}_{N,\Delta t}(t_v)$ je enak

$$\langle \mathbf{u}_{N,\Delta t}(t_u), \mathbf{v}_{N,\Delta t}(t_v) \rangle = \langle \mathbf{u}(t_u), \mathbf{v}(t_v) \rangle_{N,\Delta t} = \sum_{i=0}^{N-1} u(t_u + i\Delta t) v(t_v + i\Delta t).$$

Popolnoma normaliziran koeficient navzkrižne korelacije je tako definiran kot

$$C[\mathbf{u}(t_u), \mathbf{v}(t_v)]_{N,\Delta t} = \frac{\langle \mathbf{u}(t_u), \mathbf{v}(t_v) \rangle_{N,\Delta t}}{\sqrt{\langle \mathbf{u}(t_u), \mathbf{u}(t_u) \rangle_{N,\Delta t} \langle \mathbf{v}(t_v), \mathbf{v}(t_v) \rangle_{N,\Delta t}}}$$

Vrednost koeficienta C vedno leži v intervalu $[-1, 1]$ in predstavlja podobnost zabeleženih seizmičnih zapisov. Ekstremne vrednosti dosežemo le, če je prvi vektor popolnoma enak ali popoln večkratnik drugega. Pri beleženju potresov se to dejansko nikoli ne zgodi, zapisi so si vedno le bolj ali manj podobni, zato je prava vrednost vedno nekje vmes. Bližje nič je vrednost koeficienta C , slabše je ujemanje.

V nadaljevanju smo za iskanje podobnih seizmičnih zapisov z navzkrižno korelacijo uporabili Obspy funkcijo `obs.py.signal.cross_correlation.correlation_detector` (Beyreuther in sod., 2010; Megies in sod., 2011; Krischer in sod., 2015). Funkcija z vzorčnim zapisom potresa drsi po izbranem seizmičnem zapisu in išče potrese podobnih oblik. Poleg vsakega časa detekcije izpiše tudi vrednost, imenovano podobnost (ang. *similarity*). Pri korelaciji smo vedno primerjali signale zapisane na isti komponenti istega instrumenta. V drugem koraku vsem najdenim potresom natančneje določimo vstopne čase vzdolžnega valovanja. Dodamo še vstopni čas prečnega valovanja, če je zapis ob pričakovanem času podoben vzorčnemu zapisu. Odčitavanje vstopnih časov izvedemo z Obspy funkcijo `obs.py.signal.cross_correlation.xcorr_pick_correction` (Beyreuther in sod., 2010; Megies in sod., 2011; Krischer in sod., 2015). Vstopne čase valovanj, ki smo jih na ta način odčitali na bližnjih opazovalnicah zberemo v možne dogodke in jih lociramo s programom Hypocenter (Lienert in sod., 1988; Lienert, 1994). Tako dobimo nabor potresov, ki so seizmologu v pomoč pri analizi in določanju končnih parametrov potresov.

Analiza občutljivosti navzkrižne korelacije na nizu potresov pod južnim pobočjem Snežnika

Mreža prenosnih potresnih opazovalnic RI-SI-EPOS deluje v polni sestavi od 26. avgusta 2020 dalje. V tem času, do konca novembra 2020, ko smo to študijo izvedli, sta se na robnem območju mreže zgodila dva roja potresov. Najprej smo na primeru gruče, ki se je zgodila 10. in 11. oktobra 2020 v slovensko-hrvaškem obmejnem območju pod južnim pobočjem Snežnika, ugotavljali občutljivost metode na izbiro različnih parametrov.

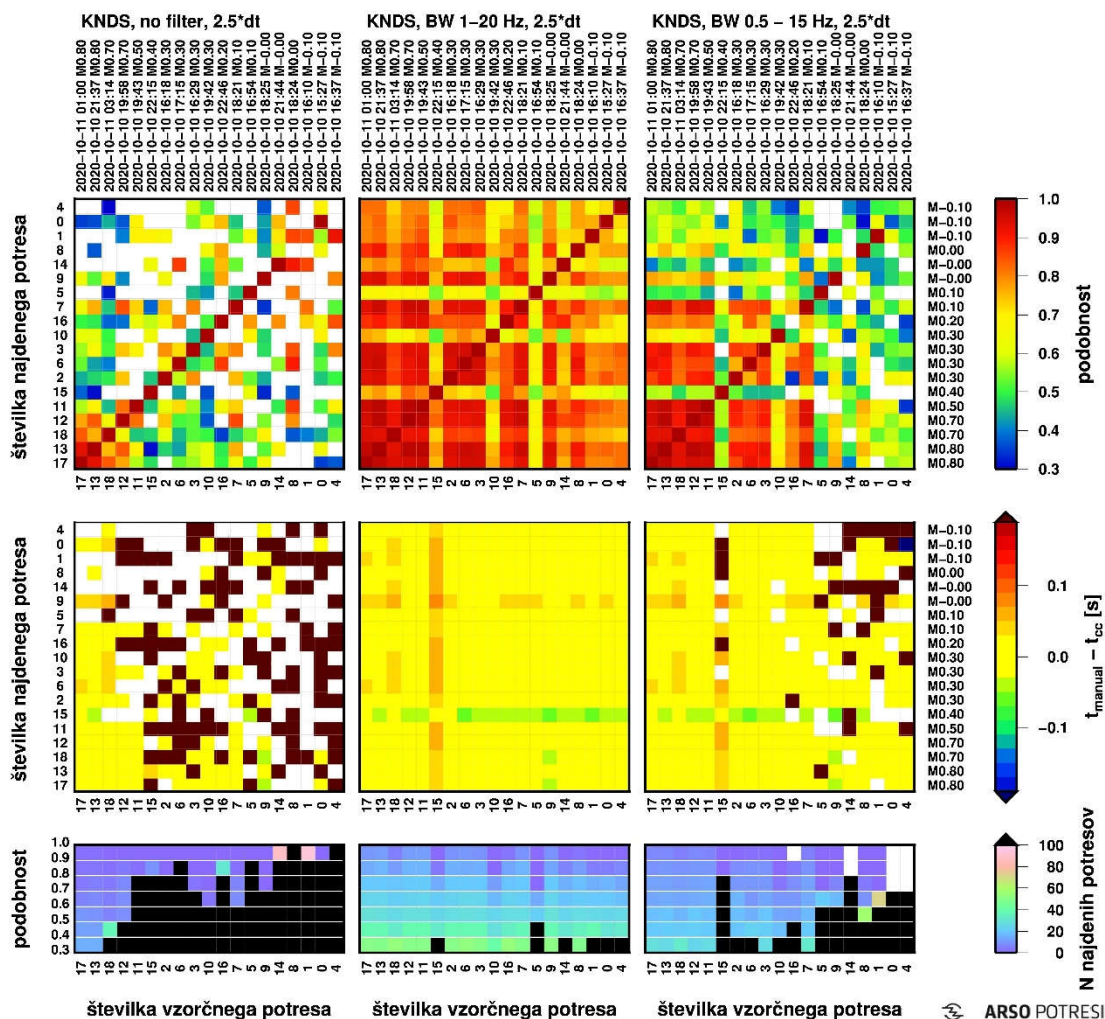
Potresni niz smo najprej analizirali tako, da smo vizualno pregledali celotne zapise izbranih dni na potresu bližnjih opazovalnicah ter našli in uspeli locirati 19 potresov z magnitudami med -0,1 in 0,8. Samodejni sistem opisan v uvodu, ki obdeluje seizmične zapise državne mreže potresnih opazovalnic v stvarnem času in za detekcijo uporablja STA/LTA algoritem, je uspel locirati 3 potrese najvišjih magnitud, to je 0,7 in 0,8.

Pri navzkrižni korelaciji najprej z izbranim vzorčnim potresom drsimo po celodnevni seizmični zapisih izbranih opazovalnic in iščemo podobne potrese. Iskanje izvedemo z Obspy funkcijo `obs.py.signal.cross_correlation.correlation_detector` (Beyreuther in sod., 2010; Megies in sod., 2011; Krischer in sod., 2015). Da bi spoznali vpliv različnih parametrov na uspešnost iskanja, smo izvedli nekaj občutljivostnih testov. Vsak potres v naboru 19 potresov je bil enkrat vzorčni potres, s katerim smo na seizmogramih 10. in 11. oktobra 2020 iskali podobne potrese. Najprej smo posameznemu vzorčnemu potresu poiskali seizmični zapis navpične komponente zapisane na potresom najbližji opazovalnici KNDS, katere žariščna razdalja do potresov je približno 7 kilometrov. Zapis vzorčnega potresa smo izbrali tako, da se je vedno začel 0,3 sekunde pred vstopom vzdolžnega valovanja na opazovalnico in končal po času 2,5-kratne časovne razlike med vstopom prečnega in vzdolžnega valovanja na opazovalnico.

Rezultati so prikazani na sliki 3, ki ima 9 diagramov. Posamezni stolpci ustrezajo enemu iskanju potresov z navzkrižno korelacijo, z drugimi besedami različni stolpci ustrezajo navzkrižni korelaciji z različnimi iskalnimi parametri. Na sliki 3 je v levem stolpcu prikazan rezultat navzkrižne korelacije, ki smo jo izvedli na nefiltriranem zapisu. V srednjem stolpcu je iskanje potresov narejeno na seizmičnih zapisih filtriranih s širokopasovnim filtrom, propustnim za frekvence med 1 Hz in 20 Hz. V desnem stolpcu pa so pri navzkrižni korelaciji seizmični zapisi filtrirani s širokopasovnim filtrom, propustnim za frekvence med 0,5 Hz in 15,0 Hz. Zgornji diagram posameznega stolpca prikazuje podobnost med izbranim vzorčnim potresom (abscisna os) in najdenimi potresi (ordinatna os). Srednji diagram prikazuje časovno razliko med časom vstopa vzdolžnega valovanja na opazovalnico z navzkrižno korelacijo najdenega potresa in časom vstopa, ki smo ga odčitali ročno za isti potres. Spodnji diagram pa prikazuje skupno število podobnih potresov, ki jih je algoritem navzkrižne korelacije našel za posamezni vzorčni potres, nad pragom podobnosti. Natančneje, prvi stolpec zgornjih in osrednjih diagramov primerja izbrano vrednost med vzorčnim potresom magnitude 0,8, ki je nastal 11. 10. 2020 ob 01:00 UTC in vsakim potresom v nizu. Vsak naslednji stolpec predstavlja rezultat, ki smo ga dobili, ko smo za vzorčni potres izbrali naslednjega v nizu z enako ali nižjo magnitudo. Stolpci spodnjega diagrama pa predstavljajo število najdenih potresov pri izbranem vzorčnem potresu.

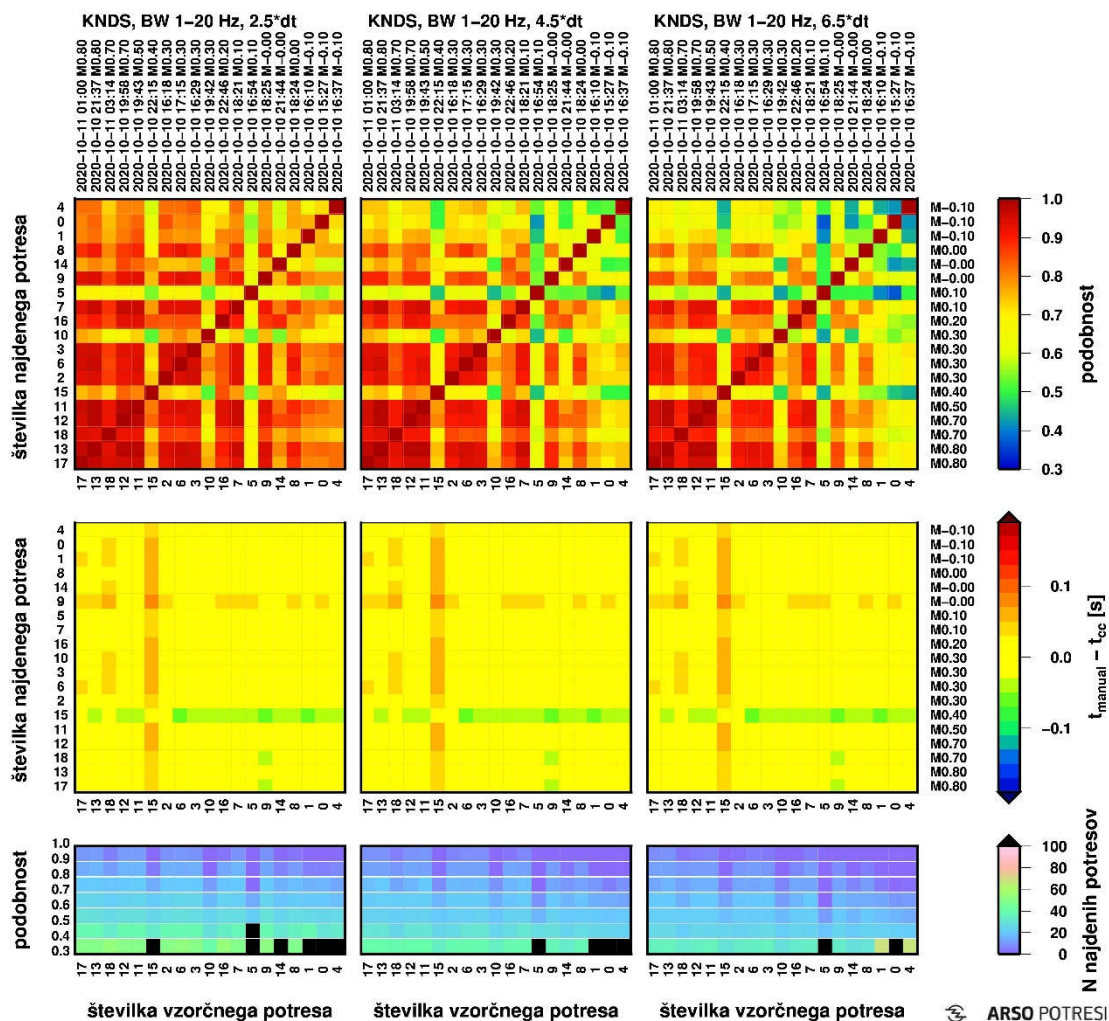
Najprej si oglejmo zgornje diagrame slike 3, ki prikazujejo podobnost. Potresi so razvrščeni po magnitudi, oštevilčeni pa so po času nastanka. Belo obarvana območja predstavljajo primere, ko algoritem ni prepoznal podobnosti tega potresa z vzorčnim potresom. Vidimo, da smo s prvim nefiltriranim vzorčnim zapisom našli 13 potresov, pet smo jih spregledali. S šibkejšimi vzorčnimi potresi smo bili vse manj uspešni v prepoznavanju podobnih potresov. Pričakovali bi, da z izbranim vzorčnim potresom vedno najdemo taisti potres, vendar temu ni tako. Za vsakim najdenim vzorcem algoritem naredi preskok – v našem primeru 7-sekundni – in išče dalje po seizmičnem zapisu. Pri zelo šibkih potresih, ko je detekcij zelo veliko, se zgodi, da algoritem najde pred vzorčnim potresom detekcijo in lasten vzorec preskoči (diagrama slike 3 desno in levo zgoraj). Najuspešnejši v iskanju potresov z navzkrižno korelacijo smo bili, ko smo seizmične zapise predhodno filtrirali s širokopasovnim filtrom, propustnim za frekvence med 1 Hz in 20 Hz (diagrami v srednjem stolpcu slike 3). Z vsakim potresom v naboru smo našli tudi vse ostale. Obenem lahko iz diagramov vidimo, da je podobnost med potresi večja in s tem detekcija zanesljivejša, če za vzorčni potres izberemo potres višje magnitude, seveda je razpon

magnitud v potresnem nizu manjši od 1,0. Preizkusili smo tudi druge filtre, vendar je bil ta najustrežnejši tako za opazovalnico KNDS, kot tudi za ostale potresne opazovalnice.



Slika 3 – Diagrami zgornje vrste predstavljajo podobnost med 19 potresi v potresnem nizu pod južnim pobočjem Snežnika 10. in 11. oktobra 2020. Potresi so označeni z zaporedno številko kot so se zgodili v času, v diagramu pa so razporejeni po magnitudi. Na abscisni osi so razporejeni vzorčni potresi, na ordinatni osi pa najdeni potresi. Parametri potresa so izpisani nad zgornjimi diagrami in ustrezajo številkam vzorčnega potresa v stolpcu.

Najdeni potresi so razporejeni po istem vrstnem redu in njihove številke ustrezajo številkam vzorčnih potresov. Belo polje pomeni, da potres pri izbranem vzorčnem potresu ni bil najden. Diagrami srednje vrste predstavljajo časovno razliko med vstopom vzdolžnega valovanja na opazovalnico KNDS odčitane ročno oz. z navzkrižno korelacijo. Barvo večjih vrednosti označuje rjava barva, manjših pa temno modra. Diagrami spodnje vrste predstavljajo skupno število podobnih potresov, ki jih je algoritem navzkrižne korelacije našel, za posamezni vzorčni potres nad pragom podobnosti. Črna barva predstavlja vrednosti večje od 100. Pri izračunu so bili seizmični zapisi v levem stolpcu nefiltrirani; v srednjem stolpcu filtrirani s pasovno propustnim filtrom v frekvenčnem območju 1,0 – 20,0 Hz; v desnem stolpcu filtrirani s pasovno propustnim filtrom v frekvenčnem območju 0,5 Hz – 15,0 Hz.



Slika 4 – Diagrami zgornje vrste predstavljajo podobnost med 19 potresi v potresnem nizu pod južnim pobočjem Snežnika 10. in 11. oktobra 2020. Potresi so označeni z zaporedno številko kot so se zgodili v času, v diagramu pa so razporejeni po magnitudi. Na abscisni osi so razporejeni vzorčni potresi, na ordinatni osi pa najdeni potresi. Parametri potresa so izpisani nad zgornjimi diagrami in ustrezajo številkam vzorčnega potresa v stolpcu.

