

STABILNOST PRENOSNE FUNKCIJE SEIZMOMETROV V VRTINI

Long-term stability of borehole seismometer transfer properties

Izidor Tasič* UDK 550.34.03:681.5.033.5

Povzetek Abstract

Predstavljamo stabilnost prenosne funkcije širokopasovnih seizmometrov CMG 40TBH za namestitve v vrtine, ki so v državni mreži potresnih opazovalnic. Ker so ti seizmometri v vrtinah v globini 20 metrov, so v toplotno stabilnem okolju in zato primerni za kontrolo stabilnosti parametrov prenosne funkcije. Stabilnost preverjamo s kalibracijskim signalom v obliki stopnice, ki ga prožimo s kalibracijskim modulom zajemalne enote Quanterra Q730. Ker zaradi rekonstrukcijskega filtra na izhodu iz kalibracijskega modula, ki vpliva na kalibracijski signal, ne moremo uporabiti klasičnih algoritmov, smo sami razvili postopek za natančno analizo odzivov seizmometrov. Analiza je pokazala, da se parametri prenosne funkcije spreminjajo skozi čas, vendar so te spremembe majhne in zaenkrat niso potrebni popravki v parametrih prenosne funkcije seizmometra.

Borehole seismic stations in the Slovenian National Seismic Network are equipped with Quanterra Q730 data loggers and Güralp CMG-40TBH broadband seismometers. Although the manufacturer of the seismometer guarantees the long-term stability of the sensor transfer properties, a question regarding this guarantee arises, and thus sensor calibration needs to be performed periodically. Typical parameters for broadband seismometers at low frequencies are damping and its natural period. On the calibration sheet we found that for CMG-40T seismometers the natural period is 30 seconds and the damping factor is 0.707. In order to check the stability of the seismometer it is sufficient to evaluate these two parameters only. We will present the stability of these parameters for borehole seismometers, which are in a stable thermal environment. Analysis shows that the parameters change over time, but that these changes are not critical, even for a period longer than 10 years.

Predstavitev

Sodobni širokopasovni seizmometri kljub višji ceni izpodrivajo pasivne seizmometre tudi v lokalnih seizmoloških mrežah, ki so namenjene beleženju lokalnih potresov, ker imajo obilo prednosti. Sodobni seizmometer pretvarja premik tal v električni signal. Pasivni seizmometri pretvarjajo v električni signal odmik uteži iz ravnovesne lege in delujejo zato na omejenem frekvenčnem pasu. Širokopasovni seizmometri delujejo po načelu ravnovesja sil: premik uteži se 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, veliko dinamično območje, poleg tega je prenosna funkcija na frekvenčnem območju, ki je zanimivo za analizo lokalnih potresov, relativno ravna. Tudi parametri prenosne funkcije so stabilnejši. Proizvajalci zagotavljajo, da se zaradi uporabe povratne zanke prenosna funkcija ne spremeni tudi po daljšem časovnem intervalu, zagotovo pa je stabilnejša kakor pri klasičnih seizmometrih. Prenosna funkcija širokopasovnih seizmometrov, ki jo navede proizvajalec,

običajno velja za vse seizmometre iste vrste, njena natančnost pa je temu primerna.

Stabilnost prenosne funkcije seizmometrov preverjamo z rednimi pregledi v daljšem časovnem obdobju. Pregled lahko izvedemo na več načinov. Lahko pridobimo absolutne vrednosti parametrov ali pa jih ugotavljamo relativno glede na izbrane referenčne podatke. Kateri postopek bomo uporabili, je odvisno od več dejavnikov: tehnoloških zmožnosti, cene, časa, ki je na voljo.

Neposredno določamo prenosno funkcijo seizmometra na stresalni mizi, kar ima precej pomanjkljivosti. Stresalne mize so običajno narejene za določeno vrsto seizmometra, natančnost je večinoma slaba izven frekvenčnega območja 0.5 to 5 Hz (Bormann, 2002), senzor moramo s potresne opazovalnice prenesti v laboratorij, kar je večinoma časovno zamudno, za nekatere vrste seizmometrov, predvsem za tiste, ki so postavljeni v vrtino, pa je to praktično nemogoče.

