

# PRVE DIGITALNE POTRESNE OPAZOVALNICE V SLOVENIJI

## THE FIRST DIGITAL SEISMIC STATIONS IN SLOVENIA

**Peter Sinčič**

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

**Izidor Tasič**

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

### Povzetek

Razvoj računalništva je povzročil tudi velike spremembe v seizmologiji tako v razvoju opreme za beleženje in shranjevanje podatkov kot v kakovosti ter hitrejši obdelavi seizmoloških podatkov. Analogni zapis potresa je omogočal večinoma le določitev lokacije nadžarišča in velikosti magnitude potresa, včasih tudi globine potresa. Začetek digitalizacije je bilo vnašanje analognih zapisov z ročnim vnašanjem točk z digitalizatorjem v računalnik, pravi napredek pa se je začel, ko je tehnologija omogočila neposredno pretvorbo signala iz seismometra v digitalno obliko. Digitalni seizmografi, kombinacija širokopasovnega seismometra z zajemalno napravo, so imeli veliko prednosti in so pospešili razvoj seizmologije ter poznavanje notranje zgradbe Zemlje.

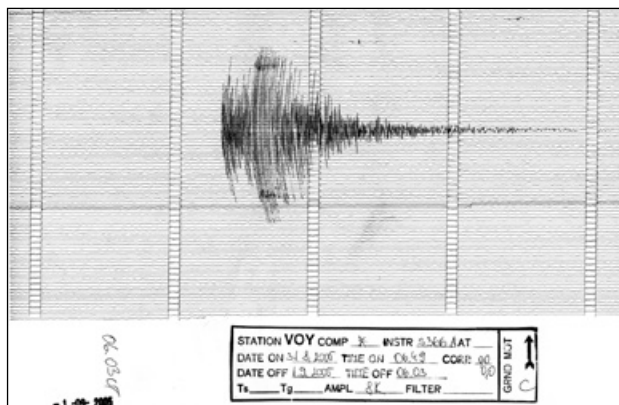
### Abstract

The development of computing has led to major changes in seismology in the field of the development of equipment for recording and storing data, and in the quality and faster processing of seismological data. The analogue record of an earthquake mostly allowed the determination of the epicentre and the magnitude of the earthquake, and sometimes also the hypocentral depth. At the beginning of digitization, the manual digitization of analogue seismograms meant that some special digital techniques could be applied. The real progress came when technology made it possible to directly convert a signal from a seismometer to digital form. Digital seismographs, a combination of a broadband seismometer with an acquisition unit, have a number of advantages, and have accelerated the development of seismology and thus our knowledge of the internal structure of our planet.

## Uvod

Besedna zveza digitalna potresna opazovalnica ali digitalni seizmograf izhaja iz obdobja, ko so bile potresne opazovalnice večinoma opremljene z analognimi seizmografi (Sinčič in Vidrih, 1993). S tem terminom se je poudarilo, da ima taka opazovalnica tudi digitalne seizmografe, saj sta predvsem v začetnem obdobju na potresnih opazovalnicah vzporedno delovala oba sistema. Analogni zapisi potresov (slika 1) na papir, fotopapir ali film so dali prvi vpogled v zgradbo notranjosti Zemlje, imeli pa so več pomanjkljivosti. Prva je bila majhno dinamično območje. Razmerje med najmanjšim še vidnim odmikom peresa in največjim odmikom zapisa na papirju je največ 1 : 100 (40 dB), v naravi pa je razmerje med šumom Zemlje in najmočnejšim potresom več kot 1 : 10<sup>10</sup> (200 dB). Z instrumentom smo lahko beležili šibkejša potresa, pri močnejših pa je prišlo do prekrmljenja instrumenta ali je bil instrument prirejen za beleženje močnih potresov, šibkejših pa ni zaznal. Druga pomanjkljivost je bila zamudna ročna analiza seizmogramov, ki ni dala dosti podatkov. Podatki, pridobljeni iz analognega zapisa, so bili čas posameznih faz potresa, perioda in amplituda nihanja ter polariteta prvega odmika. Omogočali so izračun lokacije nadžarišča in magnitude potresa, delno tudi globino žarišča, niso pa

omogočali seizmične tomografije, izračunov žariščnih mehanizmov in natančnejše ocene ob potresu sproščene energije. Tretja pomanjkljivost so bile težave pri shranjevanju seizmogramov, zapisanih na papirju, filmu ali magnetnih trakovih v daljšem obdobju (Gostinčar in



