

# ALPARRAY – MEDNARODNI PROGRAM SEIZMOLOŠKIH IN GEOFIZIKALNIH RAZISKAV NA ŠIRŠEM OBMOČJU ALP

Andrej Gosar<sup>1</sup>

## Povzetek

Notranjo zgradbo Zemlje raziskujemo predvsem z analizo potresnih valov, ki jih zaznavamo s stalnimi potresnimi opazovalnicami, te pa so po svetu razporejene zelo neenakomerno. Za izboljšanje geofizikalnih modelov je zato koristno nekajletno dopolnilno opazovanje seizmičnosti z dodatnimi seizmografi. Razvoj prenosne merilne opreme je v zadnjih dveh desetletjih omogočil številne tovrstne projekte globokih raziskav litosfere. V Evropi je za boljše razumevanje kompleksnega stika med litosferskimi ploščami zanimivo predvsem območje Alp, ki so nastale s kolizijo Evrazijske in fragmentirane Afriške tektonske plošče. V okviru raziskovalnega programa AlpArray je bilo na tem območju v 11 državah postavljenih več kot 600 dodatnih seizmografov, ki so dve leti registrirali potrese. Zbrani podatki omogočajo poglobljene raziskave, predvsem s seizmično tomografijo in analizo disperzije površinskih valov, rezultat katerih so podrobni 3D-modeli porazdelitve seizmičnih hitrosti in gostote. Dopolnjujejo jih gravimetrične in druge geofizikalne raziskave. Skupaj prispevajo k natančnejšemu lociranju potresnih žarišč, poznavanju seizmotektonike in boljšim ocenam potresne nevarnosti.

## ALPARRAY – AN INTERNATIONAL PROGRAMME OF SEISMOLOGICAL AND GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS IN THE GREATER ALPINE AREA

### Abstract

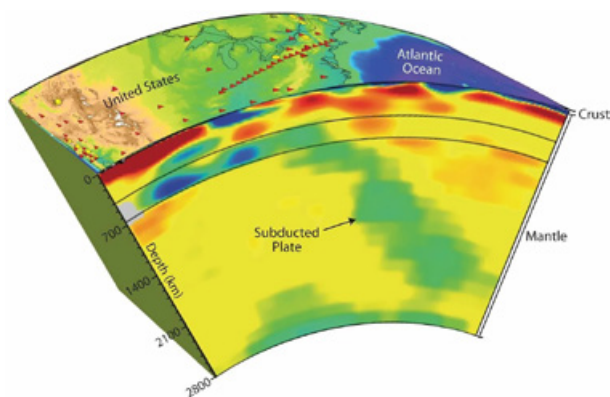
*The internal structure of the Earth is studied mainly by the analysis of seismic waves. These are recorded by permanent seismological stations, but they are very unevenly distributed. To improve geophysical models, observations of seismicity with additional seismographs for a couple of years is meaningful. The development of portable measuring equipment in the past two decades has given rise to numerous studies of deep lithospheric structures worldwide. For a better understanding of the complex lithosphere plate boundaries in Europe, the most interesting studies are of the Alps, which were formed by the collision of the Eurasian and the fragmented African tectonic plates. Within the AlpArray research programme, 600 additional seismographs were deployed in 11 countries, which measured earthquakes for two years. The recorded data enabled in-depth studies, especially using seismic tomography and surface wave dispersion methods. They resulted in detailed 3D models of seismic velocity and density distribution, supplemented by gravimetric and other geophysical studies. All this together contributes to more accurate locations of earthquake hypocentres, knowledge of seismotectonics, and better seismic hazard assessment.*

<sup>1</sup> dr., Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo, ARSO, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, Ljubljana, [andrej.gosar@gov.si](mailto:andrej.gosar@gov.si)

## UVOD

Raziskave notranje zgradbe Zemlje so zelo pomembne za razumevanje procesov, ki povzročajo geološke naravne nesreče, kot so potresi in vulkanski izbruhi. Njihov skupni imenovalac je tektonika litosferskih plošč, osnovna teorija sodobne geologije, ki se je oblikovala v šestdesetih letih prejšnjega stoletja (Gosar, 2010). Litosfera je trdna zunanja lupina Zemlje, ki je pod oceani debela od 70 do 100 km, pod celinami pa od 100 do 150 km. Pod njo je astenosfera, ki je delno staljena in počasi teče kot

zelo viskozna tekočina. Konvekcijski tokovi v Zemljinem plašču so osnovno gibalno premikanje litosferskih plošč. Litosfero sestavljata Zemljina skorja in vrhnji del plašča, ki se v svojih fizikalnih lastnostih (gostota, hitrost potovanja potresnih valov) znatno razlikujeta, meja med njima je Mohorovičićeva diskontinuiteta (Gosar, 2009). V šestdesetih letih prejšnjega stoletja se je še zelo malo vedelo o zgradbi in strukturi litosfere, v zadnjih desetletjih pa so metode raziskav zelo napredovale (slika 1). Večinoma temeljijo na analizi potresnih ali seizmičnih valov (Grad in sod., 2009), ki nastanejo ob naravnih (tektonskih)



**Slika 1:** Model notranje zgradbe Zemlje pod Severno Ameriko na podlagi seizmične tomografije. Modra in zelena pomenita bolj toge in hladnejše kamnine, kot je podrivajoča se litosferska plošča (angl. *subducted plate*), rdeča pa toplejše in mehkejše kamnine, kot so magmatski pojavi v zahodnem delu, ki so vzrok za nastanek gorske verige (EarthScope, 2024).

