

SEIZMIČNO ZAZNAVANJE IZREDNIH VREMENSKIH DOGODKOV LETA 2023 NA DRŽAVNI MREŽI POTRESNIH OPAZOVALNIC

Izidor Tasič¹

Povzetek

Potresne opazovalnice niso primerne le za zaznavanje potresov, temveč z njimi zaznavamo tudi druge naravne pojave. Kadar ti pustijo svoj »seizmični odtis« na zapisih nihanj tal, nam to omogoči seizmično analizo pojava, kar pa nam posledično predstavi njegovo dinamiko. To velja tudi za izredne vremenske dogodke, ki smo jih v Sloveniji beležili leta 2023. Raziskali smo, kakšen seizmični odtis so pustili ti dogodki na Državni mreži potresnih opazovalnic. Močnega dežja potresne opazovalnice ne zaznajo, čeprav tudi dež pušča svoj seizmični odtis, a je na višjih frekvencah, kot je merilno območje seizmometrov. Močan prizemni veter v neposredni bližini seizmometra pomembno prispeva k povečanju seizmičnega šuma tako v nizkofrekvenčnem delu spektra, kjer ga zaznamo predvsem na vodoravnih komponentah seizmometra, kot tudi v visokofrekvenčnem delu spektra, kjer vpliv beležimo prostorsko. Tudi reke puščajo svoj seizmični odtis, ki je zabeležen, če so pretoki rek bistveno povečani in če je potresna opazovalnica dovolj blizu reke.

SEISMIC DETECTION OF EXTREME WEATHER EVENTS IN 2023 ON THE SLOVENIAN NATIONAL SEISMIC NETWORK

Abstract

Seismic stations are not only suitable for detecting earthquakes, but can also detect other natural phenomena. When these phenomena leave their „seismic footprint“ on the records of ground motion, this enables us to analyse the phenomenon seismically and, consequently, to reveal its dynamics. This also applies to the extraordinary weather events we recorded in Slovenia in 2023. We investigated what kind of seismic imprint various extreme weather events leave on the seismic records of the Slovenian National Seismic Network. Rain is not detected; although rain does leave a seismic imprint, it is located at higher frequencies than are covered by the measurement range of the seismometer. Strong ground wind in the immediate vicinity of the seismometer significantly contributes to an increase in seismic noise both in the low-frequency part of the spectrum, where it is detected mainly on the horizontal components of the seismometer, and also in the high-frequency part of the spectrum, where the impact is recorded spatially. Rivers also leave a seismic footprint, which is recorded if river flows are significantly increased and if the seismic observatory is close enough to the river.

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

UVOD

V zadnjem desetletju se vse bolj zavedamo, da potresne opazovalnice niso primerne le za zaznavanje potresov, ampak se veliko pomembnih informacij skriva v »preostalem« seizmičnem signalu. Vse več raziskav zato temelji na parcialni analizi »nepotresnega« signala, s katerimi lahko prepoznavamo vpliv okoliških dejavnikov na nihanje tal.

Izredni vremenski dogodki, ki zaradi podnebnih sprememb postajajo pogostejši, lahko povzročijo katastrofalne hudourniške poplave, nižinske poplave, zemeljske plazove, žledolome, toče itn. Nekateri od teh

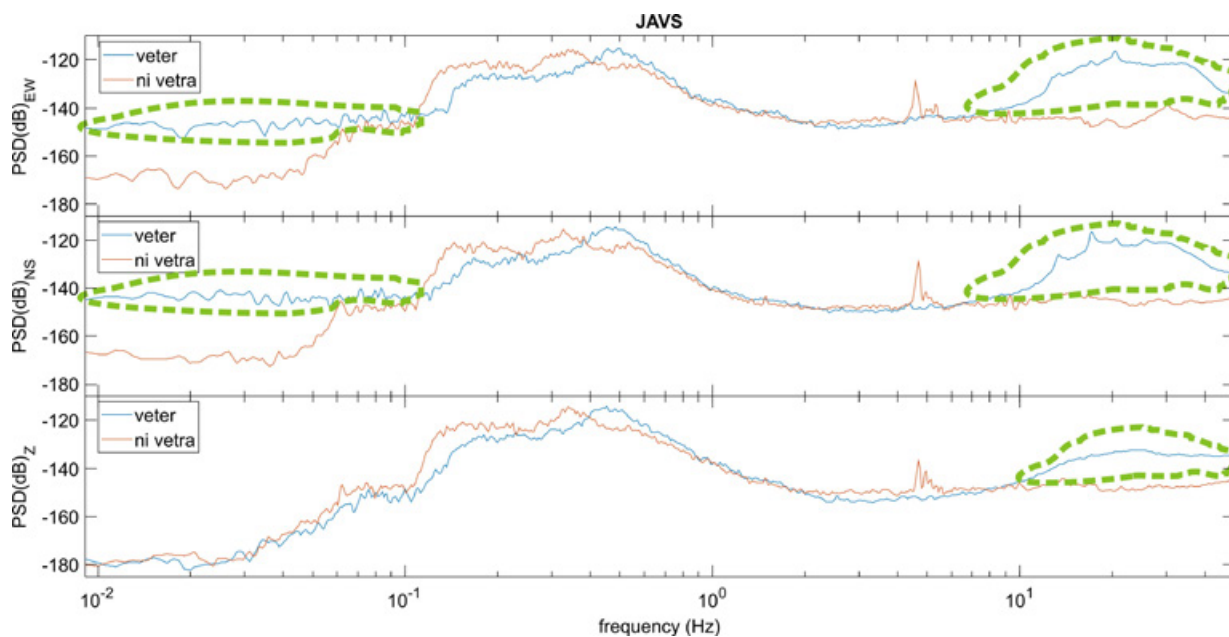
dogodkov lahko posredno ali neposredno pustijo svoj seizmični odtis na zapisih nihanj tal, ki jih zaznajo instrumenti potresnih opazovalnic. Seizmični odtis pomeni, da seizmični signal izstopa iz vsakdanjega seizmičnega nihanja tal – dogodek je prepoznaven na seizmičnih zapisih. Seizmični odtis dogodka je prepoznaven tako v časovnem kot frekvenčnem prostoru. Kakovost seizmičnega odtisa nekega dogodka je odvisna tudi od kakovosti seizmološke merilne opreme. Potresne opazovalnice Državne mreže potresnih opazovalnic (ARSO, 2024a) so opremljene z vrhunskimi merilnimi seizmološkimi instrumenti (Vidrih in sod., 2006; Tasič, 2018), ki zaznavajo stalno nihanje tal na celotnem merilnem območju instrumentov.

To nihanje, ki nima izvora v potresih, imenujemo seizmični šum, povzročajo pa ga tako naravni kot antropogeni dejavniki. Seizmični šum delimo na nizkofrekvenčnega in visokofrekvenčnega z mejo med obema območjema okoli enega Hertza (Tasič, 2015). Šibko nihanje tal pri nizkih frekvencah je predvsem posledica valovanj oceanov in morij (Loguet-Higgins, 1950). To nihanje tal »pušča« na spektrogramih na frekvenčnem območju med 0,03 Hz in 1 Hz seizmične odtise skozi vse leto, izraziteje pa v zimskih mesecih. Visokofrekvenčno nihanje tal, ki ga opazujemo od 1 Hz naprej, povzročajo tako naravni pojavi (npr. veter) kot dejavnosti človeka. Imenujemo ga antropogeni seizmični signal in ga povzročajo vse človeške dejavnosti, ki povzročajo tresljaje tal. To so promet, industrija, dejavnosti v objektih in različne prireditve na prostem ter v zaprtih prostorih. Antropogeni seizmični signal je izrazitejši podnevi kot ponoči, obstaja tudi zaznavna razlika med delovniki in dela prostimi dnevi (Tasič, 2022). Bližje ko je potresna opazovalnica gosto naseljenemu območju in več ko je človeške aktivnosti na tem območju, več šuma zabeleži potresna opazovalnica. Visokofrekvenčni seizmični signal povzročajo tudi naravni dejavniki, kot so veter, reke in časovno krajši izvori, na primer dež in grom. Sem spadajo tudi naravne nesreče, ki jih povzroča vreme, ki v nekaterih primerih neposredno (toča,

dež, veter) ali posredno (hudourniške vode, povečani pretoki rek itn.) povzročajo nihanje tal. Nekateri med njimi lahko povzročijo veliko gospodarsko škodo oziroma močno vplivajo na življenje ljudi. Kako posamezni vremenski dogodki pustijo svoj seizmični odtis na zapisih nihanj tal, je odvisno od večjega števila dejavnikov: od vira seizmičnega nihanja, medija, po katerem se to prenaša, ter od mikrolokacije seizmometra, ki lahko vpliva na kakovost zaznavanja. V urbanih naseljih bo zaradi povečanega antropogenega šuma detekcija drugih signalov otežena oziroma celo ne bo mogoča. Najpomembnejši je vir seizmičnega izvora. Pri padavinskih dogodkih sta to predvsem dež in veter.

