

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.

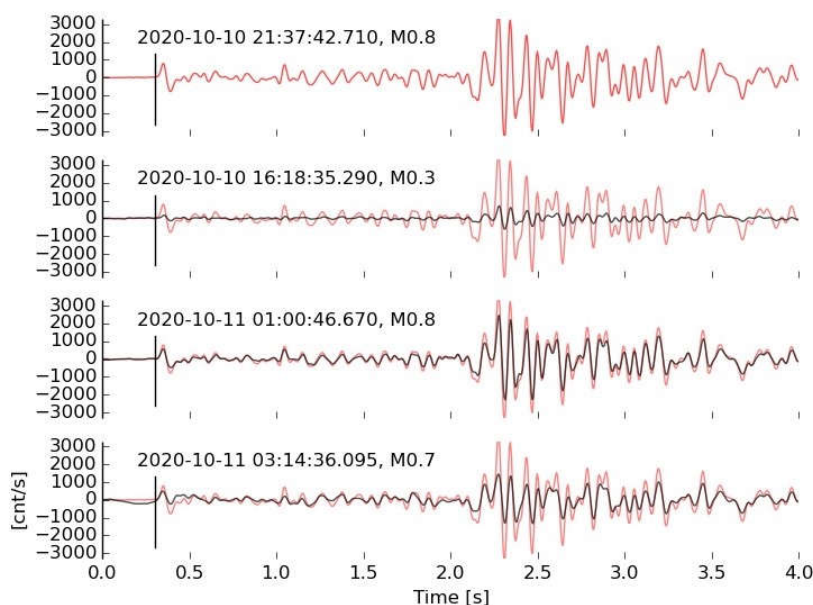
Uvod

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

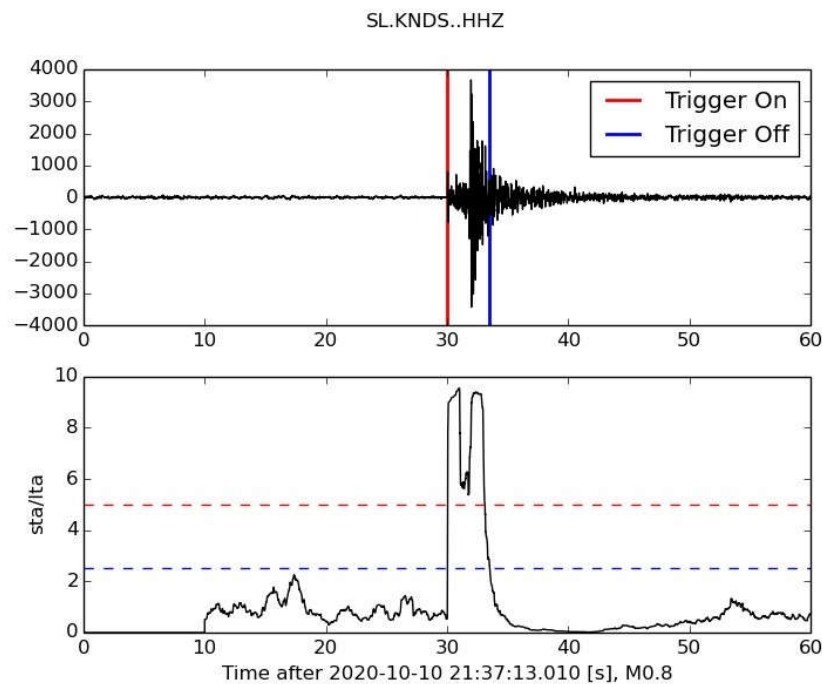
* Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

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 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 nemir 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 uporaben 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 navkrižno 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.