Preskušanje sistema na kraju potresne opazovalnice je mogoče s kalibracijskimi signali (Plešinger, 1998). Za to potrebujemo generator signalov in napravo za zajemanje kalibracijskega signala in odziva seizmometra, ki mora imeti vgrajeno kalibracijsko tuljavo za posnemanje nihanja

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



Slika 1. Potresna opazovalnica Goliše (oznaka GOLŠ), kjer je seizmometer nameščen v vrtini.
 Figure 1. Goliše seismic station (GOLŠ), where the borehole seismometer is installed.



Slika 2. Seizmometer CMG 40TBH v jaški potresne opazovalnice pred namestitvijo v vrtino.
 Figure 2. CMG-40TBH seismometer in a vault at the seismic station before installation in the borehole.

tal. [Kalibracijsko tuljavo imajo danes vgrajeni vsi pomembnejši širokopasovni seizmometri.] Priprava in izvedba teh meritev pomeni obisk potresne opazovalnice in preureditev merilnega sistema začasne meritve kalibracijskih signalov in odzivov. S tem posegom povzročimo začasno toplotno nestabilnost opazovanega sistema, kar lahko vpliva na kakovost meritve, saj mora biti v neposredni okolici nekaterih širokopasovnih seizmometrov temperatura stabilna na manj kakor 0,1 stopinje na dan. Preskušanje potresne opazovalnice povzroči izpad seizmičnih podatkov, saj opazovalnica v tem času ne beleži potresnih dogodkov.

Za nadzor stabilnosti parametrov prenosne funkcije lahko uporabimo tudi kalibracijske module, ki so vgrajeni v sodobne seizmološke digitalne zajemalne enote. Osnovna naloga teh enot je, da pretvarjajo analogni signal iz seizmometra v digitalnega, ga časovno uskladijo z UTC časom in prenašajo preko protokola TCPIC v središče za obdelavo seizmoloških podatkov, lahko pa ga tudi shranijo na lokalni spominski enoti. Če ima ta enota vgrajen kalibracijski modul, lahko tudi z njo ustvarimo kalibracijske signale in jih pošljemo na kalibracijsko tuljavo v seizmometru. Te signale lahko prožimo daljinsko in zato naša navzočnost na potresni opazovalnici ni potrebna, zaradi česar ostane prostor, kjer je seizmološki sistem, zaprt in toplotno nemoten, poleg tega je sistem takoj po končani kalibraciji v delujočem stanju brez dodatnih opravil. Pomanjkljivost tega postopka je, da je zabeležen samo odziv sistema na kalibracijske signale, na pa tudi kalibracijski signali, katerih izbira je zelo omejena, kakovost signalov pa je lahko slabša od želene. Zato vgrajeni kalibracijski modul običajno ne omogoča absolutne kalibracije, lahko pa ga uporabimo za relativno kontrolo stabilnosti prenosne funkcije. Slednje pride v poštev predvsem pri sistemih, ki jih ne moremo prestavljati, npr. pri seizmometrih, ki so nameščeni v vrtinah.

Za relativno kontrolo stabilnosti prenosne funkcije je pomembno, da širokopasovni seizmometri v nizkofrekvenčnem spektru delujejo kakor pasivni seizmo-

metri, katerih prenosno funkcijo opišemo s sistemom drugega reda [Wielandt, 2002]. Na tem frekvenčnem območju jih zato lahko opredelimo s samo dvema parametroma: kritičnim dušenjem (β) in lastnim nihajnim časom (T_0). Teoretično lahko vrednosti teh dveh parametrov določamo s kalibracijskim signalom v obliki idealne stopnice [Heaviside funkcije] [Scherbaum, 2001]. V praksi tak kalibracijski signal nikoli ni idealen.

Seizmometri v vrtini v Sloveniji

Na svetu so trije komercialno dosegljivi seizmometri za namestitev v vrtino: seizmometer KS54000 podjetja Geotech Instruments [Geotech, 2008] in dva seizmometra podjetja Guralp, seizmometer CMG3TBH [Guralp, 2008a] in seizmometer CMG 40TBH [Guralp, 2008b]. Prva dva seizmometra sta zelo občutljiva. Seizmometer KS-54000 deluje na frekvenčnem območju od 0.003 do 5 Hz in je namenjen predvsem beleženju nizkofrekvenčnih dogodkov (teleseizmov). Standardni CMG3TBH deluje na frekvenčnem območju od 0.0083 do 50 Hz. Seizmometri razreda CMG 40T spadajo v razred srednje občutljivih seizmometrov s standardnim frekvenčnim območjem med 0.033 in 50 Hz. Poli in ničle prenosne funkcije za seizmometre podjetja Guralp niso teoretični, ampak pridobljeni s HP spektralnim analizatorjem in to tako, da s čim nižjim redom polov in ničel zadostijo dejanskemu poteku prenosne funkcije. Podjetje Guralp zagotavlja, da se navedena prenosna funkcija ujema z dejansko na 0,1 % v območju nizkih frekvenc in znotraj 2 % na območju visokih frekvenc [Guralp, 2008c]. Poli in ničle so podani v kalibracijski datoteki seizmometra, vendar so splošni, kar pomeni, da so za iste modele Guralpovih seizmometrov prenosne funkcije enake.

