

SEIZMOLOŠKO ZAZNAVANJE SKALNEGA PODORA 26. FEBRUARJA 2021 NA RZENIKU IN NEKATERE NJEGOVE ZNAČILNOSTI

Andrej Gosar¹

Povzetek

26. februarja 2021 se je ob 6. uri in 16 minut na Rzeniku (1833 m) nad dolino Kamniške Bele zgodil večji skalni podor. V članku obravnavam seizmološko zaznavanje tega podora, ki ga ni povzročil potres, pa tudi nekatere druge značilnosti, predvsem morfometrične. Pred tem na kratko opišem skalne podore, ki so v goratih predelih pogosta posledica močnih potresov. Primerjava zračnih posnetkov pred podorom in po njem je omogočila kvantitativno opredelitev razsežnosti podora na Rzeniku. Odlom na zahodnem stebri, ki omejuje njegovo severno steno, je bil visok 200 metrov in širok okoli 100 metrov. Odlomljen skalni material, katerega prostornino ocenjujem na 625.000 m³, je nasul strmo gozdno pobočje površine okoli 13 hektarjev. Podor je povzročil tako močno tresenje tal, da so ga zaznali večina seizmografov državne mreže potresnih opazovalnic in dva v sosednji Avstriji na oddaljenosti od 15 do 126 kilometrov od Rzenika. Primerjava seizmoloških zapisov tega skalnega podora, zmernega tektonskega potresa magnitude 1,8 in večjega razstreljevanja v bližnjem kamnolomu je razkrila vso pestrost različnih seizmičnih valovanj in njihovega nastanka. Stena Rzenika, ki je visoka okoli 400 metrov in zgrajena iz triasnih apnencev, je znana kot ena najbolj krušljivih sten v naših gorah. Geomorfološka analiza podrobnega digitalnega modela višin je pokazala, da so se tukaj tudi v geološki preteklosti dogajali veliki skalni podori.

SEISMOLOGICAL OBSERVATION OF THE ROCKFALL ON RZENIK MOUNTAIN ON 26 FEBRUARY 2021, AND SOME OF ITS CHARACTERISTICS

Abstract

On 26 February 2021 at 6:16am a large rockfall occurred on Rzenik Mountain (1833 m) above the Kamniška Bela valley. This paper describes the seismological observations of this rockfall, which was not triggered by an earthquake, as well as morphometric and other characteristics. In addition, rockfalls in mountain areas frequently caused by strong earthquakes are briefly described. A comparison of aerial images taken before and after the Rzenik rockfall enabled a quantitative assessment of its extent. The break occurred in the west pillar of the north face, and was 200 m high and 100 m wide. The volume of the fallen rocks, deposited on the steep wooded slope across an area of 13 hectares, was estimated to be 625,000 m³. The rockfall caused ground motion so strong that it was detected by most of the seismographs of the Slovenian seismological network, and also by two seismographs in Austria, at distances of 15 to 126 km. A comparison of the seismic records of this rockfall with a moderate tectonic earthquake of magnitude 1.8 and a large blast in a nearby quarry revealed a variety of different seismic waves and their generation. The 400 m high Rzenik wall is composed of Triassic limestone, and is known as one of the crumbliest in the Slovenian mountains. Geomorphologic analysis of a high resolution digital elevation model showed that large rockfalls have also occurred in this area in its geological history.

¹ dr., Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo, ARSO, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, Ljubljana, andrej.gosar@gov.si

UVOD

Velika večina potresov je tektonskih in nastanejo zaradi nenadnega premika kamnin ob prelomu, ko nakopičene napetosti v Zemljini skorji presežejo strižno trdnost. Potresi, ki niso tektonski, pa lahko nastanejo zaradi vulkanske dejavnosti ali skalnih podorov. Vse vrste potresov zaznavamo in opazujemo

s potresnimi opazovalnicami, njihovi zapisi (seizmogrami) pa se glede na način nastanka tresenja precej razlikujejo. Hiter razvoj seizmologije se ne odraža samo v vedno bolj občutljivih seizmometrih z zelo širokim frekvenčnim in dinamičnim območjem, temveč predvsem v tem, da se število seizmografov hitro povečuje, kar omogoča vse natančnejši monitoring potresne dejavnosti. V Sloveniji smo na Uradu za

seizmologijo ARSO konec leta 2022 upravljali že 48 merilnih mest. 26 izmed njih jih tvori Državno mrežo potresnih opazovalnic (Vidrih in sod., 2006), drugi pa so akcelerografi in različne postavitve seizmografov za namenska opazovanja in raziskave. S povečevanjem števila merilnih mest se je povečala tudi zmožnost zaznavanja netektonskih virov tresenja tal, kot so: razstreljevanja v kamnolomih in gradnjah, hribinski udari zaradi rudarjenja (Bajc in sod., 2004), preboj zvočnega zidu vojaških letal (Pahor in Zupančič, 2018), večji skalni podori in meteoridi, ki so kot bolidi razpadli v ozračju (ARSO, 2020), ali celo zelo redki meteoriti, ki so padli na Zemljina tla (Spurny in sod., 2010). V članku na primeru skalnega podora na Rzeniku, ki se je zgodil 29. februarja 2021, obravnavamo njihovo seizmološko zaznavanje in opazovanje, torej ko je tresenje tal posledica podora. Pred tem bomo na kratko opisali tudi skalne podore, ki so v goratih predelih pogosta posledica močnih potresov.

