

ZAZNAVANJE PLIMOVANJA TRDNE ZEMLJE S SEIZMOMETRI DRŽAVNE MREŽE POTRESNIH OPAZOVALNIC

Izidor Tasič¹

Povzetek

Tla pod našimi nogami vsak dan nihajo z zelo dolgo periodo in amplitudo, tudi do 30 centimetrov, kar ni posledica potresov ali premikanj tektonskih plošč, temveč privlačnih sil Lune in Sonca. To premikanje je plimovanje Zemljine skorje in ga beležijo tudi občutljivi širokopasovni seizmometri državne mreže potresnih opazovalnic. Čeprav seizmometri niso namenjeni beleženju tako dolgoperiodnih nihanj tal, lahko z združitvijo meritev iz vse mreže pravilno opredelimo plimovanje Zemljine skorje v Sloveniji. S pomočjo teoretičnih informacij o plimovanju lahko tudi prepoznamo motnje v delovanju seizmometra ali vpliv strukture posamezne potresne opazovalnice na seizmološke meritve.

DETECTION OF EARTH TIDES BY THE SEISMOMETERS OF THE SLOVENIAN NATIONAL SEISMOLOGICAL NETWORK

Abstract

The ground beneath our feet moves every day, often by as much as 30 centimetres, but this is not caused by earthquakes or the movement of tectonic plates; it is the result of the gravitational forces of celestial bodies, especially the Moon and the Sun. This movement is the tides of the Earth's crust, and is also recorded by the sensitive broadband seismometers of the Slovenia National Seismological Network. Despite the fact that seismometers are not designed to record such long-period ground movements, by combining measurements from the entire network we can correctly record the tides of the Earth's crust in Slovenia. With the help of theoretical information about the Earth tides, we can also identify disturbances in the operation of the seismometers or the influence of the structure of individual seismic stations on seismological measurements.

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

UVOD

Plimovanje morja poznamo vsi in vemo, da je posledica privlačnih sil Lune ter Sonca. Manj znano je, da zaradi njune privlačnosti sil tudi trdna tla pod našimi nogami vsak dan periodično nihajo (Agnew, 2007) in da lahko ti premiki v Sloveniji dosežejo v navpični smeri amplitudo do 30 centimetrov (Milbert, 2018). Do tega plimovanja pride, ker Zemljina skorja ni povsem toga, temveč je prožna, kar povzroča dinamičen odziv Zemlje na privlačne sile nebesnih teles (Agnew, 2005). Ti premiki so tako počasni oziroma dolgoperiodni, da jih človeško telo ne zazna.

V nasprotju z morsko bibavico, pri kateri na višino oseke in plime poleg gravitacijskih sil Lune ter Sonca vplivajo tudi razčlenjenost obale, lokalna globina morja, topografija morskega dna, veter, vreme

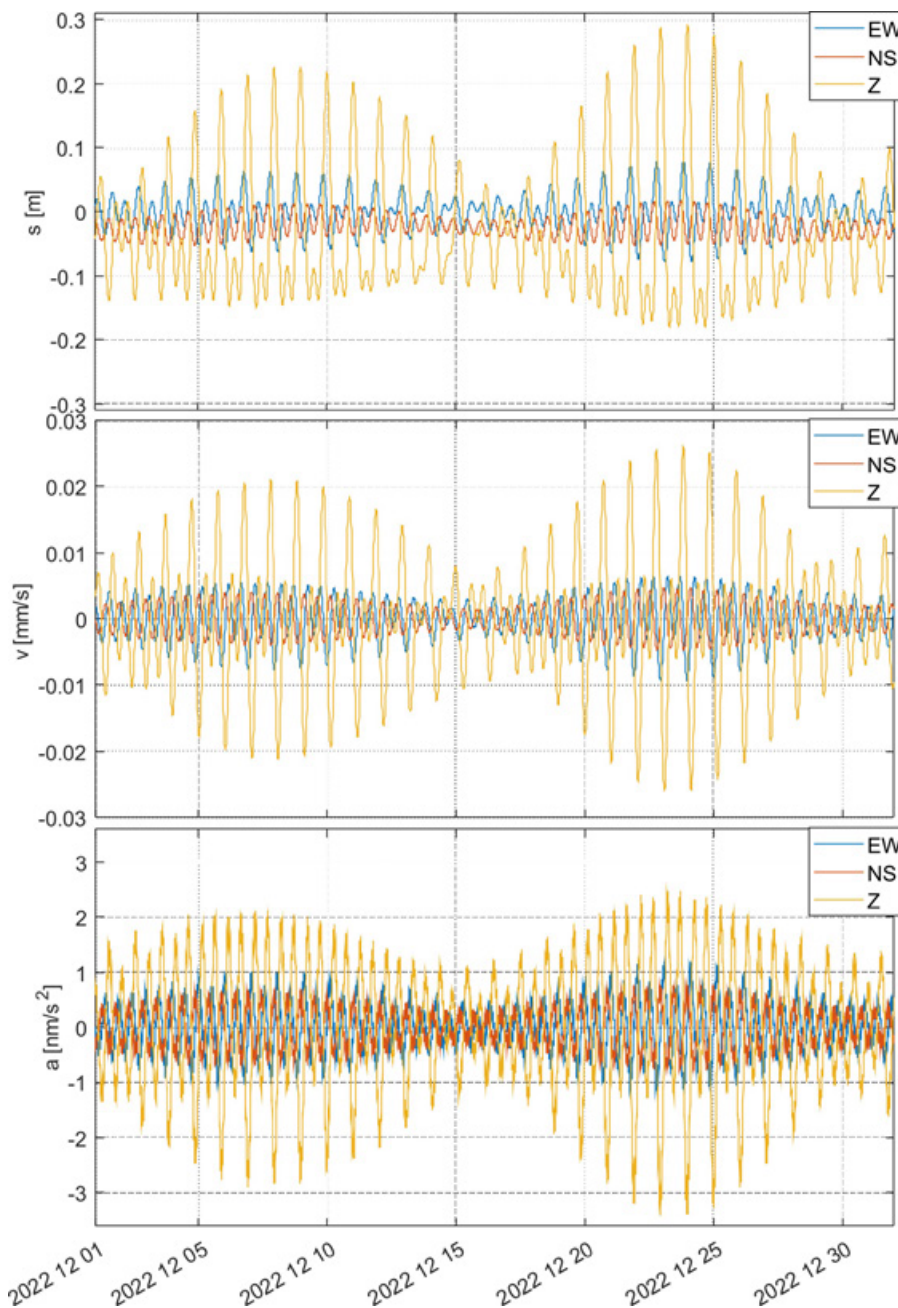
(zračni tlak) in lastna frekvenca nihanja oceanov (Christodoulidis in sod., 1988), je plimovanje trdne skorje veliko lažje modelirati. Zemlja je v nasprotju z vodo toga in ima bolj preprosto obliko kot oceanski bazeni, zaradi česar je pri odzivu Zemlje na privlačne sile Lune in Sonca treba upoštevati bistveno manj podrobnosti (Agnew, 2007). Preprost kazalnik, da je modeliranje morske bibavice zaradi prej opisanih vplivov precej kompleksnejše kot modeliranje plimovanja Zemljine skorje, je podatek, da morska bibavica ni časovno skladna s plimovanjem trdne Zemlje. To je poleg prej naštetih dejavnikov posledica tudi velike mase vode, ki se premika v oceanih zaradi plime, vendar jo pri premikanju ovira kopno. Zakasnitev plimovanja oceanov oziroma zamujanje plime glede na lego Lune in Sonca lahko traja nekaj ur, v nekaterih delih sveta pa tudi ves dan ali več (NOAA, 2023).

