

PRISPEVEK K ZGODOVINI SEIZMOLOGIJE: 50 LET NEPREKINJENEGA INSTRUMENTALNEGA TRIDIMENZIONALNEGA BELEŽENJA ŠIROKOPASOVNEGA SPEKTRA SEIZMIČNIH VALOV V SLOVENIJI

50 YEARS OF CONTINUOUS THREE-DIMENSIONAL RECORDING OF THE BROADBAND SPECTRUM OF SEISMIC WAVES IN SLOVENIA

Peter Sinčič

Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, Ljubljana, petersincic@gov.si

Izidor Tasič

mag., Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, Ljubljana, izidortasic@gov.si

Povzetek

Od leta 1969 na Astronomsko-geofizikalnem observatoriju (AGO) Golovec v Ljubljani neprekinjeno deluje tridimenzionalno širokopasovno beleženje nihanj tal. Tega leta sta začela delovati dva za tiste čase vrhunska analogna seizmografa, kratkoperiodni in dolgoperiodni, ki sta skupaj, sicer nelinearno, pokrivala širokopasovno območje nihanj tal ter sta lahko beležila ne le bližnje, ampak tudi oddaljene potrese ali teleseizme. V članku so opisani ozadje, merilna oprema in postopki dela s to opremo.

Abstract

Since 1969, the three-dimensional instrumental broadband recording of seismic ground vibrations has been continuously operating at the Astronomical Geophysical Observatory (AGO) on Golovec in Ljubljana. In that year, two types of measurements began, using top quality analogue seismographs for the time, which, together, non-linearly covered the broadband range of ground vibrations and could record both nearby earthquakes and teleseisms. This article describes the background, the measuring equipment and the operating procedures of this equipment.

Uvod

Leto 1969 pomeni začetek širokopasovnega opazovanja seizmičnosti v Sloveniji. Isto leto se je na Astronomsko-geofizikalnem observatoriju Golovec (v nadaljnjem besedilu: AGO) začelo neprekinjeno tridimenzionalno (3D) širokopasovno beleženje seizmičnega nihanja tal, ki od tedaj traja vse do danes. Širokopasovno beleženje tal je bilo sestavljeno iz kratkoperiodnega in dolgoperiodnega seizmografa. Dolgoperiodno 3D beleženje nihanja tal je potekalo v kleti observatorija neprekinjeno od 14. aprila 1969, kratkoperiodno 3D beleženje seizmičnih valov pa od 9. julija 1969 naprej (Vidrih, 2009). Beleženje je bilo izvedeno z analognim načinom zapisa svetlobnega žarka na fotografski papir (Sinčič in sod., 1997).

Širokopasovno 3D-opazovanje nihanj tal ob potresu je pomembno za natančno opredeljevanje osnovnih parametrov potresov (lokacija žarišča, magnituda) ter tudi za analize strukture notranjosti Zemlje.

Preučevanje zapletene sestave Zemljine notranjosti se je lahko začelo z razvojem seizmoloških instrumentov v 18. stoletju. Na podlagi zapisov potresov in teorije o razširjanju potresnega valovanja skozi prožno snov so strokovnjaki že v tej zgodnji dobi spoznali, da so potresi edini vir podatkov o Zemljini notranjosti. Leta 1906 je bilo na voljo že toliko zabeleženih potresov na različnih napravah, da je lahko R. D. Oldham iz zapisov oddaljenih potresov ocenil, da je del Zemljinega jedra tekoč. Leta 1936 je danska seizmologinja Inge Lehmann prav tako iz zapisov oddaljenih potresov z žariščem na drugi strani Zemljine oble dokazala, da je jedro sestavljeno iz dveh delov, tekočega in trdnega (Skoko in Mokrovič, 1982). Hrvaški seizmolog Andrija Mohorovičić pa je leta 1910 na podlagi lokalnega potresa (Pokupski potres leta 1909) dokazal, da je območje oziroma plast, ki je diskontinuiteta, kjer se fizikalne lastnosti skokovito spremenijo, že nekaj deset kilometrov pod površino zemlje. Ta meja, ki loči Zemljino skorjo in plašč, je po njem tudi dobila ime (Skoko in Mokrovič, 1982). Za izpopolnjevanje

vedenja o notranjosti Zemlje so bili torej pomembni tako lokalni potresi z žariščem blizu potresne opazovalnice kot tudi oddaljeni potresi z žariščem nekaj tisoč kilometrov od nje. Periode in amplitude potresnih valov lokalnih in oddaljenih potresov se med seboj močno razlikujejo. Do razvoja širokopasovnih seizmometrov, ki se je začel v osemdesetih letih prejšnjega stoletja, so za beleženje bližnjih potresov uporabljali kratkoperiodni seizmograf, za beleženje oddaljenih potresov (teleseizmov) pa dolgoperiodni seizmograf. Razvoj in proizvodnja takih seizmografov sta potekala v sodelovanju med akademskim okoljem in malimi podjetji, kjer je bila proizvodnja maloserijska. Zato se je oprema po svetu močno razlikovala med seboj. Standardizacija seizmološke opreme se je izkazala za pomembno pri opredeljevanju potresne magnitude. Na podlagi zapisov iz standardizirane opreme, postavljene na potresnih opazovalnicah v južni Kaliforniji, je leta 1935 C. F. Richter v sodelovanju z B. Gutenbergom vpeljal tako imenovano potresno magnitudo (Bormann in sod., 2002). Toda seizmološka oprema na teh opazovalnicah je imela kar nekaj pomanjklivosti. Seizmometer tipa wood-anderson je meril nihanje tal le v horizontalni ravnini in je bil primeren le za zaznavanje lokalnih in regionalnih potresov. Leta 1934 je k razvoju dolgoperiodnega beleženja vertikalnega nihanja tal pri potresu močno vplival LaCoste z razvojem prenapete vzmeti, ki je imela teoretično pri nični sili nično dolžino in s tem tudi nični raztezek. Z uporabo posebnih zlitin za LaCostovo vzmet je ob koncu leta 1940 Frank Press pod vodstvom Mauricea Ewinga razvil izredno kakovosten nizkošumen in stabilen dolgoperiodni seizmometer in galvanometer (Press in sod., 1958; Okal, 2015). Ta prototip z imenom press-ewing je z nekaj manjšimi modifikacijami postal najbolj razširjen merilni instrument za dolgoperiodno opazovanje vse do prihoda sodobnih širokopasovnih seizmometrov. Podatki, zabeleženi na tem seizmografu, so veliko pripomogli pri prepoznavanju strukture Zemlje. K njegovi množični uporabi pa je pripomogla tudi hladna vojna in težnja ZDA, da bi lahko neodvisno zaznavale poskusne eksplozije jedrskih bomb po vsem svetu, ter tako spremljale razvoj jedrskega orožja neameriškega izvora.