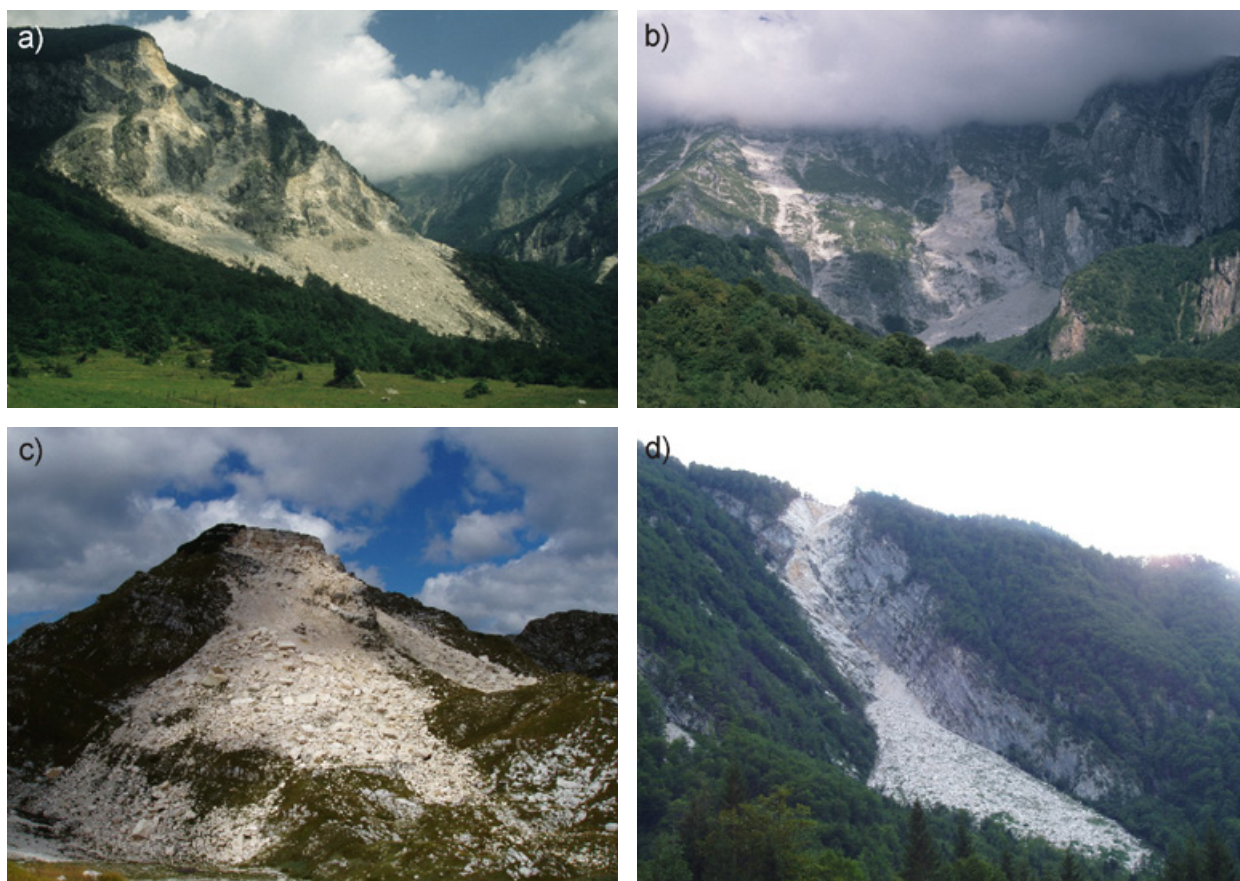
SKALNI PODORI V GORSKEM SVETU

V gorskem svetu se, posebej na območjih, ki se zaradi tektonike hitro dvigujejo, dogajajo stalni erozijski pojavi, med katerimi so najbolj izraziti skalni podori in zemeljski plazovi. Stopnja erozije je odvisna od številnih dejavnikov, med katerimi so najpomembnejši geološka zgradba, relief, padavine, temperaturne razlike in hitrost dviganja ozemlja zaradi tektonskih procesov. Rezultati modeliranja erozije po metodi Rusle kažejo, da je Slovenija po eroziji na letni ravni na drugem mestu med članicami EU s povprečno 7,43 t/ha/leto erodiranih tal v vseh rabah tal (Vrščaj in sod., 2020). Stopnja erozije v Sloveniji je visoka zaradi geološke zgradbe, velike erozivnosti padavin in strme topografije. Višjo povprečno letno stopnjo erozije ima Italija (8,46 t/ha), medtem ko je Avstrija s 7,19 t/ha na tretjem mestu. Ocenjeno je, da slovenske gore v povprečju na leto izgubijo kar 2,5 milijona m³ materiala (Hrvat in sod., 2006).

V gorskem svetu Slovenije in bližnje okolice je bilo v preteklosti tudi več zelo velikih skalnih podorov. Največji se je zgodil ob potresu leta 1348 na Dobraču na avstrijskem Koroškem, ko je v dolino Zilje zgrmel velik del južnega ostenja (Rdeča peč) in jo tudi zajezil (Zorn, 2002a). Isti potres je povzročil velik podor na Velikem vrhu v grebenu Košute, kar je dokazano z metodo datiranja z radionuklidi (Mrak, 2010). V geološki zgodovini se je zgodil največji podor Kuntri med Srpenico in Trnovim ob Soči, na južni strani Polovnika (Zorn, 2002b), ki je povzročil nastanek Srpeniškega

jezera, ki je v kvartarju segalo v Bovško kotlino. Nad njo se je na pobočjih Javorščka (1557 m) leta 1950 zgodil velik podor, ki je viden še danes. Konec 80. let sta se v dolini Trente pri domačiji Plajer zgodila dva večja podora, zaradi katerih je bila zgrajena galerija, ki ščiti cesto (Orožen Adamič, 1990; Pavšek, 1994). Potres leta 1998 v Krnskem pogorju je povzročil več kot 80 skalnih podorov (slika 1), med katerimi sta bila največja na Velikem Lemežu nad dolino Lepene in na Osojnci nad dolino Tolminke (Ribičič in Vidrih, 1999; Vidrih in Ribičič, 1999; Gosar, 2012). Nekoč najvišji slovenski slap Čedca (130 m) v Makekovi Kočni nad Jezerskim se je leta 2008 podrl in je danes visok le še 30 metrov (Frantar in Robič, 2009). V Dovškem Gamsovcu se je leta 1995 podrl velik del zahodne stene, aprila 2023 pa del zahodne stene Jalovca. V slovenskih gorah se je leta 2000 zgodil tudi velik drobirski tok (Ribičič, 2014), ki je uničil del vasi Log pod Mangartom, zahteval sedem žrtev in je bil posledica velikega plazu Stožje nad Mangartsko planino. Med zemeljskimi plazovi so največji Slano blato nad Ajdovščino, Macesnikov plaz pod Olševo in Tratičnikov plaz v Podvolovljeku. Enotno evidenco podatkov o plazenju tal in eroziji v Sloveniji vodijo na Geološkem zavodu Slovenije (GeoZS, 2023), z raziskovanjem teh pojavov pa se ukvarjajo številne raziskovalne ustanove.

Erozija in tudi skalni podori so močno odvisni od vremenskih razmer, ne samo padavin, temveč tudi temperature in predvsem njenih nihanj med tistimi pod in nad lediščem, kar je še posebej pomembno v ledeniških gorah (Vrhovec, 2003). Podnebne spremembe že opazno spreminjajo razmere za pojavljanje erozije. V *Tematski strategiji za tla* Evropske komisije je erozija navedena kot ena glavnih groženj okolju stare celine (Legradić, 2023), Alpe pa so prepoznane kot eden najranljivejših ekosistemov. Znano je, da se temperature v Alpah dvigujejo hitreje kot na večini drugih območij severne poloble. Predvsem pa je vse več ekstremnih vremenskih pojavov in z njimi povezanih intenzivnih erozij v gorskem svetu. Podnebne spremembe na različne načine vplivajo na večjo erozijo in tudi pojavljanje skalnih podorov. Ekstremne suše, kot je bila poleti 2022, krepijo izgubo vode v skali tudi v njeni globini. Zaradi lastnosti apnenca in drugih karbonatnih kamnin, ki so polne razpok in prevladujejo v gorskem svetu Slovenije, voda v toplem delu leta deluje kot vezivo, ki zmanjšuje pojav skalnih podorov (Legradić, 2023). V ledeniških gorah zahodnih Alp tudi opažajo vedno več skalnih podorov in poleti 2022 se je v pogorju Mont Blanca porušilo več sten, čeprav je zgrajeno pretežno



Slika 1: Večji skalni podori, ki so nastali ob potresu 12. aprila 1998 v Krnskem pogorju: a) Osojnica nad dolino Tolminke, b) Krn in Krnčica, c) Veliki Šmohor, d) Škrilj nad dolino Lepene (foto: A. Gosar)

Figure 1: Large rockfalls caused by the 12 April 1998 earthquake in the Krn mountains: a) Osojnica in the Tolminka valley, b) Krn and Krnčica, c) Veliki Šmohor, d) Škrilj in the Lepena valley (Photo: A. Gosar)

iz od apnenca mnogo odpornejšega granita. V zimskem času zmrznjena podlaga, led in sneg delujejo kot naravna zaščita pred erozijo. Z vedno toplejšimi zimami in manjšim številom dni s snežno odejo so gore spet bolj izpostavljene preperevanju. Povečuje se tudi temperaturna razlika med nočjo in dnem, ki povzroča mehansko raztezanje razkrite kamnine, če ni pokrita s snegom, vodi v razpokah, ki zmrzne v led, pa se poveča prostornina, kar povzroči večjo kručljivost skalnih sten (Legradić, 2023).

POTRESI IN SKALNI PODORI

Močni potresi imajo poleg učinkov na ljudi, predmete in stavbe, ki se uporabljajo pri določitvi intenzitete potresa v nekem naselju (npr. po Evropski potresni lestvici), lahko tudi velike učinke na naravno okolje, med katerimi prevladujejo zemeljski plazovi in skalni podori. Makroseizmične intenzitetne lestvice so učinke potresov na naravno okolje dolgo časa le obrobno obravnavale, saj se je zdelo, da jih je težko uporabiti za določitev intenzitete (Vidrih in Ribičič, 1998). To

se je spremenilo z uvedbo posebne lestvice učinkov na naravno okolje (Environmental Seismic Intensity scale) ESI 2007 (Guerrieri in Vittori, 2007), ki se uporablja skupaj s klasičnimi 12-stopenjskimi lestvicami, predvsem Evropsko potresno lestvico (EMS-98). Poseben pomen ima uporaba ESI 2007 na odmaknjenih in redko poseljenih goratih območjih, kjer so za močne potrese učinki na naravno okolje prevladujoči. Čeprav potres 12. aprila 1998 v Posočju z navorno magnitudo 5,6 in največjo intenziteto VII–VIII EMS-98 spada po večini meril med zmerne potrese, je zaradi specifične geološke zgradbe povzročil številne skalne podore v Krnskem pogorju (Ribičič in Vidrih, 1999). Nekateri večji so predstavljeni na sliki 1. Ker je ožje nadžariščno območje zaradi visokogorja redko poseljeno, kar je omejevalo vrednotenje učinkov na ljudi, predmete in stavbe za določitev intenzitete, se je izkazalo, da je koristno vzporedno uporabiti tudi analizo porazdelitve skalnih podorov za oceno intenzitete (Gosar 2012; 2014).