**Figure 1:** Model of the Earth's inner structure underneath North America. Blue and green mean colder and stiffer rock as subducted lithospheric plate, while red means warmer and softer rocks as magmatic features in the western part, connected to the formation of the mountain chain (EarthScope, 2024)

potresih (pasivne metode) ali jih generiramo umetno z močnimi eksplozijami (aktivne metode). Poleg tega pa se za raziskave uporabljajo tudi druge geofizikalne metode, kot so magnetotelurske in gravimetrične (Gosar, 2011).

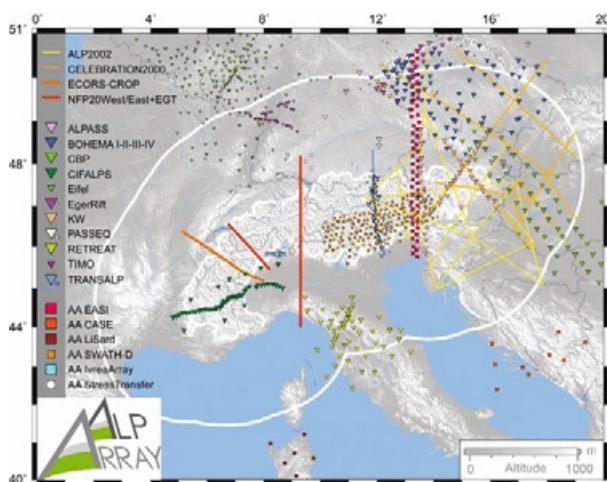
Alpe so nastale s kolizijo (trkom) Evrazijske in fragmentirane Afriške litosferske plošče in so najbolj raziskan orogen na svetu. Zanje je značilna zelo zapletena tektonska zgradba s številnimi narivi in pokrovi. Njihova struktura v globini se z različnimi geofizikalnimi raziskavami v zadnjih desetletjih šele počasi razkriva v vedno boljši ločljivosti. Na širšem območju Alp se Evrazijska plošča proti jugu podri-va pod Jadransko mikroploščo, ki je fragment Afriške plošče. Globina Mohorovičićeve diskontinuitete se zato tu močno spreminja in je od 25 km do več kot 65 km. Kolizija pa ni preprosta, saj se Jadranska mikroplošča kot klin vriva v skorjo Evrazijske plošče, kar se kaže v zelo zapleteni geološki zgradbi na širšem območju Slovenije, kjer se stikajo velike geotektonske enote Alp, Dinaridov in Panonskega bazena (Brückl in sod., 2007).

## AKTIVNE IN PASIVNE SEIZMIČNE RAZISKAVE LITOSFERE

Pri aktivnih seizmičnih raziskavah postavimo vzdolž izbranih profilov za krajši čas posebne seizmografe in z njimi zaznamo prihode različnih vrst valovanj,

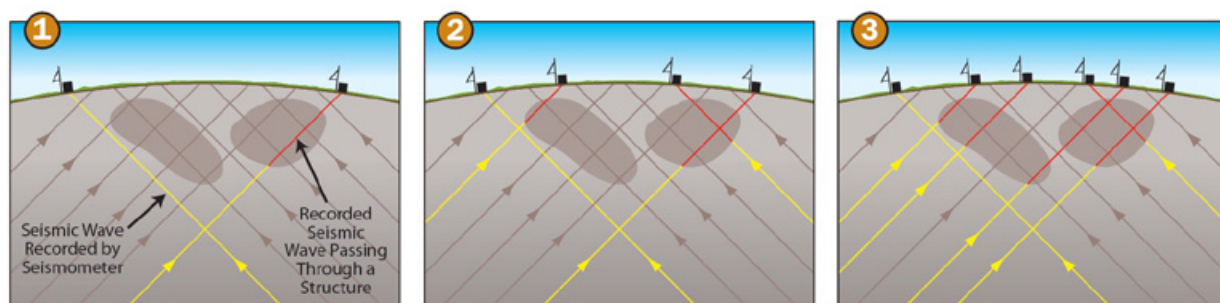
ki smo jih generirali z močnimi eksplozijami v nekaj deset metrov globokih vrtinah (Gosar, 2002). Glede na način potovanja potresnih valov skozi litosfero imenujemo to širokokotna refleksijska in refrakcijska seizmika. Obsežen seizmični projekt (ALP2002) na območju vzhodnih Alp ter prehoda v Panonski bazen in Dinaride je mednarodna skupina izvedla leta 2002, ko smo vzdolž dvanajstih profilov skupne dolžine 4100 km postavili 1055 seizmografov (127 v Sloveniji) z razmikom med 3 in 6 km in nato v treh nočeh, ko so antropogene seizmične motnje najmanjše, posamično sprožili 31 močnih eksplozij (dve v Sloveniji), ki jih je bilo mogoče zaznati tudi 300 km daleč (slika 2). S tem projektom smo pridobili do zdaj najboljše podatke o strukturi litosfere in zelo velikih spremembah v globini do Mohorovičićeve diskontinuitete pod Slovenijo (Brückl in sod., 2007; Gosar, 2009).