Slika 1: Analogni zapis Z komponente potresa 31. avgusta 2005 ob 21.55 po UTC z magnitudo 2,6 v Posočju (foto: P. Sinčič)

Figure 1: Analogue recording of the Z component of an earthquake of magnitude of 2.6 which occurred in Posočje on August 31, 2005 at 21.55 UTC (Photo: P. Sinčič)

Vidrih, 1997; Sinčič in sodelavci, 1997; Sinčič in Tasič, 2019). Fotografski papir in filmi so občutljivi na svetlobo. Seizmogrami morajo biti shranjeni v temnih in suhih prostorih s stalno temperaturo. Tudi zapisi na magnetnih trakovih sčasoma postajajo težko berljivi.

S pojavom računalništva so seizmologi začeli digitalizirati analogne seizmogramne. Računalniki so omogočali samodejno obdelavo zapisov in veliko matematičnih izračunov. Digitalizacija seizmogramov je v začetku potekala ročno z vnašanjem točk krivulje zapisa na digitalizatorju v računalnik, kar je bilo počasno in mučno delo. Razvoj elektronike in računalništva je sčasoma omogočil digitalizacijo signala neposredno iz seismometra. Digitalni seizmografi, ki so kombinacija seismometra z zajemalno napravo z analogno-digitalnim (A/D) pretvornikom in elektroniko za obdelavo, shranjevanje ter pošiljanje podatkov v omrežje, imajo veliko prednosti v primerjavi z analognimi. Predvsem imajo večje dinamično območje. Že prvi 16-bitni analogno-digitalni pretvornik je imel dinamično območje 96 dB, kar je za dve velikostni stopnji magnitude večje od analognih seizmografov. Danes se v seizmologiji uporabljajo 24-bitni analogno-digitalni pretvorniki z dinamičnim območjem 142 dB. Sodobni zaprtozračni širokopasovni seismometri dosegajo ali celo presegajo to dinamično območje. Kombinacija obeh lahko zazna šum na lokacijah z najnižjim šumom Zemljinega površja in ni prekrmljena pri večini najmočnejših potresov (Tasič, 2009; Tasič, 2019).

Druga prednost sta samodejno zaznavanje in obdelava dogodkov, kar omogoča takojšnje določanje lokacije nadzarišča ter velikost magnitude potresa.

Tretja prednost je velika količina podatkov, ki jo omogočajo širokopasovni seismometri in zajemalne naprave z velikim dinamičnim obsegom. Analogni seizmografi so veliko ojačenje dosegli na le ozkem pasovnem območju s kratko- in dolgoperiodnimi instrumenti z uporabo filtrov za odstranitev neželenih signalov in šuma. Sodobni digitalni seizmografi zajemajo široko območje frekvenc brez filtriranja. Šele pri analizi zapisov lahko analizator pozneje z uporabo digitalnih filtrov izloči želene podatke za analizo, osnovni podatki pa ostanejo nespremenjeni. Podatki so v digitalni obliki, zato jih lahko uporabimo za različne obdelave, kot so spektralna analiza, trodimenzionalna analiza žariščnega mehanizma, seizmična tomografija, analiza šuma posameznih opazovalnic in druge.

Četrta prednost sta preprosto shranjevanje in izmenjava podatkov. Podatke, zajete v digitalnem formatu, lahko poljubno velikokrat kopiramo brez slabšanja kakovosti na različne medije. Današnja tehnologija omogoča medije z veliko zmoglostjo shranjevanja in zelo hitrim dostopom do podatkov.

