

Analiza največjih magnitud in globin žarišč potresov v Sloveniji za namen ocenjevanja potresne nevarnosti

Gregor Rajh*, Polona Zupančič**, Mladen Živčić**, Andrej Gosar***, Martina Čarman**

Povzetek

Potresno nevarnost ocenjujemo z determinističnim (DSHA) ali verjetnostnim (PSHA) pristopom. Danes PSHA pripisuje velik pomen seizmotektonskim podatkom, ki jih podajamo predvsem v obliki aktivnih prelomov in seizmotektonskih območij. Aktivni prelomi v Sloveniji so bili v zadnjih letih predmet obsežnih raziskav. Rezultati so spodbudili natančnejšo analizo potresnih izvorov na podlagi pretekle seizmičnosti. Uporabili smo zgodovinsko-instrumentalni (od leta 456 do 2013) in instrumentalni (od leta 2004 do 2014) potresni katalog, prvega za določitev največjih magnitud in drugega za oceno seizmogenih globin potresnih izvorov. Analizo smo izvedli z orodji GIS, ki so olajšala objektivno analizo danih geoloških in seizmoloških razmer v Sloveniji. Vzpostavili smo prostorski odnos med tektonskimi podatki in preteklo seizmičnostjo ter na ta način opredelili največje magnitude in seizmogene globine. Zanesljivost analize globin smo zagotovili z uporabo različnih meril pri izboru potresov iz instrumentalnega potresnega kataloga. Rezultate prikazujemo na kartah magnitud in globin za seizmotektonska območja, celice in prelomne potresne izvore. Ugotavljamo, da so bili najmočnejši potresi v preteklosti v zahodni in osrednji Sloveniji, z nekaterimi izstopajočimi vrednostmi tudi v drugih predelih Slovenije. Globine potresov so večje v zahodnem delu Slovenije. Rezultati analize bodo uporabni pri določanju vhodnih parametrov za verjetnostno oceno potresne nevarnosti v Sloveniji.

Ključne besede: potresna nevarnost, seizmotektonika, GIS, potresni izvor, aktivni prelom, seizmotektonsko območje, seizmogeni globina, največja magnituda, PSHA

Key words: seismic hazard, seismotectonics, GIS, seismic source, active fault, seismotectonic province, seismogenic depth, maximum magnitude, PSHA

Uvod

Potresna nevarnost je opredeljena z jakostjo tresenja tal, ki so jo na nekem območju zmožni povzročiti potresi v izbrani povratni dobi. Ocenimo jo lahko z determinističnim ali verjetnostnim pristopom in predstavlja izhodišče za analizo potresne ogroženosti. Verjetnostno ocenjevanje potresne nevarnosti (PSHA) upošteva porazdelitev potresov in učinke potresov različnih magnitud z vseh potresnih izvorov obravnavanega območja (Reiter, 1991; McGuire, 2004). Uradna karta potresne nevarnosti Slovenije (Lapajne in drugi, 2001) temelji na verjetnostnem pristopu z glajenjem seizmičnosti. Glajenje je bilo deloma pogojeno s količinskim seizmotektonskim modelom, ki povzema značaj in orientacijo večjih prelomov ali tektonskih struktur znotraj posameznih območij. Seizmotektonska območja so bila obravnavana kot homogena in s tem zanemarjene lastnosti posameznih manjših struktur, ki so prav tako pomembne za oceno potresne nevarnosti. Takšen pristop je bil uporabljen zaradi pomanjkanja kvalitetnih seizmotektonskih podatkov. Razvoj geodetskih metod in paleoseizmologije ter številne geološke in geofizikalne raziskave so nam v zadnjem času omogočile pridobitev podrobnejših seizmotektonskih podatkov na ozemlju Slovenije in bližnje okolice. Geološki zavod Slovenije (Atanackov in drugi, 2014 in 2015) je za namen PSHA izdelal karto aktivnih, verjetno aktivnih in

* Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana

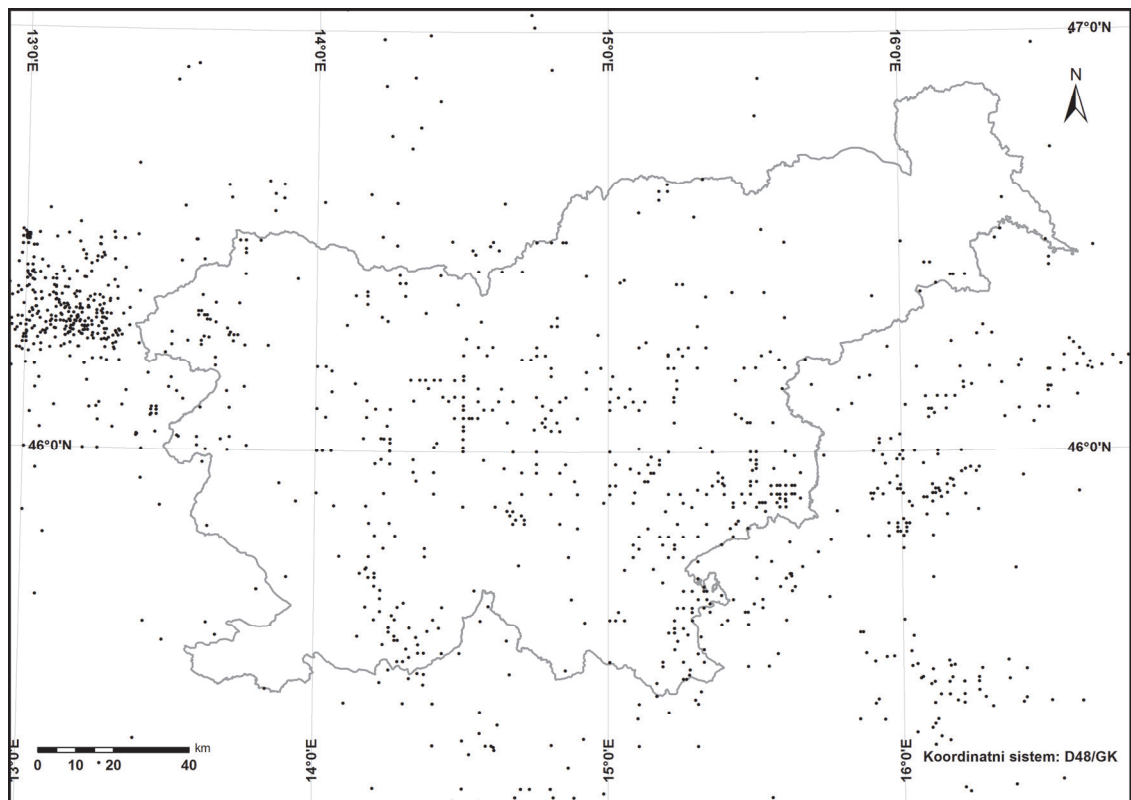
** MOP, Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