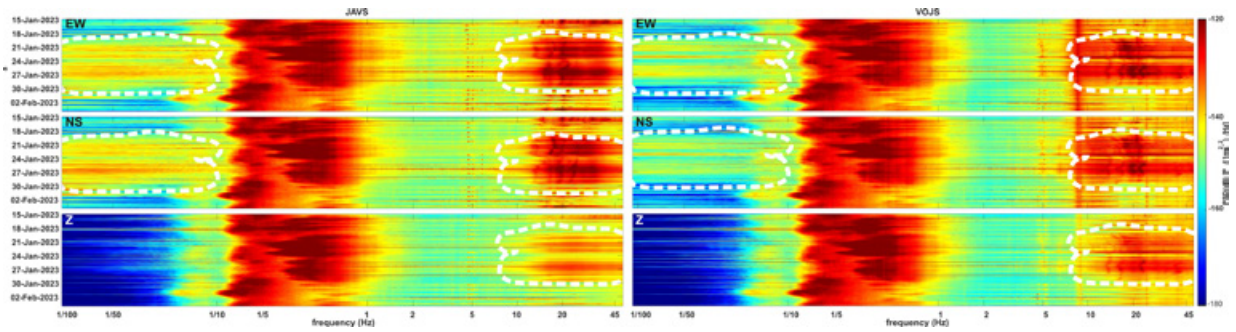
SEIZMIČNI SIGNAL PRI PADAVINSKIH DOGODKIH IN MOČNEM VETRU

Seizmični signal zaradi dežja je posledica tako velikosti kapljic kot gostote dežnih kapelj v časovni enoti. Večja ko je kapljica, večja je njena končna hitrost, kar analogno pomeni večji udarec v tla. Seizmični signal zaradi dežja se pri močnih nalivih izrazito zazna predvsem v frekvenčnem območju med 60 Hz in 450 Hz. Leta 2021 jim je na eksperimentalni mreži potresnih opazovalnic v kotlini Cerdanya (vzhodni Pirineji, Španija), kjer je bila razdalja med opazovalnicami približno



Slika 1: Spekter močnostne gostote za dva enourna zapisa nihanj tal januarja 2023 na potresni opazovalnici JAVS za obdobje, ko ni bilo vetra (rdeča) in med daljšim vetrovnim obdobjem (modra). Seizmični odtis vetra je obkrožen z zeleno črtkano črto. Pri dolgih periodah, s frekvenco pod 0,1 Hz, veter vpliva na nihanje tal predvsem na vodoravnih komponentah, pri visokih frekvencah pa je prisoten na vseh treh komponentah, v prikazanem primeru je izrazit nad 10 Hz.

Figure 1: Power spectrum density for two one-hour records of ground vibrations in January 2023 at the JAVS seismic station, in a period when there was no wind (red) and during a longer windy period (blue). The „seismic footprint“ of the wind is surrounded by a green dashed colour. At long periods, below 0.1 Hz, the wind affects the ground oscillation mainly on the horizontal components, but at high frequencies it is present in all three components; in this case it is pronounced somewhere from 10 Hz onwards.



Slika 2: Spektrogrami prikazujejo večdnevno vetrovno obdobje januarja 2023 (ARSO, 2023a) na potresnih opazovalnicah JAVS (Javornik) in VOJS (Vojsko), ki sta med seboj oddaljeni približno 20 km. Seizmični odtis vetra je obkrožen z belo črtkano črto. Med opazovalnicama se seizmična odtisa vetra razlikujeta v spektrogramih, kar je posledica lokalnih razlik v vetru in tudi v topografiji opazovalnice. Izrazit seizmični signal med 0,1 Hz in 1 Hz, ki je skoraj enak na obeh potresnih opazovalnicah, je seizmični odtis povečanega valovanja oceanov in morij.

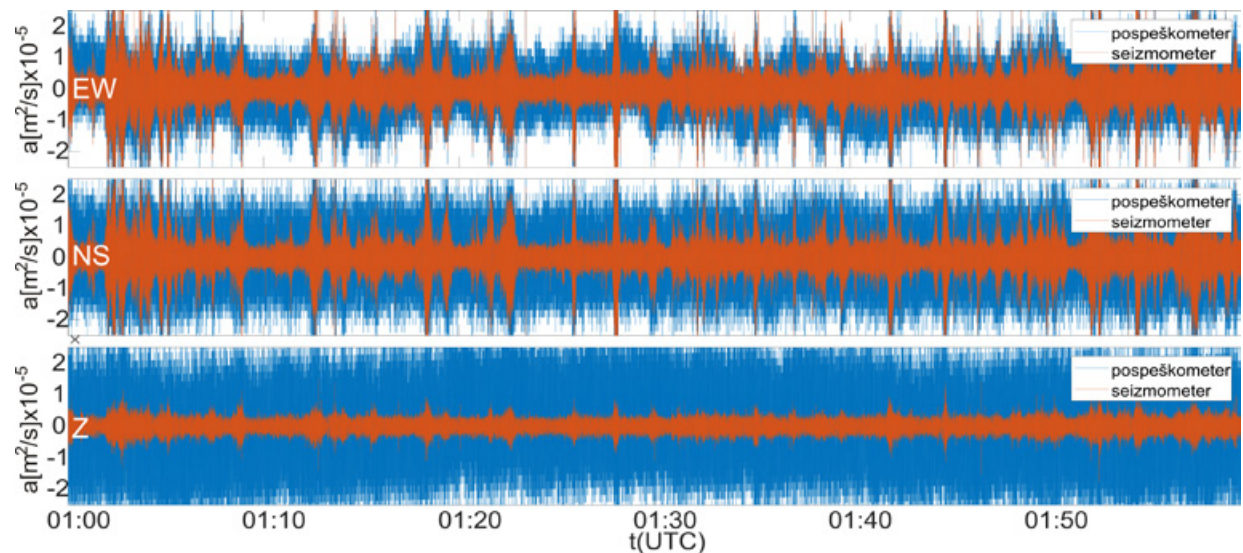
Figure 2: Spectrograms show a multi-day windy period in January 2023 (ARSO, 2023a) at the JAVS (Javornik) and VOJS (Vojsko) seismic stations, which are separated by approximately 20 kilometres. The seismic footprint of the wind is surrounded by a white dashed line. The seismic wind signatures differ between JAVS and VOJS in the spectrograms, which is the result of local differences in the wind and in the topography at the two stations. A pronounced seismic signal between 0.1 Hz and 1 Hz, which is almost the same at both seismic observatories, is the seismic footprint of increased ocean and sea waves.

1,5 km, uspelo z visokofrekvenčnimi seizmološkimi merilniki, ki niso standardna oprema, ne le identificirati padavine in gostoto dežja, temveč tudi časovno ovrednotiti prehod nevihtnega sistema prek merilne mreže (Diaz in sod., 2023). Ugotovili so tudi, da se jakosti seizmičnega signala zaradi dežnih kapelj povečujejo linearno z velikostjo dežne kapljice do premera manj kot 3,5 mm. Nad premerom, večjim od 3,5 mm, pa zveza ni več linearna.

Na državni mreži potresnih opazovalnic (DMPO) dež tudi pri obilnih padavinah (ARSO, 2024c, 2024d) ne

prispeva veliko k povečanemu seizmičnemu šumu. Razlog je predvsem v omejeni frekvenčni širini seizmoloških instrumentov, inštaliranih na DMPO, saj zaznavajo nihanje tal le do 50 Hz (Tasič, 2018). Pri frekvencah med 10 Hz in 50 Hz pa je seizmični signal dežja šibak in pogosto zakrit z antropogenim šumom.

Drugače je z vetrom. Prizemni veter pomembno prispeva k povečanju seizmičnega šuma tako v nizkofrekvenčnem delu spektra, kjer vpliva predvsem na vodoravni komponenti seizmometra (nagibanje podlage), kot tudi v visokofrekvenčnem delu spektra, kjer vpliv



Slika 3: Enourni zapis vetrovnega dogajanja na potresni opazovalnici JAVS 27. januarja 2023. Na zapisu iz seizmometra (rdeča) je nihanje tal zaradi vetra zaznavno, pri zapisu iz pospeškometra (modra) instrumentalni šum zakrije seizmični signal in ne omogoča enolične identifikacije tega pojava.