Pri pasivnih globokih seizmičnih raziskavah so vir valovanja naravni (tektonski) potresi, zato moramo namestiti dodatne seizmografe za dlje časa (nekaj let), da z njimi zaznamo dovolj potresov (slika 2). Potresi so lahko šibkejši lokalni, oddaljeni do okoli 140 km, nekoliko močnejši regionalni, oddaljeni do 1100 km, ali zelo oddaljeni močni potresi (teleseizmi). Vsa njihova potresna valovanja so zelo uporabna za raziskave globoke notranjosti Zemlje, razlikujejo pa se metode analize podatkov (Gosar, 2011). Pri lokalnih potresih je to predvsem seizmična tomografija (Rajh, 2022), pri kateri na podlagi velikega števila seizmičnih žarkov, ki



**Slika 2:** Položaj večjih seizmoloških projektov na širšem območju Alp do leta 2018. Aktivne seizmične raziskave so označene s polno črto, pasivna seizmološka opazovanja pa s trikotniki. Komplementarna opazovanja programu AlpArray so prikazana s kvadrati (Hetenyi in sod., 2018).

**Figure 2:** Location of seismicological projects in the greater Alpine area up to 2018. Active seismic investigations are shown as solid lines and passive seismicological observations as triangles. AlpArray complementary experiments are shown as squares (Hetenyi et al., 2018)



**Slika 3:** Pomen povečevanja števila seizmografov na Zemljinem površju za raziskave geoloških struktur v notranjosti Zemlje z metodo seizmične tomografije (EarthScope, 2024)

**Figure 3:** The significance of increasing the number of seismographs at the surface to investigate geological structures inside the Earth with the seismic tomography method (EarthScope, 2024)

preslikajo notranjost, izdelamo 3D-modele porazdelitve seizmičnih hitrosti P- in S-valovanja (slika 1). Pri regionalnih potresih pridobimo predvsem 1D-modele spreminjanja seizmične hitrosti z globino z analizo njihove disperzije, to je odvisnosti hitrosti od valovne dolžine valovanja (Živčič in sod., 2000). Pri analizi zelo oddaljenih potresov se za globoko notranjost Zemlje prav tako uporablja tomografija, za raziskave litosfere pa predvsem metoda funkcije sprejemnikov (angl. *Receiver Function*), ki temelji na tem, da se na Mohorovičičevi diskontinuiteti del P-valov pretvori v S-valove, ki nato potujejo počasneje skozi skorjo, kar omogoča določitev njene debeline (Stipčević in sod., 2020). Geofizikalni modeli, ki jih pridobimo s pasivnimi metodami, so glede ločljivosti in globinskega dosega seveda zelo odvisni od gostote seizmografov ter števila potresov, ki jih zaznamo. Glede na razpoložljivo opremo in potresne značilnosti območja moramo torej izbrati optimalno gostoto postavitve in trajanje opazovanj.

S seizmično tomografijo ugotavljamo razlike v fizikalnih lastnostih med različnimi geološkimi plastmi ali strukturami (Gosar, 2011). Možnost zaznavanja in ločevanja struktur pa je močno odvisna od števila seizmičnih žarkov, ki jih prečkajo, torej od števila seizmografov na Zemljinem površju, kar kaže slika 3. V primeru 1 imamo le dva seizmografa in seizmični valovi prečkajo le desno od obeh struktur, ki imata drugačne lastnosti od okolice. Zato obstoja leve strukture s to raziskavo sploh ne moremo ugotoviti. V primeru 2 smo dodali še dva seizmografa in lahko zaznamo obe strukturi, vendar še ne moremo določiti njune oblike in velikosti. V primeru 3 s šestimi seizmografi na površju pa obe strukturi prečka dovolj seizmičnih žarkov, da lahko s tomografsko analizo podatkov določimo obliko in velikost obeh struktur in izdelamo različne prereze skozi notranjost Zemlje (EarthScope, 2024).

