

KAKO MERIMO POTRESE

Measuring Earthquakes

Izidor Tasič* UDK 550.34.03/.06

Povzetek Abstract

Pri oceni osnovnih parametrov potresa, kot sta moč in njegova lokacija, nam pomagajo naprave, ki jim pravimo seizmografi. To so instrumenti, ki beležijo nihanje tal. Ti instrumenti neprestano beležijo potrese in nam govorijo o moči narave. Največ potresov je šibkih, takih, ki jih zaznajo samo zelo občutljivi instrumenti, nekateri pa so žal tudi rušilni.

Assessing basic earthquake parameters such as strength and location requires the use of seismographs. Seismographs are instruments that measure ground movements. They constantly track tremors, demonstrating the power of nature. Most earthquakes are weak and only detected by very sensitive equipment yet some are extremely destructive.

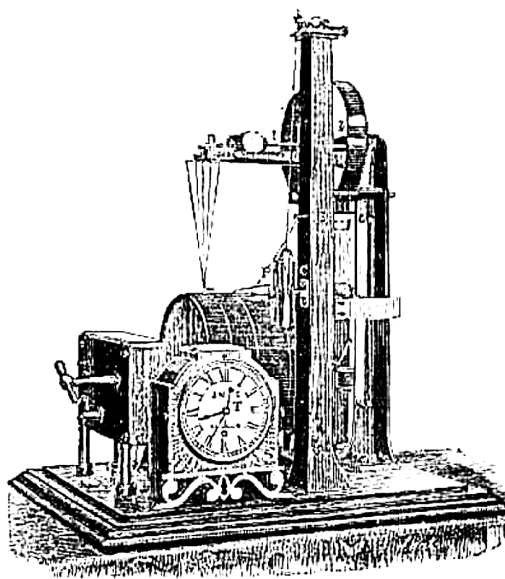
Pogled v preteklost

Nenadno nihanje zemlje je pri ljudeh že od nekdaj vzbujalo strah in spodbujalo človeško domišljijo k razlagi. Za povzročitelja tega pojava so tako najpogosteje krivili mitološke živali, ki so nosile Zemljo. Prebivalci otokov Balijsa, Floresa in Bornea so krivili velikanskega bika. Indijanci plemena Algonquian iz Severne Amerike so to vlogo pripisovali želvi, medtem ko so na Celebesu potres razlagali s praskanjem vepra po palmi. Živali so lahko nadomestili velikani neverjetnih moči. Tako je pri starih Grkih Zemljo nosil Atlas. Grški filozof Tales pa si je predstavljal Zemljo, ki plava na vodi. Potres je primerjal s podrtavanjem čolna na valovih morja. Na kasnejša razmišljanja je močno vplival grški filozof Aristotel. Znotraj ideje o štirih osnovnih elementih narave (zemlji, ognju, vodi in zraku) je mehanizem potresa prenesel na vpliv enega od njih, na zrak. Zrak naj bi bil stisnjen v razpokah Zemlje, vsake toliko pa lahko izbije na plan in pri tem povzroči tresenje Zemlje. Po Aristotelovi razlagi je vreme v trenutku potresa mirno, brez vetra. Šele s prihodom močnih vetrov potresi prenehajo. Zanimivo je, da je ta ideja v različnih oblikah v Evropi preživela srednji vek.

Katastrofalni lisbonski potres leta 1755, zahteval je 60.000 življenj in se je čutil v večjem delu Evrope in severozahodnem delu Afrike, je bil prelomnica v pojmovanju in obravnavanju potresov. Zaradi njegove obsežnosti je zbudil radovednost mnogih učenjakov. Lahko rečemo, da je bil to začetek znanstvenega pristopa k razlagi pojava in njegovih učinkov. Tako leta 1760 prvič naletimo na razlago, da je potres povezan s širjenjem valov skozi zemeljsko notranjost. V obdobju od lisbonskega potresa do prehoda 19. v 20. stoletje so načrtno zbirali podatke o potresih in njihovih učinkih na stavbe, tla, vodo in ljudi.

V poznih dvajsetih letih 18. stoletja sta Cauchy in Poisson matematično pokazala možnost širjenja dveh vrst valovanj v elastični snovi, transverzalnega in longitudinalnega. Nekoliko kasneje so Kirhhof, Kelvin in Rayleigh matematično obdelali še valovanje na meji homogene elastične snovi. Leta 1840 je bil objavljen prvi katalog o potresih po svetu.

