

# Potresa 12. aprila 1998 in 12. julija 2004 v Krnskem pogorju – časovna porazdelitev popotresov ter odnos med magnitudo in pogostostjo popotresov

## The earthquakes on 12 April 1998 and 12 July 2004 in Krn Mountains (NW Slovenia) – time distribution of aftershocks and magnitude-frequency relation

Andrej GOSAR<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, SI-1000, Ljubljana;  
e-mail: andrej.gosar@gov.si

<sup>2</sup>Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva 12, SI-1000, Ljubljana

**Ključne besede:** glavni potres, popotresni niz, časovna porazdelitev, Omorijev zakon, odnos magnituda-pogostost, Gutenberg-Richterjev odnos, Krnsko pogorje, Slovenija

**Key words:** mainshock, aftershock sequence, time distribution, Omori's power law, magnitude-frequency relation, Gutenberg-Richter's relation, Krn Mountains, Slovenia

### Izvleček

Potresa 12. aprila 1998 ( $M_L=5,6$ ) in 12. julija 2004 ( $M_L=4,9$ ) v Krnskem pogorju sta imela obsežna niza več tisoč popotresov, ki so trajali dlje kot eno leto. V 400 dneh so prvemu potresu sledili 104, drugemu pa 89 popotresov z  $M_L \geq 2,0$ . Oba najmočnejša popotresa sta imela za 1,4 in 1,3 nižjo magnitudo od glavnih potresov, kar je le malo več od podatkov v literaturi (1,2). Analiza časovne porazdelitve popotresov z metodo največje zanesljivosti je pokazala, da se parametri dopolnjenega Omorijevega zakona, ki opisuje hiperbolično pojemanje gostote pojavljanja popotresov s časom, za oba niza dobro ujemajo, kar ustreza temu, da sta oba potresa nastala v istem žariščnem območju. Vrednost parametra  $p$  je okoli 1,02. Popotresi v letu 1998 jasno kažejo sekundarni popotresni niz z vrednostjo  $p$  0,770, ki se je začel ob najmočnejšem popotresu 6. maja 1998 ( $M_L=4,2$ ), medtem ko leta 2004 podobnega sekundarnega niza ni bilo. Analiza odnosa med magnitudo in pogostostjo popotresov (Gutenberg-Richterjev odnos) z metodo najmanjših kvadratov in metodo največje zanesljivosti je dala vrednost parametra  $b$  za popotresni niz leta 1998 med 0,77 in 0,83 in za niz leta 2004 med 0,97 in 0,98, kar pomeni, da je prvemu potresu sledilo več močnejših popotresov. Dobljeni parametri dopolnjenega Omorijevega zakona in Gutenberg-Richterjevega odnosa se ujemajo s podatki za podobne popotresne nize v literaturi.

### Abstract

Earthquakes on 12 April 1998 ( $M_L=5.6$ ) and 12. July 2004 ( $M_L=4.9$ ) in Krn Mountains were followed by extensive aftershock sequences with several thousand of shocks which lasted for more than one year. In 400 days the first earthquake was followed by 104 and the second one by 89 aftershocks with  $M_L \geq 2,0$ . Both strongest aftershocks had magnitudes smaller for 1.4 and 1.3 with respect to the mainshocks, which is slightly more than published values (1.2). Analysis of time distribution of aftershocks with maximum likelihood estimate has shown that the parameters of modified Omori's law, which describes the hyperbolic decay of aftershock activity with time, are very similar. This corresponds to the fact that both earthquakes occurred in the same hypocentral area. The value of  $p$  parameter is around 1.02. Aftershocks in 1998 clearly show secondary aftershock sequence which started with strongest aftershock on 6 May 1998 ( $M_L=4.2$ ), but there was no secondary sequence in 2004. Analysis of magnitude-frequency (Gutenberg-Richter's) relation with least squares and maximum likelihood estimate has given the value of  $b$  parameter for 1998 aftershock sequence between 0.77 and 0.83 and for 2004 sequence between 0.97 and 0.98. This means that the first earthquake was followed by more stronger aftershocks. Obtained parameters of modified Omori's law and Gutenberg-Richter's relation are in good agreement with values published for similar aftershock sequences.

### Uvod

Niz popotresov, ki sledi vsakemu močnejšemu (glavnemu, *ang.* mainshock) potresu, je zelo običajen pojav in je posledica tega, da se vsa nakopičena napetost ob prelomni coni ne sprosti

z glavnim potresom, obenem pa sproščena energija povzroči tudi spremembo napetostnega stanja v okolici. V žariščnem območju potresa torej med glavnim potresom ostanejo območja, kjer ob glavnem potresu ne pride do pretrgov ali zdrsov, ki pa se zgodijo kasneje kot popotresi (*ang.* aftershock).

Ker lahko prostorska in časovna porazdelitev popotresov veliko pove o značilnostih žarišnega območja oziroma prelomne cone, ju je vredno natančneje analizirati. Nekatere statistične zakonitosti povezane s prostorsko in predvsem časovno porazdelitvijo popotresov ter pogostostjo njihovih magnitud so odkrili v seizmologiji že relativno zgodaj. Prostorska porazdelitev popotresov običajno dobro sovпада s površino in dolžino prelomne cone, ob kateri je prišlo pri glavnem potresu do zdrsa. Včasih pa pride tudi do migracije popotresov vzdolž prelomne cone. Število popotresov, njihova magnituda in trajanje pa je odvisna od magnitude glavnega potresa. Magnituda najmočnejšega popotresa je po RICHTERJU (1958) manjša od magnitude glavnega potresa za okoli 1,2, STEIN & WYSS (2003) pa navajata, da je manjša za več kot 1,0.