## VELIKI SEIZMOLOŠKI PROGRAMI RAZISKAV LITOSFERE

Na podlagi uspešnih seizmoloških in geofizikalnih projektov med letoma 1980 in 2000, ki so dali prvi podrobnejši vpogled v globoke strukture litosfere, sta razvoj in cenovna dostopnost seizmografov pripeljala do sklepa, da je na številna odprta znanstvena vprašanja mogoče odgovoriti predvsem z boljšimi opazovanji, to je z namenskiimi programi postavitve začasnih seizmografov v dovolj gosti mreži v daljšem obdobju. Glede na velikost ozemlja se to lahko doseže s sistematičnim premikanjem razpoložljivih seizmografov po površju. Najbolj znan tak program je EarthScope v ZDA (EarthScope, 2024), kmalu pa mu je sledila tudi Evropa.

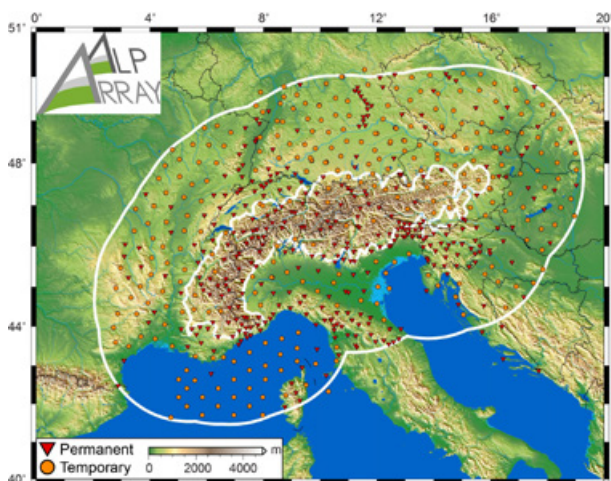
EarthScope je bil velik geoznanstveni program raziskav notranje zgradbe Zemlje pod Severno Ameriko, ki je potekal med letoma 2003 in 2018. Ključni del programa je bil projekt USArray pod vodstvom Pridružene raziskovalne ustanove za seizmologijo (angl. *Incorporated Research Institutions for Seismology* – IRIS). V obdobju 16 let so sistematično premikali 400 seizmografov po površju ZDA od zahoda proti vzhodu (EarthScope, 2024). Za dve leti so jih postavili na nekem ozemlju v medsebojni razdalji okoli 70 km. V tem času so zaznavali potrese različnih magnitud, nastalih kjer koli na svetu, in zbrali dovolj seizmogramov, ki ustrezajo različnim seizmičnim žarkom, to je poti potresnega valovanja od žarišča potresa skozi notranjost Zemlje do seizmografa (slika 3). Poleg registracije potresov so z dodatnimi 1700 seizmografi izvajali aktivne seizmične meritve, pri katerih so potresno valovanje tvorili z močnimi eksplozijami, in magnetotelurske raziskave, ki temeljijo na meritvah naravnih električnih in magnetnih polj Zemlje. Tako so dobili zelo podrobne podatke o zgradbi litosfere in Zemljinega plašča in izdelali podrobne 3D-modele porazdelitve različnih fizikalnih količin, predvsem hitrosti potovanja



seizmičnih valov (slika 1). Ločljivost teh modelov je bila zelo dobra do globine okoli 70 km, kar predstavlja pod celinami večino litosfere (Gosar, 2009) in kjer potekajo glavni globalni procesi, povezani s tektoniko litosferskih plošč, ki so pomembni za razumevanje naravnih pojavov, kot so potresi in vulkani.