Tako veliki podori so seveda tudi prispevali k tresenju tal, vendar jih zaradi precej močnejšega seizmičnega

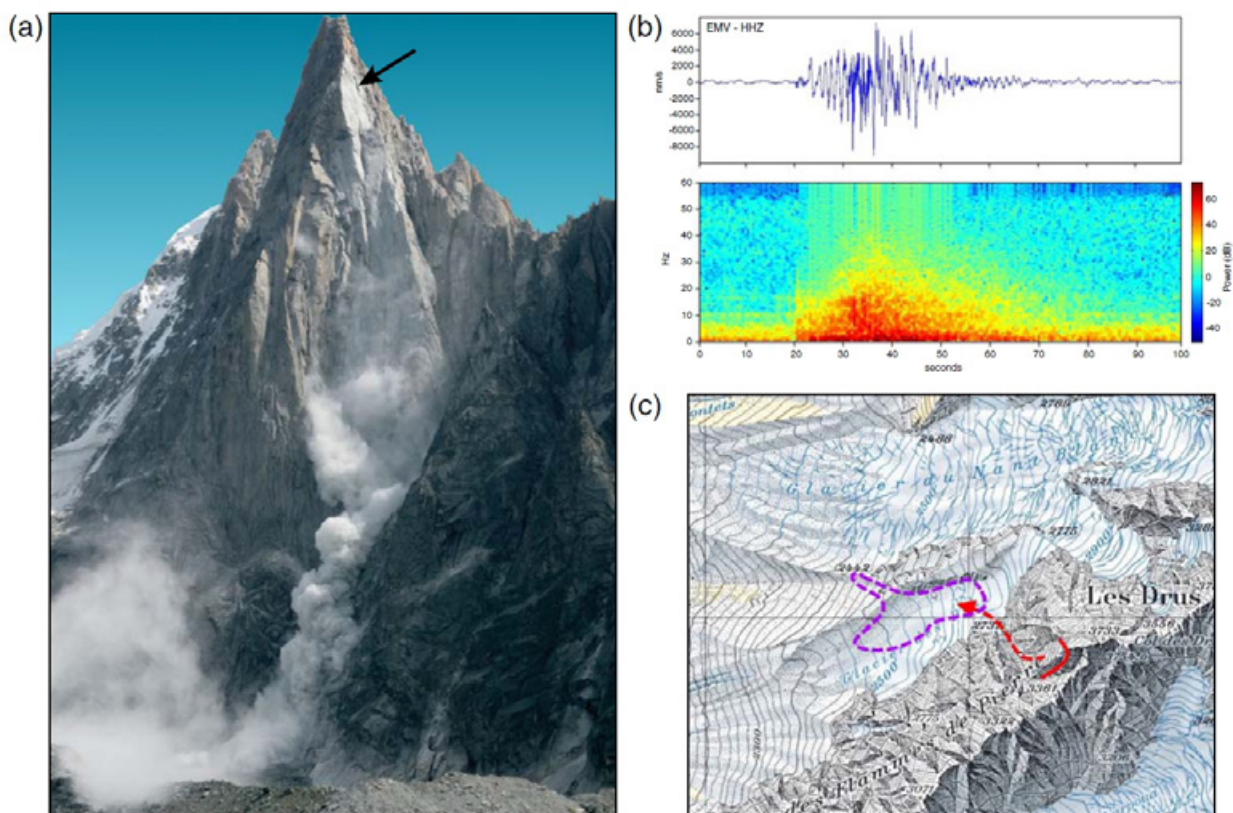
signala tektonskega potresa na seizmogramih ni mogoče videti.

PRIMERI SEIZMIČNIH OPAZOVANJ SKALNIH PODOROV

Na gori Aiguille Dru nad Chamonixom (Francija) je konec junija 2005 nastalo več skalnih podorov (Dammeier in sod., 2015), ki so odnesli tudi del plezalnih smeri, med njimi znameniti Bonattijev steber (slika 2). 30. junija sta v razmiku dveh minut nastala največja podora, ki sta bila zabeležena na osmih potresnih opazovalnicah v bližnji Švici. Skupna prostornina vseh skalnih podorov v Druju v tem poletju je ocenjena na 265.000 m³ in na podlagi značilnosti seizmičnega zapisa (sliki 2b in c) največjega od njih na 150.000 m³. Največja amplituda nihanja tal je namreč tesno povezana s sproščeno energijo. Izrazit je dolgoperiodni signal na območju 20–50 sekund. Celotna višina padanja skalovja je bila 800 metrov, v vznožju stene pa je odložen grušč segal 420 metrov daleč.

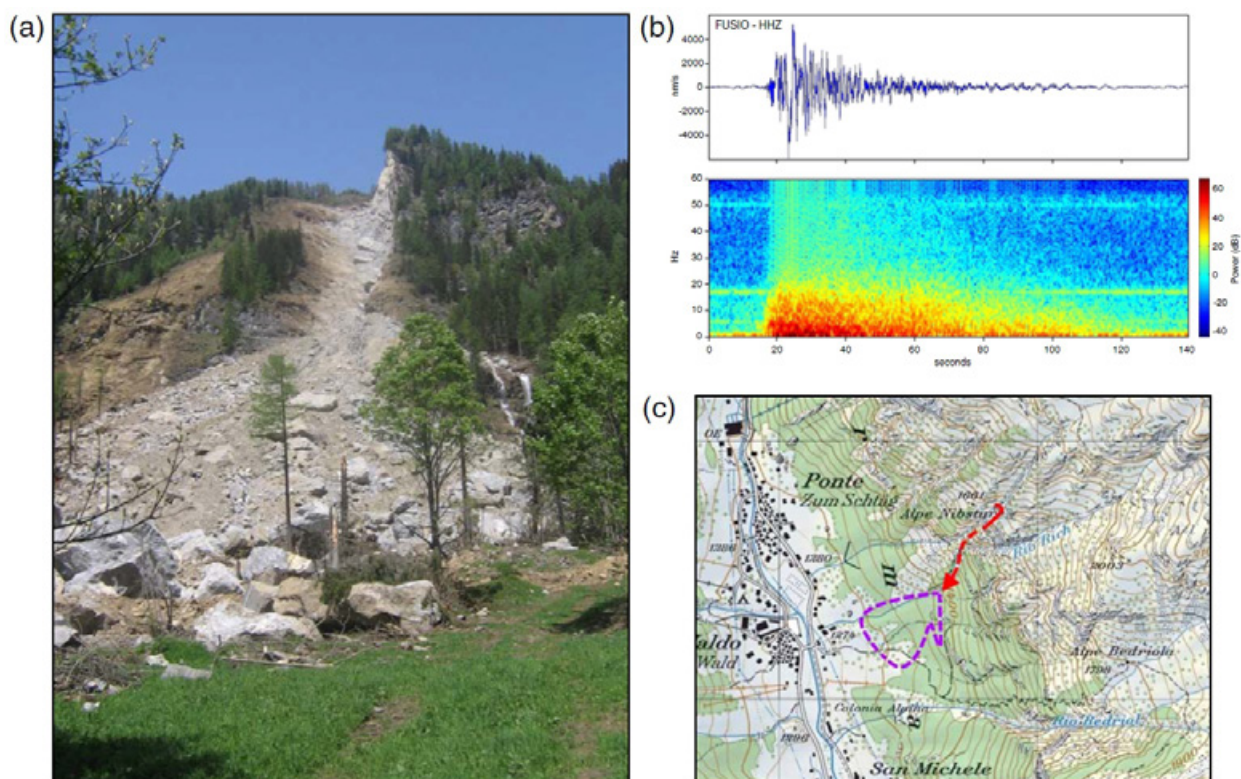
V dolini Formazza (Italija), kjer se od juga državna meja globoko zajeda v Švico, se je 19. aprila 2009 v treh zaporednih odlomih zgodil podor (slika 3) z ocenjeno skupno prostornino 700.000 m³ (Dammeier in sod., 2015). Vsi trije so se zelo jasno videli na zapisih osmih potresnih opazovalnic, tudi z izrazitim dolgoperiodnim signalom na območju 8–25 sekund (slika 3b). Prostornina prvega od treh podorov je bila ocenjena na 170.000 m³, celotna višina padanja skalovja pa je bila 530 metrov na vodoravni razdalji 600 metrov. Odlom je nastal na grebenu, ki poteka vzporedno s strmo vpadajočimi prelomi. Ob enem izmed njih je nastal tudi začetni odlom.

Seizmološke podatke desetih drugih velikih skalnih podorov v francoskih Alpah so analizirali Deparis in sodelavci (2008). Ugotovili so, da trajanje nihanja tal na izbrani razdalji (30 kilometrov) od podora bolje korelira s sproščeno potencialno energijo kot največja amplituda, izmerjena na seizmogramih. Seizmični zapisi kažejo na delno možnost razlikovanja seizmičnega vira, in sicer sam odlom in pa udarec podora ob pobočju v vznožju skalne stene.