V Krnskem pogorju sta se v razmiku dobrih šestih let zgodila v istem žariščnem območju ob Ravenskem prelomu dva močna potresa, ki sta prizadela Zgornje Posočje (VIDRIH, 2006). Potres 12. aprila 1998 je imel lokalno magnitudo  $M_L=5,6$ , oz. navorno magnitudo  $M_w=5,6$ , potres 12. julija 2004 pa lokalno magnitudo  $M_L=4,9$  oz. navorno magnitudo  $M_w=5,2$ . Obema glavnima potresoma sta sledila obsežna niza popotresnih sunkov, ki sta trajala dlje kot eno leto. Ker smo v nadžariščnem območju takoj po glavnih potresih postavili več začasnih potresnih opazovalnic (ZUPANČIČ et al., 2001; PAHOR et al., 2006), sta popotresna niza razmeroma dobro opazovana, kar omogoča njuno podrobnejšo analizo. V prispevku obravnavam časovno porazdelitev obeh popotresnih nizov ter odvisnost pogostosti popotresov od njihove magnitude.

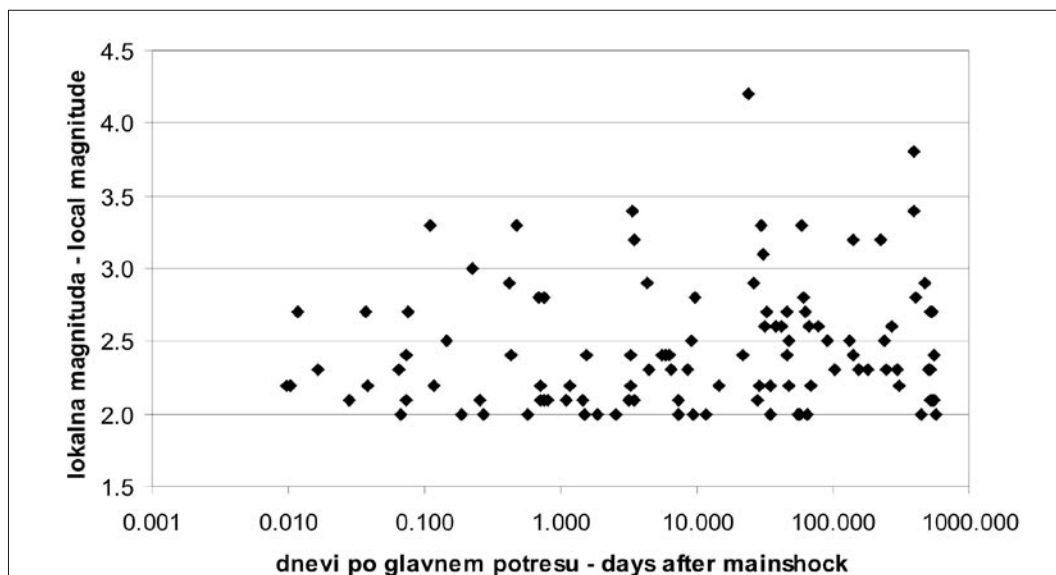
### Popotresna niza

Po potresu z lokalno magnitudo 5,6, ki je prizadel Zgornje Posočje 12. aprila 1998 ob 10:55 UTC

je bilo postavljenih 12 začasnih potresnih opazovalnic, ki so do konca leta 1998 zaznale več kot 7000 popotresnih sunkov (VIDRIH & RIBIČIČ, 1998; ZUPANČIČ et al., 2001). V 396 dneh (do 13. maja 1999) so 104 popotresi imeli magnitudo enako ali večjo od 2,0, trinajst potresov pa magnitudo večjo ali enako 3,0 (sl. 1). Najmočnejši popotres z lokalno magnitudo 4,2 se je zgodil 6. maja 1998, torej 23 dni po glavnem potresu. Njegova magnituda je za 1,4 nižja od magnitude glavnega potresa. Prostorska porazdelitev relociranih žarišč je pokazala, da se območje popotresov dobro ujema z območjem pretrga prelomne ploskve Ravenskega preloma med Bovško kotlino in izviri Tolminke (BAJC et al., 2001).

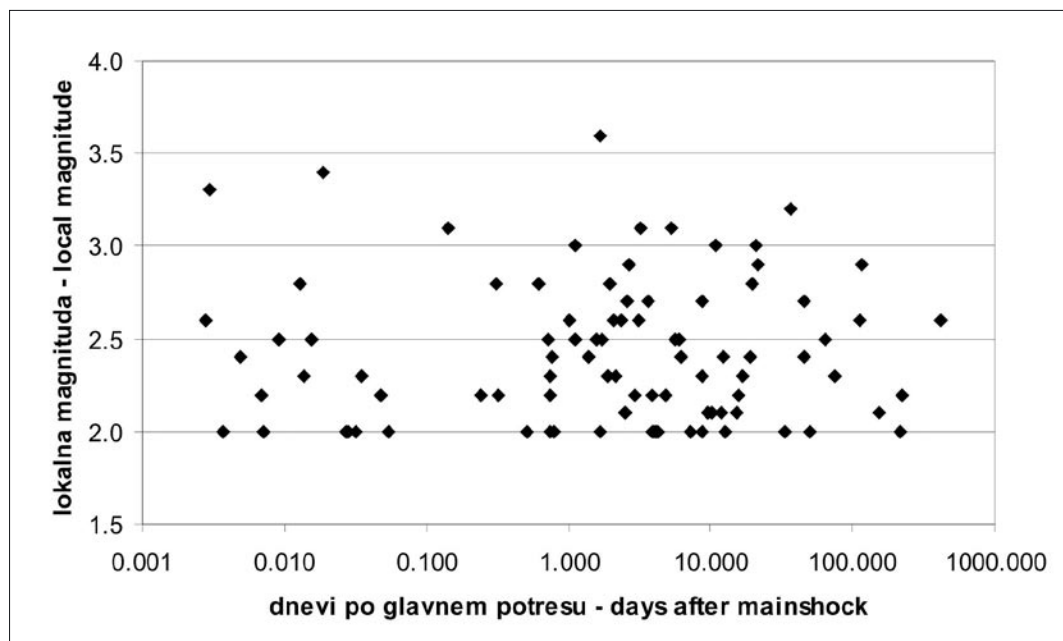
Po potresu z lokalno magnitudo 4,9, ki se je zgodil 12. julija 2004 ob 13:04 UTC je sledilo več kot 6000 popotresnih sunkov, ki jih je registriralo 22 začasnih potresnih opazovalnic (VIDRIH & RIBIČIČ, 2004; ŽIVČIČ et al. 2006; PAHOR et al., 2006). Te so kmalu po glavnem potresu postavile poleg Urada za seizmologijo in geologijo ARSO še tri italijanske inštitucije (DST, INGV in OGS). V 415 dneh (do 31. avgusta 2005) je 89 popotresov imelo magnitudo enako ali večjo od 2,0, deset potresov pa magnitudo večjo ali enako 3,0 (sl. 2). Najmočnejši popotres z lokalno magnitudo 3,6 se je zgodil 14. julija 2004, torej dva dneva po glavnem potresu (ČEČIČ et al., 2006). Njegova magnituda je za 1,3 nižja od magnitude glavnega potresa. Prostorska porazdelitev popotresnih žarišč ni tako enotna kot tista iz leta 1998, ampak kaže bivergentno porazdelitev (KASTELIČ et al., 2006).

