

LASTNOSTI SEIZMOLOŠKE OPREME DRŽAVNE MREŽE POTRESNIH OPAZOVALNIC

Characteristics of seismic equipment in the Seismic Network of Slovenia

Izidor Tasič* UDK 550.34.044

Povzetek Abstract

Amplitude nihanj tal zaradi potresa so odvisne od njegove velikosti in oddaljenosti žarišča od točke opazovanja. Merimo in beležimo jo s seizmološko opremo, postavljeno na potresnih opazovalnicah. Modernizacija državne mreže potresnih opazovalnic se je začela v letu 2000. Na začetku so bile potresne opazovalnice opremljene z zajemalnimi enotami Quanterra Q730 in s seizmometri CMG 40T, pozneje pa smo nekatere opazovalnice nadgradili s seizmometri CMG 3ESPC ali STS-2. V članku predstavljamo bistvene lastnosti seizmološke opreme državne mreže potresnih opazovalnic.

Ground movements resulting from earthquakes depend on the earthquake's magnitude and the distance from the hypocenter to the point of observation; they are measured using a seismograph. The project "Modernization of the Seismic Network of Slovenia" started in 2000. Seismic stations were equipped with Quanterra Q730 data loggers and Guralp CMG-40T seismometers. Recently some of seismic stations were upgraded with broadband seismometer Guralp CMG-3ESPC or STS-2. In this study we present the most important characteristics of the seismic equipment installed in the Seismic Network of Slovenia.

Uvod

Temeljni namen državne mreže potresnih opazovalnic je pridobivanje podatkov o potresih in obveščanje pristojnih služb in javnosti o glavnih značilnostih potresa (predvsem o lokaciji nadžarišča ter velikosti in obsegu potresa) v čim krajšem času po potresu. Naloga državne mreže potresnih opazovalnic je tudi čim natančnejše opredeljevanje osnovnih potresnih veličin na podlagi globinskega geofizikalnega modela ozemlja Slovenije, ki ga je mogoče izdelati na podlagi instrumentalnih zapisov potresov na potresnih opazovalnicah. Zato je treba poleg instrumentalnega beleženja močnejših potresov zaznati in locirati tudi zelo šibke potrese, ki sicer ne povzročajo škode, vendar veliko povedo o potresnih značilnostih prelomov na opazovanem ozemlju. Pri natančnem opazovanju šibkih potresov imajo število, porazdelitev potresnih opazovalnic in lastnosti seizmološke opreme ključno vlogo, pri čemer vplivajo na občutljivost mreže potresnih opazovalnic lokalni seizmični šum, geološki pogoji na kraju opazovanja in oddaljenost žarišča potresov od potresne opazovalnice. Ko so kraji opazovalnic izbrani in so potresne opazovalnice zgrajene, lahko izboljšujemo kakovost zajemanja seizmičnih podatkov samo še z izboljševanjem lastnosti seizmološke opreme.

Seizmološki instrumenti so v zadnjih tridesetih letih doživeli skokovit razvoj. To se kaže predvsem v povečanem dinamičnem območju, natančnejši obdelavi podatkov, večji možnosti hranjenja podatkov in hitrejšem načinu prenosa podatkov do središča za zajemanje, obdelavo in hranjenje podatkov. To velja tudi za seizmološke instrumente na seizmoloških opazovalnicah v Sloveniji. V osemdesetih letih prejšnjega stoletja so na potresnih opazovalnicah v Sloveniji delovali v glavnem analogni seizmografi. Sestavljali so jih ozkopasovni seismometer, ojačevalnik signala in analogno pisalo, ki je neprekinjeno zapisovalo nihanje tal s črnilom na papir. Pomanjkljivosti teh seizmografov so bili majhno dinamično območje (40–45 dB), slaba resolucija in dokaj ozek frekvenčni pas delovanja. Šibkih potresov zaradi slabe resolucije, ki je bila posledica debeline črte pisala, ni bilo mogoče natančno analizirati. Močnejši potresi so povzročili, da je pisalo zapisovalo nihanje tal z največjimi možnimi amplitudami. Vendar zapis ni prikazoval nihanj tal, ker je pisalo udarjalo ob rob ohišja, zapis potresa je bil manj uporaben. Poleg tega podatkov, ki so »narisani« na papir, ni bilo mogoče neposredno računalniško obdelati. Papir, na katerem je bilo zabeleženo nihanje tal, je osebe opazovalnice po pošti pošiljalo v središče za obdelavo tudi z nekajdnevno zamudo.