Istočasno z razvojem znanosti so se povečevale zahteve po instrumentih, ki bi mogli posredovati gibanje zemlje v času potresa. Prvi instrumenti za merjenje potresa so zaznali samo največje odmike tal. To so bili seizmoskopi. Najstarejši znani seizmoskop je izdelal kitajski učenjak Zhang Heng že leta 132. Podobno napravo so v Evropi "odkrili" šele dobrih šestnajst stoletij kasneje. Zhang Heng je bil kitajski matematik, astronom in geograf. Njegov instrument, imenoval ga je Di Dong Yi (Di =



Slika 1. Seizmometer iz leta 1892
Figure 1. Seismometer from 1892

* Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana, Izidor.Tasic@gov.si

zemlja, Dong = premakniti, Yi = instrument), naj bi zaznal potrese z žariščem, ki je bilo oddaljeno od instrumenta tudi nekaj sto kilometrov. Instrument, velik skoraj dva metra, naj bi deloval štiri stoletja. Nato pa je za njim izginila vsaka sled. Po slikah so ga prvič rekonstruirali leta 1951, vendar še sedaj ne vedo zagotovo, kakšen je bil mehanizem v njegovi notranjosti.

V Evropi so začeli prve seizmoskope izdelovati šele v 18. stoletju. Pomembno leto je 1892. Tega leta je J. Milne s sodelavci med bivanjem na Japonskem skonstruiral prvi seizmograf – instrument, s katerim so lahko določili nihanje tal v odvisnosti od časa (Slika 1). To je bil začetek instrumentalne seizmometrije.

Okoli leta 1900, se pravi, več kot sedemdeset let po matematični teoriji, so v zapisih potresa prepoznali vse vrste valovanj, prostorske in površinske. Iz zapisov potresov so spoznali, da je nihanje tal tridimenzionalno in ga lahko opišemo s pomočjo vertikalne in dveh horizontalnih komponent. V prvem desetletju tega stoletja sta tako E. Kiocher in B. S. Galitain skonstruirala seizmograf, ki je zapisoval vse tri komponente za kratke in dolge periode potresnih valov. Ravno tako so ugotovili, da ni mogoče narediti univerzalnega seizmografa, ki bi enako dobro zapisoval hitra in počasna nihanja tal šibkih in močnih potresov. Problem so rešili z izdelavo seizmografov različnih karakteristik (kratko-, srednje- in dolgo periodni seizmografi). V dvajsetih in tridesetih letih so že na več potresnih opazovalnicah po svetu uporabljali elektromagnetne senzorce z "roto" zapisom, tako imenovanim zapisom na neskončen papir.

Na koncu petdesetih let so s seizmografi že lahko beležili nihanja tal s periodo pod 0,01 sekunde. Istočasno so razvili instrumente, ki beležijo nihanja tal periode nad deset minut. Osemdeseta leta so bila zaznamovana z začetki digitalne seizmologije. Sočasno z razvojem so se v zadnjih dvajsetih letih prejšnjega stoletja zaradi kompleksnosti opreme proizvajalci seizmografov začeli deliti v dve skupini. V prvi se ukvarjajo s senzorji premikov, v drugi pa z razvojem enot za ojačanje in zapisovanje seizmičnih signalov.

V začetku instrumentalne seizmologije so poskušali oceniti moč potresa glede na učinke v naravi. Take ocene so bile subjektivne, poleg tega pa so potresi z isto močjo lahko zaradi različnih vzrokov (globina potresa, oddaljenost žarišča od točke opazovanja) pustili v naravi različne posledice. Da bi lahko subjektivne opisne ocene o učinkih potresa nadomestil z instrumentalno določeno mero, kar bi pomagalo pri razvrščanju potresov v razrede glede moči potresa, je leta 1935 Richter vpeljal koncept potresne magnitude. Pri definiranju potresne magnitude si je pomagal z lokalno mrežo potresnih opazovalnic v Južni Kaliforniji. Vse te potresne opazovalnice so bile opremljene s standardiziranimi kratkoperiodnimi Wood-Andersonovimi seizmometri. Magnitudna skala je pomenila v primerjavi z opisnimi lestvicami velik korak naprej, saj je omogočala enostaven izračun ter nepo-

sredno instrumentalno primerjavo potresov med seboj. Zaradi preprostosti izračuna je bila hitro sprejeta po vsem svetu. Vendar, ker je bilo po svetu razmeroma malo Wood-Andersonovih seizmometrov, poleg tega pa so z izboljšavo seizmoloških instrumentov postale tudi meritve natančnejše, so se spreminjale ter dopolnjevale tudi enačbe za izračunavanje magnitude.