Svetovno standardizirano seizmografsko omrežje

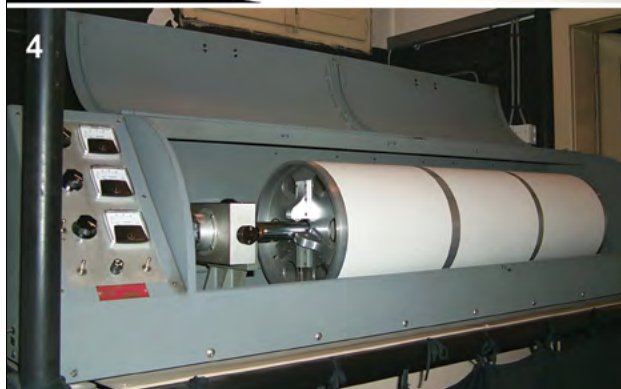
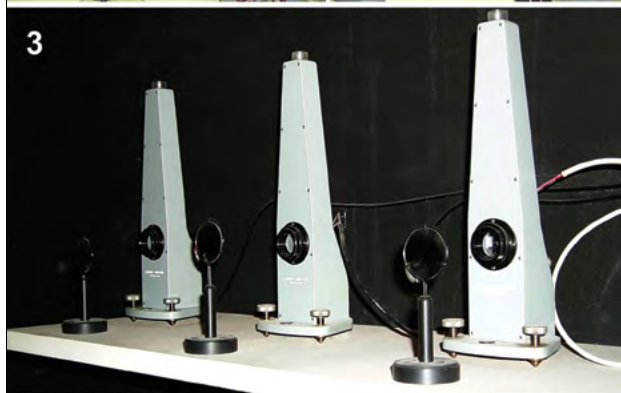
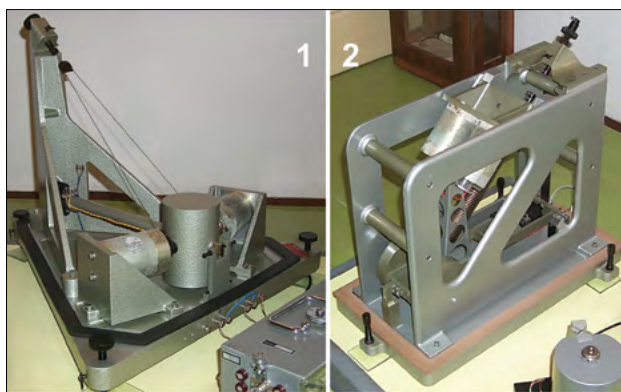
Ob koncu petdesetih let je bilo že jasno, da se lahko z natančno analizo zapisa nihanj tal pri podzemni ali prizemni jedrski eksploziji ovrednoti moč eksplozije in njena lokacija, tudi če se je ta zgodila daleč stran. Da bi to bilo mogoče, je raziskovalna skupina pod vodstvom dr. Lloyda Berknerja priporočila namestitve standardiziranih seizmografov, ki bi omogočili širokopasovno opazovanje seizmičnosti s točnimi urami na 100 do 200 potresnih opazovalnicah, razporejenih po vsem svetu (Peterson in Hutt, 2014). Novo omrežje naj ne bi bilo namenjeno le nadzoru jedrskih poskusov, ampak tudi zbiranju podatkov o naravnih potresih, oziroma zapisov seizmogramov za

nadaljnje temeljne raziskave v seizmologiji.

Na osnovi priporočila so bile leta 1960 sprejeti smernice za seizmološko opremo ter protokol dela s takšno opremo in podatki, omrežje pa so poimenovali »svetovno standardizirano seizmografsko omrežje« (*World-Wide Standardized Seismograph Network – WWSSN*) (Gosar, 2012). Opremo za potresne opazovalnice so izdelovali v ZDA, in sicer za dolgoperiodni seizmograf podjetje Sprengnether, preostalo opremo pa podjetje Geotechnical Corporation iz Texasa, ki ga je leta 1965 prevzelo podjetje Teledyne. Med letoma 1961 in 1967 so s to opremo opremili 117 potresnih opazovalnic v mnogih državah po vsem svetu (Peterson in Hutt, 2014). V resnici poimenovanje »svetovno« malo zavaja, saj opazovalnic s to standardizirano opremo ni bilo v Franciji in francosko govorečih državah, v državah vzhodnega bloka, Kitajski in Kanadi. Vpliv tega omrežja pa je presegal blokovsko delitev tako po organizacijski plati delovanja potresnih opazovalnic, saj so mnoge druge institucije prevzele vsaj del protokola njihovih delovanj ter izmenjave podatkov, kakor tudi znanstveno, saj so podatki močno vplivali na razvoj znanja o notranji strukturi Zemlje, razumevanju tektonskih plošč, žariščnih procesov pri potresu in podobnem. Med drugim je WWSSN opredelil opremljenost širokopasovnih potresnih opazovalnic, ki so jim v glavnem sledile tudi druge institucije po svetu, postavil pa je tudi temelj poznejšim, bolj naprednim seizmološkim mrežam.

