

Preliminarna analiza potresne aktivnosti po prelomnih potresnih izvorih v Sloveniji

Gregor Rajh^{*}, Barbara Šket Motnikar^{**}, Mladen Živčić^{**}, Polona Zupančič^{**},
Andrej Gosar^{*,**}

Povzetek

Verjetnostno ocenjevanje potresne nevarnosti upošteva učinke potresov različnih magnitud z vseh znanih potresnih izvorov na nekem območju. Izhodišče za opredelitev in parametrizacijo prelomnih potresnih izvorov predstavljajo aktivni prelomi, ki so bili v zadnjih letih na območju Slovenije predmet obsežnih raziskav. Na izračun potresne nevarnosti v veliki meri vpliva potresna aktivnost, ki jo podamo s številom potresov nad izbrano magnitudo v dani časovni in prostorski enoti. V tej študiji smo za namen izdelave nove karte potresne nevarnosti v Sloveniji analizirali potresno aktivnost po prelomnih potresnih izvorih, in sicer na podlagi seizmoloških (*seizmološka potresna aktivnost*) in geoloških podatkov (*geološka potresna aktivnost*). Seizmološko potresno aktivnost smo izračunali na podlagi zgodovinsko-instrumentalnega kataloga potresov (od leta 456 do leta 2014), iz katerega smo odstranili odvisne potresne dogodke in analizirali njegovo popolnost za pet izbranih vrednosti magnitude. Geološko potresno aktivnost smo izračunali na podlagi geometrijskih lastnosti prelomnih potresnih izvorov in hitrosti premikanja ob prelomih. Z opravljeno analizo potresne aktivnosti smo poizkusili opredeliti njeno negotovost ter poiskati razloge zanjo. Kljub temu, da so rezultati analize potresne aktivnosti preliminarni, bodo pomembno prispevali k izdelavi nove karte potresne nevarnosti Slovenije.

Ključne besede: potresna aktivnost, magnitudno-frekvenčna porazdelitev, prelomni potresni izvor, prelomno območje, katalog potresov, hitrost premikanja ob prelomu, ocenjevanje potresne nevarnosti

Key words: earthquake activity rate, magnitude-frequency relationship, fault seismogenic source, fault zone, earthquake catalog, fault slip rate, seismic hazard analysis

Uvod

Potresna nevarnost je opredeljena z jakostjo tresenja tal, ki so jo na nekem območju zmožni povzročiti potresi v izbrani povratni dobi in predstavlja izhodišče za analizo potresne ogroženosti. Potresno nevarnost običajno ponazorimo s kartami projektnega pospeška tal. Projektni pospešek tal lahko ocenimo z determinističnim ali verjetnostnim pristopom. Verjetnostno ocenjevanje potresne nevarnosti (PSHA) upošteva porazdelitev in učinke potresov različnih magnitud z vseh znanih potresnih izvorov na obravnavanem območju (Reiter, 1991; McGuire, 2004). Izhodišče za opredelitev in parametrizacijo prelomnih potresnih izvorov predstavljajo aktivni prelomi, ki so bili v zadnjih letih na območju Slovenije predmet obsežnih raziskav. Rezultat tovrstnih raziskav je karta aktivnih, verjetno aktivnih in potencialno aktivnih prelomov ter pripadajoča parametrizacijska tabela s podatki o prelomih (lokacija, geometrija, hitrost premikanja ob prelomu, aktivnost), ki ju je za namen PSHA izdelal Geološki zavod Slovenije (Atanackov et al., 2014 in 2015). Ti podatki so poleg analize seizmogene globine in največje opažene magnitude potresov (Rajh et al., 2017; Rajh, 2017) spodbudili tudi natančnejšo analizo

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

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

potresne aktivnosti (ang. earthquake activity rate) po prelomnih potresnih izvori. Potresno aktivnost podamo s številom potresov nad izbrano magnitudo v dani časovni in prostorski enoti, izračunamo pa jo lahko na podlagi seizmoloških (*seizmološka potresna aktivnost*) ali geoloških podatkov (*geološka potresna aktivnost*). Z opredelitvijo prelomnih območij okrog tras prelomnih potresnih izvorov smo vzpostavili prostorski odnos med prelomi in preteklo seizmičnostjo. Podatke o pretekli seizmičnosti smo črpali iz zgodovinsko-instrumentalnega (od leta 456 do leta 2014) kataloga potresov (ARSO, 2015), iz katerega smo odstranili odvisne potresne dogodke po metodi, opisani v Gardner & Knopoff (1974) in nato analizirali njegovo popolnost za pet izbranih vrednosti magnitudo. Celotno analizo potresne aktivnosti smo izvedli s pomočjo orodij GIS (ArcGIS) in skriptnega programskega jezika Python z razširitvami. Omenjena orodja so olajšala analizo večje količine podatkov ter nam omogočila preizkušanje različnih parametrov in metod za izračun potresne aktivnosti. Seizmološko potresno aktivnost smo za oceno negotovosti izračunali z dvema pristopoma in za izbrane vrednosti magnitudo popolnosti, kar ponazorimo z razponom med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti za nek prelomni potresni izvor. Primerjali smo ga tudi z izračunano geološko potresno aktivnostjo. Za izbrane prelomne potresne izvore oziroma pripadajoča prelomna območja prikazujemo magnitudno-frekvenčne porazdelitve v obliki dvojno odrezanih eksponentnih krivulj, vrednosti seizmološke potresne aktivnosti po vseh prelomnih potresnih izvori pa prikazujemo na karti. Izračunane vrednosti potresne aktivnosti smo primerjali tudi z Evropsko bazo seizmogenih prelomov ali krajše EDSF (Basili et al., 2013), ki je bila izdelana v okviru ocenjevanja potresne nevarnosti za Evropo.

Analiza potresne aktivnosti

Potresno aktivnost podamo s številom potresov nad izbrano magnitudo v dani časovni in prostorski enoti. V okviru analize potresne aktivnosti smo izračunali seizmološko in geološko potresno aktivnost po prelomnih potresnih izvori. Analizo seizmološke potresne aktivnosti izvedemo na podlagi štetja potresov, ki pripadajo posameznim prelomnim potresnim izvori. Ocenjevanje potresne nevarnosti poenostavimo s Poissonovim modelom pojavljanja potresov. To pomeni, da predpostavimo časovno neodvisnost med posameznimi potresnimi dogodki, zato moramo pred analizo seizmološke potresne aktivnosti oziroma pred štetjem potresov iz kataloga odstraniti odvisne potresne dogodke (predpotrese in popotrese). S predpostavko stacionarne seizmičnosti moramo analizirati tudi *popolnost* (ang. completeness) kataloga potresov. Katalog je v nekem obdobju popoln, če so v njem zabeleženi vsi potresi nad izbrano *magnitudo popolnosti* (ang. *magnitude of completeness*). Popolnost instrumentalnega kataloga potresov je odvisna od spodnje meje detekcije in prostorske porazdelitve seizmografov, popolnost zgodovinskega kataloga potresov pa od zanesljivosti zgodovinskih virov makroseizmičnih podatkov (Reiter, 1990). Za popoln katalog potresov velja magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov, ponazorjena z dvojno odrezano eksponentno krivuljo (Cornell & Vanmarcke, 1969; enačba 1). Pri tem je $N[m]$ kumulativno letno število potresov nad magnitudo m .

$$N[m] = N[m_0] \left(e^{-\beta(m-m_0)} - e^{-\beta(m_u-m_0)} \right) \left(1 - e^{-\beta(m_u-m_0)} \right)^{-1} \quad (1)$$

Dvojno odrezana eksponentna krivulja oziroma magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov je definirana na intervalu magnitudo $[m_0, m_u]$. V našem primeru smo pri vseh prelomnih potresnih izvori izbrali fiksno vrednost spodnje meje porazdelitve ($m_0 = 0,0$), medtem ko je zgornja meja porazdelitve (m_u) pri posameznih prelomnih potresnih izvori

različna. Spodnja meja porazdelitve na ta način predstavlja magnitudo, za katero računamo potresno aktivnost. Naklon dvojno odrezane eksponentne krivulje določa koeficient β ($b * \ln 10$), ki podaja razmerje med številom šibkih in močnih potresov. Koeficient b se v svetovnem merilu približuje vrednosti 1,0, kar sta z analizo potresne dejavnosti pokazala že Gutenberg & Richter (1945). Seizmološko potresno aktivnost a opredelimo kot $N[m_0]$ in v našem primeru predstavlja letno število potresov nad magnitudo 0,0.