Seizmograf

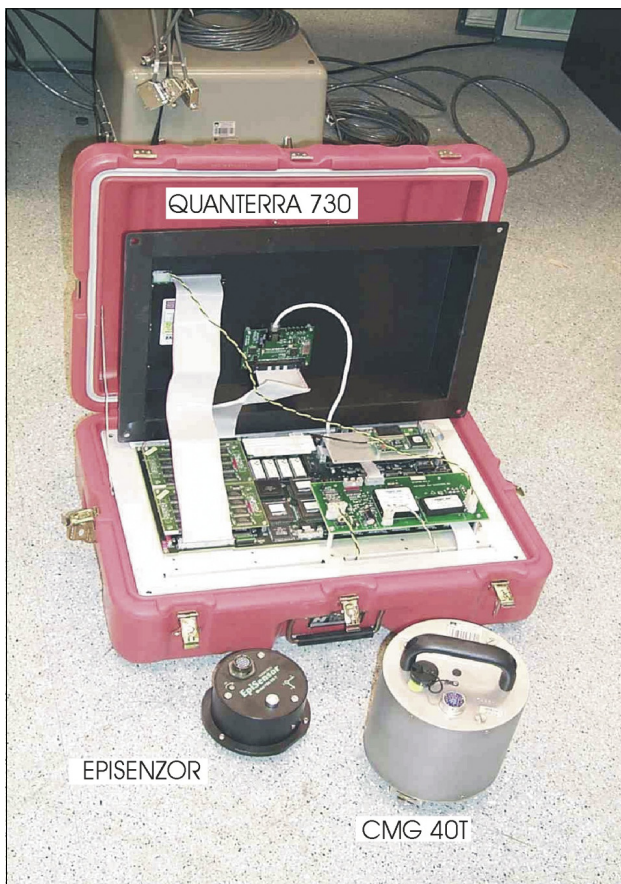
Seizmograf je zelo občutljiva naprava za beleženje nihanj tal. Nihanje tal beleži z natančno in točno uro, tako da dobimo zabeleženo nihanje tal kot funkcijo časa. Njegova osnovna sestavna dela sta seizmometer, to je senzor za zaznavanje nihanj tal, in enota za ojačitev in beleženje signalov. Živo bitje zaznava mehanične treslajaje, vendar so instrumenti bistveno bolj občutljivi. Sodobne merilne seizmološke naprave so zmožne zaznati vibracije, ki so 106 šibkejše od tistih, ki jih lahko zazna človeško telo.

Enota ojačitev in beleženje signalov

Še v začetku prejšnjega stoletja so bili seizmografi nihala z velikimi masami in izredno natančno narejenimi prenosnimi mehanizmi, ki so zapisovala gibanja tal na s sajamii prevlečen papir. Te naprave so v šestdesetih letih izpodrinile naprave, v katerih se nihanje tal pretvori v spremenljiv električni signal in se nato z zrcalnim galvanometrom s pomočjo usmerjenega žarka snema na fotografski papir oz. s pomočjo črnila na klasični papir. Zapis je vseboval še urne znamke, periodične "motnje" na zapisu, najpogosteje z minutnimi presledki. Strokovnjak je pri obdelavi zapisov določil prihod potresnih valov tako, da je z merilom izmeril razdaljo med časovno znamko in začetkom potresa ter dobljeno razdaljo pretvoril v čas.

Sodobni seizmografi beležijo nihanje tal v digitalni obliki, kar poveča dinamično območje naprave in izboljša kakovost obdelave signala s pomočjo računalnikov. Pri digitalni pretvorbi so pomemben podatek resolucija, dinamično območje in šum naprave.

Slovenska državna seizmološka mreža je opremljena z digitalno-analognimi pretvorniki (A/D) Quanterra 730 (Slika 2). To so 24-bitni A/D-pretvorniki, z dinamičnim območjem nad 140 dB. Srce pretvornika je 32-bitni procesor Motorola iz razreda 68. Q730 ima na vhodu tri (oziroma 6, če sta na opazovalnici dva sistema seizmometrov) neodvisne 24-bitne analogno-digitalne pretvornike z vzorčenjem 200, 20 in 1 vzorca na sekundo. Vzorčenje 200 vzorcev na sekundo je namenjeno opazovanju bližnjih potresov, vzorčenje 20 in 1 pa oddaljenim potresom. Za A/D-pretvorbo je uporabljena sigma-delta modulacija z osnovno frekvenco vzorčenja 20 kHz; nižje frekvence vzorčenja dobimo s pomočjo digitalne obdelave signala z decimacijo in digitalnim filtriranjem. Za točen čas skrbi GPS-enota, dogodki so označeni z UTC-časom pod eno milisekundo natančno. Q730 ima vgrajeno še



Slika 2. Državna mreža potresnih opazovalnic je opremljena z analogno-digitalnim pretvornikom Quanterra 730 in seizmometrom CMG-40T. Nekatere lokacije pa so dodatno opremljene še z akcelometrom EpiSensor.

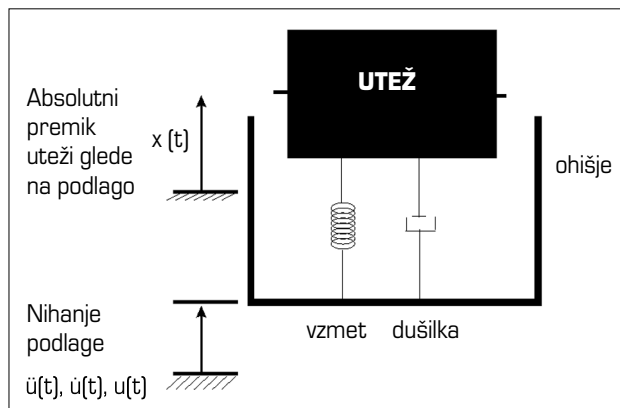
Figure 2. The national network of earthquake observatories has a Quanterra 730 analogue digital converter and CMG-40T seismometer. Some locations also have an EpiSensor accelerometer.

komunikacijsko kartico in pošilja podatke prek državnega računalniškega omrežja v Center za obdelavo podatkov skoraj v realnem času. V Centru se ti podatki shranjujejo in naknadno obdelujejo.