Leta 2002 je ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, postavil tri seizmometre vrste CMG 40TBH v vrtine na lokacijah: Gološe (oznaka opazovalnice GOLŠ, slika 1), Legarje (oznaka opazovalnice LEGS) in Podkum (oznaka opazovalnice PDKS) [Tasič, 2004]. Na slikah 2 in 3 je

Datum	22. 3. 2004		30. 3. 2005		23. 3. 2006		2. 4. 2007		14. 2. 2008	
Seizmometer	T4B26		T4B26		T4B26		T4B26		T4B26	
Sestavina	To	β	To	β	To	β	To	β	To	β
E-W	30.62	0.6989	30.67	0.6991	30.71	0.6993	30.75	0.6994	30.78	0.6996
N-S	30.65	0.7038	30.70	0.7041	30.75	0.7044	30.79	0.7045	30.82	0.7048
Z	30.51	0.7016	30.56	0.7017	30.60	0.7019	30.63	0.7020	30.66	0.7022

Preglednica 1. Primer izračunanih parametrov β in T_0 za vse tri sestavine seizmometra GurAlp CMG 40-TBH s/n T4B26 na lokaciji GOLS. Vrednosti kažejo na počasno, a očitno spreminjanje obeh parametrov s časom.

Table 1. Example of evaluated parameters as a function of time for the GurAlp CMG 40-T seismometer, s/n T4B26, installed at the GOLS seismic station. Time dependence is clearly seen.

dokumentiran postopek namestitve seizmometra v vrtino na lokaciji Legarje. Globina vrtine in s tem lega seizmometrov je okoli 20 m. Seizmometri so sidrani v vrtinah s finim kremenčevim peskom, ki še dodatno poveča temperaturno stabilnost v neposredni bližini seizmometra. Vsi seizmometri imajo raven hitrostni odziv v frekvenčnem območju med 50 Hz in 0.033 Hz (0,02 s - 30 s). V nizko-

