

# TRIOSNI ŠIROKOPASOVNI SEIZMOMETRI S POSTAVITVIJO SENZORJEV XYZ IN UVW

## THREE-AXIS BROADBAND SEISMOMETERS WITH XYZ AND UVW SENSOR CONFIGURATIONS

Izidor Tasič

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

### Povzetek

Seizmometri merijo nihanje tal v treh med seboj pravokotnih smereh, eden v navpični in dva v vodoravni smeri z usmeritvijo, ki je po mednarodnem dogovoru skladna s smermi neba (vzhod–zahod, sever–jug). Zato lahko pričakujemo, da so tako postavljeni tudi senzorji v sodobnih širokopasovnih triosnih seizmometrih. Taki postavitvi senzorjev pravimo XYZ-konfiguracija. Na začetku devetdesetih let prejšnjega stoletja pa se je na tržišču pojavil seizmometer z novo zasnovano postavitve senzorjev, kjer so trije med seboj pravokotni senzorji postavljeni tako, da z navpičnico tvorijo kot  $54,74^\circ$  (UVW-konfiguracija oziroma postavitev senzorjev, poimenovana cube-corner). To je bil zelo znani seizmometer STS-2 švicarskega podjetja Streckeisen. Danes, več kot 25 let pozneje, si tržišče delita oba koncepta skoraj enakovredno, oba pa imata svoje prednosti in slabosti, kar opisujemo v pričujočem članku. Tudi v državni mreži potresnih opazovalnic uporabljamo oba tipa seizmometrov.

### Abstract

Seismometers measure ground movements in three mutually perpendicular directions, one in a vertical and two in a horizontal direction, which are consistent with the cardinal directions (east-west, north-south) by international agreement. We can therefore expect that in modern broadband three-axial seismometers, all three sensors are also placed in the same way. This type of sensor arrangement is called an XYZ configuration. However, at the beginning of the 1990s a seismometer appeared on the market with a new sensor concept, where three of the rectangular sensors were arranged to form a  $54.74^\circ$  angle with the vertical (a UVW configuration or "cube-corner" sensor arrangement). This was the well-known STS-2 seismometer from the Swiss company Streckeisen. Today, more than 25 years later, seismometers with both concepts share the market almost equally, and both have their advantages and disadvantages, which are described in this article. In the Slovenian national seismic network, we use both types of seismometer.

## Uvod

Tla se neprestano tresejo (Tasič, 2015), vendar je to tresenje večino časa tako šibko, da ga zaznajo le zelo občutljivi instrumenti, ki jim pravimo seizmometri. Nihanje tal je večsmerno: tla nihajo tako v vodoravni ravnini kakor tudi v navpični smeri, zato imajo sodobni seizmometri tri med seboj pravokotno postavljene merilnike nihanja tal. Na tržišču prevladujejo merilniki nihanj, ki merijo gibanje tal glede na neko inercialno referenco (Tasič, 2018). Najpogosteje je to utež, ki je elastično vpeta na podlago preko ohišja. Ko tla nihajo s periodo, ki je manjša, kot je lastna perioda takšnega sistema, je utež pri miru. Razlika med lego ohišja in lego uteži je podatek o nihanju tal. Če tla nihajo s periodo, ki je večja, kot je lastna perioda sistema, utež sledi nihanju ohišja in poznati moramo povezavo med nihanjem uteži in podlage. Zakonitost vztrajnostne mase so uporabili že prvi seizmografi, ki so bili po svoji konstrukciji sistemi za merjenje nihanja tal v vodoravni ravnini, kjer na utež ne vpliva težnost, in so bili preprostejši za izdelavo; ter sistemi, ki so merili nihanje tal le v navpični smeri in so morali pri njih konstruktorji izničiti vpliv težnosti na utež.

To so dosegli s posebno razporeditvijo ene ali več vzmeti, tako da je bila komponenta sile, ki je kompenzirala vpliv težnosti na utež, konstantna, komponenta sile, ki je vračala utež v ravnovesno lego, pa je kar najmanj vplivala na meritev. Najpogosteje so uporabljali tip uteži lacoste (LaCoste, 1934). Razvil ga je LaCoste v tridesetih letih prejšnjega stoletja za dolgoperiodni navpični seizmometer in so ga pri konstrukciji dolgoperiodnih seizmometrov uporabljali vse do množičnega razvoja širokopasovnih seizmometrov, ki se je začel v devetdesetih letih prejšnjega stoletja.