* mag., Ministrstvo za okolje in prostor RS, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana, izidor.tasic@gov.si

Danes so potresne opazovalnice opremljene s sodobno seizmološko opremo, kakor so širokopasovni seizmometri in digitalne enote za beleženje podatkov. Širokopa-

Proizvajalec	Tip	Frek. območje	Občutljivost	Največja amplituda zapisa
Guralp	CMG-40T	0,033-50Hz	800 V/(m/s)	~ 2,3 cm/s
Guralp	CMG-40TBH	0,033-50Hz	1600 V/(m/s)	~ 1,1 cm/s
Guralp	CMG-3ESPC	0,0083-50Hz	2000 V/(m/s)	~ 0,9 cm/s
Streckeisen	STS-2	0,0083-50Hz	1500 V/(m/s)	~ 1,3 cm/s
Kinematics	EpiSensor	DC-180Hz	10 V/g	~ 2g (g=9,8 m/s ²)

Preglednica 1. Značilne lastnosti seizmometrov in akcelerometrov državne mreže potresnih opazovalnic

Table 1. Seismometers used in the Seismic Network of Slovenia.

sovni seizmometri delujejo po načelu ravnovesja sil, ko se premik uteži izravna s povratno električno generirano silo. Zato ostaja utež v ravnovesni legi, tok, ki je potreben za ustvarjanje ravnovesja, pa da informacijo o nihanju tal. Takšni seizmometri imajo večji frekvenčni razpon, manjši lastni šum in veliko dinamično območje, ki je okoli 140 dB (Guralp, 2009, Streckeisen, 1995). Še večjo natančnost v obdelavi seizmoloških podatkov je prinesla vpeljava digitalnih sistemov za beleženje, ki analogni signal iz seizmometra pretvorijo v digitalno obliko. Hkrati te zajemalne enote digitalni signal opremijo s točno uro in omogočijo takojšen prenos preko sodobnih komunikacijskih poti v središče za obdelavo podatkov (Sinčič in Tasič, 2008).

Seizmološka oprema državne mreže potresnih opazovalnic

Na potresnih opazovalnicah uporabljamo tri različne tipe seizmometrov (preglednica 1, slika 1). Na začetku so bile vse potresne opazovalnice opremljene s širokopasovnimi seizmometri CMG-40T proizvajalca GurAlp iz Velike Britanije. Štirje od teh so bili prirejeni postavitvi v vrtino in imajo dodatno oznako BH (ang. *BoreHole*), drugi so prirejeni postavitvi v jaške. Razlikujejo se samo v obliki ohišja. CMG 40T je trikomponentni širokofrekvenčni seizmometer, ki omogoča meritve hitrosti nihanja tal na frekvenčnem območjem med 0,03 Hz in 50Hz (30 sekundami) in dinamičnim območjem nad 145 dB. Pozneje se je izkazalo, da je na več potresnih opazovalnicah lastni šum seizmometrov večji od seizmičnega nemira na lokaciji (Čarman in Živčič, 2007) in so se informacije o zelo šibkih potresih izgubljale. Zato smo na nekaterih opazovalnicah spremenili njihove značilnosti. Opremil smo jih s seizmometri STS-2 ali seizmometri CMG 3ESPC. Tudi ta dva tipa seizmometrov omogočata meritve hitrosti nihanja tal, vendar je njuno frekvenčno območje delovanja določeno na območju od 0,0083 Hz do 50 Hz, predvsem pa sta »tišja«, lastni šum teh seizmometrov je nižji kakor lastni šum seizmometrov CMG 40T (slika 2).

Poleg seizmometrov so na petih potresnih opazovalnicah postavljeni še akcelerometri ali pospeškometri tipa EpiSensor podjetja Kinematics. To so instrumenti, ki omogočajo meritve pospeška nihanja tal. So manj občutljivi kakor seizmometri, vendar beležijo nihanje tal pri močnih potresih tudi do vršnega pospeška 2 g ('g' je

Proizvajalec	Tip	Št. kanalov	Vzorcev/s	V/št.
Quanterra	Q730	3	200, 20, 1	20/2 ²³
Quanterra	Q730	3+3	200, 20, 1+200	20/2 ²³

Preglednica 2. Zajemalne enote državne mreže potresnih opazovalnic

Table 2. Acquisition units used in the Seismic Network of Slovenia.