VPLIV LUNE IN SONCA

Tako imenovana kopenska plima obstaja na dveh koncih Zemlje hkrati, in sicer na strani, ki gleda proti Luni, in na nasprotni strani, saj je deformacija Zemlje zaradi gravitacijske sile Lune (skoraj) simetrična. Perioda plime trdnih tal je zaradi privlačnosti Lune 12 ur in 25,2 minute, kar je polovica Luninega dneva in jo imenujemo tudi Lunina poldnevica. Lunin dan je nekoliko daljši od Zemljinega in traja 24 ur in 52 minut, ker Luna kroži v isti smeri, kot se Zemlja vrti okoli svoje osi. Pri opisu bibavice Zemljine skorje je ta perioda znana tudi kot sestavina plimovanja M_2 , pri čemer indeks pove, da gre za polovico Luninega dneva (Agnew, 2005).

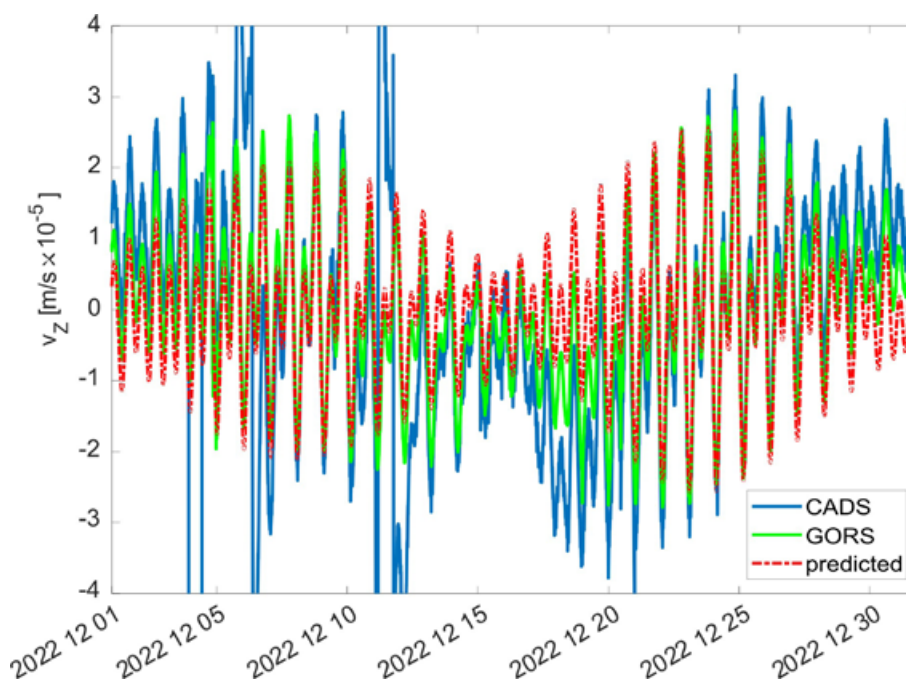
Luna ima največji vpliv na plimovanje Zemljine skorje. Nekoliko manjši vpliv na bibavico Zemlje ima Sonce, ki je od Luninega manjši za približno 0,46-krat. Perioda plime je zaradi vpliva Sonca 12 ur, torej polovico Zemljinega dneva. Pri opisu bibavice Zemljine skorje se ta dvanajsturna perioda označi kot S_2 .

Plima tal je največja, ko so Sonce, Luna in Zemlja v liniji ter se vpliva Sonca in Lune seštejeta. Zaradi različnih navidezni obhodnih časov Lune in Sonca okoli Zemlje je Sonce pravokotno glede na pozicijo Lune na približno vsakih 14 dni in takrat je višina plime najmanjša.