## Seizmometri nekoč in danes

Danes merilniki v sodobnih širokopasovnih seizmometrih delujejo po zakonitosti povratne zanke. Še vedno je osnovna sestavina merilnika utež, povezana z ohišjem prek vzmeti, a se premik uteži uravnoteži (kompenzira) s povratno električno generirano silo, ki deluje na utež. To silo ustvari elektromagnet. Zaradi tega se utež premika skupaj z ohišjem, posredno pa merimo silo, s katero prisilimo utež, da kljub dinamični povezavi z ohišjem

prek vzmeti niha enako kakor ohišje (Wielandt, 2012). Elektronika v povratni zanki poskrbi, da sodobni širokopasovni seizmometri zelo natančno merijo na večjem frekvenčnem območju in so bolj stabilni, kot so to omogočali klasični seizmometri s premikajočo se utežjo oziroma nihalom. Sodobni komercialni seizmometri so sposobni meriti nihanje tal z amplitudami od nekaj deset nanometrov do nekaj milimetrov s periodo od nekaj desetink sekund pa tudi do šest minut (glej Nanometrics, 2019). Lzhodna napetost iz sodobnega seizmološkega merilnika je sorazmerna hitrosti nihanju tal (Wielandt, 2012) in se pozneje digitalizira in opremi z zelo natančnim časom v zajemalnih enotah ali digitalizatorjih. Povratna zanka je omogočila tudi zmanjšanje senzorja. Pri mehanskih seizmografih je prenos signala deloval prek mehanskih vzvodov, večja teža uteži pa je pripomogla k večjemu ojačenju. Dvokomponentni horizontalni mehanski seizmograf wiechert, ki je deloval v Ljubljani z daljšimi prekinitivami od leta 1926 do 1970 (Gostinčar in Vidrih, 1997), je imel 200-kilogramsko utež in je ojačil signal s faktorjem 160. Wiechert z utežjo 1000 kg je imel recimo skoraj 1000-kratno ojačenje signala. Pri elektrodinamičnih seizmometrih so bile mase uteži že manjše, električni signal, ki je nastal kot posledica nihanja tuljave (pritrjene na utež nihala) v stalnem magnetnem polju, pa se je lahko še dodatno ojačal. Kratkoperiodni elektrodinamični seizmometer tipa benioff – oblikovan je bil v tridesetih letih prejšnjega stoletja (Benioff, 1932), v šestdesetih letih pa so ga množično uporabili v omrežju WWSSN (Peterson in Hutt, 2014) – ima 107,5 kilogramsko utež, skupaj z galvanometrom in optičnim pisačem je imel s standardnimi nastavitvami 50.000-kratno ojačenje signala. Elektrodinamični kratkoperiodni seizmometer wilmore MK-II ima maso uteži 4,5 kg, skupna analogna povečava na observatoriju na Golovcu je 45.000-kratna. V sodobnih merilnikih s povratno zanko pa so mase uteži še manjše. Pri enem prvih komercialnih širokopasovnih seizmometrov s povratno zanko (STS-1) je bila masa uteži že okoli 0,6 kg (Wielandt in Streckeisen, 1982). Merilniki nihanj tal, vgrajeni v seizmometre, so danes veliki le nekaj centimetrov, mase uteži pa so od nekaj deset do tristo gramov, je pa dejanska masa uteži pri sodobnih seizmometrih »poslovna skrivnost« proizvajalcev. Manjše mase uteži so omogočile, da je pri navpičnih seizmometrih robustno vzmetenje lacoste (spiralno prenapete vzmeti) zamenjala listnata vzmet (Wielandt in Streckeisen, 1982). Uporaba listnate vzmeti je tudi omogočila uporabo temperaturno skoraj neobčutljivih materialov, kot je recimo invar, kar je neposredno povezano z manjšim instrumentalnim šumom (Willmore in Connell, 1963). Da pa se z listnato vzmetjo pridobijo iste lastnosti, kot jih ima vzmetenje lacoste, da je torej seizmometer uporaben tudi za dolge periode nihanj tal, se listnato vzmet obremenjeno, oziroma ukrivljeno, vpne v ležišče. Tako vpetje listnate vzmeti pa je matematično zelo zapletena konstrukcija. Pri seizmometrih STS-1 so modelirali vzmet numerično s postopkom končnih elementov (Wielandt in Streckeisen, 1982). Verjetno so ravno zapletenost vpetja vzmeti, njena nesimetrična oblika in izbira pravih materialov za vzmet glavni razlog, da je na svetu tako malo

proizvajalcev širokopasovnih seizmometrov. Miniaturizacija senzorjev je tudi zmanjšala prostor za namestitev senzorjev. Manjša prostornina seizmometra omogoča enostavnejšo termično izolacijo lokacije ter s tem bolj stabilno delovanje seizmometra pri dolgih periodah (Mali in Tasič, 2011).

Nenazadnje je miniaturizacija omogočila novo zasnovo postavitve senzorjev v triosnem seizmometru, ki je konkurenčna klasični XYZ-postavitvi.

## Klasična oziroma XYZ-konfiguracija

Sodobni širokopasovni seizmometri imajo vgrajene tri merilnike nihanj tal in jim zato pravimo triosni. Klasičen triosni seizmometer ima en senzor postavljen v navpični smeri, dva v vodoravni ravnini, vsi pa so med seboj postavljeni pravokotno oziroma ortogonalno. Tako postavitve imenujemo poenostavljeno XYZ, saj je skladna s kartezičnim koordinatnim sistemom in z mednarodnim dogovorom postavitve seizmometrov. Ti so postavljeni tako, da X meri nihanje tal v smeri vzhod–zahod, Y meri nihanje tal v smeri sever–jug in Z meri nihanje tal v navpični smeri (slika 1).