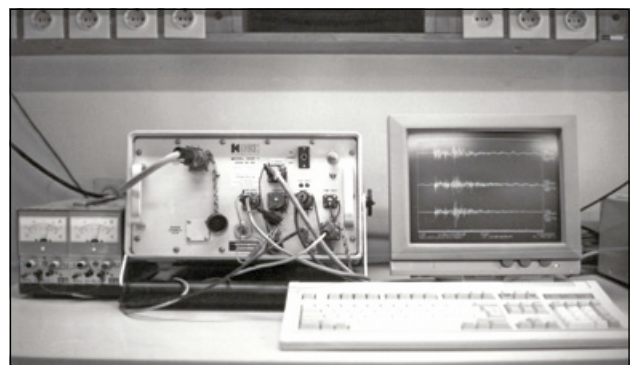
Digitalizacija seizmoloških sistemov se je začela ob koncu sedemdesetih let prejšnjega stoletja. Eden izmed

mejniov je bilo leto 1978, ko je doktorand s Harvarda J. M. Steim v svojem doktorskem delu predstavil koncept digitalizacije seizmoloških signalov iz seismometrov, ki mu sledi tudi današnja digitalizacija. J. M. Steim je nadaljeval svoje delo pri digitalizaciji seizmoloških sistemov in digitalnih podatkih ter leta 1982 predstavil algoritem za kompresijo digitalnih podatkov, ki se po njem imenuje steim in se še danes uporablja. Leta 1985 sta Erhard Wielandt, ki je sodeloval pri razvoju zelo širokopasovnega seismometra STS-1, in J. M. Steim predstavila koncept zelo širokopasovnega seismografa (Willand in Streckeisen, 1982; Wielandt in Steim, 1986). V tem času je slednji razvil 24-bitno zajemalno enoto Quanterra, ki je temeljila na procesorju Motorola 680xx in večopravilnem komercialnem operacijskem sistemu OS9. Ta je bil tako dobro zasnovan, da so mnoge zajemalne enote tega tipa delovale do konca prejšnjega desetletja.

Tudi podjetje Kinometrics iz ZDA je v tem času razvijalo svoje digitalne seizmografske sisteme, med drugimi glede na zajemalno enoto Quanterra cenovno bolj dostopno enoto SSR-1, ki je bila kot prva digitalna zajemalna enota kupljena tudi v Sloveniji.

## Prvi digitalni seizmološki sistem v Sloveniji

Leta 1990 je Seizmološki zavod RS kupil digitalno zajemalno enoto SSR-1 (slika 2) podjetja Kinometrics s tremi enokomponentnimi širokopasovnimi seismometri WR-1 (Sinčič in Vidrih, 1998).



Slika 2: Zajemalna naprava SSR-1 z računalnikom v observatoriju v Ljubljani (foto: P. Sinčič)  
Figure 2: SSR-1 acquisition unit and personal computer in a seismic station in Ljubljana (Photo: P. Sinčič)

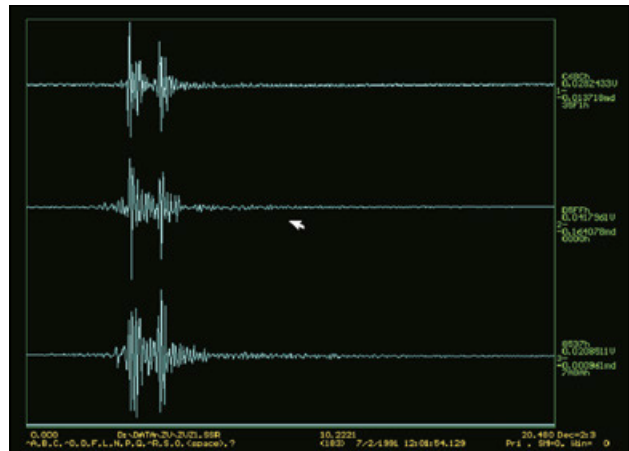
SSR-1 je bila trikanalna zajemalna enota za beleženje seizmičnih dogodkov v pomnilnik RAM. Ob koncu leta 1994 smo dogradili aparaturu na šest kanalov. Na vходу vsakega kanala je bil predojačevalnik, s katerega so signali šli na 16-bitni analogno-digitalni pretvornik, ki je omogočal 96 dB veliko dinamično območje. Dinamično