Figure 3: A one-hour record of wind events at the JAVS seismic observatory on 27 January 2023. On the seismometer (red) the shaking of the ground due to the wind is visible; on the accelerometer (blue), its instrumental noise is too high and does not allow unique identification of this phenomenon.

beležimo prostorsko. Visokofrekvenčni vpliv vetra od nizkofrekvenčnega loči seizmični signal, ki mu pravimo sekundarni mikroseizem (Loguet-Higgins, 1950) in je posledica valovanja oceanov, ki na potresnih opazovalnicah DMPO povzročajo večje nihanje tal od vetra. Zato se lahko visokofrekvenčni vpliv vetra opazuje približno od 1 Hz naprej. Na spektrih iz DMPO pa smo ugotovili, da se vpliv vetra nad 10 Hz izraziteje poveča (slika 1, slika 2). Slika 1 prikazuje spekter močnostne gostote za enourni podatek, zabeležen na seizmometru v obdobju, ko vetra ni, in v vetrovnem obdobju. Slika 2 prikazuje seizmični odtis vetra januarja 2023, ko je bilo večdnevno vetrovno obdobje, in na dveh potresnih opazovalnicah, ki sta med seboj oddaljeni 20 km. Za to obdobje najdemo v arhivu ARSO poročilo Sneženje in močan veter med 21. in 24. januarjem 2023 (ARSO, 2023a). Tako tudi veter zmanjša »sposobnost« potresne opazovalnice za zaznavanje dežnih kapelj in tudi potresov. Veter ni prisoten le ob padavinah. Močan veter, ki je bil 4. februarja 2023 (ARSO, 2023b), smo izrazito zaznali na nekaterih potresnih opazovalnicah. Vpliv vetra je lokalni, saj je odvisen od okolice potresne opazovalnice. Večji visoki objekti v neposredni bližini opazovalnice, kot so drevesa ali visoki ozki objekti, lahko pretvorijo bistveno več energije vetra v nihanje tal kot manjši objekti. Vpliv vetra je odvisen tudi od lokacije in topografije okolice opazovalnice, saj so nekatera območja bolj vetrovna od drugih. V Sloveniji to velja za potresni opazovalnici Knežji dol in Javornik na Primorskem, kjer je najmočnejši veter burja. Na potresnih opazovalnicah DMPO imamo poleg seizmometra postavljen tudi pospeškometer, ki je namenjen detekciji izrazitejših nihanj tal (Tasič, 2018). Ker je instrumentalni šum pospeškometra bistveno višji od seizmometra, vpliva vetra na dolgih periodah na tem merilniku ne opazimo, na visokih pa le takrat, če je seizmični signal kot posledica vetra bistveno nad pragom detekcije posamezne komponente pospeškometra. Na sliki 3 je seizmični zapis vetrovnega dogajanja na potresni opazovalnici JAVS, kot sta ga zabeležila pospeškometer in seizmometer. Instrumentalni

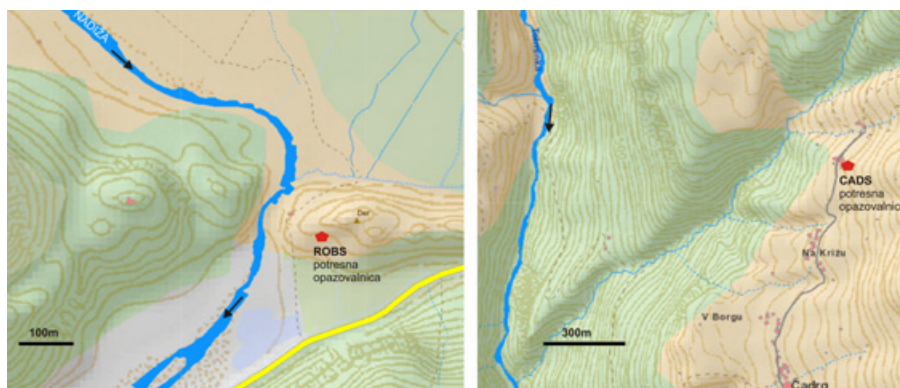
šum pospeškometra na navpični in NS-komponenti pospeškometra onemogoča zaznavanje vetra. Brez »pomoči« seizmometra ga v resnici ne moremo identificirati tudi na EW-komponenti. Če je pospeškometer postavljen v urbanem okolju, antropogeni šum še dodatno zmanjša sposobnost aparature za detekcijo vetra. 1. avgusta 2023 se je nevihta, ki je nastala nad Brkini, nad ilirskobistriško kotlino okrepila in nekaj po osmi uri zvečer s tornadom prizadela Koseze pri Ilirski Bistrici (ARSO, 2023c), pri čemer je bilo poškodovanih tudi nekaj zgradb. Čeprav je akcelerograf v Ilirski Bistrici oddaljen le en kilometer od Kosez, zaradi antropogenega šuma na zapisih pospeškometra tega pojava ni bilo mogoče identificirati.

SEIZMIČNI SIGNALI OB IZREDNIH HIDROLOŠKIH DOGODKIH

Tudi reke puščajo svoj seizmični odtis, ki je zabeležen, če je potresna opazovalnica dovolj blizu. Vendar je vpliv reke na nihanje tal zelo kompleksen in odvisen od več dejavnikov. Izvora nihanj tal v reki razdelimo na dva tipa, in sicer na tok reke in transport sedimentov v reki.

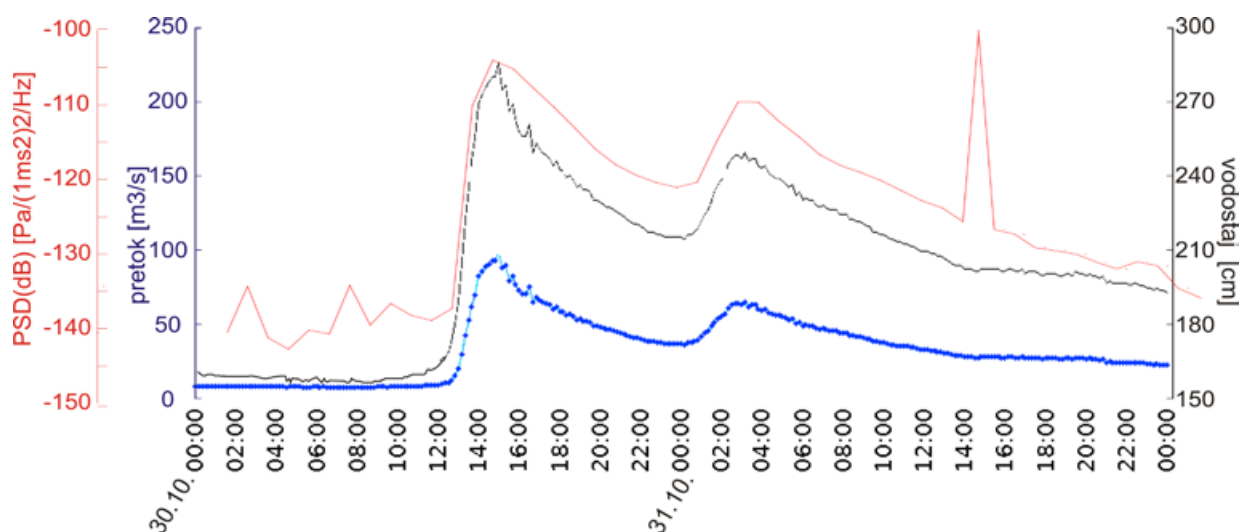
Seizmični odtis toka reke, predvsem turbulentnega toka, je povezan z rečno strugo, obalo in velikostjo pretoka. Pri seizmološkem eksperimentu, ki so ga leta 2015 naredili v Kaliforniji (ZDA) na reki Trinity (Schmandt in sod., 2017), kjer so poplavo simulirali s pomočjo izpusta vode iz jezusa, vpliv reke pa so merili s 76 seizmometri, postavljenimi ob obali v dolžini 700 m, so ocenili, da je seizmični odtis toka reke na frekvenčnem območju do 12 Hz in je linearno povezan z velikostjo pretoka. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi v Nemčiji za potresno opazovalnico AHRW, ki je od reke Arh oddaljena približno 1,1 km (Dietze in sod., 2022).