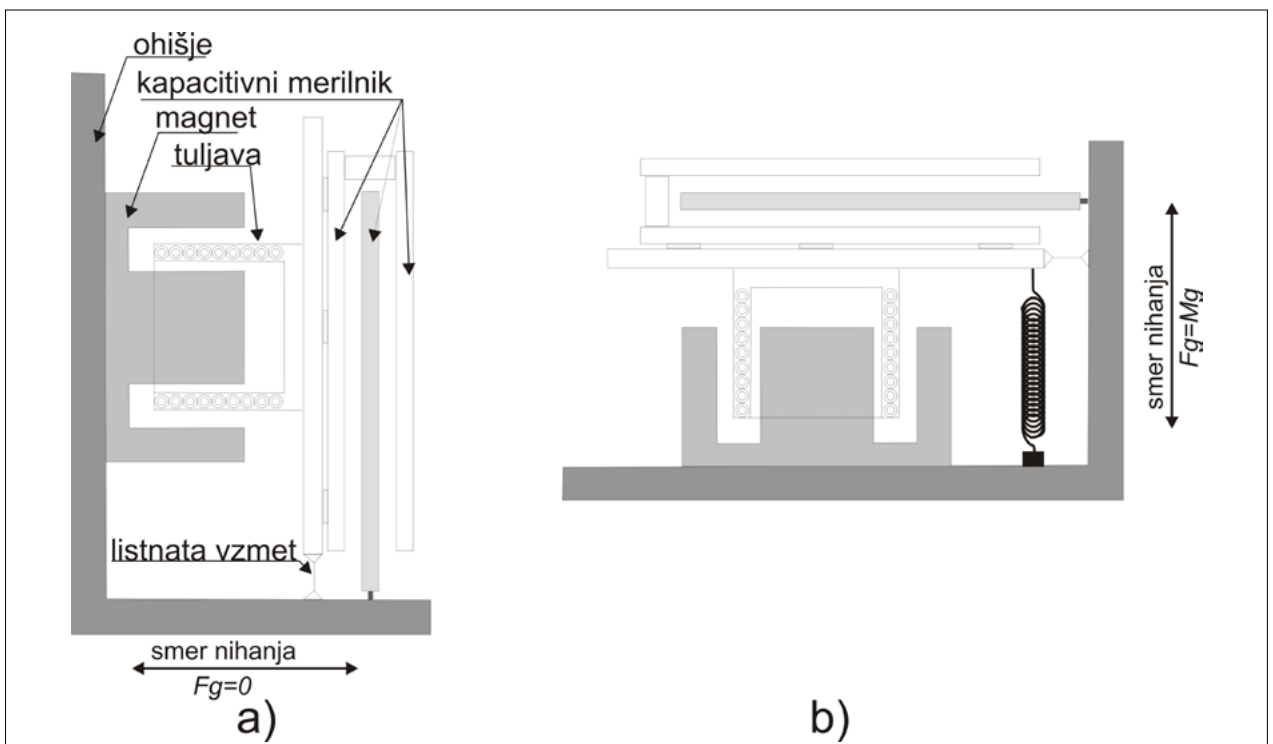
Tudi v sodobnih triosnih seizmometrih z XYZ-postavitvijo senzorjev je navpični senzor zaradi vpliva težnosti drugačen od vodoravnega senzorja. Razlike so prikazane v poenostavljeni shemi (slika 2), saj je dejanska zasnova sodobnega senzorja mnogo bolj zapletena. Za merjenje premikov v širokopasovnih seizmometrih se najpogosteje uporablja kapacitivni merilnik, ki posreduje elektronični informacijo o premiku uteži. Sredinska kondenzatorska plošča je pritrjena na ohišje, zunanji kondenzatorski plošči pa na utež, ki je prek listnate vzmeti pritrjena na ohišje. Na uteži je tudi tuljava, ki je v magnetnem polju stalnega magneta, pritrjenega na ohišje, in skrbi za povratno silo na utež. Če merilnik meri navpične premike, je z dodatno vzmetjo (slika 2b) ali drugačne oblikovano oziroma vpeto osnovno listnato vzmetjo vpliv težnosti izničen. Dva vodoravna in en navpični merilnik so nameščeni na osnovni plošči znotraj kovinske posode, ki je tlačno izolirana. Elektronika, ki krmili elemente povratne zanke, in pomožna elektronika sta nad senzorji (slika 3).

Zaradi različnih razlogov, od temperaturnih sprememb in staranja do nagnjenosti podlage, se lahko utež premakne iz ničelne lege. Zato je pomemben element vsakega sodobnega širokopasovnega seizmometra elektronski avtomat, ki skrbi za ponastavitev uteži v ničelno lego. Pri vodoravnih senzorjih to dosežemo z nagibom ohišja senzorja (slika 4, oznaka c). Nekoliko bolj zapleten je postopek pri navpičnih senzorjih. Da se postavi utež navpičnega senzorja v ničelno lego, sta na voljo dve možnosti. Pri prvi z izvlečenjem premikajoče mase v »uteži« vplivamo na težišče sistema in s tem na položaj mirovne lege celotne uteži (slika 4, oznaka a). Pri drugi