Če primerjamo oba popotresna niza na slikah 1 in 2, vidimo razliko predvsem v prvih 15 minutah (do 0,01 dneva), ko je bil leta 1998 le en popotres, leta 2004 pa sedem popotresov. To je posledica tega, da je bila državna mreža potresnih opazovalnic leta 1998 še zelo redka in je bila najbližja opazovalnica v Italiji oddaljena 16 km, najbližja



Sl. 1. Popotresi z  $M_L \geq 2,0$ , ki so sledili glavnemu potresu 12. aprila 1998 ( $M_L=5,6$ )

Fig. 1. Aftershocks with  $M_L \geq 2,0$  which followed the mainshock on 12 April 1998 ( $M_L=5,6$ )



Sl. 2. Popotresi z  $M_L \geq 2,0$ , ki so sledili glavnemu potresu 12. julija 2004 ( $M_L=4,9$ )

Fig. 2. Aftershocks with  $M_L \geq 2,0$  which followed the mainshock on 12 July 2004 ( $M_L=4,9$ )

v Sloveniji pa je bila analogna opazovalnica na Vojskem, oddaljena okoli 35 km. Zaradi velikega števila popotresov v prvih minutah, se ti na zapisih med seboj prekrivajo in jih ni bilo mogoče ločiti. Leta 2004 pa so delovali v Posočju poleg potresnih opazovalnic državne mreže v Čadrgu in Robiču tudi akcelorografi v Bovcu, Kobaridu in Drežnici. Na njihovih zapisih pa je bilo mogoče ločiti posamezne močnejše popotresne sunke.

### Časovna porazdelitev popotresov

Prvi zakon, ki opisuje hiperbolično pojemanje gostote pojavljanja popotresov s časom, ki poteče od glavnega potresa, je postavil Omori že leta 1895 (UTSU et al., 1995) v obliki

$$n(t) = K(t + c)^{-1}$$

Kasneje so ga dopolnili z eksponentnim parametrom  $p$  v obliko za katero se je uveljavilo ime dopolnjen Omorijev zakon (UTSU, 1962)

$$n(t) = K(t + c)^{-p}$$

kjer so

$n(t)$  – število popotresov v časovni enoti  $t$  (ura, dan, mesec),

$K, c, p$  – parametri dopolnjenega Omorijevega zakona.

Za eksponentni parameter  $p$ , ki ima vrednosti med 0,7 in 1,4 (UDIAS, 1999) oz. med 1,0 in 1,5 (UTSU, 2002), se smatra, da je odvisen od heterogenosti v območju prelomne cone. Ker je celotno število popotresov končno, je pri dovolj dolgem času po glavnem potresu  $p > 1$ . Če so kamnine v območju prelomne cone petrofizikalno bolj homogene, se bo število popotresov zmanjševalo hitreje

(višje vrednosti  $p$ ) kot v primeru bolj heterogenih kamnin (nižje vrednosti  $p$ ).  $K$  je odvisen od spodnje meje magnitude in celotnega števila popotresov, medtem ko za  $p$  in  $c$  UDIAS (1999) meni, da sta odvisna le od njihove časovne porazdelitve, medtem ko Utsu (2002) navaja, da  $c$  pogosto kaže močno odvisnost od spodnje meje magnitude.

Če je v popotresnem nizu kakšen izrazito močan potres, povzroči svoj lasten (sekundarni) popotresni niz. Pojemanje gostote pojavljanja popotresov v tem primeru opišemo z enačbo

$$n(t) = K(t + c)^{-p} + K_2(t - T_2 + c_2)^{-p_2}$$

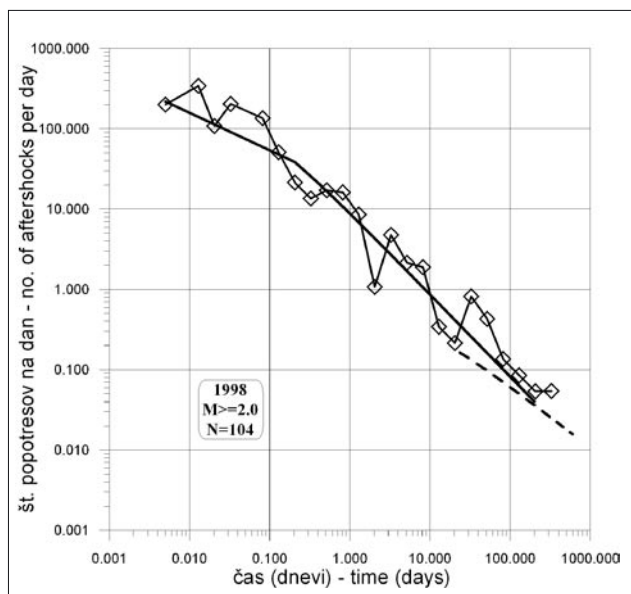
( $K_2 = 0$  za  $t \leq T_2$ )

kjer so

$K_2, c_2, p_2$  – parametri sekundarnega popotresnega niza.