potencialno aktivnih prelomov ter podal parametrizacijsko tabelo s podatki o prelomih. Ti podatki so spodbudili natančnejše seizmološke analize različnih vhodnih podatkov za PSHA. V tej študiji smo se osredotočili na določitev največje magnitude potresov, ki so se zgodili v določenem potresnem izvoru (največja magnituda) in na opredelitev globine posameznih potresnih izvorov. Tektonski vhod v analizo so predstavljali prelomi, pridobljeni na podlagi karte aktivnih prelomov (Atanackov in drugi, 2014 in 2015) in seizmotektonska območja. Slednja smo na ARSO izdelali v okviru mednarodnega projekta BSHAP (Gülerce et al., 2015). Podatke o pretekli seizmičnosti smo črpali iz zgodovinsko-instrumentalnega (od leta 456 do 2013) in instrumentalnega (od leta 2004 do 2014) potresnega kataloga (ARSO, 2014 in 2015). Analizo smo izvedli s pomočjo orodij GIS (ArcGIS) in skriptnega programskega jezika (Python2) z razširitvami. Rezultati so pokazali, da je na ta način mogoče izvesti dovolj podrobno in objektivno analizo največjih magnitud in globin žarišč potresov po potresnih izvorih tudi na območju Slovenije. Tovrstna analiza je zaradi relativno počasnih premikov ob prelomih in zmerne potresne aktivnosti zelo zahtevna. Rezultati največjih magnitud in globin potresnih izvorov so pomembni za verjetnostni izračun nove karte potresne nevarnosti Slovenije.

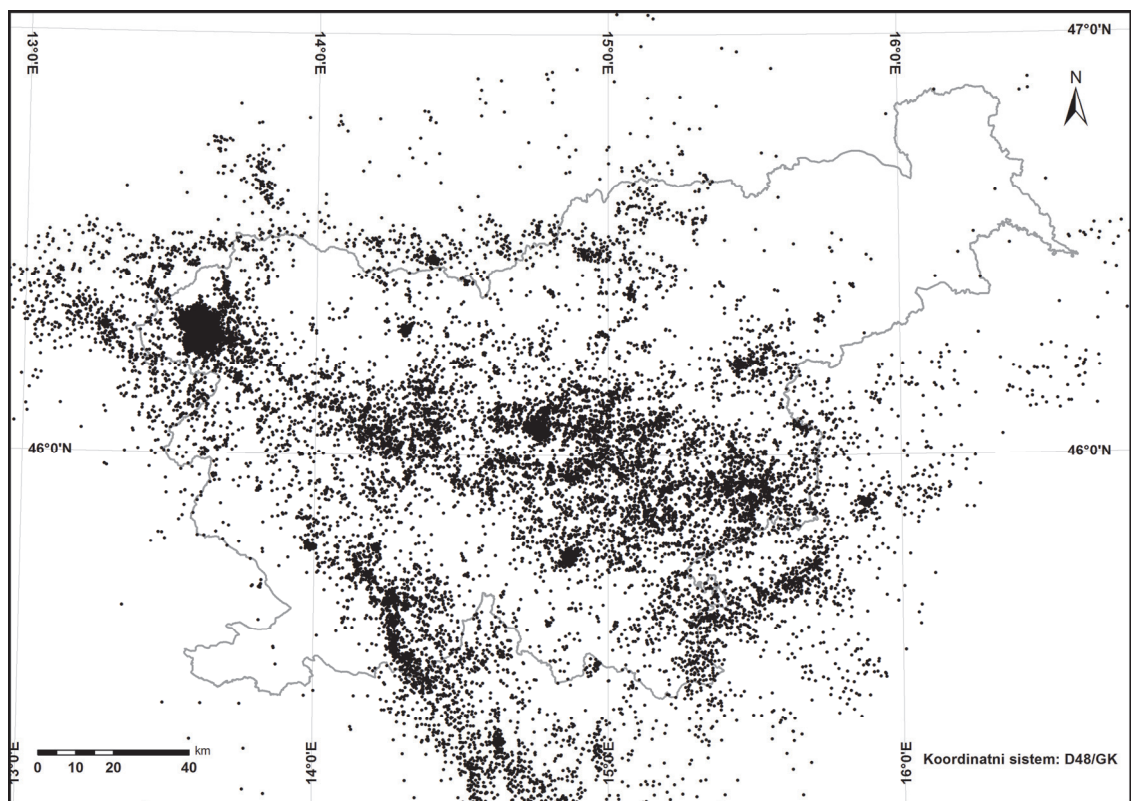
Vhodni podatki

Temelj analize magnitud in globin žarišč potresov sta dva potresna kataloga, ki obsegata območje Slovenije s širšo okolico. Zgodovinsko-instrumentalni potresni katalog (ARSO, 2014), prikazan na sliki 1, obsega obdobje od leta 456 do 2013 in vsebuje 2109 zgodovinskih in instrumentalno opredeljenih parametrov potresov. Najmočnejši potres v katalogu doseže M_w 6,5. Katalog vsebuje zmerne in močne potrese ($M_w \geq 3,5$) na območju med 44° in 48° SGŠ in med 12° in 18.5° VGD. V analizi smo ga geografsko omejili na Slovenijo in neposredno okolico. Ta katalog smo zaradi daljšega časovnega razpona uporabili za določitev največjih magnitud v potresnih izvorih.