Slika 2: Podor na gori Aiguille Dru (F) leta 2005: a) Fotografija poznejšega manjšega podora, s puščico je označen odlom, b) Seizmogram in njegov spektrogram na najbližji potresni opazovalnici, EMV (15,1 km), c) Zemljevid območja z označenim odlomom in območjem nasutja (Dammeier in sod., 2015)

Figure 2: Aiguille Dru (France) 2005 rockfall: a) Photo of a later smaller fall, with the scarp indicated by the arrow, b) Seismogram and corresponding spectrogram at the nearest station, EMV (15.1 km), c) Map of the region, indicating the scarp and deposit area (Dammeier et al., 2015)



Slika 3: Podor na Formazzi (I) leta 2009: a) Posnetek podora, b) Seizmogram in njegov spektrogram na najbližji potresni opazovalnici, FUSIO (19,3 km), c) Zemljevid območja z označenim odlomom in območjem nasutja (Dammeier in sod., 2015)

Figure 3: Formazza (Italy) 2009 rockfall: a) Photo of rockfall, b) Seismogram and corresponding spectrogram at the nearest station, FUSIO (19.3 km), c) Map of the region, indicating the scarp and deposit area (Dammeier et al., 2015)

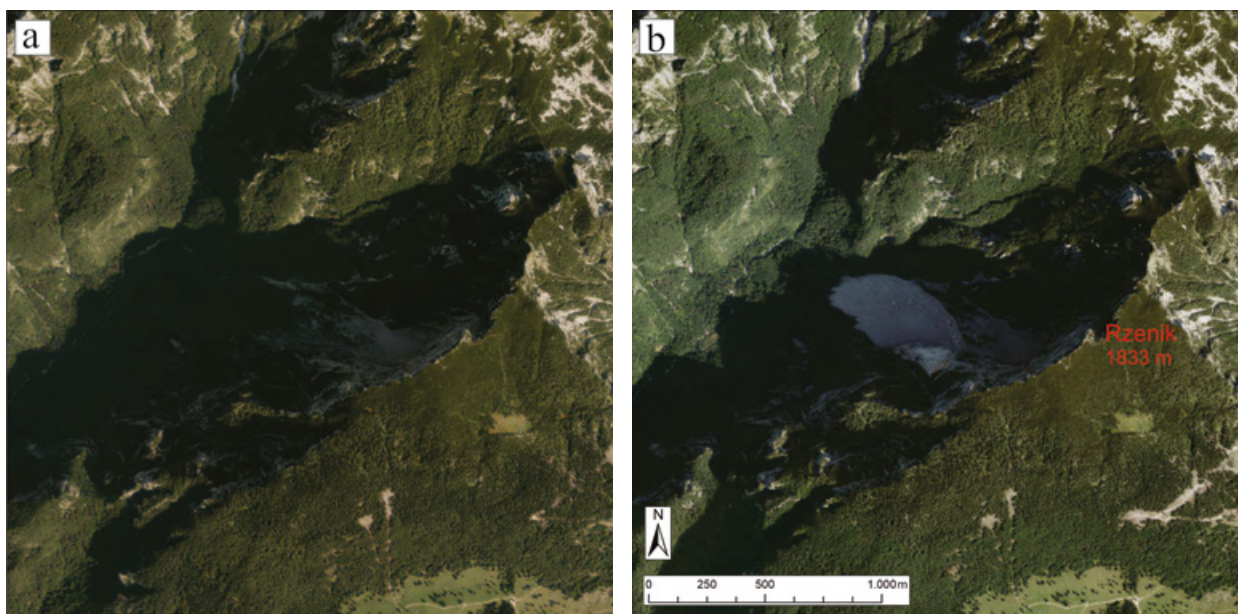
SKALNI PODOR NA RZENIKU 26. FEBRUARJA 2021

Rzenik je 1833 metrov visoka gora v Kamniško-Savinjskih Alpah. Je v grebenu, ki poteka v smeri sever-jug (od Ojstrice proti Veliki planini), prečno na glavno slemenitev te gorske skupine. Na južni strani je precej enakomerno pobočje, ki je v spodnjem delu med planinama Dol in Rzenik poraščeno z gozdom, višje pa z ruševjem. Na severno stran pada v dolini Kamniške Bele z okoli 400 metrov visoko steno, pod katero je strmo (30° – 35°), večinoma poraslo, pobočje. Greben Rzenika poteka v smeri JZ–SV in se iz Kopišč v dolini Kamniške Bistrice (okoli 580 m) najprej strmo vzpne na Kopo, kateri sledi Ojstri rob. Proti SV pa se Rzenik brez izrazitega sedla nadaljuje na Konja (1803 m) in po strmem skalnem grebenu prek Lučke kope do sedla Presedljaj (1613 m), ki ločuje skupino Velike planine na jugu od Dleskovške planote – Veže na severu.

Rzenik je v svojem spodnjem delu zgrajen iz trisnega apnenca, glinastega skrilavca in laporno glinastega skrilavca z vložki breče zgornje anizijske in spodnje ladinijske starosti ($T_2^{1,2}$). Nad njim je trisni masivni apnenec cordevolske starosti ($T_{2,3}$), iz

katerega je skoraj celotna severna stena (Premru, 1982). Po dolini Kamniške Bele poteka prelom. Mogočna severna stena je zaradi prepadnosti predstavljala velik izziv alpinistom, ki so jo preplezali pred drugo svetovno vojno (Babič in Golnar, 1987), danes pa je v njej več kot 20 različnih plezalnih smeri. Stena Rzenika je znana kot ena najbolj krušljivih v slovenskih Alpah, kar močno povečuje težavnost in tveganost alpinističnih vzponov. Vzroki za tako izjemno krušljivost niso jasni, saj je iz masivnega apnenca cordevolske starosti zgrajenih tudi več drugih sten v Kamniško-Savinjskih Alpah, ki imajo večinoma bolj kompaktno skalo. Verjetno je glavni razlog krušljivosti tektonska pretrtost kamnin, čeprav prelom po dolini Kamniške Bele ne spada med močnejše ali daljše v tem delu Slovenije.

26. februarja 2021 se je ob 6. uri in 16 minut zjutraj zgodil v severni steni Rzenika velik skalni podor. Že istega dne so poročali, da je podor zasul planinsko pot na Presedljaj in da so prašenje, ki so ga povzročile padajoče skale, zaznali tudi na vhodu v dolino Kamniške Bele (Občina Kamnik, 2021). Naslednjega dne je območje preletel športni pilot in posnel nazorne fotografije (PD Domžale, 2021). Konec februarja 2021 je bilo v tem delu Slovenije v gorah razmeroma



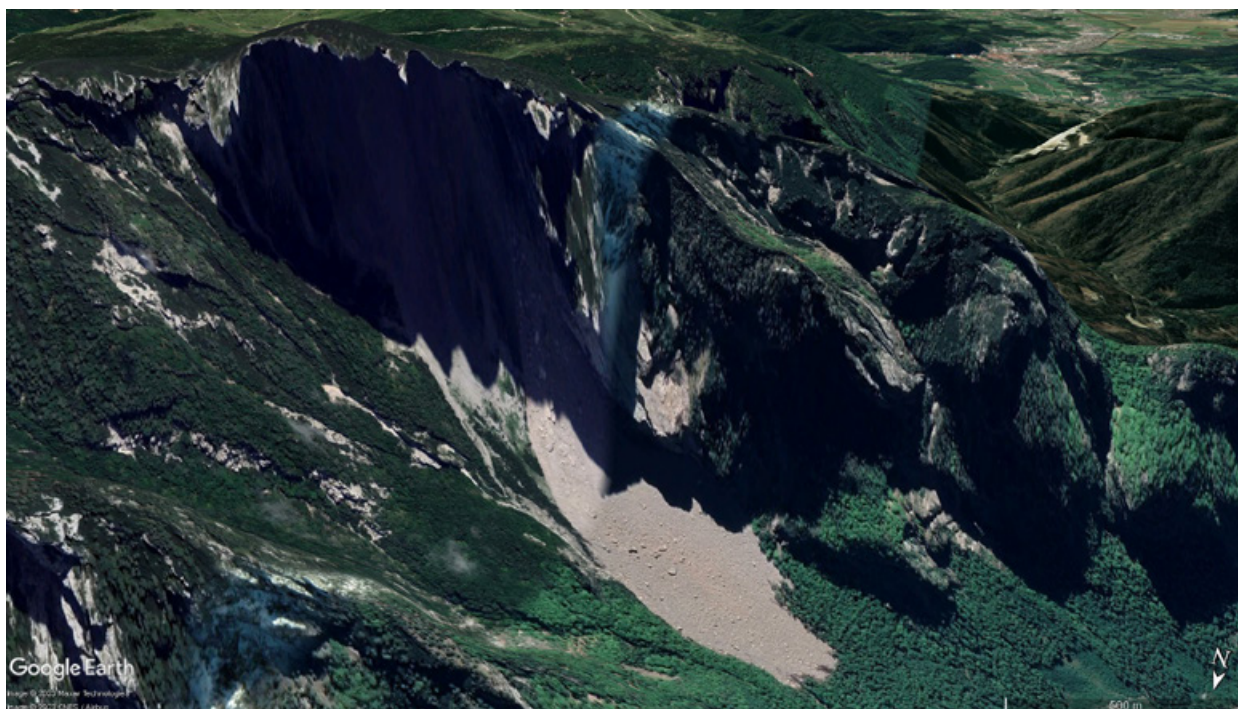
Slika 4: Digitalni ortofoto (DOF, vir GURS) območja Rzenika, posnet: a) pred podorom leta 2019, b) po podoru leta 2021.