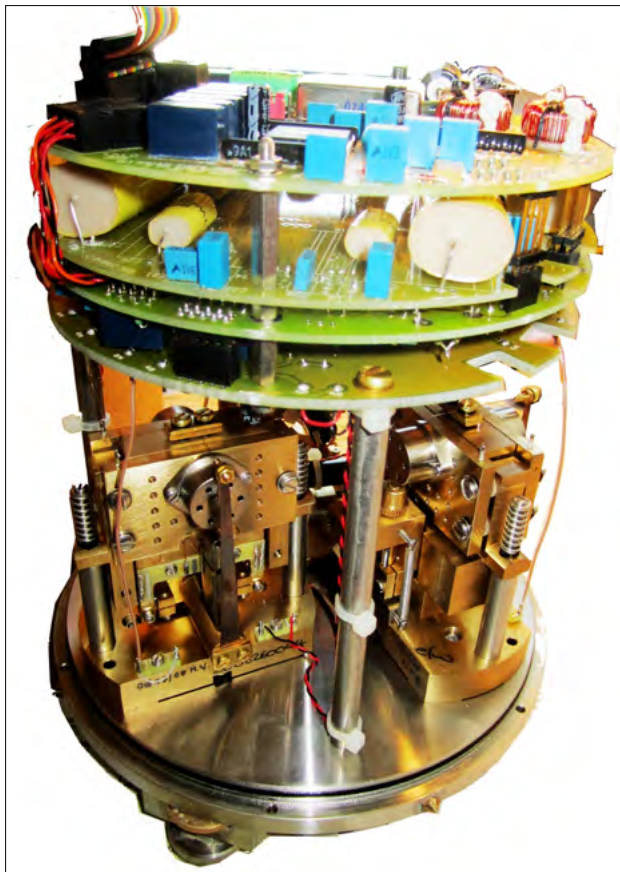
Slika 1: Lega treh enoosnih seizmometrov »Hilger and Watts« modela SG 450 (Wilmore MKII) na Observatoriju na Golovcu. Seizmometer desno zgoraj je postavljen v smeri vzhod-zahod (oznaka E-W), levo zgoraj je postavljen v smeri sever-jug (oznaka N-S), seizmometer spodaj v sredini slike pa meri nihanje tal v navpični smeri. (foto: I. Tasič)

Figure 1: Position of the three uniaxial seismometers in the "Hilger and Watts" model SG450 (Wilmore MKII) at the Observatory at Golovec. The seismometer on the right is positioned in the East-West direction (E-W mark), the one on the left is positioned in the North-South direction (N-S mark), and the seismometer below them and in the middle of the picture measures ground motion in the vertical direction. (Photo: I. Tasič)



Slika 2: Shematski prikaz osnovnih elementov a) vodoravnega in b) navpičnega seizmometra s povratno zanko. (avtor: I. Tasič)

Figure 2: Schematic representation of the basic elements of the a) horizontal and b) vertical seismometer with a feedback loop (Photo: I. Tasič)



Slika 3. Notranjost širokopasovnega seizmometra z XYZ-konfiguracijo senzorjev. Na osnovni plošči sta vidna dva med seboj pravokotno postavljena senzorja za zaznavanje vodoravnega nihanja tal. Elektronika je nameščena nad senzorji. (foto: I. Tasič)

Figure 3: Inside view of a broadband seismometer with an XYZ configuration of sensors. On the base plate there are two mutually perpendicular sensors for detecting the horizontal oscillation of the ground. The electronics are positioned above the sensors. (Photo: I. Tasič)

pa to dosežemo s spremembo napetost vzmeti (slika 4, oznaka b). Zaradi načina nastavitve ničelne lege vodoravnega senzorja se lahko zgodi, da osi navpičnega in vodoravnega senzorja niso več pravokotne med seboj.

## Simetrična oziroma UVW-konfiguracija

Leta 1995 je Galperin za namene raziskovanja nahajališč nafte predstavil alternativno razporeditev senzorjev (Graizer, 2009). Trije senzori v seizmometrih z Galperinovo konfiguracijo so še vedno pravokotno postavljeni med seboj, a niso več postavljeni v osnovnih oseh kartezičnega koordinatnega sistema XYZ, ampak so nagnjeni pod enakim kotom  $54,74^\circ$  glede na navpično os (sliki 5 in 6) oziroma  $35,26^\circ$  glede na vodoravno ravnino. Samo pri tem kotu ( $54,74^\circ$  glede na navpično os) tvorijo vse tri osi, če so med seboj enakomerno razporejene, v skupni

točki pravi kot ter so tako skupaj ortogonalni koordinatni sistem, rotiran glede na kartezično postavitev osi. Preslikava osi senzorjev na vodoravno ravnino nam pokaže tri daljice v obliki trikrake zvezde (slika 5), enake simbolu avtomobila mercedes. Daljice imajo skupno točko v središču koordinatnega sistema ter so med seboj simetrično odmaknjene za  $120$  stopinj. Prvi sodobni širokopasovni komercialni seizmometer, ki temelji na Galperinovi konfiguraciji, je bil STS-2 švicarskega podjetja Streckeisen. Predstavili so ga leta 1990 in je zaradi nizkega instrumentalnega šuma ter velike dinamike takoj zasedel vodilno mesto med širokopasovnimi instrumenti, ki merijo nihanje tal v frekvenčnem območju med  $50$  Hz in  $0,0083$  Hz ( $120$  sekundami). Taka postavitev senzorjev se imenuje tudi simetrična, saj težnost enako vpliva na vse tri senzore (slika 6).

