ALTERNATOR
Misliti znanost.

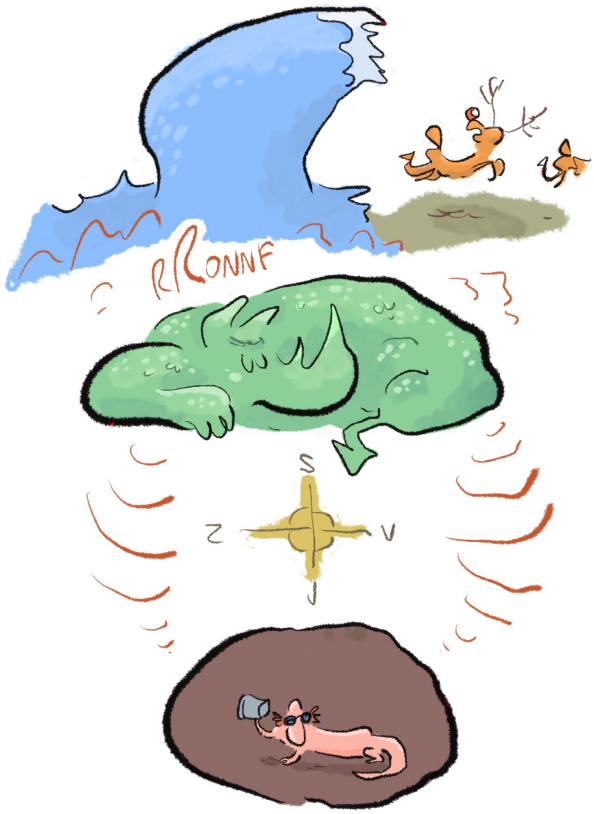
Seizmično presenečenje z Grenlandije

9. 4. 2026

Številka: 06/2026

Avtor:

- Izidor Tasič

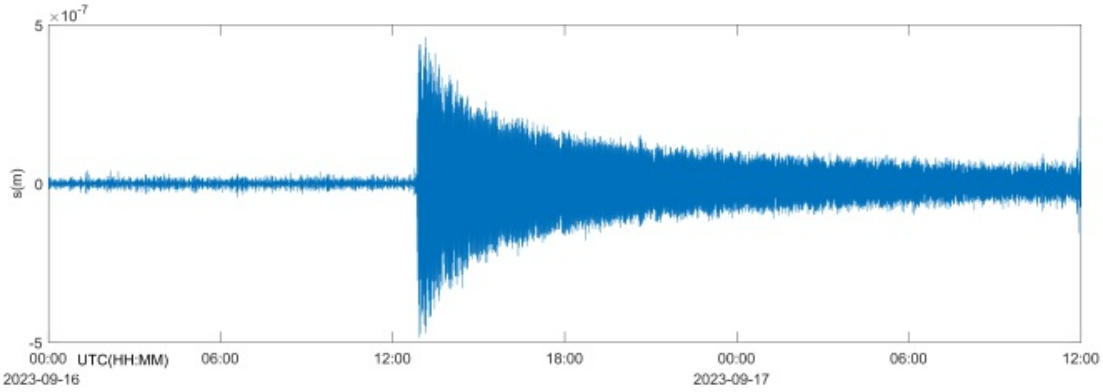


Ilustracija: Izar Lunaček

© Izar Lunaček in ZRC SAZU, 2026. Vse pravice pridržane. Brez predhodnega pisnega dovoljenja imetnika avtorskih pravic ni dovoljeno reproduciranje, distribuiranje, javna priobčitev, predelava ali druga uporaba ilustracije v kakršnemkoli obsegu ali postopku.