območje je bilo mogoče še povečati s programsko nastavljenim ojačenjem predojačevalnikov. Frekvence vzorčenja so bile nastavljive, največje vrednosti pa so bile 1000 vzorcev/s za en kanal, 500 vzorcev/s za tri kanale in 200 vzorcev/s za šest kanalov. Naprava je omogočala dva podatkovna toka. Drugi tok podatkov je bil uporabniško nastavljen. Ta značilnost je omogočala priklop kratko- in dolgoperiodnih senzorjev. Tako je bil sekundarni podatkovni tok z nizko frekvenco vzorčenja izbran za neprekinjen prenos podatkov, primarni podatkovni tok pa je deloval v prožilnem načinu za beleženje lokalnih potresov. Neprekinjenega zajemanja podatkov v tistem času tehnologija še ni omogočala zaradi majhne zmogljivosti pomnilniških medijev.

V prožilnem načinu delovanja so bili štirje načini proženja, in sicer nastavitve praga proženja glede na vhodni signal, razmerje med STA in LTA (ang. *Short Time Average/Long Time Average* – kratkočasovna povprečna vrednost oziroma dolgočasovna povprečna vrednost signala), vnaprej programirano časovno okno beleženja podatkov in zunanje proženje.

Točen čas je sistemu zagotavljala ura s temperaturno stabiliziranim kremenovim oscilatorjem. Pri analognih seizmografih je morala biti ura točna na stotinko sekunde, pri digitalnih seizmografih pa mora biti zaradi visokih frekvenc vzorčenja ura točna na tisočinko sekunde. Za večjo stabilnost ure je bilo vgrajeno vezje, ki je skrbelo za popravek ure s sprejemnikom časovnih signalov navigacijskega sistema Omega s časovno kodiranim signalom IRIG. Radijski navigacijski sistem Omega je zgradila mornarica Združenih držav Amerike in je pokrival vso Zemljino oblo z osmimi oddajniki, ki so bili postavljeni v državah, označenih s črkami abecede, in sicer Norveška (A), Liberija (B), Havaji (C), Severna Dakota (D), otok Reunion (E), Argentina (F), Avstralija (G) ter Japonska (H). Vseh osem postaj je oddajalo fazno in časovno sinhronizirane signale v frekvenčnem pasu VLF na frekvencah od 10 do 14 kHz. Nizke frekvence so povsod zagotavljale stabilen sprejem površinskih valov. Sprejemnik Omega v digitalnem seizmografu je sprejemal le frekvenco najmočnejše postaje. Iz sprejetega signala je izračunal podatek o času in ga primerjal s časom ure. Če so bila odstopanja prevelika, je uro popravil. Navigacijski sistem Omega je deloval do leta 1997, ko so ga ukinili zaradi satelitskega sistema GPS (Sinčič in Vidrih, 1994). Seizmološke naprave, ki so uporabljale ta signal za določitev točnega časa, so v trenutku ostale brez zelo pomembnega podatka, torej točnega časa. Kljub tej pomanjkljivosti je ta enota s pospeškometrov leta 1998 ob močnem potresu v Posočju v observatoriju na Golovcu v Ljubljani edina pravilno zabeležila nihanje tal ob potresu.

Velikost pomnilnika RAM je bila največ 4 MB, kar je zadostovalo za neprekinjeno beleženje približno ure podatkov treh kanalov pri vzorčenju 200 vzorcev na sekundo, zato je aparatura delovala v prožilnem načinu, ko je šele potres sprožil zajemanje podatkov (slika 3).