To je pomembna prednost pri izdelavi senzorjev, saj so vsi trije senzori enaki. Osi koordinatnega sistema so označene z oznakami U, V in W (Wielandt, 2012), zato na kratko pravimo temu sistemu kar UVW. Vizualno si tak koordinatni sistem najlaže predstavljamo kot kocko, ki jo postavimo na eno od oglišč, vse tri osi pa so pod enakim kotom nagnjene od ravnine. Za tako postavitev uporabljamo tudi izraz cube-corner. To kocko lahko nato zavrtimo okoli navpične osi za  $360$  stopinj, kar pomeni, da obstaja nešteto možnih orientacij UVW-postavitve koordinatnega sistema, a se do zdaj v seizmologiji uporablja taka orientacija, da je os U v ravnini osi X in Z. Pri tem sta dve možnosti (Townsend, 2014). Ena je, da je os U postavljena v polravnino, ki jo tvorita os Z in negativna os X. Tak sistem uporablja podjetje Streckeisen pri seizmometrih tipa STS-2. Druga možnost je, da je U v polravnini, ki jo tvorita os Z in pozitivna os X, kot je pri seizmometrih tipa trillium podjetja Nanometrics. Koordinatni sistem UVW je torej rotacija koordinatnega sistema XYZ. Analogni signal, ki ga zabeležijo vse tri komponente v koordinatnem sistemu UVW, se transformira v kartezični koordinatni sistem XYZ že v samem seizmometru, za kar poskrbi elektronika.

Pri senzorjih tipa galperin so za nastavitve ničelne lege uteži uporabne vse tri metode, ki smo jih opisali pri seizmometru z XYZ-konfiguracijo senzorjev (Townsend, 2014). Prilagajanje napetosti vzmeti uporablja Nanometrics pri trilliumu, spremembo težišča mase pa Streckeisnov STS-2. Bistvena prednost pri teh dveh metodah pred nagibnim postopkom je, da so osi še vedno pravokotne druga na drugo, četudi seizmometer ni postavljen idealno vodoravno na podlago.

## Prednosti in slabosti

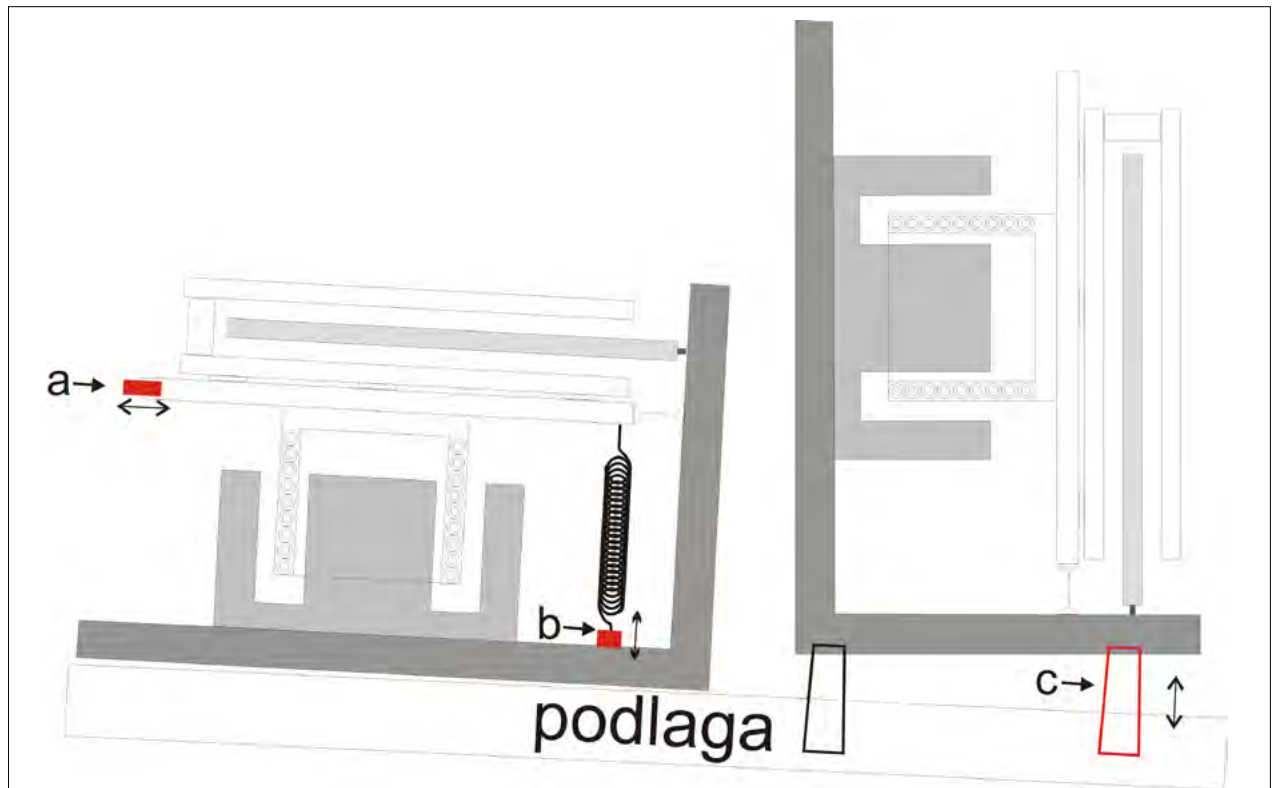
### UVW- in XYZ-postavitve senzorjev v seizmometru