Seizmometer

Seizmometer je senzor, ki meri gibanje tal. V seizmologiji se najpogosteje uporabljajo seizmometri inercialnega tipa, ki merijo premikanje tal relativno glede na referenčno točko, ki se nahaja v ohišju sensorja. To je ponavadi utež, ki je prek vzmeti povezana z ohišjem. Enostaven mehanski model klasičnega seizmometra je prikazan na sliki 3.

Sodobni seizmometer pretvarja premik tal v električni signal. Pri pasivnih seizmometrih pretvorimo v električni signal odmik uteži iz ravnovesne lege. Takšni seizmometri so enostavnejši za izdelavo, vendar delujejo na zelo omejenem frekvenčnem pasu. Zato so bolj uporabni aktivni seizmometri, to so senzori s povratno zanko.

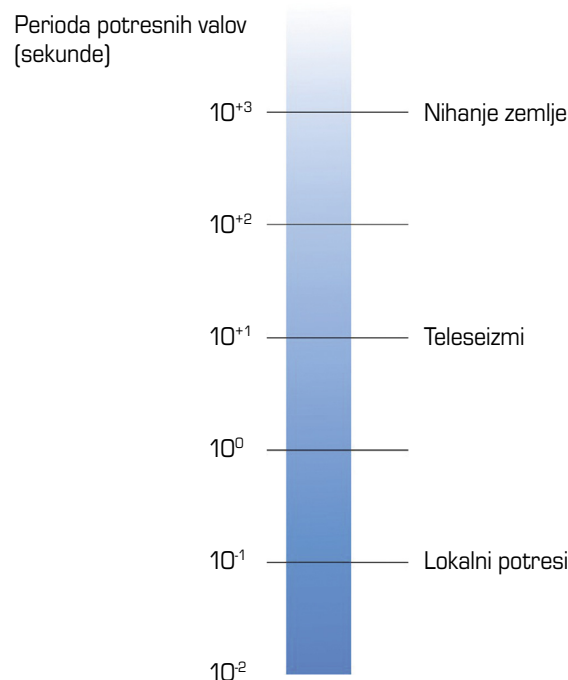


Slika 3. Dinamični model preprostega seizmometra. Utež naj se giblje le premočrtno brez rotacije.

Figure 3. Dynamic model of a simple seismometer. The weight moves straight with not rotation.

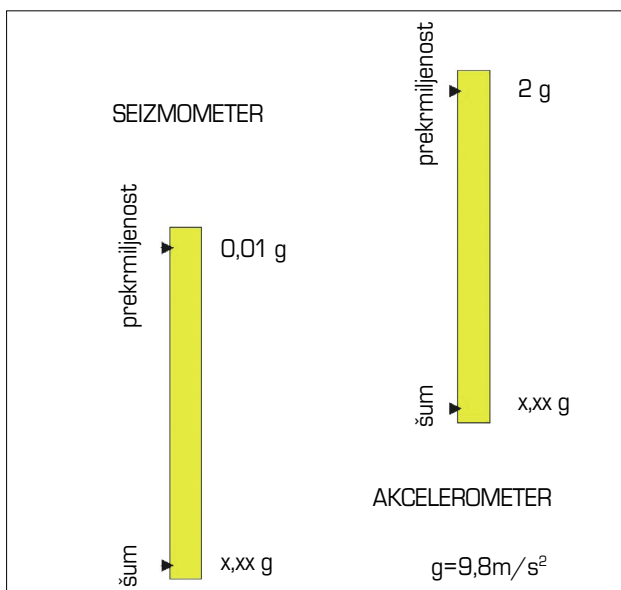
Le-ti delujejo na principu ravnovesja sil. To pomeni, da se premik uteži kompenzira s povratno električno generirano silo. Na ta način ostaja utež v ravnovesni legi, merimo pa tok, ki je potreben za ustvarjanje ravnovesja. Takšni senzori v primerjavi s pasivnimi senzori delujejo na širšem frekvenčnem območju z boljšimi dinamičnimi karakteristikami.

Pretvorbe premika tal v električni signal ne moremo opisati le z enostavno linearno zvezo, ker vseh sil, ki vračajo maso v ravnovesno lego, nikoli ne moremo zanemariti. Zato moramo poznati senzorijske dinamične lastnosti, ki so ponavadi podane z jezikom Laplaceove transformacije.



Slika 4. Periode potresnih valov so odvisne od moči potresa in so lahko od nekaj stotink sekunde pa do nekaj ur.