Rezultat analize popolnosti kataloga potresov so različna obdobja popolnosti, določena za izbrane vrednosti magnitude popolnosti (m_i). Za vsako magnitudo popolnosti torej določimo obdobje popolnosti kataloga in v njem preštujemo potrese $N[m_i]$ nad magnitudo popolnosti. Pri štetju upoštevamo le glavne potrese, njihovo število pa delimo s številom let v obdobju popolnosti kataloga potresov (normirano prešteto število potresov). Vsak popoln katalog potresov opredeljuje svojo magnitudno-frekvenčno porazdelitev (enačba 1), s katero lahko izračunamo seizmološko potresno aktivnost. Glede na izbrano magnitudo popolnosti jo označimo z a_{mi} . Seizmološko potresno aktivnost lahko torej izračunamo za različne vrednosti magnitude popolnosti (tj. obdobja popolnosti kataloga potresov), katero od teh bomo upoštevali, pa je odvisno od števila potresov in namena izračuna potresne aktivnosti.

V našem primeru smo seizmološko potresno aktivnost računali na dva načina, in sicer za najmanjšo izbrano vrednost magnitude popolnosti ($m_i = 3,5$) z največjim številom potresov ($a_{3,5}$), ter za največjo vrednost magnitude popolnosti (m_i), pri kateri je prelomnemu potresnemu izvoru pripisanih vsaj še pet potresov (a_{mi}). Rezultati enega in drugega izračuna se lahko medsebojno razlikujejo zaradi privzetih, a ne v popolnosti veljavnih, predpostavk (Poissonova porazdelitev potresov, stacionarna seizmičnost), ocenjene popolnosti kataloga potresov in nepopolnega ujemanja dejanskega stanja v naravi z modelom magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov. Rezultati obeh izračunov se bodo zagotovo ujemali takrat, ko bo omejitev števila potresov zadostila isti vrednosti magnitude popolnosti kataloga potresov. Vse opisane negotovosti se odražajo v velikosti razpona med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti, izračunane glede na posamezna obdobja popolnosti kataloga potresov. V ta razpon smo vključili tudi vrednosti seizmološke potresne aktivnosti, izračunane za popolne kataloge z manj kot petimi potresi, pripisanimi posameznim prelomnim potresnim izvorom.

Geološko potresno aktivnost ($N[m_0]$ oziroma a) izračunamo iz definicije *spremembe potresnega navora* (ang. seismic moment rate; Brune, 1968), s pomočjo katerega je mogoče vzpostaviti odnos med potresno aktivnostjo in dolgoročno oziroma povprečno *hitrostjo premikanja ob prelomu* (ang. slip rate; S) ter površino celotne prelomne ploskve (A_f). V obliki dvojno odrezane eksponentne krivulje oziroma magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov ta odnos zapišemo kot (Youngs & Coppersmith, 1985):

$$N[m_0] = \frac{\mu A_f S (c - b) (1 - e^{-\beta(m_u - m_0)})}{b M_0 [m_u] e^{-\beta(m_u - m_0)}}, \quad (2)$$

kjer potresni navor pri zgornji meji porazdelitve ($M_0[m_u]$) izrazimo kot

$$M_0[m_u] = e^{\ln 10 (c m_u + d)}. \quad (3)$$

Koeficient μ v enačbi 2 predstavlja strižni modul. Vrednosti koeficientov c in d sta iz odnosa med potresnim navorom in magnitudo (enačba 3) empirično izpeljala že Hanks & Kanamori (1979). Vse vrednosti omenjenih koeficientov smo za izračun geološke potresne aktivnosti privzeli na podlagi literature (npr. Gutenberg & Richter, 1945; Hanks &

Kanamori, 1979; Youngs & Coppersmith, 1985; Bungum, 2007). Podajamo jih v preglednici 1. Geološka potresna aktivnost je izračunana na letno vrednost in primerljiva s seizmološko potresno aktivnostjo, če je hitrost premikanja ob prelomu podana v dolžinski enoti na leto.

Na podlagi izračunanih vrednosti seizmološke in geološke potresne aktivnosti po posameznih prelomnih potresnih izvorihi lahko prikažemo magnitudno-frekvenčno porazdelitev potresov (enačba 1). Za spodnjo mejo porazdelitve (m_0) smo v vseh izračunih potresne aktivnosti privzeli vrednost magnitude enako 0,0. Zgornja meja porazdelitve (m_u) predstavlja največjo magnitudo potresa, ki ga lahko generira nek potresni izvor. V analizi geološke potresne aktivnosti je treba upoštevati tudi delež aseizmične komponente premika ob prelomu, ki pripada duktilnim deformacijam oziroma *lezenju* (ang. creep).

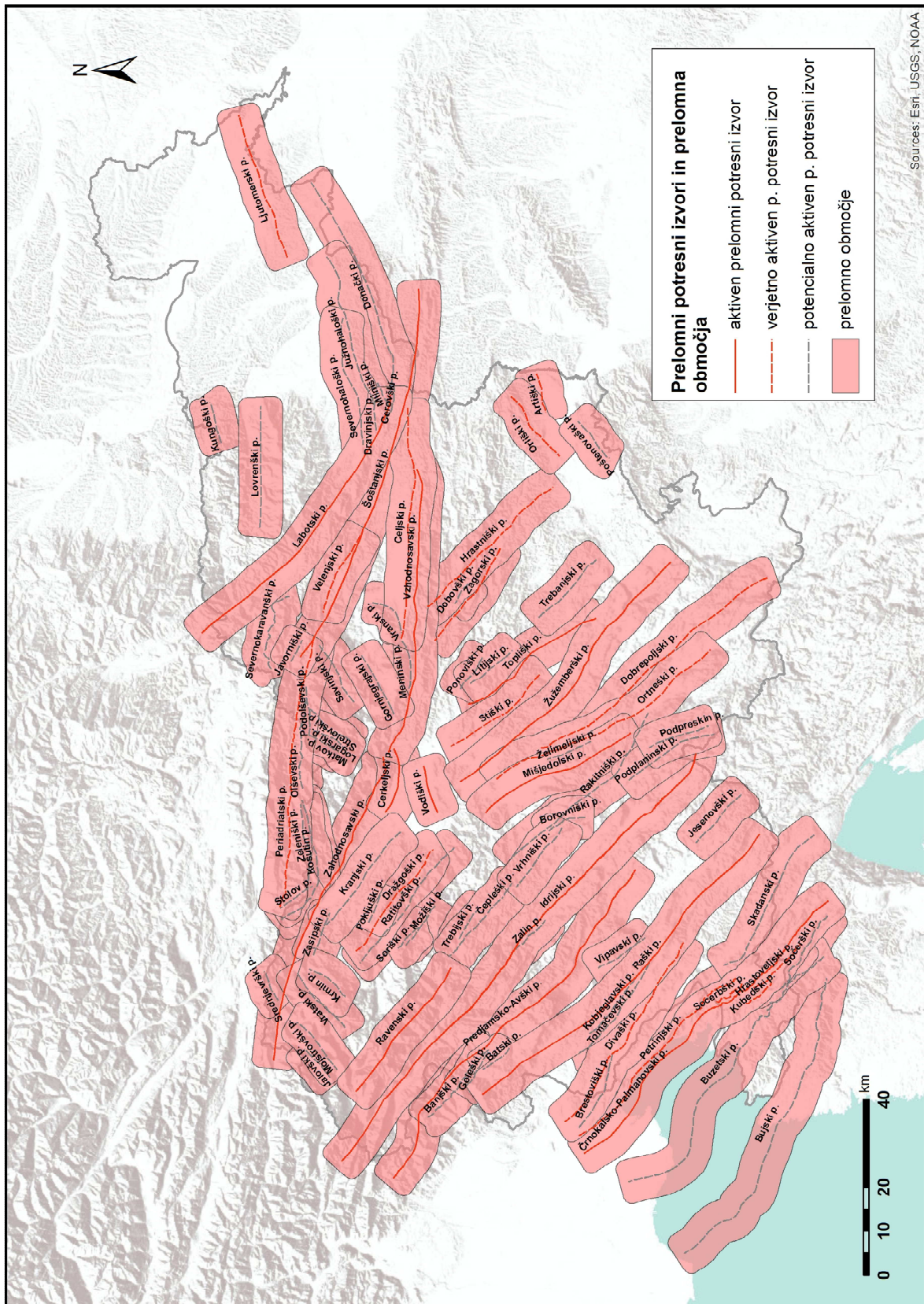
Preglednica 1 – Koeficienti in njihove vrednosti, uporabljene v analizi potresne aktivnosti (npr. Gutenberg & Richter, 1945; Hanks & Kanamori, 1979; Youngs & Coppersmith, 1985; Bungum, 2007).

koeficient	vrednost
b	1,0
β	$b * \ln 10$
c	1,5
d	16,1
μ	$3 * 10^{10} \text{ N/m}^2$

Prikaz in priprava podatkov

Analizo potresne aktivnosti smo izvedli po prelomnih potresnih izvorihi, ki jih je v okviru projekta "Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije" pripravil Geološki zavod Slovenije (Atanackov et al., 2014 in 2015). Prelomni potresni izvori (slika 1) so geometrijsko podani kot linijski sloj s številnimi parametri in temeljijo na trasah 89 aktivnih, verjetno aktivnih in potencialno aktivnih prelomov. V preglednici 2 podajamo izsek iz parametrizacijske tabele za izbrane prelomne potresne izvore.