Transport sedimentov po reki je še bolj kompleksen pojav, kar velja tudi za njegov seizmični odtis. Transport



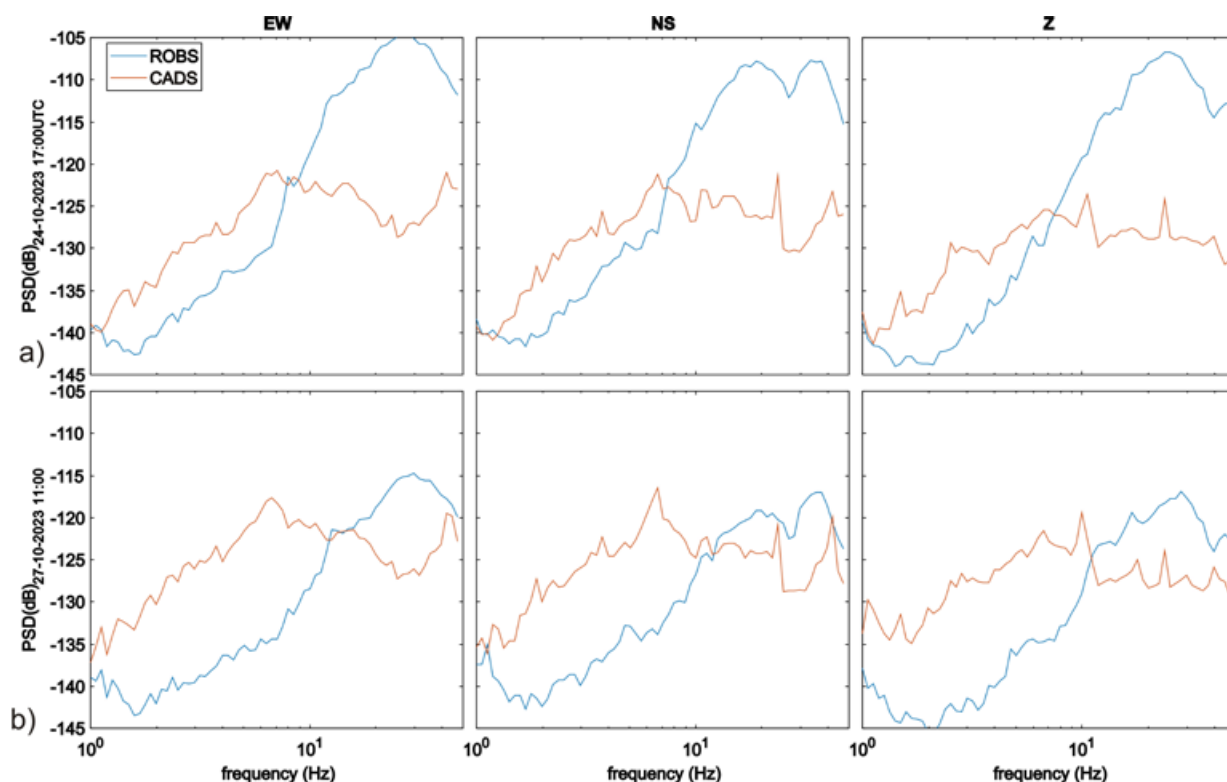
Slika 4: Lokacija potresne opazovalnice ROBS glede na tok reke Nadiže (levo) in lokacija potresne opazovalnice CADS glede na tok reke Tolminke (desno)

Figure 4: The location of the ROBS seismic station relative to the course of the Nadiža River (left), and the location of the CADS seismic station relative to the course of the Tolminka River (right)



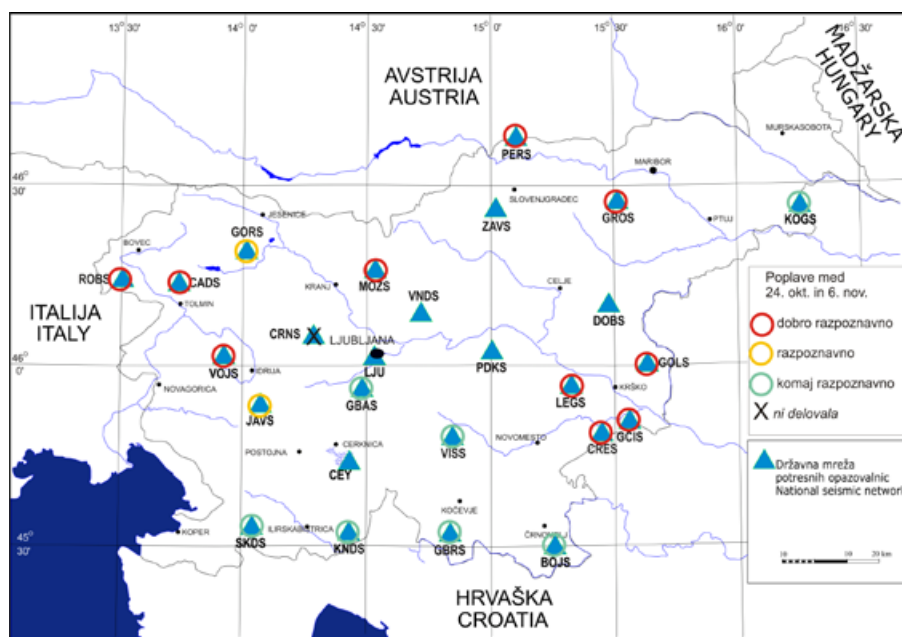
Slika 5: Pretok (modro) in vodostaj (črno) reke Nadiže na lokaciji Potoki za 30. in 31. oktober 2023 (ARSO, 2024b) ter spektrogram pri 30 Hz (rdeče) iz potresne opazovalnice ROBS za isto obdobje. Spektrogram, ki se računa iz enournega seizmičnega zapisa za vsako polno uro, je skladen s pretokom reke. Špica na spektrogramu popoldne 31. oktobra je seizmični signal iz drugega vira. Zamik spektrograma na grafu je posledica časovne uskladitve, seizmografi uporabljajo UTC-čas, hidrološki podatki pa standardni srednjeevropski čas (UTC +1).

Figure 5: Flow (blue) and water level (black) of the Nadiža River at the Potoki location for 30 and 31 October 2023 (ARSO, 2024b) and a spectrogram at 30 Hz (red) from the ROBS seismic observatory for the same time period. A spectrogram calculated from a one-hour seismic record for each full hour is consistent with the flow of the river. The peak on the spectrogram in the afternoon of 31 October is a seismic signal from another source. The time delay of the spectrogram on the graph is the result of time alignment: seismographs use UTC time, and hydrological data use Central European Standard Time (UTC +1).



Slika 6: Spektri močnostne gostote enournih zapisov nihanj tal za vse tri komponente na potresnih opazovalnicah ROBS (modra črta) in CADS (rdeča črta) 24. oktobra 2023 ob 17.00 UTC (slika a) in 27. oktobra 2023 ob 12.00 UTC (slika b). Leta 2023 je bil največji pretok reke Nadiže 24. oktobra 2023 in največji pretok reke Tolminke (pri Tolminu) 27. oktobra 2023.

Figure 6: PSD-s of one-hour records of ground motions for all three components at the seismic station ROBS (blue line) and CADS (red line) on 24 October 2023 at 17:00 hrs UTC (a) and on 27 October 2023 at 12:00 hrs UTC (b). In 2023, the maximum flow of the Nadiža River was on 24 October 2023 and the maximum flow of the Tolminka River (near Tolmin) was on 27 October 2023.



Slika 7: Poplave v Sloveniji med 24. oktobrom in 6. novembrom 2023 (ARSO, 2023h) so pustile svoj seizmični odtis na večini potresnih opazovalnic DMPO (preglednica 2). Razpoznavnost seizmičnega odtisa na posamezni potresni opazovalnici smo razdelili v tri razrede: komaj razpoznaven (zeleni krog), razpoznaven (rumeni krog) in dobro razpoznaven (rdeči krog).