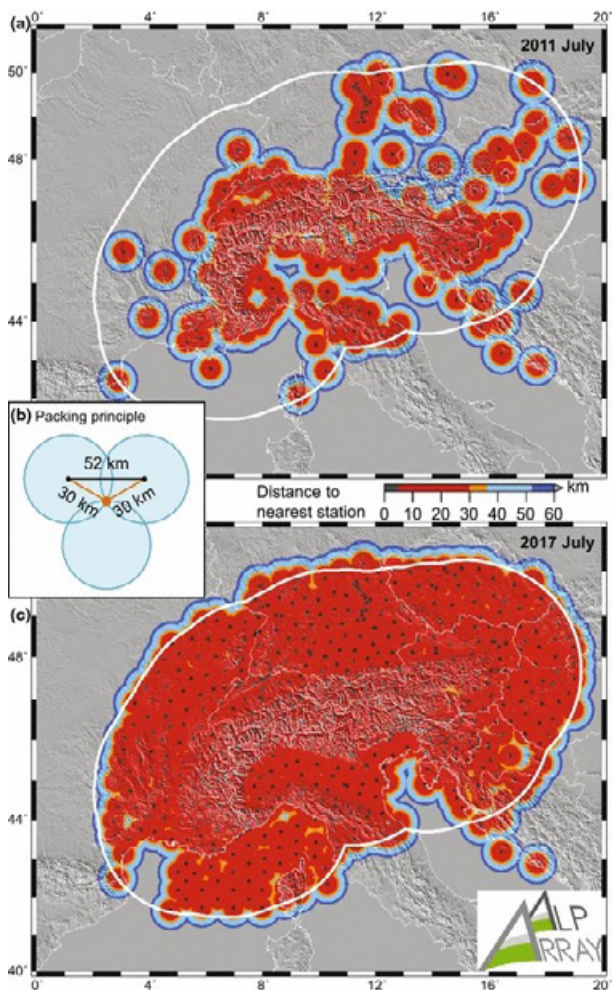
## MEDNARODNI PROGRAM RAZISKAV ALPARRAY

V Evropi se raziskovalci niso odločili za sistematično premeščanje seizmografov po površju celotne celine, saj so seizmotektonske razmere med njenimi severnimi predeli (Baltski ščit) in Sredozemljem ter Alpami geološko popolnoma različne. Tako so se osredotočili najprej na območja, ki so raziskovalno najbolj zanimiva, kar so v Evropi Alpe. V okviru raziskovalnega programa AlpArray je najpomembnejši projekt zgostitev seizmoloških merilnih mrež (angl. *array*), ki je dal ime celotnemu programu. Za obdobje, daljše od dveh let, je bilo na območju Alp (slika 4) postavljenih več kot 600 dodatnih širokopasovnih seizmografov, ki so dopolnili stalne in začasne potresne opazovalnice (AlpArray Seismic Network, 2015). Cilj je bil doseči tako gostoto, da razdalja med sosednjimi seizmografi ne bi bila večja od 52 km (slika 5). Pri tem je sodelovalo 36 ustanov iz 11 držav, tudi Urad za seizmologijo Agencije RS za okolje (Hetenyi in sod., 2018). V Sloveniji sicer dodatne namestitve začasnih opazovalnic niso bile potrebne, saj imamo dovolj gosto državno mrežo potresnih opazovalnic (Vidrih in sod., 2006), smo pa sodelovali pri



**Slika 4:** Območje raziskav programa AlpArray s stalnimi (trikotniki) in začasnimi (krožci) potresnimi opazovalnicami, postavljenimi v okviru tega programa (AlpArray Seismic Network, 2015)

**Figure 4:** The area of the AlpArray research programme with permanent (triangles) and temporary (circles) seismic stations deployed within this programme (AlpArray Seismic Network, 2015)

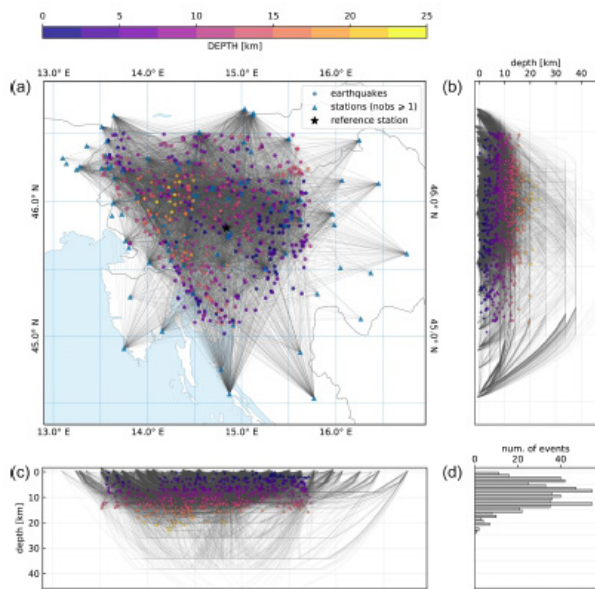


**Slika 5:** Karta, ki kaže razdaljo do najbližje sosednje širokopasovne potresne opazovalnice: a) vrzeli na začetku leta 2011, ko je bilo 234 opazovalnic; b) princip postavljanja novih začasnih opazovalnic; c) medsebojne oddaljenosti, ko je bilo postavljenih vseh 628 opazovalnic mreže AlpArray leta 2017 (Hetenyi in sod., 2018).

**Figure 5:** Map showing the distance to the closest nearby broadband seismicological station: a) spacing at the beginning in 2011 with 234 stations; b) principle of positioning newly installed temporary stations; c) spacing of the full 628 stations of the AlpArray Seismic Network in 2017 (Hetenyi et al., 2018)

različnih raziskavah in upravljanju ter vzdrževanju obsežne zbirke seizmoloških in drugih podatkov. Območje raziskav je bilo opredeljeno z oddaljenostjo 250 km od glajene plastnice nadmorske višine 800 m okoli Alp (slika 4). Program AlpArray je tesno povezan z največjim projektom upravljanja raziskovalne infrastrukture na področju geoznanosti v Evropi – Opazovalni sistem Evropske plošče (angl. European Plate Observing System – EPOS) (Gosar, 2021).

Zbrani podatki so omogočili številne poglobljene raziskave posameznih območij Alp, med katerimi je med bolj zanimivimi stik med geotektonskimi enotami Alp, Dinaridov in Panonskega bazena, katerega pomemben del je v Sloveniji.