Slika 1: Prikaz plimovanja trdne Zemljine skorje za Ljubljano za december 2022. V zgornjem grafu je prikazana amplituda odmika (Milbert, 2018), v srednjem grafu amplituda hitrosti in v spodnjem grafu amplituda pospeška nihanj tal. (avtor slike: I. Tasič)

Figure 1: Earth tides for Ljubljana for the month of December 2022. The upper graph shows the displacement amplitude (Milbert 2018), the middle velocity amplitude, and the lower graph the acceleration amplitude of ground vibrations. (Figure: I. Tasič)



Slika 2: Zapisa navpične sestavine hitrosti nihanja tal s potresnih opazovalnic CADS (modra črta) in GORS (zelena črta) za december 2022. Podatki so bili vzorčeni s frekvenco en vzorec na 100 sekund. Rdeča prekinjena črta je teoretični signal Zemljinega plimovanja (Milbert, 2018). (avtor slike: I. Tasič)

Figure 2: Record of the vertical components of the ground motion from the CADS (blue line) and GORS (green line) seismic stations for December 2022. Data was sampled at a frequency of one sample per 100 seconds. The theoretical signal of the Earth tides is shown by a red dashed line (Milbert 2018). (Figure: I. Tasič)

Orbita gibanja Zemlje okoli Sonca je eliptična in tudi orbita Lune okoli Zemlje ni ves čas enaka. Te spremembe v oddaljenosti obeh nebesnih teles glede na Zemljo se kažejo kot spremembe amplitude bibavice v različnih časovnih periodah. Primer je perioda 18,6 leta in je posledica precesiranja Lune okoli ekliptike (Agnew, 2007).

Nihanje tal zaradi plime v resnici ni tako preprosto. Vrtenje Zemlje in njena eliptičnost povzročata, da bibavice ne sestavlja le osnovna oziroma primarna sferoidna deformacija, ki sledi poldnevni periodi Sonca in Lune, temveč pride tudi do deformacij s sferičnimi harmoniki višjih stopenj. Lastno oziroma resonančno nihanje Zemlje, ki ga navadno zaznajo seizmometri ob močnejših potresih, pri katerih najdaljša perioda ne preseže 53 minut, na Zemljino bibavico nima vpliva, saj je za plimovanje ta lastna frekvenca Zemlje previsoka (Alterman in sod., 1959).

Še en zanimiv pojav lahko zasledimo pri plimovanju Zemljine skorje. Zaradi vrtenja Zemlje in njene eliptične oblike tekoče jedro ter trdni plašč procesirata drug okoli drugega. To je znano kot skoraj dnevno prosto nihanje (nearly diurnal free wobble – NDFW). Frekvenca tega pojava, in sicer 1,005 Sončevega dneva, spada v pas dnevnih plim in osek in ga tudi zaznajo občutljivi instrumenti, ki merijo Zemljino bibavico.

Na amplitudo nihanj tal lahko vpliva tudi visoka plima v oceanih. Oceanska plima ni časovno skladna z Zemljino, zato se na obalnih območjih ob visoki oceanski

plimi tla v širši okolici posedejo, da se sistem uravnoteži. Podobno se zgodi, če na posteljo položite težek predmet in se lahko ob tem okolica tega predmeta posede. Nasproten pojav je ob visoki oseki. Ti premiki lahko vplivajo na amplitude Zemljine plime, kar občutljivi instrumenti lahko zaznajo (Agnew, 2005).

Na sliki 1 je za Ljubljano za december 2022 prikazano Zemljino plimovanje, kot ga napovedujejo enačbe. Pri pripravi grafa smo uporabili program Solid (Milbert, 2018), ki za izbrano lokacijo in čas izračuna amplitudo Zemljinega plimovanja. Napovedovanje plime za katerokoli lokacijo na svetu je danes že zelo natančno. Za napoved, ki temelji na harmonični analizi, je pomembno poznavanje položaja Lune in Sonca ter vrednosti Lovejevih števil h , k in l . To so brezdimenzijski parametri, ki predstavljajo Zemljin odziv na privlačne sile nebesnih teles, njihove vrednosti pa so dobljene numerično oziroma eksperimentalno. Leta 2022 je Ljubljana doživela največji odmik v navpični smeri 23. decembra skoraj ob 24. uri, saj je bil več kot 29 centimetrov. V vodoravni smeri se je največji odmik v smer od vzhoda do zahoda zgodil več kot dve uri prej in je bil manj kot osem centimetrov. Tega leta je bila največja amplituda hitrosti isti večer in je v navpični smeri znašala približno 0,03 mm/s, v vodoravni smeri pa je bila desetkrat manjša. Pospešek nihanja tal je bil največji 10. septembra 2022 in je dosegel nekaj nm/s^2 .

Amplituda tal zaradi plime lahko doseže nekaj deset centimetrov, zato je to že precejšen premik in se pojavi vprašanje, ali lahko Zemljino plimovanje

proži potrese. Avtorji so sicer to poskusili dokazati, vendar do zdaj statistično pomembne korelacije med Zemljinim plimovanjem in potresi še niso potrjene (USGS, 2023; Ostrihansky 2019). Vulkanologi so potrdili povezavo med premikanjem magme znotraj vulkanov in plimovanjem.

Geodeti morajo tudi upoštevati plimovanja trdne Zemlje, predvsem pri prehodih med različnimi geodetskimi referenčnimi osnovami in tudi pri določanju absolutnega položaja z GNSS (Pavlovčič Prešeren in Kuhar, 2016).

