

FORENZIČNA SEIZMOLOGIJA

Andrej Gosar¹

Povzetek

Potresne opazovalnice včasih poleg potresov, razstreljevanj v kamnolomih ali pri gradnjah ter hribinskih udarcev v rudnikih zaznajo tudi druge nepredvidene in redke dogodke, pri katerih zaradi eksplozije ali močnega udarca nastanejo seizmična in akustična valovanja. Beleženje in seizmoakustična analiza teh valovanj, kar imenujemo forenzična seizmologija, sta lahko pomembna za hitro ugotavljanje, kaj, kje, kdaj in s kakšno močjo se je zgodilo, in koristno dopolnjujeta druga opazovanja. Najpomembnejše je seizmično opazovanje podzemnih jedrskih poskusov, saj zaradi prepovedi o njih ni skoraj nobenih drugih podatkov. Sledijo eksplozije kemičnega razstreliva zaradi nesreč v tovarnah, neeksploziranih bomb iz preteklih vojn ali terorističnih dejanj. Med večjimi sta bili eksplozija skladišča amonijevega nitrata v bejrutskem pristanišču in nesreča ruske podmornice Kursk z dvema močnima eksplozijama. Večje pozornosti je bila deležna tudi sabotaza plinovoda Severni tok v Baltskem morju. Nekaj je tudi primerov seizmičnega zaznavanja in analize eksplozivnih nesreč plinovodov na kopnem. Redkeje pa potresne opazovalnice zaznajo padec letala ali trk ladje z obalo. Forenzične seizmološke analize omogočajo predvsem hitro opredelitev lokacije in velikosti (magnitude) eksplozivnega ali udarnega dogodka.

FORENSIC SEISMOLOGY

Abstract

Seismological stations detect not only earthquakes, blasting in quarries or for construction purposes, and rock bursts caused by mining, but also other unforeseen and rare events, where due to the explosion or impact seismic and acoustic waves are generated. By their registration and analysis, known as forensic seismology, we can rapidly determine what happened and where, when and how strong it was, supplementing other observations. The most important of these events is the monitoring of underground nuclear tests; because they are banned, almost no other data is available. They are followed by chemical explosions due to accidents in factories, related to unexploded ordnance from past wars, or due to terrorist attacks. Among the biggest was the explosion of the warehouse full of ammonium nitrate in Beirut port, and the sinking of the Russian submarine Kursk, which was accompanied by two strong explosions. The recent sabotage of the Nord Stream gas pipeline in the Baltic Sea has also attracted attention. There have also been some cases of seismic observations of large gas pipeline explosive accidents on shore. Examples of seismic detections of aircraft crashes or collisions of large ships with the shore are very rare. Forensic seismological analyses enable especially rapid determination of the location and magnitude of explosive or impact events.

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

UVOD

Forenzične raziskave povezujemo predvsem s preiskovanjem kriminalnih dejanj, vendar se ta izraz uporablja tudi v vedah, kot so arheologija, biologija, medicina in geologija, ali v tehniki, pri kateri s forenzičnimi pristopi analizirajo vzroke za letalske ali železniške nesreče, strojelomne dogodke ali porušitve objektov. V seizmologiji se forenzika uporablja predvsem za razlikovanje med naravnimi potresi in kemičnimi ali jedrskimi eksplozijami (Pyle in Walter, 2019). To področje se je precej razširilo, ko so ugotovili, da lahko s poglobljeno analizo seizmogramov razkrijemo naravo in podrobnosti različnih pojavov, kot so namerne in nenamerne eksplozije, teroristična dejanja, potopitve ladij ali podmornic, letalske nesreče, eksplozije