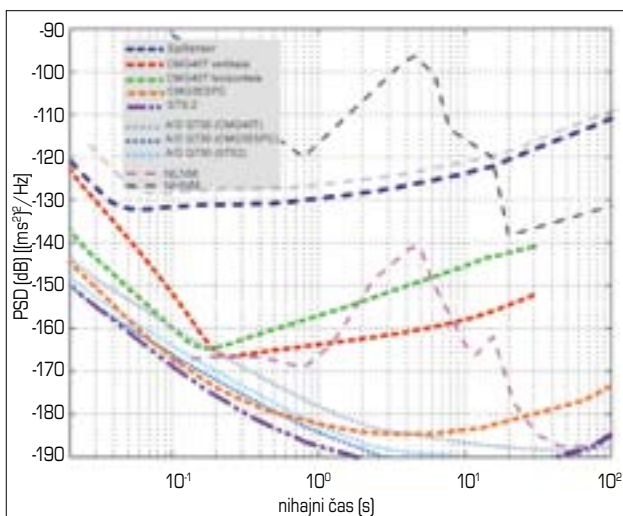


Slika 1. Seizmometri na potresnih opazovalnicah državne mreže potresnih opazovalnic

Figure 1. Seismometers installed in the Seismic Network of Slovenia seismic stations.

težni pospešek Zemlje), ne da bi bili prekrmljeni. S tem dosežemo skupno dinamično območje seizmometra in akcelerometra 200 dB (Clinton, 2004).

Slovenska mreža potresnih opazovalnic je opremljena z zajemalnimi enotami Quanterra Q730. Osrednji del zajemalne enote je 32-bitna procesna enota Motorola 68030. Ker vsak seizmometer sestavljajo trije zelo majhni senzori, ki omogočajo meritve nihanja tal v treh med seboj pravokotnih smereh, vsebuje vsaka zajemalna enota tri 24-bitne analogne digitalne pretvornike (A/D), ki beležijo tri vhodne napetosti iz seizmometra. Na petih potresnih opazovalnicah imajo zajemalne enote šest neodvisnih pretvornikov A/D, ker imamo na teh opazovalnicah poleg seizmometrov postavljene tudi akcelerometre. Sodobni pretvorniki A/D v seizmologiji uporabljajo pri pretvorbi signala »sigma-delta modulacijo« (Bormann in ostali, 2002). Osnovna frekvenca vzorčenja pri Quanterri Q730 je 20 kHz; nižje frekvence vzorčenja dobimo z digitalno obdelavo signala (Scherbaum 2001).



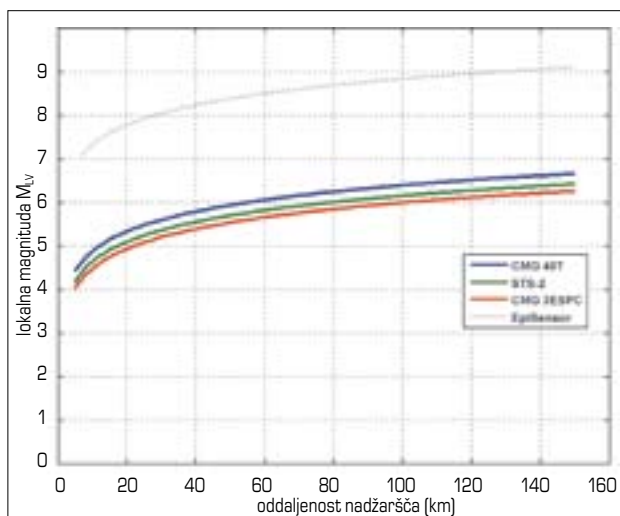
Slika 2. Instrumentalni šum za instrumente na naših potresnih opazovalnicah. Instrumentalni šum zajemalne enote je prilagojen tipu seizmometra. Primerjalno sta prikazana še modela seizmičnih šumov NLNM in NHNM (Peterson, 1993) in predstavljata mejne vrednosti teh šumov na potresnih opazovalnicah

Figure 2. Instrument noise of seismic equipment installed in the Seismic Network of Slovenia seismic stations. The instrument noise of the acquisition unit is presented relative to the attached seismometer. In addition, the New High and New Low Noise Models are presented (Peterson, 1993).