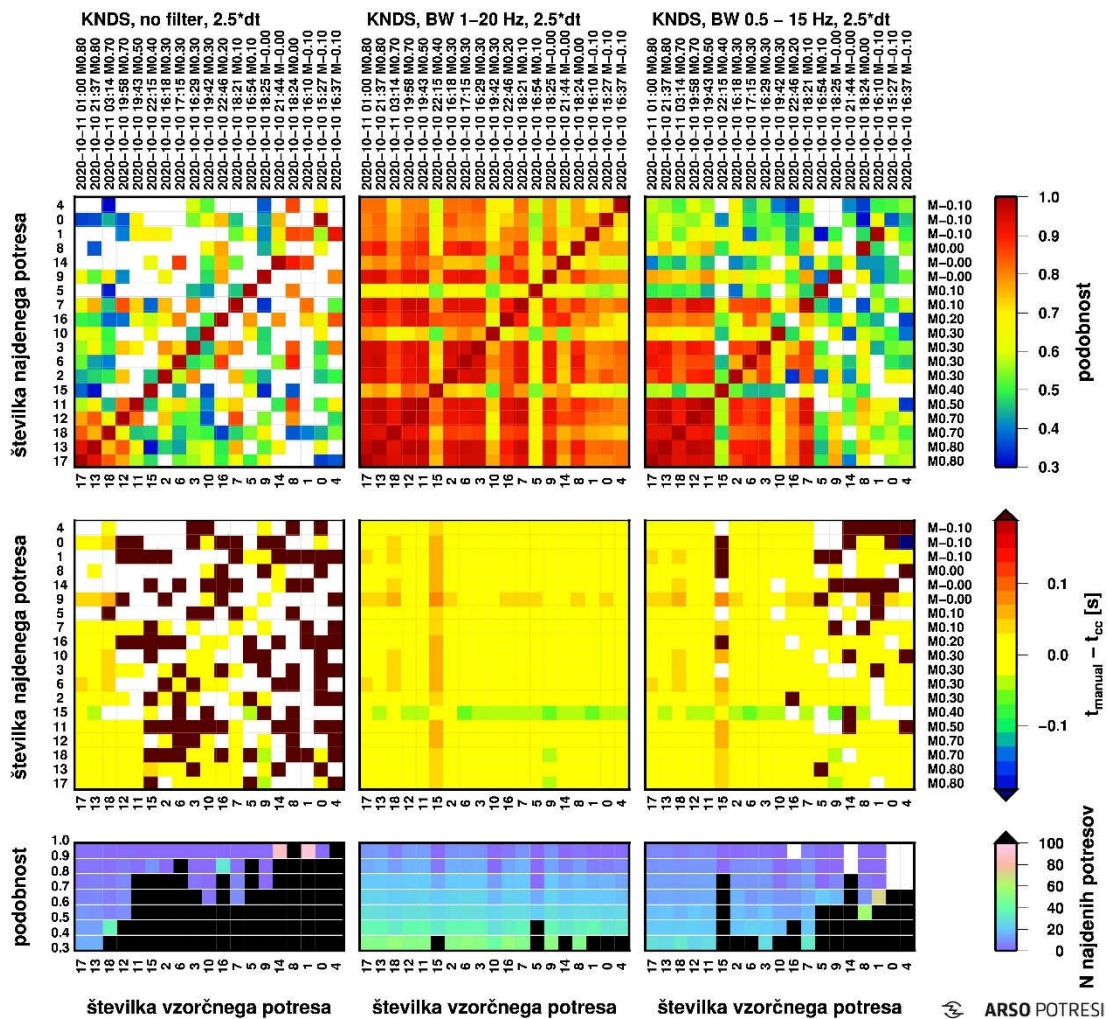
Potresni niz smo najprej analizirali tako, da smo vizualno pregledali celotne zapise izbranih dni na potresu bližnjih opazovalnicah ter našli in uspeli locirati 19 potresov z magnitudami med -0,1 in 0,8. Samodejni sistem opisan v uvodu, ki obdeluje seizmične zapise državne mreže potresnih opazovalnic 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 `obspy.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.