Najdeni potresi so razporejeni po istem vrstnem redu in njihove številke ustrezajo številkam vzorčnih potresov. Diagrami srednje vrste predstavljajo časovno razliko med vstopom vzdolžnega valovanja na opazovalnico KNDS odčitane ročno oz. z navzkrižno korelacijo. Barvo večjih vrednosti označuje rjava barva, manjših pa temno modra. Diagrami spodnje vrste predstavljajo skupno število podobnih potresov, ki jih je algoritem navzkrižne korelacije našel za posamezni vzorčni potres nad pragom podobnosti. Črna barva predstavlja vrednosti večje od 100. Pri izračunu so bili seizmični zapisi filtrirani s pasovno propustnim filtrom v frekvenčnem območju 1,0 Hz – 20,0 Hz. Za vzorčni potres smo vzeli seizmogram z začetkom 0,3 sekunde pred vstopom longitudinalnega seizmičnega valovanja na opazovalnico in koncem v levem stolpcu) po 2,5-kratniku razlike med vstopom prečnega in longitudinalnega valovanja na potresno opazovalnico, to je $2,5 \cdot \Delta t$; v srednjem stolpcu $4,5 \cdot \Delta t$; v desnem stolpcu $6,5 \cdot \Delta t$.

Srednja vrsta diagramov slike 3 prikazuje časovno razliko med časom vstopa vzdolžnega valovanja na opazovalnico z navzkrižno korelacijo najdenega potresa in časom vstopa, ki smo ga odčitali ročno za isti potres. Rumena barva predstavlja časovne razlike manjše od 0,04 sekunde. Srednji diagram, ki ustreza filtriranju seizmičnih zapisov s širokopropustnim filtrom za frekvence 1 - 20 Hz, je skoraj v celoti rumen, kar pomeni, da je primerljivost odčitkov navzkrižne korelacije z ročno odčitanimi vstopnimi časi zelo dobra.

Spodnja vrsta diagramov predstavlja skupno število potresov, ki smo jih našli za posamezen vzorčni potres nad izbranim pragom podobnosti. Ta prag ne sme biti previsok, ker lahko s tem izgubimo šibke potrese ali potrese, kjer je na opazovalnici visok nivo šuma. Obenem pa z nižanjem te vrednosti, število vseh detekcij skokovito narašča, posebej če za vzorčni potres vzamemo šibek potres. Polja, kjer je število najdenih detekcij za vzorčni potres nad ali z izbrano vrednost podobnosti nad 100, so obarvana črno. Tudi tokrat dobimo najboljši rezultat v primeru, kjer seizmične zapise pred navzkrižno korelacijo filtriramo s širokopasovnim filtrom propustnim za frekvence med 1,0 Hz in 20,0 Hz.

Pri naslednjem testu smo navzkrižno korelacijo naredili na zapisih filtriranih s širokopasovnim filtrom propustnim za frekvence med 1,0 Hz in 20,0 Hz. Spreminjali smo le dolžino seizmičnega zapisa vzorčnega potresa. Vzorčni zapis smo vedno začeli 0,3 sekunde pred vstopom vzdolžnega valovanja na potresno opazovalnico, zaključili pa smo ga glede na časovno razliko med vstopom vzdolžnega in prečnega valovanja na izbrano potresno opazovalnico, označeno Δt . Preizkusili smo navzkrižno korelacijo z različno dolgimi vzorčnimi zapisi. Rezultati so predstavljeni na diagramih slike 4 po isti analogiji kot je narejena slika 3. Levi stolpec diagramov predstavlja rezultat navzkrižne korelacije, kjer smo za vzorčni potres vzeli $2,5 \cdot \Delta t$ dolg zapis, srednji stolpec $4,5 \cdot \Delta t$ dolg zapis in desni stolpec $6,5 \cdot \Delta t$ dolg zapis vzorčnega potresa. Vidimo lahko, da se podobnost z daljšanjem vzorca nekoliko zmanjša, medtem ko so razhajanja v časih vstopov vzdolžnega valovanja med ročnimi odčitki in odčitki z navzkrižno korelacijo primerljiva. Število najdenih vzorcev pa se z daljšanjem vzorca zmanjšuje. Preizkusili smo tudi krajše vzorce, vendar se je zmožnost iskanja potresov na vzorcu krajšem od $2 \cdot \Delta t$ bistveno poslabšala. Na podlagi rezultatov smo se odločili, da bomo za dolžino vzorčnega zapisa potresa vzeli 2,5-kratnik Δt .

Iskanje potresov z navzkrižno korelacijo

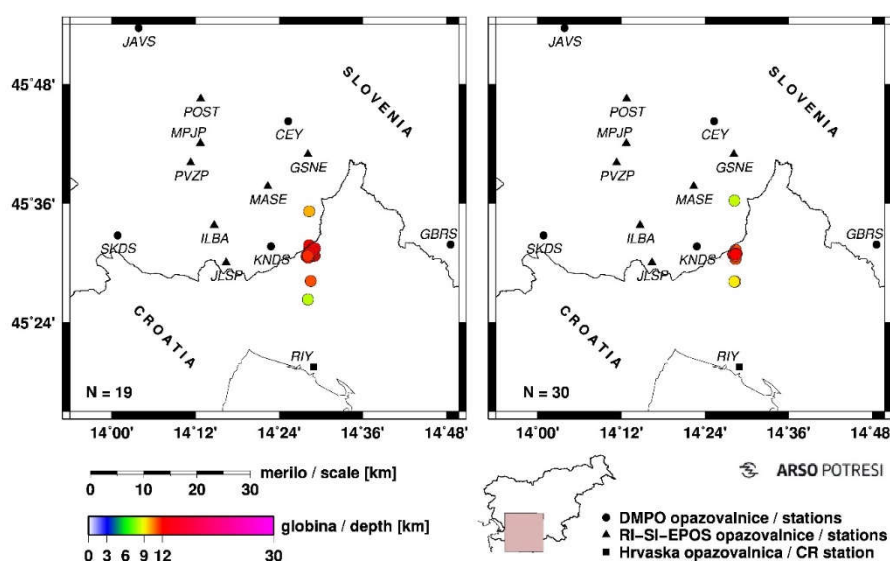
V nadaljevanju smo na obeh gručah potresov, ki smo ju v času delovanja RI-SI-EPOS mreže zabeležili, preizkusili novo orodje.

Z navzkrižno korelacijo seizmičnih zapisov smo najprej iskali potrese v gruči, ki se je zgodila 10. in 11. oktobra 2020 pod južnim pobočjem Snežnika. Za vzorčni potres smo vzeli potres najvišje magnitude 0,8, ki se je zgodil 10. oktobra 2020 ob 21.37 uri po UTC. Potres 11. oktobra 2020 ob 1.00 UTC je kljub enaki magnitudi nekoliko šibkejši, kar nam pokaže primerjava zapisov na sliki 1. Potres smo predhodno zelo skrbno in natančno analizirali. Seizmične signale navpične komponente osmih najbližjih opazovalnic, to je KNDS, GSNE, GBRs, JLSP, SKDS, MASE, RIY in CEY, smo pred analizo filtrirali s pasovno propustnim filtrom za frekvenčno območje 1,0 Hz – 20,0 Hz. Z navzkrižno korelacijo smo nato poiskali podobne zapise potresov na posameznih opazovalnicah.

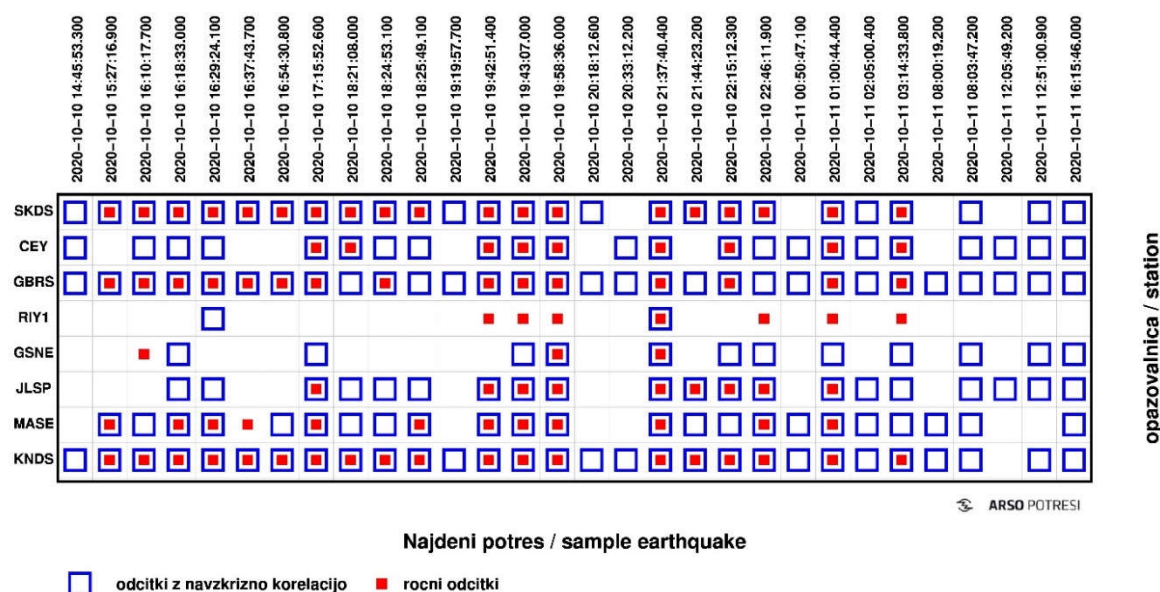
V drugem koraku smo najdenim podobnim zapisom na posamezni opazovalnici skušali odčitati še vstopne čase vzdolžnega in prečnega valovanja. Pri tem smo uporabili Obspy funkcijo `obs.py.signal.cross_correlation.xcorr_pick_correction` (Beyreuther in sod., 2010; Megies in sod., 2011; Krischer in sod., 2015), s katero smo primerjali zelo kratek odsek seizmičnega zapisa vsakega najdenega potresa z ustreznim zapisom vzorčnega ob času vstopa vzdolžnega valovanja na opazovalnico. Na enak način smo primerjali zapise

vzorčnega potresa in najdenega ob pričakovanem vstopu prečnega valovanja na opazovalnico. Vstopni čas smo odčitali, če je bila podobnost seizmičnih zapisov višja od vrednosti 0,3. Vse odčitane čase smo združili v dogodke in te locirali s programom Hypocenter (Lienert in sodelavci, 1988; Lienert, 1994). Tako smo dobili 30 potresov, ki so se zgodili na vsaj treh opazovalnicah, poleg vseh ročno že analiziranih še dodatnih 11. Slika 5 levo prikazuje rezultat ročne analize dogodkov, na desni pa je prikazan rezultat navzkrižne korelacije. Vsi potresi, razen treh (en potres severno in dva južno), katerih lokacije so bile določene le s tremi opazovalnicami, so se strnile v osrednjo gručo na globini približno 12 kilometrov. Vzorčni potres se nahaja v osrednji gruči 27-ih potresov.

Odčitani vstopni časi ročne analize in analize navzkrižne korelacije so v diagramu slike 6 označeni za vsak posamezni potres in opazovalnico. S primerjavo lahko ugotovimo, kateri odčitki so se izmuznili seizmologu in kateri računalniškemu algoritmu.

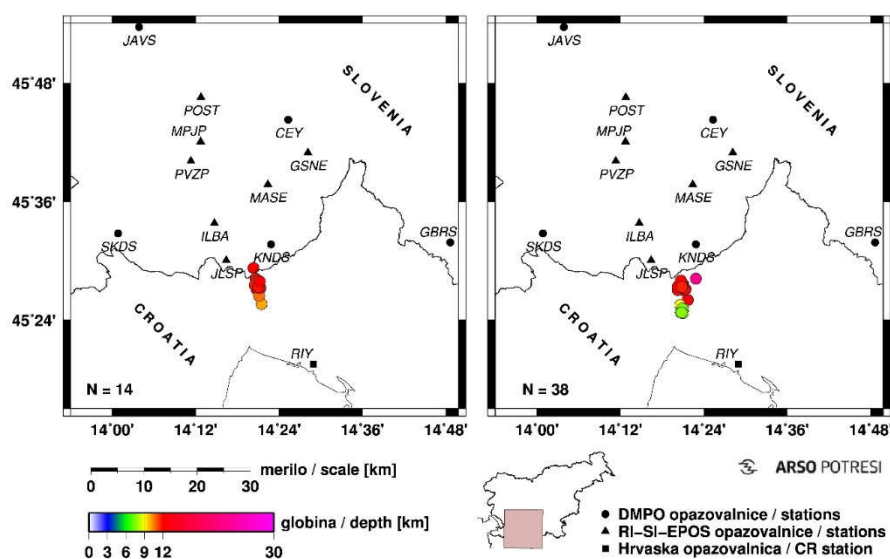


Slika 5 – Potresi 10. in 11. oktobra 2020 na južnem pobočju Snežnika analizirani ročno (levo) in z navzkrižno korelacijo (desno). Na levi karti je 19 potresov, na desni pa 30.



Slika 6 – Vsaj en odčitani vstop potresnega valovanja na bližnjih opazovalnicah za posamezne potrese, ki smo jih našli z navzkrižno korelacijo in uspeli locirati (slika 5). Rdeči kvadratici predstavljajo ročne odčitke, modri pa odčitke z navzkrižno korelacijo.

Uporabnost orodja smo preizkusili še na gruči podobnih potresov, ki se je zgodila od 12. do 19. novembra 2020 jugovzhodno od Jelšan (slika 7 desno). Za vzorčni potres, s katerim smo primerjali podobnost seizmičnih zapisov izbranih dni, smo izbrali najmočnejši potres v gruči. Ta se je zgodil 12. novembra 2020 ob 20.09 UTC in je imel magnitudo 1,4. Seizmolog je z analizo seizmogramov našel in lociral 14 potresov (slika 7 levo). Z navzkrižno korelacijo pa smo našli 38 potresov (slika 7 desno). Gruča najdenih potresov na sliki je nekoliko razpršena, vendar če bi odstranili lokacije določene le s tremi opazovalnicami, bi nam ostala le osrednja, strnjena gruča 25-ih potresov na globini približno 12 kilometrov. Lokacije potresov, ki so določene le z odčitki treh opazovalnic so najverjetneje odmaknjene od gruče predvsem zaradi neustreznega hitrostnega modela ter ne najboljše geometrije mreže opazovalnic, saj vse opazovalnice ležijo severno od gruče. Opazovalnica RIY, ki edina beleži seizmičnost južno od gruče in bi tako lahko lokacije stabilizirala, je postavljena v seizmično zelo nemirno okolje, zaradi česar amplitude šibkih potresov postanejo primerljive ali manjše od amplitud šuma. Tako vstopnih časov valovanja na opazovalnici RIY tudi z navzkrižno korelacijo nismo uspeli odčitati. Kljub temu smo bili pri iskanju potresov zelo uspešni, saj smo v obeh primerih našli vse potrese, ki jih je predhodno analiziral seizmolog, poleg tega pa še številne šibkejške. Nabora najdenih potresov, ki smo jih našli z navzkrižno korelacijo, sta tako pripravljena, da ju seizmolog pregleda in kritično ovrednoti.



Slika 7 – Potresi od 12. do 19. novembra 2020 jugovzhodno od Jelšan analizirani ročno (levo) in z navzkrižno korelacijo (desno). Na levi karti je 14 potresov, na desni pa 38.

Obe gruči potresov sta se zgodili na robu mreže opazovalnic RI-SI-EPOS. Študija je bila narejena na teh dveh primerih zato, ker sta bili to edini gruči potresov, ki sta se od avgusta do novembra 2020 (do izvedbe študije) zgodili na raziskovanem območju. Primera lepo pokažeta, kako pomembna je gosta mreža opazovalnic, saj smo zelo uspešno našli številne zelo šibke potrese. Kljub temu, pa smo v obeh primerih imeli nekoliko težav z lociranjem potresov, ker opazovalnice niso zadovoljivo obkrožale gruč, temveč so bile postavljene severno od njih. S postavitvijo mreže potresnih opazovalnic RI-SI-EPOS pričakujemo

zanesljivejše opredeljevanje potresnih parametrov na raziskovanem območju. Pri tem sta ključna dejavnika zadostna bližina potresnih opazovalnic, ki omogoča beleženje šibkih potresov, in geometrija mreže, ki zagotavlja, da bo potresno nadžarišče vedno obkroženo z opazovalnicami.

Zaključek

Predstavili smo metodo navzkrižne korelacije seizmičnih zapisov za iskanje podobnih potresov, ki smo jo uporabili na dveh rojih šibkih potresov, prvi se je zgodil 10. in 11. oktobra 2020 pod južnim pobočjem Snežnika, drugi med 12. in 19. novembrom 2020 jugovzhodno od Jelšan. Četudi sta bila roja potresov na robu lokalne mreže, torej ne idealna učna primera, smo uspešno našli vse potrese, ki jih je predhodno lociral že seizmolog, poleg tega pa še vrsto šibkejših potresov. Z lociranjem smo imeli nekaj težav, ker so se gručice potresov zgodile na robu mreže opazovalnic. Za raziskovano območje znotraj mreže RI-SI-EPOS teh težav ne pričakujemo, ker bo potres vedno obkrožen z vsaj nekaj opazovalnicami.

Orodje, ki smo ga pripravili, da z navzkrižno korelacijo išče potrese, lahko uporabimo vedno, ko seizmolog pri analizi prepozna roj ponavljajočih potresov na območju mreže RI-SI-EPOS. Obetamo si, da bomo z zanesljivejšim lociranjem šibkih, a številnih potresov lažje opredeljevali aktivne dele prelomnih struktur.

Zahvala

V študiji smo uporabili seizmične zapise opazovalnic lokalne mreže postavljene v okviru raziskovalnega projekta RI-SI-EPOS (RI-SI-EPOS, 2018; Šebela in sod., 2021). Seizmične zapise hrvaške opazovalnice RIY smo pridobili v okviru Mednarodnega sporazuma o izmenjavi seizmoloških podatkov v stvarnem času na področju Alpe-Jadran v okviru Srednje in vzhodno evropske mreže za raziskave potresov CE³RN (2020). Slike 3, 4, 5, 6 in 7 smo izdelali s programom GMT (Wessel in Smith, 1991, 1998).