Za določitev globin potresnih izvorov smo uporabili instrumentalni potresni katalog (ARSO, 2015), prikazan na sliki 2, v katerem so lokacije žarišč določene točneje. Le-ta vsebuje 20.832 potresov in obsega obdobje od leta 2004 do 2014. Začetek kataloga sovpada s končano izgradnjo nove državne mreže potresnih opazovalnic, ki je bila predpogoj za točnejše lociranje žarišč potresov in predvsem določitev njihovih globin. V obeh katalogih so podane ocene napak parametrov. V instrumentalnem katalogu smo pred analizo globin izločili slabše locirana žarišča posameznih potresov z uporabo meril, ki temeljijo na številu potresnih opazovalnic, največji azimutni vrzeli med žariščem potresa in posameznimi opazovalnicami (vrzel ali ang. gap) ter na razmerju med oddaljenostjo potresnih opazovalnic od nadžarišča in globino žarišča (razmerje D/H). Preizkusili smo različne kombinacije meril za izbor potresov. V analizi uporabljamo globine potresnega podkataloga, filtriranega z merili, ki smo jih po strokovni presoji izbrali za najprimernejše. Podani so v preglednici 1. Tako filtriran podkatalog vsebuje 8174 potresov, z najglobljim potresom na 35,1 km.



Slika 1 – karta lokacij nadžarišč potresov v zgodovinsko-instrumentalnem potresnem katalogu



Slika 2 – karta lokacij nadžarišč potresov v instrumentalnem potresnem katalogu

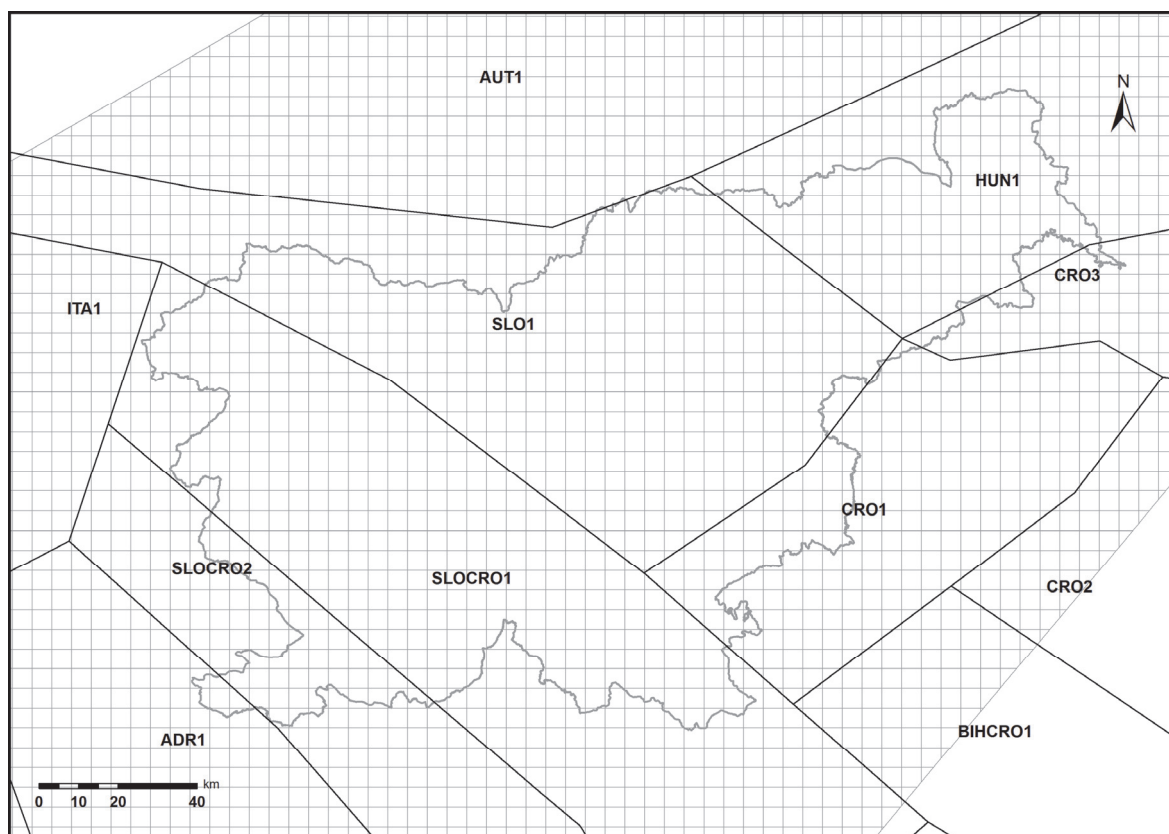
Preglednica 1 – uporabljena merila za izbor bolje lociranih žarišč potresov

Število potresnih opazovalnic	> 4
Azimutna vrzel [°]	≤ 180
Razmerje D/H	≤ 1,5

Prostorsko analizo smo izdelali na treh nivojih. Prvi nivo so seizmotektonska območja, ki smo jih na ARSO izdelali v okviru mednarodnega projekta BSHAP (Gülerce in drugi, 2015). Večji del Slovenije pripada petim seizmotektonskim območjem, manjši deli pa segajo v dodatna tri območja (slika 3).