**Slika 6:** Potresne opazovalnice in potresna žarišča, povezujejo jih žarki, ki so bili uporabljeni pri raziskavi z metodo seizmične tomografije na območju Slovenije in SZ Hrvaške (Rajh in sod., 2022).

**Figure 6:** Seismological stations and earthquake hypocentres, connected by seismic rays, used in the seismic tomography study of Slovenia and NW Croatia (Rajh et al., 2022)

Gregor Rajh je v svoji doktorski disertaciji z naslovom *Raziskave strukture Zemljine skorje v severozahodnih Dinaridih z metodo lokalne seizmične tomografije* (Rajh, 2022) izvedel poglobljene tomografske raziskave, pri katerih je poleg obstoječih potresnih opazovalnic v Sloveniji, Italiji, Avstriji in na Hrvaškem uporabil tudi podatke mreže AlpArray (slika 6). Rezultat so zelo podrobni 1D- in 3D-modeli porazdelitve seizmičnih hitrosti, ki imajo veliko boljše ločljivost od predhodnih (Rajh in sod., 2022). Temeljijo predvsem

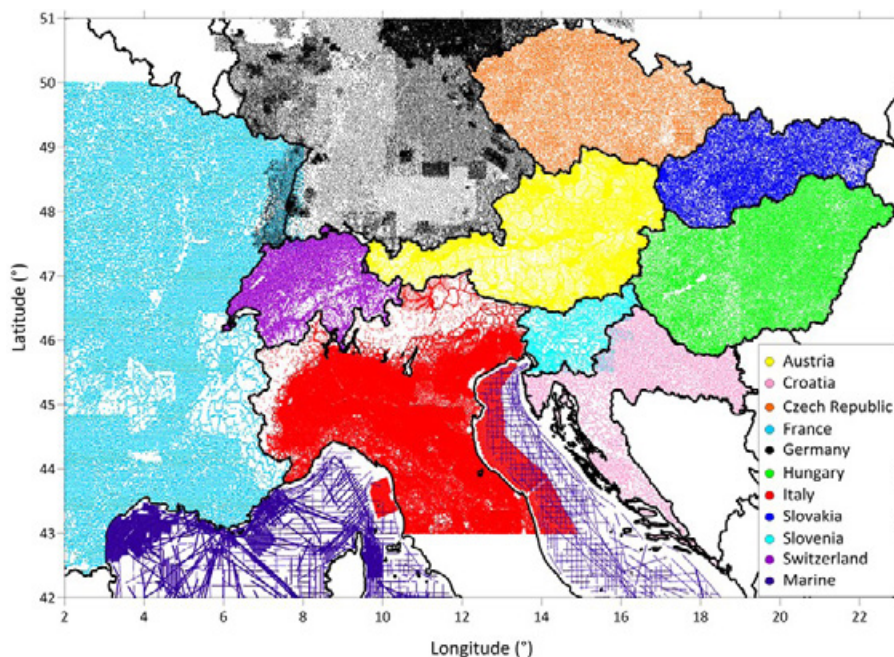
na obsežnih podatkih, zbranih v zadnjih 20 letih z novo državno mrežo potresnih opazovalnic Slovenije (Vidrih in sod., 2006), saj je uporabil seizmogramе skoraj 600 potresov, ki so bili zabeleženi na vsaj desetih opazovalnicah (slika 6). Raziskave so potekale v dveh korakih, najprej so bili izdelani enodimenzionalni (1D) modeli spreminjanja hitrosti z globino, pri katerih se je pokazalo, da gre v Sloveniji z okolico za tri geofizikalno med seboj različna območja (Rajh in sod., 2022). Podrobna analiza 1D-modelov je v drugem koraku omogočila natančnejšo inverzijo pri izdelavi tridimenzionalnih modelov porazdelitve hitrosti ter P- in S-valovanja z metodo lokalne seizmične tomografije (Rajh in sod., 2024). Končni hitrostni modeli omogočajo boljše lociranje žarišč potresov, kar je zelo pomembno za seizmotektonske analize in boljše ocene potresne nevarnosti.

## RAZISKOVALNE SKUPINE V OKVIRU PROGRAMA ALPARRAY

Znanstvenoraziskovalno delo v okviru programa AlpArray poteka v petih raziskovalnih skupinah (RS).

**RS Površinski seizmični valovi** se je osredotočila na lastnosti Rayleighovih in Lovovih potresnih valov ter njihove uporabe pri globokih raziskavah litosfere (Živčič in sod., 2000; Gosar, 2009).