MERITVE PLIMOVANJA ZEMLJINE SKORJE

Instrumente, s katerimi lahko merimo plimovanje Zemljine skorje, delimo v tri osnovne skupine, in sicer gravimetre, merilnike nagibov ter merilnike deformacij (Agnew, 2007). Gravimetri so najbolj natančni merilci nihanj bibavice v navpični smeri in jih lahko opišemo tudi kot zelo dolgoperiodne navpične seizmometre. Tako kot pri klasičnih seizmometrih je tudi v tem primeru utež v nihalu šibko pritrjena na ohišje prek posebne vzmeti. Opazujemo lahko relativno razliko med utežjo in ohišjem, na kar vpliva že šibka sprememba v gravitaciji. Vzmet za take instrumente je že leta 1936 razvil LaCoste (LaCoste, 1988) in se imenuje prenapeta vzmet. LaCoste in Romberg sta bila tudi prva, ki sta pri gravimetrih uporabila povratno zanko in tako povečala njihovo občutljivost. Danes imajo največjo občutljivost superprevodni gravimetri (Marson, 2012).

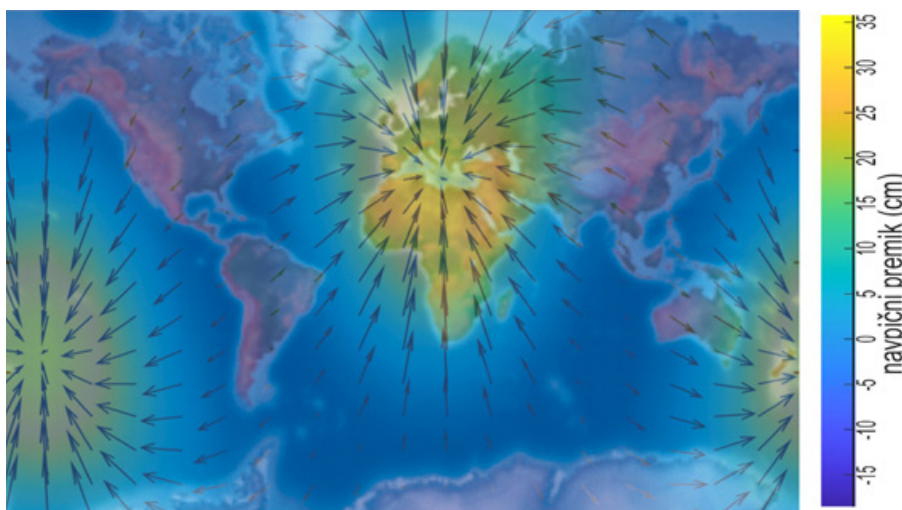
Pri merilnikih nagibov se najbolj pogosto uporabljajo merilniki po principu vodne tehnice v obliki prozorne cevi, napolnjene z vodo (Ruotsalainen, 2001). Kadar

sta konca cevi skupaj ali le nekaj metrov narazen, sta višini obeh vodnih stolpcev enaki. To je bilo dovolj natančno za zidarje. Kadar je razdalja med koncema cevi dovolj velika, lahko z natančnim odčitavanjem razlik vodnih stolpcev glede na ravnovesno lego ugotovimo razlike, ki so posledica nagibanja tal med točkama. Večja ko je razdalja, bolj natančno lahko določimo razliko od ničelne lege in tako tudi nagib tal med točkama. Da se zmanjša vpliv sprememb temperature na meritve, so ti merilniki postavljeni v podzemnih jaških, kjer so spremembe temperature na celotni dolžini merilnika zanemarljive.

Linearni merilniki deformacij (Agnew in Wyatt, 2003; Agnew, 1986) merijo spremembe v razdalji med točkama z uporabo trdnega kosa snovi (na krajši razdalji) ali laserskega interferometra (na veliki razdalji do nekaj sto metrov). S temi merilniki se prav tako zaznavajo spremembe v deformaciji, ki so posledica plimovanja tal.

MERITVE ZEMLJINEGA PLIMOVANJA S SEIZMOMETRI DRŽAVNE MREŽE POTRESNIH OPAZOVALNIC

Državno mrežo potresnih opazovalnic (DMPO), ki jo upravlja Agencija RS za okolje (ARSO), sestavlja 26 potresnih opazovalnic (Vidrih in sod., 2006), ki omogočajo neprekinjeno spremljanje seizmičnosti Slovenije in sveta ter zagotavljajo tudi kakovostne podatke za seizmološke in geodinamične znanstvene raziskave (Tasič, 2019). Od tega je 23 potresnih opazovalnic opremljenih s širokopasovnimi seizmometri, ki merijo hitrost nihanja tal vsaj na frekvenčnem območju med 0,0083 in 50 Hz. Njihov namen sicer ni merjenje zelo dolgoperiodnih signalov, vendar se je izkazalo, da lahko zaznajo tudi Zemljino plimovanje



Slika 3: Plima in oseka Zemljine skorje za 23. december 2022 ob 23.26 po UTC (Greene, 2023; Milbert, 2018). Puščice so namenjene nazornejšemu prikazu plimnega vala in niso v skali. (avtor slike: I. Tasič)