Literatura

- Beyreuther, M., Barsch, R., Krischer, L., Megies, T., Behr, Y. and Wassermann, J. (2010). ObsPy: a python toolbox for seismology. *Seismol. Res. Lett.* (2010) 81 (3), 530-533. DOI: <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.3.530>
- BRTT, Boulder Real Time Technologies, inc. (online) (2020). Antelope Real Time System. <http://www.brtt.com/> (9. 12. 2020)
- CE³RN, The Central and Eastern European Earthquake Research Network (2020). <http://www.ce3rn.eu/> (10. 12. 2020)
- Čarman, M., Jesenko, T., Šebela, S., Zupančič, P., Birko., D., Živčič, M., 2021. Mreža prenosnih potresnih opazovalnic RI-SI-EPOS jugovzhodno od Postojne. V: Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2020: zbornik predavanj, 26. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Krischer, L., Megies, T., Barsch, R., Beyreuther, M., Lecocq, T., Caudron, C., and Wassermann, J. (2015). ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem. *Computational Science & Discovery*, 8 (1), 014003. DOI: <https://doi.org/10.1088/1749-4699/8/1/014003>
- Lienert, B. R. (1994). Hypocenter 3.2 - A Computer Program for Locating Earthquakes Locally, Regionally and Globally, Hawaii Institute of Geophysics & Planetology, Honolulu, 70 pp.
- Lienert, B. R., Berg, E., Frazer, L. N. (1988). Hypocenter: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively least squares. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 771-783.

- Megies, T., Beyreuther, M., Barsch, R., Krischer, L., and Wassermann, J. (2011). ObsPy - What can it do for data centers and observatories? *Annals of Geophysics*, 54 (1). DOI: <https://doi.org/10.4401/ag-4838>
- RI-SI-EPOS (2018). <https://izrk.zrc-sazu.si/sl/programi-in-projekti/ri-si-epos#v> (4.12.2020)
- Šebela, S. (2021) Raziskovalna infrastruktura RI-SI-EPOS na področju krasoslovja. V: Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2020: zbornik predavanj, 26. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Šebela, S., Tasič, I., Živčič, M., Mali, M., Krebelj, M., Čeligoj, J., Pančur, L., Pahor, J., Čarman, M., Zupančič, P. in Gosar, A. (2021). Mreža prenosnih potresnih opazovalnic RI-SI-EPOS jugovzhodno od Postojne. [Postojna: ZRC SAZU, Inštitut za raziskovanje krasa]. https://izrk.zrc-sazu.si/sites/default/files/prenosne_potresne_opazovalnice_a3_format.pdf (18. 12. 2020)
- Vidrih, R., Sinčič, P., Tasič, I., Gosar, A., Godec, M., Živčič, M. (2006). Državna mreža potresnih opazovalnic = Seismic network of Slovenia. Ur. Vidrih, R. Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, 287 p.
- Wessel, P. in Smith, W.H.F. (1998). New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, Vol. 79, 579 p..
- Wessel, P., Smith, W. H. F. (1991). Free software helps map and display data, *Eos, Trans. Amer. Un.*, Vol. 72 (441), 445-446.

Georeferenciranje terestričnega laserskega skeniranja z naravnimi tarčami: primer lednega plezališča v Mlačci

Polona Pavlovčič Prešeren², Miha Pajnič^{**}, Tomaž Ambrožič^{*}, Aleš Marjetič^{*}

Povzetek

V prispevku obravnavamo primernost uporabe naravnih tarč za georeferenciranje podatkov terestričnega laserskega skeniranja na območju težavne izvedbe postavitve umetnih tarč. V lednem plezališču Mlačca v Mojstrani smo opravili izmero v dveh različnih terminih zajema oblakov točk, da bi na primeru določili postopek izvedbe in obdelave meritev za spremljanja debeline ledne stene. V danem primeru smo se omejili na opredelitev kakovosti georeferenciranja na podlagi izbranih ploskovnih elementov v zajetih skenogramih posamezne izmere. Za to smo uporabili metodo ujemanja oblakov točk »Cloud to cloud« in metodo primerjave parametrov z izravnavo ravnin iz množice zajetih točk dveh izmer. Iz prvih izkušenj ter pridobljenih rezultatov izmere v težavnih pogojih je najbolj očiten problem v soteski slaba geometrijska razporeditev oslonilnih točk (naravnih tarč) za registracijo in georeferenciranje. Zato bi bilo smiselno na danem območju vzpostaviti in trajno stabilizirati geodetsko mrežo točk, da bi lahko v nadaljevanju izmere zagotovili boljšo registracijo s pomočjo umetnih tarč.

Ključne besede: georeferenciranje, registracija, naravne tarče, oslonilne točke

Keywords: georeferencing, registration, natural targets, control points

Uvod

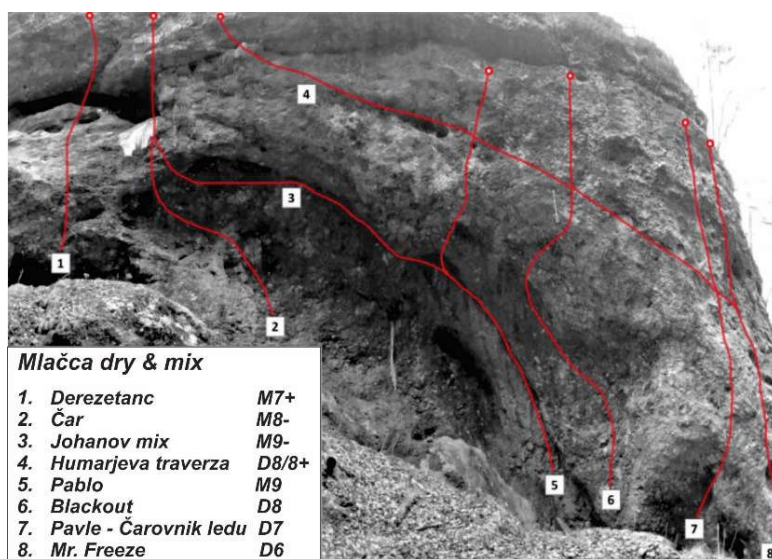
Terestrično lasersko skeniranje (TLS) nam kot tehnologija celovitega zajemanja prostorskih podatkov omogoča, da lahko hitro in enostavno pridobimo veliko količino podatkov o prostoru. Poleg hitrosti, natančnosti in možnosti zajema ogromne količine podatkov je ključno, da lahko določimo položaje objektom na težko dostopnih mestih. Če oblake točk za isto območje pridobimo v več zaporednih izmerah, lahko modeliramo spremembe oziroma deformacije naravnih ter zgrajenih objektov. Tehnologijo TLS so za modeliranje sprememb v prostoru uporabili že v številnih raziskavah (Carrivick et al., 2013; Blasone et al., 2014; Vericat et al., 2014; Bezak et al., 2017). V danem primeru smo prednosti TLS želeli uporabiti za izdelavo modela in spremljanje debeline ledu v lednem plezališču Mlačca v Mojstrani v zimi 2019/2020. Prvotni namen je bil spremljati debelino ledu v fazi nastajajoče ledne stene. Vendar so bili v tej zimi pogoji tako neugodni, da se je po drugi izmeri v januarju 2020 komaj nastali led že začel taliti. Kljub temu nam je uspelo pridobiti izkušnje, ki bodo osnova za izboljšavo izmere in modeliranja ledne stene v prihodnjih zimah.

Ledno steno v soteski Mlačca izdelujejo člani *Društva lednih plezalcev Mojstrana*. Podrobnejše informacije o stanju lednega plezališča lahko najdemo na njihovi spletni strani (www.lednoplezanje.com). Težavnost smeri št. 8 (slika 1) je leta 2016 ocenila plezalka

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

^{**} GeoTočka d. o. o., Tehnološki park 24, 1000 Ljubljana

Nadja Korinšek, težavnost preostalih smeri pa plezalec Vili Guček. Eden od ciljev našega dela je bil, da izdelamo podrobnejši 3D-prikaz previsov na steni, ki bi ga lahko plezalci uporabili za virtualno izboljšavo trenutne ocene smeri.



Slika 1: Stena v Mlačci s smermi ter ocenami težavnosti (vir: www.lednoplezanje.com).

V soteski je nameščanje tarč na stene težavno, zato smo se odločili za registracijo in georeferenciranje na osnovi izbranih naravnih tarč (objektov). Večinoma tak pristop ne da najboljših rezultatov, zato smo morali oceniti, ali so naravne tarče v soteski primerne za registracijo in georeferenciranje. Za spremljanje debeline ledene stene namreč potrebujemo enolično georeferencirane skenograme več terminskih zaporednih izmer. Kontrolo kakovosti georeferenciranja s pomočjo naravnih tarč smo izvedli s pomočjo izbranih ploskovnih elementov in območij, ki so predstavljala enako površino v zajetih skenogramih. Za ugotavljanje morebitnega nekakovostnega georeferenciranja skenogramov smo z metodo »Cloud to cloud« (v nadaljevanju C2C) primerjali parametre izravnanih ravnin iz množice zajetih točk.

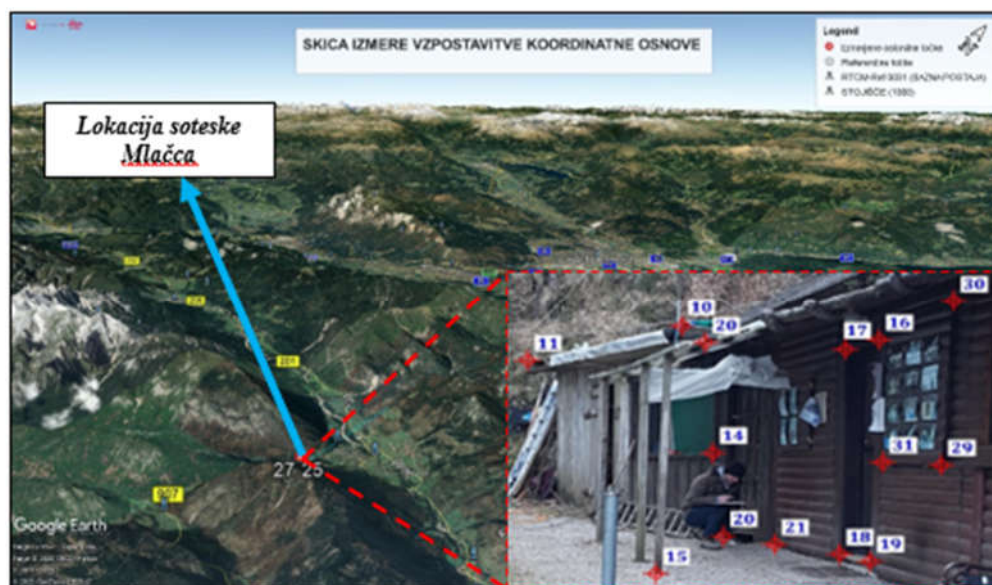
Z geodetskega in merskega stališča je bil glavni namen raziskave oceniti uspešnost metode fine registracije oblaka točk za ustvarjanje tridimenzionalne osnove za spremljanje debeline ledne stene z uporabo podatkov TLS. Za natančno prilagajanje skenogramov v več časovnih izmerah in določitev morebitnega premika zaradi napačnega georeferenciranja smo uporabili (a) metodo ocene oddaljenosti med dvema skenogramoma in (b) metodo iterativnega določevanja najbližje točke (angl. *Iterative Closest Point*).

Terenska izmera

Terensko izmero v soteski smo naredili dvakrat. Prva je potekala v juliju 2019 in druga v januarju 2020, ko je bila plezalna stena obdana z ledom. Izmero v januarju smo izvedli v času, ko je bil led trenutne zime najdebelejši, a je imel v tej zimi veliko manjši obseg kot običajno. V zimi 2020 je bila količina ledu tako skromna, da se v plezališču zaradi varnosti niso izvajale športne aktivnosti.

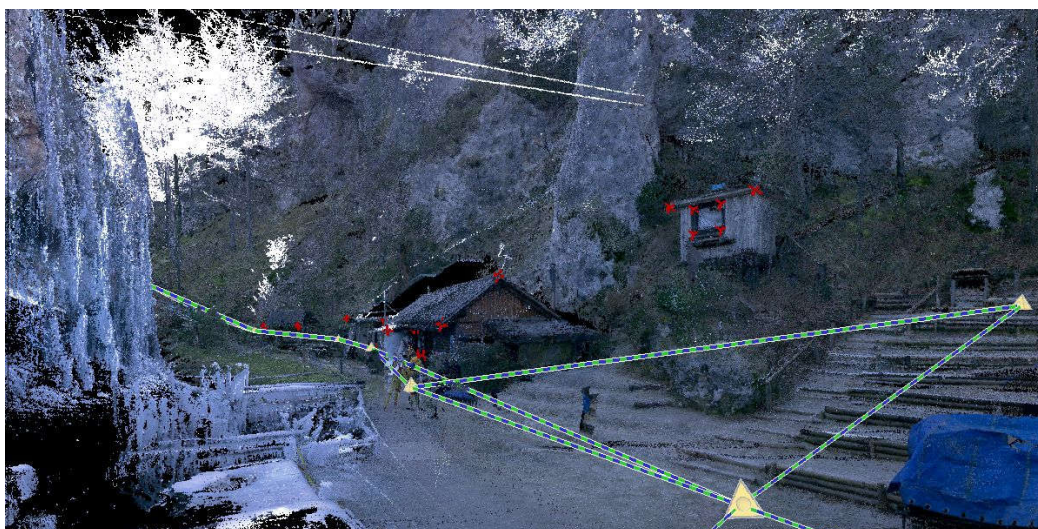
Za skeniranje soteske smo zaradi priročnosti uporabili terestrični laserski skener BLK360 proizvajalca Leica Geosystems AG (Heerbrugg, Švica), ki z dosegom 60 m omogoča izvedbo skeniranja v obravnavanem primeru. Da smo lahko zajeli podatke celotnega območja, smo skenirali z več stojišč in oblake točk nadalje s postopki registracije in

georeferenciranja skušali vklopiti v državni koordinatni sistem D96-17/TM. Državni sistem smo uporabili zato, da bi lahko rezultate skeniranja primerjali z drugimi podatki množičnega zajema prostorskih podatkov. Za oba termina izmer je bilo potrebno določiti enoten geodetski datum in vzpostavili izhodišče za nadaljnje analize različnih izmer.



Slika 2: Skica nekaterih točk detajla, ki smo jih uporabili pri georeferenciranju skenogramov.

Za registracijo in georeferenciranje smo uporabili značilne točke lesenih zgradb v soteski. Signalizaciji oslonilnih točk z umetnimi tarčami smo se izognili zato, ker nismo želeli fizično posegati v prostor. Na terenu smo določili položaj večjega števila točk, kot so detajli lesenih objektov v soteski (robovi oken, vrat, slemena strehe, robovi, kjer se stika več različnih ploskev). Položaj oslonilnih točk smo določili s kombinirano GNSS in tahimetrično izmero v državnem koordinatnem sistemu D96-17/TM. Sliki 2 in 3 prikazujeta lokacije nekaterih oslonilnih točk na območju enostavnih objektov ob plezalni steni.



Slika 3: Prikaz lokacij oslonilnih točk na skenogramu druge izmere.

Obdelava meritev

Za registracijo in georeferenciranje posameznih stojišč v skupni izbrani koordinatni sistem smo uporabili program *Leica Cyclone REGISTER 360*. Ker so zajeti skenogrami vsebovali tudi vegetacijo in druge objekte, ki nas niso zanimali, smo območje stene, ki jo v zimskem času obda ledena plast, najprej grobo obrezali. Sledila je fina filtracija podatkov, da bi določili le točke s površja stene. Ta točke razvršča na talne in ne-talne, ki ne predstavljajo dejanskega terena. Za lokacijo izbranega ploskovnega elementa smo filtracijo naredili s pomočjo algoritma »soglasje naključnih vzorcev« (angl. *Random Sampling Consensus* – RANSAC) (Fischler in Bolles, 1981; Urbančič et al., 2014; Urbančič et al., 2016). Gre za algoritem razpoznavanja točk iz oblaka točk, ki pripadajo telesu z opisljivo geometrijo.

V danem primeru smo iz oblaka točk izbrali naključne tri točke iz oblaka in z njimi definirali ravnino. Na osnovi izračunane ravnine je algoritem določil, katere in koliko točk je na tej ravnini ter koliko so ostale točke od ravnine oddaljene. Na ta način smo dobili oblak točk, ki je vseboval največje število točk na podlagi predhodno izbranih parametrov.

S slike 3 je razvidno, da je bila večina oslonilnih točk le ob objektih na desni strani soteske, zato razporeditev oslonilnih točk ni bila najboljša. Razporeditev oslonilnih točk je že vnaprej narekovala na težavo pri kakovosti georeferenciranja zaradi morebitnega zasuka okoli osi X (slika 8). Zato smo za testiranje izbrali območji na plezalni steni in en vertikalni ploskovni element, kjer smo predpostavili, da se površje med dvema izmerama ni spremenilo.

Po registraciji in georeferenciranju na podlagi izmerjenih oslonilnih točk oblaka točk dveh terminskih izmer nista sovpadala. Zato smo se odločili, da naredimo še fino poravnavo oblakov točk z metodo ICP (angl. *Iterative Closest Point*) (He et al., 2017). Registracijo oblakov točk prve in druge izmere smo izvedli na dva načina:

- brez prilagoditve merila skenograma; razlika RMS: 10^{-5} ;
- s prekrivanjem skenogramov in izključitev najbolj oddaljenih točk.