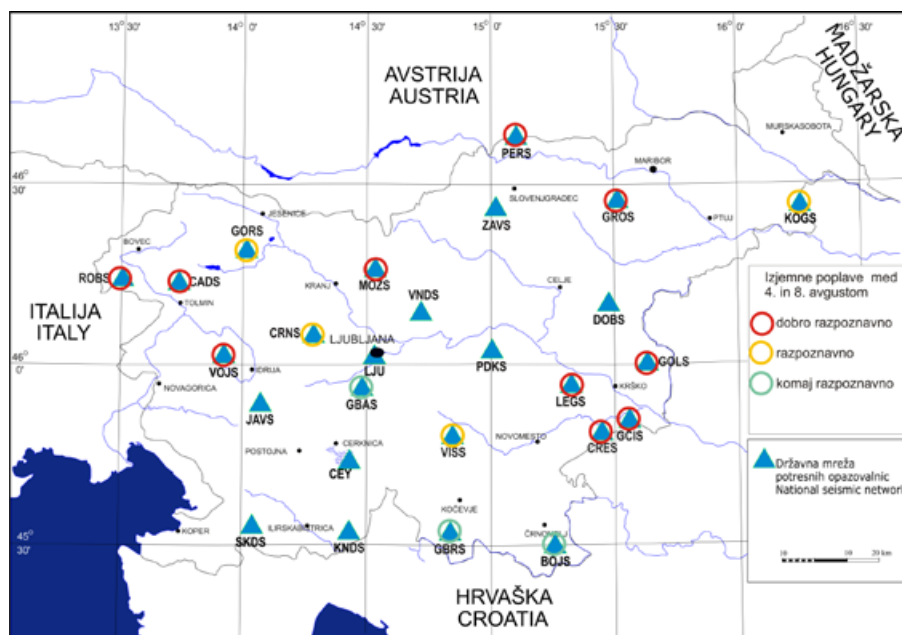
Figure 7: Floods in Slovenia between 24 October and 6 November 2023 (ARSO, 2023h), left a seismic imprint at most SNRS seismic stations (Table 2). The recognizability of the seismic footprint at each seismic observatory was divided into three classes: barely recognizable (green circle), recognizable (yellow circle), and well recognizable (red circle).

delcev v reki lahko razdelimo na dva sistema: prenos plavajočih in lebdečih predmetov (plavje) in kotaljenje ter drsenje proda po dnu reke (Knapič in sod., 2019). Predvsem rinjenje plavin po rečnem dnu se v večjih količinah pojavi šele pri večjih pretokih in je poleg pretoka odvisno tudi od oblike rečnega dna in struge. Pri poskusu na reki Trinity (Schmandt in sod., 2017), kjer so med drugim v vodo sipali gramoz, so ocenili, da je seizmični odtis transporta sedimentov prisoten nad 20 Hz, vendar šele po tem, ko je bil pretok reke dovolj velik, da je omogočil transport sedimentov.

Ker je seizmični odtis reke zelo kompleksen in so ugotovitve eksperimenta na reki Trinity odvisne tudi od lokalnih posebnosti, lahko pričakujemo, da je

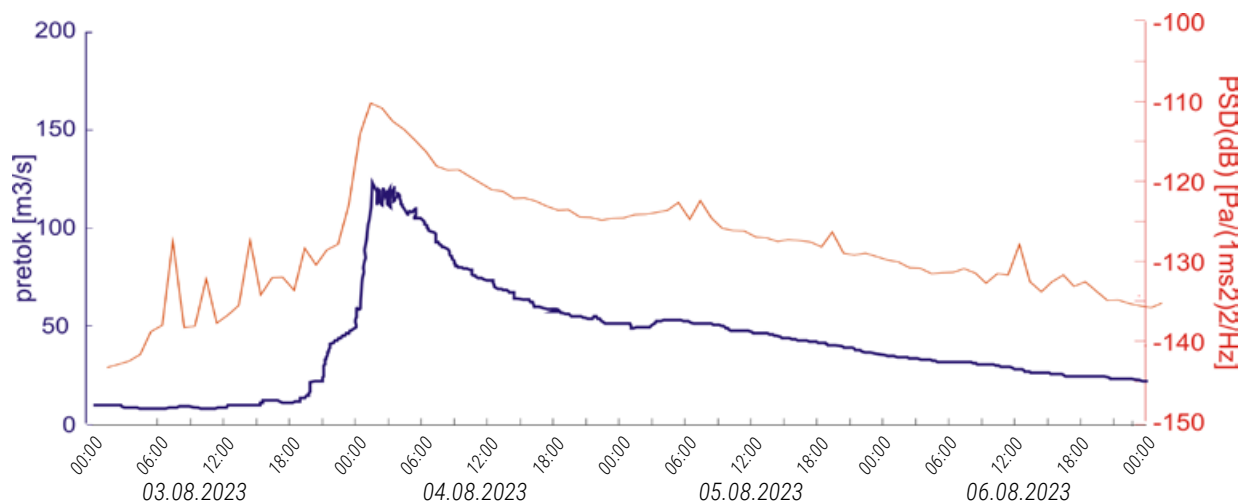
seizmični odtis reke odvisen od oblike rečne struge v bližini potresne opazovalnice ter od oddaljenosti potresne opazovalnice do struge.

Dve opazovalnici DMPO sta v bližini hudourniških rek, kjer lahko opazujemo vpliv rek po večjih padavinskih dogodkih na seizmično nihanje tal. Opazovalnica ROBS je od Nadiže oddaljena 90 m, pri tem pa reka na tem območju naredi 90-stopinjski zavoj (slika 4). Potresna opazovalnica CADS je od Tolminke oddaljena 0,9 km (slika 4). Zaradi hudourniškega značaja se pretoka reke ob obilnih padavinah precej povečata. Obe reki sta imeli v kompleksnem vremenskem dogajanju med 24. oktobrom in 6. novembrom 2023 (ARSO, 2023h) po večkrat povečan pretok. Na sliki 6



Slika 8: Poplave v Sloveniji med 4. in 8. avgustom 2023 (ARSO, 2023g) so pustile svoj seizmični odtis na dobri polovici potresnih opazovalnic DMPO (preglednica 2). Razpoznavnost seizmičnega odtisa na posamezni potresni opazovalnici smo razdelili v tri razrede: komaj razpoznaven (zeleni krog), razpoznaven (rumeni krog) in dobro razpoznaven (rdeči krog).

Figure 8: The floods in Slovenia between 4 and 8 August 2023 (ARSO, 2023g) left a seismic imprint at more than half of the DMPO seismic stations (Table 2). The recognizability of the seismic footprint at each seismic observatory was divided into three classes: barely recognizable (green circle), recognizable (yellow circle), and well recognizable (red circle).



Slika 9: Pretok reke Tolminke (modro) na merilni postaji Tolmin 1 (ARSO, 2024a, 2024b, 2023g), ki je od potresne opazovalnice CADS oddaljena nizvodno 5 km, in spektrogram seizmičnega signala pri 7Hz s potresne opazovalnice CADS (izračunani za vsako polno uro). Grafa sta med seboj skladna, posamezne špice spektrograma, ki so najbolj vidne 3. avgusta 2023, so seizmični signal iz drugega vira.

Figure 9: Flow of the Tolminka River (blue) at the Tolmin 1 gauging station (ARSO 2024a, 2024b, 2023g), which is 5 km downstream from the CADS seismic observatory, and the spectrogram of the seismic signal at 7Hz from the CADS seismic station (calculated for each full hour). The two graphs are consistent with each other; the individual spikes in the spectrogram, most visible on 3 August 2023, are seismic signals from other sources.

so za 30. in 31. oktober 2023 na istem grafu prikazani pretok in višina reke Nadiže na hidrološki merilni postaji Potoki (ARSO, 2024a), ki je od potresne opazovalnice oddaljena nadvodno 0,7 km, in spektrogram seizmičnega signala potresne opazovalnice ROBS pri 30 Hz. Grafi so med seboj skladni, kar kaže na povezavo med seizmičnim signalom in pretokom vode. Leta 2023 je bil največji pretok reke Nadiže izmerjen 24. oktobra 2023 (Petan, 2024; ARSO, 2024a, 2024b). Ta dan so na ROBS imeli visokofrekvenčni spektri močnostne gostote največjo intenziteto med 17. in 18. uro UTC, kar je bilo skladno z največjim pretokom, izmerjenim na hidrološkem merilnem mestu Potoki. Slika 6a prikazuje spekter močnostne gostote enournega zapisa za to obdobje za vse tri med seboj pravokotne merilnike nihanj tal v seizmometru (EW, NS, Z). Za primerjavo so na istem grafu prikazani tudi spektri za seizmične podatke, zabeležene na lokaciji CADS ob isti uri. Tudi Tolminka je imela ta dan povečan pretok. Največji pretok reke Tolminke leta 2023 je bil v Tolminu zabeležen 27. oktobra 2023. Slika 6b prikazuje spekter močnostne gostote enournega zapisa z dne 27. oktobra 2023 ob 11.00 UTC, ker so spektri na lokaciji CADS ob tej uri imeli največjo intenziteto, kar je skladno z izmerjenim največjim pretokom na lokaciji Tolmin I (ARSO, 2024a), ki je sicer 5 km nizvodno od potresne opazovalnice CADS. Na istem grafu so prikazani še spektri za lokacijo ROBS ob isti uri. Tega dne je imela reka Nadiža sicer povečan pretok, a več kot dvakrat manjšega, kot je bil 24. oktobra 2023. A kljub bistveno manjšemu pretoku so na lokaciji ROBS