Za boljšo preglednost in lažje razločevanje med regionalnimi in lokalnimi prostorskimi spremembami smo raziskovano območje razdelili na kvadratne celice velikosti 5 x 5 km (slika 3) in 2,5 x 2,5 km, ki nam omogočajo izvedbo analize globin, neodvisno od tektonskih podatkov. Iz analize celic so bila izločena območja, v katerih so potresi redki.

Seizmotektonska območja in celice nam podajajo grobo sliko porazdelitve največjih magnitud in globin potresov. Na ta način lahko razberemo določene regionalne spremembe.



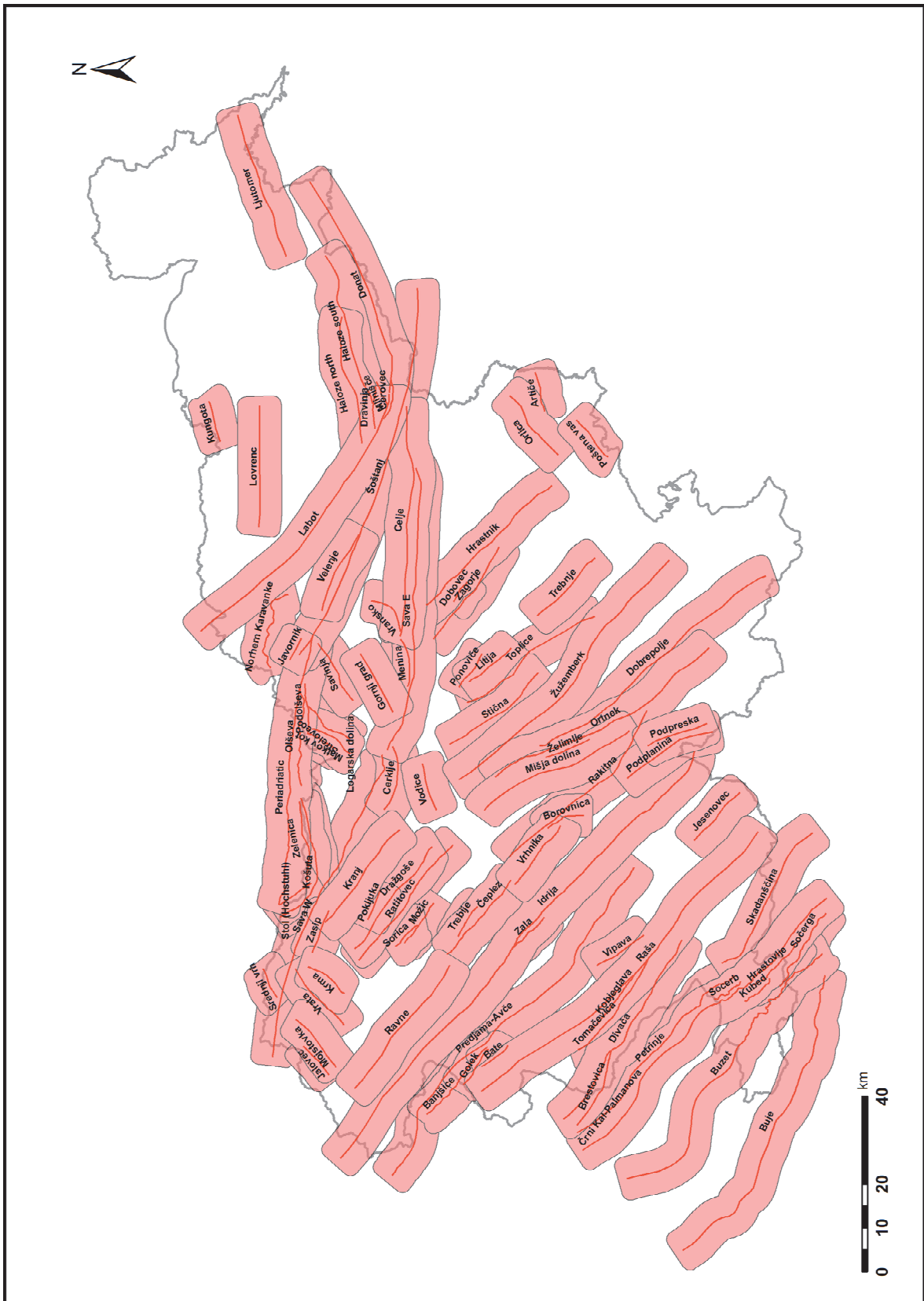
Slika 3 – prikaz seizmotektonskih območij BSHAP in celic velikosti 5 x 5 km, uporabljenih v analizi

Poleg seizmotektonskih območij in celic smo vzporedno uporabili tudi prelome, ki jih je v okviru projekta "Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije" pripravil Geološki zavod Slovenije (Atanackov in drugi, 2014 in 2015). Prelomi so geometrijsko podani kot linijski sloj (slika 4) s številnimi parametri in temeljijo na trasah 89 aktivnih, verjetno aktivnih in potencialno aktivnih prelomov (v nadaljevanju prelomov). V programskem okolju GIS smo za vsak prelom oblikovali prelomno območje, ki je na podlagi testiranj široko 5 km od vsake točke, prečno na prelom. S tem smo vsaj delno upoštevali napako lokacije nadžarišč in zaobjeli globinsko geometrijo prelomov. Dobljena območja smo zaradi manjšega prekrivanja podaljšali vzdolžno za 2 km v obe smeri. Končna oblika prelomnih območij je prikazana na sliki 4.