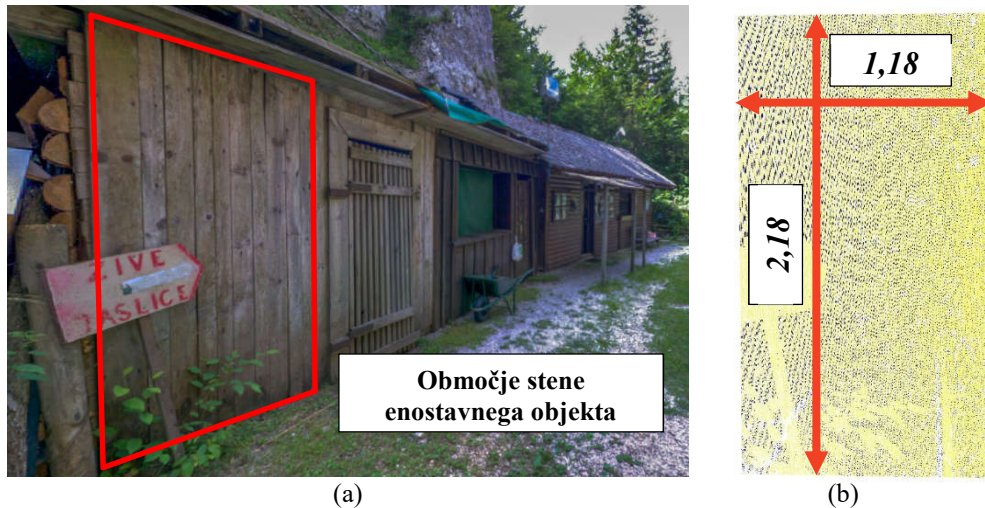
Sledila je fina registracija oz. poravnava skenogramov, kjer smo določili transformacijsko matriko, ki ponazarja relacijo med skenogramoma pred in po izvedeni fini registraciji. Poleg tega smo pridobili oceno natančnosti oddaljenosti na identičnih točkah v obliki korena srednjega kvadratnega pogreška (RMS); v danem primeru je znašal 9 mm. Na podlagi izbranega instrumentarija in izvedeni registraciji posameznih stojišč skenogramov lahko ugotovimo, da je bila fina poravnava narejena ustrezno. To je razvidno tudi iz izračunane transformacijske matrike $\mathbf{R}$, ki združuje rotacijsko matriko (zgornja blok-diagonalna podmatrika velikosti 3×3) in translacijski vektor (vektor 3×1 četrtega stolpca matrike $\mathbf{R}$):

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,000 & -0,001 & -0,001 & 0,001 \\ 0,001 & 1,000 & -0,001 & 0,011 \\ 0,001 & 0,001 & 1,000 & 0,016 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{bmatrix}$$

Rezultati

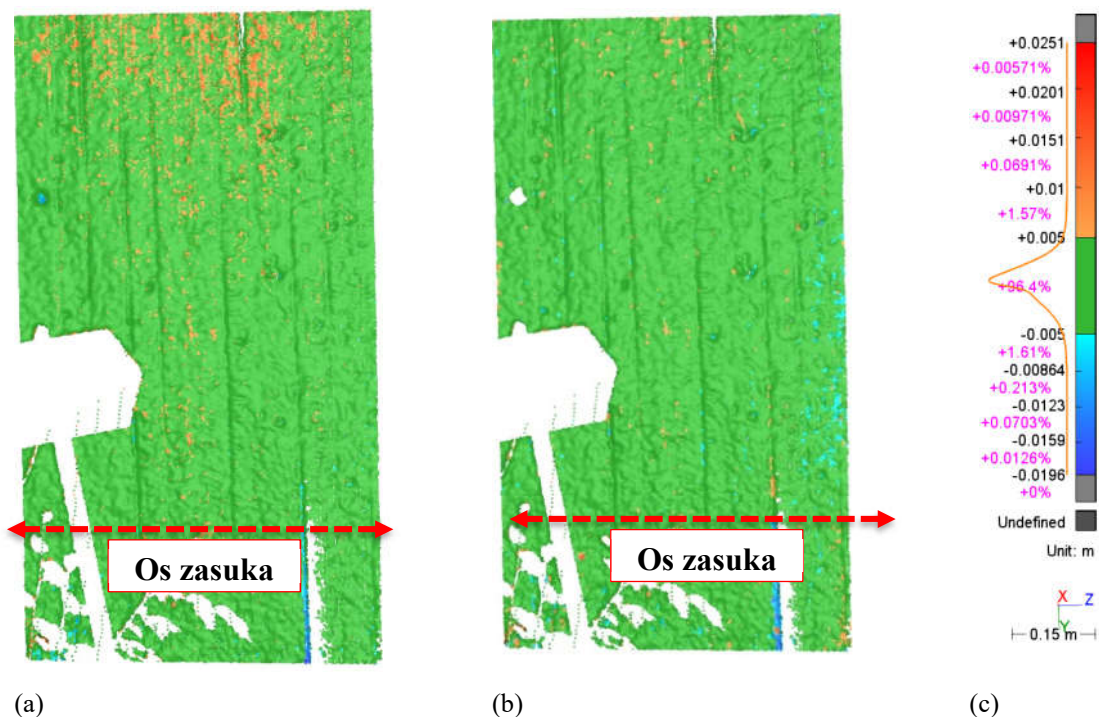
(A) Stena enostavnega vertikalnega objekta

Na sliki 4.b modri oblak prikazuje meritve prve izmere in rumeni oblak točk rezultate druge izmere. Levo je prikazano skenirano območje vertikalne lesene stene objekta ob plezališču (označeno s paralelogramom na sliki 7).



Slika 4: Oblak točk izbranega vertikalnega objekta.

Z metodo C2C smo določili oddaljenosti med oblakoma prve in druge izmere. Primerjavo dela oblakov točk smo naredili z namenom ocene sistematičnih pogreškov, ki bi lahko nastali zaradi nekakovostnega georeferenciranja z naravnimi tarčami.



Slika 5: Prikaz razlik v oblaku točk za vertikalni objekt s slike 4, in sicer: (a) pred registracijo, (b) po registraciji, (c) razlike med oblakoma po fini poravnavi.

Slika 5 prikazuje oddaljenost med oblakoma točk dveh zaporednih izmer, določenih z metodo C2C. Prikazane so razlike med skenogramoma pred in po fini registraciji oblakov točk. Oddaljenosti med oblakoma točk na zgornji strani objekta so nekaj milimetrov večje od oddaljenosti spodnjega roba stene, vendar se po fini poravnavi izrazito zmanjšajo. Na osnovi rezultatov lahko sklepamo, da je prišlo do zasuka oblaka točk zaradi slabe razporeditve oslonilnih točk vzdolž soteske. Po primerjavi oblakov točk med dvema izmerama lahko rečemo, da so razlike po fini poravnavi enakomerno porazdeljene po celotnem območju (slika 4.c).

Sklepanja na osnovi grafičnih rezultatov na sliki 5 lahko potrdimo tudi s statistično analizo primerjave vzorcev oblakov točk dveh izmer. Za vzorec smo vzeli del oblakov točk iz posameznih izmer, ki se je nanašal na isto območje, to je steno lesene barake (slika 4). Iz rezultatov (preglednica 1) lahko vidimo, da se največje in najmanjše oddaljenosti med oblakoma točk pred in po registraciji nekoliko spremenijo, zato se sorazmerno spremenijo tudi vrednosti variacijskega razmika.

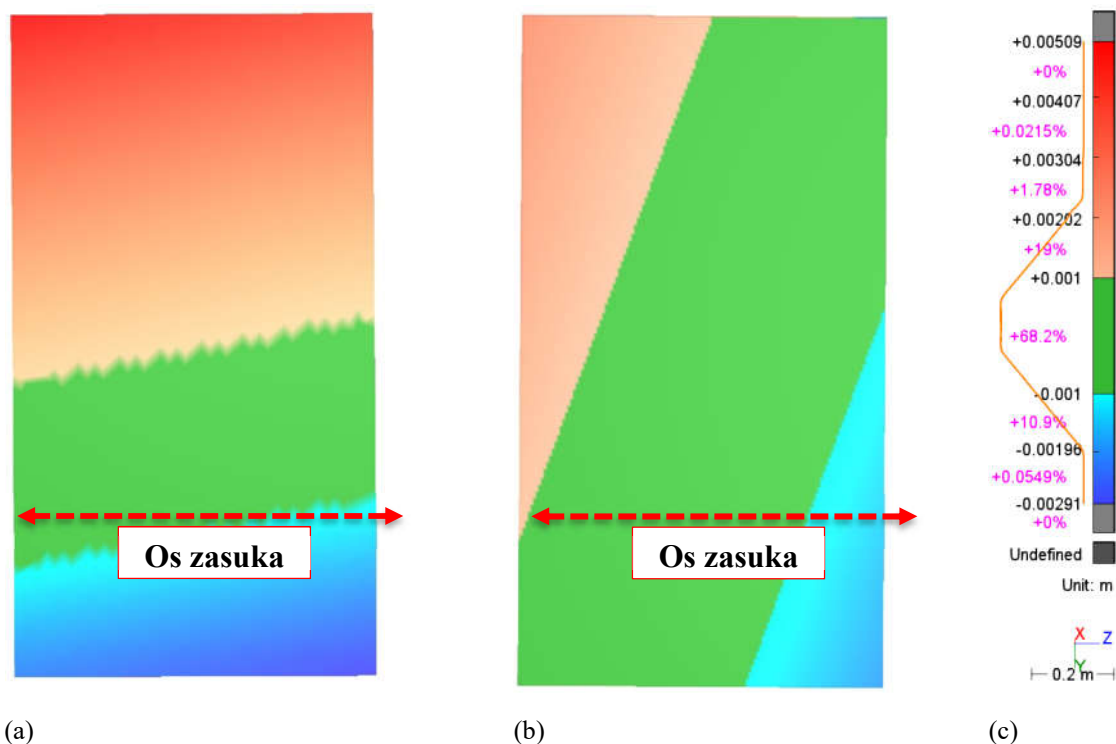
Preglednica 2: Statistični kazalci (srednje vrednosti in mere razpršenosti) vzorca pred in po registraciji za območje stene objekta.

	<i>Razlika 2 .in 1.izmere (pred registracijo)</i>	<i>Razlika 2 .in 1.izmere (po registraciji)</i>	<i>Razlika pred in po registraciji</i>
Srednje vrednosti			
<i>Aritmetična sredina ($\bar{x}$)</i>	0,001 m	0,000 m	−0,001 m
<i>Mediana (M_e)</i>	0,001 m	0,001 m	0,000 m
<i>Največja vrednost</i>	0,013 m	0,025 m	0,012 m
<i>Najmanjša vrednost</i>	−0,018 m	−0,020 m	−0,002 m
<i>Standardni odklon (σ)</i>	0,002 m	0,002 m	0,000 m
<i>Variacijski razmik (VR)</i>	0,031 m	0,045 m	0,014 m
Število točk, kjer je bila izračunana oddaljenost v intervalu $[-\infty \text{ cm}, 0 \text{ cm}]$			
<i>Vzorec</i>	24.670	62.886	38.216
<i>Delež populacije</i>	14,1 %	35,9 %	21,8 %
Število točk, kjer je bila izračunana oddaljenost v intervalu $[0 \text{ cm}, \infty \text{ cm}]$			
<i>Vzorec</i>	150.618	112.102	−38.516
<i>Delež populacije</i>	85,9 %	64,1 %	−21,8 %
Število točk, kjer je bila izračunana oddaljenost v intervalu $[-0,6 \text{ cm}, 0,6 \text{ cm}]$			
<i>Vzorec</i>	165.567	171.962	6.395
<i>Delež populacije</i>	94,5 %	98,3 %	3,8 %

Oblak točk se po narejeni fini poravnavi nekoliko bolj prilega in izključuje možnost morebitnega zasuka. To je razvidno iz spremenjenih razmerij med izračunanimi negativnimi in pozitivnimi oddaljenostmi med točkami oblakov dveh izmer. Pred poravnavo je bilo zaznanih 24.670 negativnih razdalj ali 14,1 % vzorca, medtem ko se je numerična vrednost po poravnavi zvišala na 21,8 % oziroma na 62.886 ali 35,9 % izračunanih negativnih oddaljenosti med oblakoma prve in druge terminske izmere. Pozitivne razdalje so se zmanjšale na 112.102 oz. na 64,1 % celotnega vzorca oddaljenosti. Določili smo tudi število točk, kjer je bila izračunana oddaljenost v intervalu med −0,6 cm in 0,6 cm. Ugotovili smo, da se je število izmerjenih oddaljenosti po izvedeni fini poravnavi povečalo za 3,8 % oz. na 6.395 oddaljenosti glede na analizo pred poravnavo. Iz tega lahko ugotovimo, da se celoten skenogram prve izmere še nekoliko bolj prilega skenogramu druge izmere. Iz rezultatov lahko potrdimo smiselnost fine poravnave oblaka točk za odstranitev zasuka skenograma.

Naredili smo tudi primerjavo med rezultati izračunanih izravnanih ravnin iz obstoječega ter transformiranega skenograma po registraciji. Slika 6 prikazuje razlike med ravninama prve in druge terminske izmere, in sicer pred in po fini poravnavi skenogramov. S slike 6 je razvidno, da smo s fino poravnavo dobili večji delež razlik v območju $\pm 1 \text{ mm}$ (zeleno

obarvano območje). Pred poravnavo ravnin je bilo 27,2 % razlik celotne površine analiziranega območja manjših od enega milimetra, medtem ko se je po fini poravnavi delež zvišal na 68,2 % celotne površine (izrazito povečano zeleno območje na Sliki 9.b). Po poravnavi skoraj ni videti temno modre in rdeče barve, ki predstavljata največje pozitivne oziroma negativne vrednosti razlik.



Slika 6: Prikaz razlik v izravnanih ravninah za vertikalni objekt (slika 7), in sicer: (a) pred registracijo, (b) po registraciji, (c) razlike med oblakoma po registraciji.

(B) Vertikalni element: izsek na steni lednega plezališča

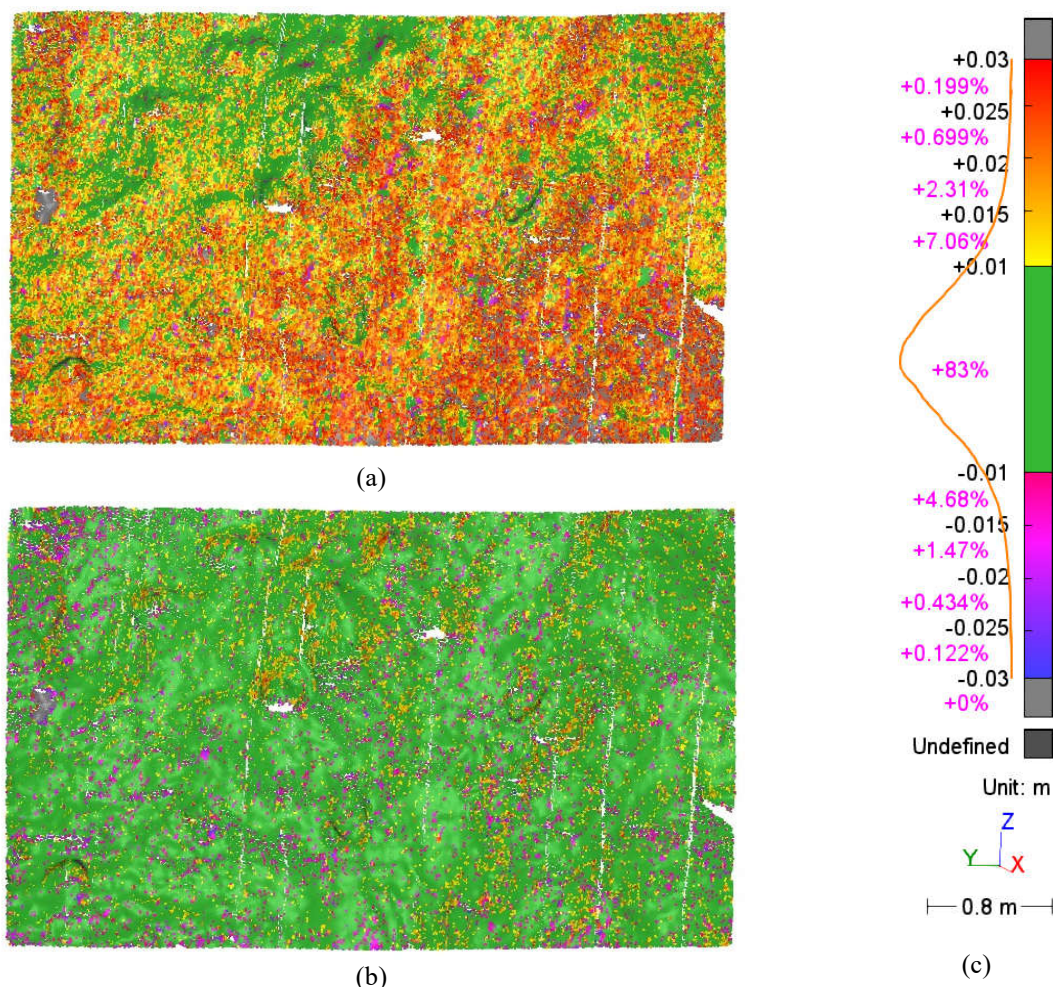


Slika 7: Izbrano območje analize na plezalni steni

Analizo smo razširili na izbrano območje na plezalni steni (slika 7), da bi naredili kontrolo kakovosti fine poravnave skenogramov za območje, ki nas je zanimalo. Testni območji smo izbrali na osnovi kriterijev:

- stabilnost območja
- nespremenjena konfiguracija terena in
- območja brez ledu in vegetacije.

Na povsem enak način kot prej smo ugotavljali kakovost registracije (georeferenciranja) skenogramov dveh izmer med sabo in morebitne zasuke zaradi neprimerne razporeditve oslonilnih točk.



Slika 8: Prikaz razlik v položajih med prvo in drugo izmero za območje plezalne stene (slika 10): (a) pred registracijo, (b) po registraciji in (c) prikaz razporeditve razlik po registraciji.

Rezultati primerjave pred in po fini poravnavi so grafično prikazani na sliki 8. Zgornja slika ponazarja oddaljenosti med oblakoma točk območja med prvo in drugo izmero pred fino poravnavo, medtem ko spodnja slika prikazuje rezultat oddaljenosti po poravnavi. Očitno je, da smo z dodatnim postopkom dosegli boljši vklop oblakov točk dveh izmer. Preglednica 2 prikazuje statistične mere razpršenosti med prvo in drugo izmero po izvedeni fini poravnavi ter primerjavo pred in po izvedeni fini registraciji skenogramov. Pozitivno vrednost razdalj je imelo 102.275 oziroma 56 % izmed vseh izračunanih oddaljenosti.

Negativne vrednosti so bile pri 44 % točk vzorca (80.521 izračunanih oddaljenosti). Če primerjamo rezultate, dobljene pred registracijo, opazimo znatno spremembo, saj se za 40,5 % vzorca povečajo negativne oddaljenosti, medtem ko se vzorcu pozitivnih oddaljenosti zmanjša obratno sorazmerno negativnemu vzorcu. Največje razlike med obema analizama dobimo pri testiranju števila točk, kjer je bila izračunana oddaljenost med -1 cm in $+1$ cm. Tu se je število izračunanih razdalj povečalo za 131.321 oddaljenosti ali 71,8 % celotnega vzorca. Velika sprememba je bila zaznana tudi pri analizi oddaljenosti, ki niso presegale absolutne vrednosti dveh centimetrov. Število teh se je povečalo za 112.256 oziroma za 61,4 %.