Vsaka potresna opazovalnica WWSSN je bila opremljena s trikomponentnim kratkoperiodnim seizmografom, trikomponentnim dolgoperiodnim seizmografom in natančno uro. Trikomponentna seizmografa sta beležila nihanje tal v smeri sever-jug, vzhod-zahod in v vertikalni smeri. Prenosne funkcije seizmografa istega tipa so bile izenačene med osmi. Seizmograf so sestavljali seizmometer, uporabna enota za nastavitev kritičnega dušenja galvanometra, galvanometer in registrirni valj, namenjen fotooptičnemu beleženju. Fotooptični oziroma fotografski papir so menjavali enkrat dnevno. Takoj po menjavi papirja se je za namene preverjanja delovanja sistema sprožil tudi kalibracijski signal-stopnica, katerega odziv se je zapisal na začetek beleženja dnevnih sledi. Seizmometer kratkoperiodnega seizmografa je temeljil na prototipu, ki ga je že leta 1932 razvil Hugo Benof. Masa uteži je bila 107,5 kg, lastna frekvenca pa 1 Hz. Lastna frekvenca galvanometra je bila 1,33Hz. Kombinacija galvanometra in seizmometra je dala največje ojačanje pri beleženju nihanj tal pri periodi 0,7 sekunde, a se je po dogovoru vedno navajalo ojačanje pri eni sekundi. Ojačenje kratkoperiodnih sistemov je bilo v osnovi nastavljeno na 50.000, kar omogoča registracijo potresov z magnitudo 2,0 do oddaljenosti 200 km (Vidrih in Sinčič, 1993), zaradi različnih izvorov lokalnega nemira pa je dejansko bilo od 6250 do celo 500.000.

Seizmometer dolgoperiodnega seizmografa je temeljil na seizmografu press-ewing. Masa uteži vertikalnega seizmometra je bila 11,2 kg, masa horizontalnih pa 10,7 kg.



Slika 1: Dolgoperiodni trikomponentni seizmograf je imel te komponente:

1. dva vodoravna seizmometra sprengnether S-5007-H,
2. navpični seizmometer sprengnether S-5007-V,
3. trije galvanometri lehner & griffith GL-261,
4. registrirni boben sprengnether R-6007.

(avtor: P. Sinčič)

Figure 1: The long-period three component seismograph consists of:

1. Two horizontal seismometers (Sprengnether S-5007-H)
2. A vertical seismometer (Sprengnether S-5007-V)
3. Three galvanometers (Lehner&Griffith GL-261)
4. A drum recorder (Sprengnether R-6007)

(Author: P. Sinčič)

Lastna perioda seizmometra je bila najprej nastavljena na 30 sekund, a so že v sredini leta 1960 zaradi nelinearnih pojavov pri meritvah v naslednjih namestitvah seizmometrov zmanjšali lastno periodo na 15 sekund. Lastna perioda galvanometra je bila 100 sekund. Kombinacija galvanometra in 15-sekundnega seizmometra je

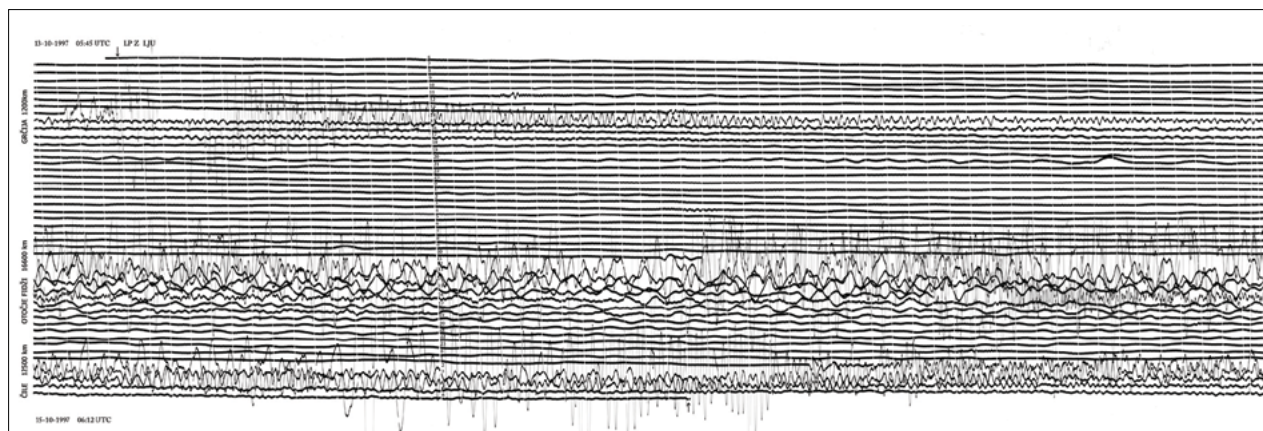
dala največje ojačanje beleženja nihanj tal pri periodi 15 sekund in tudi po dogovoru se je vedno navajalo ojačanje pri referenčni periodi, enaki lastni periodi seizmometra. Ojačenje seizmoloških sistemov ni bilo popolnoma standardizirano, večinoma je bilo nastavljeno na 1500, segalo pa je od 375 do 5500.