Končne frekvence vzorčenja so tri, 200, 20 in 1 vzorec na sekundo. Vzorčenje 200 vzorcev na sekundo je namenjeno opazovanju bližnjih potresov, vzorčenje 20 in 1 pa oddaljenim potresom. Za točen čas skrbi enota GPS, dogodki so označeni s časom po UTC pod eno milisekundo natančno. Q730 ima vgrajeno še komunikacijsko kartico in pošilja podatke v stvarnem času preko državnega računalniškega omrežja v središče za obdelavo podatkov, kjer poteka samodejna analiza seizmoloških podatkov in samodejna ocena potresnih veličin v skoraj stvarnem času. Hkrati se seizmološki podatki shranjujejo v podatkovne krožne pomnilnike za poznejšo natančnejšo analizo, ki jo opravijo seizmologi.

Instrumentalni šum, dinamično območje in frekvenčni razpon

Dinamično območje je opredeljeno kot razmerje med največjim še pravilno zabeleženim signalom in najmanjšim signalom, ki ga lahko instrument zabeleži, kar običajno predstavlja instrumentalni šum. Praviloma je dinamično območje podano v decibelih (okrajšava je dB) in je enota brez dimenzije. Dinamično območje podajamo v logaritmičnem merilu, zato je z njim mogoče obseči zelo velik razpon razmerij z relativno majhnimi števili. Kadar se nanaša na meritve amplitude, je dinamično območje

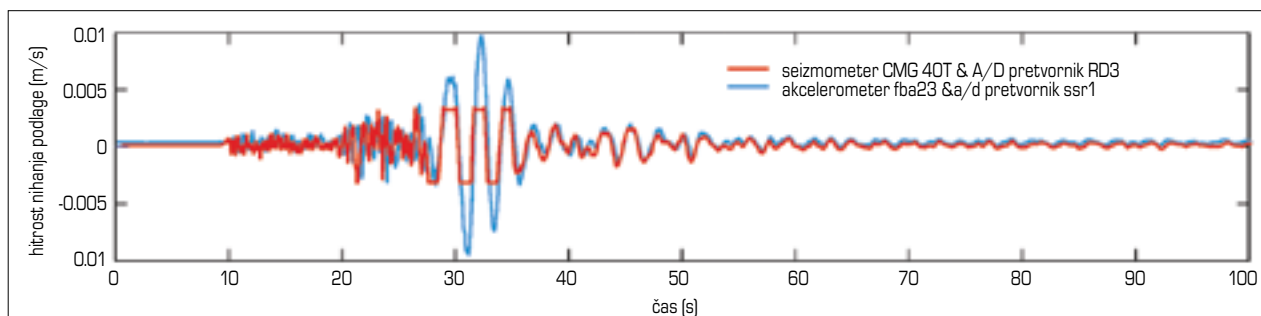


Slika 3. Teoretično največja možna lokalna magnituda, ki je lahko zabeležena na posameznem instrumentu, preden pride do prekrmljenosti navpične komponente nihanja tal, v odvisnosti od oddaljenosti nadžarišča od lokacije instrumenta. Graf akcelerometra je približna ocena

Figure 3. Theoretical maximum possible magnitude - epicentral distance plot, for which the vertical component of the seismic record will not be clipped. The highest possible magnitude for the accelerometer is roughly estimated.

opredeljeno kot $D_{dB} = 20 \log_{10} (A_{max}/A_{min})$, pri čemer predstavlja A_{max} in A_{min} največjo in najmanjšo zabeleženo amplitudo (Scherbaum 2001). Pri seizmometrih je izhod iz seizmometra napetost in se zato meri v voltih. Dinamično območje seizmometra je omejeno z največjo možno zabeleženo amplitudo glede na instrumentalni šum. Zaradi zgradbe seizmometra je instrumentalni šum funkcija frekvence (slika 2). Torej bi morali tudi proizvajalci podati dinamično območje kot funkcijo frekvence, vendar se v literaturi pogostokrat navaja stalna vrednost, ki običajno predstavlja povprečje, ki je okoli 140 dB, in je odvisno od seizmometra.