Preglednica 3: Tabela prikazuje predstavitev mer razpršenosti pred in po registraciji za drugo območje plezalne stene.

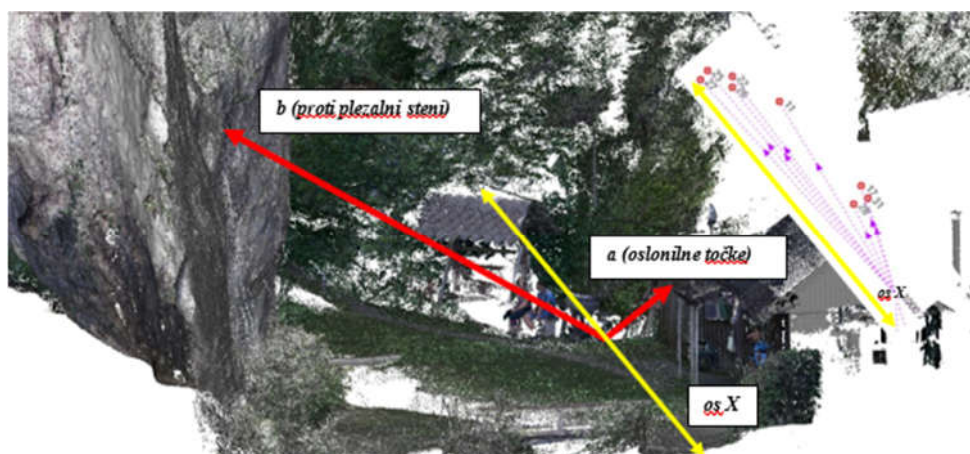
	<i>Razlika 2 .in 1.izmere (pred registracijo)</i>	<i>Razlika 2 .in 1.izmere (po registraciji)</i>	<i>Razlika pred in po registraciji</i>
Srednje vrednosti			
<i>Aritmetična sredina ($\bar{x}$)</i>	0,013 m	0,001 m	-0,012 m
<i>Mediana (M_e)</i>	0,014 m	0,001 m	-0,013 m
<i>Največja razlika</i>	0,099 m	0,085 m	-0,014 m
<i>Najmanjša razlika</i>	-0,087 m	-0,083 m	0,004 m
<i>Standardni odklon (σ)</i>	0,011 m	0,008 m	-0,004 m
<i>Variacijski razmik (VR)</i>	0,186 m	0,185 m	-0,001 m
Razlike med točkami so v intervalu [-3 cm, 3 cm]			
<i>Število točk</i>	136.163	182.333	46.170
<i>Delež populacije</i>	74,5 %	99,7 %	25,3 %
Razlike med točkami so v intervalu $(-\infty, -3$ cm] $\cup$ $[3$ cm, $\infty)$			
<i>Število točk</i>	46.633	463	-46.170
<i>Delež populacije</i>	25,6 %	0,3 %	-25,3 %
Razlike med točkami so v intervalu [-2 cm, 2 cm]			
<i>Število točk</i>	67.421	179.677	112.256
<i>Delež populacije</i>	36,9 %	98,3 %	61,4 %
Razlike med točkami so v intervalu [-1 cm, 1 cm]			
<i>Število točk</i>	20.069	151.390	131.321
<i>Delež populacije</i>	11,0 %	82,8 %	71,8 %
Razlike med točkami so v intervalu $[-\infty$ cm, 0 cm]			
<i>Število točk</i>	6.580	80.521	73.941
<i>Delež populacije</i>	3,6 %	44,0 %	40,5 %
Razlike med točkami so v intervalu [0 cm, ∞ cm]			
<i>Število točk</i>	176.216	102.275	-73.941
<i>Delež populacije</i>	96,4 %	56,0 %	-40,5 %

Z registracijo smo dosegli, da le za 1,7 % točk obravnavanega testnega območja pripišemo slabi filtraciji in šumom. Iz preglednice 2 je razvidno, da so se mere razpršenosti po fini registraciji zmanjšale glede na rezultate pred poravnavo. Primerjava med ekstremi izračunanih razlik, tj. oddaljenostmi med točkami, ostaja skoraj nespremenjena. Iz razporejenosti razlik v oddaljenostih (slika 11. c) lahko zaključimo, da so na tem testnem območju razlike med prvo in drugo terminsko izmero porazdeljene normalno. To pomeni, da smo tudi na tem območju s fino poravnavo posredno odpravili sistematične napake zaradi pomanjkljivosti razporeditve točk pri georeferenciranju skenogramov v izbrani referenčni koordinatni sistem.

Težava, ki bi jo v prihodnje potrebno razrešiti je, da se bo stena tekom zaledenitve spreminjala in bo na steni čedalje manj območij, ki bi jih lahko uporabili za poravnavo.

Zaključek

Po analizi registracije in georeferenciranja posameznega oblaka točk s pomočjo ploskovnih elementov lahko zaključimo, da bi bilo v prihodnje potrebno rešiti problem slabe razporeditve oslonilnih točk za georeferenciranje. Na podlagi kriterijev izbire območja smo za analizo izbrali dve vertikalni območji, in sicer eno izmed območij je bilo omejeno na ravno vertikalno steno lesene barake in drugo na območje plezalne stene, kjer smo želeli določiti konkretne vrednosti razlike med dvema skenogramoma. Iz rezultatov (preglednica 1 in preglednica 2) ter iz grafičnih prikazov (slika 5, slika 6 in slika 8) lahko vidimo zasuk okoli osi X (slika 9).



Slika 9: Razlaga zasuka zaradi slabe geometrije razporeditve oslonilnih točk.

Po analizi georeferenciranja bi za nadaljnje delo bilo smiselno narediti najprej optimizacijski postopek projektiranja točk geodetske mreže, ki bi jih uporabili kot oslonilne točke za georeferenciranje. Čeprav bo to v soteski težavna naloga, bomo poizkušali trajno stabilizirati točke v naravi na takih mestih, da jih ne bo prekril led. Na ta način bomo vzpostavili osnovo in ocenili kakovost določitve koordinat. Za nadaljnja spremljanja sprememb v soteski zaradi zaledenitve bi bilo smiselno uporabiti signalizacijo na retroreflektivne tarče. Dodatno bi veljalo premisliti o možnosti skeniranja z višjo ločljivostjo.

Zahvali

Zahvaljujemo se Društvo lednih plezalcev iz Mojstrane, še posebej neumornemu skrbniku plezališča **Pavletu Skumavcu**, ki nam je omogočil izmero.

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega programa *Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije (P2-0227)* Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS.

Literatura in viri

Bezák, N., Grigillo, D., Urbančič, T., Mikoš, M., Petrovič, D. in Rusjan, S. (2017). Geomorphic response detection and quantification in a steep forested torrent. *Geomorphology*, 291, 33–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.034>

- Blasone, G., Cavalli, M., Marchi, L., Cazorzi, F. (2014). Monitoring sediment source areas in a debris-flow catchment using terrestrial laser scanning. *Catena*, 23, 23–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.07.001>
- Carrivick, J. L., Geilhausen, M., Warburton, J., Dickson, N.E., Carver, S. J., Evans, A. J. in Brown, L. E. (2013). Contemporary geomorphological activity throughout the proglacial area of an alpine catchment. *Geomorphology*, 188, 83–95.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.029>
- Fischler M. A., Bolles R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24 (6), 381–395. DOI: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/358669.358692>
- He, Y., Liang, B., Yang, J., Li, S., He, j. (2017). An Iterative Closest Points Algorithm for Registration of 3D Laser Scanner Point Clouds with Geometric Features. *Sensors*, 17 (8), 1862–1898. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17081862>
- Urbančič, T., Koler, B., Stopar, B., Kosmatin Fras, M. (2014). The Influence of the Input Parameters Selection on the RANSAC Results. *International Journal of Simulation Modelling*, 13 (2), 159–170. DOI: [https://doi.org/10.2507/IJSIMM13\(2\)3.258](https://doi.org/10.2507/IJSIMM13(2)3.258)
- Urbančič, T., Vrečko, A., Kregar, K. (2016). Zanesljivost metode RANSAC pri oceni parametrov geometrijskih oblik. *Geodetski vestnik*, 60 (1), 69–97.
DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2016.01.69-97>
- Vericat, D., Smith, M. W., Brasington, J. (2014). Patterns of topographic change in sub-humid badlands determined by high resolution multi-temporal topographic surveys, *Catena*, 120, 164–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.012>

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

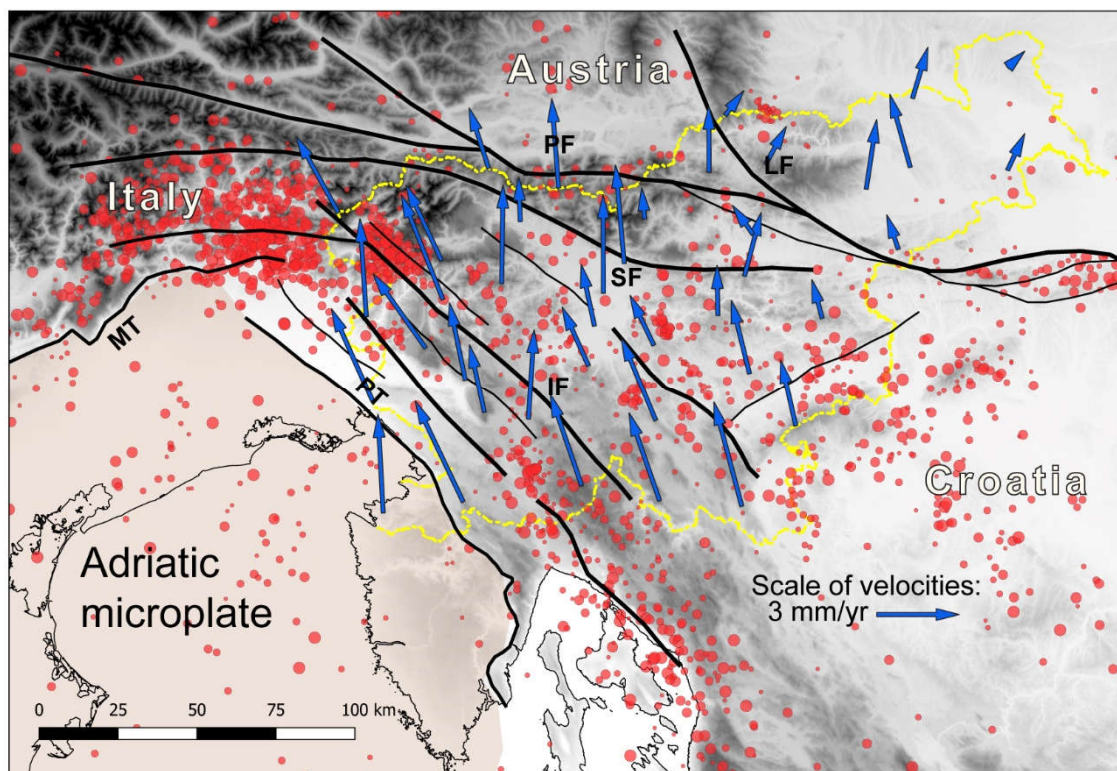
^{*} Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

^{**} Geodetski inštitut Slovenije

^{***} Geološki zavod Slovenije

^{****} Univerza v Ljubljani, Naravoslovno tehniška fakulteta

nabiranje elastičnih deformacij pred potresi. Značilno je, da so tektonske deformacije po 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 14: 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.

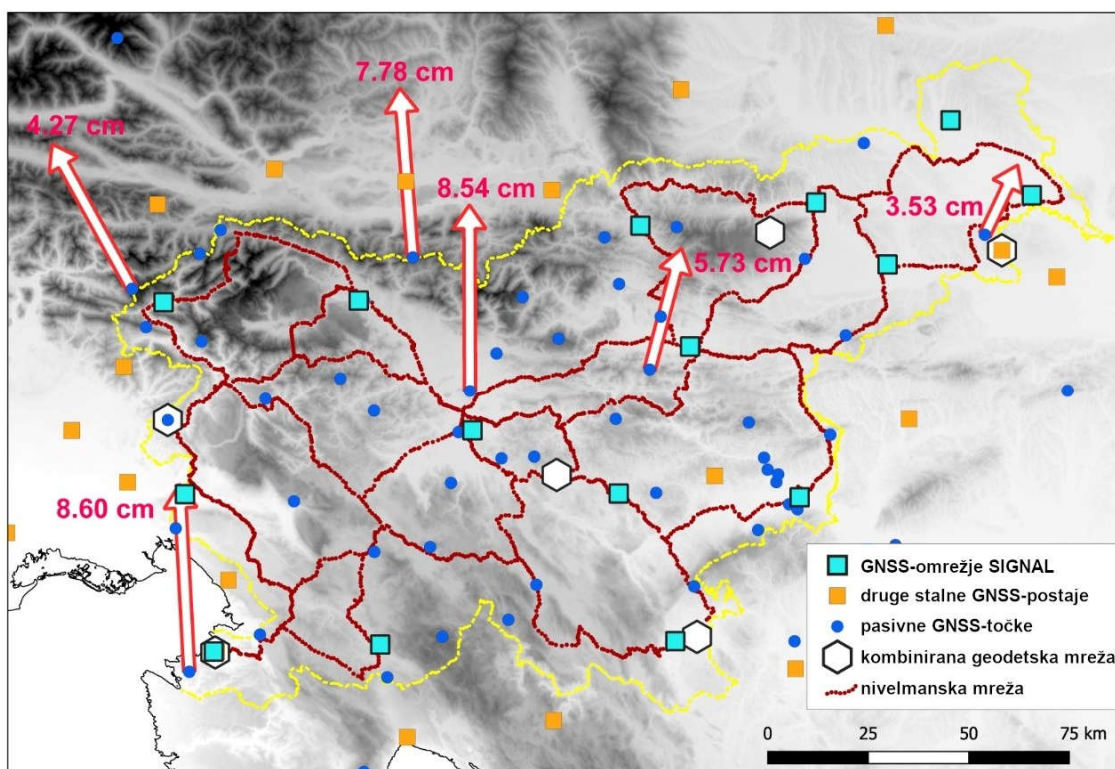
Aktivno geodinamično dogajanje pomeni, da na tektonsko aktivnih ozemljih z geodetsko izmero določene koordinate točk na površju Zemlje niso konstantne, ampak se s časom spreminjajo. S prejšnjimi raziskavami smo ugotovili, da na ozemlju Slovenije hitrosti premikov geodetskih referenčnih točk znašajo tudi do 5 mm/leto glede na stabilno Evrazijo (Weber et al., 2010; Sterle, 2015; Vrabec 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. centimetske točnosti določitve položaja v poljubnem trenutku, za trenutne in prihodnje zahteve glede točnosti

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 15: 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; Vrabec et al., 2006, 2010; Sterle 2015) in študij tektonske aktivnosti (npr. Vrabec & Fodor, 2006; Vrabec 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; Vrabec 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 desnozmernih 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 dnevnih 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.

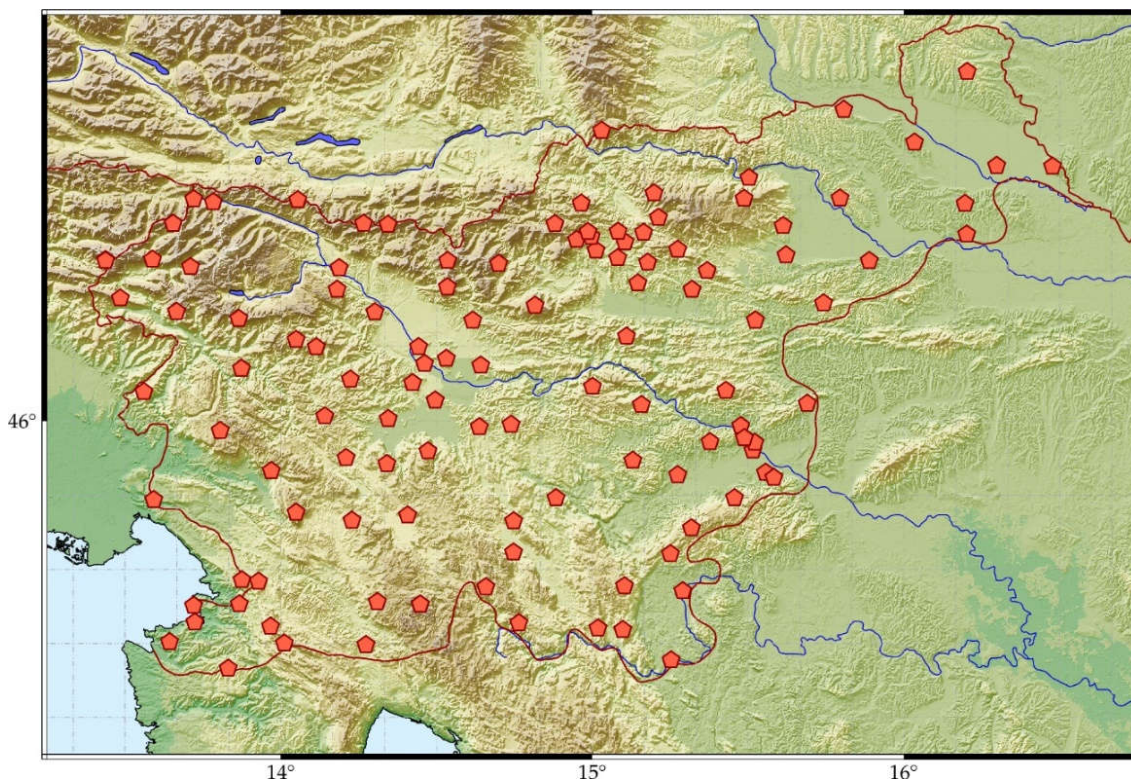
Do sedaj smo že izvedli analizo arhiva opazovanj GNSS, ki ga hranimo na Katedri za matematično in fizikalno geodezijo UL FG (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo). V arhivu hranimo 4288 datotek RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), ki so bile pridobljene v številnih 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 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 16: Končni niz geodetskih točk GNSS na območju Slovenije, ki so potencialne za ponovne izmere GNSS (121 točk)