Začetki trikomponentnega širokopasovnega beleženja v Sloveniji

Pomen in vrednost trikomponentnega širokopasovnega beleženja za stroko je prepoznal tudi prof. Ribarič s svojo ekipo. Iz leta 1964 najdemo zapis (vir: zapiski dr. Ribariča): »Načrti za modernizacijo postaje v LJU so zaenkrat neuresničeni.« A že leta 1966 se uresniči nakup »nove generacije seizmoloških aparatov s pomočjo sklada Boris Kidrič ter bančnim kreditom z jamstvom fakultete«, oprema je bila leta 1967 postavljena v »poskusni pogon v zasilno adaptiranih prostorih« (vir: zapiski dr. Ribariča). Kje natančno so bili ti začasno adaptirani prostori, danes ni jasno, glede na delovanje prof. Ribariča pa lahko sklepamo, da že na observatoriju na Golovcu v Ljubljani. Tako tudi ni jasno, kako je potekala selitev na stalno lokacijo, a v literaturi (Vidrih, 2009) najdemo nekatere podatke: od 14. aprila 1969 poteka v kleti observatorija na Golovcu v Ljubljani neprekinjeno beleženje dolgoperidonega seizmičnega nihanja tal, od 9. julija 1969 pa še neprekinjeno beleženje kratkoperidnih potresnih valov. Tako se Slovenija že zelo zgodaj pridruži razmeroma majhni skupini potresnih opazovalnic po vsem svetu z zelo visokimi standardi seizmičnega opazovanja, ki omogočajo širokopasovno trikomponentno opazovanje seizmičnosti. Potresna opazovalnica sicer nikoli ni bila del WWSSN, saj razen dolgoperidnih seizmometrov ni imela enake oziroma standardizirane opreme kot opazovalnice WWSSN. Tudi ni bila financirana enako kot potresne opazovalnice WWSSN in seizmogramov ni pošiljala v ZDA, a je sodelovala z vsemi svetovnimi centri, jim dostavljala analize seizmografov slovenskih strokovnjakov ipd. Do neke mere je tudi upoštevala postopke, predpisane za omrežje WWSSN, a je tudi odstopala od nekaterih zahtev, predvsem to velja za prenosno funkcijo dolgoperidnih sistemov.

Oprema trikomponentnega širokopasovnega sistema v Sloveniji

Dolgoperidni sistem (slika 1) so sestavljali dva horizontalna seizmometra (model S-5007-H) z maso uteži 10,7 kg in vertikalni seizmometer (model S-5007-V) podjetja Sprengnether z maso uteži 11,2 kg, ki so bili konstrukcijsko kopija seizmometrov press-weing in

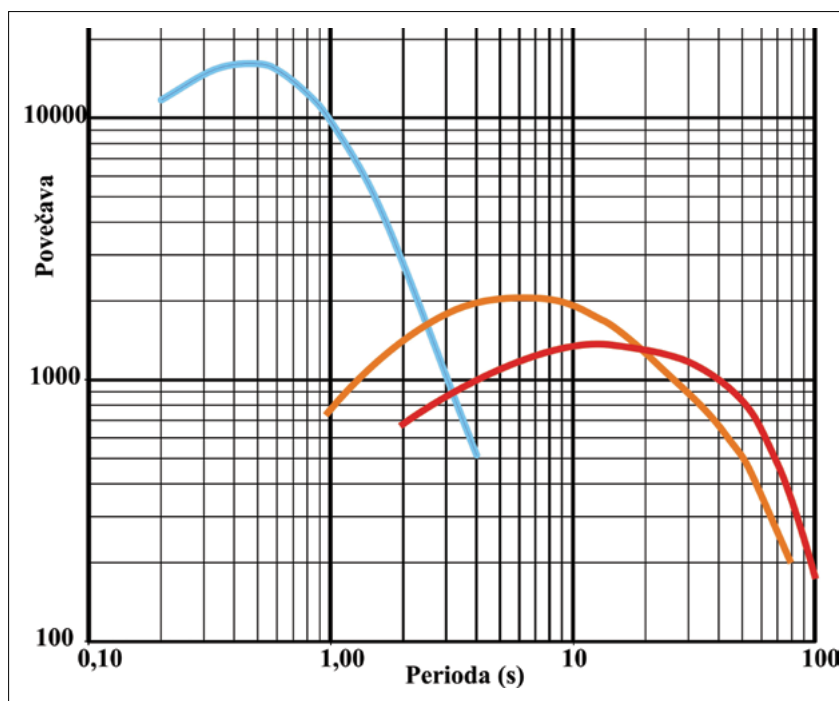


Slika 2: Na dolgoperiodnem seizmogramu komponente Z, ki se je začel 13. oktobra 1997 ob 5:45 po UTC in končal 15. oktobra 1997 ob 6:12 po univerzalnem koordiniranem času (UTC), so zapisi potresov v južni Grčiji, na Fidžiju in ob osrednji obali Čila. (avtor: P. Sinčič)

Figure 2: On the long-period seismogram of the Z component that started on 13 October, 1997 at 5:45 UTC and ended on 15 October 1997 at 6:12 UTC, earthquakes occurring in south Greece, on the Fiji islands, and near the central coast of Chile were recorded (Author: P. Sinčič)