meteorjev v ozračju ali padec meteorita na Zemljino površje (Spurný in sod., 2010; Edwards in sod., 2014). Zaradi neprekinjenega spremljanja potresne dejavnosti in vedno boljših omrežij potresnih opazovalnic, tako glede nameščenih senzorjev kot tudi njihove gostote, so pri takih dogodkih seizmologi pogosto prvi, ki lahko nekaj povedo o tem, kaj se je zgodilo, predvsem pa, kje in kakšna je bila moč eksplozije, udarca ali podobnega pojava. Metode določevanja lokacije in velikosti oziroma magnitude potresa ali umetno povzročene eksplozije ali udarca telesa so namreč podobne. Več znanja in izkušenj pa je potrebnih, da hitro in zanesljivo ločimo tak dogodek od naravnega potresa, še preden so na voljo druge, neodvisne informacije. To je lahko zelo pomembno, saj v številnih forenzičnih primerih ni na voljo pravih podatkov, bodisi

zaradi vojaških ali nezakonitih dejanj, kot so podzemni jedrski poskusi, sabotaže ali teroristična dejanja, bodisi se zgodijo v predelih sveta, ki ne slovijo po transparentnosti delovanja in se podatki skrivajo zaradi političnih ali poslovnih razlogov. Deloma spadajo k forenzični seizmologiji tudi opazovanja inducirane seizmičnosti (Gosar, 2018) zaradi akumulacijskih jezer, rudarjenja ali vtiskanja vode ali plina v geološke plasti pod površjem (Gosar, 2005).

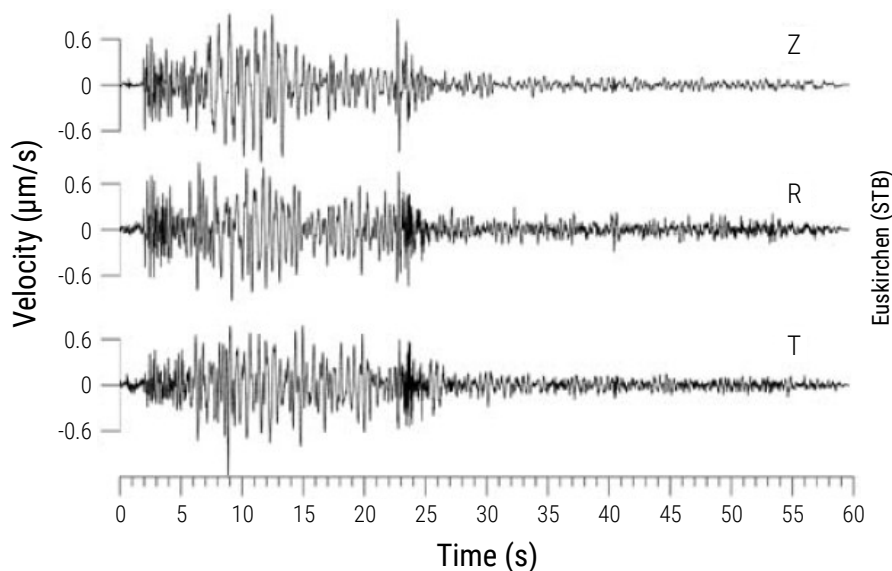
Najbolj znano področje forenzične seizmologije je zaznavanje jedrskih poskusov, o čemer smo v Ujmi že pisali (Gosar, 2014), zato ga v tem preglednem članku ne bomo ponovno obravnavali. Po mednarodnem sporazumu o prepovedi jedrskih poskusov iz leta 1996 so vsi taki poskusi prepovedani. Mednarodna skupnost nadzira spoštovanje prepovedi z monitoringom, ki ga izvaja mednarodna organizacija Združenih narodov CTBTO (Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organisation). Monitoring temelji predvsem na seizmološkem opazovanju, vključuje pa tudi hidroakustično in infrazvočno opazovanje ter analizo radionuklidov v zraku (Pasyanos in sod., 2018; Stump in sod., 2022; Ding in sod., 2024; Ekström in sod., 2024). Spektralna razmerja med različnimi vrstami potresnih valov se pri podzemni eksploziji značilno razlikujejo od tistih pri naravnem potresu, zato je njihova analiza eden glavnih načinov za razlikovanje. Moč eksplozije se prav tako določi predvsem na podlagi seizmološko izračunane magnitude. Zadnji podzemni jedrski poskus je izvedla Severna Koreja leta 2017 in so ga zaznale potresne opazovalnice, razporejene po vsem svetu, tudi v Sloveniji. Eksplozija je po velikosti ustrezala potresu magnitude 6,3, ta pa približno ustreza eksploziji ekvivalentne mase 260 kiloton TNT.