Analiza

Največjo magnitudo in globino žarišč potresov po seizmotektonskih območjih, celicah in prelomnih območjih smo določili s pomočjo orodij GIS (ArcGIS) in skriptnega programskega jezika (Python2) z razširitvami. Pred tem smo podatke transformirali v enoten koordinatni sistem (D48/GK). Prostorske poizvedbe smo opravili na obeh potresnih katalogih in tako vsakemu potresu pripisali pripadajoče seizmotektonsko območje, celico in prelomno območje. Seizmotektonska območja smo zaradi njihove razprostranjenosti lahko pripisali vsem potresom. Nekaterim potresom nismo mogli pripisati nobenega preloma, ker so se nahajali izven vseh prelomnih območij. V primeru prekrivanja prelomnih območij smo enemu potresu pripisali več prelomov. Nekatera prelomna območja so ostala brez pripadajočih potresov. Za njih bomo privzeli rezultate iz bližnjih prelomnih območij.

V vsakem seizmotektonskem območju, celici in prelomnem območju smo poiskali največjo in najmanjšo vrednost magnitud in globin ter 5., 10., 90. in 95. percentil globin. Prav tako smo izračunali razliko globin med največjo in najmanjšo vrednostjo, 95. in 5. percentilom, 90. in 10. percentilom ter dodali tudi podatek o številu potresov. Z uporabo percentilnih vrednosti globin smo se izognili izstopajočim vrednostim, ki so lahko posledica netočne lokacije žarišč. Z razliko med največjimi in najmanjšimi vrednostmi ter razliko med percentilnimi vrednostmi smo si pomagali pri opredelitvi potresnih izvorov po globini.