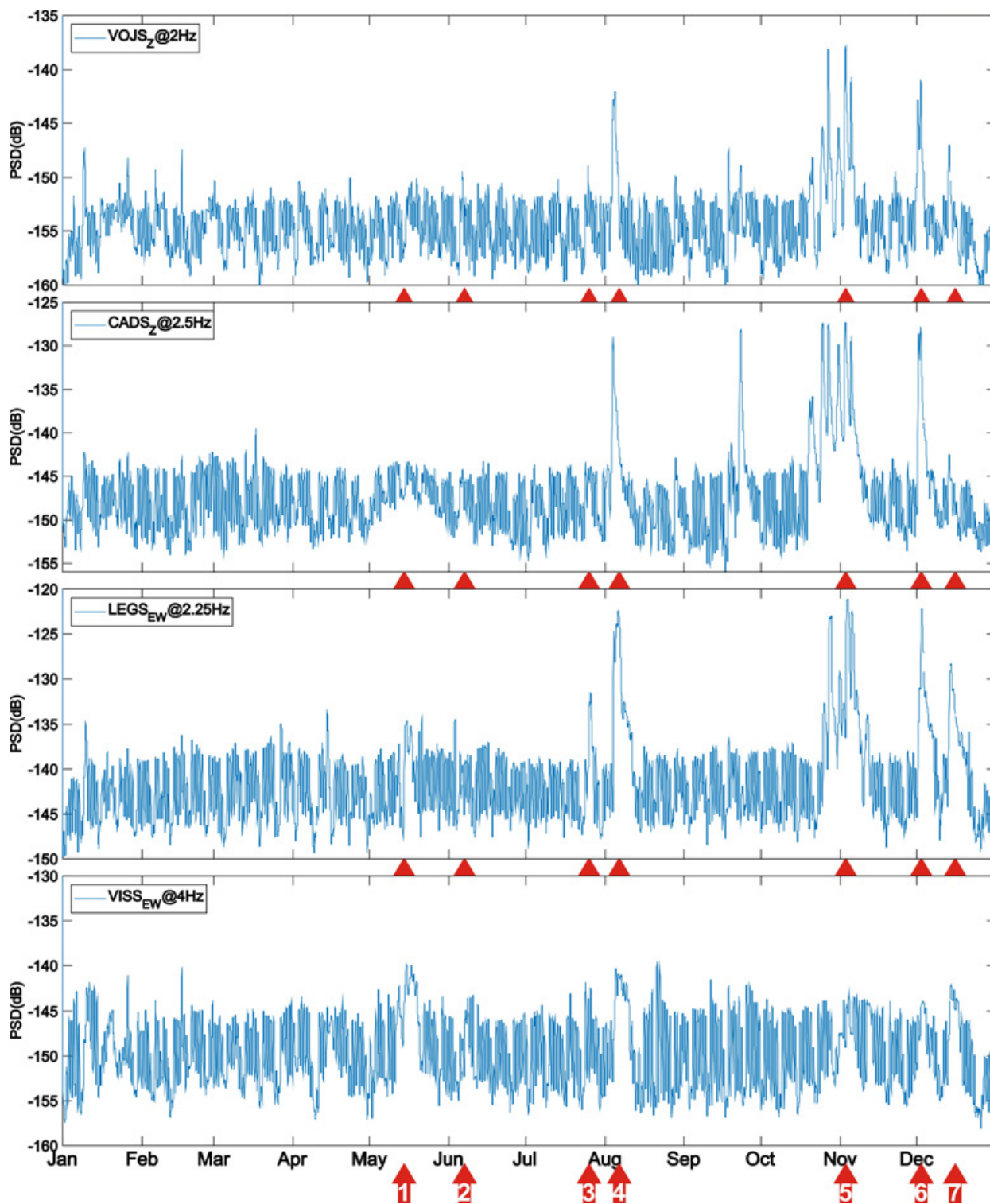
oblike grafov (ne pa intenzitete) med posameznimi komponentami podobne. Vrhovi grafov so pri istih komponentah (npr. EW 24. in EW 27. oktobra) ne glede na dan na približno istih frekvencah. Podobnost v oblika grafa je najverjetneje posledica bližnjega zavoja struge reke, kjer pri povečanih pretokih pride do intenzivnih turbulentnih tokov na skoraj istih lokacijah, kar ustvari podobne seizmične odtise. Pri tem verjetno pride tudi do drsenja trdih delcev po tleh.

Primerjava grafov med potresnima opazovalnicama ROBS in CADS (slika 6) pokaže, da ima Nadiža na ROBS seizmični odtis na bistveno višjih frekvencah kot Tolminka na CADS. Razloga sta zagotovo dva:

1	Visoke vode in poplave med 14. in 19. majem 2023 (ARSO, 2023d)
2	Hudourniška poplava reke Cerknice 13. julija 2023 (ARSO, 2023e)
3	Visoke vode in poplave med 20. in 26. julijem 2023 (ARSO, 2023f).
4	Izjemne poplave v Sloveniji med 4. in 8. avgustom 2023 (ARSO, 2023g)
5	Poplave v Sloveniji med 24. oktobrom in 6. novembrom 2023 (ARSO, 2023h)
6	Visoke vode in poplave med 1. in 3. decembrom 2023 (ARSO, 2023i)
7	Visoke vode in poplave 13. in 14. decembra 2023 (ARSO, 2023j)

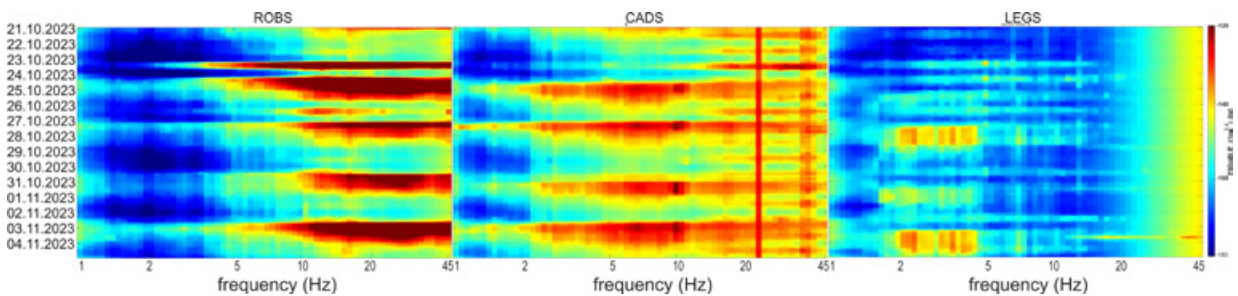
Preglednica 1: Poročila o izrednih hidroloških dogodkih leta 2023 na spletni strani ARSO

Table 1: Reports on the extraordinary hydrological events in 2023 on the ARSO website



Slika 10: Prikaz seizmičnih odtisov za hidrološke dogodke iz preglednice 1 za štiri potresne opazovalnice (oznake VOJS, CADS, LEGS, VISS) pri frekvenci, kjer je bil odtis na posamezni potresni opazovalnici najbolj izrazit. Številke na puščici prikazujejo posamezne hidrološke dogodke, ki so opisani na spletnih straneh ARSO (preglednica 1). Za seizmični odtis 23. septembra 2023, ki ga zaznamo na potresni opazovalnici CADS, sicer ni poročila, je pa bil ta dan izmerjen povečan pretok reke Tolminke (Petan, 2024). To kaže na to, da so seizmični podatki iz potresne opazovalnice CADS dober indikator za zaznavanje povečanega pretoka Tolminke.

Figure 10: Display of seismic footprints for hydrological events from spreadsheet 1 for four seismic observatories (labels VOJS, CADS, LEGS, VISS) at the frequency where the footprints at each seismic observatory were the most pronounced. The numbers on the arrow show individual hydrological events and are consistent with Table 1. There is no report for the seismic footprint of 23 September 2023, detected at the CADS seismic station, but an increased flow in the Tolminka River was also measured on that day (Petan, 2024). This indicates that the seismic data from the CADS seismic observatory is a good indicator for detecting an increased flow in the Tolminka River.



Slika 11: Spektrogrami prikazujejo seizmični odtis kompleksnega vremenskega dogajanja med 24. oktobrom in 6. novembrom 2023 (ARSO, 2023h) na treh potresnih opazovalnicah ROBS, CADS in LEGS. Seizmični odtisi, ki so posledica več padavinskih dogodkov v tem časovnem obdobju, se glede na opazovalnice razlikujejo tako po frekvenci kot po intenziteti in tudi po začetku posamezne faze.