Za oba tipa seizmometrov velja, da senzori, če so kako-  
vostno narejeni, merijo nihanje tal zelo natančno. V obeh



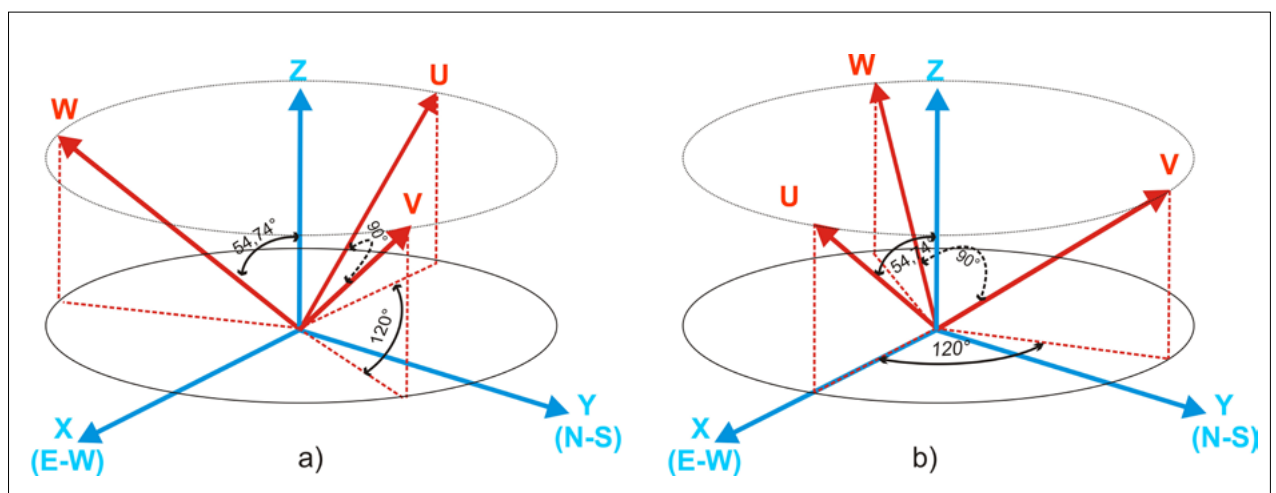
sistemih so sestavljeni iz mehanskega dela in elektronike, oboje pa je rezultat zelo zahtevnega in dolgotrajnega razvoja. Tudi proizvodni proces je pri obeh ves čas natančno nadzorovan. Je pa zaradi zapletene listnate vzmeti razvoj senzorja za UVW-simetrijo (za postavitev

senzorja pod kotom  $54,74^\circ$ ) bolj zapleten kot razvoj posameznega vodoravnega ali navpičnega senzorja. Zdaj širokopasovne seizmometre z UVW-konfiguracijo komercialno proizvajata samo dve podjetji, Steckeisen iz Švice in Nanometrics iz Kanade.