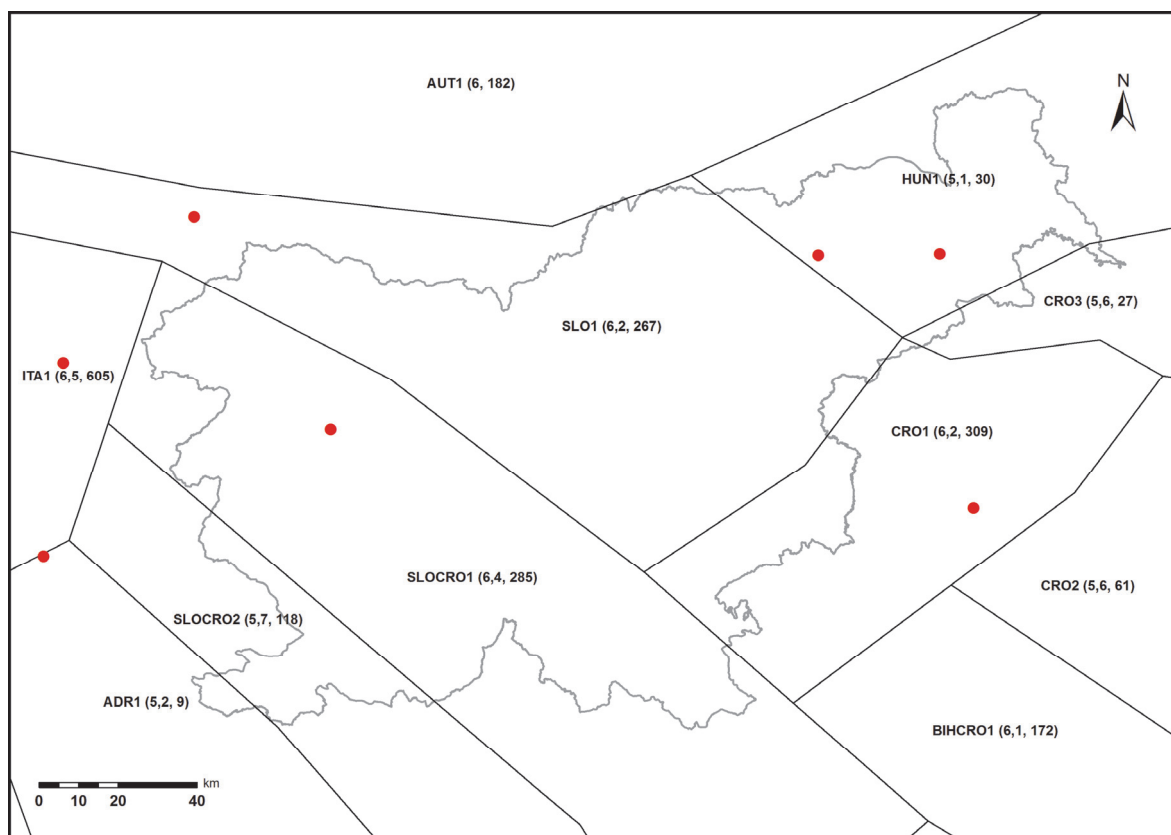


Slika 4 – karta prelomov in prelomnih območij

Rezultati

Največje magnitude

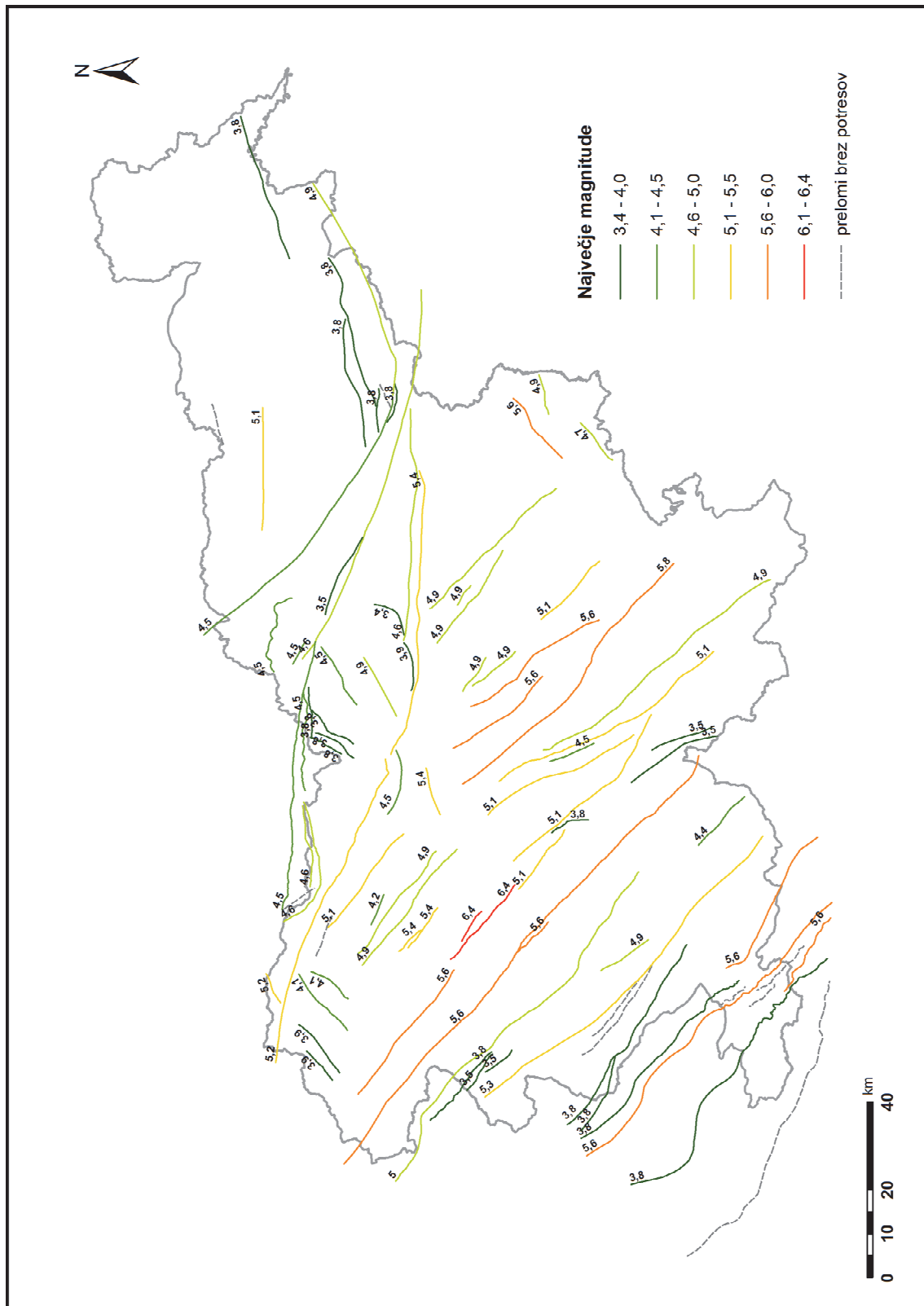
Za oceno zmožnosti seizmogenih virov potrebujemo magnitudo najmočnejših opaženih potresov. Na sliki 5 so prikazane največje opažene vrednosti magnitud za seizmotektonska območja BSHAP. Večji del Slovenije pripada območjem SLO1, SLOCRO1 in CRO1, za katere je največja opažena magnituda nad 6,0. Vidno je zmanjševanje največjih magnitud in hkrati tudi števila potresov v smeri proti SV (Panonskemu bazenu) in JZ (Jadranskemu predgorju). Največja opažena magnituda na prikazanem ozemlju je 6,5 na območju ITA1. Najmanjšo vrednost največjih opaženih magnitud 5,1 zasledimo na območju HUN1. Za vsako območje so prikazane lokacije najmočnejših potresov (slika 5). Nekateri najmočnejši potresi se nahajajo izven prikazane karte.



Slika 5 – največje opažene vrednosti magnitud za seizmotektonska območja BSHAP s številom potresov in lokacijami nadžarišč najmočnejših opaženih potresov

Slika 6 prikazuje rezultate analize največjih magnitud znotraj prelomnih območjih. Zaradi boljše preglednosti so na karti prikazani prelomi. Regionalne spremembe so pričakovano podobne tistim, ki jih opažamo že na karti seizmotektonskih območij, saj rezultati temeljijo na istem (zgodovinsko-instrumentalnem) potresnem katalogu. Prelomi z največjimi opaženimi magnitudami so dinarske smeri (SZ–JV) in dosega največje magnitude v zahodni in osrednji Sloveniji. Poleg njih se pojavljajo prelomi z največjimi opaženimi magnitudami 5,6 v vzhodnem in jugozahodnem delu Slovenije. Največja opažena magnituda znotraj prelomnih območij je 6,4. Določena je bila za prelomni območji Čeplez in Trebija in je zaradi bližine obeh rezultat istega potresa iz leta 1511. Lokacija za ta potres je določena

le iz makroseizmičnih raziskav in je zato manj točna. Prelomno območje z najmanjšo opaženo vrednostjo največjih magnitud 3,4 je Vransko. Prelomnim območjem je bilo pripisanih 483 potresov. Znotraj desetih prelomnih območjih ni bilo zabeleženih nobenih potresov, zato so pripadajoči prelomi prikazani brez vrednosti največjih magnitud.