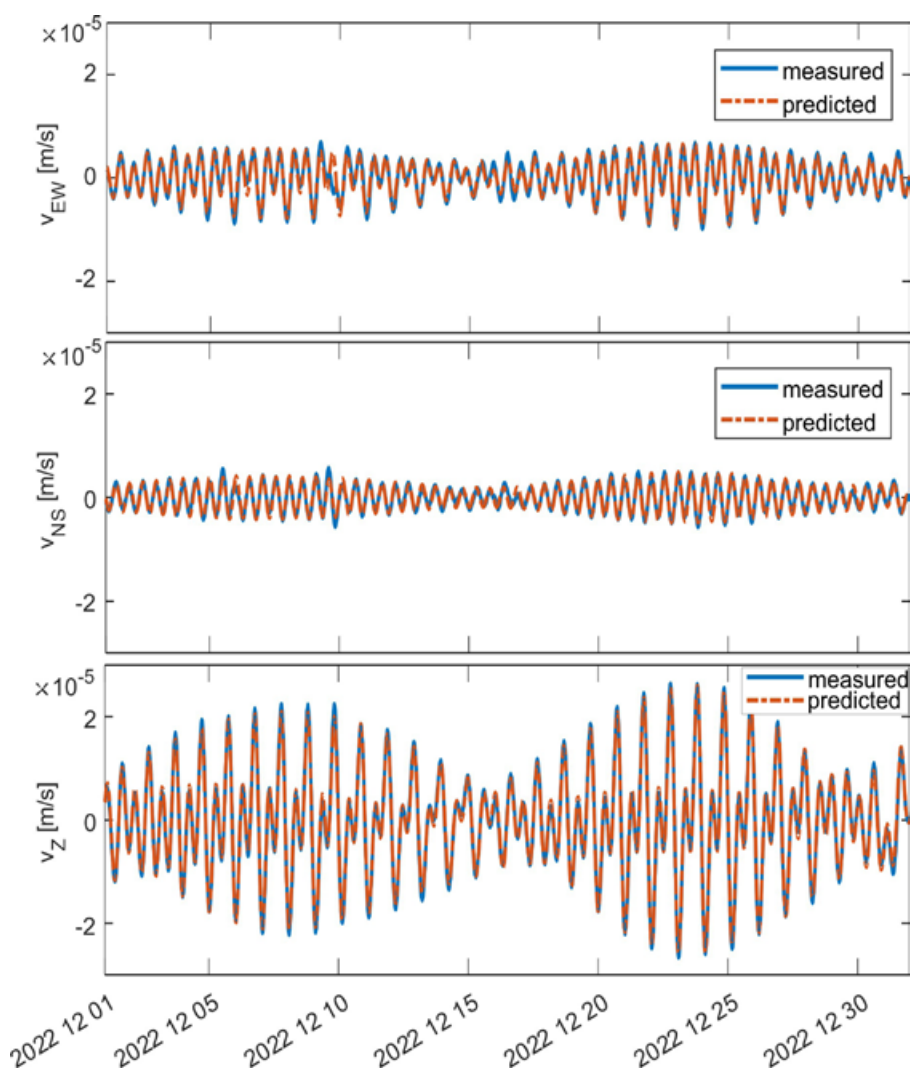
Figure 3: Tides of the Earth's crust for 23rd December 2022 at 23:26 UTC (Greene 2023, Milbert 2018). The arrows are for a clearer representation of the tidal wave and are not to scale. (Figure: I. Tasič)

(Hinderer in sod., 2002). Na sliki 2 sta prikazana seizmograma s potresnih opazovalnic GORS in CADS za december 2022. Na sliki vidimo, da je lahko signal plimovanja zakrit z drugimi signali. Ti so lahko posledica seizmičnih dogodkov, antropogene motnje ali vzdrževalnih del. Signali, ki so posledica dejavnosti na posamezni potresni opazovalnici, niso korelirani s signali na drugih potresnih opazovalnicah. Vrh plimnega vala preide Slovenijo v dobrih desetih minutah, kar je dober odstotek periode M_2 , zato lahko meritve v naši državi v prvem približku med seboj združimo. To je potrjeno tudi na sliki 3, na kateri sta prikazani plima in oseka Zemljine skorje 23. decembra 2022 ob 23.26 po UTC (Greene, 2023; Milbert, 2018). Na sliki je Slovenija majhna v primerjavi s plimnim čelom. Z združitvijo meritev vseh površinskih širokopasovnih seizmometrov DMPO in uporabo filtrov vključno z mediano dobimo vrednosti, ki se v veliki večini skladajo z napovedjo plimovanja (slika 4). Vidi se, da se združena meritev v obeh vodoravnih smereh občasno razlikuje od teoretične napovedi, označene z rdečo črtkano črto. Na sliki 5 je prikazan spekter

močnostne gostote združenih meritev iz DMPO za štiri leta. Različne faze plimovanja na območju pol-dnevni period in dnevni period so na navpični sestavini dobro vidne. Izmerjeno plimovanje navpične sestavine, ki ima za 10 dB manjši šum, kot je ta na vodoravnih sestavinah, je zelo skladno s teoretičnim izračunom. Amplituda plimovanja tal na vodoravnih sestavinah je manjša od amplitude na navpičnih, zato je tudi ločljivost signala pri dnevnih periodah manjša. Na sestavini od severa do juga tako prispevka dnevnih period ne ločimo več od šuma.