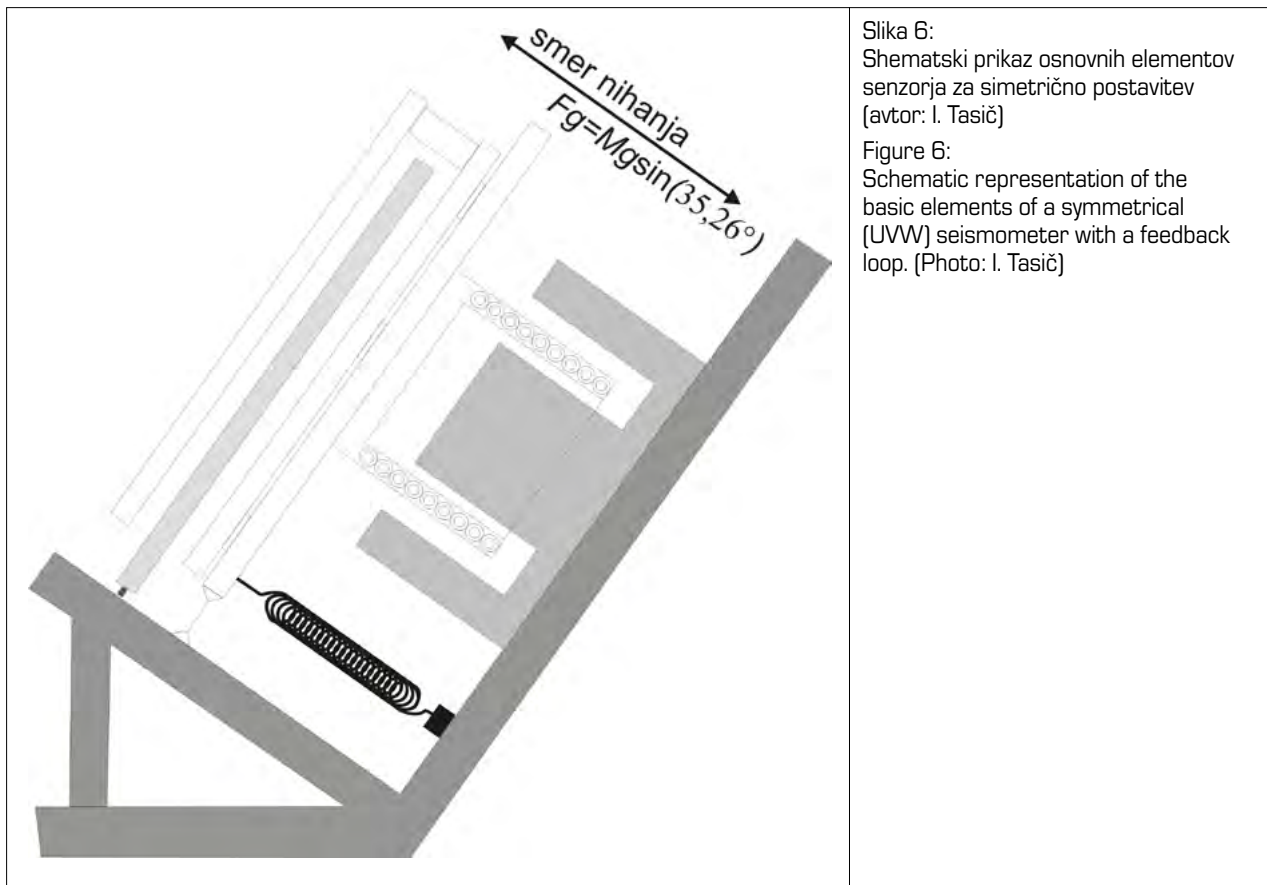
Slika 4: Pri seizmometrih z XYZ-konfiguracijo senzorjev se lahko zaradi »centriranja uteži« vodoravnega senzorja (oznaka c; glej tekst za obrazložitev) spremeni njegov naklon glede na navpični senzor. To lahko povzroči izgubo pravokotnosti med vodoravnim in navpičnim senzorjem. Pri navpičnem merilniku oba možna postopka centriranja uteži (oznaki a, b; glej tekst za obrazložitev) ne vplivata na naklon osi. (avtor: I. Tasič)

Figure 4: For seismometers with the XYZ configuration of the sensors, the horizontal sensor can, due to “centering the mass” (mark c; see text for explanation), change its inclination with respect to the vertical sensor. This may result in a loss of perpendicularity between the horizontal and vertical sensors. With the vertical meter, neither of the possible weighting procedures (mark a, b; see text for explanation) affect the inclination of the axis. (Photo: I. Tasič)



Slika 5: Postavitev osi v XYZ-konfiguraciji (modra) in UVW-konfiguraciji (rdeča); levosučno rotacijo (slika a) uporablja seizmometer STS-2, desnosočno (slika b) pa trillium 120 GA. (avtor: I. Tasič)

Figure 5: Axis in the XYZ configuration (blue) and UVW configuration (red). The left-hand rotation (Figure 5a) is used by the STS-2 seismometer; the right-hand rotation (Figure 5b) is used by the Trillium 120GA seismometer. (Photo: I. Tasič)



Slika 6:  
Shematski prikaz osnovnih elementov  
senzorja za simetrično postavitvev  
(avtor: I. Tasič)

Figure 6:  
Schematic representation of the  
basic elements of a symmetrical  
(UVW) seismometer with a feedback  
loop. (Photo: I. Tasič)

Pri UVW-konfiguraciji je izdelava senzorjev v proizvodnji poenotena, saj so vsi trije senzori enaki. To na prvi pogled poenostavi proizvodnjo. A ker se seizmični signal prevede v XYZ-sistem že v samem seizmometru, morajo biti prenosne funkcije vseh treh komponent enake, kar zahteva izredno natančno poenotenje vseh vhodnih delov in osnovnih gradnikov senzora. Pravokotnost med osmi je bistvena in je zagotovljena že v proizvodnji sami ter nanjo ne vpliva poznejše centriranje uteži. Simetrični triosni seizmometri morajo imeti, za razliko od XYZ-seizmometrov, še dodatno »mešalno« elektro-niko, ki analogni signal iz UVW-konfiguracije pretvori v XYZ-izhod, kar tudi nekoliko prispeva k stroškom proizvodnje. Glavna slabost teh seizmometrov pa je vpliv okvare enega senzora na celoten XYZ-izhod. Če se zgodi okvara enega senzora, je zaradi mešalne elektronike celoten signal iz seizmometra neuporaben. Pri XYZ-konfiguraciji pa je pri okvari enega senzora seizmometer še vedno uporaben, saj meri podatke o nihanjih tal še v dveh dimenzijah.