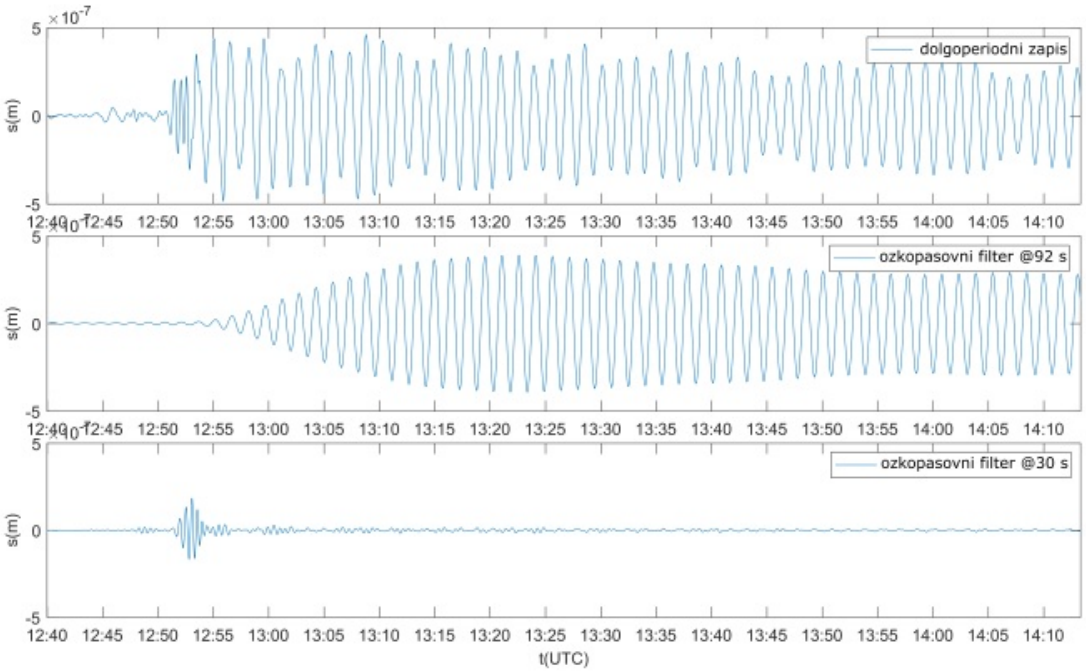
Septembra 2023 popoldne so slovenske potresne opazovalnice zaznale neobičajen seizmični signal, ki je trajal kar šest dni – pojav, ki ga do zdaj še nismo opazili.
Na eni od potresnih opazovalnic smo s pomočjo večdnevne spektralne analize seizmičnih podatkov preverjali kvaliteto delovanja seizmološke opreme in začudeni opazili izstopajoč ozkopasovni signal pri periodi 92 sekund, ki je trajal že več kot en dan (Slika 1). Ta ozko- in istočasno nizkofrekvenčni signal je v seizmologiji tako zelo nenavaden, da smo najprej domnevali, da je s seizmološko merilno opremo na tej lokaciji nekaj narobe. Frekvenčno porazdelitev seizmičnega nihanja tal v grobem delimo na dve območji, nizkofrekvenčno (oziroma dolgoperiodno) in visokofrekvenčno nihanje tal, s približno mejo med območjema pri vrednosti okoli 1 Hz. Ozkofrekvenčni oziroma skoraj enofrekvenčni seizmični signali so pogosto posledica antropogene dejavnosti in jih navadno zasledimo pri visokih frekvencah, le zelo poredko pa tudi pri nizkih. Seizmični šum (https://doi.org/10.3133/ofr93322) oziroma stalno prisotno seizmično nihanje tal, predvsem to velja za navpično komponento, je nad periodo 40 sekund (https://ojs-gr.zrc-sazu.si/ujma/article/view/8596) bistveno šibkejše kot pri višjih frekvencah. Amplituda nihanja tal pri tako nizkih periodah se giblje pri vrednosti okoli deset nanometrov. Tako šibko nihanje tal lahko zaznajo samo kvalitetni širokopasovni seizmometri. Na navpični komponenti se seizmični signal le občasno poveča in v veliki večini je to posledica teleseizmov – potresov, ki izvirajo daleč, vsaj več kot 1000 kilometrov stran. A taki dogodki ne ustvarijo ozkopasovnega nihanja tal. Lahko pa enofrekvenčni signal umetno ustvarimo s pomočjo zajemalne enote, ki ima sicer nalogo, da analogni signal iz seizmometra pretvarja v digitalnega in ga opremi s točnim časom. Sodobne zajemalne enote lahko na zahtevo uporabnika v seizmometer dodajo različne umetne signale (https://ojs-gr.zrc-sazu.si/ujma/article/view/8533) , ki jih uporabimo za testiranje in kontrolo seizmometrov. Toda v opazovanem času seizmometra nismo testirali. Razlog za zaznani signal bi lahko bila tudi napaka na kateri od komponent seizmološkega sistema. Netipični signali kot posledica napak opreme niso pogosti, so izredno raznoliki in pogostokrat nenavadni, zato se

za njihovo identifikacijo uporabljajo različni postopki in računska orodja.