Figure 4: Digital Ortho Photo image (DOF, Source: GURS) of Rzenik Mountain area taken a) before the rockfall in 2019, b) after the rockfall in 2021.

malo snega za ta čas, doline pod 1400 metri pa so bile večinoma kopne. Tudi vreme je bilo že dlje časa sončno in brez padavin.

Z analizo razpoložljivih podatkov daljinskega zaznavanja sem ocenil razsežnost skalnega podora. Pri tem je bila najbolj koristna primerjava posnetkov

cikličnega aerosnemanja, saj sta za območje Rzenika na voljo posnetka iz let 2019 in 2021, torej pred podorom in po njem (slika 4). Uporabil sem tudi amaterske fotografije športnega pilota, posnete dan po podoru. Podor se je zgodil v stebru na desni (zahodni) strani severne stene med nadmorsko višino 1230 in 1430 metri. Odlomljen del stene je visok okoli



Slika 5: Satelitski posnetek iz leta 2022 v aplikaciji Google Earth lepo prikaže razsežnost skalnega podora na Rzeniku. Pogled iz smeri severa.

Figure 5: Satellite image in Google Earth from 2022 clearly shows the extent of the Rzenik rockfall; viewed from the north

200 metrov in širok okoli 100 metrov. Podor je nasul strmo (30°–35°), pred tem večinoma poraslo, pobočje, med nadmorskima višinama 750 in 1230 metri v dolžini okoli 600 metrov in širini okoli 340 metrov. Pri tem je dosegel strugo Kamniške Bele. Površina nasutega skalovlja, izmerjena na digitalnem ortofoto posnetku, znaša 0,125 km². Če grobo ocenim ali predpostavim, da je debelina nasutja povprečno 5 metrov, je njegova prostornina 625.000 m³. To je podobno kot pri podoru na Formazzi v Italiji (slika 3) in bistveno manj kot pri dveh največjih podorih, ki sta nastala v Krnskem pogorju ob potresu leta 1998. Na podlagi primerjav digitalnih modelov višin sta bili prostornini teh podorov ocenjeni na: Veliki Lemež – 15 x 10⁶ m³ in Osojnica – 3 x 10⁶ m³ (Gosar, 2012). Če za razpokan in deloma preperel apnenec vzamemo povprečno gostoto 2600 kg/m³, bi bila masa podora na Rzeniku ocenjena na 1,625 milijona tone. Pri skalovlju, ki je zdrobljeno z miniranjem, se navadno predvideva, da vsebuje 25–30 % praznin, ker je lahko približek tudi za skalni podor. Zato je resnična masa podora nižja, verjetno okoli 1,200 milijona tone.

SEIZMOLOŠKA REGISTRACIJA SKALNEGA PODORA NA RZENIKU IN PRIMERJAVA Z DRUGIMI SEIZMIČNIMI DOGODKI

Velik skalni podor na Rzeniku smo zaznali na večini izmed 26 seizmografov Državne mreže potresnih opazovalnic (slika 6), kar kaže na zelo veliko energijo, ki se je ob zrušenju deloma spremenila v potresno valovanje. Na sliki 7 je 13 seizmogramov navpične komponente (Z) seizmografov, ki sicer merijo

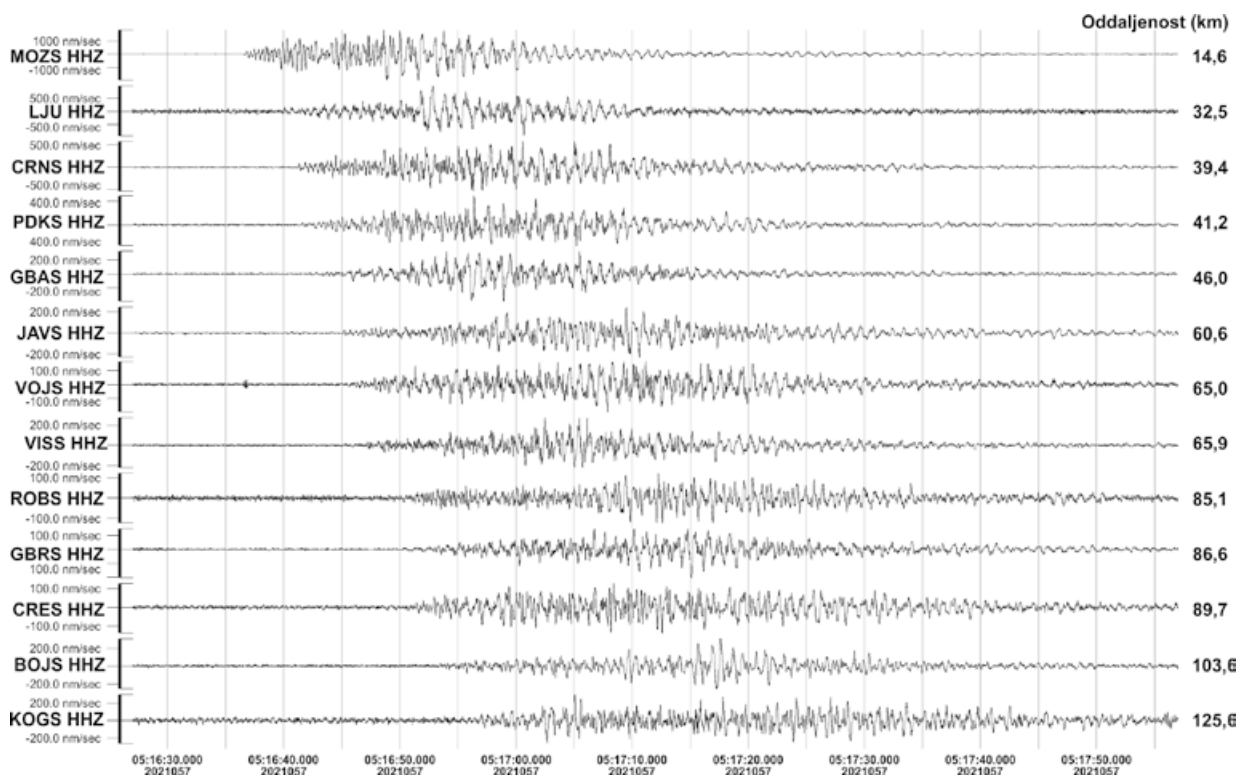
nihanje tal v treh pravokotnih smereh. Razvrščeni so od najbližje do najbolj oddaljene potresne opazovalnice od lokacije podora. Amplitude so normalizirane za vsako opazovalnico posebej, zato je treba upoštevati njihovo različno merilo. Najbližje (14,6 km) je opazovalnica na Možjanci (MOZS), najbolj oddaljeni pa so Bojanci (BOJS) v Beli krajini (103,6 km) in Kog (KOGS) v Slovenskih Goricah (125,6 km). Iz seizmograma je razvidno, da se trajanje nihanja tal z oddaljenostjo povečuje, in sicer zaradi razlike v času potovanja hitrejših longitudinalnih potresnih valov in počasnejših transversalnih ter površinskih potresnih valov. Prav tako se z oddaljenostjo opazovalnice od podora zmanjšujeta največja amplituda nihanja in razmerje med signalom ter šumom. Šum se vidi predvsem v času pred prvim prihodom potresnega valovanja, na primer na seizmogramih opazovalnic ROBS, CRES in KOGS. Čeprav je zaradi bližine mesta z veliko prometa in industrije opazovalnica LJU na Golovcu v Ljubljani med bolj zašumljenimi, je zaradi bližine podora (32,5 km) signal zelo jasno viden. Po glavnem podoru ob 05.16 po UTC (06.16 po lokalnem času) se je ob 05.55 po UTC zgodil še manjši podor, ki so ga zaznale samo nekatere bližnje opazovalnice.

Seizmološki zapis skalnega podora se navadno bistveno razlikuje od zapisa tektonskega potresa ali večjega razstreljevanja v kamnolomu, zato ju je zanimivo primerjati. Območje Kamniških in Savinjskih Alp potresno sicer ni med dejavnejšimi v Sloveniji, se pa tudi tu občasno dogajajo potresi. Za primerjavo sem vzel potres magnitude 1,8, ki se je zgodil 19. 9. 2013, in sicer tri kilometre jugozahodno od Rzenika v globini 17 kilometrov (slika 8), in večje razstreljevanje



Slika 6: Potresne opazovalnice slovenske državne mreže potresnih opazovalnic in lokacija podora na Rzeniku. Na seizmogramih (slike 7–9) so prikazani zapisi samo tistih opazovalnic, katerih oddaljenost od Rzenika (v kilometrih) je prikazana na tej karti.