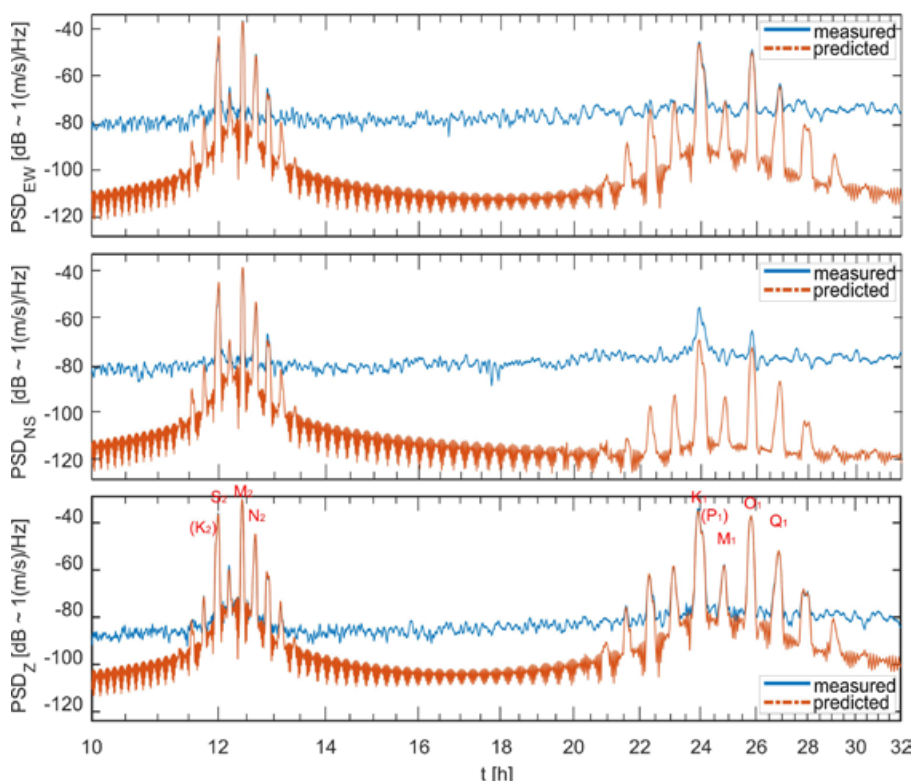
ANALIZA DELOVANJA POTRESNE OPAZOVALNICE Z ODSTRANITVIJO TEORETIČNIH VREDNOSTI ZEMLJINEGA PLIMOVANJA

Na slikah 4 in 5 je prikazano, da lahko s širokopasovnimi seizmometri, ki imajo na dolgoperiodnem delu spektra lastno nihanje 120 sekund ali več, zaznamo tudi plimovanje tal, ker je signal, ki ga povzroča



Slika 4: Plimovanje Zemljine skorje za Slovenijo za december 2022 v smeri od vzhoda do zahoda (zgoraj), v smeri od severa do juga (sredina) in v navpični smeri (spodaj). Modra črta prikazuje rezultat združenih meritev iz podatkov DMPO, rdeča pa teoretično vrednost. (avtor slike: I. Tasič)

Figure 4: The tides of the Earth's crust for Slovenia for December 2022 in the east-west direction (top), north-south direction (middle) and the vertical component (bottom). The blue line shows the result of combined measurements from the data of the national network of seismic stations, while the red line shows the theoretical value. (Figure: I. Tasič)



Slika 5: Spekter močnostne gostote združenih meritev iz podatkov DMPO (modra črta) in teoretične napovedi (rdeča črta). Podatki so bili vzorčeni s frekvenco en vzorec na 100 sekund. Pomembnejše faze plimovanja so na navpični sestavini označene z Darwinovo nomenklaturo.

(avtor slike: I. Tasič)

Figure 5: Power spectral density for the combined signal from DMPO data (blue line) and theoretical predictions (red line). The data was sampled at a frequency of one sample per 100 seconds. The more important tidal phases are marked on the vertical component with „Darwin“ nomenclature. (Figure: I. Tasič)

plimovanje večji od instrumentalnega šuma pri tako dolgih periodah. Z uporabo teoretične vrednosti nihanja tal zaradi plime (Milbert, 2018) lahko plimovanje »odstranimo« iz zabeleženega signala in tako poiščemo razlike v seizmičnem zapisu, ki lahko kažejo na motnje v delovanju seizmometra ali strukturi potresne opazovalnice. Ta analiza delovanja seizmološke opreme se lahko opravi v bistveno daljšem intervalu, kot to omogoča klasična dnevna analiza seizmičnih zapisov, ki temelji na urnih intervalih.

Primer uporabe tega postopka je analiza delovanja opreme na potresni opazovalnici Robič (ROBS). Večina potresnih opazovalnic DMPO je zgrajena tipsko in je sestavljena iz dveh jaškov. V globokem jašku je oprema, v plitvem pa podpora in komunikacijska oprema. Potresna opazovalnica ROBS je zgrajena v skalni votlini, v kateri je oprema. Dolgoperiodni seizmični signali, ki smo jih zaznavali na tej lokaciji, so kazali na to, da betonska podlaga ni ločena od pohodnega betonskega dna, zato smo jeseni 2021 posodobili nekatere dele objekta z izdelavo dveh novih betonskih podstavkov, ki sta bila ločena od podlage (slika 6). Seizmološko merilno opremo smo zaščitili še z manjšim montažnim objektom, ki jo je dodatno fizično in termično ločil od okolice.

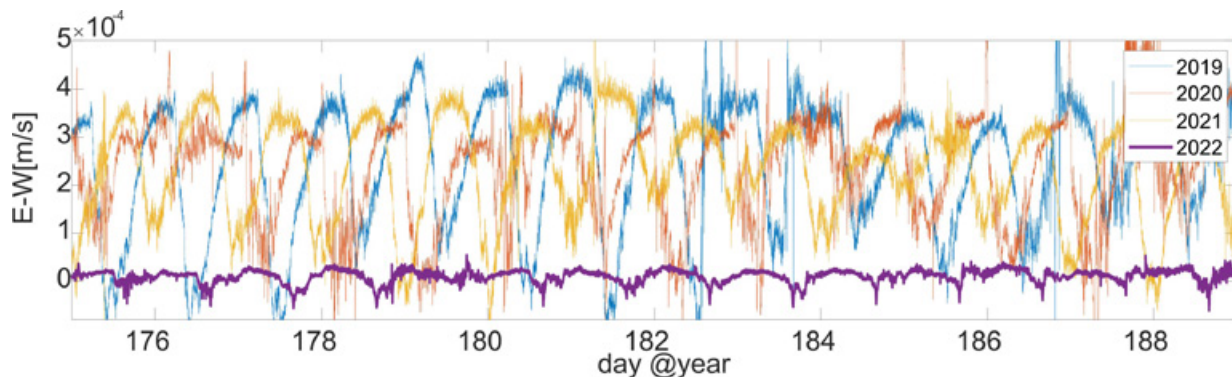
Primerjava dolgoperiodnih seizmoloških signalov pred rekonstrukcijo opazovalnice in po njej kaže, da je bil postopek uspešen, saj so po novem amplitude