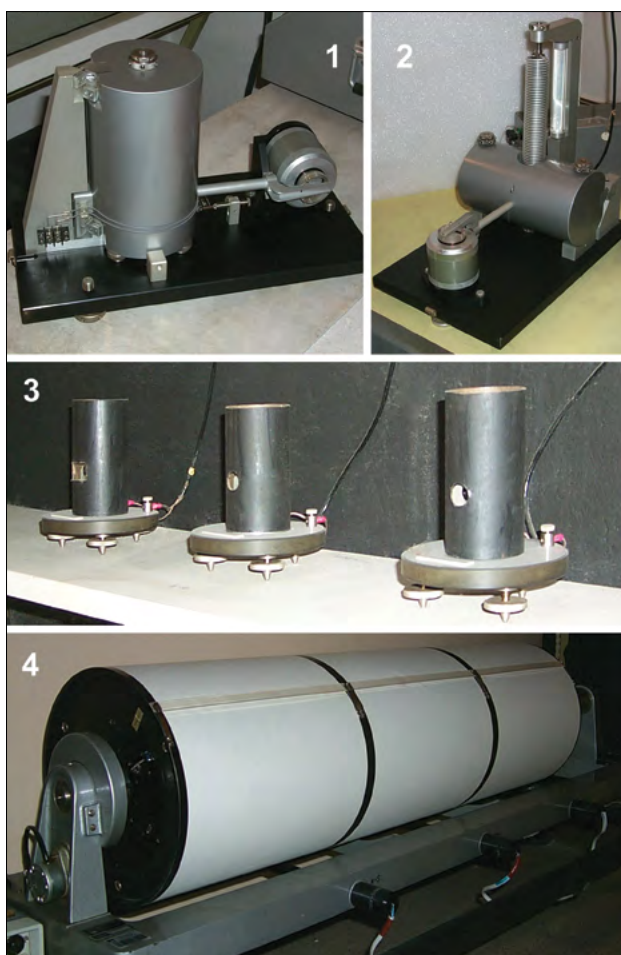
enakega modela kot seizmometri, uporabljeni v dolgoperiodnih sistemih WWSSN. Elektrodinamični seizmometri so imeli hitrostni izhod, lastna perioda pa je bila teoretično nastavljiva med 6 in 60 s, vendar so pri seizmometrih nastali nelinearni pojavi, če je bila perioda nastavljena nad 25 s. Zanimivo je, da so imeli horizontalni seizmometri, postavljeni na AGO, nastavljeno nižjo lastno periodo (8,2 s), kot je bila lastna perioda vertikalnega seizmometra (15,7 s), ter so se po tem razlikovali od mednarodnih priporočil in nastavitvev WWSSN. Prenosna funkcija vodoravnih komponent se je tudi razlikovala od prenosne funkcije navpične komponente. Danes lahko sklepamo, da se je prof. Ribarič za take parametre na horizontalnih komponentah odločil zaradi večjega poudarka na beleženju regionalnih potresov (potresov z žariščem na območju

nekdanje Jugoslavije). Za zapis signalov seizmometrov na fotografski papir je skrbel 90-sekundni torzijski galvanometer (Lehner Griffith, model GL-261; proizvajalec Teledyne Industries). Galvanometer sestavljata tuljava in zrcalo, pripeta navpično na isto torzijsko os, ta pa je pripeta na ohišje. Ker je galvanometer nizkoprepustni filter, vpliva na prenosno funkcijo celotnega sistema. Galvanometer je bil en meter oddaljen od registrirnega bobna (Sprengnether, model R-6007), kjer so bili pritrjeni trije na svetlobo občutljivi papirji velikosti 90 x 30 cm, za vsako komponento po eden. Posamezni papir je bil na rotacijski boben pritrjen s podolgovato stekleno letvico. Svetlobni vir je bila žarnica na dnu registratorja. Vsaka komponenta je imela svoj vir svetlobe in lečo za usmerjanje žarka, svetlobni žarek se je od zrcalca na galvanometru odbijal na fotografski papir.



Slika 3: Prikaz prenosne funkcije kratkoperiodnega (modra) seizmografa in dologoperiodnega seizmografa: vodoravna rjava in navpična rdeča komponenta (avtor: I. Tasič)

Figure 3: Response curves for a short-period seismograph (blue) and a long-period seismograph: brown for the horizontal component and red for the vertical component (Author: I. Tasič)



Slika 4: Kratkoperiodni trikomponentni seizmograf je imel te komponente:

1. dva vodoravna seizmometra lehner & griffith SH-216,
 2. navpični seizmometer lehner & griffith SV-215,
 3. trije galvanometri lehner & griffith GS-250,
 4. registrirni bobna teledyne DR-273.
- (avtor: P. Sinčič)

Figure 4: The short-period three component seismograph consists of:

1. Two horizontal seismometers (Lehner & Griffith SH-216)
 2. A vertical seismometer (Lehner & Griffith SV-215)
 3. Three galvanometers (Lehner & Griffith GS-250)
 4. A drum recorder (Teledyne DR-273)
- (Author: P. Sinčič)

Zrcalce galvanometra se je obračalo glede na izhodni signal seizmometra, impedančna prilagoditev galvanometra in seizmometra je bila izvedena z uporovnim T členom. Hitrost vrtenja registrirnega bobna je bila 30mm/minuto, kar pomeni, da je bil papir popisan v 48 urah (v dveh dneh, slika 2). Boben je bil pokrit s kovinski pokrovom, ki je papir varoval pred nenačrtovano osvetlitvijo. Časovne označbe so bile določene tako, da se je vsako minuto svetloba za 2 s, na vsako uro pa za 4 s prekinila. Povečava vertikalne komponente pri nihajnem času 15 s je bila 1300. Povečava horizontalnih komponent pri nihajnem času 8 s je bila 2000 (slika 3). Leta 1991 so pri vnovičnem preverjanju kali-