Figure 6: Seismological stations of the Slovenian seismological network and the location of the Rzenik rockfall. The seismograms (Figures 7–9) show only the records of these stations, for which the distance from Rzenik (in km) is shown on this map



Slika 7: Seizmogrami podora na Rzeniku 26. 2. 2021, zabeleženi na 13 izbranih potresnih opazovalnicah, označenih z njihovo kodo na sliki 6. Na desni je zapisana oddaljenost opazovalnice od mesta podora. Dolžina zapisa je 90 sekund.

Figure 7: Seismograms of the Rzenik rockfall recorded at 13 selected seismological stations, indicated by their code in Figure 6. The distance of the seismic station from the rockfall is shown on the right. The length of the seismic record is 90 seconds

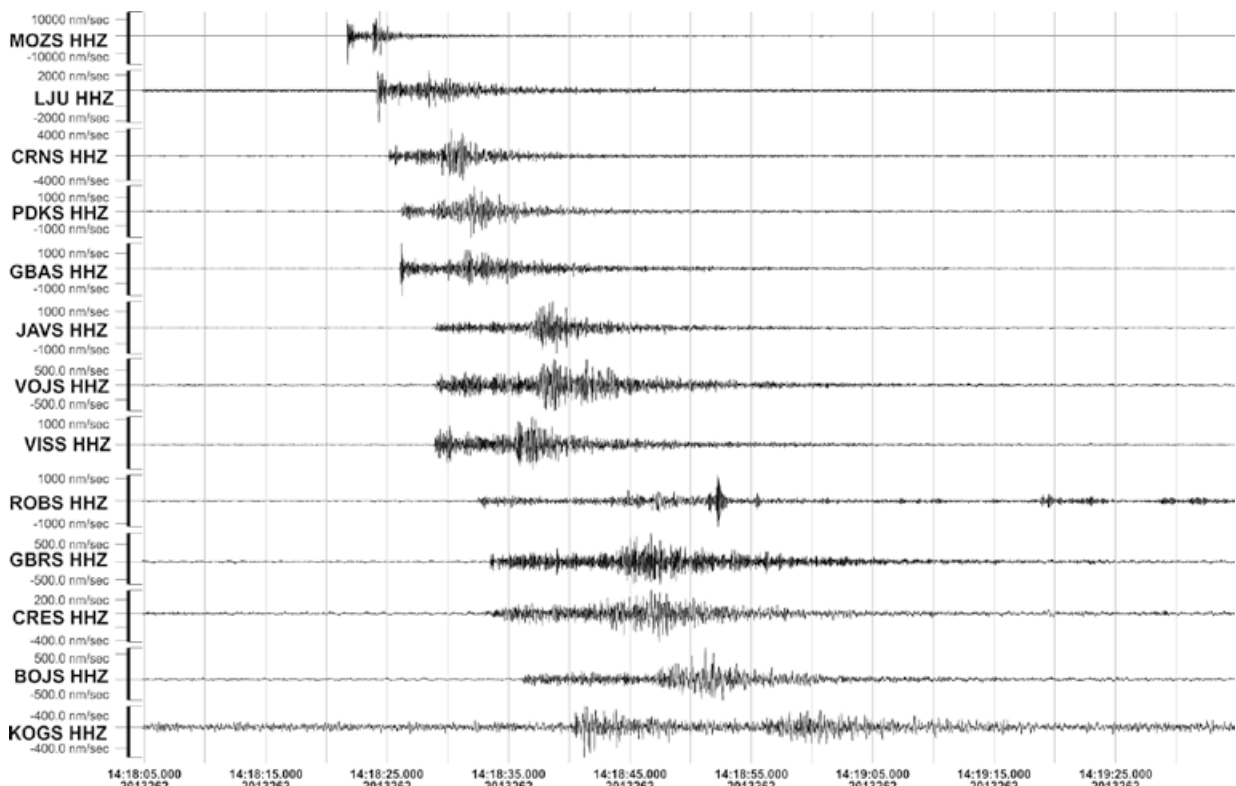
18. 1. 2019 v kamnolomu podjetja Calcit v Stahovici, ki je pet kilometrov južno od Rzenika (slika 9).

Seizmogrami skalnih podorov, potresov in večjih razstreljevanj v kamnolomih (slike 7–10) se razlikujejo zaradi številnih razlogov:

- Podor in razstreljevanje sta pojava na Zemljinem površju, zaradi česar se izraziteje razvijejo površinska potresna valovanja (Rayleighjevo in Lovejevo valovanje), za katera so značilne nižje frekvence, večje amplitude in nižja hitrost potovanja. Tektonski potres ima žarišče v globini, ki je v Sloveniji večinoma med 5 in 20 kilometri, zaradi česar prevladujejo prostorska potresna valovanja (longitudinalno in transverzalno), ki so hitrejša od površinskih in imajo višje frekvence.
- Potres majhnih do zmernih magnitud je zaradi majhnega zdrsa kamninskih blokov ob tektonskem prelomu hipen pojav, zaradi česar je trajanje nihanja tal krajše. Skalni podor je daljšega trajanja, saj se navadno ne odlomi ves del stene naenkrat, temveč postopoma, poleg tega je pod steno navadno nagnjeno pobočje, vzdolž katerega se odlomljeno skalovje nekaj časa kotali. Razstreljevanje bi bilo lahko hipno, če bi celotno količino uporabljenega eksploziva sprožili naenkrat, kar pa ne bi bilo

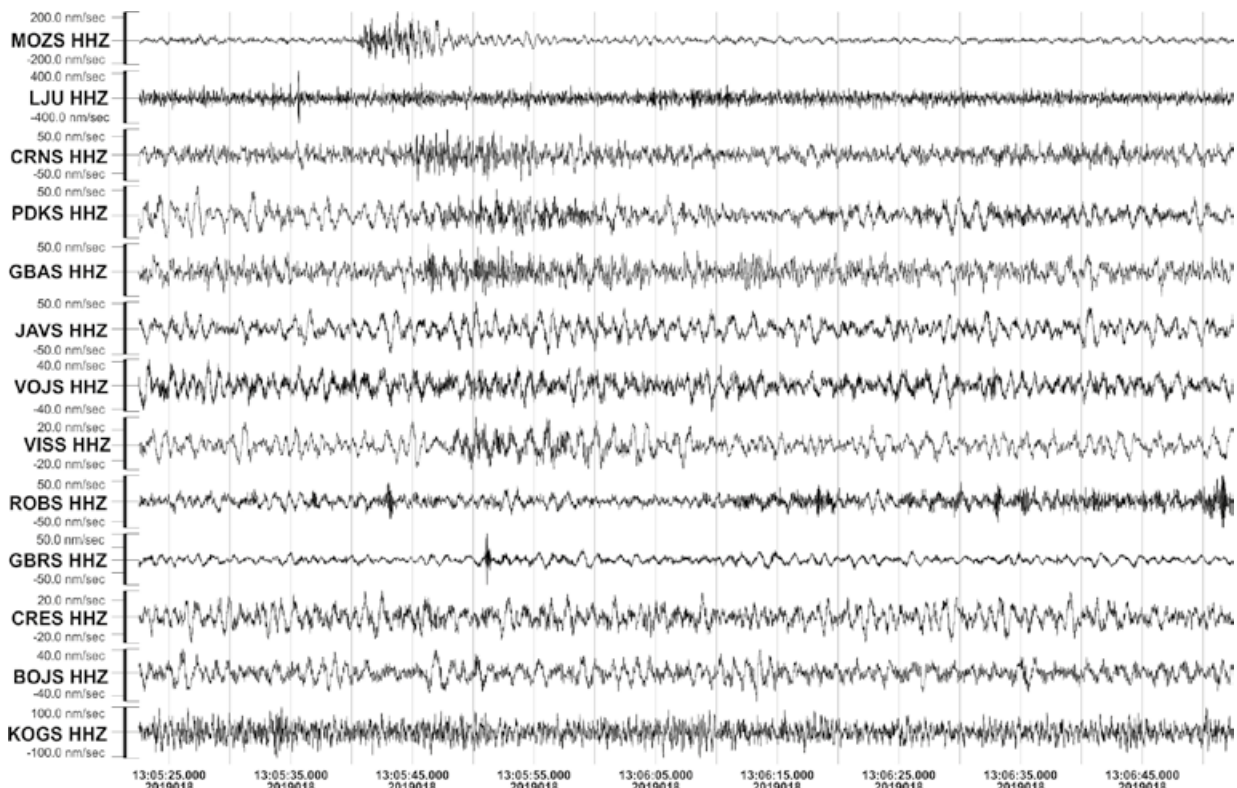
učinkovito za drobljenje kamnine, lahko pa bi bilo tudi nevarno za okolico. Zato se pri večjih razstreljevanjih v kamnolomih uporabljajo zakasnilci in se posamezna polnjenja v zaporednih strelnih vrtnah prožijo s kratkimi zamiki. Tako sta dosežena učinkovitejša drobljenje kamnine in manjši razmet skalovja. Posledično je tudi nihanje tal daljše.