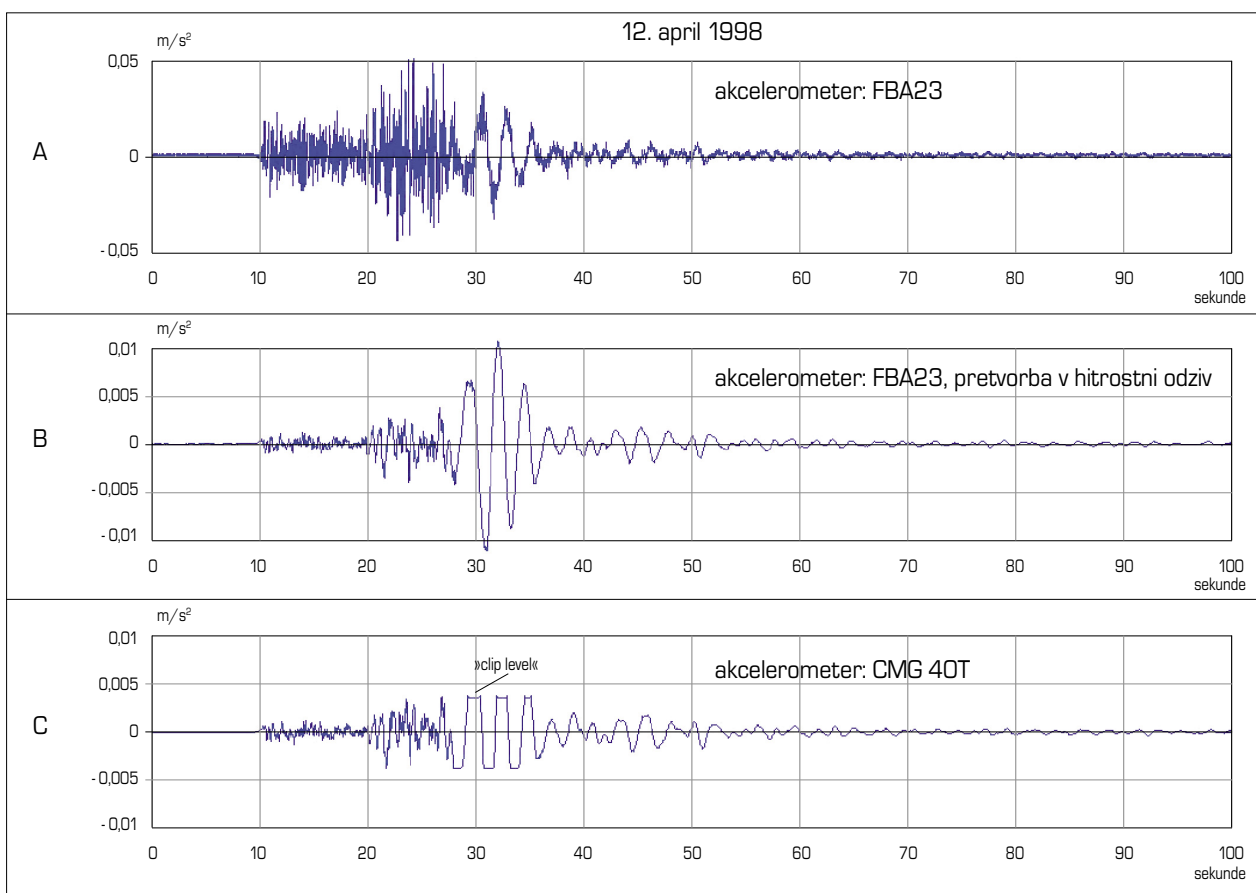
Figure 4. The period of a seismic wave depends on the strength of an earthquake and ranges from hundredths of seconds to several hours.



Slika 5. S kombinacijo seizmometra in akcelerometra povečamo dinamično območje seizmografa.

Figure 5. The combination of seismometer and accelerometer increases the dynamic range of a seismograph.

Glede na moč in oddaljenost potresa je gibanje tal zelo raznovrstno. Amplitude potresnih valov so lahko od nekaj nanometrov do nekaj centimetrov. Periode potresnih valov so od nekaj stotink sekunde pa do nekaj ur (Slika 4). Trenutno ne obstajajo senzori, ki bi lahko pokrili takšen razpon. Zato ponavadi uporabljamo tiste senzore, ki so omejeni na področje naših raziskav, ali pa si pomagamo z več senzori z različnimi karakteristikami. Za obvladovanje čim večjega dinamičnega razpona uporabljamo kombinacijo seizmometra in akcelerometra (Slika 5). V žargonem jeziku ob besedi seizmometer takoj pomislimo na napravo, ki meri hitrost nihanja podlage, akcelerometer pa pospeške nihanja podlage. Zaradi svoje konstrukcije so seizmometri bolj občutljivi na šibke in srednje močne potrese in so namenjeni za stalno beleženje seizmične aktivnosti, pri zelo močnih potresih pa so lahko prekrmljeni. Akcelerometri so ponavadi manj občutljive naprave, termično manj uravnovešene in namenjene za inženirsko seizmologijo in opazovanje močnejših potresnih sunkov. Na sliki (Slika 6) je zapis močnega potresa iz Posočja 12. aprila 1998, kot sta ga zaznala seizmometer in akcelerometer v observatoriju Golovec v Ljubljani. Seizmometer je bil pri večjih amplitudah prekrmljen in če bi ne imeli tudi akcelerometra, bi bili podatki o največjih amplitudah izgub-



Slika 6. Zapis močnega potresa 12. aprila 1998 z žariščem v Posočju, kot sta ga zaznala akcelerometer in seizmometer v observatoriju Golovec v Ljubljani. Nihanje tal ob potresu je bilo tako močno, da je bil seizmometer pri večjih amplitudah prekrmljen (C). Akcelerometer pa je lepo zabeležil tudi večja nihanja (A,B).