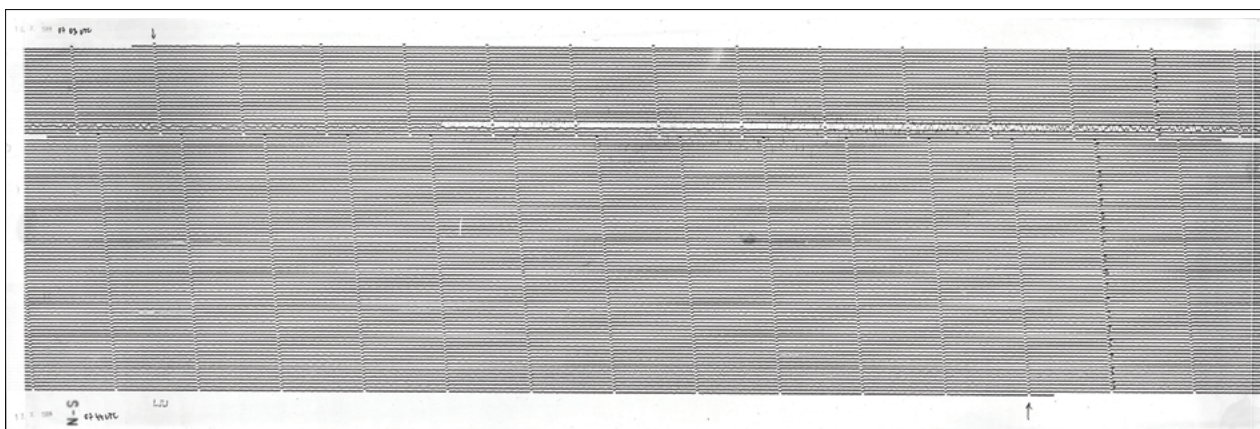
bracijskih vrednosti dolgoperiodnega sistema ugotovili, da sta bili horizontalni komponenti napačno polarizirani, kar pomeni, da je bil prvi zabeležen premik pri potresu v nasprotni smeri, kot je bilo pričakovano oziroma je bilo mednarodno dogovorjeno. Do te napake je verjetno prišlo leta 1982, ko je bila obnovljena celotna električna napeljava (Gostinčar, 1991).

Elemente trikomponentnega kratkoperiodnega seizmografa (slika 4) je razvilo in na začetku izdelovalo podjetje Lehner & Griffith. Med drugim je izboljšalo Benofov seizmometer. To je nizkoohmski elektromagnetni seizmometer z lastno periodo 1,5 s. Utež cilindrične oblike je bila težka 20 kg, kar je štirikrat manj kot pri Benofovih seizmometrih, zato so bili tudi bistveno manjši. Utež je preko križnih upogibnih vzmeti vpeta v ohišje. Navpični seizmometer ima za kompenzacijo gravitacije dodano vzmet v vertikalni ravnini. Vodoravni in navpični seizmometer sta se konstrukcijsko razlikovala, a sta imela enake lastnosti. Od leta 1964 je seizmometre izdelovalo podjetje Teledyne (NMAH, 2019) pod oznako SV-215 in SH-216. Navkljub drugemu proizvajalcu in drugačni oznaki pa je ta seizmometer med uporabniki obdržal ime »seizmometer lehner & griffith«.

Seizmometri so bili priključeni na kratkoperiodne galvanometre lehner & griffith GS-250. Lastna perioda teh galvanometrov, nastavljiva v območju med 0,2 in 1,5 s, je bila na observatoriju nastavljena na periodo 0,5 s. Tudi tukaj je bil galvanometer en meter oddaljen od registratorskega bobna model DR-273, kjer so bili pritrjeni trije na svetlobo občutljivi papirji. Mere papirja so bile enake kot pri dolgoperiodnem sistemu (slika 5).

Galvanometri in fotografska regulatorja za kratkoperiodni in dolgoperiodni sistem sta bila postavljena v istem prostoru na dveh višinah (slika 6). Zgornji regulator je bil namenjen dolgoperiodnemu, spodnji pa kratkoperiodnemu sistemu. Registrirni boben za kratkoperiodni sistem ni imel pokrova, ampak črno zaveso, ki je na svetlobo občutljivi papir varovala pred nenačrtovano osvetlitvijo. Posamezni list papirja velikosti 90 x 30 cm je bil na rotacijski boben pritrjen s podolgovato stekleno letvico. Tudi tukaj je bil svetlobni vir žarnica na dnu regulatorja. Vsaka komponenta je imela svoj vir svetlobe in lečo za usmerjanje žarka, svetlobni žarek se je od leče na galvanometru odbijal na fotografski papir. Zrcalce galvanometra se je obračalo glede na izhodni signal seizmometra, impedančna prilagoditev galvanometra in seizmometra je bila tudi izvedena z uporovnim T-členom. Hitrost vrtenja je bila nastavljena tako, da je bil papir popisan v enem dnevu, kar je pomenilo, da se je valj obrnil štirikrat v eni uri oziroma je imel hitrost 60 mm/min. Časovne označbe so bile določene tako, da je vsako začeto minuto označil dvosekundni, vsako začeto uro pa štirisekundni odmik svetlobnega žarka. Povečava sistema pri nihajnem času ene sekunde je bila 12.000.