Navedeno se odraža na seizmogramih na slikah od 7 do 9 in spektrogramih (gostota spektra moči) za seizmogrami, ki so najbližji opazovalnici MOZS na Možjanci (slika 10). Seizmogrami na sliki 10 niso filtrirani in se zato razlikujejo od tistih na slikah od 7 do 9, na katerih je bil za nazornejši prikaz uporabljen pasovnoprepustni filter 1–20 Hz. Pri potresu (sliki 8 in 10) so razvita praktično le prostorska valovanja, razlika med prihodom hitrejših longitudinalnih in počasnejših transverzalnih valov pa je le okoli 2 sekundi, saj je opazovalnica oddaljena od nadžarišča le 15 km. Zaradi razmeroma velike globine žarišča je pri tako majhni oddaljenosti na navpični komponenti zapisa amplituda obeh vrst valovanja skoraj enaka, oziroma za longitudinalno celo malo višja. Celotno trajanje nihanja tal je le okoli 10 sekund, saj se površinska valovanja niso razvila. Prevladujejo visoke frekvence, ki segajo do 60 Hz (slika 10). Pri podoru



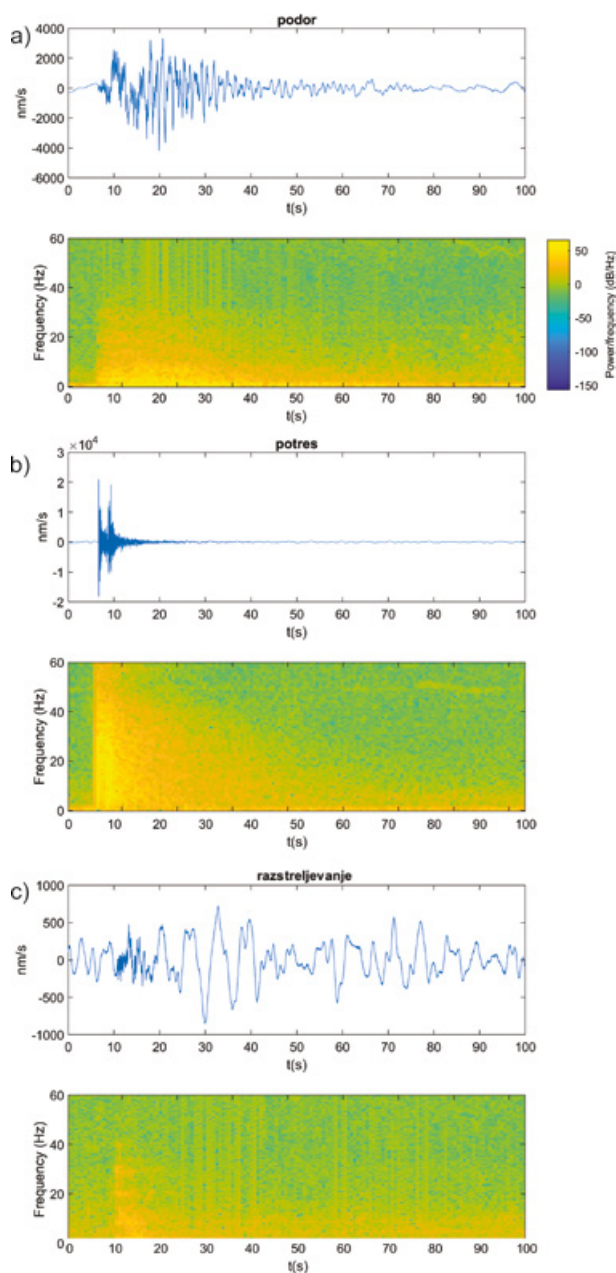
Slika 8: Seizmogrami potresa magnitude 1,8 dne 13. 9. 2019, ki se je zgodil tri kilometre jugozahodno od Rzenika v globini 12 kilometrov, zabeleženi na istih 13 potresnih opazovalnicah kot na sliki 7. Dolžina zapisa je 90 sekund.

Figure 8: Seismograms of the 1.8 magnitude earthquake which occurred on 13 September 2019, 3 km south-west of Rzenik at a depth of 12 km, recorded at the same 13 seismological stations as in Figure 7. The length of the seismic record is 90 seconds



Slika 9: Seizmogrami večjega razstreljevanja v kamnolomu Stahovica, ki je 5,2 kilometra južno od Rzenika na istih 13 potresnih opazovalnicah kot na sliki 7. Dolžina zapisa je 90 sekund.

Figure 9: Seismograms of a massive blast in Stahovica quarry, located 5.2 km to the south of Rzenik, recorded at the same 13 seismological stations as in Figure 7. The length of the seismic record is 90 seconds



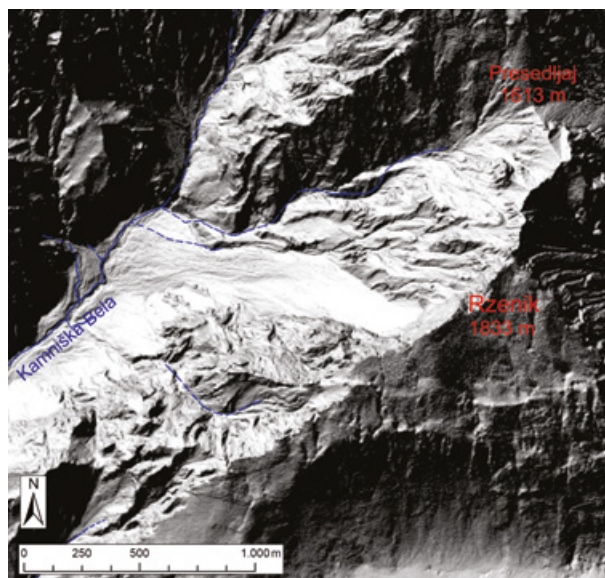
Slika 10: Seizmogrami navpične komponente, zabeleženi na potresni opazovalnici Možjanca (MOZS) in njihovi spektrogrami (gostota spektra moči) za: a) podor na Rzeniku, b) tektonski potres magnitude 1,8, c) večje razstreljevanje v kamnolomu Stahovica; seizmogrami niso filtrirani in se zato razlikujejo od tistih na slikah od 7 do 9, pri katerih je bil za boljši prikaz uporabljen pasovnoprepustni filter 1–20 Hz.

Figure 10: Vertical component seismograms, recorded at Možjanca (MOZS) seismological station, and corresponding spectrograms (power spectral density) for a) the Rzenik rockfall, b) a tectonic earthquake of 1.8 magnitude, c) a massive blast in Stahovica quarry. The seismograms are shown without any filters, so they look different from those in Figures 7–9, where a band-pass filter of 1–20 Hz was applied.

(sliki 7 in 10) traja nihanje tal okoli 70 sekund z največjimi amplitudami po 10–12 sekundah, pri čemer že prevladujejo površinska valovanja, ki sledijo višjefrekvenčnemu začetnemu delu zapisa s prostorskimi

valovanji, vendar brez jasne ločnice med longitudinalnimi in transverzalnimi. Spektrogram pokaže, da je v seizmogramu širok razpon frekvenc med 2 in 30 Hz, in sicer brez izrazitejših vrhov. Pri razstreljevanju (sliki 9 in 10) sledijo začetnemu visokofrekvenčnemu delu, dolgemu okoli 10 sekund in s frekvenco do 40 Hz, izrazita nizkofrekvenčna valovanja na območju med 15 in 90 sekundami zapisa, ki so veliko bolj razvita kot pri podoru. V njih prevladujejo frekvence do 10 Hz, brez kakšnih izrazitejših vrhov.