FORENZIČNE ANALIZE EKSPLOZIJ KEMIČNEGA RAZSTRELIVA

Eksplozije na površju Zemlje ali pod njim povzročijo infrazvočna in seizmična valovanja, ki se zaznavajo z akustičnimi senzorji in potresnimi opazovalnicami. Forenzične študije temeljijo na seizmoakustičnih analizah obeh vrst podatkov.

Seizmolog in profesor na Univerzi v Kölnu Klaus G. Hinzen je 3. januarja 2014 med delovnim časom videl, da so instrumenti na eni izmed potresnih opazovalnic začeli zapisovati seizmično valovanje, ki ni značilno za potres, temveč za zračni udar (slika 1). Takoj je preveril podatke razpoložljivih potresnih opazovalnic in z uporabo hitrosti zvoka v zraku (330 m/s), ki je bistveno manjša od hitrosti seizmičnega valovanja v kamninah, hitro določil lokacijo eksplozije vzhodno od mesta Euskirchen s 55.000 prebivalci (Hinzen, 2014). Na tem območju ni kamnolomov, v katerih se sicer pogosto izvajajo večja miniranja, zato je pomislil, da gre za nesrečo. Že med analizo podatkov so ga poklicali s policije in posredoval jim je podatek o lokaciji ter morebitnem vzroku. Nekaj minut pozneje je že bilo jasno, da je med zemeljskimi deli v bližini železniške postaje eksplodirala letalska bomba iz druge svetovne vojne. Čeprav je za določitev lokacije iz seizmogramov uporabil preprost rutinski postopek, se je opredeljena lokacija razlikovala od prave le za 1,15 km (Hinzen, 2014).

Letalska bomba je eksplodirala na delovišču podjetja za recikliranje odpadkov, na katerem so gradbene odpadke po rušenju objektov drobili in ločevali med seboj v beton, železo in drugo. Pri tem so uporabljali bager s priključenim hidravličnim drobilnikom. Med



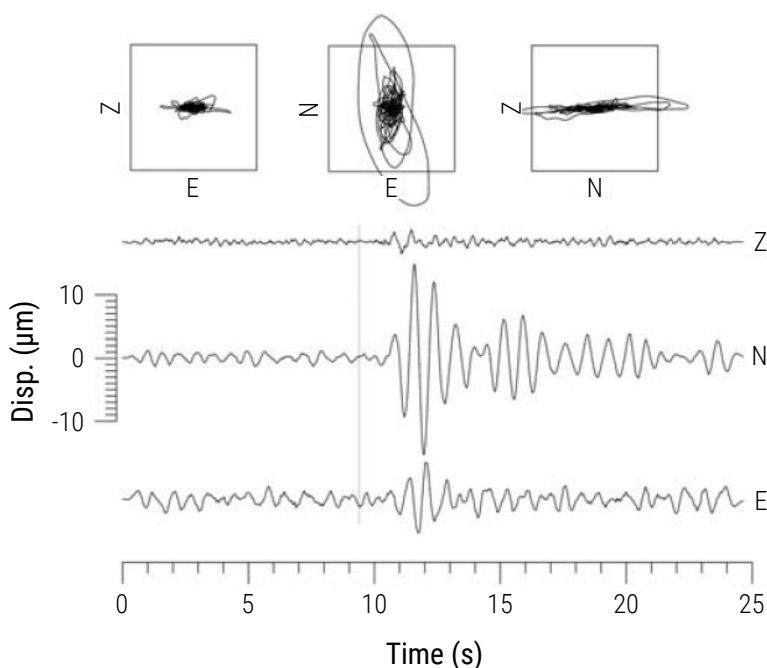
Slika 1: Trikomponentni seizmogram eksplozije letalske bombe iz druge svetovne vojne v Euskirchnu. Nastal je na potresni opazovalnici Univerze v Kölnu, ki je bila oddaljena 7,5 km. (Hinzen, 2014)