Figure 6. Printout of a strong earthquake on 12 April 1998 with epicentre in the Soča valley region as captured by a seismometer and accelerometer at the Golovec observatory in Ljubljana. Ground movement was so strong during the earthquake that the seismometer went off the scale at higher amplitudes (C). The accelerometer recorded even the higher amplitude waves properly (A, B).

ljeni. Akcelerometer pa je lepo zabeležil tudi večja nihanja. Tako vemo, da so aparature v observatoriju na Golovcu v Ljubljani pri potresu 12. aprila leta 1998 v Posočju z oceno magnitude 5,6 M_{LV} zaznale v vertikalni smeri največji pospešek $0,05 \text{ m/s}^2$ in največjo hitrost $0,01 \text{ m/s}$.

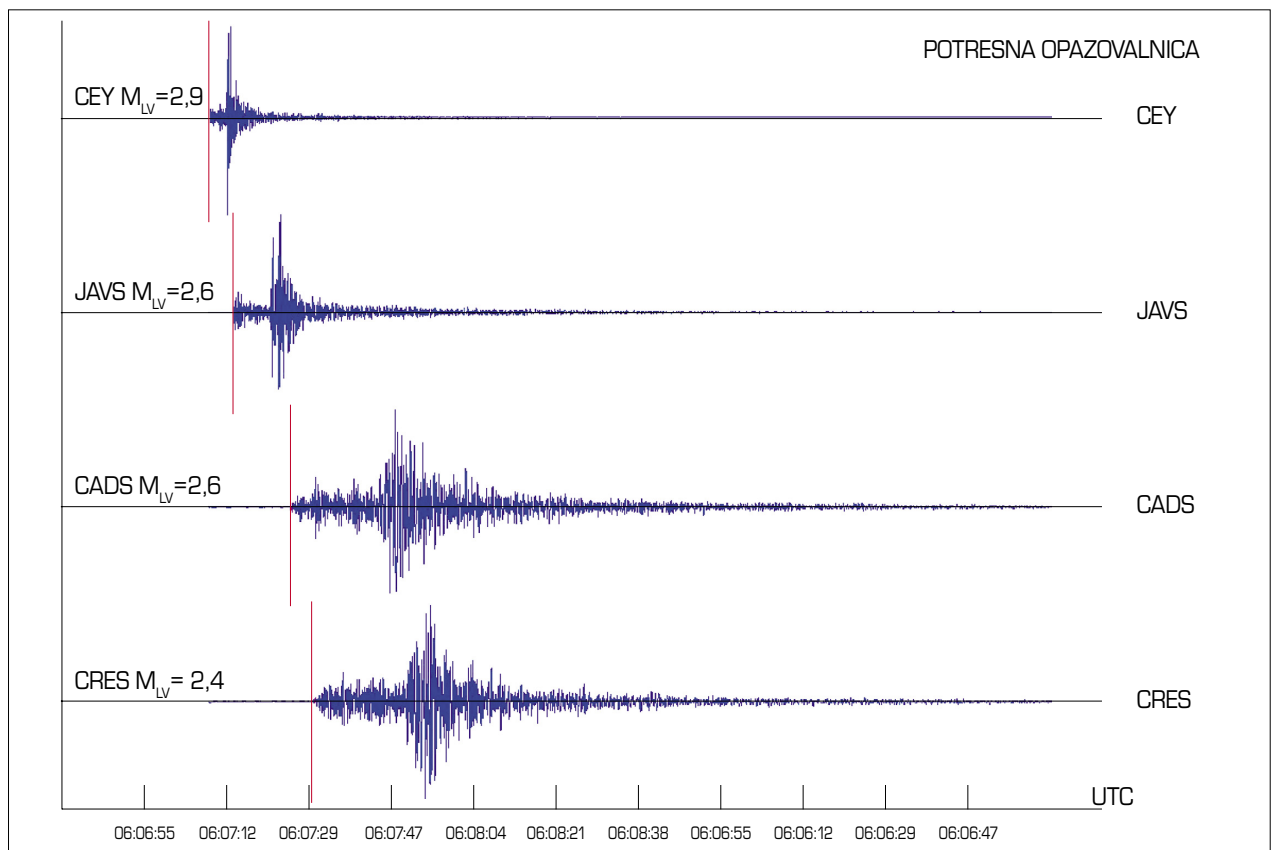
Slovenska Državna seizmološka nacionalna mreža je opremljena s širokopasovnimi senzori CMG-40T proizvajalca GurAlp iz Velike Britanije (Slika 2). To je trokomponentni širokofrekvenčni seizmometer s hitrostnim odzivom s frekvenčnim območjem med 50 Hz in 0,03 Hz in dinamičnim območjem nad 145 dB. Seizmometer sestavljajo trije miniaturni senzori, ki so postavljeni pravokotno drug na drugega, kar omogoča prostorsko oceno hitrosti nihanja podlage. Seizmometer je po dogovoru postavljen na podlago tako, da senzori kažejo v smeri sever–jug, vzhod–zahod in v vertikalni smeri. Konstrukciji vertikalnega in horizontalnega sensorja sta zelo podobni. Senzor je kondenzatorski merilnik premikov z elektromagnetno povratno zanko. Vertikalnemu sensorju je za izničenje vpliva gravitacije dodana listnata vzmet. Najnižja parazitska resonanca je nad 450 Hz. Izhod iz sensorja je proporcionalen hitrosti na območju med 0,03 Hz in 50 Hz.