Skalni podori so v razmeroma krušljivih slovenskih gorah precej pogosti, vendar navadno ne tako obsežni, kot je bil podor na Rzeniku 26. februarja 2021. Taki so izjemno redki in jih večinoma povzročijo le močni potresi. Čeprav je severna stena Rzenika znana kot ena najbolj krušljivih v Sloveniji, ni znanih zgodovinskih zapisov o podobno velikih podorih, na katere pa lahko sklepamo po obsežnem melišču pod steno, ki pa je večinoma poraščeno. Letalsko lasersko skeniranje površja (LiDAR) nam omogoča videti tudi golo površje brez dreves, saj nekateri žarki skozi krošnje dosežejo tla, kar je pomembno za geomorfološke analize (Gosar, 2007). Senčni digitalni model višin območja Rzenika na podlagi letalskega laserskega skeniranja Slovenije iz leta 2015 (slika 11) jasno pokaže, da so se morali v ne tako oddaljeni



Slika 11: Senčen digitalni model višin območja Rzenika ločljivosti en meter, oblikovan na podlagi podatkov letalskega laserskega skeniranja površja (LiDAR, vir ARSO) iz leta 2015. Morfologija golega površja po odstranitvi dreves jasno kaže na predhodne velike podore na tem območju, ki so dosegli strugo Kamniške Bele.

Figure 11: Shaded digital elevation model of the Rzenik Mountain area with 1 m resolution, derived from airborne laser scanning data (LiDAR, Source: ARSO) from 2015. The morphology of the bare surface after the removal of trees clearly indicates previous large rockfalls in this area, which reached the Kamniška Bela creek

geološki preteklosti tu zgoditi podobno veliki ali celo večji skalni podori, saj je nasut material v pahljačasti obliki dosegel dno doline Kamniške Bele.

SKLEPNE MISLI

Z državnim seizmološkim monitoringom ne zaznamo le potresov, temveč tudi nekatere druge ume-tno povzročene ali naravne pojave, pri katerih se sprosti veliko energije, ta pa se deloma spremeni v seizmična valovanja, ki jih zaznajo seizmografi. Tudi skalni podor na Rzeniku 26. februarja 2021 so najprej zaznale potresne opazovalnice, saj se je zgodil v odmaknjeni dolini, zgodaj zjutraj in pozimi, ko v dolinah Kamniške Bistrice in Kamniške Bele ni bilo očitvidcev. Ti so pozneje najprej videli velik oblak prahu, saj severna stena Rzenika ni neposredno vidna

iz nobenega naselja. Podor je bil tako velik, da so ga zaznale potresne opazovalnice po vsej Sloveniji do razdalje 126 kilometrov in bližnje v Avstriji. Primerjava seizmoloških zapisov skalnega podora, zmer-nega tektonskega potresa in večjega razstreljevanja v bližnjem kamnolomu je razkrila pestrost različnih seizmičnih valovanj in njihovega nastanka. Odlom v severni steni Rzenika je bil visok 200 metrov in širok okoli 100 metrov. Podor, katerega prostornino oce- njujem na 625.000 m³, je nasul strmo gozdno pobo-čje površine okoli 13 hektarjev.

ZAHVALA

Zahvaljujem se Izidorju Tasiču za izračun spektro-gramov moči seizmogramov na sliki 10.

Viri in literatura

1. ARSO, 2020. Državna mreža potresnih opazovalnic je 28. februarja 2020 ob 10.32 zabeležila padec meteorita. https://twitter.com/ARSO_potresi/status/1233350684000620544 (6. julij 2023).
2. Babič, S., Golnar, T., 1987. Kamniške in Savinjske Alpe, Repov kot in Kamniška Bela, plezalni vodnik. Samozaložba, 112.
3. Bajc, J., Živčič, M., Gostinčar, M., 2004. Seizmična aktivnost v Šaleški dolini spomladi 2002. Potresi v letu 2002, 56–71. Ljubljana: Agencija RS za okolje.
4. Dammeier, F., Guilhem, A., Moore, J. R., Haslinger, F., Loew, S., 2015. Moment tensor analysis of rockslide seismic signals. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, 3001–3014.
5. Deparis, J., Jongmans, D., Cotton, F., Baillet, L., Thouvenot, F., Hantz, D., 2008. Analysis of rock-fall and rock-fall avalanche seismograms in the French Alps. *Bulletin of the Seismological Society of America* 98, 1781–1796.
6. Frantar, P., Robič, M., 2009. Podori na območju slapa Čedca, *Ujma*, 23, 82–87.
7. Geološki zavod Slovenije 2023. Spletna aplikacija za popis in pregledovanje plazov in erozije. <https://www.e-plaz.si/> (6. julij 2023).
8. Gosar, A., 2007. Letalsko lasersko skeniranje (LiDAR) Idrijskega in Ravenskega preloma v zahodni Sloveniji. *Ujma* 21, 139–144.
9. Gosar, A., 2012. Application of Environmental Seismic Intensity scale (ESI 2007) to Krn Mountains 1998 Mw = 5.6 earthquake (NW Slovenia) with emphasis on rockfalls. *Nat. hazards earth syst. sci.*, 12/5, 1659–1670.
10. Gosar, A., 2014. Ocena intenzitet potresa leta 1998 v Krnskem pogorju z uporabo Environmental Seismic Intensity scale (ESI 2007). V Zorn in sod. (ur.): (Ne)prilagojeni. Naravne nesreče 3. GIAM ZRC SAZU, 83–93.
11. Guerrieri, L., Vittori, E., 2007. Intensity Scale ESI 2007. *Memorie Descrittive della Carta Geologica D'Italia*, 74, 41.
12. Hrvatini, M., Komac, B., Perko, D., Zorn, M., 2006. Slovenia. In: Boardman, J., Poesen J. (Eds.) *Soil erosion in Europe*. 297–310, John Wiley & Sons.
13. Legradič, V., 2023. Grožnje gorskemu svetu – erozija v Alpah. *Planinski vestnik*, 123/2, 18–20.
14. Mrak, I., 2010. Uporaba metode datiranja površinske izpostavljenosti na primeru podora Veliki vrh. V: Zorn in sod. (ur). *Od razumevanja do upravljanja*. GI ZRC SAZU, Ljubljana.
15. Občina Kamnik 2021. Skalni podor v dolini Bele – na tem območju je priporočljiva skrajna previdnost. <https://www.kamnik.si/objava/644034> 6 (6. julij 2023).
16. Orožen Adamič, M., 1990. Podor v Trenti. *Ujma*, 4, 38–38.
17. Pahor, J., Zupančič, P., 2018: Preboj zvočnega zidu dveh letal na zapisih državne mreže potresnih opazovalnic. *Potresi v Sloveniji* 2016, 78–86. Ljubljana: Agencija RS za okolje.
18. Pavšek, M., 1994. Skalni podor v Trenti. *Ujma*, 8, 24–29.
19. PD Domžale 2021. Podor v Rzeniku iz zraka. <https://www.pdd.si/2021/02/28/podor-v-rzeniku-iz-zraka/> (6. julij 2023).
20. Premru, U., 1982. Osnovna geološka karta SFRJ, list Ljubljana, 1 : 100.000. Geološki zavod Ljubljana.
21. Ribičič, M., Vidrih, R., 1999. Posledice potresa 1998 v naravi. *Ujma*, 13, 107–116.
22. Ribičič, M., 2014. Zemeljski plazovi – vrste in opis. *Geološki zavod Slovenije*, 32. [https://www.e-plaz.si/Media/PDF/Priloga1_MRibicic_2014_ZEMELJSKI%20PLAZOVI%20\(VRSTE%20IN%20OPIS\).pdf](https://www.e-plaz.si/Media/PDF/Priloga1_MRibicic_2014_ZEMELJSKI%20PLAZOVI%20(VRSTE%20IN%20OPIS).pdf) (6. julij 2023).
23. Spurny, P., Borovička, J., Kac, J., Kalenda, P., Atanackov, J., Kladnik, G., Heinlein, D., Grau, T., 2010. Analysis of instrumental observations of the Jesenice meteorite fall on April 9, 2009. *Meteoritics & planetary science*. 45/8, 1392–1407.
24. Vidrih, R., Ribičič, M., 1998. Porušitve naravnega ravnotežja v hribinah ob potresu v Posočju 12. aprila 1998 in Evropska makroseizmična lestvica (EMS-98). *Geologija*, 41, 365–410.
25. Vidrih, R., Sinčič, P., Tasič, I., Gosar, A., Godec, M., Živčič, M., 2006. Državna mreža potresnih opazovalnic; Seismic network of Slovenia. Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, 287.
26. Vrhovec, T., 2003. Odmrzovanje permafrosta in podori v visokih alpskih stenah. *Ujma*, 17/18, 201–207.
27. Vrščaj, B., Bergant, J., Kastelic, P., Šinkovec, M., 2020. *Erozija v Sloveniji*. Ljubljana: Kmetijski inštitut Slovenije, 32.
28. Zorn, M., 2002a. Podori na Dobraču. *Geografski vestnik*, 74/2, 9–20.
29. Zorn, M., 2002b. Rockfalls in Slovene Alps. *Geografski obzornik*, XLII, 123–160.