V programskem okolju GIS smo za vsak prelomni potresni izvor oblikovali prelomno območje, ki je na podlagi testiranja široko 5 km v obe smeri od linije prelomnega potresnega izvora, prečno nanj. S tem smo vsaj delno upoštevali napako lokacije nadzarišč potresov in zaobjeli globinsko geometrijo prelomnih potresnih izvorihi. Dobljena območja smo podaljšali vzdolžno za 2 km v obe smeri ter s tem boljše pokrili obravnavano območje. Končna oblika prelomnih območij je prikazana na sliki 1. Zaradi prekrivanja je en potres lahko pripadal več kot enemu prelomnemu območju, zato smo take potrese pri štetju ustrezno utežili in sicer z obratno vrednostjo števila ponovitev. En potres je h končnemu številu tako prispeval delež, obratno sorazmeren s številom prelomnih območij, v katerih se pojavi. Število $N[m_i]$ v primeru analize seizmološke potresne aktivnosti tako predstavlja prešteto število potresov z navorno magnitudo $M_w \geq m$, uteženo glede na število ponovitev posameznih potresov v različnih prelomnih območjih in normirano glede na obdobje popolnosti kataloga potresov za ustrezno vrednost magnitude popolnosti.

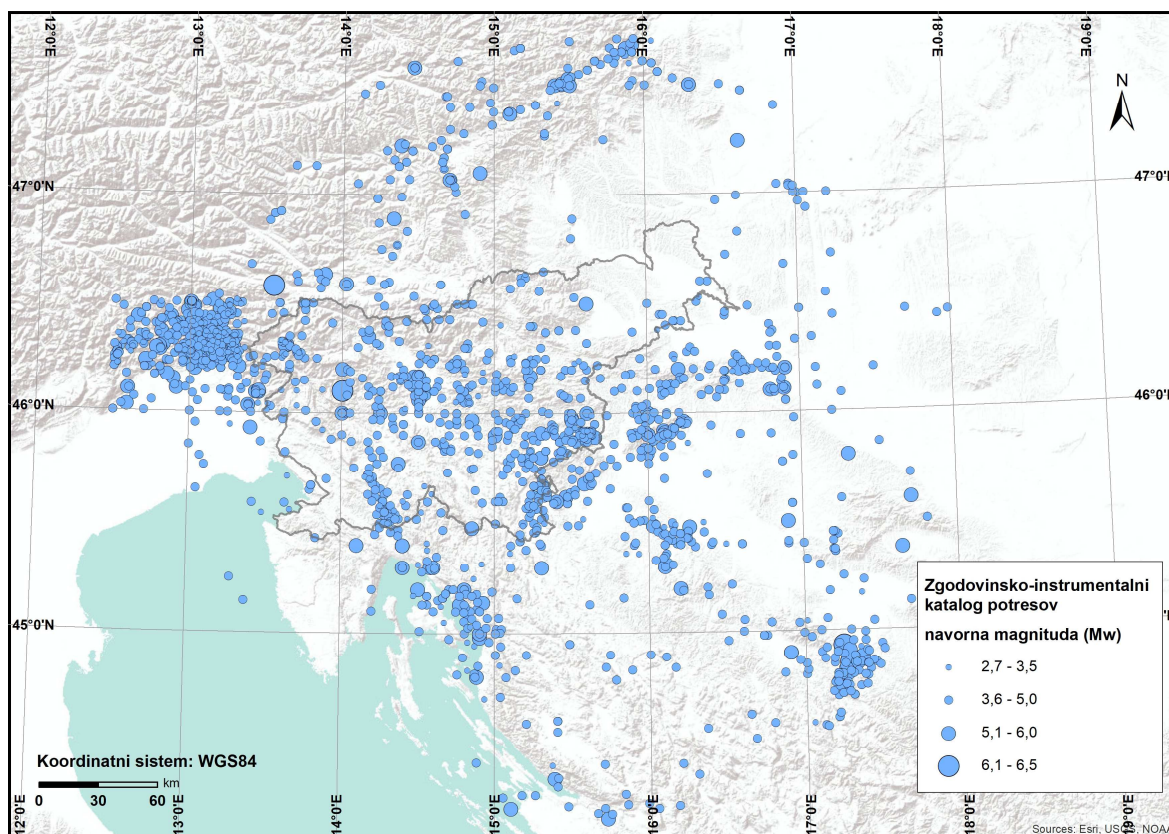


Slika 1 – Karta aktivnih, verjetno aktivnih in potencialno aktivnih prelomnih potresnih izvorov (po Atanackov et al., 2014 in 2015) s pripadajočimi prelomnimi območji.

Preglednica 2: Parametri za izbrane prelomne potresne izvore po Atanackov et al. (2014 in 2015), Rajh et al. (2017) in Rajh (2017).

ime prelomnega potresnega izvora	vrsta	dolžina [km]	smer [°]	naklon [°]	seizmogena globina [km]	hitrost premikanja ob prelomu [mm/leto]	največja navorna magnituda potresa	aktivnost
Črnokalsko-Palmanovski prelom	nariv	83	315	20	8,0	0,20	7,3	aktiven
Hrastniški prelom	desnozmični	40	350	85	11,2	0,07	7,0	verjetno aktiven
Idrijski prelom	desnozmični	125	310	85	16,0	1,00	7,5	aktiven
Raški prelom	desnozmični	87	315	85	16,9	0,70	7,3	aktiven
Ravenski prelom	desnozmični	36	310	80	11,6	0,10	6,9	aktiven
Vrhniški prelom	desnozmični	17	310	80	20,5	0,05	7,1	potencialno aktiven
Žužemberški prelom	desnozmični	70	315	80	15,9	0,5	7,2	aktiven

Temelj analize seizmološke potresne aktivnosti je zgodovinsko-instrumentalni katalog potresov (ARSO, 2015), ki obsega obdobje od leta 456 do leta 2014 ter vsebuje 2064 zmernih in močnih potresov ($M_W \geq 2,7$) na območju med 44° in 48° SGŠ in med 12° in $18,5^\circ$ VGD (slika 2). Najmočnejši potres v katalogu doseže M_W 6,5. V katalogu so podane tudi ocene napak parametrov potresov (npr. lokacije, globine in magnitude).

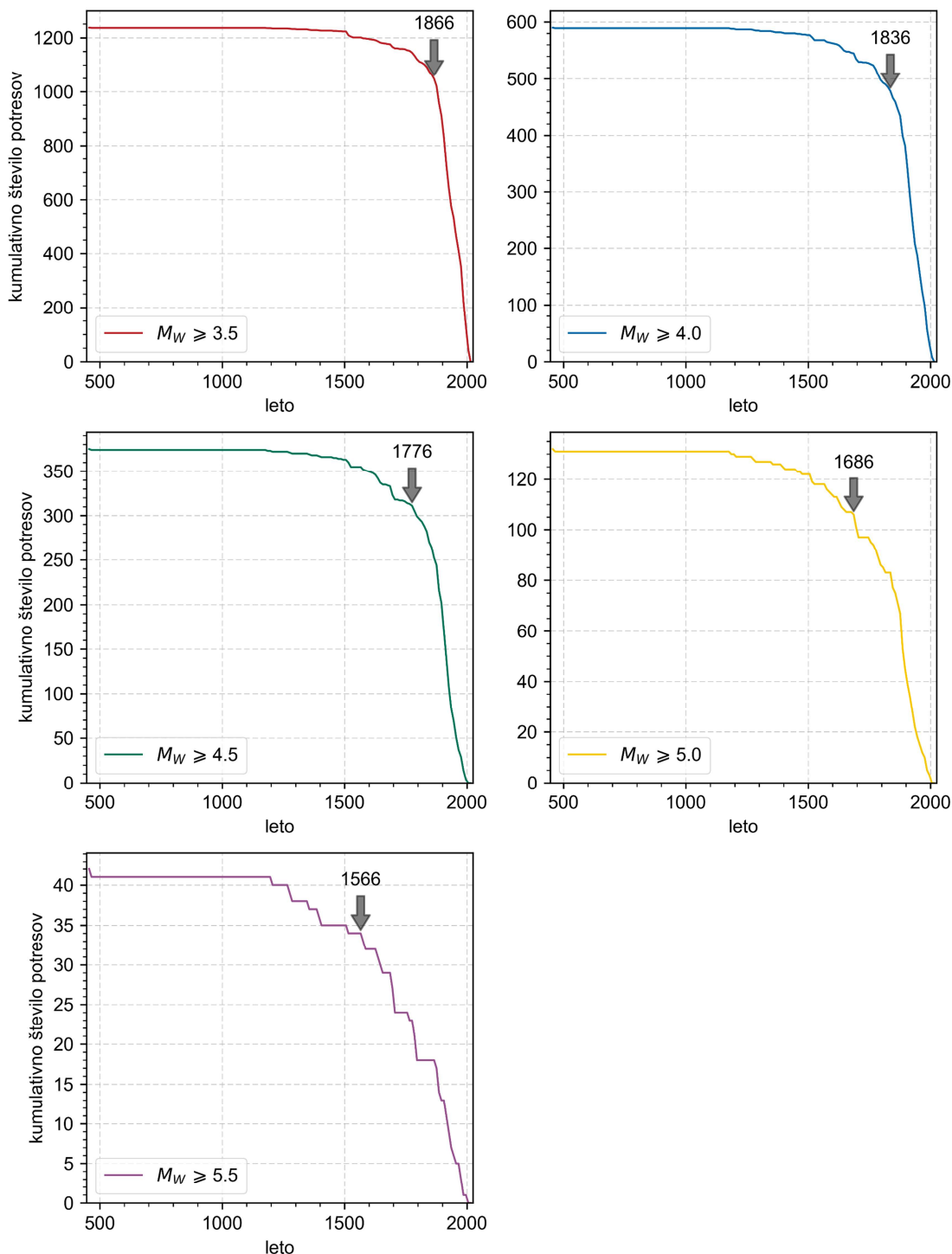


Slika 2 – Zgodovinsko-instrumentalni katalog potresov (od leta 456 do leta 2014) s prikazanimi lokacijami nadžarišč in navornimi magnitudami potresov (ARSO, 2015).