Zajemalne enote sestavljajo pretvorniki A/D, kjer na izhodu dobimo digitalizirano vrednost ali število, saj je analogno-digitalna pretvorba postopek, s katerim analogno električno napetost pretvorimo v ustrezno (digitalno ali diskretno) številko. Digitalna vrednost je število, ki ustreza izmerjeni napetosti. Sodobni pretvorniki omogočajo 24-bitno pretvorbo. Tudi pri pretvornikih je dinamično območje funkcija frekvence in tudi tukaj proizvajalci uporabljajo poenostavitve. Dinamično območje sodobnih pretvornikov je med 136 in 146 dB. Pri uporabi pretvornikov A/D je zelo pomembno, da je pretvornik prilagojen na seizmometer, kar pomeni, da sta instrumenta usklajena pri merjenjih največjih in najmanjših signalov. Vendar zaradi različnih virov instrumentalnih šumov pri šibkih signalih tega ni mogoče popolnoma doseči. Na sliki (slika 2) je prikazan instrumentalni šum za seizmološke instrumente, ki jih uporabljamo v državni mreži potresnih opazovalnic. Instrumentalni šum določa spodnjo mejo zaznavanja potresnega nihanja tal. Instrumentalni šum pretvornika

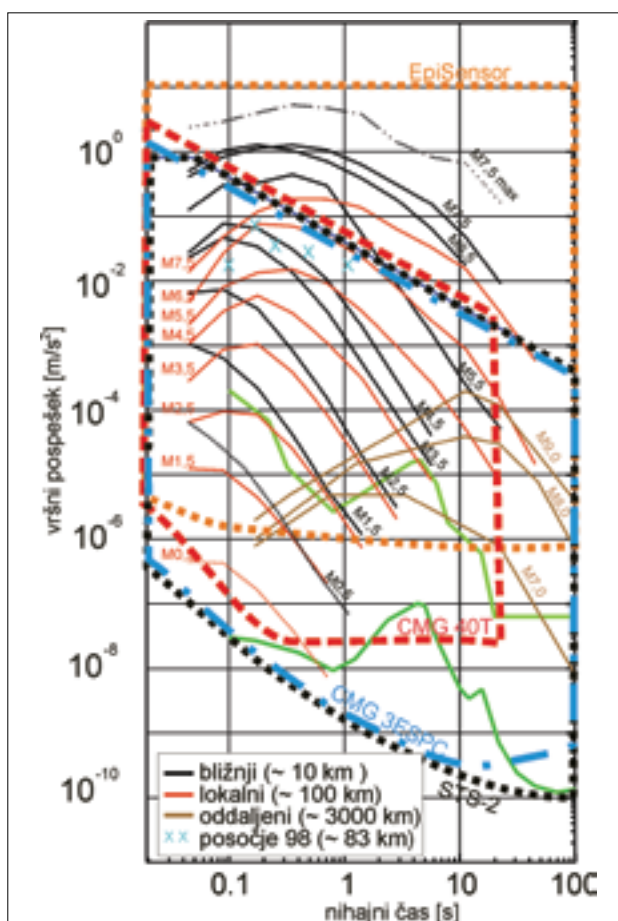


Slika 4. Zapis močnega nihanja tal na potresni opazovalnici LJU na seizmografu in akcelero grafu ob potresu 12. aprila 1998. Močno nihanje tal zaradi prekrmiljenosti seizmografa, ki sta ga sestavljala enota A/D RD3 in seizmometer CMG 40T, ni bilo pravilno zabeleženo

Figure 4. Strong ground motion recorded on seismograph and accelerograph in the LJU seismic station on April 12, 1998 caused by an earthquake with its epicenter in the Soča valley region. Registration by the seismic system consisting of acquisition unit RD3 and seismometer CMG40T was clipped.

A/D je prirejen tipu seizmometra. Največje amplitude nihanja tal, ki jih lahko zabeležijo posamezni seizmometri, so odvisne od njihove zgradbe. Ker v Sloveniji izračunavamo magnitudo potresa iz zapisa navpične komponente nihanja tal (Cecić in ostali, 2001), ta komponenta za določitev potresnih veličin ne sme biti prekrmiljena. Slika 3 kaže, kolikšna je lahko teoretično največja možna zabeležena magnituda v odvisnosti od oddaljenosti nadžarišča od potresne opazovalnice, preden pride do prekrmiljenosti navpične komponente na posameznem instrumentu. Graf, ki prikazuje največjo možno magnitudo potresa na akcelero metru, je groba ocena, ki temelji na predpostavki, da je nihajni čas največje amplitude v zapisu potresa stalen ne glede na oddaljenost potresa. To seveda ne drži, saj je zapis potresa izredno celovit in je odvisen tudi od lege ali položaja potresne opazovalnice glede na žariščni mehanizem. Vendar za približno oceno zadošča prikazani graf.