Figure 11: Spectrograms show the seismic footprint of the complex hydrological event between 24 October and 6 November 2023 (ARSO, 2023h) at three seismic stations, ROBS, CADS and LEGS. The seismic footprints, which are the result of several precipitation events during this time period, differ according to the observatories both in terms of frequency and intensity and also according to the beginning of each phase.

prvi je ta, da je CADS bolj oddaljena od struge reke kot ROBS. Ker se višje frekvence bolj dušijo kot nižje, to pomeni manjše zastopanje višjih frekvenc v seizmičnem odtisu. Drugi razlog je, da struga Nadiže naredi v bližini potresne opazovalnice oster ovinek, kar prispeva k seizmičnemu odtisu na višjih frekvencah.

Za seizmični odtis Tolminke pridemo do zanimivih ugotovitev. Če za potresno opazovalnico CADS primerjamo med seboj grafe iz slik 6a in 6b, opazimo, da so si spektri po komponentah ne le podobni, imajo tudi podobne jakosti, čeprav je bil izmerjeni pretok v Tolminu 27. oktobra 2023 za skoraj eno tretjino večji kot 24. oktobra 2023. Ker pa je pretok reke merjen v Tolminu, to mogoče ni ustrezen podatek za Tolminko pod vasjo Čadrg. Poleg tega iz detekcije seizmičnih nihanj tal na lokaciji Čadrg ne moremo izločiti drugih hudourniških potokov, ki so v bližini vasi. Sem recimo spada potok Podpasica, ki je od opazovalnice oddaljen dobrih 200 m, in nimamo informacij o njegovi vodnatosti ter hudourniški dejavnosti v teh dneh. Glede na podobnost seizmičnih odtisov na lokaciji CADS med 24. in 27. oktobrom lahko tudi ocenimo, da seizmični odtis ni posledica transporta sedimentov.

Nismo pa zabeležili seizmičnega odtisa rek ob izrednih hidroloških dogodkih le na teh dveh opazovalnicah in le v tem obdobju. Za leto 2023 najdemo na spletni strani ARSO poročila za sedem izrednih hidroloških dogodkov (preglednica 1). V preglednici 2 so prikazani dogodki iz preglednice 1, ki so na posamezni potresni opazovalnici DMPO pustili svoj sled. Tako so poplave v Sloveniji med 24. oktobrom in 6. novembrom 2023 (ARSO, 2023h) pustile svoj seizmični odtis na večini potresnih opazovalnic DMPO (slika 7), izjemne poplave v Sloveniji med 4. in

8. avgustom 2023 (ARSO, 2023g) pa na več kot polovici potresnih opazovalnic (slika 8). Na sliki 9 je za ta dogodek na istem grafu prikazan pretok reke Tolminke na hidrološki merilni postaji Tolmin 1 (ARSO, 2024a), ki je od potresne opazovalnice nizvodno oddaljena 5 km, in spektrogram seizmičnega signala potresne opazovalnice CADS pri 7 Hz. Grafa sta med seboj skladna, kar kaže na povezavo med seizmičnim signalom in pretokom vode. Hudourniško poplavo reke Cerknice ni zaznala nobena potresna opazovalnica (ARSO, 2023e). Tudi kompleksno vremensko dogajanje med 14. in 19. majem 2023 (ARSO, 2023d) je zaznalo malo potresnih opazovalnic. Žal je potresna opazovalnica KOGS neposredno doživela vpliv tega dogajanja – zalila jo je voda in 16. maja 2023 je začasno prenehala delovati.

Seizmični odtisi za posamezni izredni hidrološki dogodek so se med opazovalnicami razlikovali, kar kaže na kompleksnost seizmičnega nihanja tal. Razen na prejemljenih potresnih opazovalnicah ROBS in CADS so bili seizmični odtisi hidroloških dogodkov na vseh drugih potresnih opazovalnicah DMPO na nižjih frekvencah. Zaznali smo jih na frekvenčnem območju med 1 Hz in 5 Hz. Slika 10 prikazuje zglajene spektre za štiri potresne opazovalnice za leto 2023 pri različnih frekvencah; za potresno opazovalnico VISS pri frekvenci 4 Hz, za potresno opazovalnico LEGS pri frekvenci 2,2 Hz, za potresno opazovalnico CADS pri frekvenci 2,5 Hz in za potresno opazovalnico VOJS pri frekvenci 2 Hz. Razlog za prikaz grafov v različnih frekvencah je, da se prepoznavnost hidroloških dogodkov med potresnimi opazovalnicami razlikuje ne le po intenziteti, temveč tudi po frekvenci, za kar pa ni kriv le izvor, temveč tudi mikrolokacija potresne opazovalnice. Vpliv antropogenega izvora seizmičnega signala, ki lahko zakrije druge izvore, se pa razlikuje med potresnimi opazovalnicami, se pod

Oznaka	Ime kraja	Visoke vode in poplave med 14. in 19. majem 2023 (ARSO, 2023d)	Hudourniška poplava reke Cerknice 13. julija 2023 (ARSO, 2023e)	Visoke vode in poplave med 20. in 26. julijem 2023 (ARSO-vode, 2023c)	Izjemne poplave v Sloveniji med 4. in 8. avgustom 2023 (ARSO, 2023g)	Poplave v Sloveniji med 24. oktobrom in 6. novembrom 2023 (ARSO, 2023h)	Visoke vode in poplave med 1. in 3. decembrom 2023 (ARSO, 2023i)	Visoke vode in poplave 13. in 14. decembra 2023 (ARSO, 2023j)
BOJS	Bojanci	R	/	/	KR	KR	KR	KR
CADS	Čadrg	/	/	/	D	D	D	R
CEY	Grahovo	/	/	/	/	/	/	/
CRES	Črešnjevec	/	/	/	D	D	R	R
CRNS	Črni Vrh	/	/	/	R	n. d.	n. d.	n. d.
DOBS	Dobrina	/	/	/	/	/	/	/
GBAS	Gorenja Brezovica	/	/	/	/	KR	/	/
GBRS	Gornja Briga	/	/	/	KR	KR	KR	KR
GCIS	Gornji Cirknik	/	/	R	D	D	D	D
GOLS	Goliše	/	/	/	D	D	D	D
GORS	Gorjuše	/	/	/	R	R	R	/
GROS	Grobnik	/	/	/	D	D	/	/
JAVS	Javornik	/	/	/	/	R	R	/
KOGS	Kog	n. d.	/	/	R	KR	/	/
KNDS	Knežji Dol	/	/	/	/	KR	KR	/
LEGS	Legarje	KR	/	R	D	D	D	D
LJU	Ljubljana	/	/	/	/	/	/	/
MOZS	Možjanca	/	/	/	D	D	D	/
PDKS	Podkum	/	/	/	/	/	/	/
PERS	Pernice	/	/	/	D	D	D	/
ROBS	Robič	/	/	/	D	D	D	/
SKDS	Skadanščina	/	/	/	/	KR	/	/
VISS	Višnje	R	/	/	R	KR	KR	R
VNDS	Vrh nad Dolskim	/	/	/	/	/	/	/
VOJS	Vojsko	/	/	/	D	D	D	R
ZAVS	Zavodnje	/	/	/	/	/	/	/

Preglednica 2: Glede na poročila o izrednih hidroloških dogodkih leta 2023, ki jih najdemo na spletni strani ARSO (preglednica 1: 7 dogodkov), smo preverili, na katerih potresnih opazovalnicah DMPO lahko te dogodke prepoznamo na seizmičnih zapisih. Identifikacijo smo razdelili v tri razrede: komaj razpoznavno (KR), razpoznavno (R) in dobro razpoznavno (D). Oznaka »n. d.« pomeni, da opazovalnica ni delovala.

Table 2: According to the reports on the extraordinary hydrological events in 2023 (7 events, Table1) found on the ARSO website, we checked which DMPO seismic stations had a recognizable trace of these events in the seismic records. We divided the identification into three classes: barely recognizable (KR), recognizable (R), and (D) well recognizable. The notation „n.d.“ means that the seismic station was not working.