Zaradi privzete predpostavke Poissonovega modela pojavljanja potresov oziroma časovne neodvisnosti med posameznimi potresnimi dogodki smo iz kataloga odstranili odvisne potresne dogodke (predpotrese in popotrese) po metodi, opisani v Gardner & Knopoff (1974). V katalogu je po odstranitvi teh potresnih dogodkov preostalo še 1261 glavnih potresov, od tega 390 znotraj meja Slovenije. Nadalje smo analizirali še popolnost kataloga potresov. Ob predpostavki stacionarne seizmičnosti jo dokaj preprosto analiziramo z družinami krivulj, s katerimi prikazemo kumulativno število potresov nad magnitudo popolnosti v odvisnosti od časa (npr. Poljak et al., 2000). Točka, v kateri se kumulativna krivulja zadnjič prelomi oziroma bistveno spremeni naklon, določa začetek obdobja popolnosti kataloga potresov. V našem primeru smo popolnost kataloga potresov analizirali za pet izbranih vrednosti magnitude popolnosti (slika 3). Pri odčitavanju obdobja popolnosti iz kumulativnih krivulj smo si pomagali s štejetjem potresov po dekadah.

Analizo geološke potresne aktivnosti smo izvedli na podlagi najboljših ocen parametrov prelomov (Atanackov et al., 2014 in 2015) ter rezultatov analize seizmogene globine in največje opažene magnitude potresov (Rajh et al., 2017; Rajh, 2017), zapisanih v parametrizacijski tabeli prelomnih potresnih izvorov (preglednica 2). Največjo magnitudo potresa smo za vsak prelomni potresni izvor določili na tri načine: dva na podlagi empirično izpeljanih odnosov med površino prelomne ploskve in navorno magnitudo,

oziroma med dolžino preloma in navorno magnitudo (Wells & Coppersmith, 1994) ter tretjega na podlagi analize pretekle seizmičnosti (Rajh et al., 2017; Rajh, 2017). Izmed dobljenih treh vrednosti največjih magnitud potresov smo za vsak prelomni potresni izvor izbrali največjo. Pri izračunu geološke potresne aktivnosti smo upoštevali še 30 % delež aseizmičnosti (npr. Wallace, 1970; Ward, 1998; Hunstad et al., 2003).



Slika 3 – Analiza popolnosti zgodovinsko-instrumentalnega kataloga potresov (ARSO, 2015) za pet izbranih vrednosti magnitude popolnosti. S puščicami so prikazani začetki obdobja popolnosti kataloga potresov.

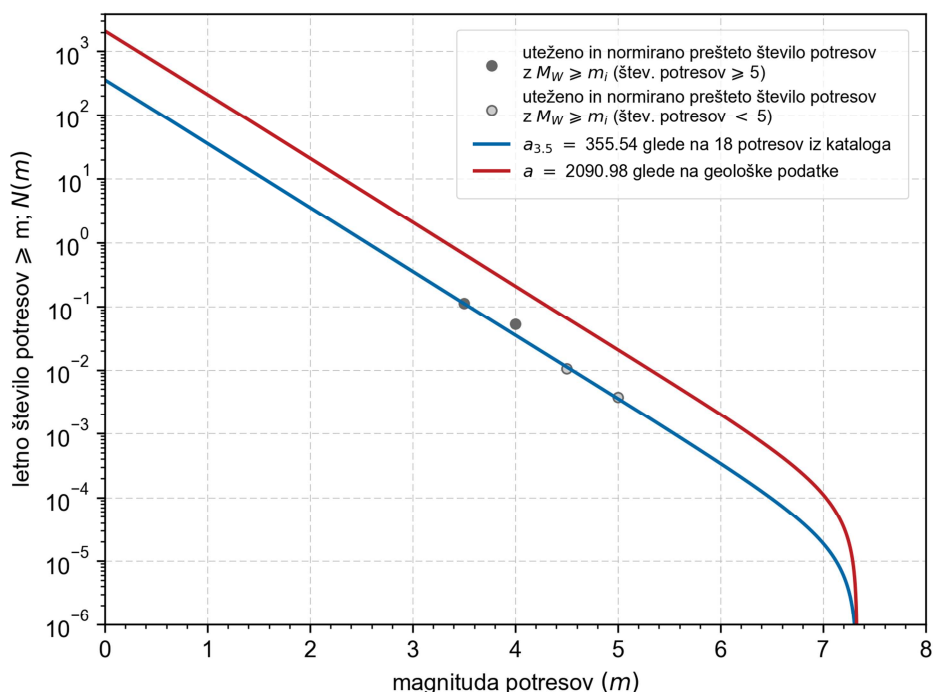
Rezultati

Na slikah 4, 5 in 6 prikazujemo magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov, izračunane na podlagi seizmoloških podatkov za najmanjšo vrednost magnitude popolnosti in geoloških podatkov. Na slikah so poleg magnitudno-frekvenčnih porazdelitev prikazane tudi točke, ki predstavljajo uteženo in normirano (prešteto) število potresov iz kataloga za različna obdobja oziroma različne magnitude popolnosti. Ponazorjene so s polnimi (ko je število potresov znotraj prelomnega območja ≥ 5) in praznimi krogi (ko je število potresov znotraj prelomnega območja < 5). Največja in najmanjša vrednost seizmološke potresne aktivnosti določata razpon, ki ga omejujeta ustrezni dve točki uteženega in normiranega števila potresov iz kataloga (npr. slika 8).

Razhajanje med seizmološko potresno aktivnostjo za najmanjšo vrednost magnitude popolnosti ($a_{3,5}$) in geološko potresno aktivnostjo je, na primerih Raškega preloma (slika 4) in Idrijskega preloma (slika 5), veliko. Vizualno prileganje magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov, izračunane na podlagi $a_{3,5}$, z uteženim in normiranim številom potresov za ostale vrednosti magnitude popolnosti je za omenjena preloma dobro. Izračunana magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Idrijski prelom se vizualno dobro prilega točkam uteženega in normiranega števila potresov za vrednosti magnitude popolnosti vse do M_w 4,5, pri točkah za zadnji dve vrednosti magnitude popolnosti pa je odstopanje nekoliko večje. Na primeru Ravenskega preloma (slika 6) opazimo ravno obratno, in sicer zelo majhno razhajanje med seizmološko in geološko potresno aktivnostjo ter slabo vizualno prileganje izračunane magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov za $a_{3,5}$ z uteženim in normiranim številom potresov za vse ostale vrednosti magnitude popolnosti. Seizmološko določena magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov Ravenskega preloma gre samo skozi točko, s katero je krivulja opredeljena. Ta točka ponazarja uteženo število potresov z $M_w \geq 3,5$, normirano na obdobje popolnosti za ustrezno vrednost magnitude. Nekoliko se približa samo še točkama uteženega in normiranega števila potresov za naslednji dve vrednosti magnitude popolnosti, od ostalih dveh pa je že bistveno bolj oddaljena. Za pripadajoče prelomno območje je število močnejših potresov v katalogu večje od vrednosti, ki jih predvideva model, izračunan na podlagi $a_{3,5}$. Število potresov znotraj prelomnega območja tega preloma je bistveno manjše v primerjavi s številom potresov za isto vrednost magnitude popolnosti za Raški in Idrijski prelom.