Parametre Omorijevega zakona določamo običajno z metodo največje zanesljivosti (*ang.* maximum likelihood estimate) (OGATA, 1983), ki temelji na časovni vrsti. Uporabili smo jo tudi pri svojih analizah, ki smo jih opravili s programom AFT (UTSU & OGATA, 1997). V preteklosti se je za oceno  $p$  uporabljala tudi določitev na bilogaritmskem diagramu  $n(t)$ , na katerem se Omorijeva krivulja v limiti velikih časov približuje premici, katere strmina poda oceno za  $p$ . Pri določitvi parametrov Omorijevega zakona je zelo pomembna pravilna izbira mejne magnitude, ki jo še upoštevamo, in mora biti enaka ali večja od meje popolnosti podatkov, kar pomeni, da so v časovni vrsti zajeti vsi popotresi, močnejši od določene magnitude. To mejo določimo z analizo odnosa med magnitudo in pogostostjo popotresov (Gutenberg-Richterjev odnos).

Rezultati analize pojemanja gostote popotresov so za oba popotresna niza v Krnskem pogorju

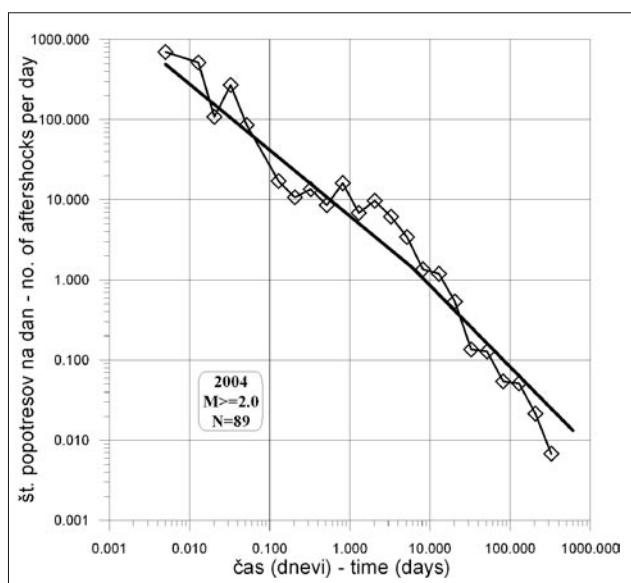


Sl. 3. Frekvenca popotresov glavnega potresa 12. aprila 1998 s krivuljo dopolnjenega Omorijevega zakona. Sekundarni popotresni niz, ki se je začel ob najmočnejšem popotresu 6. maja 1998 ( $M_L=4,2$ ), je prikazan s prekinjeno črto

Fig. 3. Frequency of aftershocks of the mainshock on 12 April 1998 with modified Omori's law function. The secondary aftershock sequence, which started with strongest aftershock on 6 May 1998 ( $M_L=4,2$ ) is shown with dashed line

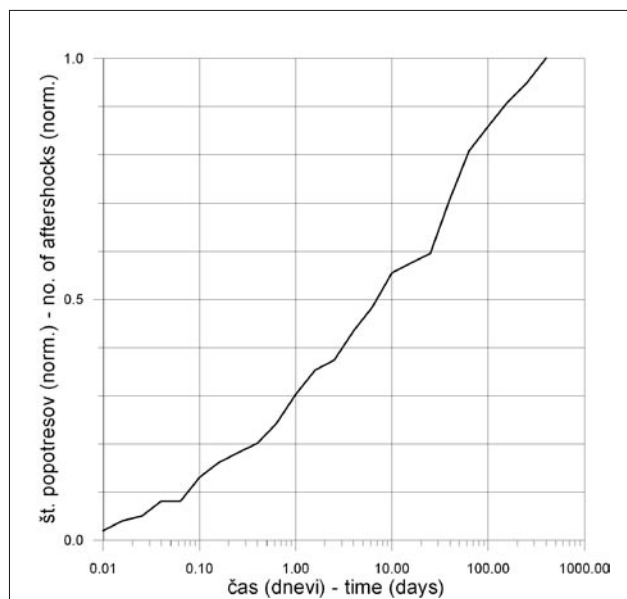
podani z dvema diagramoma:

- število popotresov na dan z  $M \geq 2,0$  v odvisnosti od časa po glavnem potresu; časovni intervali so enakomerno razporejeni v logaritemskem merilu; dodana je krivulja dopolnjenega Omorijevega zakona pojemanja katerega parametri so podani v preglednici 1 (sl. 3 in sl. 5)
- kumulativno število popotresov normirano na celotno število popotresov v odvisnosti od časa (sl. 4 in sl. 6).



Sl. 5. Frekvenca popotresov glavnega potresa 12. julija 2004 s krivuljo dopolnjenega Omorijevega zakona

Fig. 5. Frequency of aftershocks of the mainshock on 12 July 2004 with modified Omori's law function

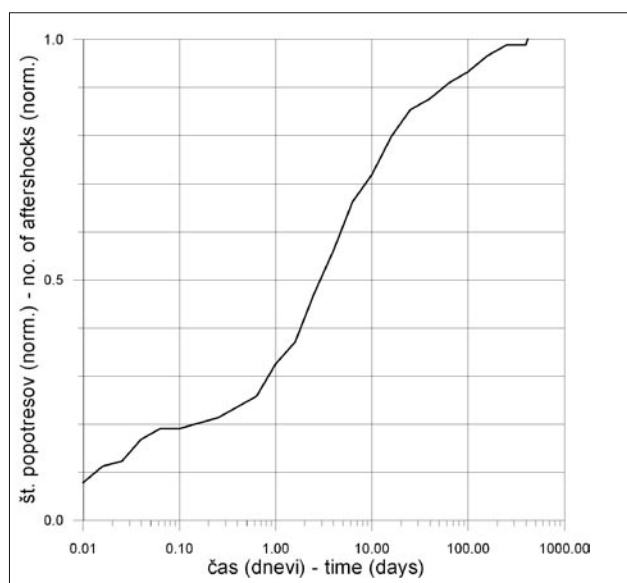


Sl. 4. Kumulativna frekvenca popotresov ( $M_L \geq 2,0$ ) normirana na celotno število popotresov za potres 12. aprila 1998

Fig. 4. Cumulative frequency of aftershocks ( $M_L \geq 2,0$ ) normalized with the total number of aftershocks for the 12 April 1998 earthquake

Analiza odnosa med magnitudo in pogostostjo popotresov je pokazala, da sta časovna niza popolna za lokalno magnitudo večjo ali enako 2,0, ki smo jo vzeli za spodnjo mejo. Obdobje, ki smo ga obravnavali, je trajalo okoli 400 dni (396 za potres 1998 in 415 za potres 2004). V tem času so se po potresu 1998 zgodili 104 popotresi, po potresu 2004 pa 89 popotresov z  $M \geq 2,0$ .