Slika 1: Neobičajen seizmični signal, ki so ga 16. septembra 2023 popoldne zaznale slovenske potresne opazovalnice.

A po daljši natančni analizi delovanja posameznih delov opreme, ki smo jo lahko opravili telemetrično, napake nismo odkrili, zato smo nadaljevali analizo spektrov na naslednji potresni opazovalnici in začudeni opazili enak 92-sekundni signal. Takrat je postalo jasno, da je to pravzaprav seizmični signal še neznanega izvora. Ta signal pri periodi 92 sekund so 16. septembra leta 2023 ob okoli 12. ure in 50 minut po UTC začele zaznavati vse potresne opazovalnice na slovenskem ozemlju s širokopasovnimi seizmometri. Nadaljnja analiza je pokazala, da je bil seizmični signal na začetku sestavljen iz več frekvenc, ki pa so relativno hitro zamrle (Slika 2). Signal pri periodi 92 sekund pa je v slabe pol ure narasel do svoje največje amplitude, nato pa je začel zelo počasi upadati. Ta signal smo na slovenskih potresnih opazovalnicah lahko opazovali še naslednjih šest dni, preden ga je prekril seizmični šum. S posebnim algoritmom smo prečesali slovenski digitalni arhiv seizmogramov, a podobnega signala nismo našli. To pomeni, da v zadnjih petindvajsetih letih takega dogodka ni bilo.



Slika 2: Časovno krajši prikaz začetka nenavadnega seizmičnega signala (s Slike 1): prikaz dolgoperiodnega dela zapisa (graf A); zapis, filtriran z ozkopasovnim filtrom pri 92 sekundah (graf B), ki pokaže, da je nihanje pri tej periodi doseglo svoj maksimum slabe pol ure po začetku; zapis, filtriran z ozkopasovnim filtrom pri 30 sekundah (graf C). Zadnja krivulja je seizmični odtis dogodka, ki je sprožil večdnevno nihanje tal s periodo 92 sekund.

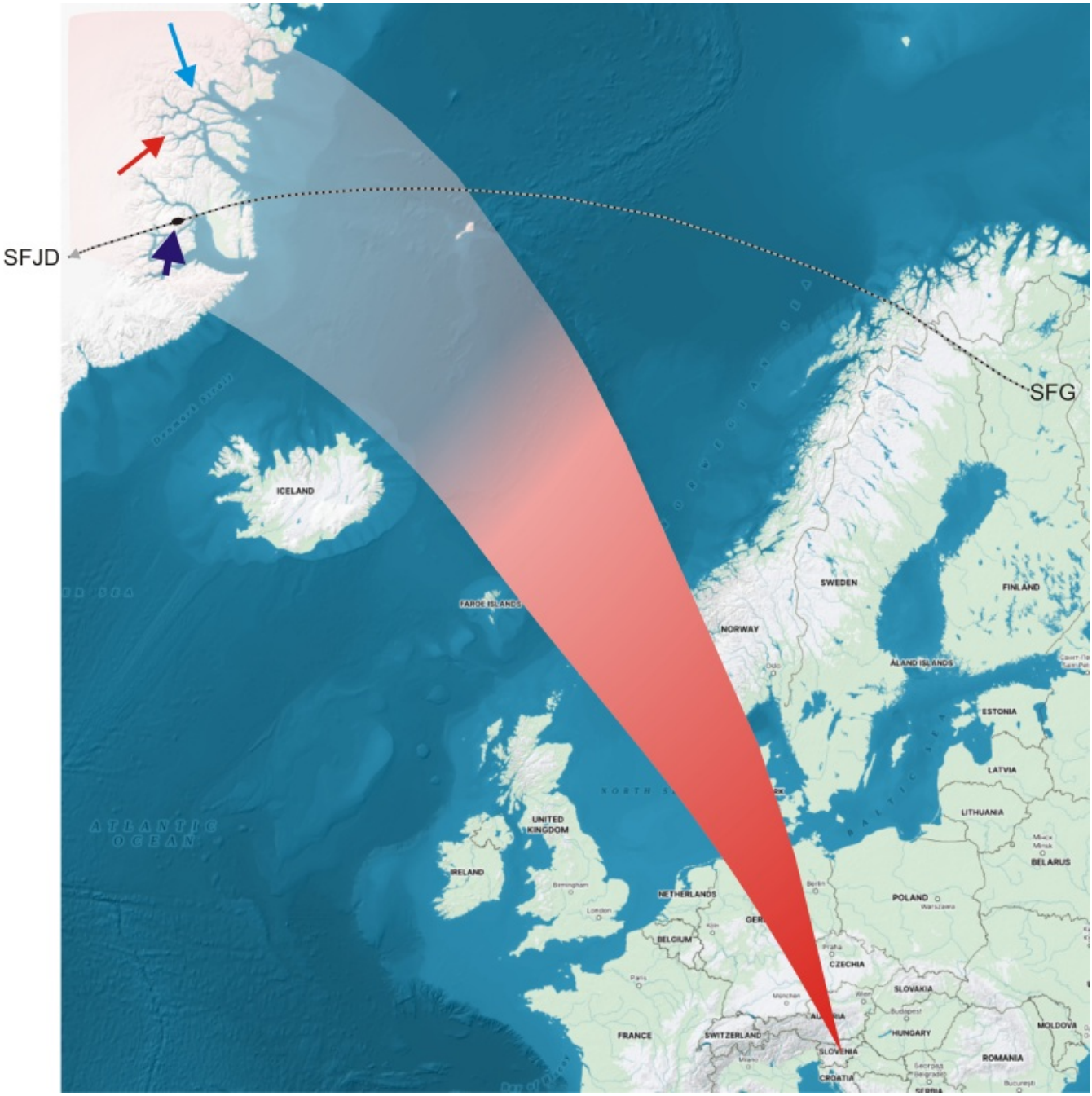
Kje je izvor?