Slika 3: Zapis preboja zvočnega zidu letala nad Ljubljano 2. julija 1991 ob 12.01 po UTC na seizmografu SSR-1 (foto: P. Sinčič)

Figure 3: Sonic boom of an aeroplane over Ljubljana recorded by SSR-1 on July 2, 1991 at 12.01 UTC (Photo: P. Sinčič)

Komunikacija z računalnikom je potekala po serijskem protokolu RS 232. Hitrost prenosa podatkov je bila nastavljiva od 300 Bd do 115 kBd. Aparaturi je bila priložena programska oprema QuickTalk za komunikacijo z napravo in QuickLook za pregled dogodkov na računalniku.

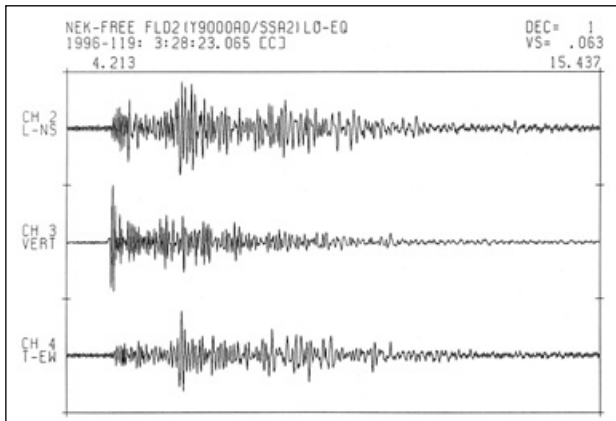
## Akcelerograf SSA-2

Digitalizacija seizmološke opreme se je leta 1991 nadaljevala z nakupom dveh zajemalnih enot SSA-2 in pospeškometrov FBA-23 (slika 4). Enota SSA-2 je bila v osnovi akceleroigraf in je imela v ohišju že vgrajen pospeškometer oziroma senzor pospeškov, naša akceleroigrafa pa sta bila v izvedbi z zunanjo priključitvijo senzorjev.



Slika 4: Akceleroigraf SSA-2 z akceleroigrom FBA-23 na začasni opazovalnici v Horjulu (foto: P. Sinčič)

Figure 4: The SSA-2 accelerometer with the FBA-23 accelerometer mounted in a temporary station in Horjul (Photo: P. Sinčič)



Slika 5: Zapis potresa z akcelerografom SSA-2, ki je nastal 28. aprila 1996 ob 3.28 po UTC na Krškem polju (foto: P. Sinčič)

Figure 5: SSA-2 record of an earthquake which occurred on April 28, 1996 at 03.28 UTC in the Krško region (Photo: P. Sinčič)

Enota SSA-2 je bila v kombinaciji s pospeškometrov namenjena beleženju pospeškov ob močnejših potresih v mestnem okolju (slika 5). Trikanalna naprava z 12-bitnim analogno-digitalnim pretvornikom, ki je zagotavljal 72 dB veliko dinamično območje, je delovala v prožilnem načinu. Akcelerograf je namenjen beleženju pospeškov lokalnih potresov, zato je bilo vzorčenje analognega signala v analogno-digitalnem pretvorniku 200 vzorcev/s. Podatki so se shranjevali v 2 MB velikem pomnilniku RAM. Velikost pomnilnika je zadostovala za zapise v skupni dolžini 80 minut. Za točnost vgrajene ure je skrbel sprejemnik časovnih signalov Omega. Komunikacija z računalnikom za nastavitve parametrov delovanja in prenos podatkov je potekala po serijskem vmesniku RS 232. Skupaj z aparaturo je bila programska oprema QTSSA za komunikacijo z računalnikom in QLSSA za pregled zabeleženih dogodkov.