Ura, ki je krmilila časovne oznake, je imela termostatiran oscilator s kremenovim kristalom in je bila točna pod



Slika 5: Na kratkoperiodnem seizmogramu komponente N-S, ki se je začel 16. oktobra 1988 ob 7.03 po UTC in končal 17. oktobra 1988 ob 7.44 po UTC, je zapis potresa z magnitudo 5,9, ki je nastal v Jonskem morju ob grški obali ob 12.34 po UTC. (avtor: P. Sinčič)

Figure 5: On the short-period seismogram of the N-S component that started on 16 October, 1988 at 7.03 UTC and ended on 17 October 1988 at 7.44 UTC, an earthquake occurring in the Ionian Sea near the west coast of Greece was recorded (Author: P. Sinčič)

0,1 sekunde na dan. Na izhodu je dajala minutne in urne časovne oznake, ki so jih uporabljali pisarji za registriranje.

Delovni prostori

Vsi sistemi razen ure so bili v kletnih prostorih observatorija (slika 7). Seizmometri so bili v ločeni sobi, ki je bila zaradi termične stabilnosti dodatno obgrajena (soba v sobi), na betonskem podstavku, ločenem od temeljev zgradbe. Galvanometri in registrirna bobna so bili v predprostoru brez oken. Zamenjava registrirnih papirjev je potekala ob rdeči svetlobi čim hitreje zaradi občutljivosti fotopapirja na svetlobo. Običajna osvetlitev se je uporabljala samo ob servisnih posegih. Ura je bila v merilnem prostoru v pritličju zgradbe skupaj z radijskim sprejemnikom za sprejem časovnih signalov in merilnikom odstopanj ure od točnega časa.

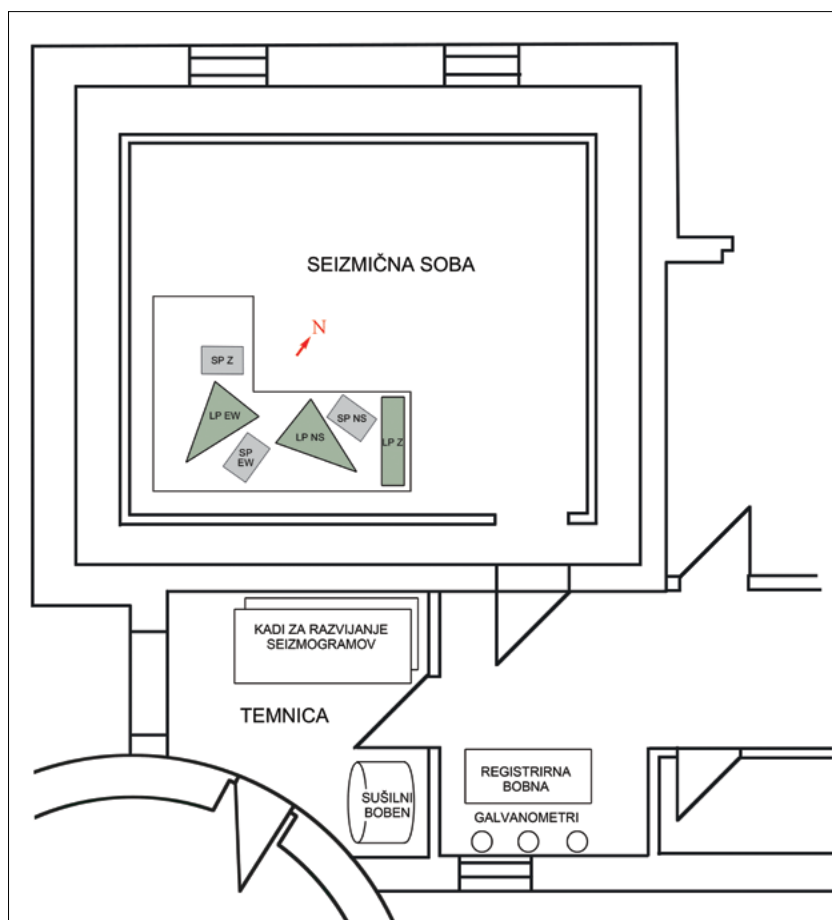
V sosednji sobi je bila temnica, namenjena razvijanju seizmogramov na fotopapirju. V njej so bili kadi z razvijalcem, fiksirjem in vodo za izpiranje ter sušilni boben. Enkrat dnevno za kratkoperiodne in vsak drugi dan za dolgoperiodne zapise, običajno zjutraj, je bilo treba zamenjati registrirni fotografski papir. Postopek menjave papirja na obeh registratorjih je potekal tako:

- izklop pogona vrtenja obeh bobnov in svetilk za zapisovanje;
- vpis ure in minute izklopa na spodnji rob enega od papirjev; čas izklopa so potem v nadzorni sobi vpisali na vse papirje pri zadnji oznaki časa na papirjih;
- vpis komponente (N-S, E-W ali Z) na posamezni list dolgoperiodnega registratorja; boben registratorja kratkoperiodnih zapisov je imel oznako vsake komponente že na bobnu zapisano s fosfornimi črkami, ki so se potem zapisale na fotopapir;
- pobiranje listov z obeh bobnov;



Slika 6: Galvanometri dolgoperiodnega sistema so bili nameščeni na polici nad galvanometri kratkoperiodnega sistema. (avtor: P. Sinčič)

Figure 6: Long-period galvanometers were installed on a shelf above the short-period galvanometers (Author: P. Sinčič)



Slika 7:

Namestitev seizmološke opreme v kletnih prostorih Astronomskeo-geofizikalnega observatorija Golovec v Ljubljani. V seizmični sobi so na temelju, ločenem od temeljev stavbe, nameščeni dolgoperiodni (LP Z, LP EW in LP NS) ter kratkoperiodni (SP Z, SP EW in SP NS) seizmometri. (avtor: P. Sinčič)

Figure 7:

Layout of the seismic equipment in the basement of the Astronomical Geophysical Observatory on Golovec in Ljubljana. In the seismic vault there are long-period (LP Z, LP EW in LP NS) and short-period (SP Z, SP EW in SP NS) seismometers installed on a pier separated from the building's foundations (Author: P. Sinčič)

- namestitev novih papirjev;
- vpis ure in minute vklopa bobnov;
- vklop obeh registrirnih bobnov.