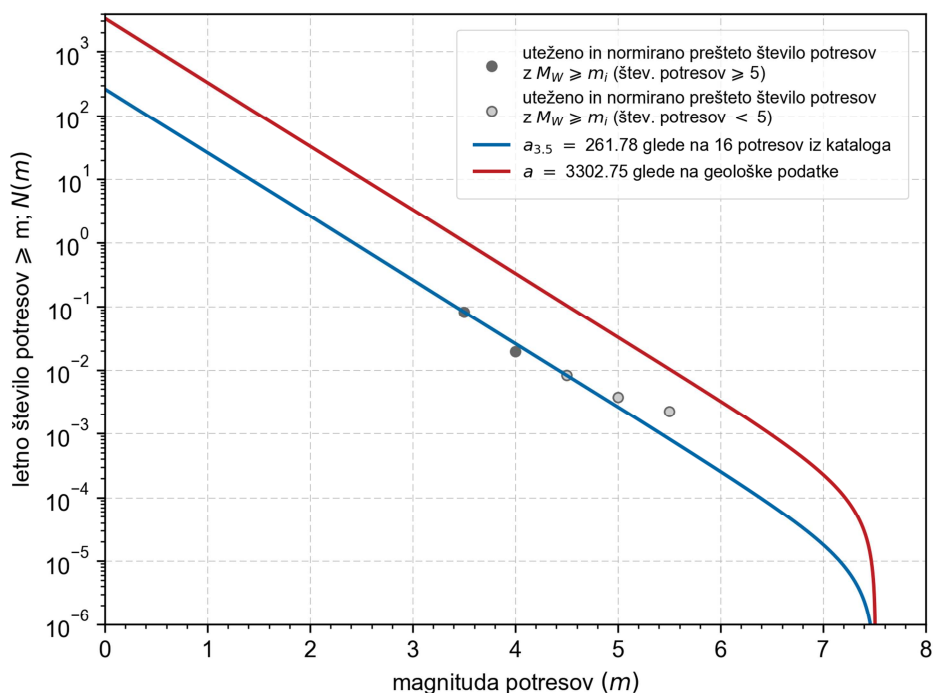
Za vse tri prikazane prelome je geološka potresna aktivnost večja od seizmološke potresne aktivnosti ($a_{3,5}$). Pri nekaterih prelomih, npr. Vrhniškemu prelomu, pa je geološka potresna aktivnost manjša od seizmološke potresne aktivnosti (slika 7). Tu razhajanje med omenjenima potresnima aktivnostima sicer ni veliko. Za ta prelom je dobro tudi vizualno prileganje magnitudno-frekvenčne porazdelitve potresov, izračunane na podlagi $a_{3,5}$, z uteženim in normiranim številom potresov za ostale vrednosti magnitude popolnosti.

Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Raški prelom
 $m_0 = 0.0, m_u = 7.3$



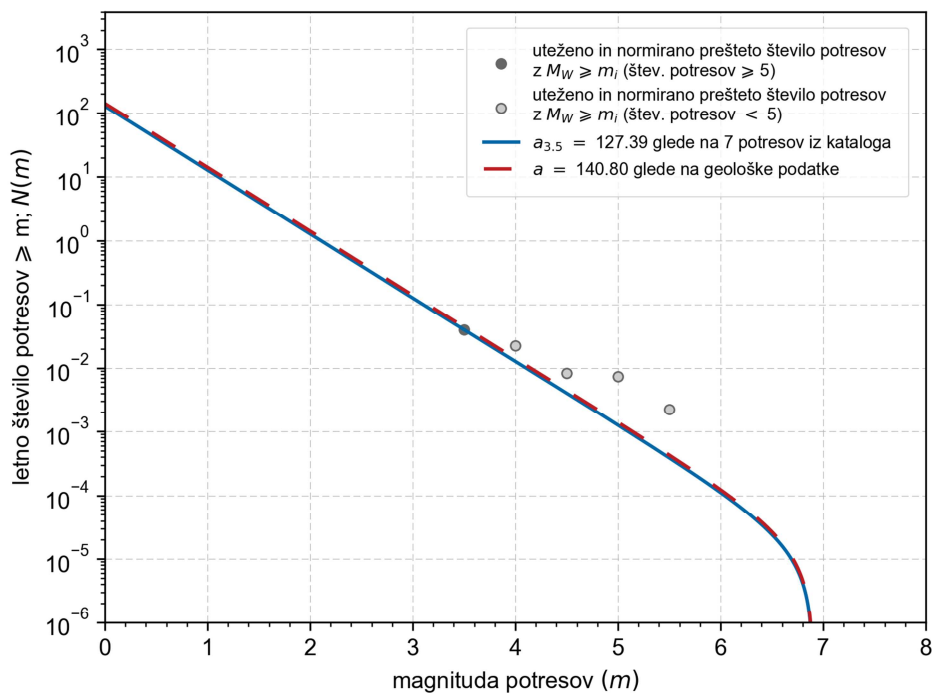
Slika 4 – Magnitudno-frekvenčni porazdelitvi potresov za Raški prelom, izračunani na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{3,5}$ (modra črta) in geoloških podatkov (rdeča črta). Točke prikazujejo uteženo in normirano prešteto število potresov z $M_W \geq m_i$.

Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Idrijski prelom
 $m_0 = 0.0, m_u = 7.5$



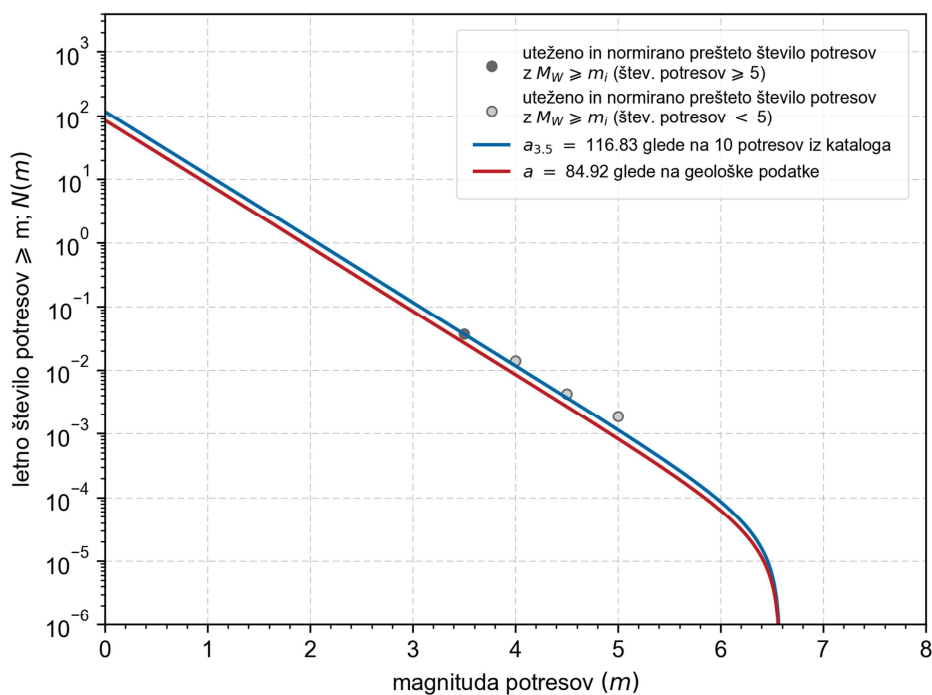
Slika 5 – Magnitudno-frekvenčni porazdelitvi potresov za Idrijski prelom, izračunani na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{3,5}$ (modra črta) in geoloških podatkov (rdeča črta). Točke prikazujejo uteženo in normirano prešteto število potresov z $M_W \geq m_i$.

Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Ravenski prelom
 $m_0 = 0.0, m_u = 6.9$



Slika 6 – Magnitudno-frekvenčni porazdelitvi potresov za Ravenski prelom, izračunani na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{3,5}$ (modra črta) in geoloških podatkov (prekinjena rdeča črta). Točke prikazujejo uteženo in normirano prešteto število potresov z $M_W \geq m_i$.

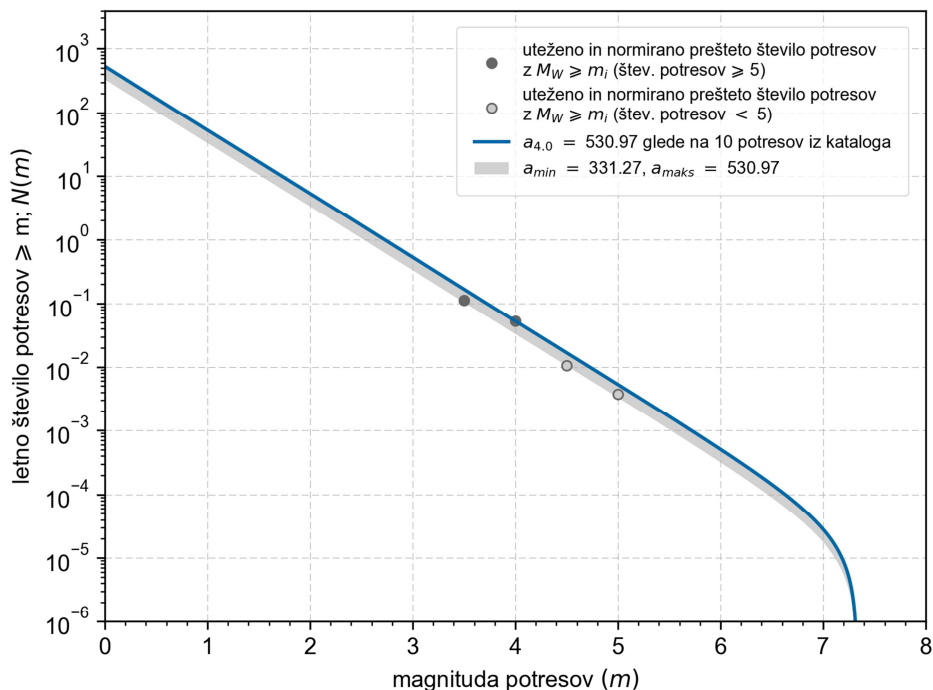
Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Vrhniški prelom
 $m_0 = 0.0, m_u = 6.6$



Slika 7 – Magnitudno-frekvenčni porazdelitvi potresov za Vrhniški prelom, izračunani na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{3,5}$ (modra črta) in geoloških podatkov (rdeča črta). Točke prikazujejo uteženo in normirano prešteto število potresov z $M_W \geq m_i$.