Ko smo preverili seizmične zapise iz potresnih opazovalnic sosednjih držav, ki ležijo bolj ali manj blizu naše meje, smo ugotovili, da vse zaznavajo zelo podoben signal, le amplituda na opazovalnicah severno od Slovenije je bila opazno večja. Na osnovi teh pregledov smo najprej ocenili, da je izvor signala okvirno nekje na severu. Podobnost v zapisih različnih opazovalnic je kazala na to, da je bila sevalna funkcija izvora za vse opazovalnice, ne glede na to, kje so se nahajale, enaka.

V tem času je bil na Islandiji aktiven vulkan, zato smo sprva domnevali, da je izvor signala magmatski in da prihaja s tega območja. Magma lahko v določenih pogojih v notranjosti Zemlje tvori enofrekvenčni seizmični signal s periodami nekaj

sekund, ki lahko traja tudi leta (https://doi.org/10.3986/alternator.2025.24) . A že primarna analiza 92-sekundnega seizmičnega signala v prostoru frekvence in valovnega števila (t. i. analiza FK, Slika 3) s podatki iz slovenskih opazovalnic je pokazala, da izvor ni na območju Islandije. Analiza FK (angl. *frequency–wavenumber analysis*) je metoda, ki jo uporabljamo predvsem v geometrijsko oblikovanih omrežjih seizmoloških opazovalnic, da iz podatkov več senzorjev določimo smer prihoda seizmičnega valovanja glede na center omrežja in fazno hitrost širjenja. Slednja nam pove, kako hitro se seizmični val širi čez območje potresnih opazovalnic. Analiza temelji na tem, da prispejo seizmični valovi, ki potujejo čez območje opazovalnic, do vsake naslednje potresne opazovalnice z majhno časovno zamudo, ki je odvisna od njihove smeri in hitrosti. Analiza FK izrabi te zamike v frekvenčno-valovnem prostoru. Pri tej analizi mora biti izvor seizmičnega signala zadosti daleč od omrežja, da je podatek uporaben in realen. Eno najstarejših in tudi največje geometrijsko oblikovano omrežje je NORSAR (https://www.norsar.no/) , ki leži na severu Norveške. Ima premer 100 km in uporablja senzorje (https://doi.org/10.1785/0220200375) , razporejene v več koncentričnih prstanov. Sistem je bil namensko zgrajen za zaznavanje jedrskih poskusov; delovati je začel leta 1968. Od leta 1999 je NORSAR neodvisna, neprofitna raziskovalna fundacija.