Ocenjujemo, da je na Zemlji razmerje nihanja tal med najmočnejšim potresom in seizmičnim šumom na tihi lokaciji približno 10^{10} (Clinton, 2004), kar ustreza dinamičnemu območju 200 dB. Seizmometra, ki bi imel takšno dinamično območje, ni. S seizmografi takega dinamičnega območja ne dosežemo, dosežemo pa ga s kombinacijo seizmometrov in akcelero metrov. Da ohranimo veliko ločljivost, uporabimo za vsak tak merilni sistem samostojni digitalni pretvornik. Slika 4 kaže primer uporabe dveh sistemov, ki omogoča normalno analizo potresa. Leta 1998 sta na potresni opazovalnici LJU v Ljubljani delovala dva seizmološka digitalna sistema. Prvi je uporabljal pretvornik A/D RD3 podjetja Nanometrics, na katerega je bil priključen seizmometer CMG 40T, in je beležil nihanje tal neprekinjeno. Pri potresu v Posočju leta 1998 je bil sistem prekrmiljen (slika 4). Do prekrmiljenosti je prišlo, ker zaradi želje po povečani občutljivosti sistema za šibke potrese izhod iz seizmometra ni bil prilagojen vhodu v pretvornik A/D. Seizmometer bi lahko zabeležil skoraj trikrat večja nihanja tal. Drugi seizmološki sistem sta sestavljala pretvornik A/D SSR-1 in akcelero meter FBA23 podjetja Kinometrics, in je snemal samo močnejše dogodke. Nihanje tal na lokaciji



Slika 5. Lastnosti seizmometrov državne mreže potresnih opazovalnic glede na tri razrede potresov: bližnje s povprečno oddaljenostjo nadžarišča 10 kilometrov, lokalne z oddaljenostjo nadžarišča 100 kilometrov in oddaljene z oddaljenostjo nadžarišča okoli 3000 kilometrov

Figure 5. Characteristics of seismometers in the Seismic Network of Slovenia with respect to the three pre-selected earthquake distances: near source (seismic data at average epicentral distance 10 km), regional (seismic data at average epicentral distance 100 km) and teleseismic (seismic data about 3000 km or 27° from epicenter).

LJU zaradi potresa v Posočju leta 1998 je bilo s tem sistemom pravilno zabeleženo in je bila zato mogoča celovita analiza potresa.

Slika 5 kaže, na katerem območju nihaj tal delujejo posamezni instrumenti državne mreže in kakšne so lastnosti posameznih seizmometrov glede na zabeležene amplitude ter frekvence nihanj tal ob različnih potresih. Na sliki so predstavljeni trije razredi potresov. 'Bližnji potresi' so potresi z nadžariščno razdaljo, ki je manjša od dvajset kilometrov, 'lokalni potresi' so potresi z nadžariščno razdaljo med 90 in 110 kilometrov, 'oddaljeni potresi' pa so potresi s približno oddaljenostjo nadžarišča potresa od potresne opazovalnice okoli 3000 kilometrov. Frekvenčna značilnost zabeležene amplitude nihanj tal ob potresu ni kakor običajno predstavljena s spektralno močjo signala, ampak z uporabo pasovno prepustnih filtrov (Clinton, 2004). Na ta način so kratkotrajni pospeški natančneje predstavljeni. Po drugi strani pa je zanemarjena kompleksnost signala v smislu širokopasovnega snemanja in so zato nekateri pojavi, npr. natovarjanje signala, izvzeti. Kljub temu na ta način enostavneje prikažemo območje delovanja seizmoloških instrumentov.