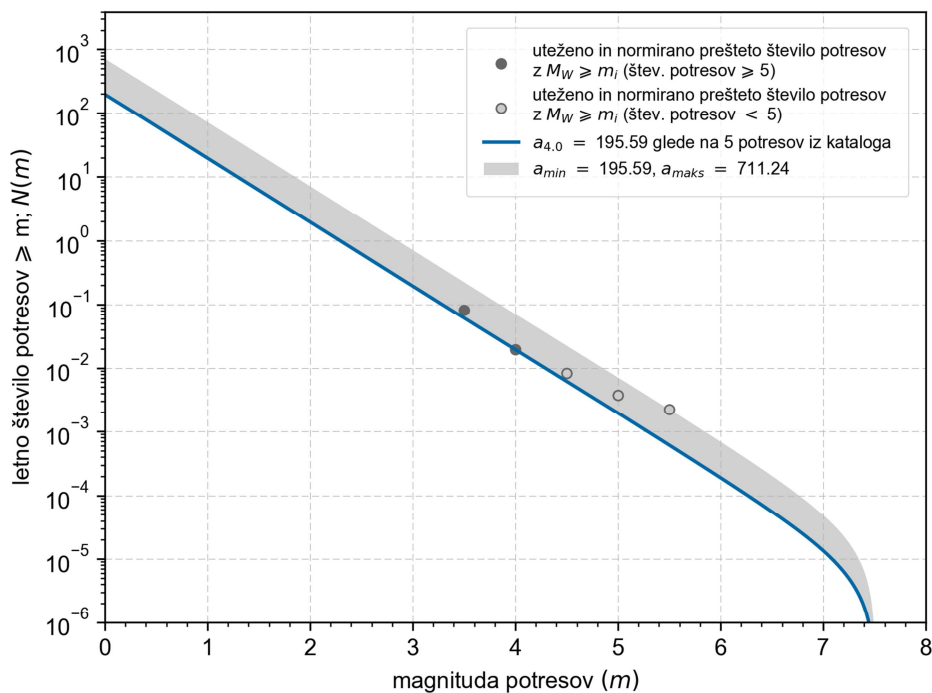
Za prve tri že omenjene prelome v nadaljevanju prikazujemo rezultate analize seizmološke potresne aktivnosti, izračunane za največjo vrednost magnitude popolnosti, nad katero je bilo posameznemu prelomnemu potresnemu izvoru pripisanih vsaj pet potresov (slike 8, 9 in 10). Na ta način smo za Raški prelom (slika 8) izračunali seizmološko potresno aktivnost za vrednost magnitude popolnosti enako M_W 4,0 ($a_{4,0}$), ki je v primerjavi z $a_{3,5}$ večja za približno 175 potresov letno. Razpon med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti, izračunane iz posameznih uteženih in normiranih števil potresov za različne magntude popolnosti, ni bistveno večji od te vrednosti. Tudi za Idrijski prelom (slika 9) smo v tem primeru izračunali $a_{4,0}$, ki pa je v primerjavi z $a_{3,5}$ manjša za približno 66 potresov letno. Razpon med najmanjšo in največjo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti je v tem primeru bistveno večji, kar je posledica majhnega števila potresov (< 5) za večje vrednosti magnitude popolnosti. Znotraj prelomnega območja Ravenskega preloma je število potresov enako pet ali več samo pri najmanjši vrednosti magnitude popolnosti, zato je seizmološka potresna aktivnost v primeru drugega izračuna ostala nespremenjena. Razpon med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti je tudi v tem primeru dokaj velik. Največja razlika med skrajnima vrednostima seizmološke potresne aktivnosti se pojavi pri prelomih z manjšim številom potresov pri vrednostih magnitude popolnosti nad M_W 4,0. Pri takih prelomih je zato za seizmološko potresno aktivnost smiselno privzeti kar vrednost $a_{3,5}$.

Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov s prikazanim razponom za različna obdobja popolnosti kataloga potresov (Raški prelom)



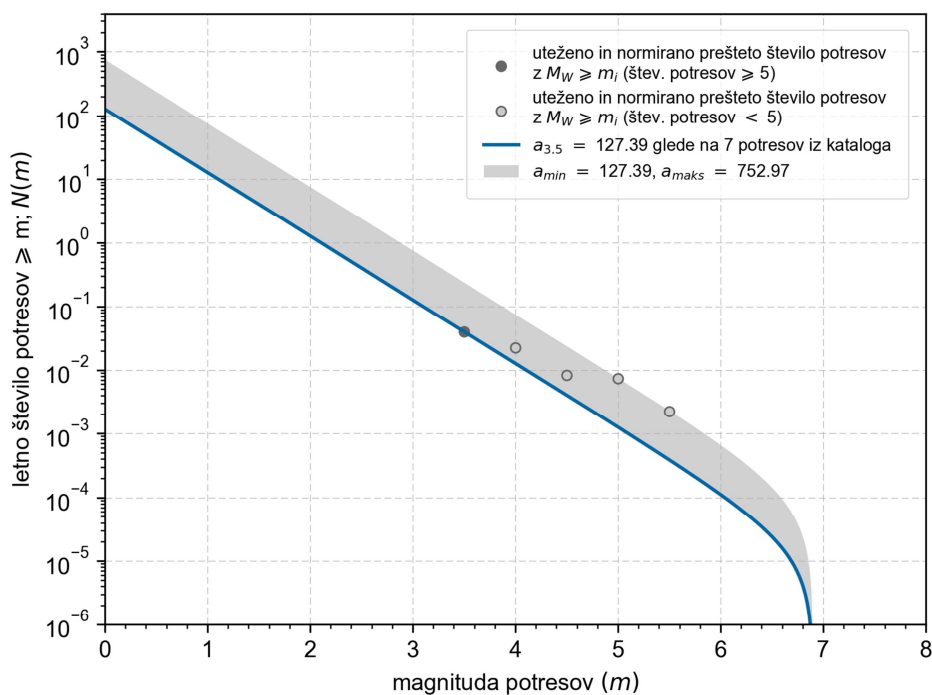
Slika 8 – Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Raški prelom, izračunana na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{4,0}$ (modra črta). Razpon med skrajnima vrednostima seizmološke potresne aktivnosti je prikazan z osenčenim območjem.

Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov s prikazanim razponom za različna obdobja popolnosti kataloga potresov (Idrijski prelom)



Slika 9 – Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Idrijski prelom, izračunana na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{4,0}$ (modra črta). Razpon med skrajnima vrednostima seizmološke potresne aktivnosti je prikazan z osenčenim območjem.

Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov s prikazanim razponom za različna obdobja popolnosti kataloga potresov (Ravenski prelom)