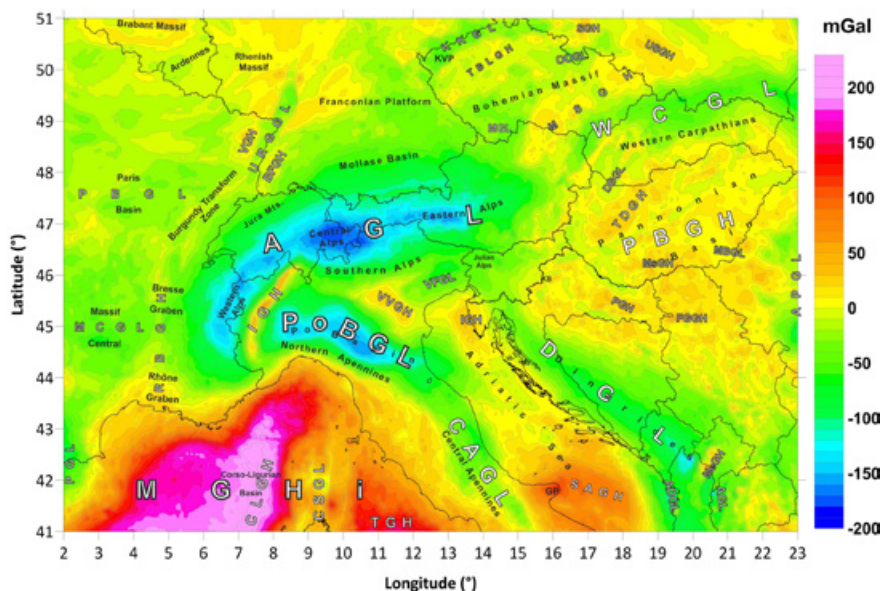
**RS Funkcije sprejemnikov** se je usmerila v raziskave debeline Zemljine skorje na podlagi pretvorbe seizmičnih valov pri prehodu iz Zemljinega plašča



**Slika 7:** Porazdelitev več kot milijon gravimetričnih točk na območju AlpArray, ki so bile vključene v pripravo homogenizirane zbirke težnostnih podatkov (Zahorec in sod., 2021)

**Figure 7:** The distribution of more than 1 million gravity points in the area of AlpArray included in the compilation of the homogeneous data set (Zahorec et al., 2021)





**Slika 8:** Nova gravimetrična karta Bouguerjevih težnostnih anomalij, pripravljena v okviru AlpArray z označenimi glavnimi regionalnimi anomalijami (Zahorec in sod., 2021)

*Figure 8:* New gravity map of Bougere anomalies prepared in the frame of AlpArray with the main regional anomalies indicated (Zahorec et al., 2021)

v skorjo na Mohorovičičevi diskontinuiteti z metodo analize zakasnitev na posamezni potresni opazovalnici (funkcije sprejemnikov; angl. Receiver Function) (Stipčević in sod., 2020; Gosar, 2009).

RS **Seizmičnost, seizmotektonika in lokalna seizmična tomografija** je omogočila izboljšanje vedenja o porazdelitvi potresnih žarišč, njihovi povezavi s tektonskimi prelomi in izdelavi geofizikalnih modelov litosfere s tomografskimi metodami (Hetenyi in sod., 2018; Rajh in sod., 2022; Rajh in sod., 2024).

RS **Seizmična anizotropija** je uporabljala nove metode raziskav in modeliranje anizotropskih pojavov v litosferi ter zgornjem delu plašča, ki prispevajo podatke, pomembne za razumevanje odnosov med litosferskimi ploščami.

RS **Gravimetrija** je bila osredotočena na pripravo prve homogenizirane zbirke gravimetričnih podatkov za širše območje Alp ter na izdelavo karte Bouguerjevih težnostnih anomalij in drugih produktov za izboljšanje modelov litosfere (Zahorec in sod., 2021).

Razlike v gostoti kamnin pod površjem se kažejo v majhnih razlikah v težnostnem pospešku na Zemljinem površju, kar se lahko izmeri z zelo občutljivimi gravimetri in se v geofiziki uporablja za geološke raziskave (Gosar, 2011). Odstopanje od normalne vrednosti zaradi različne gostote kamnin se imenuje težnostna ali Bouguerjeva anomalija. Zaradi izrazite razlike v gostoti Zemljine skorje in plašča se spreminjiva globina do Mohorovičičeve diskontinuitete lepo pokaže v gravimetričnih podatkih. Gravimetrična

karta je zato ena od osnovnih geofizikalnih kart vsake države. V okviru programa AlpArray smo oblikovali prvo homogenizirano zbirko težnostnih podatkov za celotno območje Alp (slika 7), ki obsega več kot milijon meritev (Zahorec in sod., 2021). Na njihovi podlagi smo pripravili karto Bouguerjevih težnostnih anomalij (slika 8), ki kaže tako spremembe v debelini Zemljine skorje, na primer velika debelina pod Alpami in majhna na območju Panonskega bazena ter Jadranskega in Ligurskega morja, kot tudi vpliv zelo debele plasti manj gostih usedlin v nekaterih večjih sedimentnih bazenih, kot je Padska nižina.