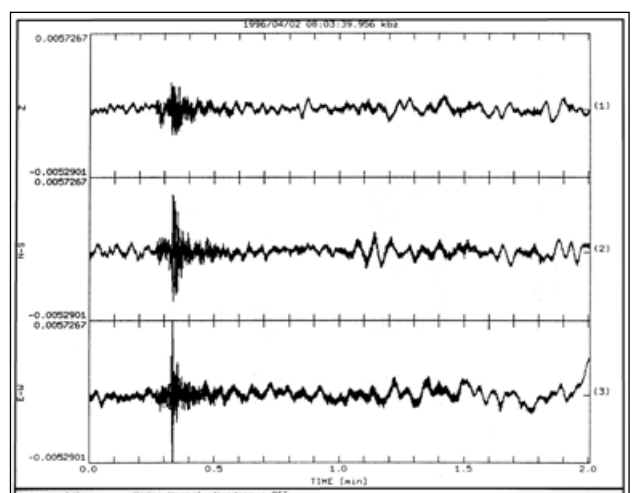
## Neprekinjeno beleženje

Leta 1993 smo na Seizmološkem zavodu RS kupili tip zajemalnih enot, ki je omogočal neprekinjeno zajemanje in shranjevanje podatkov v daljšem obdobju. To je bil instrument TERRAPROBE tip 72A-07/DAT, izdelek podjetja RefTek (slika 6). Trikanalna zajemalna enota je imela 24-bitni analogno-digitalni pretvornik, vgrajen sprejemnik GPS in tračno enoto DAT za shranjevanje za tisti čas velike količine podatkov 1,3 GB. Modularna izvedba instrumenta je skupaj s programsko opremo omogočala uporabo instrumenta za meritve lokalnih, regionalnih ali globalnih dogodkov, kar je omogočala izbira vzorčenja analognega signala s 1000, 500, 250, 200, 125, 100, 50 in 25 vzorcev/s na kanal. Na vhod smo lahko priključili različne vrste seizmometrov ali akcelerometrov. Pri nastavitvah za beleženje lokalnih dogodkov je kasetna DAT zadostovala za mesec dni neprekinjenega beleženja nihanja tal (slika 7), potem pa jo je bilo treba zamenjati.



Slika 6: Namestitev seizmografa RefTek 72A-07/DAT (zgoraj) v omarico na potresni opazovalnici Cesta (CESS). Spodaj je bil nameščen seizmometer. (foto: P. Sinčič)

Figure 6: Installation of a RefTek 72A-07/DAT seismograph in a cabinet at Cesta seismic station (CESS) (above). A seismometer was installed below (Photo: P. Sinčič)



Slika 7: Zapis potresa s seizmografom RefTek 72A-07/DAT, ki je nastal 2. aprila 1996 ob 8.03 po UTC na Krškem polju (foto: P. Sinčič)

Figure 7: The RefTek 72A-07/DAT seismograph record of an earthquake which occurred on April 2, 1996 at 08.03 UTC in the Krško region (Photo: P. Sinčič)

Naslednje leto se je število digitalnih instrumentov povečalo še za akcelerografa SSA-2 z akcelerometroma FBA-23, enoto 72A-07/DAT s širokopasovnim seizmometrom in enoto 72A-02 s širokopasovnim seizmometrom, ki je imela kot zunanji pomnilnik trdi disk. Sčasoma so se tračne enote DAT izkazale kot nezanesljiv medij za shranjevanje podatkov, saj je bilo njihovo delovanje precej odvisno od zunanjih vplivov, kot sta temperatura in vlaga okolice. Podatki so se večkrat izgubili, zato smo pozneje vse enote DAT zamenjali s trdimi diski.