Geometrija slovenskih opazovalnic za analizo FK ni idealna, saj potresne opazovalnice niso postavljene v pravilni geometrijski strukturi. Da smo lahko ocenili smer prihoda seizmičnega valovanja, smo analizo ponovili večkrat tako, da smo naključno izpuščali podatke iz dela potresnih opazovalnic. Nobena od rešitev ni kazala proti Islandiji, ampak bolj severno, v smeri jugovzhodnega dela Grenlandije (Slika 3). Tam vulkanske aktivnosti ni. S pomočjo analize FK smo torej izvedeli, da je bil seizmični signal pri periodi 92 sekund, ki so ga 16. septembra 2023 začele zaznavati potresne opazovalnice na slovenskem ozemlju, površinsko valovanje s hitrostjo 4,1 km/s, ki je prihajalo iz smeri severa oz. severozahoda.



Slika 3: Lociranje izvora seizmičnega pojava: prvič s pomočjo FK analize (rdeč žarek, usmerjen iz Slovenije); drugič s pomočjo dveh opazovalnic z izrazito drugačnim zapisom (črna puščica kaže na mali črni pravokotnik na sivi črti, ki povezuje opazovalnici na Grenlandiji in Finskem); pomembno za oceno usmerjenosti sevalne funkcije 92-sekundnega seizmičnega signala; tretjič s pomočjo preprostega algoritma, ki upošteva vstopne čase 30-sekundne periode na nekaterih potresnih opazovalnicah severne poloble (modra puščica); dejanska lokacija izvora (rdeča puščica).

Pri nadaljnji analizi tega signala iz naključno izbranih evropskih potresnih opazovalnic smo naleteli na dve opazovalnici, med seboj oddaljeni okoli 3120 kilometrov, katerih seizmična zapisa sta bila bistveno drugačna od ostalih zapisov, med seboj pa sta bila povsem primerljiva. Prva opazovalnica (z oznako SFJD) se nahaja na zahodni obali Grenlandije, druga (z oznako SFG) pa na severnem delu Finske. Druga je zabeležila signal z manjšimi amplitudami kot prva. To je pomenilo, da za ti dve opazovalnici izvor signala ni enak kot za ostale. Izvor je torej poudarjeno podolgovato ovalen, z daljšo stranjo v smeri teh dveh opazovalnic. Potresni opazovalnici smo po površini Zemlje povezali med seboj in ob predpostavki, da je hitrost površinskih potresnih valov za oba kraja enaka, dobili oceno lokacije, ki je kazala na območje fjordov vzhodne obale Grenlandije (Slika 3). Tako določena lokacija je samo ocena, z večjo napako v smeri sever–jug, a pomembno oriše usmeritev žariščnega sistema.

Za natančnejšo določitev lokacije smo uporabili (https://fgg-web.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2025/SZGG_2025_Tasic_Pahor_Jesenko.pdf) nekatere seizmograme iz Evrope, Kanade in Aljaske ter seizmični signal pri periodi 30 sekund (Slika 2). Seizmični zapis je imel pri tej periodi jasnejši vstop kot pri periodi 92 sekund. Hitrost površinskega valovanja pri tej periodi smo ocenili na 3,8 km/s in s preprostim algoritmom ocenili lokacijo dogodka (Slika 3). Tudi ta rešitev je kazala na območje fjordov vzhodne obale Grenlandije.

A še vedno nismo našli zadovoljivega odgovora na vprašanje, kaj bi povzročilo pojemajoč nekajdnevni enofrekvenčni tremor pri periodi 92 sekund. Sumili smo, da je izvor povezan z ledeno goro, ki se je odlomila od podlage, a je zatem z enim koncem nasedla in ustvarila enofrekvenčno nihanje. Toda to ni bilo ravno skladno s počasnim iznihavanjem, kot so ga kazali seizmogrami.

200-metrski cunami

Leto dni kasneje je v reviji *Science* izšel članek (https://doi.org/10.1126/science.adm9247) , pri katerem je sodelovalo več deset znanstvenikov, vključno s seizmologi, geofiziki in oceanografi, in ki je natančno razložil celotno dogajanje. Članek je bil rezultat večplastne nekajmesečne analize vseh razpoložljivih podatkov in je vključeval tudi terensko delo.

Na vzhodni obali Grenlandije, na obronkih fjorda Dickson (Slika 4) je sesedanje manjšega ledenika zaradi večletnega toplega obdobja destabiliziralo gorsko pobočje. Velik plaz s približno 25 milijoni kubičnih metrov kamnin in ledu se je zrušil v fjord in ustvaril 200-metrski cunami. Na zapisih potresnih opazovalnic iz Slovenije je ta dogodek viden na začetku tremorja pri periodi 30 sekund. Del cunamija se je nato razširil izven meja fjorda. Obalo otoka Ella, ki je od mesta plazu oddaljen okoli 55 kilometrov, je prizadel 4 metre visok val. Otok Ella je priljubljena destinacija za turistične križarke, ki turistom razkazujejo grenlandske fjorde. Na srečo jih tega dne na tem območju ni bilo.