Za to, da bomo pokrili čim večji amplitudni razpon, bo pet potresnih opazovalnic v Sloveniji še dodatno opremljenih

z merilniki pospeškov EpiSensor ameriškega proizvajalca Kinematics (Slika 2). Merilniki pospeškov so skonstruirani tako, da so dokaj neobčutljivi pri šibkih potresih, jih ne zaznajo, zato pa zaznavajo močnejša nihanja tal. S kombinacijo seizmometra in akcelerometra dosežemo zelo veliko dinamično območje in na ta način preprečimo, da pri močnejših potresih ne pride do prekrmljenosti, kar se je lahko zgodilo pri močnih potresih.

Magnituda

Magnituda je logaritmična mera, ki nam iz instrumentalnega zapisa potresa poda oceno o moči potresa. Sama beseda izhaja iz latinske besede "magnitudo" in pomeni velikost. Za izračun magnitude uporabljamo empirično enačbo, kjer sta glavna podatka oddaljenost žarišča potresa od opazovalnice in največja vrednost amplitude v zapisu potresa. Osnovni cilj uporabe magnitude je, da čim enostavneje klasificiramo potrese po moči. Koncept potresne magnitude je leta 1935 vpeljal Richter: Richterjeva magnituda M_L temelji na logaritmu maksimalne amplitude potresa A_{max} , izmerjene v milimetrih na Wood-Andersonovem seizmometru, in oddaljenosti potresne opazovalnice od žarišča potresa $M_L = \log(A_{max}) - \log(A_0)$, pri čemer so bile vrednosti A_0 podane v tabeli. Potres



Slika 7. Zapis lokalnega potresa na štirih potresnih opazovalnicah v Sloveniji. Amplitude zapisov so normirane. Ocene moči za isti potres se zaradi vplivov različnih geofizikalnih pojavov lahko med potresnimi opazovalnicami razlikujejo tudi do pol velikostnega razreda.

Figure 7. Printout of local earthquake at four observatories in Slovenia. The amplitude printouts have been standardised. Estimates of the strength for the same earthquake differ by up to half a category of amplitude between different earthquake observatories due to different geographical factors.

z magnitudo $M_L = 0$ je tisti potres, ki je nastal 100 km daleč od seizmološke postaje in je zapis potresa na Wood-Andersenovem seizmometru imel največjo amplitudo 1 mikrometer; $A_{max} = A_0$. Danes zaradi bolj občutljivih merilnih naprav uporabljajo strokovnjaki za izračun magnitude več različnih empiričnih enačb. Katero bodo uporabili, je odvisno od oddaljenosti žarišča potresa od potresne opazovalnice ter od dinamičnih lastnosti instrumentov. Za potrese na območju Slovenije uporabimo naslednjo formulo: $M_{LV} = \log(A/T)_{max} + 1,52 \log(D/111) - 2,9$. Največjo amplitudo nihanj tal poiščemo na vertikalni komponenti zapisa tresenja tal v skupini transversalnih valov (tako imenovanih S-valov). Moč potresa lahko ocenimo že s pomočjo enega samega zapisa potresa, če le lahko iz njega ocenimo oddaljenost žarišča potresa in največjo vrednost amplitude. Vendar pa se je treba zavedati, da ocena moči potresa temelji na največji amplitudi v zapisu potresa, nima pa neposredne fizikalne razlage z mehanizmom izvora potresnih valov. Na obliko zapisa potresnega valovanja vplivajo žariščni mehanizem, fizikalne lastnosti snovi, skozi katero valovanje potuje, lom, odboj in sipanje na nezveznostih med posameznimi zemeljskimi plastmi, vpliv snovi na dušenje valovanja, položaj potresne opazovalnice, merilni sistem in seizmični šum. Zato se lahko ocene o moči potresa med različnim institucijami razlikujejo tudi do pol velikostnega razreda (Slika 7).