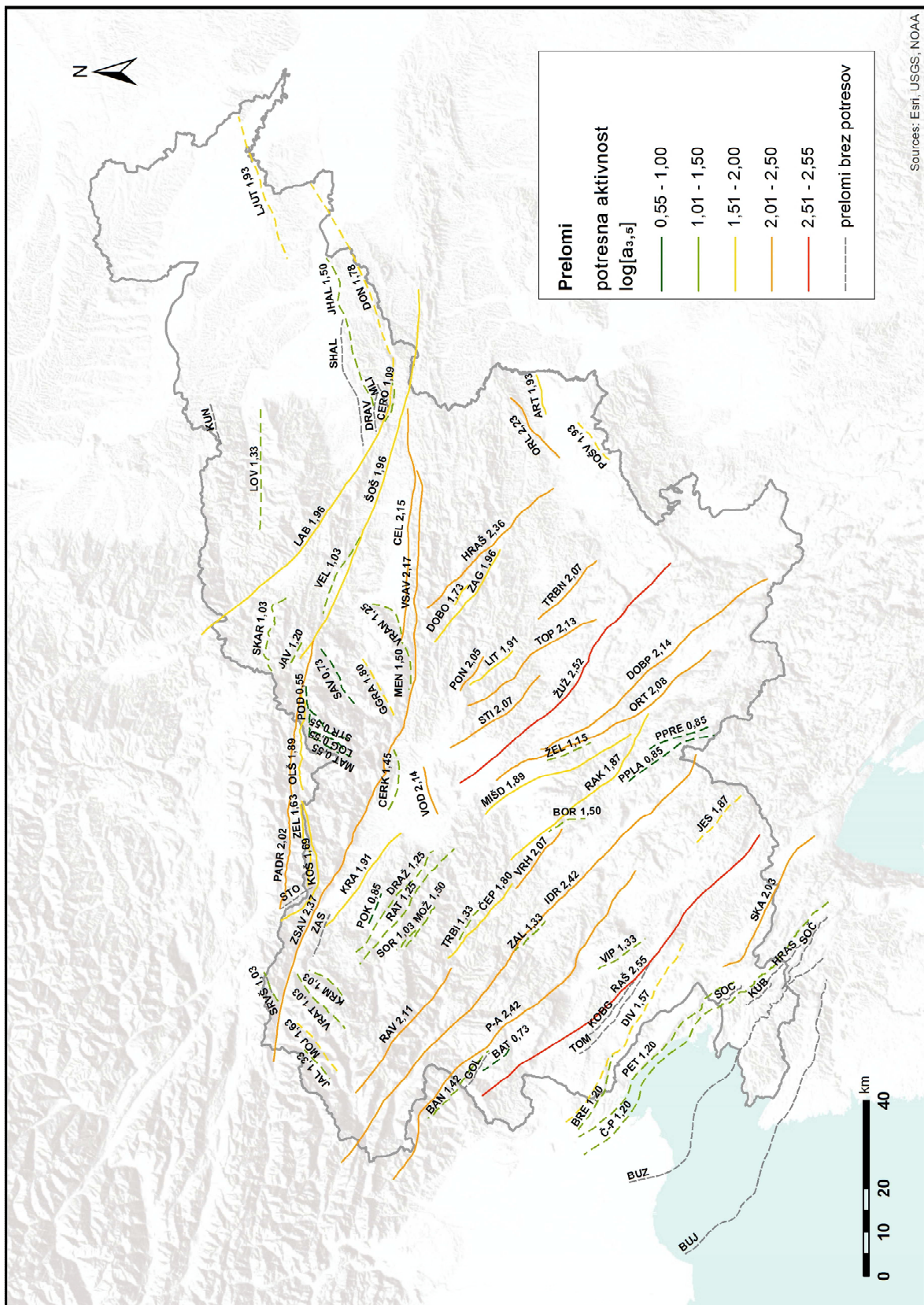
Slika 10 – Magnitudno-frekvenčna porazdelitev potresov za Ravenski prelom, izračunana na podlagi seizmoloških podatkov za $a_{3,5}$ (modra črta). Razpon med skrajnima vrednostima seizmološke potresne aktivnosti je prikazan z osenčenim območjem.

Na karti potresne aktivnosti (slika 11) po prelomnih potresnih izvorih je prikazan logaritem seizmološke potresne aktivnosti, izračunan za najmanjšo vrednost magnitude popolnosti ($a_{3,5}$) in pripadajoče obdobje popolnosti kataloga potresov od leta 1866 do leta 2014. Največje vrednosti seizmološke potresne aktivnosti pripadajo (od največje proti najmanjši vrednosti) Raškemu prelomu (RAŠ), Žužemberškemu prelomu (ŽUŽ) in Idrijskemu prelomu (IDR). Za te prelomne potresne izvore so vrednosti $a_{3,5}$, glede na število potresov znotraj pripadajočih prelomnih območij, določene dokaj zanesljivo. Najmanjše vrednosti izračunane potresne aktivnosti zasledimo na velikem številu prelomnih potresnih izvorov v severni in severozahodni Sloveniji, posamezni prelomni potresni izvori z majhno potresno aktivnostjo pa se pojavljajo tudi v južni Sloveniji. To so predvsem tisti z majhnim številom potresov znotraj pripadajočih prelomnih območij, zato izračunana seizmološka potresna aktivnost za njih najverjetneje ni zanesljiva. Prelomni potresni izvori z manj kot petimi potresi znotraj prelomnih območij so na karti označeni z obarvanimi prekinjenimi črtami.

Diskusija

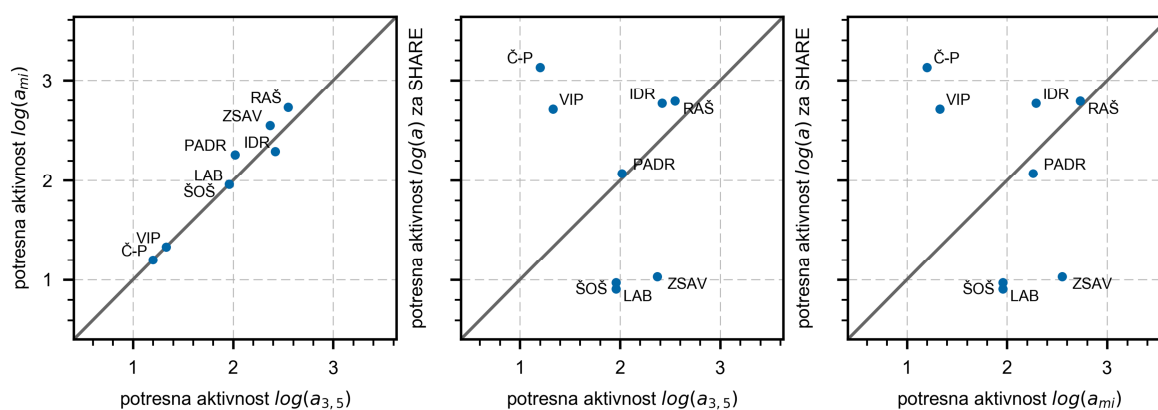
Vrednosti potresne aktivnosti za nekatere prelomne potresne izvore lahko primerjamo s tistimi, ki so bile v okviru projekta SHARE ("Seismic Hazard Harmonization in Europe") izračunane po prelomnih potresnih izvorih iz baze EDSF ("The European Database of Seismogenic Faults") (Giardini et al., 2013). Primerjavo podajamo na sliki 12 za logaritem seizmološke potresne aktivnosti. Podrobnosti analize za izračun potresne aktivnosti v projektu SHARE ne poznamo, zato razlogov za odstopanje v primerjavi z našimi vrednostmi ne moremo ustrezno komentirati.

Za primerjane prelomne potresne izvore se seizmološka potresna aktivnost med različnima pristopoma za izračun bistveno ne razlikuje (slika 12, levo), zato podrobneje komentiramo le primerjavo med seizmološko potresno aktivnostjo, izračunano za najmanjšo vrednost magnitude popolnosti ($a_{3,5}$) in projektom SHARE. Z vrednostmi potresne aktivnosti iz projekta SHARE se dobro ujemajo vrednosti $a_{3,5}$ za Idrijski prelom, Periadriatski prelom (PADR) in Raški prelom. Vrednost $a_{3,5}$ je v primerjavi z vrednostjo iz projekta SHARE bistveno manjša za Črnokalsko-Palmanovski prelom (Č-P) in Vipavski prelom (VIP). Geološka potresna aktivnost je za ta dva prelomna potresna izvora bistveno bližje vrednosti potresne aktivnosti iz projekta SHARE, zato sklepamo, da je bila tudi slednja izračunana na podlagi geoloških podatkov. Pri izračunu seizmološke potresne aktivnosti za Črnokalsko-Palmanovski prelom in Vipavski prelom smo imeli na voljo bistveno premalo podatkov, da bi lahko podali ustrezne zaključke, saj sta bila znotraj prelomnega območja prvega opažena dva potresa, znotraj prelomnega območja drugega pa le en potres. Bistveno večjo vrednost potresne aktivnosti smo v primerjavi s projektom SHARE izračunali za Labotski prelom (LAB), Šoštanjski prelom (ŠOŠ) in Zahodnosavski prelom (ZSAV). Razlog za nastalo razliko je deloma lahko vrednost koeficienta b , saj so v projektu SHARE za omenjene prelome uporabili manjšo vrednost koeficienta (0,83), kar zmanjša naklon dvojno odrezane eksponentne krivulje in s tem izračunano potresno aktivnost.



Slika 11 – Logaritem vrednosti $a_{3.5}$, prikazan po prelomnih potresnih izviroh za prelomna območja (slika 1). S prekinjeno črto so označeni prelomni potresni izviroi z manj kot petimi potresi znotraj pripadajočih prelomnih območij.