Popisane papirje je operater potem v temnici razvil s fotografskim postopkom. Za delo v temnici je potrebna tema; edina luč, ki jo pri tem uporabljamo, je rdeča, namenjena fotografskim temnicam, na katero fotografski papir ni neobčutljiv. Najprej je operater potopil liste papirja v kad s pripravljenim razvijalcem. Čas razvijanja za posamezen list je bil približno tri minute. Proces razvijanja se potem prekine s spiranjem v vodi. Dokončno ustavimo proces razvijanja s potopitvijo listov za pet minut v fiksir ter jih po končanem postopku znova operemo z zadostno količino tekoče vode. Posamezne liste potem posušimo na sušilnem bobnu ali na zraku.

V nadzorni sobi je potem operater vsak posamezen list zapisov – seizmogram opremil z vpisom komponente, z datumom in časom vklopa oziroma začetka beleženja na vrhu seizmograma in z datumom in časom izklopa oziroma konca beleženja na dnu seizmograma.

Sklepne misli

Opisani seizmografi so bili v digitalni dobi vse manj v ospredju – sodobni digitalni seizmografi so bili bistveno boljši in natančnejši, podatki pa enostavnejši za obdelavo. Za analogne sisteme z zapisom na fotografski papir bi

dan danes veljalo, da imajo majhen dinamični razpon. Tudi fotografski papir je bil zelo velik strošek, cena dvoletne zaloge je bila primerljiva ceni širokopasovnega seizmometra STS-2. Leta 1996 je na lokaciji na Golovcu začel s stalnim beleženjem širokopasovni triosni seizmometer guralp CMG-40T, ki je imel bistveno boljše ločljivost od analognih sistemov in je prevzel vodilno vlogo širokopasovnega opazovanja (Tasič in Sinčič, 2018). Opremljenost državne mreže potresnih opazovalnic se je leta 2000 z nabavo vrhunskih zajemalnih enot quatterra Q730 in programskega paketa Antelopa, ki je poleg analize skrbel tudi za arhiviranje digitaliziranih seizmoloških podatkov, še bistveno izboljšala. Z arhiviranjem digitalnih podatkov se je pomembnost zapisov analognih fotooptičnih seizmografov še dodano zmanjšala, morda celo zaključila. Leta 2004 je bil kupljen širokopasovni seizmometer STS-2, ki je po svojih lastnostih vodilni v svetovnem seizmičnem opazovanju, a ga na podstavku za seizmometre v kleti observatorija na Golovcu ni bilo mogoče namestiti, ker so seizmometri za fotooptični seizmografe zasedali celoten prostor. Vsi ti razlogi so povzročili, da sta tako kratkoperiodni kakor tudi dolgoperiodni fotooptični seizmograf prenehala delovati 21. decembra 2004. Na mestu, kjer so bili postavljeni ti seizmometri, je od leta 2005 naprej postavljen seizmometer STS-2.

Opisani analogni sistemi so v svojem času pomenili vrhunec seizmologije in so skupaj z drugimi sistemi po svetu pomembno prispevali k opazovanju seizmičnosti in raziskovanju Zemljine notranjosti.

Viri in literatura

1. Bormann, P. (ed.), 2002. IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice. GeoForschungsZentrum Potsdam, Vol. 1, poglavje 3, 1–94.
2. Gosar, A., 2012. Petdeseta obletnica svetovnega standardiziranega seizmografskega omrežja (WWSSN). Ujma 26, 295–297.
3. Gostinčar, M., 1991. Kalibracija LP LJU. Seizmološki zavod R Slovenije, Ljubljana.
4. LaCoste, L., 1988. The zero-length spring gravity meter. Geophysics. 7. 10.1190/1.1439525
5. Martineau, K., 2012, Press-Ewing Seismograph on Jeopardy! (<https://blogs.ei.columbia.edu/2012/06/07/press-ewing-seismograph-on-jeopardy/>) (dostopano 14. 4. 2019).
6. Okal, E., 2015. Historical seismograms: Preserving an endangered species. GeoResJ. 6. 10.1016/j.grj.2015.01.007.
7. NMAH, 2019. National Museum of American history, 2019. Three-Channel Drum Photographic Recorder (WWSSN). (https://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_1445903) (dostopano 15.4.2019).
8. Peterson, J., Hutt, C. R., 2014. World-Wide Standardized Seismograph Network: A. Data Users Guide. Open-File Report 2014–1218.
9. Press, F., Ewing, M., Lehner, F., 1958. A long period seismograph system. Eos Trans. AGU, 39(1), 106–108, doi:10.1029/TR039i001p00106.
10. Sinčič, P., Vidrih, R., Deterding, M., 1997. Zapisi potresov skozi čas. Ujma 11, 178–184.
11. Sinčič, P., Vidrih, R., 1993. Mreža potresnih opazovalnic v Sloveniji. Ujma 7, 130–137.
12. Skoko, D., Mokrović, J., 1982. Andrija Mohorovičić. Školska knjiga, Zagreb.
13. Tasič, I., Sinčič, P., 2018. Prva avtomatska digitalna mreža potresnih opazovalnic v Sloveniji. Ujma 32, 257–264.
14. Vidrih, R., 2009. Nemirna Zemlja: ob 50-letnici moderne seizmologije na Slovenskem. Tehniška založba Slovenije.