Pri analizi popotresnega niza 1998 se je pokazalo, da je najmočnejši popotres, ki se je zgodil 6. maja 1998 (23 dni po glavnem potresu) povzročil svoj lasten popotresni niz, kar se odraža kot izrazito koleno v obeh diagramih na slikah 3 in 4.



Sl. 6. Kumulativna frekvenca popotresov ( $M_L \geq 2,0$ ) normirana na celotno število popotresov za potres 12. julija 2004

Fig. 6. Cumulative frequency of aftershocks ( $M_L \geq 2,0$ ) normalized with the total number of aftershocks for the 12 July 2004 earthquake

Preglednica 1. Parametri dopolnjenega Omorijevega zakona za oba popotresna niza. Pri potresu leta 1998 so podani tudi podatki za sekundarni popotresni niz, ki se je začel ob najmočnejšem popotresu 6. maja 1998.

Table 1. Parameters of modified Omori law for both aftershock sequences. For the 1998 earthquake the parameters of secondary aftershock sequence, starting with the strongest aftershock on 6 May 1998, are also given.

| Popotresni niz<br>Aftershock sequence | Časovni<br>razpon<br>Time span | Trajanje (dni)<br>Duration (days) | Št. popotresov z $M \geq 2,0$<br>No. of after-shocks with $M \geq 2.0$ | $K$   | $c$   | $p$   |
|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| 1998 -<br>primarni /primary           | 12.4.1998-<br>13.5.1999        | 396                               | 104                                                                    | 9,164 | 0,040 | 1,024 |
| 1998 - sekundarni/<br>secondary       |                                |                                   |                                                                        | 2,181 | 5,248 | 0,770 |
| 2004                                  | 12.7.2004-<br>31.8.2005        | 415                               | 89                                                                     | 8,767 | 0,014 | 1,019 |

Zato smo uporabili enačbo dopolnjenega Omori-jevega zakona, ki vključuje tudi sekundarni popotresni niz. Na sl. 3 se vidi izrazita sprememba strmine krivulje pojemanja, ki jo odraža parameter  $p$ . Ta znaša za primarni niz 1,024, za sekundarni niz pa 0,770 (preglednica 1), kar pomeni, da se je pojemanje v sekundarnem nizu upočasnilo.

Pri popotresnem nizu 2004 so v krivulji pojemanja le manjše spremembe, ki jih ne moremo pripisati sekundarnemu popotresnemu nizu. Najmočnejši popotres, ki se je zgodil 14. julija 2004 (2 dneva po glavnem potresu) po svoji moči ( $M_L=3,6$ ) ne odstopa toliko kot tisti leta 1998, zaradi česar ni povzročil sekundarnega niza. Obe krivulji na slikah 5 in 6 sicer kažeta zmanjšanje števila popotresov med 0,1 dneva in 1,0 dnevom po glavnem potresu, kasneje pa je pojemanje dokaj enakomerno.

Parametri dopolnjenega Omorijevega zakona primarnega niza 1998 in popotresnega niza 2004 (preglednica 1 in sl. 7) so zelo podobni. Obe vrednosti  $p$  kot najpomembnejšega parametra se razlikujeta le za 0,005, kar se ujema s tem, da sta oba potresa nastala v isti prelomni coni in so torej petrofizikalni pogoji podobni. Razdalja med obema nadžariščema je bila namreč le okoli 1,5 km, žariščna globina prvega potresa 7,6 km (ZUPANČIČ et al., 2001), drugega pa 7,0 km (CEČIČ et al., 2006).

Preglednica 2. Odstotek popotresov glede na vse popotrese ( $M \geq 2,0$ ) za nekaj časovnih intervalov po glavnem potresu.

Table 2. Percentage of aftershocks related to the total number of aftershocks ( $M \geq 2,0$ ) for selected time intervals after the main shock

| Popotresni niz<br>Aftershock<br>sequence | 1 h | 6 h | 1 dan/day | 10 dni/days | 100 dni/days |
|------------------------------------------|-----|-----|-----------|-------------|--------------|
| 1998                                     | 8   | 18  | 30        | 56          | 86           |
| 2004                                     | 17  | 21  | 33        | 72          | 93           |

Preglednica 2 podaja odstotne vrednosti števila popotresov glede na vse popotrese v izbranih časovnih intervalih po glavnem potresu, ki izhajajo iz kumulativnih diagramov na slikah 4 in 6. Razen v prvi uri, se podatki obeh popotresnih nizov dobro ujemajo. V prvih šestih urah se je tako zgodilo okoli 20 %, v prvih 10 dneh pa med 56 % in 72 % vseh potresov.