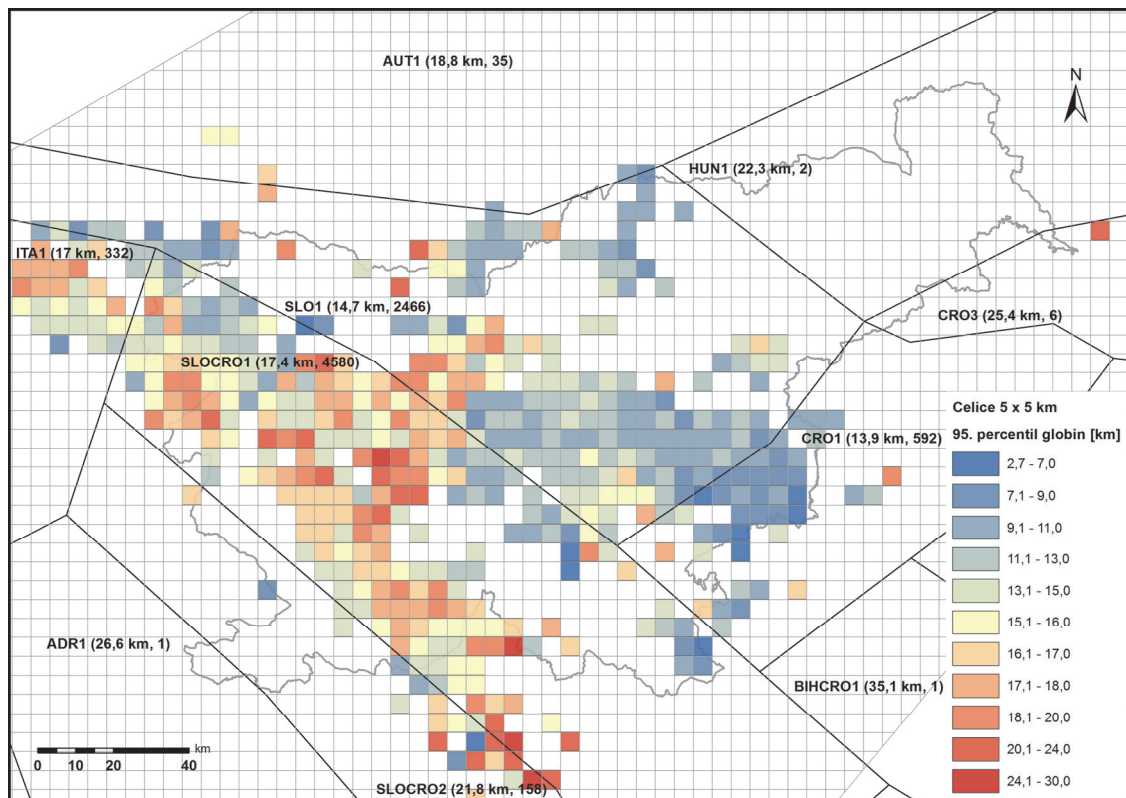


Slika 6 – rezultati analize največjih magnitud po prelomnih območjih

Globine

Po strokovni presoji kart različnih percentilov smo se odločili, da bomo za dana merila (preglednica 1) upoštevali 95. percentil globine v določenem seizmotektonskem območju, celici ali prelomnem območju. Za lažjo odločitev smo na karte dodali tudi število potresov, na podlagi katerih so bile izračunane vrednosti.

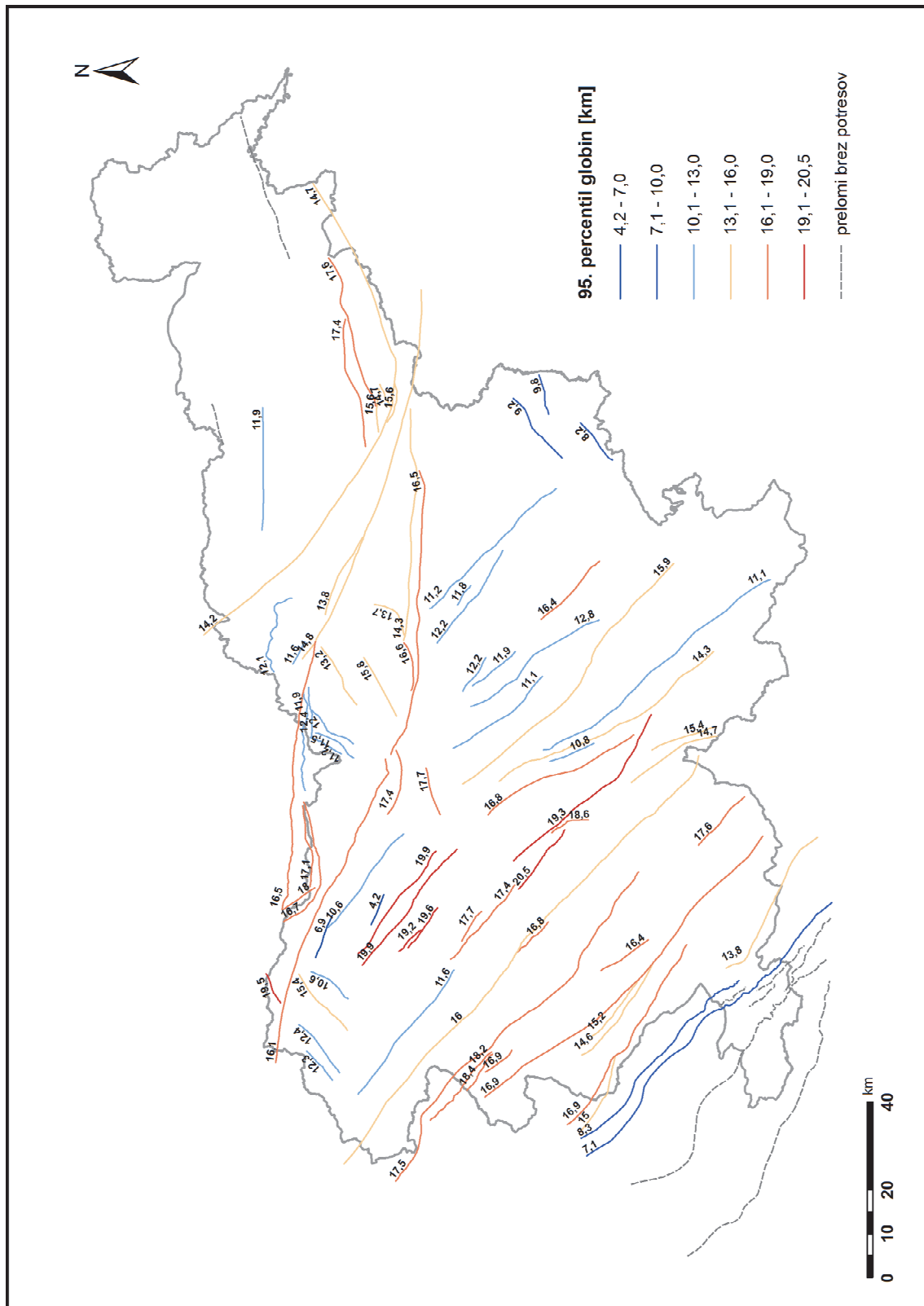
Globine za seizmotektonska območja BSHAP so prikazane na sliki 7. Zanesljivost določenih globin je majhna za območja z manj kot 100 potresi (npr. ADR1, HUN1, CRO3), zato so vrednosti zanje lahko zavajajoče in jih v nadaljevanju ne bomo komentirali. Za večji del Slovenije prikazane globine naraščajo približno v smeri SV–JZ, tj. od okoli 14 km za območja SLO1 in CRO1 ter do 21,8 km za območje SLOCRO2. Smer naraščanja je lahko posledica oblike seizmotektonskih območij. Celice velikosti 5 km odražajo porazdelitev globin (slika 7), ki ni popačena zaradi oblike seizmotektonskih območij. V tem primeru se Slovenija deli na dva dela. Globine potresov so bistveno večje v zahodnem delu z vrednostmi do okoli 25 km. V vzhodnem delu Slovenije globine ne presežejo 18 km, potresi pa se le redko pojavljajo tudi pod globino 16 km. Preostanejo območja brez prikazanih celic, kjer za obdobje instrumentalnega kataloga nismo mogli določiti globin zaradi zelo majhnega števila ali popolne odsotnosti potresov. Prikazane so celice, ki vsebujejo najmanj tri potrese.