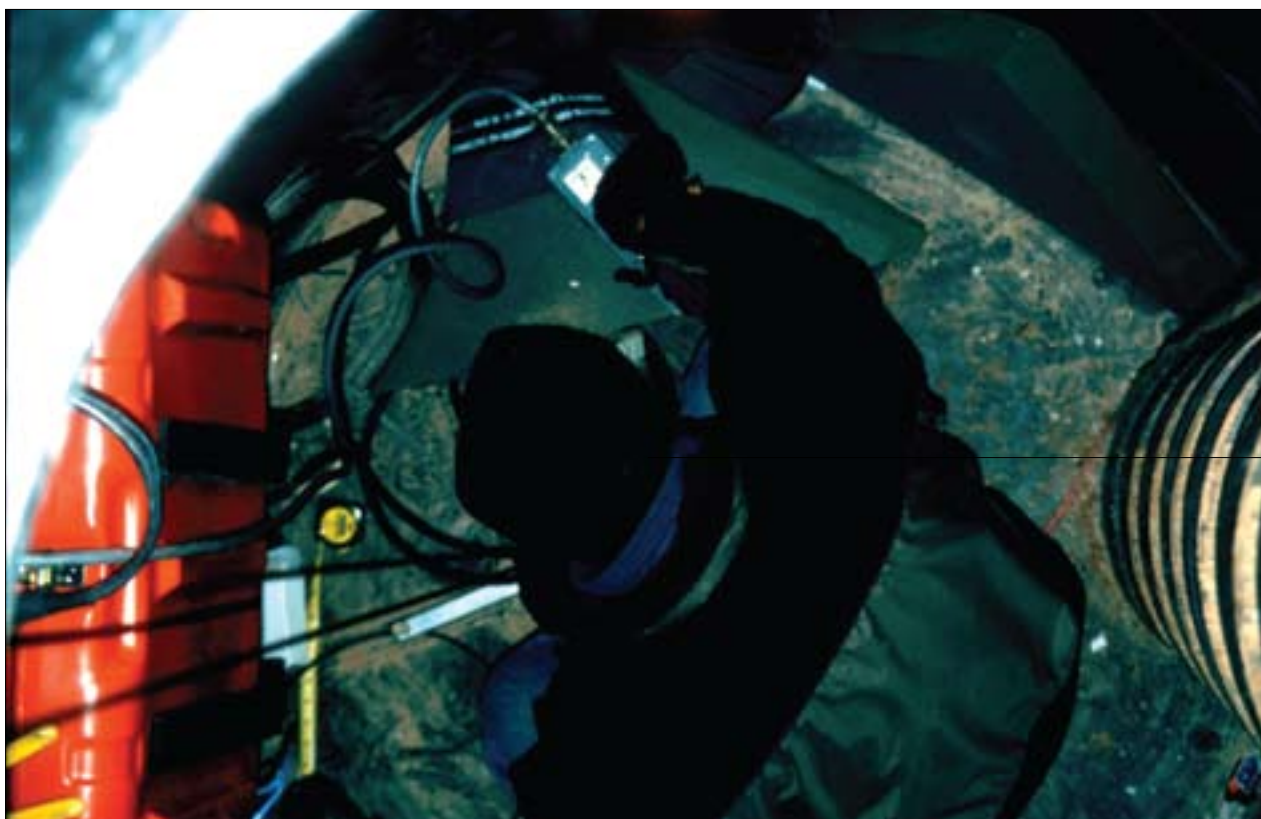
frekvenčnem spektru lahko prenosno funkcijo teh seizmometrov opišemo samo z dvema parametroma: dušenjem $\beta=0.707$ in lastnim nihajnim časom $T_0=30$ sekund (Guralp 2008b). Proizvajalec je navedel te iste vrednosti za vse seizmometre vrste CMG 40T, ki so postavljeni na slovenskih opazovalnicah. Za digitaliziranje in obravnavanje analognih seizmoloških signalov uporabljamo zajemalno enoto Quanterra Q730 ameriškega proizvajalca Quanterra. Vse naše enote Q730 imajo vgrajen kalibracijski modul, ki omogoča sinusni in stopničasti kalibracijski signal. Za zgladitev signala iz D/A pretvornika uporablja Quanterra Q730 rekonstrukcijski filter, ki ima vsaj en pol pri frekvenci 1 Hz. To pomeni, da potrebuje kalibracijski signal za posnemanje stropnice skoraj 0,5 s, da doseže največjo vrednost. To pa že vpliva na natančnost izračuna parametrov prenosne funkcije.

Poli (HZ)	Ničle (HZ)
$p_1 = (-1 - i) \times 0.02356$	$z_1 = 0$
$p_2 = (-1 + i) \times 0.02356$	$z_2 = 0$
$p_3 = -50$	$z_3 = 159$

Preglednica 2. Standardizirane vrednosti polov in ničel prenosne funkcije za seizmometre vrste Guralp CMG-40T, ki jih imamo v državni mreži potresnih opazovalnic

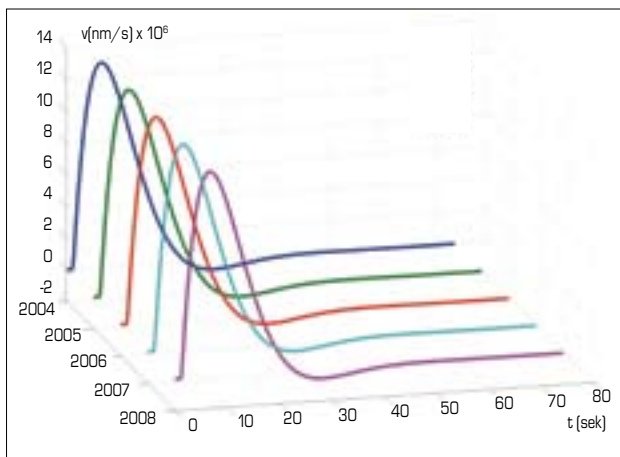
Table 2. Poles and zeros for standard Guralp CMG-40T seismometers

Od leta 2004 dalje prožimo vsaj enkrat letno kalibracijske signale preko kalibracijskega modula, ki je vgrajen v



Slika 3. Kontrola parametrov seizmometra med spuščanjem v vrtino.