V glavnem je prikaz pripravil John F. Clinton (Clinton, 2004), zbral je množico zapisov potresov iz različnih seizmoloških mrež in jih glede na oddaljenost razdelil še v razrede glede na magnitudo, kjer so se razredi ločili za eno velikostno stopnjo. Tako so bili na primer potresi z magnitudo od 1,0 do 1,9 v razredu z oznako magnitudo 1,5, potresi z magnitudo od 2,0 do 2,9 so bili v razredu z oznako magnitudo 2,5, itd. Pred obdelavo je bil vsak zapis potresa pretvorjen v pospeškovni odziv nihanja tal. Nato so bili signali filtrirani s pasovno prepustnimi filtri z razdelitvijo pasov s po eno oktavo. Takih filtrov ali razredov je bilo osem. Na vsakem filtriranem delu zapisa je bila odčitana največja vrednost pospeška, ki je bila nato vpisana v za to pripadajoč razred. Kot vzorčna vrednost za posamezni razred glede na frekvenčno območje, oddaljenost in magnitudo, je bila izbrana geometrična sredina vseh podatkov v razredu. Poudariti je treba, da meje med razredi niso ostre. Na graf smo vnesli tudi oceno za šibke lokalne in bližnje potrese in prikazali vrednosti za najmočnejši potres v prejšnjem stoletju, ki je bil v Posočju leta 1998. Vrednosti niso vzorčne, ker je bila potresna opazovalnica LJU, od koder so podatki, oddaljena od nadžarišča okoli 83 kilometrov, kar je manj od spodnje meje pri razredu lokalnih potresov (90 kilometrov).

Sklepne misli

Izbira seizmološke opreme je običajno kompromis med željami, seizmološko opremo, ki je v trenutku odločitve na voljo na trgu, in finančnimi sredstvi. S trenutnim številom in lego potresnih opazovalnic, ki so hkrati

opremljene z seizmometrom in akcelerometrom, lahko izredno močan lokalni potres zabeležimo na najmanj štirih opazovalnicah brez bojazni, da bi bili seizmološki sistemi prekrmljeni, verjetno pa bi dogodek zabeležili kar na vseh petih. Postavitev opazovalnic je taka, da bi pri potresu, kakršna sta bila leta 1998 in leta 2004 v Posočju, vse te opazovalnice pravilno zabeležile dogodek in sodelovale pri popolnem in natančnem izračunu parametrov potresa. Pri takem potresu obstaja verjetnost, da bi bile lahko nekatere bližnje potresne opazovalnice, opremljene samo z seizmometri, prekrmljene, verjetno vsaj na horizontalnih komponentah. Vendar so takšni dogodki izredno redki. Po drugi strani pa z izboljševanjem kakovosti instrumentov na »tihih« lokacijah beležimo vse večje število izredno šibkih potresov, ki odkrivajo potresne značilnosti prelomov v Sloveniji.

Z modernizacijo državne mreže potresnih opazovalnic in s sprotnim posodabljanjem posameznih delov opreme opazovalnic ustvarjamo pogoje za občutljivejše zaznavanje in natančnejše beleženje močnih in šibkih potresov, kar omogoča vedno boljše poznavanje aktivnih prelomov kot možnih potresnih izvorov na slovenskem ozemlju.

Viri in literatura

1. Bormann, P. (ed.), 2002. IASPEI, New Manual of Seismological Observatory Practice, GeoForschungsZentrum Potsdam, Vol. 1, poglavje 6, 10.
2. Cecic, I., Živčič, M., Torkar, M., Deterding, M., 2001. Potresi v Sloveniji 1999. V: Potresi v letu 2001, ARSO, Urad za seizmologijo, Ljubljana, 8–32.
3. Clinton, J. F., 2004. Modern Digital Seismology – Instrumentation, and Small Amplitude Studies for the Engineering World, PhD Thesis, California Institute of Technology.
4. Čarman, M., Živčič, M., 2007. Analiza seizmičnega šuma na opazovalnicah (v letih 2003 in 2004). V: Potresi v letu 2005, ARSO, Urad za seizmologijo, Ljubljana, 30–40.
5. Güralp, 2009a. <http://www.guralp.com/products/3ESPC/> (navedeno 1. 3. 2009).
6. Güralp, 2009b. <http://www.guralp.com/products/40T/> (navedeno 1. 3. 2009).
7. Peterson, J., 1993. Observations and modelling of background seismic noise. Open-file report 93–322, U. S. Geological Survey, Albuquerque, New Mexico.
8. Sinčič, P., Tasič, I., 2008. Pomen komunikacij za državno mrežo potresnih opazovalnic. V: Ujma št. 22, 195.
9. Scherbaum, F., 2001. Of Poles and Zeros: Fundamentals of Digital Seismology. Springer.
10. Streckeisen, G., 1995. Portable Very Broad Band Tri-Axial Seismometer: STS-2 manual. G. Streckeisen AG, Switzerland, 1995.