Z razvojem računalništva se je razvijala tudi komunikacijska oprema za prenos podatkov. Tako so začeli v digitalne seizmografe najprej vgrajevati modemske enote za prenos podatkov po telefonskih linijah, pozneje pa že omrežne kartice za vklop instrumentov v računalniška omrežja. Leta 1995 se je začela vzpostavitev računalniškega omrežja državnih organov, tako da se je pojavila možnost vključitve potresnih opazovalnic v omrežje, ki je omogočalo samodejen prenos podatkov v centralni računalnik v središče za obdelavo podatkov, ki je bilo v tistem času v observatoriju na Golovcu v Ljubljani. Tako smo na Upravi RS za geofiziko, prej Seizmološkem zavodu RS, začeli načrtovati omrežje potresnih opazovalnic (Tasič in Sinčič, 2018).

## Sklepne misli

Digitalni seizmografi so pomenili velik napredek pri razvoju seizmologije. Zapis potresnega valovanja je sestavljen iz različnih frekvenc in analizo takega valovanja lahko opravimo le z računalniško obdelavo. Z uvajanjem digitalnih seizmografov je zapis potresov imel obliko, ki je bila primerna za računalniško obdelavo podatkov. Najprej je bilo treba podatke iz seizmografa ali akcelerografa na potresni opazovalnici ročno prenesti v prenosni računalnik in nato v središču za obdelavo v centralni računalnik. Poznejše izvedbe instrumentov so že shranjevale zajete podatke na prenosni medij, torej na kaseto z magnetnim trakom ali na trdi disk v prenosnem ohišju, ki jih je operater enkrat na mesec ali ob močnejšem potresu zamenjal. Zadnji instrumenti te vrste so že omogočali prenos podatkov in nastavitve parametrov delovanja instrumenta z modemi po klicnih telefonskih linijah iz središča za obdelavo podatkov.

Danes so instrumenti na potresnih opazovalnicah povezani v računalniško omrežje. Prenos podatkov poteka neprekinjeno v realnem času v središče za obdelavo podatkov. Tako takoj po potresu naprave izračunajo magnitudo in nadžarišče potresa. S poznejšimi analizami podatkov ugotavljamo strukturo Zemljine notranjosti, aktivnosti tektonskih prelomov in geološko sestavo terena, kar omogoča tudi pripravo zemljevidov potresne nevarnosti na območjih s seizmično aktivnostjo.

## Viri in literatura

1. Gostinčar, M., Vidrih, R., 1997. Seizmograf Wiechert, Ujma 11.
2. Sinčič, P., Vidrih, R., 1993. Mreža potresnih opazovalnic v Sloveniji. Ujma 7, 130–137.
3. Sinčič, P., Vidrih, R., 1994. Pomen točnega časa pri registraciji potresov. Ujma 8, 182–185.
4. Sinčič, P., Vidrih, R., Deterding, M., 1997. Zapisi potresov skozi čas. Ujma 11, 178–184.
5. Sinčič, P., Vidrih, R., 1998. Razvoj instrumentalne seizmologije v Sloveniji ob 100-letnici prve potresne opazovalnice v Sloveniji. Zbornik za zgodovino naravoslovja in tehnike 13-14, 136–167, Slovenska matica.
6. Sinčič, P., Tasič, I., 2019. Prispevek k zgodovini seizmologije: 50 let neprekinjenega instrumentalnega tridimenzionalnega beleženja širokopasovnega spektra seizmičnih valov v Sloveniji. Ujma 22, 211–218.
7. Wielandt, E., Steim, J., 1986. A digital very broad band seismograph, *Ann. Geophys.*, 4, 227–232.
8. Wielandt, E., Streckeisen, G., 1982. The leaf spring seismometer: design and performance, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 72, 2349–2367.
9. Tasič, I., 2009. Lastnosti seizmološke opreme državne mreže potresnih opazovalnic. Ujma 23, 140–144.
10. Tasič, I., Sinčič, P., 2018. Prva avtomatska digitalna mreža potresnih opazovalnic v Sloveniji. Ujma 32, 257–264.
11. Tasič, I., 2019. Triosni širokopasovni seizmometri s postavitvijo senzorjev XYZ in UVW. Ujma 33, 185–191.