4,5 Hz zmanjšuje. Na tej sliki je zanimiv graf potresne opazovalnice CADS, kjer so vsi izstopajoči signali skladni s poročili ARSO za izredne hidrološke dogodke, razen za 23. september 2023, ko ni bilo pripravljeno posebno

poročilo, je bil pa ta dan tudi izmerjen povečan pretok (Petan, 2024). To kaže na to, da so seizmični podatki iz potresne opazovalnice CADS dober indikator za zaznavanje povečanega pretoka Tolminke. Na sliki 11 je

spektrogram treh opazovalnic za navpično komponento za oktobrski hidrološki dogodek (ARSO, 2023h). Iz slike je razvidno, da je ta dogodek vseboval več faz, več padavinskih dogodkov. Seizmični odtisi se med opazovalnicami razlikujejo po frekvenčni sestavi. Na potresni opazovalnici LEGS hidrološko dogajanje opazujemo le v frekvenčnem območju med 1,5 Hz in 5 Hz, tudi spektrogram je drugače sestavljen kot spektrograma potresnih opazovalnic ROBS in CADS (slika 11).

Da nekatere potresne opazovalnice niso zabeležile nobenega izrednega hidrološkega dogodka, je kriv močan antropogeni šum, ki zakrije šibkejša seizmična signala. V to skupino spadajo potresne opazovalnice LJU, VNDS in CEY (preglednica 2).

Čprav je transport sedimentov v reki pomemben dejavnik seizmičnega signala, ne moremo z gotovostjo trditi, da smo na potresnih opazovalnicah DMPO leta 2023 zaznali tudi seizmični signal tega izvora. Izstopa sicer visokofrekvenčni signal, ki ga ob povečanih pretokih Nadiže zaznamo na potresni opazovalnici ROBS. Ta je zaradi oblike rečne struge, v neposredni bližini potresne opazovalnice se struga reke obrne skoraj za 90 stopinj (slika 4), verjetno kombinacija močnih turbulentnih tokov in tudi transporta sedimentov, oboje ob levem bregu reke, a obeh pojavov med seboj ne moremo ločiti.

SKLEPNE MISLI

Izredni vremenski dogodki lahko puščajo svoje »odtise« na seizmičnih zapisih. Nekatere sledi so lahko izvor novih informacij, nekatere pa tudi zakrivajo bolj pomembne seizmične signale, kot so na primer lokalni potresi. Dež kot izvor seizmičnega signala

je zaradi tipa merilne opreme, ki je inštalirana na potresnih opazovalnicah Državne mreže potresnih opazovalnic, neviden. Drugače je z vetrom. Močan veter v bližini potresne opazovalnice lahko povzroča izrazito nihanje tal, ki pa nam poda le malo koristnih seizmičnih informacij. Nihanje tal zaradi vetra pomeni motnjo (šum) v seizmični meritvi. Drugače pa je z odtisi, ki jih pustijo hidrološki dogodki. Seizmični zapisi teh pojavov lahko pokažejo njihovo velikost in trajanje na nekem območju. Vremenska dogajanja leta 2023 so pokazala, da so hidrološki dogodki na večini opazovalnic izvor seizmičnega nihanja tal v frekvenčnem območju med 1 Hz in 5 Hz ter da so pomembnejši, kot smo sklepali do zdaj. Seizmično zaznavanje povečanih pretokov rek in potokov je sicer odvisno od oblike rečne struge, oddaljenosti potresne opazovalnice od struge in od antropogenega seizmičnega signala, ki lahko zakrije seizmični signal hidrološkega izvora. Na potresnih opazovalnicah CADS in ROBS lahko ob močnejših nalivih na območju porečij Tolminke ali Nadiže seizmične signale neposredno povežemo z bližnjima rekama. Da bomo razumeli, kako so druge potresne opazovalnice DMPO povezane z izrednimi hidrološkimi dogodki, torej kateri vodotoki povzročajo povečane signale na potresnih opazovalnicah, bo treba opraviti še nekaj dodatnih analiz.

ZAHVALA

Zahvaljujem se dr. Sašu Petanu za podatke o pretokih rek in za razlage o hidroloških dogodkih, saj je njegova razlaga pomembno prispevala k razumevanju interakcije med hidrološkimi dogodki in seizmičnimi zapisi.

Viri in literatura

1. ARSO, 2024a. Atlas Okolja. https://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso, 14. 6. 2024.
2. ARSO, 2024b. Hidrološki podatki <https://www.arso.gov.si/vode/podatki/>, 14. 6. 2024.
3. ARSO, 2024c. Arhiv poročil o izrednih dogodkih do leta 2023, <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/natural-hazards/archive/>, 14. 6. 2024.
4. ARSO, 2024d. ARHIV – opazovani in merjeni meteorološki podatki po Sloveniji. <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>, 14. 6. 2024.
5. ARSO, 2023a. Sneženje in močan veter med 21. in 24. januarjem 2023. https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/weather_events/sneg_veter_21-24jan2023.pdf, 14. 5. 2024.
6. ARSO, 2023b. Močan veter 4. februarja 2023. https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/weather_events/veter_4feb2023.pdf, 14. 5. 2024.
7. ARSO, 2023c. Neurja 30. julija in 1. avgusta. 2023 https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/weather_events/neurja_30jul-in-1avg2023.pdf.
8. ARSO, 2023d. Visoke vode in poplave med 14. in 19. majem 2023. https://www.arso.gov.si/vode/poroc4%8dila%20in%20publikacije/Porocilo_visoke_vode_in_poplave_maj2023.pdf, 14. 5. 2024.
9. ARSO, 2023e. Hudourniška poplava reke Cerknice 13. julija 2023. https://www.arso.gov.si/vode/poroc4%8dila%20in%20publikacije/Hudourni%5a1ka_poplava_reke_Cerknice_13_20julija_2023.pdf, 14. 5. 2024.
10. ARSO, 2023f. Visoke vode in poplave med 20. in 26. julijem 2023. https://www.arso.gov.si/vode/poroc4%8dila%20in%20publikacije/Visoke_vode_in_poplave_julij3dekada_2023.pdf, 14. 5. 2024.
11. ARSO, 2023dg. Izjemne poplave v Sloveniji med 4. in 8. avgustom 2023. https://www.arso.gov.si/vode/poroc4%8dila%20in%20publikacije/Porocilo_visoke_vode_in_poplave_avg2023.pdf.
12. ARSO, 2023h. Poplave v Sloveniji med 24. oktobrom in 6. novembrom 2023. https://www.arso.gov.si/vode/poroc4%8dila%20in%20publikacije/Poplave_Slovenija_okt-nov_2023.pdf.

13. ARSO, 2023i. Visoke vode in poplave med 1. in 3. decembrom 2023. https://www.arso.gov.si/vode/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/Visoke_vode_poplave_1-3_dec_2023.pdf.
14. ARSO, 2023j. Visoke vode in poplave 13. in 14. decembra 2023. https://www.arso.gov.si/vode/poro%c4%8dila%20in%20publikacije/Porocilo_visoke_vode_in_poplave_13-14dec2023.pdf.
15. Petan, S., 2024. ARSO – osebna komunikacija. Dr. Sašo Petan, 2024.
16. Tasič, I., 2015. Spodnja raven seizmičnega šuma v Sloveniji. *Ujma*, 29, 343–349.
17. Tasič, I., 2018. Seizmometer in pospeškometer – merilni par na potresni opazovalnici. *Ujma*, 32, 210–217.
18. Tasič, I., 2022. Ali je ustavitev javnega življenja v Sloveniji zaradi covid-19 znižala raven seizmičnega šuma. *Ujma*, 36, 241–246.
19. Diaz, J., Ruiz, M., Udina, M., Polls, F., Martí, D., Bech, J., 2023. Monitoring storm evolution using a high-density seismic network. *Sci Rep* 13, 1853 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28902-8>.
20. Dietze, M., Hoffmann, T., Bell, R., Schrott, L., Hovius, N., 2022. A seismic approach to flood detection and characterization in upland catchments. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100170. <https://doi.org/10.1029/2022GL100170>.
21. Knapič, M., Ulaga F., Preglau, A., 2019. Upravljanje s sedimenti v akumulacijskih bazenih hidroelektrarn na reki Dravi: predstavitev pilotnega projekta plavljenja sedimentov v matico reke Drave pri HE Vuhred. Zbornik, 30. Mišičev vodarski dan. 2019. <https://mvd20.com/LETO2019/R25.pdf>, april 2024.
22. Schmandt, B., Gaeuman, D., Stewart, R., Hansen, S. M., Tsai, V. C., Smith, J., 2017. Seismic array constraints on reach-scale bedload transport. *Geology* 2017; 45 (4): 299–302. doi: <https://doi.org/10.1130/G38639.1>.
23. Vidrih, R., Sinčič, P., Tasič, I., Gosar, A., Godec, M., Živčič, M., 2006. Državna mreža potresnih opazovalnic, ur. Vidrih, R., Agencija RS za okolje, Ljubljana.
24. Longuet-Higgins, M. S., 1950. A Theory on the origin of microseisms. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*. 243, 1–35.