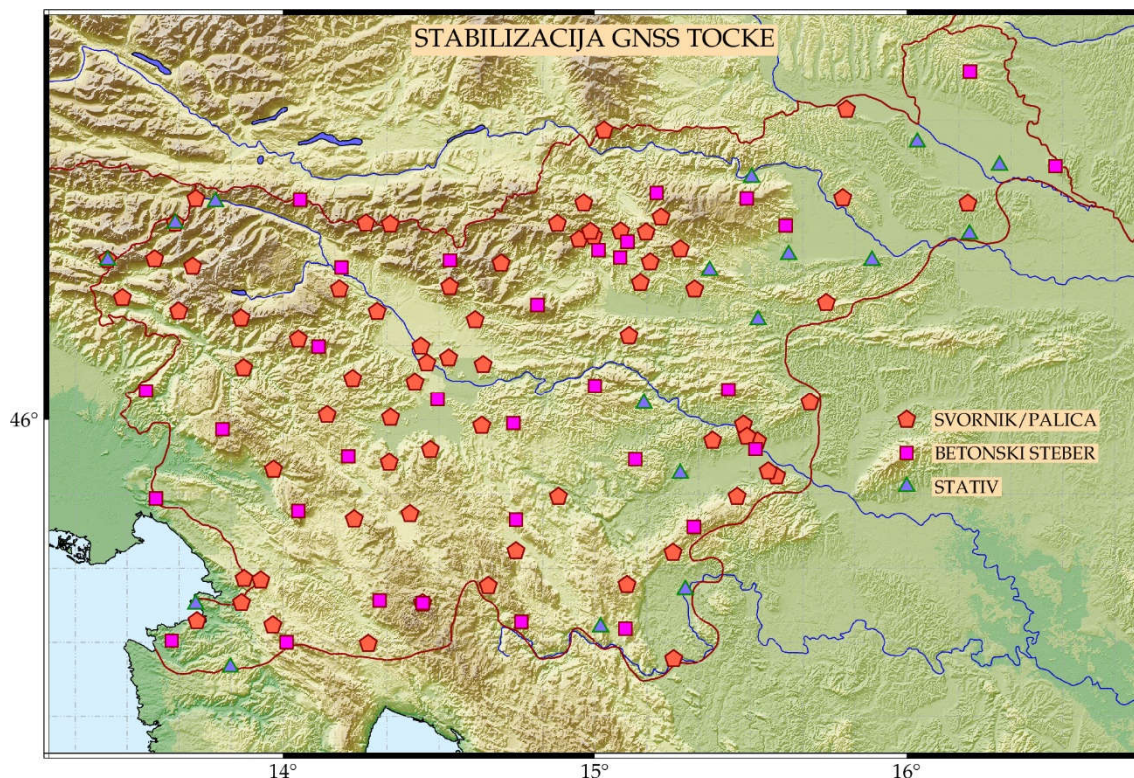
Analiza načinov stabilizacije geodetskih točk GNSS

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).

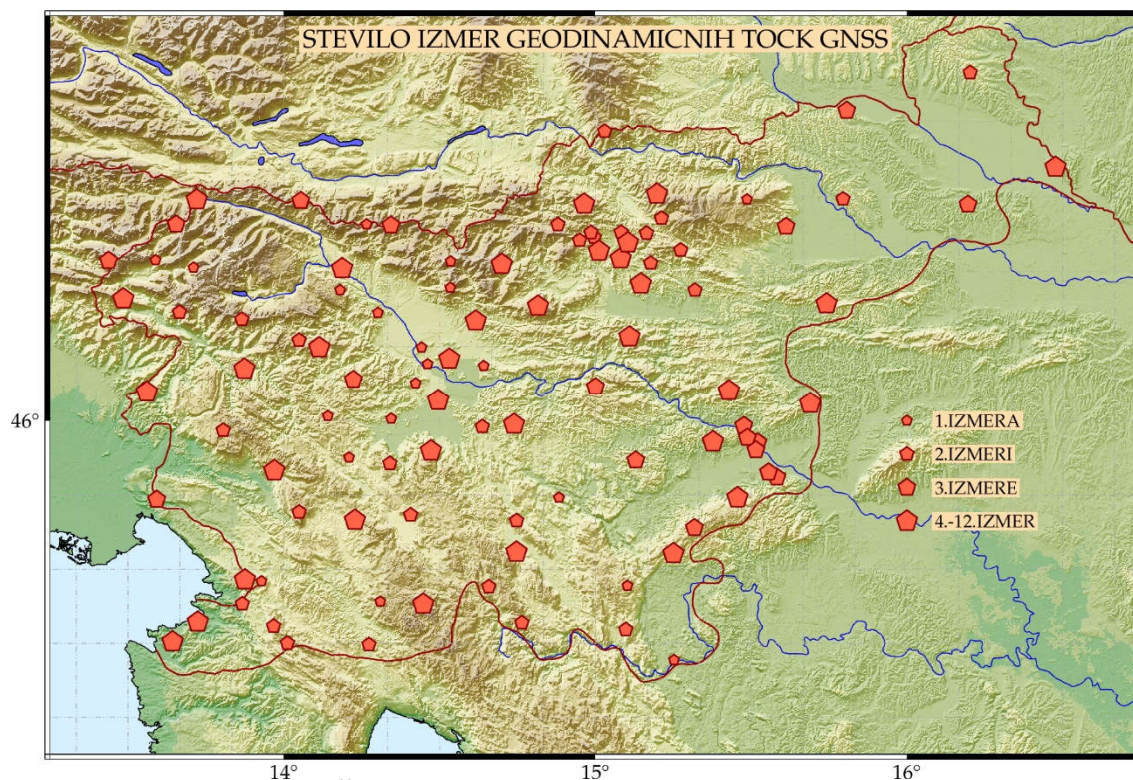


Slika 17: Vrsta stabilizacije geodetskih točk GNSS na območju Slovenije

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 FG3, 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.



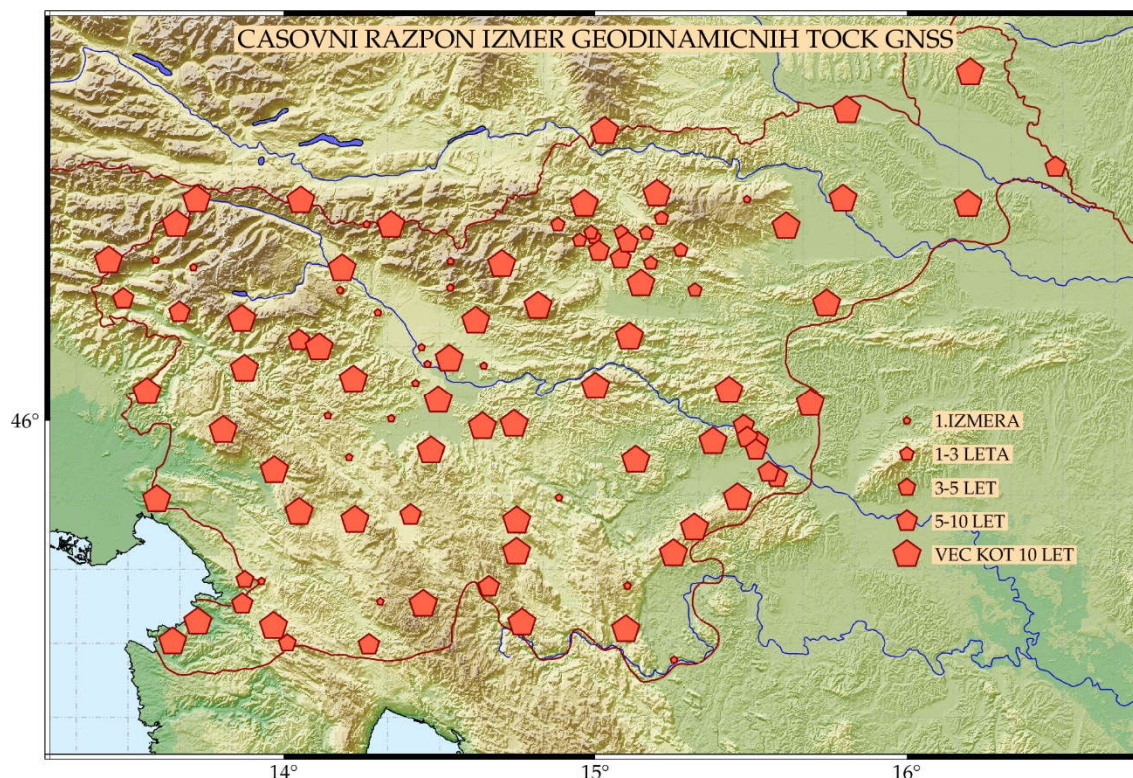
Slika 18: Število izmer GNSS na posamezni točki GNSS

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 19: 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 preliminarinih 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

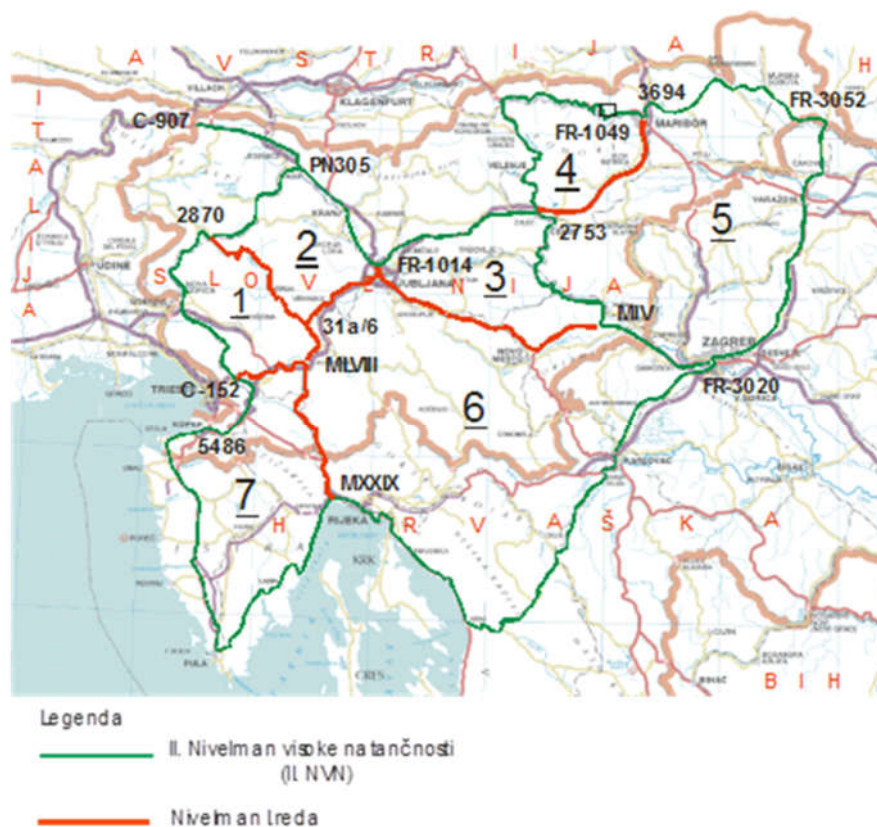
Za potrebe vzpostavitve višinskega geokinematskega modela bomo uporabili podatke nivelmanskih izmer v nivelmanski mreži visoke natančnosti, ki so bile izmerjene v

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 20: 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).

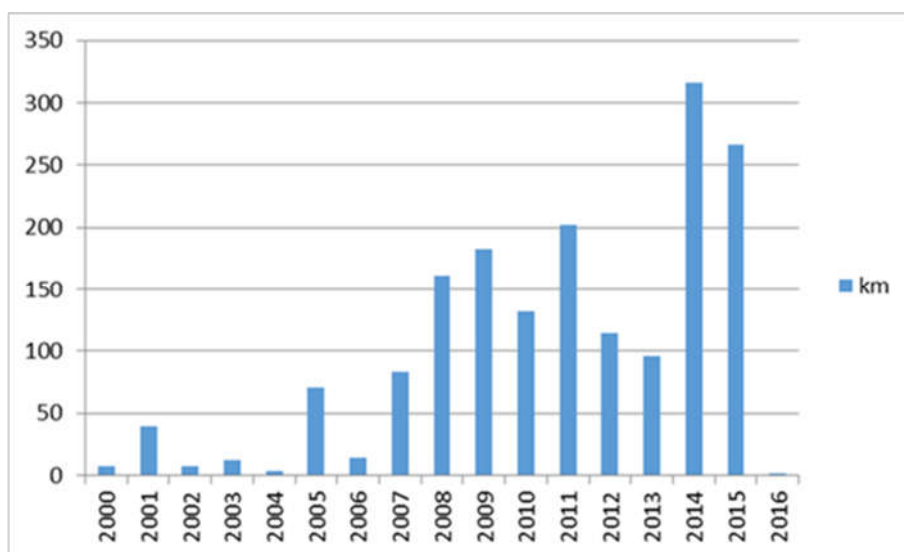
Preglednica 4: Osnovni podatki o stari nivelmanski mreži – SVS2000/Trst

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.

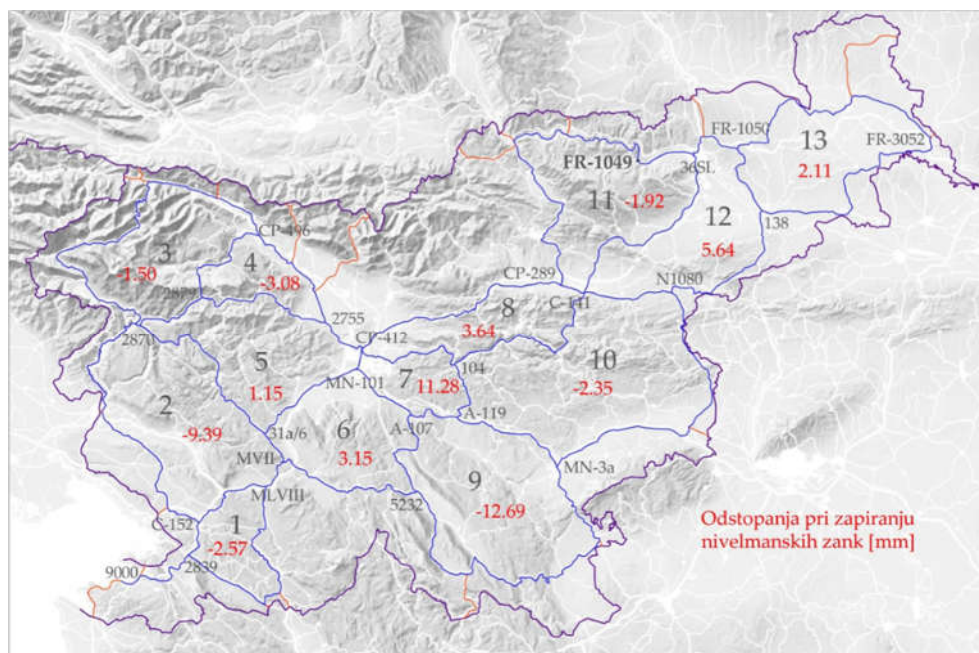
Oblika nove nivelmanske mreže – Slovenski višinski sistem 2010 (SVS2010/Koper)

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 21: 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 22: 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 5: 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 23: 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,

Δ_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 σ_H (preglednica 3).

Preglednica 6: *A-priori* (σ_z) in *a-posteriori* ($\hat{\sigma}_0$) ocena natančnosti nivelmanske mreže ter oceno natančnosti določitve nadmorske višine (σ_H)

Ocena natančnosti	SVS2000/Koper [mm]	SVS2010/Koper [mm]
σ_z	0,97	0,44
$\hat{\sigma}_0$	0,88	0,50
σ_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 ERS³, ki vsebuje podatke od leta 1991 do 2003, kot tudi najnovejše podatke, ki jih od leta 2014 zagotavljata satelita misije Sentinel-1⁴. 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 SARscape⁵ in servisa Geohazards Exploitation Platform⁶. 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

³ https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/ERS_overview

⁴ <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

⁵ <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI-SARscape>

⁶ <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.

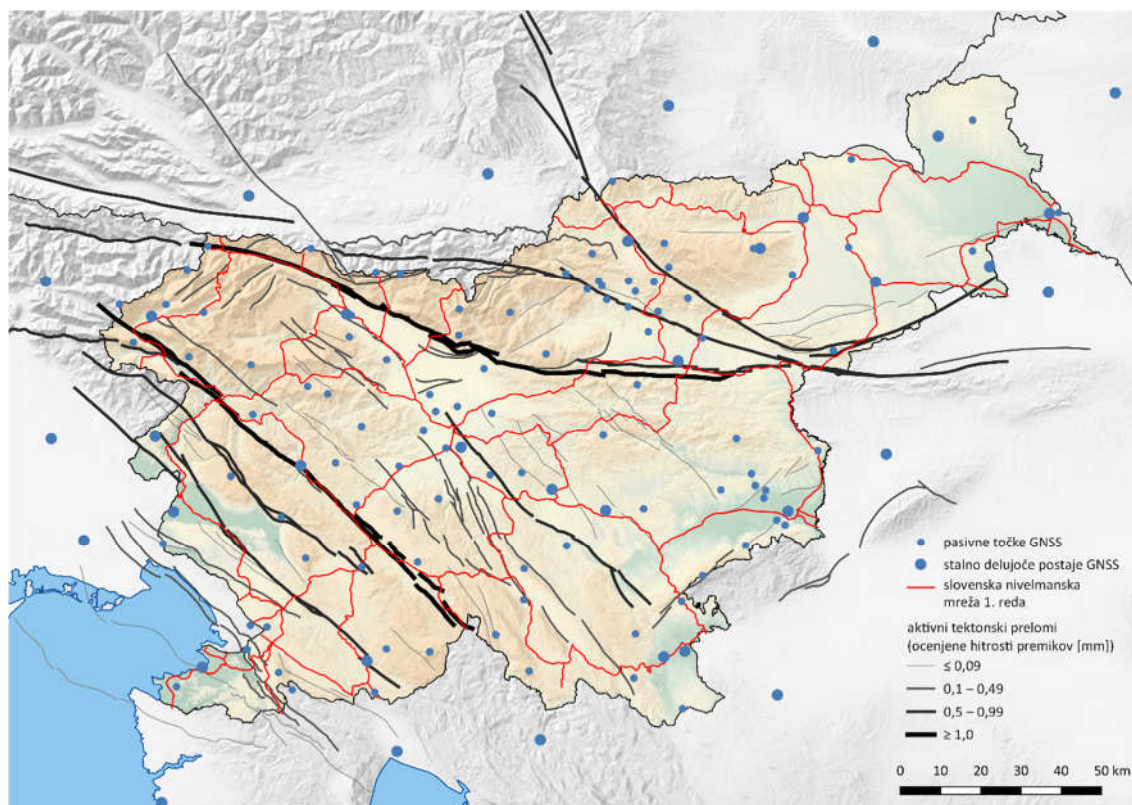
Pri interpretaciji višinskega geokinematskega modela bo opravljena primerjava višinskega geokinematskega modela z geološkimi in geofizikalnimi podatki, kot so karta potencialno aktivnih tektonskih struktur in geomorfološki indikatorji vertikalnih premikov površja. Na podlagi korelacije bo hitrostno polje 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 24: 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 FGG, 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 FGG 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., Vrabec, 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.
- 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.
- 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.
- 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.