nihanj tal, ki so posledica dnevnih sprememb, bistveno manjše (slika 7). Učinkovitost novega postopka, s katerim analiziramo dolgoperiodne signale tako, da odstranimo Zemljino bibavico, je prikazana na sliki 8. Na njej so štirinajstdnevni zapisi navpičnih period s treh potresnih opazovalnic ROBS, Gornja Brezovica (GBAS) in Pernice (PERS). Prvi opazovalnici imata isti tip seizmometra, na PERS pa je postavljen seizmometer, ki ima nekoliko večji instrumentalni šum na dolgih periodah. Na sliki 8 so zapisi pred odstranitvijo signala Zemljinega plimovanja in po njej. Na potresni opazovalnici ROBS so še vedno vidne dolgoperiodne motnje, ki imajo dnevno periodo in jih na opazovalnicah



Slika 6: Postavitev seizmološke opreme na nove seizmične podstavke na lokaciji ROBS (foto: I. Tasič)

Figure 6: Installation of seismicological equipment on new seismic piers at the ROBS seismic station (Photo: I. Tasič)



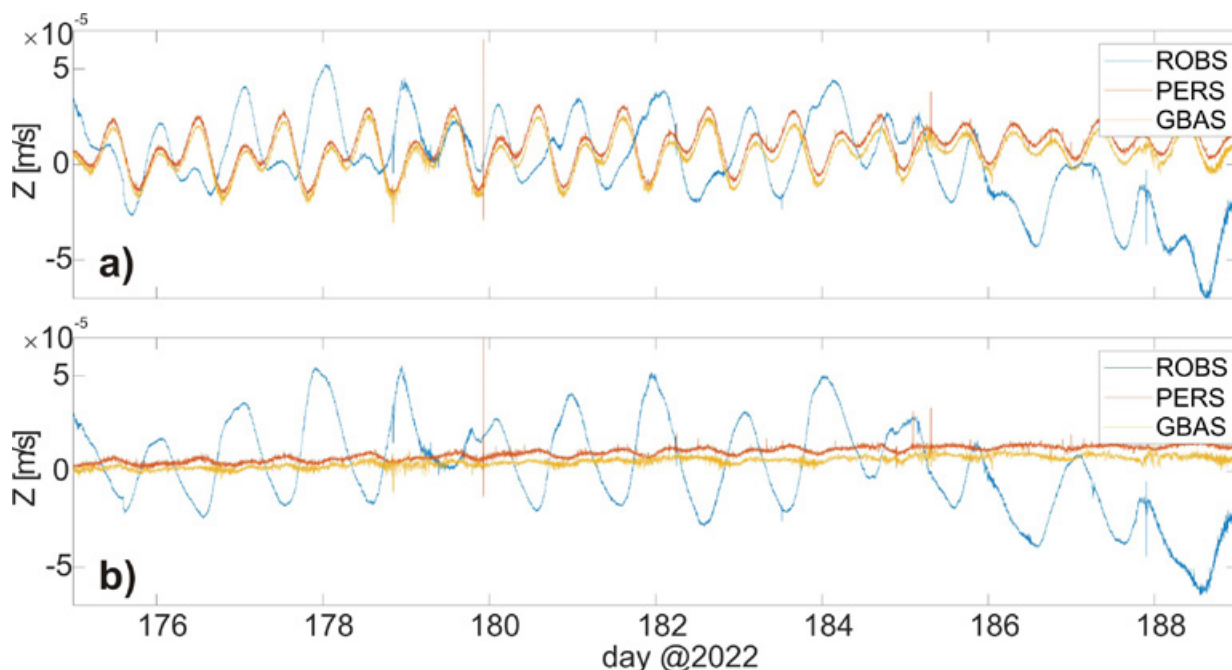
Slika 7: Prikaz dolgoperiodnega nihanja tal na komponenti od vzhoda do zahoda za 14 dni v letih 2019, 2020, 2021 in 2022 na potresni opazovalnici ROBS. Dnevno nihanje tal pred izdelavo novih betonskih podstavkov v zapisih za leta 2019, 2020 in 2021 je bilo bistveno večje, kar kaže na uspešno sanacijo lokacije. (avtor slike: I. Tasič)

Figure 7: The long-period ground motion on the E-W component for a period of 14 days in the years 2019, 2020, 2021 and 2022 at the ROBS seismic station. The daily fluctuation before the construction of new seismic piers (records 2019, 2020, 2021) was significantly greater, which indicates the successful improvements to the location. (Figure: I. Tasič)

GBAS ter PERS ne zasledimo. Da bi odstranili tudi te motnje na lokaciji ROBS, ki so verjetno še vedno posledica vpliva mikrolokacije, bi bilo treba notranjost opazovalnice nepredušno zapreti, vendar bi bili stroški takega dodatnega posega bistveno preveliki glede na že doseženo učinkovitost te lokacije.