Na podlagi analize seizmološke potresne aktivnosti ugotavljamo, da je določitev le-te otežena za dokaj velik delež prelomnih potresnih izvorov, pri katerih je število potresov znotraj prelomnega območja majhno. Seizmološko potresno aktivnost smo zato z zelo omejeno zanesljivostjo lahko določili 42 prelomnim potresnim izvorom, brez izračunane vrednosti pa je ostalo 15 prelomnih potresnih izvorov. Da bi za tovrstne prelomne potresne izvore pridobili več informacij o potresni aktivnosti, bi bilo treba izvesti analizo na podlagi številčnejšega instrumentalnega kataloga potresov z bistveno manjšo magnitudo popolnosti. Kljub privzetim predpostavkam smo lahko dokaj dobro določili seizmološko potresno aktivnost za daljše prelomne potresne izvore z večjim številom potresov. S Poissonovim modelom pojavljanja potresov predpostavimo, da se potresi pojavljajo naključno in neodvisno od časa, s čimer ne ugodimo teoriji elastičnega odskoka in odvisnim dogodkom v katalogu potresov. Kljub napaki, vpeljeni z omenjeno predpostavko, menimo, da nam Poissonov model, skupaj z metodami odstranjevanja odvisnih dogodkov, omogoča dovolj dobro oceno ključnih parametrov za ocenjevanje potresne nevarnosti. Poleg tega je treba upoštevati, da je ocena popolnosti kataloga potresov le približna, število potresov znotraj posameznih prelomnih območij pa omejeno na zelo majhno površino v primerjavi s celotno razsežnostjo kataloga potresov.



Slika 12 – Primerjava rezultatov analize seizmološke potresne aktivnosti. Medsebojno za oba načina izračuna in z vrednostmi, ki so bile izračunane v okviru projekta SHARE. Z a_{mi} je označena potresna aktivnost za največjo vrednost magnitude popolnosti, nad katero je bilo prelomu pripisanih vsaj še pet potresov.

Kot smo videli na nekaterih primerih (npr. slika 10), lahko močnejši potresi z daljšimi povratnimi dobami povzročijo nekoliko večje odstopanje uteženega in normiranega števila potresov od izračunane magnitudno-frekvenčne porazdelitve in s tem bistveno vplivajo na izračun potresne aktivnosti oziroma na razpon med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti, izračunane za različne vrednosti magnitude popolnosti. Tovrstni potresni dogodki zaradi relativno kratkega časovnega razpona kataloga potresov najverjetneje niso ustrezni za analizo ali pa smo za te vrednosti magnitude popolnosti napačno ocenili obdobje popolnosti kataloga potresov. Razpon vrednosti potresne aktivnosti bi bilo smiselno podati tudi v primeru izračuna geološke potresne aktivnosti, in sicer glede na razpon vrednosti hitrosti premikanja ob prelomu. Opozoriti je treba, da "vizualen" pristop k vrednotenju rezultatov ni najbolj ustrezen. Iskanje parametrov magnitudno-frekvenčne porazdelitve, izračunane iz seizmoloških podatkov, namreč ne poteka po metodi najmanjših kvadratov, ker so vrednosti kumulativne in zato med sabo niso neodvisne.

Velik vpliv na izračun seizmološke potresne aktivnosti ima tudi način pripisovanja potresov posameznim prelomnim potresnim izvorom. Predstavljena študija potresne

aktivnosti je le preliminarna, zato pri prostorski analizi še nismo upoštevali kinematskih lastnosti (geometrije) prelomnih potresnih izvorov in napake določitve lokacije nadžarišč potresov. Slednja upada s časom, ko je bil potres zabeležen, saj so lokacije današnjih potresov določene točneje.

Zaključek in nadaljnje delo

Ta študija predstavlja dopolnitev in nadaljevanje dosedanje analize potresne aktivnosti na območju Slovenije (Rajh, 2017). Na podlagi seizmoloških in geoloških podatkov smo analizirali potresno aktivnost po prelomnih potresnih izvorih (seizmološka in geološka potresna aktivnost). Tovrstna analiza je v Sloveniji zelo zahtevna zaradi relativno počasnih premikov ob prelomih in zmerne potresne dejavnosti. Seizmološko potresno aktivnost smo za oceno negotovosti izračunali po dveh pristopih ter jo, kjer je bilo to mogoče, primerjali z vrednostmi iz literature. Ugotavljamo, da je izračun potresne aktivnosti negotov za kar precej prelomov na območju Slovenije, kar se odraža v velikosti razpona med največjo in najmanjšo vrednostjo seizmološke potresne aktivnosti, izračunane za različne vrednosti magnitude popolnosti ter v razliki med seizmološko in geološko potresno aktivnostjo. Razlogov za to je več (npr. privzete predpostavke, uporabljene metode, privzete vrednosti parametrov), v največji meri pa k odstopanju prispevajo relativno kratek časovni razpon kataloga potresov, majhno število potresov v nekaterih prelomnih območjih, negotovosti v prostorski analizi in negotovosti v določanju parametrov prelomnih potresnih izvorov. Negotovosti pri izračunu seizmološke potresne aktivnosti bomo pred izračunom potresne nevarnosti poizkusili zmanjšati predvsem z izboljšano prostorsko analizo. Izvedli bomo tudi analizo seizmološke potresne aktivnosti z uporabo instrumentalnega kataloga potresov, pri kateri bo poudarek na prelomnih potresnih izvorih z nezanesljivo določeno potresno aktivnostjo. Podane vrednosti izračunane seizmološke potresne aktivnosti (slika 11) so preliminarne. Kljub temu predstavljajo pomemben člen pri izračunu končnih vrednosti potresne aktivnosti, ki bodo pomembno prispevale k izdelavi nove karte potresne nevarnosti Slovenije.

Literatura

- Agencija RS za okolje (ARSO) (2015). Katalog potresov od leta 456 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.
- Basili, R., Kastelic, V., Demircioglu, M. B., Garcia Moreno, D., Nemser, E. S., Petricca, P., Sboras, S. P., Besana-Ostman, G. M., Cabral, J., Camelbeeck, T., Caputo, R., Danciu, L., Domac, H., Fonseca, J., García-Mayordomo, J., Giardini, D., Glavatic, B., Gulen, L., Ince, Y., Pavlides, S., Sesetyan, K., Tarabusi, G., Tiberti, M. M., Utkucu, M., Valensise, G., Vanneste, K., Vilanova, S., Woessner, J. (2013). The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE [online]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
doi: 10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF.
<http://diss.rm.ingv.it/share-edsf> (28.11.2017).

- Brune, J. N. (1968). Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research*, 73(2), 777–784.
- Bungum, H. (2007). Numerical modelling of fault activities. *Computers & Geosciences*, 33(6), 808–820.
- Cornell, C. A., Vanmarcke, E. H. (1969). The major influences on seismic risk. V: Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago (Čile) : Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, A-1, 69-83.
- Gardner, J. K., Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363–1367.
- Giardini, D., Woessner, J., Danciu, L., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Pinho, R., Valensise, G., Akkar, S., Arvidsson, R., Basili, R., Cameelbeeck, T., Campos-Costa, A., Douglas, J., Demircioglu, M. B., Erdik, M., Fonseca, J., Glavatovic, B., Lindholm, C., Makropoulos, K., Meletti, C., Musson, R., Pitilakis, K., Sesetyan, K., Stromeyer, D., Stucchi, M., Rovida, A. (2013). Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource [online]. European Facility for Earthquake Hazard and Risk (EFEHR), Swiss Seismological Service (SED).
doi: 10.12686/SED-00000001-SHARE.
<http://www.efehr.org:8080/jetspeed/portal/hazard.psml> (28.11.2017).
- Gutenberg, B., Richter, C. F. (1945). Seismicity of the Earth (Supplementary Paper). *Bulletin of the Geological Society of America*, 1945, 56(6), 603–668.
- Hanks, T. C., Kanamori, H. A. (1979). Moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5), 2348–2350.
- Hunstad, I., Selvaggi, G., D'Agostino, N., England, P., Clarke, P., Pierozzi, M. (2003). Geodetic strain in peninsular Italy between 1875 and 2001. *Geophysical Research Letters*, 30(4), 1181.
- McGuire, R. K. (2004). Seismic hazard and risk analysis. Earthquake Engineering Research Institute, Kolorado, ZDA, 240 str.
- Poljak, M., Živčič, M., Zupančič, P. (2000). The seismotectonic characteristics of Slovenia. *Pure and Applied Geophysics*, 157, 37–55.
- Rajh, G., Zupančič, P., Živčič, M., Gosar, A., Čarman, M. (2017). Analiza največjih magnitud in globin žarišč potresov v Sloveniji za namen ocenjevanja potresne nevarnosti. V: Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016 : zbornik del, 22. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 26. januar 2017. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 39–49.
- Rajh, G. (2017). Analiza seizmotektonskih podatkov v Sloveniji z uporabo GIS orodij za verjetnostno ocenjevanje potresne nevarnosti. Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, 108 str.
- Reiter, L. (1991). *Earthquake hazard analysis: Issues and insights*. Columbia University Press, New York, ZDA, 254 str.
- Wallace, R. E. (1970). Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 2875–2890.
- Ward, S. (1998). On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. *Geophysical Journal International*, 135, 1011–1018.
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002.
- Youngs, R. R., Coopersmith, R. J. (1985). Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 939–964.