Figure 3. Control of mass position when the seismometer was gently lowered down to the bottom of the borehole.



Slika 4. Odzivi seizmometra GurAlp CMG 40-TBH s/n T4B26 (opazovalnica GOLS) na kalibracijski signal v obdobju petih let. Razlike so tako majhne, da jih brez dodatne obdelave ne vidimo.

Figure 4. Responses of the step calibration signal for a 5-year period for the GurAlp CMG 40-TBH seismometer; s/n T4B26, located at GOLS. Small differences are invisible without additional treatment.

Quantero Q730 (Tasič, in ostali, 2005). Signale sprožimo daljinsko iz Ljubljane preko protokola TELNET. Pri analizi odziva seizmometra na kalibracijski signal smo naleteli na več težav. Čas začetka proženja kalibracijskega signala je sicer vpisan v lokalno statusno datoteko, vendar smo ugotovili, da se zapisana ura ne ujema natančno z dejanskim časom proženja. Tudi parametri rekonstrukcijskega filtra niso znani. Zato za analizo sistemov nismo mogli uporabiti algoritmov, ki so na voljo, ampak smo ga naredili sami. Algoritem analizira odziv seizmometrov, pri čemer ne potrebuje natančnega podatka o začetku kalibracijskega signala (izračuna ga sam), upošteva tudi seizmični šum, ki lahko vpliva na natančnost rezultata, kakor tudi vpliv neidealne oblike stopnice.

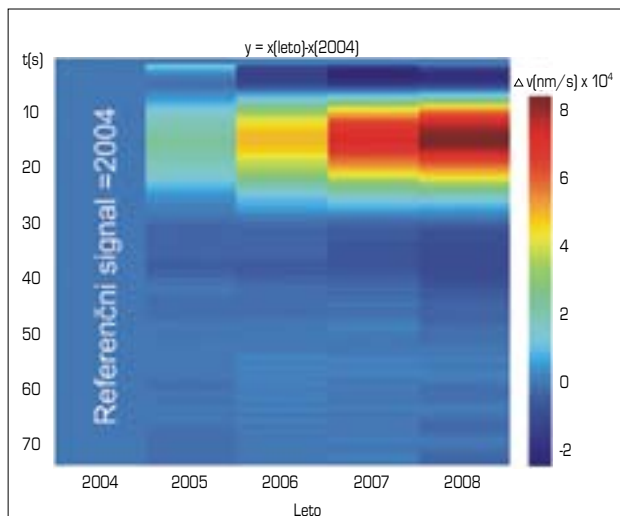
Analiza

Naša analiza je pokazala, da se tako kritično dušenje β kakor tudi lastni nihajni čas T_0 spreminjata s časom (preglednica 1, slika 5). Spremembe so sicer majhne (slika 4), vendar stalne. Enako težnjo smo zaznali na vseh treh seizmometrih vrste CMG 40TBH. Te podatke lahko

Datum	22. 3. 2004	30. 3. 2005	23. 3. 2006	2. 4. 2007	2. 4. 2008
$a_1 \times 10^{-3}$ [Hz]	-22.96	-22.93	-22.91	-22.88	-22.87
relativna napaka	2.54 %	2.67 %	2.76 %	2.89 %	2.92 %
$a_2 \times 10^{-3}$ [Hz]	-23.17	-23.13	-23.09	-23.05	-23.02
relativna napaka	1.63 %	1.83 %	2.00 %	2.16 %	2.29 %

Preglednica 3. Primer izračunanih parametrov a_1 in a_2 prenosne funkcije za sestavino seizmometra CMG 40TBH s/n T4B26 za vsako leto. Izračunana je tudi relativna napaka glede na podatek v kalibracijskem dokumentu.

Table 3. Calculated parameters a_1 and a_2 of the transfer function from evaluated parameters β and T_0 for the component of the Guralp CMG-40T seismometer, s/n T4B26, as a function of time. Relative error is calculated with reference to the information on the calibration sheet.



Slika 5. Preprosta analiza odzivov seizmometra na stopničast signal kaže, da se odzivi s časom počasi spreminjajo. Vse signale, predstavljene na sliki 4, smo odšteli od signala iz leta 2004 in razliko za lažjo predstavbo prikazali v barvni skali. Vidne so spremembe s časom.