### Odnos med magnitudo in pogostostjo popotresov

Seizmološka opazovanja v daljšem obdobju so pokazala, da je na nekem seizmično aktivnem območju, znotraj poljubno izbranega časovnega intervala število šibkejših potresov nekajkrat večje od števila močnejših potresov. Ta pojav sta empirično opisala že GUTENBERG IN RICHTER (1944) v logaritmični obliki, ki je znana kot Gutenberg-Richterjev odnos:

$$\log N = a - bM$$

kjer so

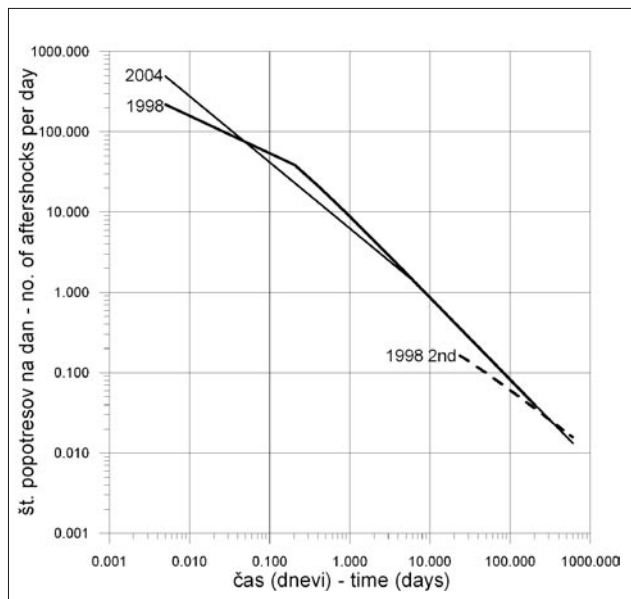
$N$  - število popotresov z magnitudo med  $M$  in  $M + dM$ ,

$M$  - magnituda,

$a, b$  - parametra Gutenberg-Richterjevega odnosa.

Gutenberg-Richterjev odnos velja za večino potresnih območij in se zato veliko uporablja pri ocenjevanju potresne nevarnosti. Pokazalo se je, da velja ta zakon tudi za popotresne nize in sicer ne glede na magnitudo glavnega potresa. Čeprav ne poznamo natančno mehanizmov kako se elastična energija nakopičena na nekem območju sprošča ob potresih, se je pokazalo, da je porazdelitev njihovih magnitud skladna s tem odnosom. Dokazali so tudi, da velja celo pri nastanku mikrorazpok v vzorcih kamnin pri laboratorijskih poskusih.

Parameter  $b$  je povezan s tektonskimi značilnostmi in fizikalnimi lastnostmi kamnin Zemljine skorje v katerih je določen potres nastal in ima po UTSU (2002) vrednost med 0,6 in 1,1, oziroma po UTSU (1962) okoli 0,9. Je zelo pomemben parameter za opisovanje in analizo seizmičnosti.



Sl. 7. Krivulji dopolnjenega Omorijevega zakona za oba popotresna niza. Parametri so podani v preglednici 1.

Fig. 7. Modified Omori's law functions for both aftershock sequences. Parameters are shown in Table 1.

Parameter  $a$  je manj pomemben, ker je odvisen predvsem od števila dogodkov v vzorcu ter od najmanjše magnitude.

Parameter  $b$  opredeljujemo na različne načine:

- Podatke nanese na semilogaritemski diagram, ki podaja odvisnost  $\log N$  od  $M$ . Parameter  $b$  podaja strmina premice, ki se najbolj prilega opazovanim podatkom in ga določimo običajno z metodo najmanjših kvadratov (*ang.* least squares). S to metodo določimo tudi vrednost parametra  $a$ .

- Po metodi največje zanesljivosti (*ang.* maximum likelihood estimate) podaja vrednost  $b$  enačba (AKI, 1965)

$$b = 0,4343/(M_a - M^*)$$

kjer je

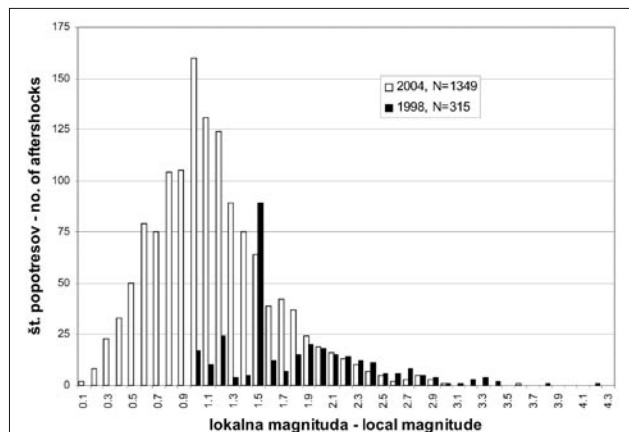
$M_a$  - povprečna magnituda popotresov v nizu,

$M^*$  - najmanjša upoštevana magnituda zmanjšana za 0,05.

- WEICHERT (1980) je metodo največje zanesljivosti dopolnil za primere spremenljivega časa opazovanja za različne magnitudne razrede.

Pri analizi obeh popotresnih nizov smo uporabili metodo najmanjših kvadratov, ki omogoča določitev parametrov Gutenberg-Richterjevega odnosa  $a$  in  $b$  ter metodo največje zanesljivosti, ki omogoča določitev le parametra  $b$ , vendar ji številni dajejo prednost (UTSU, 2002). Rezultati so zbrani v preglednici 3.

Na sl. 8 je histogram števila popotresov v odvisnosti od lokalne magnitude za oba popotresna niza. Za potres 1998 je upoštevano obdobje dolgo 565 dni (okoli 1,5 leta), v katerem je bilo zaznanih 315 popotresov z magnitudo večjo ali enako 1,0. Šibkejših popotresov, ki so jih sicer za-



Sl. 8. Pogostost popotresov v odvisnosti od lokalne magnitude za oba popotresna niza

Fig. 8. Frequency of aftershocks related to local magnitude for both aftershock sequences

znale kasneje postavljene začasne potresne opazovalnice, tu nismo upoštevali, ker je bila prva postavljena šele 9 ur po glavnem potresu, ko se je zgodilo že okoli 25 % popotresov (preglednica 2). Za potres 2004 je upoštevano obdobje dolgo 415 dni, v katerem je bilo zaznanih 1349 popotresov z magnitudo večjo ali enako 0,1. Registracijo tako šibkih potresov so omogočile potresne opazovalnice, ki so bile postavljene zelo blizu nadžariščnega območja.