## SKLEPNE MISLI

V okviru programa AlpArray je bilo zbranih zelo veliko kakovostnih raziskovalnih podatkov, ki bodo omogočali poglobljene raziskave še dolgo časa. Na podlagi zelo uspešnega mednarodnega sodelovanja pri njegovi izvedbi so se sodelujoče institucije odločile za nadaljevanje raziskav v novem programu AdriaArray, ki obsega večji del Jadranske mikroplošče, z začasno namestitvijo dodatnih seizmografov predvsem v državah zahodnega Balkana (AdriaArray, 2024). Tu so vrzeli med stalnimi opazovalnicami še veliko večje, kot so bile na območju Alp. Stiki Jadranske mikroplošče s sosednjimi ploščami so v Evropi območja največje potresne dejavnosti in zato tudi največje potresne nevarnosti. Tudi pri tem raziskovalnem programu Urad za seizmologijo Agencije RS za okolje dejavno sodeluje. Raziskave obeh programov omogočajo pripravo veliko podrobnejših geofizikalnih modelov, kot so bili na voljo do zdaj, in tako izboljšanje ocen potresne nevarnosti.

## Viri in literatura

1. AdriaArray, 2024. [https://orfeus.readthedocs.io/en/latest/adria\\_array\\_main.html](https://orfeus.readthedocs.io/en/latest/adria_array_main.html), 11. 6. 2024.
2. AlpArray Seismic Network, 2015. AlpArray Seismic Network (AASN) temporary component. AlpArray Working Group. Other/Seismic Network. doi:10.12686/alparray/z3\_2015, 11. 6. 2024.
3. Brückl, E., Bleibinhaus, F., Gosar, A., Grad, M., Guterch, A., Hrubcova, P., Keller, G.R., Majdański, M., Šumanovac, F., Tiira, T., Yliniemi, J., Hegedüs, E., Thybo, H., 2007. Crustal Structure Due to Collisional and Escape Tectonics in the Eastern Alps Region Based on Profiles Alp01 and Alp02 from the ALP 2002 Seismic Experiment. *Journal of Geophysical Research*, 112, B06308, 1–25.
4. EarthScope, 2024. [www.earthscope.org](http://www.earthscope.org), 11. 6. 2024.
5. Gosar, A., 2002. Seizmične raziskave litosfere na območju jugovzhodnih Alp – projekt ALP 2002. *Ujma*, 16, 220–225.
6. Gosar, A., 2009. Stoletnica odkritja Mohorovičićeve diskontinuitete (meja med Zemljino skorjo in plaščem). *Ujma*, 23, 314–321.
7. Gosar, A., 2010. Razvoj teorije tektonike litosferskih plošč. *Proteus*, 73/1, 6–15.
8. Gosar, A., 2011. Globalna geofizika. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, 87 str., Ljubljana.
9. Gosar, A. 2021: Evropski program povezovanja raziskovalne infrastrukture na področju geoznanosti – European Plate Observing System (EPOS). *Ujma*, 34–35, 521–529.
10. Grad, M., Tiira, T., Gosar, A., ESC working group, 2009. The Moho depth map of the European plate. *Geophysical Journal International*, 176/1, 279–292.
11. Hetenyi G., Molinari, I., Clinton, J., et al., 2018. The AlpArray Seismic Network: a large-scale European experiment to image the Alpine orogeny. *Surveys in Geophysics*, 39, 1009–1033.
12. Rajh, G., 2022. Investigations of the Earth's crust structure in the NW Dinarides using local earthquake tomography method. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, 238 str., Ljubljana.
13. Rajh, G., Stipčević, J., Živčić, M., Herak, M., Gosar, A., AlpArray Working Group, 2022. 1-D velocity structure modelling of the Earth's Crust in the NW Dinarides. *Solid Earth*, 13, 177–203.
14. Rajh, G., Stipčević, J., Živčić, M., Herak, M., Gosar, A., AlpArray Working Group, 2024. Investigation of the Upper Crustal Structure in the NW Dinarides Using Local Earthquake Tomography. V postopku za objavo v *Journal of Geophysical Research*.
15. Stipčević, J., Herak, M., Molinari, I., Dasović, I., Tkalčić, H., Gosar, A., 2020. Crustal thickness beneath the Dinarides and surrounding areas from receiver functions. *Tectonics*, 39/3, 1–15.
16. Vidrih, R., Sinčič, P., Tasič, I., Gosar, A., Godec, M., Živčić, M., 2006. Državna mreža potresnih opazovalnic, Agencija RS za okolje, 287 str., Ljubljana.
17. Zahorec, P., Papco, J., Pašteka, R., Bielik, M., Bonvalot, S., Braitenberg, K., Ebbing, J., Gabriel, G., Gosar, A., et al., 2021. The first pan-Alpine surface-gravity database, a modern compilation that crosses frontiers. *Earth System Science Data*, 13/5, 2165–2209.
18. Živčić, M., Bondar, I., Panza, G. F., 2000. Upper crustal velocity structure in Slovenia from Rayleigh wave dispersion. *Pure and Applied Geophysics*, 157, 131–146.