Ker je fjord Dickson precej zaprt in ima visoka navpična pobočja, je večina valovanja po cunamiju ostala ujeta v njem. V kratkem času se je v fjordu pojavilo dolgotrajno stabilno stoječe valovanje morja, ki ga poznamo pod imenom séš (fr. *seiche*). To je podobno valovanje, kot ga lahko z roko ustvarimo v kopalni kadi. Stoječe valovanje v fjordu (voda je nihala prečno na dolžino fjorda) je trajalo kar devet dni, kar so bližnje potresne opazovalnice tudi (za)beležile.



Slika 4: Nihanje seša (stoječega valovanja), ki ga je neposredno sprožil cunami, posredno pa velikanski plaz kamnin in ledu s pobočja gore Hvide Støvhorn. Devetdnevno nihanje so omogočili strmi bregove fjorda Dickson in zaradi ledenika skoraj enakomerno poglobljeno morsko dno.

Veliki cunamiji kot posledica plazu sicer niso zelo pogosti, so se pa v preteklosti že dogajali, tudi na Grenlandiji. Na južni

obali Nuussuaqa v srednjem delu zahodne Grenlandije je 21. novembra 2000 zemeljski plaz povzročil cunami z ocenjeno višino vala do 250 metrov, ni pa ustvaril seša. Cunami je uničil nekaj manjših čolnov, a ni zahteval nobenih žrtev in ni poškodoval ljudi. A to žal ni veljalo za nam najbližji dogodek v Italiji. V dolini Vajont se je 9. oktobra 1963 zvečer z gore Toc v akumulacijsko jezero zrušil plaz z 260 milijoni kubičnih metrov zemljine. Plaz je povzročil 200-metrski cunami, ki se je prelil čez jez in v dolini opustošil večkilometrsko območje. Umrlo je okoli 2000 ljudi.

Seizmični seš pa lahko, kadar se frekvenca potresnega valovanja ujema z naravno frekvenco vodnega telesa, nastane tudi tisoče kilometrov stran od epicentra potresa. Pojav je dobro dokumentiran (https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/seismic-seiches) , npr. pri aljaškem potresu leta 1964, kjer so seši nastali celo v Avstraliji, torej več kot 10.000 km od epicentra.

Seizmografi lahko razkrijejo marsikaj

Zdaj se lahko ponovno vprašamo: kaj je torej povzročilo tisti nenavadni seizmični signal, ki so ga seizmografi na severni polobli zaznali septembra 2023? Naravni pojavi le redko generirajo tako enolično, dolgotrajno nihanje, ki posnema umetne signale, sploh pa so taki pojavi neobičajni na dolgih periodah. Ta signal je ustvaril ogromen plaz kamenja in ledu nad fjordom Dickson na Grenlandiji. Plaz je v fjordu povzročil velikanski cunami, katerega val je večinoma ostal ujet v ozkem fjordu in ustvaril seizmično zvonjenje.

Večdnevni enofrekvenčni seizmični signal z Grenlandije je pravzaprav posledica segrevanja ozračja. Vzrok plazu je odtajevanje permafrosta in ledenika, ki je destabiliziralo pobočje. Seizmometri, ki so namenjeni zaznavanju dogodkov v zemeljski notranjosti, so tako postali tudi priča klimatskim spremembam.

In to nas pripelje do zanimivega zaključka: mreža seizmoloških instrumentov, ki smo jo postavili, da bi razumeli naravne pojave v notranjosti Zemlje, je hkrati postala sistem globalnega nadzora fizikalnih dogajanj ne glede na to, ali je njihov izvor naravni ali človeški. Vsaka sprostitev energije, naj bo to plaz ali kaj drugega, pusti seizmično sled, ki jo lahko zaznajo seizmografi. Tako lahko z njimi zaznavamo tudi jedrske poskuse, saj ti ustvarijo seizmično valovanje, ki potuje skozi celotno zemeljsko skorjo. Planet je pravzaprav slab varuh takih skrivnosti.

https://www.alternator.science/sl/daljse/seizmicno-presenecenje-z-grenlandije/