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

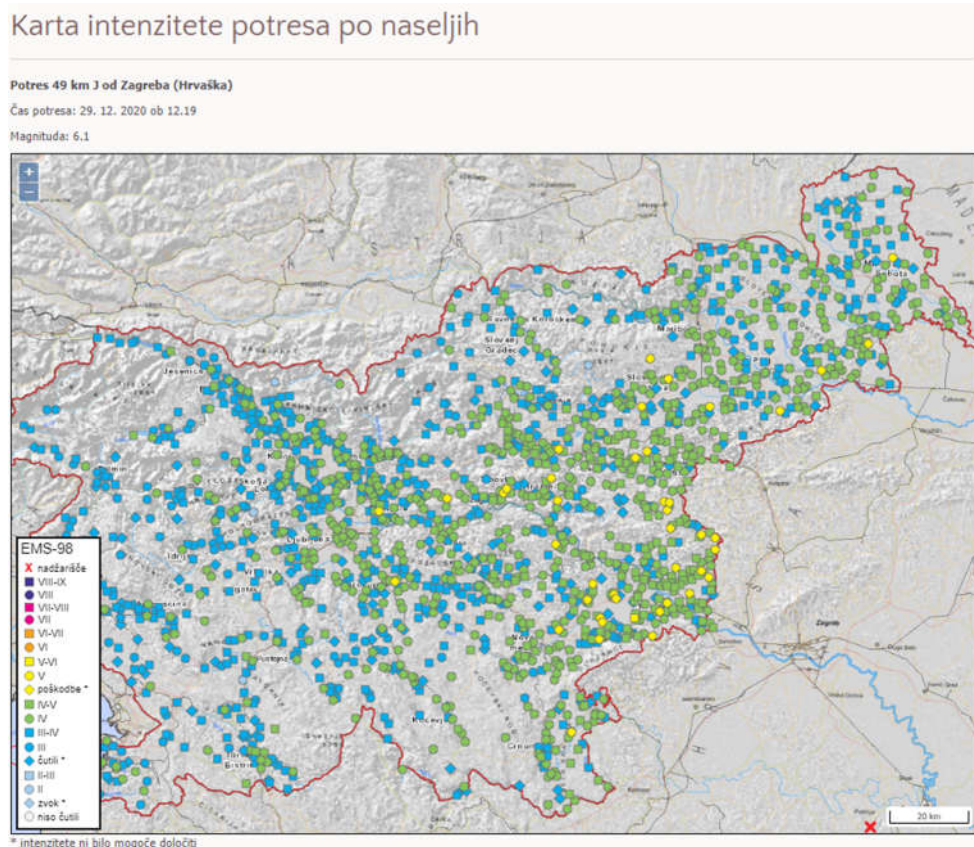
Uvod

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 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

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

(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).



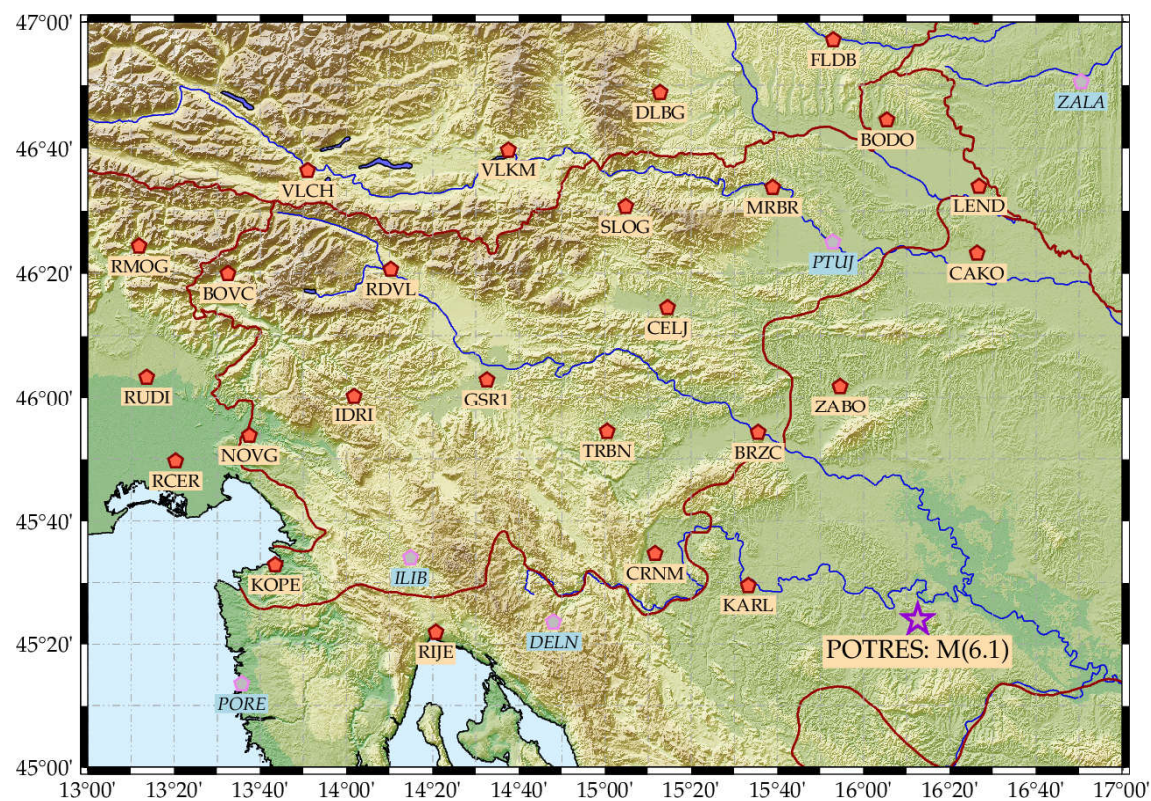
Slika 1: Karta intenzitete potresa po naseljih po potresu na Hrvaškem, pri naselju Petrinja, 29. 12. 2020, objavljena na spletni strani ARSO (2020)

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)

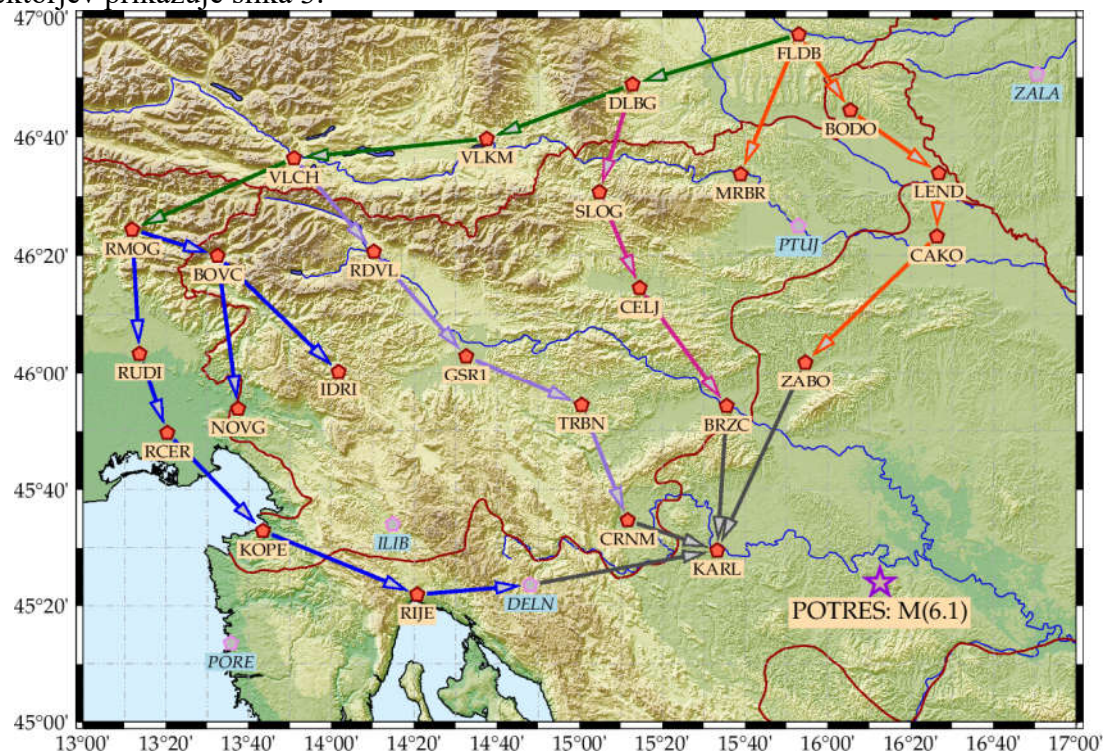
Opazovanja GNSS smo pridobili s spletnega servisa omrežja SIGNAL (<https://gu-signal.si/>), pri izboru opazovanj pa smo upoštevali različne kriterije. Prvi kriterij se je nanašal na zahtevo, da morajo biti opazovanja zabeležena z intervalom registracije vsaj 1 s, saj potresi po navadi trajajo zelo kratek 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 peterkotniki, medtem ko so postaje, ki jih nismo uporabili pri obdelavi, označene s sivimi peterkotniki 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. Shema 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:

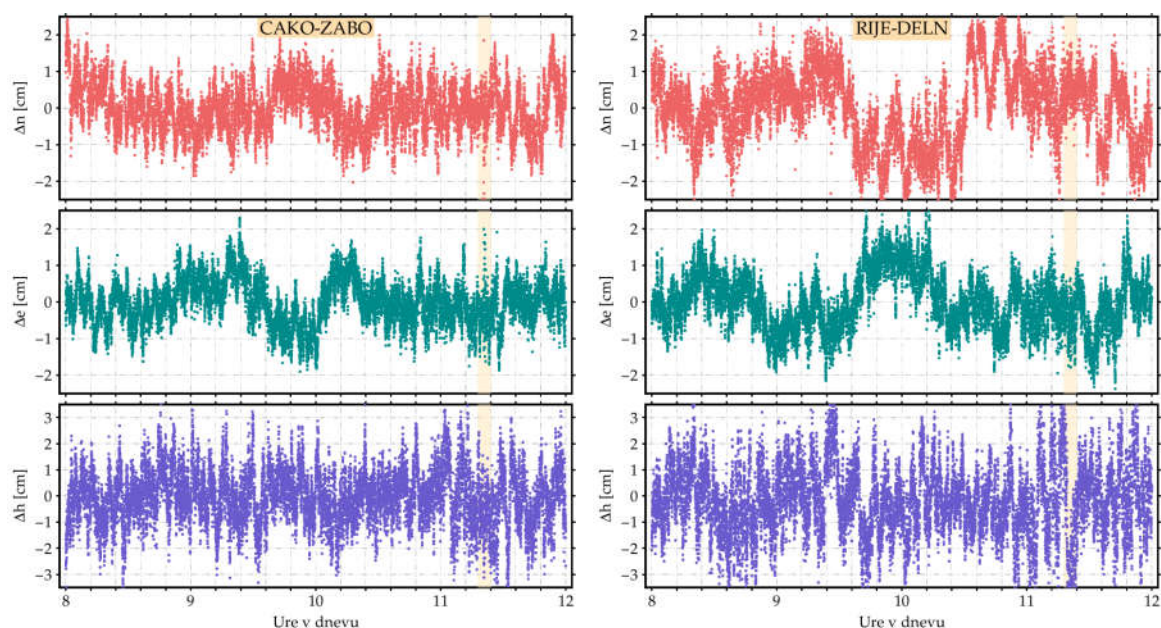
- *Vzhodni vlak (V)*, ki povezuje postaje ZABO (Zabok, Hrvaška), CAKO (Čakovec, Hrvaška), LEND (Lendava), BODO (Bodonci), FLDB (Vrbna (Feldbach), Avstrija) in MRBR (Maribor). Bazni vektorji vlaka V so obarvani oranžno.
- *Vlak center vzhod (CV)*, ki povezuje postaje BRZC (Brežice), CELJ (Celje), SLOG (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 (Trebneje), 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 NOVG (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

Primeri 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

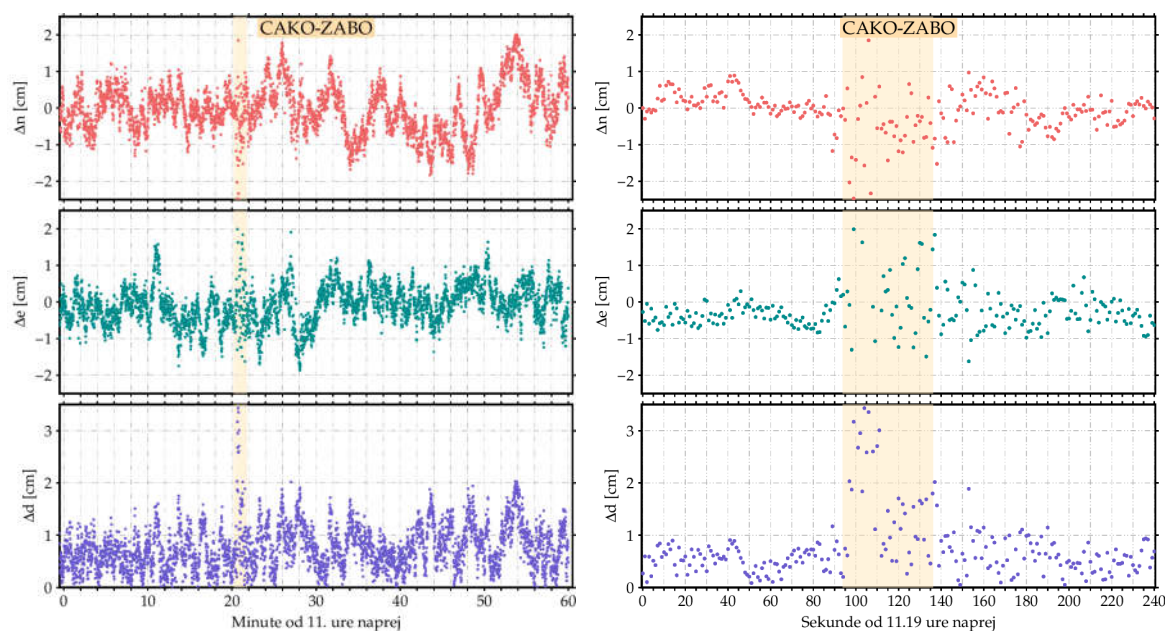
vrsti razpršenost komponente 'h', vse v enotah cm. Med 11. in 12. uro je v ozadju s svetlo rjavo barvo označen tudi približen čas potresa.



Slika 4: Časovne vrste 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).

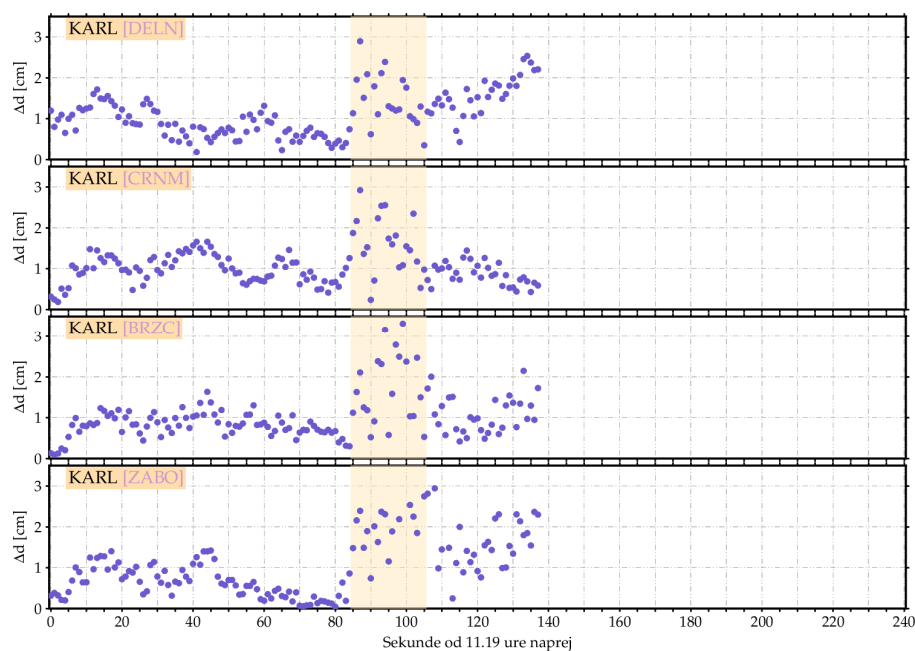


Slika 5: Časovne vrste komponent baznega vektorja CAKO-ZABO za obdobje od 11. do 12. ure (levo) in za obdobje od 11:19:00 do 11:23:00 ure za horizontalni komponenti n in e ter horizontalno razdaljo d

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

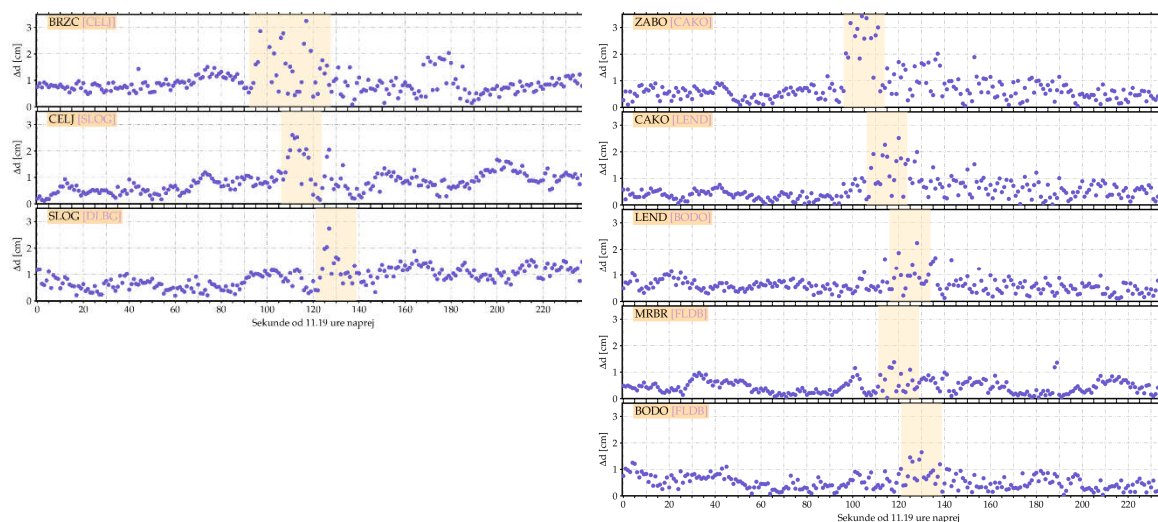
Da ugotovimo, kako se je potres širil preko območja Slovenije, bomo prikazali časovne vrste sprememb dolžine baznih vektorjev za vse sestavljene bazne vektorje s slike 3. Najprej bomo prikazali časovne vrste za vse bazne vektorje, ki se stikajo v postaji KARL. (slika 6).