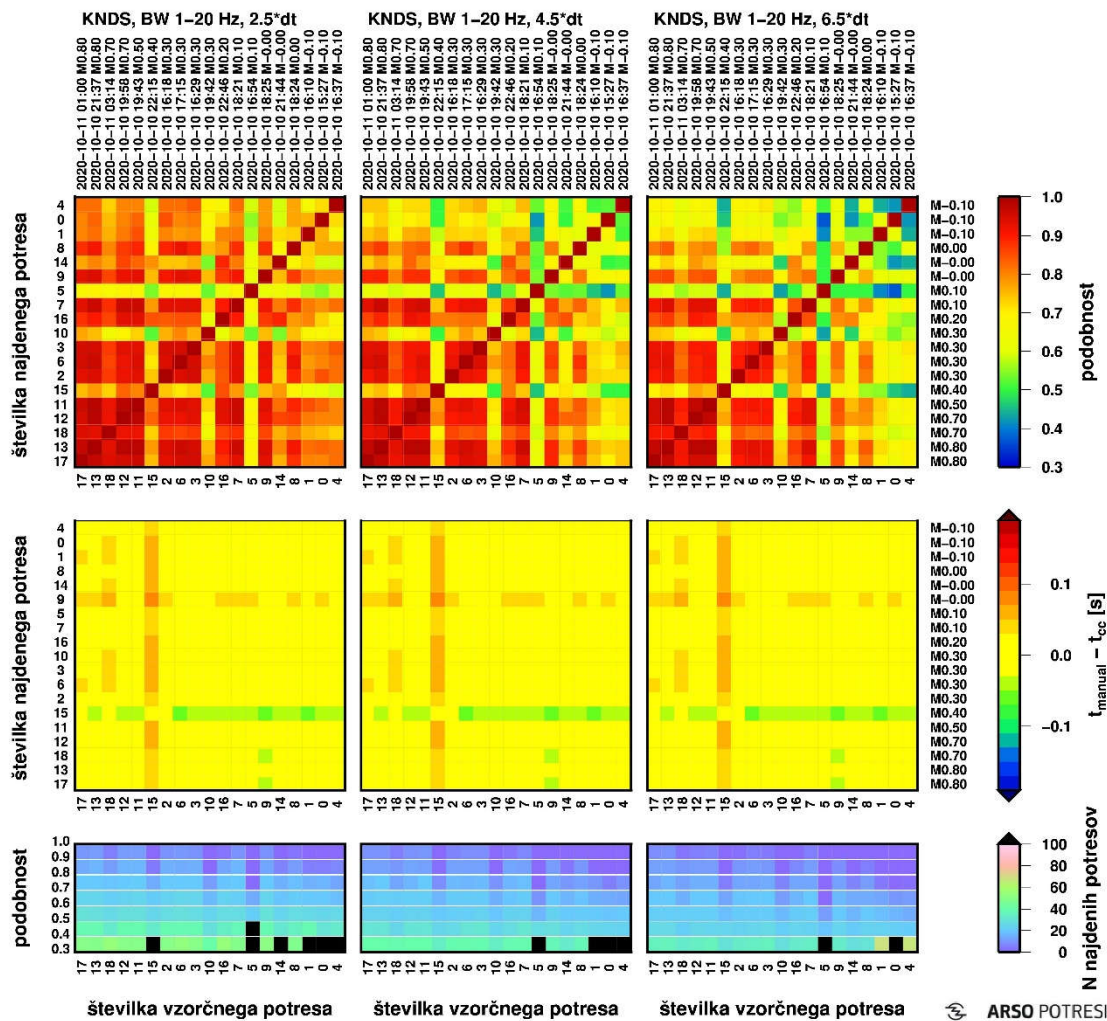
Najprej si oglejmo zgornje diagrame slike 3, ki prikazujejo podobnost. Potresi so razvrščeni po magnitudi, oštevilčeni pa so po času nastanka. Belo obarvana območja predstavljajo primere, ko algoritem ni prepoznal podobnosti tega potresa z vzorčnim potresom. Vidimo, da smo s prvim nefiltriranim vzorčnim 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 najustreznejši 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

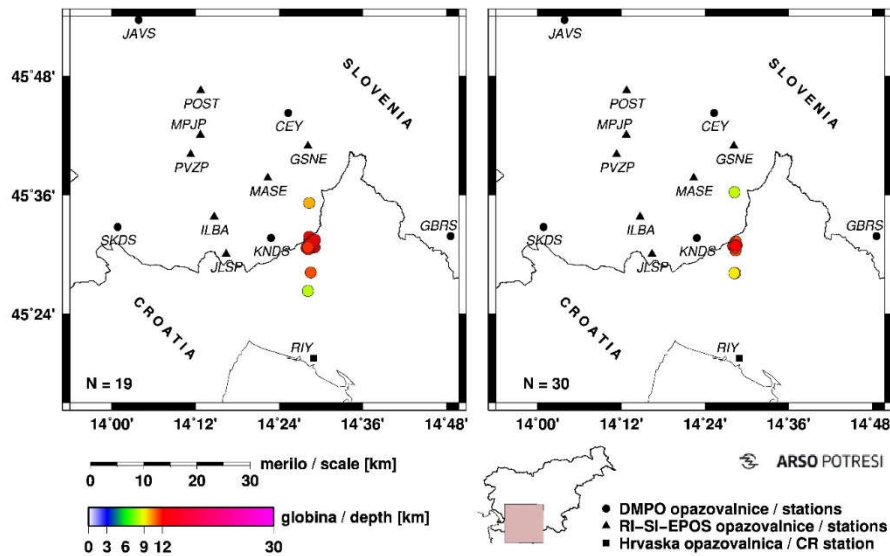
V nadaljevanju smo na obeh gručah potresov, ki smo ju v času delovanja RI-SI-EPOS mreže zabeležili, preizkusili novo orodje.

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.