Za popotresni niz 1998 smo kot spodnjo mejo vzeli magnitudo 1,5, čeprav je potresov v območju magnitud 1,6-1,8 nenavadno malo (sl. 9), kar vnaša nekaj dvoma v to ali so podatki nad to mejo res popolni. Število popotresov nad spodnjo mejo je bilo 255. Temu lahko pripišemo nekoliko večjo razliko v določitvi parametra  $b$  po obeh metodah, ki je dala po metodi najmanjših kvadratov 0,77, po metodi največje zanesljivosti pa 0,83 (preglednica 3).

Za popotresni niz 2004 smo kot spodnjo mejo vzeli magnitudo 1,0, ki se kot meja popolnosti podatkov jasno odraža v histogramu (sl. 10). Nad spodnjo mejo je bilo 870 popotresov, katerih število z naraščajočo magnitudo enakomerno upada. Ujemanje določitve parametra  $b$  po obeh metodah je zelo dobro, saj se razlikujeta le za 0,01 (preglednica 3).

Primerjava podatkov kaže, da je imel niz po potresu 1998 več relativno močnejših popotresov (parameter  $b$  je manjši) od potresa 2004. To si lahko razložimo s tem, da je prvi potres (1998), ki je bil veliko močnejši, povzročil večje spremembe v napetosti v širši prelomni coni, ki so se sprostile kot naknadni pretrgi ali zdrsi. Drugi potres (2004), ki je bil šibkejši, zato ni mogel povzročiti več tako velikih sprememb v žariščnem območju. Zaradi nepravilne porazdelitve števila popotresov v magnitudnem območju 1,5-1,9 pa je sicer določitev parametra  $b$  pri potresu 1998 manj zanesljiva. Parametra  $a$  za oba popotresna niza se razlikujeta zelo malo.

Preglednica 3. Parametri Gutenberg-Richterjevega odnosa za oba popotresna niza

Table 3. Parameters of Gutenberg-Richter relation for both aftershock sequence

| popotresni niz<br>aftershock<br>sequence | št. vseh<br>popotresov<br>no. of all<br>aftershocks | spodnja meja M<br>lower bound M | št. popotresov nad<br>spodnjo mejo M<br>no. of aftershocks<br>above lower bound M | <i>a</i><br>(least<br>squares) | <i>b</i><br>(least<br>squares) | <i>b</i><br>(maximum<br>likelihood) |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1998                                     | 315                                                 | 1,5                             | 255                                                                               | 3,33                           | 0,77                           | 0,83                                |
| 2004                                     | 1349                                                | 1,0                             | 870                                                                               | 3,20                           | 0,97                           | 0,98                                |

### Zaključki

Analize popotresnih nizov potresov 1998 in 2004 v Krnskem pogorju so pokazale, da časovna porazdelitev popotresov in odnos med magnitudo in njihovo pogostostjo sledijo znanim statističnim zakonom v seizmologiji. Rezultate smo primerjali z objavljenimi vrednostmi v literaturi.

Najmočnejša popotresa sta imela magnitudo nižjo za 1,4 in 1,3 od obeh glavnih potresov, kar je le malo več kot povprečna vrednost 1,2, ki jo po BATHU navaja RICHTER (1958).

RANALLI (1969) je analiziral 15 popotresnih nizov močnejših potresov v Severni Ameriki. Najpomembnejši parametri dopolnjenega Omori-jevega zakona in Gutenberg-Richterjevega odnosa, ki jih je ugotovil, so bili:

- *p* - razpon 0,518 – 1,882, povprečje 1,091,
- *c* - razpon 0,016 – 0,133, povprečje 0,061,
- *b* - razpon 0,557 – 1,357, povprečje 0,866.

Vrednosti ugotovljene pri naši analizi obeh popotresnih nizov v Krnskem pogorju so bile:

- *p* - razpon 1,019 – 1,024,
- *c* - razpon 0,014 – 0,040,
- *b* - razpon 0,77 – 0,98

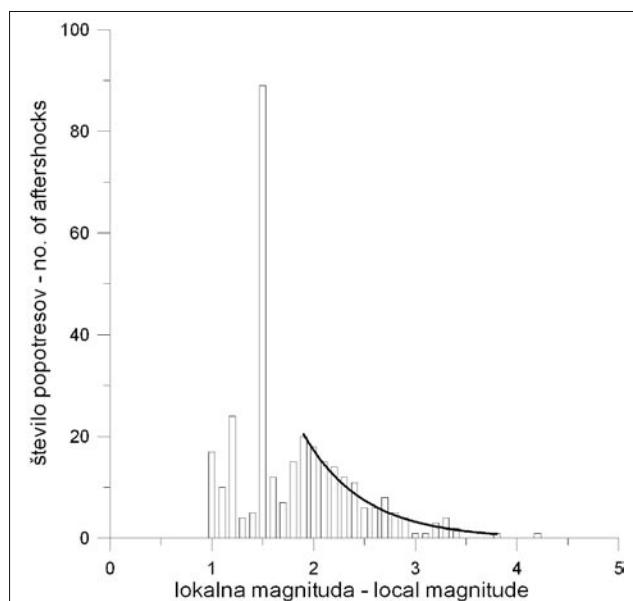
in se torej dobro ujemajo z vrednostmi, ki jih je ugotovil RANALLI (1969).

V Sloveniji so bili do sedaj primerljivi podatki zbrani le za popotresni niz potresa 3. oktobra 1996 pri Žalcu z lokalno magnitudo 3,5 (GOSAR et al., 1998). Kljub temu, da je bil to relativno šibek glavni potres, je imel obsežen popotresni niz katerega analiza je dala naslednje vrednosti:

- *p* - razpon 1,03 – 1,23,
- *c* - razpon 0,79 – 1,25,
- *b* - razpon 0,857 – 1,041.