Slika 7 – prikaz 95. percentila globin ter števila potresov za seizmotektonska območja BSHAP in celice velikosti 5 x 5 km

Slika 8 prikazuje globine po prelomih za posamezna prelomna območja, ki jim skupno pripada 5928 potresov. Največje vrednosti globin zasledimo na prelomnih območjih v severozahodnem in zahodnem delu Slovenije in se nadaljujejo proti njenemu jugozahodnemu in deloma južnemu delu. Največja globina pripada prelomnemu območju Vrhiškega preloma in znaša 20,5 km. Povečane vrednosti globin zasledimo tudi na

skrajnem severozahodu in severu. Višje percentilne vrednosti globin na prelomnih območjih severovzhodne Slovenije so manj zanesljive zaradi večje oddaljenosti potresnih opazovalnic od njihovih žarišč. Seizmičnih globin ni bilo mogoče določiti sedmim prelomnim območjem, saj znotraj njih ni bilo potresov.



Slika 8 – rezultati analize 95. percentila globin po prelomnih območjih

Zaključek

V okviru študije smo vsakemu seizmotektonskemu območju, celici in prelomnemu območju določili največjo opaženo magnitudo potresa in opredelili seizmogeno globino. Na podlagi seizmotektonskih območij (Gülerce in drugi, 2015), celic različnih velikosti in karte aktivnih, verjetno aktivnih in potencialno aktivnih prelomov (Atanackov in drugi, 2014 in 2015) ter dveh potresnih katalogov (ARSO, 2014 in 2015) smo izvedli prostorsko analizo. Ugotavljamo, da se največje opažene magnitude potresov pojavljajo v zahodni in osrednji Sloveniji. Globine potresov so v splošnem večje v zahodnem delu Slovenije. Rezultati analize bodo osnova za določevanje seizmoloških vhodnih parametrov za verjetnostno oceno potresne nevarnosti pri izdelavi nove karte potresne nevarnosti Slovenije.

Literatura

- Agencija RS za okolje (ARSO) (2014). Katalog potresov od leta 456 do 2013. Arhiv Agencije RS za okolje.
- Agencija RS za okolje (ARSO) (2015). Katalog potresov od leta 2004 do 2014. Arhiv Agencije RS za okolje.
- Atanackov, J., Bavec, M., Celarc, B., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Novak, M., Milanič, B. (2014). Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije. 1. del. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Atanackov, J., Bavec, M., Celarc, B., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Novak, M., Milanič, B. (2015). Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije. 2. del. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Gülerce, Z., Salic, R., Hrvatovic, H. I., Kovacevic, V., Kuka, N., Markusic, S., Mihaljevic, J. (2015). Final report of improvements in the Harmonized Seismic Hazard Maps for the Western Balkan Countries (BSHAP-2) Project. NATO SfP-984374. <http://wbalkanseismicmaps.org> (10. 12. 2016)
- Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. (2001). Nova karta potresne nevarnosti – projektni pospešek tal namesto intenzitete. Gradbeni vestnik 50/6, 140–149.
- McGuire, R. K. (2004). Seismic Hazard and Risk Analysis. Earthquake Engineering Research Institute, Kolorado, ZDA.
- Reiter, L. (1991). Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights. Columbia University Press, New York, ZDA, str. 254.