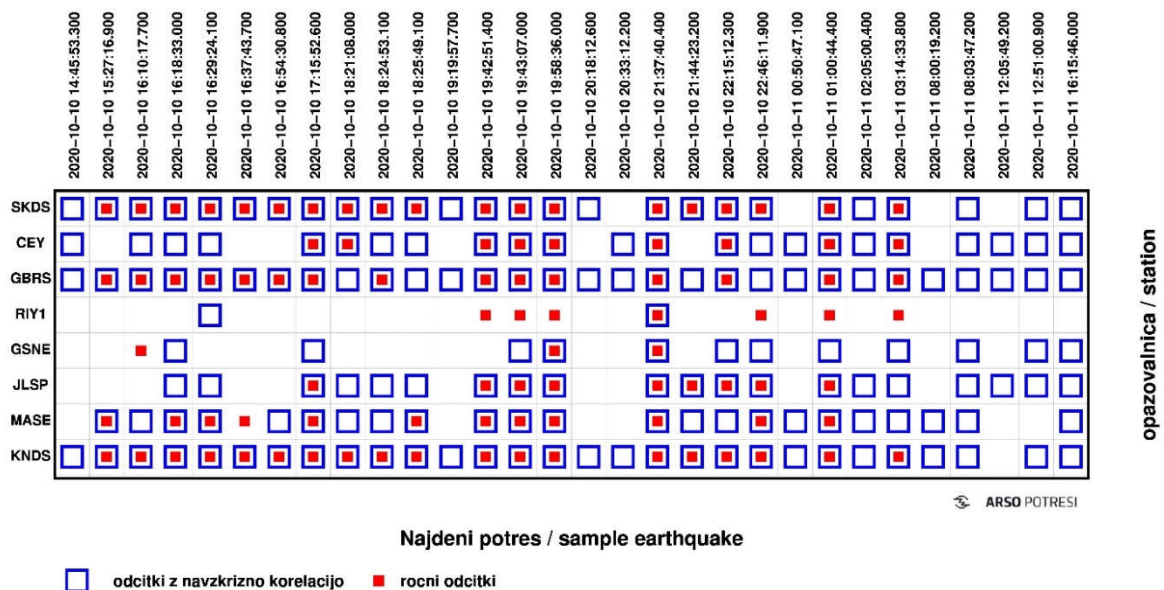
V drugem koraku smo najdenim podobnim zapisom na posamezni opazovalnici skušali odčitati še vstopne čase vzdolžnega in prečnega valovanja. Pri tem smo uporabili Obspy funkcijo `obsipy.signal.cross_correlation.xcorr_pick_correction` (Beyreuther in sod., 2010; Megies in sod., 2011; Krischer in sod., 2015), 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.

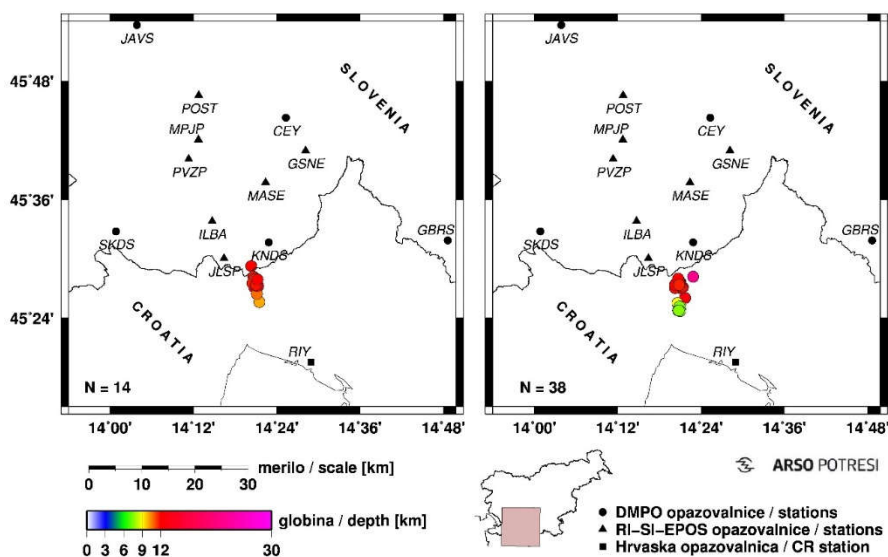


Slika 5 – Potresi 10. in 11. oktobra 2020 na južnem pobočju Snežnika analizirani ročno (levo) in z navzkrižno korelacijo (desno). Na levi karti je 19 potresov, na desni pa 30.



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 šibkejše. 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.