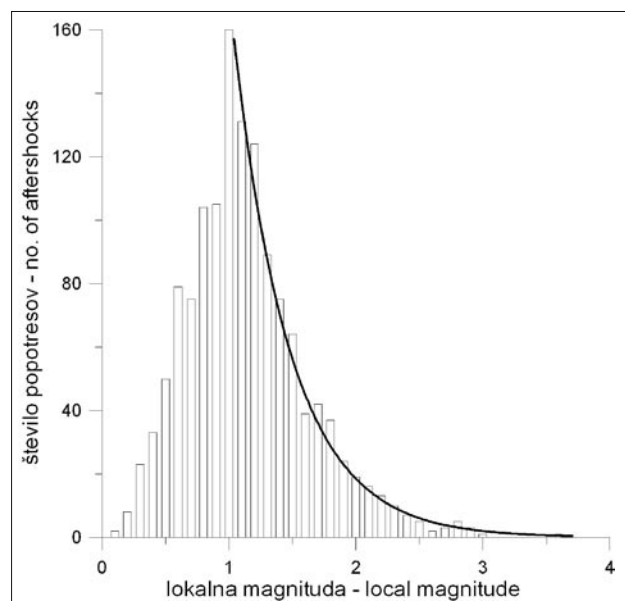
Tudi te vrednosti razen parametra *c*, ki pa je odvisen od spodnje meje magnitude (*U<sub>TSU</sub>*, 2002), so primerljive s podatki popotresnih nizov v Krnskem pogorju.

Če primerjamo popotresna niza 1998 in 2004 med seboj lahko ugotovimo, da sta po časovni porazdelitvi popotresov zelo podobna, z izjemo sekundarnega popotresnega niza leta 1998, ki ga pri potresu 2004 ni bilo. Pri odnosu med magnitudo in pogostostjo popotresov, pa je vrednost parametra *b* za potres leta 1998 nižja (0,77-0,83) kot za potres 2004 (0,97-0,98), kar je odraz tega, da je imel prvi potres več močnejših popotresov kot drugi.



Sl. 9. Pogostost popotresov potresa 12. aprila 1998 z Gutenberg-Richterjevo krivuljo

Fig. 9. Magnitude-frequency relation for 12 April 1998 aftershocks with Gutenberg-Richters's function



Sl. 10. Pogostost popotresov potresa 12. julija 2004 z Gutenberg-Richterjevo krivuljo

Fig. 10. Magnitude-frequency relation for 12 July 2004 aftershocks with Gutenberg-Richters's function

### Zahvala

Za pomoč pri zbiranju podatkov o popotresnih nizih se zahvaljujem sodelavcem na Uradu za seizmologijo in geologijo Agencije RS za okolje.

### Literatura

AKI, K. 1965: Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log N = a - bM$  and its confidence limits. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 43: 237-238.

BAJC, J., AOUDIA A., SARAO, A. & SUHADOLC, P. 2001: The Bovec - Krn mountain (Slovenia) earthquake sequence. *Geophysical Research Letters*, 28/9:1839-1842.

CECIĆ, I., ŽIVČIĆ, M., JESENKO, T. & KOLAR, J. 2006: Potresi v Sloveniji leta 2004. Potresi v letu 2004: 16-40.

GOSAR, A., CECIĆ, I., DOLENC, D. & ŽIVČIĆ, M. 1998: Analiza popotresnega niza potresa 3. oktobra 1996 pri Žalcu. *Ujma*, 12: 37-42.

GUTENBERG, B. & RICHTER, C. F. 1944: Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 34: 185-188.

KASTELIC, V., ŽIVČIĆ, M., PAHOR, J. & GOSAR, A. 2006: Seizmotektonske značilnosti potresa leta 2004 v Krnskem pogorju. Potresi v letu 2004: 78-87.

OGATA, Y. 1983: Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure. *J. Phys. Earth*, 31: 115-124.

PAHOR, J., KOLAR, J., ŽIVČIĆ, M. & CECIĆ, I. 2006: Potres 12. julija 2004 v Krnskem pogorju (zgornje Posočje) in opazovanje popotresne aktivnosti. Potresi v letu 2004: 88-94.

RANALLI, G. 1969: A statistical study of aftershock sequences. *Ann. Geofis.*, 22, 359-397.

RICHTER, C. F. 1958: *Elementary seismology*. Freeman and Co., 768 pp.

STEIN, S. & WYSESSION, M. 2003: *An introduction to seismology, earthquakes, and Earth structure*. Blackwell, 498 pp.

UDIAS, A. 1999: *Principles of seismology*. Cambridge University Press, 475 pp.

UTSU, T. 1962: On the nature of three Alaskan aftershock sequences of 1957 and 1958. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 52/2: 279-297.

UTSU, T., OGATA, Y. & MATSU'URA, R. S. 1995: The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *J. Phys. Earth*, 43:1-33.

UTSU, T. & OGATA, Y. 1997: Statistical analysis of seismicity. In: Healey, J.H., Keilis-Borok, V.I. & Lee W.H.K. (eds.). *Algorithms for earthquake statistics and prediction*. IASPEI software library, 6: 13-94.

UTSU, T. 2002: Statistical features of seismicity. In: Lee, W. et al. (eds.): *International handbook of earthquake and engineering seismology*. Academic Press, 719-732.

WEICHERT, S. H. 1980: Estimation of the earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 70/4: 1337-1346.

VIDRIH, R., RIBIČIČ, M. 1998: Porušitve naravnega ravnotežja v hribinah ob potresu v Posočju 12. aprila 1998 in Evropska makroseizmična lestvica (EMS-98). *Geologija (Ljubljana)* 41: 365-410.

VIDRIH, R., RIBIČIČ, M. 2004: Potres 12. julija v zgornjem Posočju – preliminarne geološke in seizmološke značilnosti. *Geologija (Ljubljana)* 47/2: 199-220.

VIDRIH, R. 2006: Geološki vidiki potresa 12. aprila 1998 v zgornjem Posočju. *Doktorska disertacija*, NTF, 432 str.

ZUPANČIČ, P., CECIĆ, I., GOSAR, A., PLACER, L., POLJAK, M. & ŽIVČIĆ, M. 2001: The earthquake of 12 April 1998 in the Krn Mountains (Upper Soča valley, Slovenia) and its seismotectonic characteristics. *Geologija (Ljubljana)* 44/1: 169-192.

ŽIVČIĆ, M. & KRN-2004 TEAM, 2006: The Krn mountains (Slovenia) Mw 5.2 earthquake: data acquisition and preliminary results. *Geophysical Research Abstracts*, 8, 06439.