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

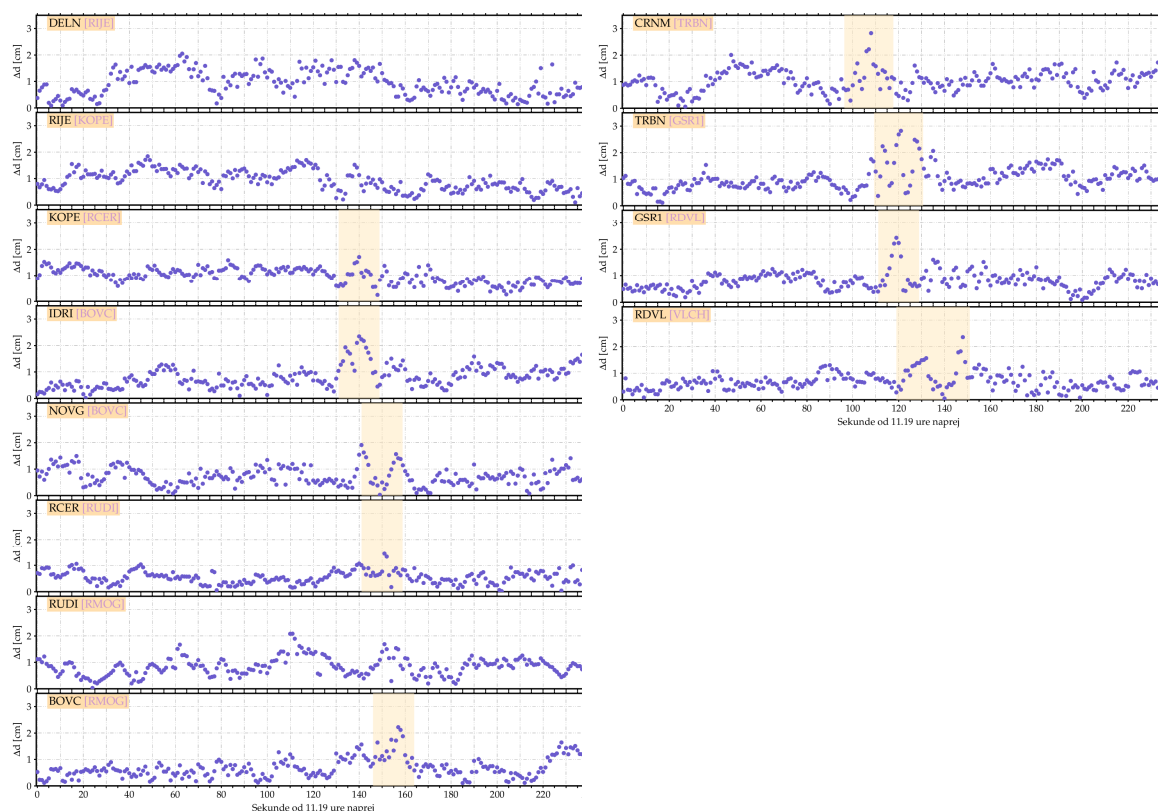
Slika 6 prikazuje vpliv potresa na delovanje postaje KARL, ki je najbližja postaja potresa. Pri vseh štirih baznih vektorjih vidimo, da je vpliv potresa jasno viden v istem časovnem obdobju. Potres v Karlovcu je bil tako silovit, da je postaja nekaj minut po potresu nehala delovati. S slike je razvidno, 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)

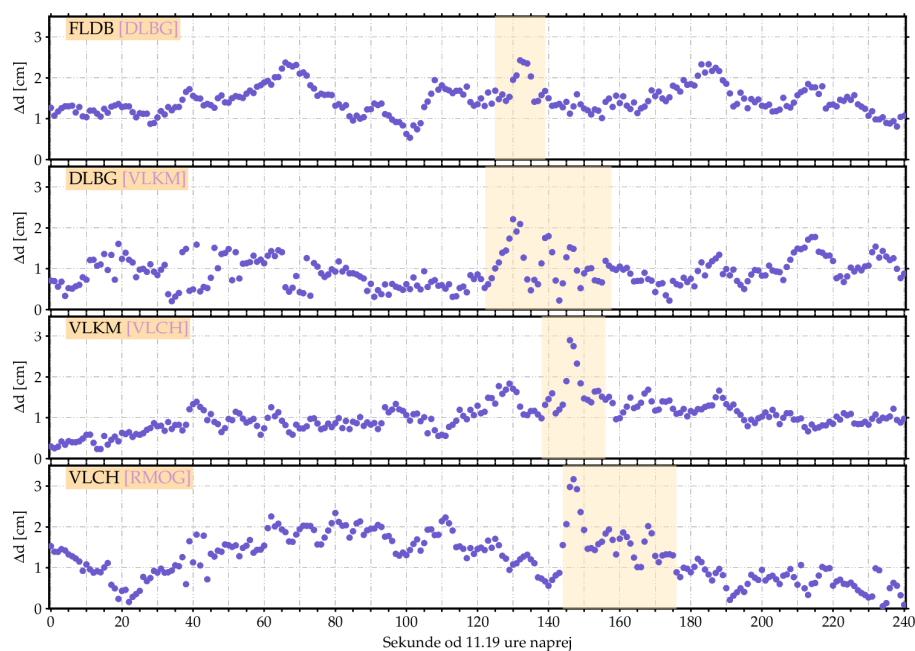
Na sliki 7 vidimo, da je potres zaznan na vseh petih baznih vektorjih vzhodnega vlaka kakor tudi na vseh treh baznih vektorjih vzhodnega centralnega vlaka. Časovno območje možne zaznave potresa na »rover« postaji baznega vektorja je obarvano v ozadju prikaza, vidi pa se tudi, da bolj kot je postaja oddaljena 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 sovpada 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

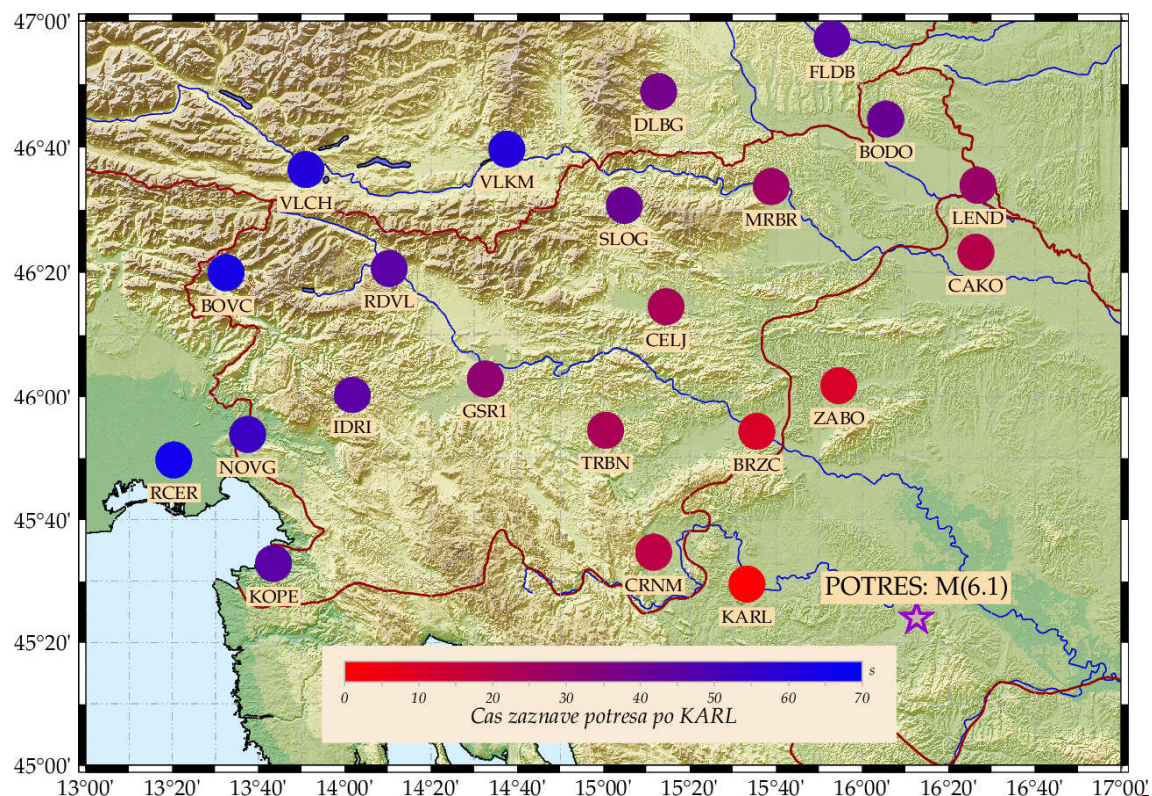
Zaznavnost potresa na stalno delujočih postajah GNSS omrežja SIGNAL

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 peterokotniki), in treh postaj, kjer potresa nismo zaznali (sivi peterokotniki)

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 postavitev 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.
- Frey Mueller, 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.rtvsl.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.

Drugi del: razširjeni povzetki

Kategorizacija konvektivnih oblakov močnega vertikalnega razvoja iz radarskih meritev

Sašo Slabajna^{*}, Gregor Skok^{*}, Andrej Hrabar^{**}

Povzetek

Letalstvo je ena izmed vremensko bolj občutljivih panog, ne le v gospodarstvu temveč tudi kot športno-rekreacijska dejavnost. Zrakoplovom eno večjih nevarnosti predstavljajo nevihte, saj lahko nastanejo zelo hitro in so nepredvidljive, njeni spremljajoči meteorološki pojavi pa so nevarni predvsem v fazi vzleta in pristajanja. Pojav nevihtnih oblakov se zapiše v meteorološka poročila (METAR), ki jih sproti pripravljajo letalski meteorologi opazovalci, in pilotom služijo kot informacija o trenutnem stanju vremena na letališču. Tehnološki napredek je povzročil trend avtomatizacije procesov in med njimi je tudi samodejno zaznavanje vremenskih razmer na letališčih. Enega večjih izzivov pri tem predstavlja zaznavanje konvekcije, metode za njeno samodejno zaznavanje pa v Sloveniji še niso bile razvite. Cilj magistrske naloge je bil zato razviti metodo zaznavanja konvekcije in kategorizacijo konvektivnih oblakov močnega vertikalnega razvoja, bolj natančno oblakov tipa Cumulonimbus (Cb) in Cumulus Congestus (TCu), na območju Letališča Jožeta Pučnika Ljubljana.

Razvita metoda temelji na statistični obdelavi meritev radarske odbojnosti meteorološkega radarja na Pasji Ravni in meteoroloških poročil Letališča Jožeta Pučnika Ljubljana v obdobju od maja do septembra v letih 2018 in 2019. Ugotovil sem, da je metoda relativno dobro kategorizirala Cb oblake, medtem ko je imela precej več težav pri kategorizaciji TCu oblakov. Merila za kategorizacijo teh oblakov so namreč na letališču definirana zelo široko, zato je metoda le na podlagi analize meritev radarske odbojnosti zgrešila ali pa sprožila lažni alarm za pojav TCu v precej več primerih kot pri oblakih Cb. Glede na rezultate metoda žal še ne bi omogočila popolne avtonomnosti zaznavanja konvekcije, bi pa lahko služila kot dodatna pomoč pri odločitvi letalskih meteorologov opazovalcev ali zabeležiti in kateri pojav zabeležiti v meteorološko poročilo. Samo metodo pa bi se lahko nadgradilo z uporabo satelitskih meritev in meritev atmosferskih razelektritev.

Ključne besede: vremenski radar, konvekcija, algoritem FiT, METAR

Keywords: weather radar, convection, FiT algorithm, METAR

^{*} UL, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska ul. 19, Ljubljana

^{**} Agencija RS za okolje, Vojkova c. 1b, Ljubljana

Določanje radialne komponente vetra iz meritev Dopplerjevega radarja

Vito Švagelj*, Gregor Skok*, Anton Zgonc**, Benedikt Strajnar**

Povzetek

Glavna naloga meteorološkega radarja je merjenje padavin. Z malo iznajdljivosti pa lahko merimo tudi hitrost premikanja dežja v radialni smeri s pomočjo Dopplerjevega efekta. Predpostavimo, da se dežne kapljice med padanjem premikajo tudi z vetrom. Na ta način lahko izmerimo hitrost vetra in sicer samo komponento proti radarju. Z dvema radarjema pa lahko rekonstruiramo celotno vetrovno polje. Meritve vetra so danes večinoma samo pri tleh. Če bi lahko uporabili obstoječe meteorološke radarje za merjenje vetra, bi pridobili veliko več informacij o stanju atmosfere.

Zaradi načina delovanja meteorološkega radarja in merjenja padavin s sunki elektromagnetnega valovanja je merjenje radialne hitrost omejeno. Radar lahko izmeri hitrosti le do neke maksimalne vrednosti. Tiste hitrosti, ki so večje od mejne, radar izmeri kot, da bi bile manjše od maksimalne. V magistrski nalogi sem implementiral in primerjal tri metode, ki skušajo pravilno določiti resnične hitrosti iz izmerjenih. Prva je metoda s torusno preslikavo, ki temelji na matematični funkciji, ki meritev preslika v nov prostor, kjer ni več omejitve hitrosti. Ostali dve sta metoda CINDA in Meierjeva metoda, ki temeljita na premikanju po območju radarske meritve in primerjavi trenutne vrednosti z vrednostmi v okolici. Namen naloge je izbrati najboljšo metodo, ki bi jo kasneje uporabljali operativno v modelu ALADIN.

V svetu postajajo takšne metode vedno bolj popularne, vendar pa imajo mnogi težave pri uporabi. Zato je dober rezultat že to, da sem jih uspel implementirati, saj to zahteva določeno mero razumevanja samih metod. Metode niso vedno pravilno popravile meritev in to je bila največja razlika med njimi. Primerjava metod z meritvami radiosonde in modelom ALADIN je sicer pokazala, da so metode izboljšale napake nepopravljenih meritev. Razlike napak za metode pa so bile tako majhne, da iz primerjave nisem mogel določiti najboljših metod. Tako je metoda s torusno preslikavo najboljši kandidat za operativno uporabo v modelu ALADIN v Sloveniji, ker je uspešno popravila največ meritev.

Ključne besede: vremenski radar, Dopplerjev radar, Nyquistova hitrost, dealiasing, vertikalna radiosondaža

Keywords: weather radar, Doppler radar, Nyquist velocity, dealiasing, vertical radiosonde

* UL, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska ul. 19, Ljubljana

** Agencija RS za okolje, Vojkova c. 1b, Ljubljana

Pojavnost kondenzacijskih sledi nad Slovenijo

Anžej Curk*, Gregor Skok*

Povzetek

Kondenzacijske sledi za letali (angl. condensation trails oziroma contrails) so eden vizualno najbolj opaznih antropogenih pojavov v ozračju. Kondenzacijska sled nastane zaradi sproščanja vodne pare pri izgorevanju goriva v letalskem motorju. Vodna para, ki nastane ob izgorevanju, se v motorju združi z vodno paro iz okoliškega zraka, in če skupna količina vodne pare preseže nasičenje, bo v izpuhu prišlo do kondenzacije in nastanka oblaka. Kondenzacijske sledi tudi vplivajo na okolje (npr. na sevalno bilanco Zemlje). V okviru magistrske naloge je bila opravljena analiza radiosondažnih meritev za obdobje 16 let. Pri analizi se je uporabil Schmidt-Applemanov kriterij, preko katerega se lahko določi, če so pogoji v ozračju primerni za nastanek sledi. Z uporabo tega kriterija je bila izračunana potencialna pojavnost kondenzacijskih sledi nad Slovenijo. Analiza je pokazala, da so pogoji v ozračju nad Slovenijo večinoma primerni za nastanek sledi (približno 97 % vseh analiziranih dni), so pa redkeje pogoji primerni za nastanek obstojni sledi (približno 30 % vseh analiziranih dni). Predvsem pa je zanimivo dejstvo, da so morebitne kondenzacijske sledi le redko vidne s tal, ker oblačnost v nižjih plasteh pogosto zastira pogled. Povprečna debelina območja, kjer je izpolnjen pogoj za nastanek sledi, se skozi leto spreminja, in je v hladnejših mesecih bistveno večja kot v poletnih mesecih. Na nastanek sledi v prvi vrsti vpliva temperatura in nekoliko manj relativna vlažnost okoliškega zraka.

Ključne besede: kondenzacijske sledi, letala, Slovenija

Keywords: condensation trails, aircraft, Slovenia

* UL, Fakulteta za Matematiko in Fiziko, Jadranska ul. 19, Ljubljana