Izdelava senzorjev pri XYZ-konfiguraciji se v proizvodnji deli na izdelavo vodoravnih in izdelavo navpičnih senzorjev, kar zahteva dve ločeni veji proizvodnje, preizkušanja in nadzora (kontrol). Zaradi dveh tipov senzorjev je med obema vrstama senzorjev bolj zapleteno doseganje enakih prenosnih funkcij, kar je nenapisan standard sodobnih triosnih seizmometrov. Toda popolna enakost prenosnih funkcij ni tako bistvena kot pri UVW-konfiguraciji, saj se lahko zabeleži v kalibracijskih datotekah, ki so spremni dokument vsakega seizmometra.

Zanimivo pa je, da imajo vsi pospeškometri, ki so na tržišču, XYZ-konfiguracijo senzorjev. Razlog so verjetno tako cena proizvodnje pospeškometrov kot tudi nekateri stranski pojavi pri UVW-postavitvi senzorjev ob zelo močnih pospeških (Graizer, 2009).

## Sklepne misli

Kateri sistemi so torej boljši za opazovanje potresov? Pri seizmometrih istega kakovostnega razreda, kadar delujejo pravilno in so dejansko narejeni po specifikacijah ter smo pri inštalaciji natančni ob uravnavanju seizmometra, pravzaprav ni bistvene razlike. Sama postavitve seizmometrov ne glede na konfiguracijo osi v seizmometru poteka podobno. Razlike so pomembne pri odkrivanju in analiziranju napak. Za analizo napak v zapisu seizmičnega signala je boljši sistem z UVW-konfiguracijo, če omogoča daljinsko preklapljanje med UVW- in XYZ-izhodom. To omogočajo seizmometri tipa trillium, STS-2 pa ne. Toda če pride do okvare katerega od senzorjev v kritičnem trenutku (npr. malo pred potresom), so podatki iz seizmometra z UVW-konfiguracijo popolnoma neuporabni, kar ne velja za seizmometre z XYZ-konfiguracijo senzorjev. Vendar pa je pri takšnem seizmometru – če ni bil idealno uravnan z vodoravno ravnino – zaradi postopka centriranja uteži vprašljiva pravokotnost med senzori.

Danes uporabljamo v Sloveniji tako seizmometre, ki imajo XYZ-konfiguracijo senzorjev, kakor tudi seizmometre z UVW-konfiguracijo senzorjev. Marca 2019

je bilo 17 potresnih opazovalnic državne mreže potresnih opazovalnic opremljenih s seizmometri podjetja GurAlp, ki imajo XYZ-konfiguracijo senzorjev. Na preostalih potresnih opazovalnicah imamo seizmometre z UVW-postavitvijo senzorjev. Na petih potresnih opazovalnicah imamo postavljene seizmometre tipa STS-2,

na štirih pa seizmometre trillium 120QA. Pri seizmometrih je pomembna tudi njihova trajnost in v tem imajo Streckeisenovi seizmometri prednost pred GurAlpovimi, kjer so okvare pogostejše. Ker so seizmometri podjetja Nanometrics sorazmerno novi, še ni znano, kako se bodo dolgoročno izkazali.

## Viri in literatura

1. Benioff, H., 1932. A new vertical seismograph, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 22, 2.
2. Gostinčar, M., Vidrih, R., 1997. Seizmograf Wiechert. *Ujma* 11, 185–187.
3. Graizer, V., 2009. The Response to Complex Ground Motions of Seismometers with Galperin Sensor Configuration. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99, 2B, 1366–1377.
4. LaCoste JBL., 1934. A new type long period seismograph. *Physics* 5:178–180.
5. Mali, M., Tasič, I., 2011. Vpliv temperaturnih sprememb na delovanje dolgoperiodnih seizmometrov. *Potresi v letu 2010*, Agencija RS za okolje, Ljubljana, Slovenija, 62–70.
6. Nanometrics, 2019. Trillium 360, [https://www.nanometrics.ca/sites/default/files/2019-03/trillium360\\_brochure\\_1.pdf](https://www.nanometrics.ca/sites/default/files/2019-03/trillium360_brochure_1.pdf), zadnjič dostopano 13. maja 2019.
7. Peterson, R.J., Hutt, R.C., 2014 – World-Wide Standardized Seismograph Network: A Data Users Guide, USGS, Open-File Report 2014–1218, <https://doi.org/10.3133/ofr20141218>
8. Tasič, I., 2015. Spodnja raven seizmičnega šuma v Sloveniji. *Ujma*, 29, 343–349.
9. Tasič, I., 2018. Seizmometer in pospeškometer – merilni par na potresni opazovalnici. *Ujma*, 32, 210–217.
10. Townsend, B., 2014. Symmetric Triaxial Seismometers. doi 10.1007/978-3-642-36197-5\_194-1.
11. Wielandt, E., 2012. Seismic sensors and their calibration, [v *New Manual of Seismological Observatory Practice 2*, NMSOP-2], P. Bormann (Urednik), 1–51.
12. Wielandt, E., Streckeisen, G., 1982. The Leaf-Spring Seismometer: Design and Performance. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 2349–2367.
13. Willmore, P.L., Connell, D.V., 1963. A new short-period seismometer for field and observatory use. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 53, 835–844.