Za pravilno beleženje potresov niso pomembni samo instrumenti, ampak tudi podlaga, na kateri so postavljeni. Če je podlaga neugodna, beležimo predvsem resonančne pojave v plasteh. Ravno tako močno vpliva na beleženje seizmični šum, tako urbani kakor tudi naravni. Primer si

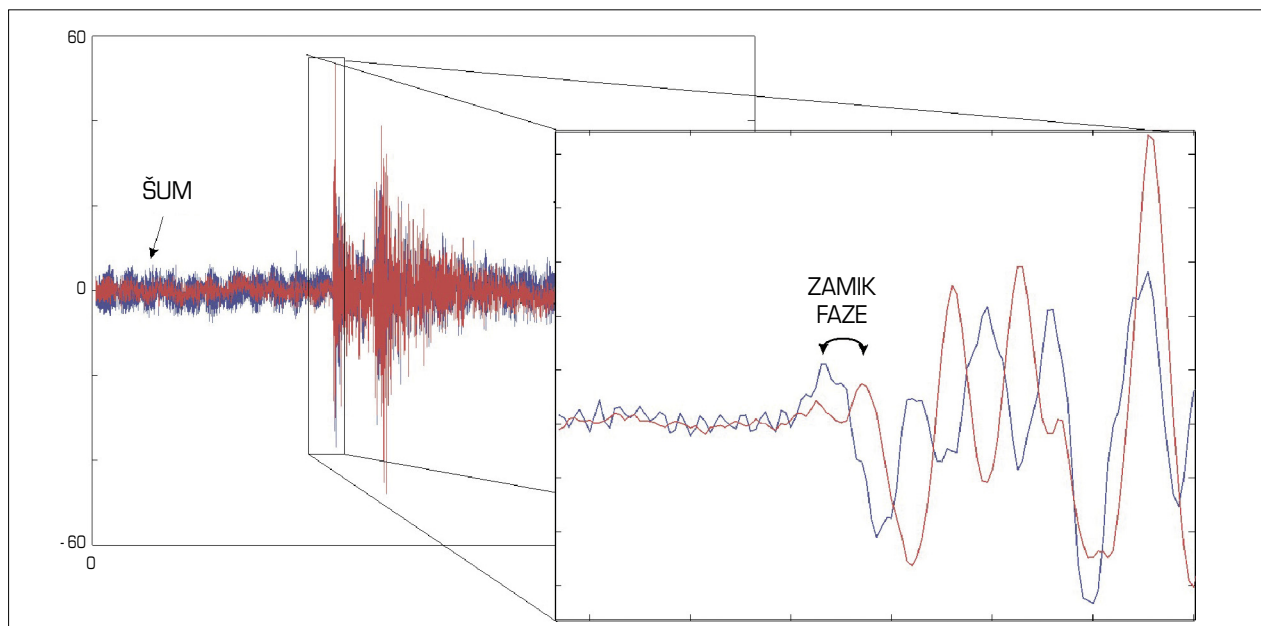
lahko ogledamo na Sliki 8, kjer je zabeležen šibek lokalni potres na dveh sensorjih, ki sta bila postavljena 20 metrov drug od drugega na sicer isti geološki podlagi, vendar na različno gradbeno pripravljenih seizmoloških lokacijah. Na sensorju A (modra črta) smo zabeležili večji seizmični šum kot na sensorju B (rdeča črta). Poleg tega pride tudi do zamika faze na komponenti N-S, ki je posledica vpliva mikrolokacije. Lokacija sensorja je zato izredno pomembna tudi pri prepoznavanju potresnih valov.

Sklepne misli

Vsak potres je enkratni pojav. Merimo ga z zelo občutljivimi instrumenti. Pomembno je tudi, da so le ti inštalirani na lokacijah, primernih za natančne meritve, brez prevelikega seizmičnega šuma in na zadovoljivi geološki podlagi. Le tako dobimo realno sliko o nihanju tal.

Viri in literatura

1. Borman, P. (ur.), 2002. New Manual of Seismological Observatory Practice, Vol 1.
2. Prosen, T., Bajc, J., Živčič, M., 2001. Potresi v Sloveniji leta 1999. Občutljivost potresne opazovalnice na Veliki Štangi. Ljubljana, Agencija RS za okolje.
3. Ribarič, V., 1984. Potresi. Ljubljana, Cankarjeva založba.
4. Skoko, D., Mokrović, J., 1982. Andrija Mohorovičić. Školska knjiga, Zagreb, Hrvaška.
5. www.kinometrics.com
6. www.guralp.com



Slika 8. Zapis šibkega lokalnega potresa na dveh sensorjih. Sensor A (modra sled) in sensor B (rdeča sled) sta med seboj oddaljena 20 metrov. Na sensorju B beležimo zaradi lokalnih pogojev večji seizmični šum kakor na sensorju A. Zaradi vpliva mikrolokacije pa pride tudi do zamika faze vstopa potresnega valovanja.

Figure 8. The printout of a weak local tremor by two sensors. Sensor A (blue) and Sensor B (red) were 20 metres apart. Sensor B recorded more seismic noise than Sensor A due to local conditions. The impact of micro-locations leads to phase shifts in the arrival of the seismic wave.