Podobno lahko analiziramo zapise s tistih potresnih opazovalnic, na katerih lahko seizmometri v običajnih razmerah delovanja zaznajo Zemljino plimovanje, in tako ovrednotimo njihovo kakovost. Izkaže se tudi, da

lahko s tako analizo zapisov, pri kateri na enem prikazu zajamemo več dni hkrati in pred tem iz zapisa odstranimo plimovanje, odkrijemo tudi občasne neznačilne motnje na posamezni lokaciji. Tako smo na potresni opazovalnici Višnje (VISS), ki velja za eno najboljših potresnih opazovalnic DMPO v seizmičnem smislu, pri analizi zapisov za zadnja štiri leta odkrili motnje, ki se pojavijo približno le enkrat na leto. Posamezna motnja se izrazi kot hkraten pulzni signal na vseh treh sestavinah seizmometra, pojavlja pa se občasno ves dan od noči naprej. Izvora motnje še ne poznamo, saj je



Slika 8: Štirinajstdnevni zapisi navpičnih period iz potresnih opazovalnic ROBS, PERS in GBAS leta 2022 (a) pred odstranitvijo signala plimovanja in (b) po njej. Na sliki b je prikazano, da je na potresni opazovalnici ROBS tudi po rekonstrukciji opazovalnice še vedno prisoten signal z dnevno periodo, ki je posledica vpliva objekta. (avtor slike: I. Tasič)

Figure 8: Vertical records over a duration of 14 days from the ROBS, PERS, and GBAS seismic stations in 2022 before (a) and after (b) Earth tidal signal removal. Figure b shows that at the ROBS seismic station a signal with a daily period is still present even after the reconstruction of the station, which is the result of the impact on the structure itself. (Figure: I. Tasič)

lahko elektronika seizmometra, lahko jo proži zajemalna enota, ki napačno interpretira položaj mirovne lege senzorja, manj verjetno pa je, da je izvor napetostni sunek iz omrežja. Za dan, ko se dogajajo te motnje, v našem informacijskem sistemu nimamo zabeležene dejavnosti, s katero bi sami sprožili te signale.

SKLEPNE MISLI

Plimovanje trdnih tal je v nasprotju s plimovanjem morja za večino neopazno, zato ga ljudje niti ne poznajo, čeprav je to največji periodični dnevni premik na Zemljini površini.

Viri in literatura

1. Agnew, D. C., 2007. Earth Tides, Treatise on Geophysics: Geodesy, T. A. Herring, ed., Elsevier, New York, 163–195.
2. Agnew, D. C., 2005. Earth Tides: An Introduction. <https://www.unavco.org/education/professional-development/short-courses/course-materials/strainmeter/2005-strainmeter-course-materials/tidenote.pdf>, 28. 5. 2023.
3. Agnew, D. C., 1986. Strainmeters and tiltmeters, Rev. Geophys, 24, 579–624.
4. Agnew, D. C., Wyatt, F. K., 2003. Long-base laser strainmeters: a review, SIO Technical Report, 2. <https://repositories.cdlib.org/sio/techreport/2/>, 28. 5. 2023.
5. Alterman, Z., Jarosch, H., Pekeris, C. L., 1959. Oscillations of the earth. Proc. R. Soc. Lond 252, 80–95.
6. Christodoulidis, D. C., Smith, D. E., Williamson, R. G., Klosko, S. M., 1988. Observed tidal braking in the Earth/Moon/Sun system. J Geophys Res Solid Earth 93, 6216–6236.
7. Greene, C., 2023. Sold Earth Tide Predictions. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50327-sold-earth-tide-predictions>, MATLAB Central File Exchange, 28. 5. 2023.
8. Hinderer, J., Amalvict, M., Crossley, D., Leveque, J. J., Rivera, L., Luck, B., 2002. Tides, earthquakes and ground noise as seen by the absolute gravimeter FG5 and its superspring; comparison with a superconducting gravimeter and a broadband seismometer, Metrologia 39 495, DOI 10.1088/0026-1394/39/5/11.
9. LaCoste, L., 1988. The zero-length spring gravity meter. The Leading Edge, 7 (7): 20–21.
10. Marson, I., 2012. A Short Walk along the Gravimeters Path. International Journal of Geophysics, vol. 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/687813>.
11. Milbert, D., 2018. Solid Earth Tide. <https://geodesyworld.github.io/SOFTS/solid.htm>, 28. 5. 2023.
12. NOAA, 2023, Are tides higher when the moon is directly overhead? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/moon-tide.html>, 28. 5. 2023.
13. Ostrihansky, L., 2019. Summary of the most evident tidal actions on solid Earth. 10.13140/RG.2.2.22859.95529.
14. Pavlovčič Prešeren, P., Kuhar, M., 2015. Modeliranje plimovanja trdne Zemlje za geodetsko določanje 3D položaja točk kombinirane geodetske mreže, Raziskave s področja geodezije in geofizike 2015, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 93–102.
15. Ruotsalainen, H., 2001. Modernizing the Finnish long water-tube tilt meter. Journal of the Geodetic Society of Japan, 47(1), 28–33.
16. Tasič, I., 2019. Triosni širokopasovni seizmometri s postavitvijo senzorjev XYZ in UVW. Ujma 33, 2019, 185–191.
17. USGS, 2023. Can the position of the moon or the planets affect seismicity? Are there more earthquakes in the morning/in the evening/at a certain time of the month? <https://www.usgs.gov/faqs/can-position-moon-or-planets-affect-seismicity-are-there-more-earthquakes-morning-in-evening-at>, 28. 5. 2023.
18. 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.

Z občutljivimi sodobnimi širokopasovnimi seizmometri na potresnih opazovalnicah državne mreže potresnih opazovalnic Zemljino plimovanje lahko zaznamo, čeprav niso namenjeni temu. Če meritve iz DMPO združimo, dobimo dober signal plimovanja na navpični sestavini, na vodoravnih pa so dnevne periode plimovanja zakrite s šumom in jih težje opazimo.

Teoretični signal nihanja zaradi plimovanja je dobro znan za vsako točko Zemlje, zato lahko z odštevanjem tega signala od meritve seizmometra dobimo zapis, ki omogoča analizo kakovosti potresne opazovalnice in seizmološke merilne opreme.