Figure 5. Simple analysis of seismometer response signals from figure 4 shows the time dependence. The response signal from each year is subtracted from the signal of the year 2004. The difference is shown on a colour scale for better presentation.

neposredno povežemo s parametri prenosne funkcije za seizmometer CMG 40TBH. Prenosna funkcija za te seizmometre ima tri pole in tri ničle (preglednica 2). Zapišemo jo z enačbo

$$H(s) = k \cdot \frac{s^2}{(s-p_1)(s-p_2)} \cdot \frac{(s-Z)}{(s-p_3)} = kH_1(s)H_2(s)$$

Desna oblika enačbe kaže, da lahko prenosno funkcijo razdelimo na dva dela. Funkcija z oznako $H_1(s)$ predstavlja nizkopropustni filter in $H_2(s)$ visokopropustni filter. Če si natančneje ogledamo kompleksne pole prenosne funkcije, vidimo, da jih lahko opišemo v obliki: $p_1 = a_1 + ia_2$ in $p_2 = a_1 - ia_2$. Člena a_1 in a_2 lahko zapišemo tudi z dušenjem in lastnim nihajnim časom: $a_1 = -\beta/T_0$ in $a_2 = -(1-\beta^2)^{1/2}/T_0$. V kalibracijskem dokumentu seizmometrov sta a_1 in a_2 enaka za vse seizmometre in imata isto vrednost: -23.56×10^{-3} . To pomeni, da je $\beta = 0.7071$ in $T_0 = 30.01$.

Z našim algoritmom lahko iz podatkov, ki smo jih dobili za β in T_0 , zelo natančno določimo pola p_1 in p_2 , ki pripadata nizkopropustnemu filtru. Primer je v preglednici 3. S podatki iz vseh treh seizmometrov lahko ocenimo, kako se parametri prenosne funkcije neprenehoma »starajo«. Iz preglednice (preglednica 3) vidimo, da je staranje manjše, kakor je napaka med izračunanimi poli, in poli, ki so podani v kalibracijski datoteki.

Sklepne misli

Rezultati kažejo, da odstopajo podatki v kalibracijskih dokumentih seizmometrov od dejanskih vrednosti do 3%. Prenosna funkcija seizmometrov se s časom počasi spreminja, kar prispeva v desetih letih dodatno napako v velikosti dobrega odstotka. Natančnost parametrov prenosne funkcije v kalibracijskem dokumentu je manjša, kakor je časovno spreminjanje le-teh. Iz danih podatkov lahko ocenimo, da parametrov prenosne funkcije CMG 40TBH 20 let ne bo treba popravljati zaradi »staranja«, če bodo spremembe v tem obdobju linearne. Je pa potrebno sprotno preverjanje parametrov zaradi možnosti okvare ali večjih sprememb v elektroniki ali mehaniki seizmometra. Ker imamo zaradi poslovne tajnosti premalo podatkov o izdelavi seizmometra, težko ugotovimo vzrok časovnega spreminjanja njegove prenosne funkcije.

Viri in literatura

1. Bormann, P. (ed.), 2002. IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice, Geo Forschungs Zentrum Potsdam, Vol. 1, chapter 5, 1–46.
2. Geotech, 2008, <http://www.geoinstr.com/ks54000c.htm>, [navedeno 1. 4. 2008].
3. Guralp, 2008a, <http://www.guralp.com/products/3TB>, [navedeno 1. 4. 2008].
4. Guralp, 2008b, <http://www.guralp.com/products/40T>, [navedeno 1. 4. 2008].
5. Guralp, 2008c, <http://www.guralp.com/articles/20060410-technical-alternative-pz/support>, [navedeno 1. 4. 2008].
6. Plešinger, A., 1998. Determination of Seismograph System Transfer Functions by Inversion of Transient and Steady-State Calibration Responses. *Studia geoph. Et geod.*, 42, 472–500.
7. Scherbaum, F., 2001. *Of Poles and Zeros. Fundamentals of Digital Seismology*, Kluwer Academic Pub.
8. Tasič, I., 2004. Seizmometer v vrtini. *Potresi v letu 2002*. Agencija RS za okolje.
9. Tasič, I., Sinčič, P., Gostinčar, M. in Pfundner, I., 2005. *Kalibracija senzorjev v državni mreži potresnih opazovalnic*. Vidrih, R., ur., *Potresi v letu 2003*. Agencija RS za okolje.
10. Wielandt, E., 2002. Seismic sensors and their calibration, [online; navedeno 1. 4. 2008].