Figure 1: Three-component seismogram of the Euskirchen World War II bomb explosion, recorded at the Cologne University seismic station located 7.5 km away. (Hinzen, 2014)

odpadki je bil tudi kovinski valjasti predmet, dolg 2,8 m, s premerom 0,76 m, ki je bil na prvi pogled videti kot odslužen bojler. V resnici je bila to angleška letalska bomba z maso 1790 kg in 1350 kg eksplozivnega polnjenja. Hidravlični drobilec je povzročil njeno detonacijo. Upravljač stroja je v nesreči umrl, 13 ljudi v okolici pa je bilo poškodovanih. Na zgradbah so do 500 m daleč od eksplozije popokala stekla, strešniki so se premaknili, lažje strehe na poslovnih objektih poškodovale, več avtomobilov je bilo poškodovanih ali uničenih. Je pa ureditev bližnje okolice odlagališča – 10 m visok nasip odpadkov, 7 m visoka vrsta transportnih kontejnerjev in 12,5 m visoka opečna stena skladišča – močno vplivala na širitev

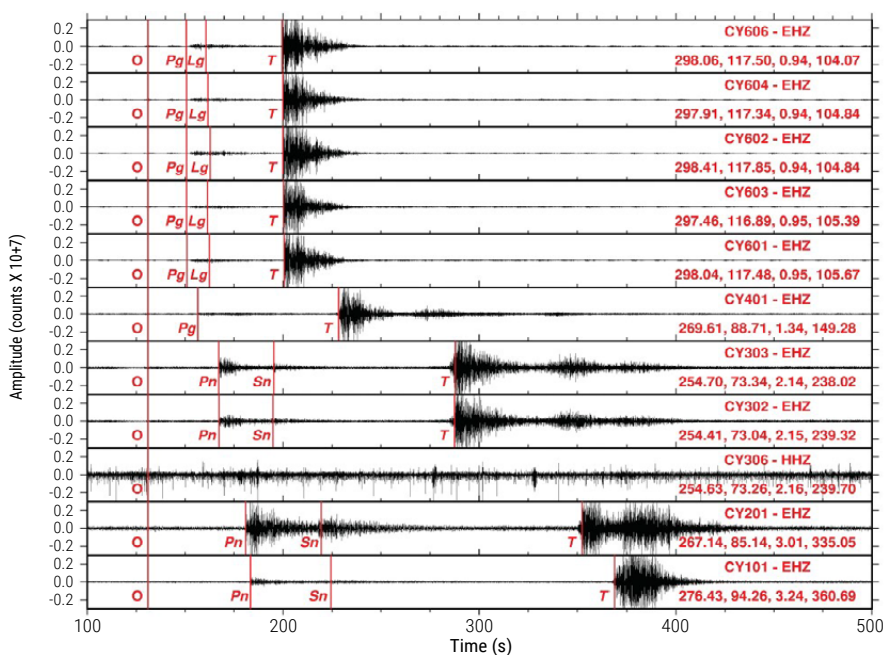
zračnega udarnega vala in porazdelitev poškodb objektov za temi ovirami, saj so te ovire usmerile večino zračnega udara v smer navzgor.

Raziskovalci so po eksploziji izvedli poglobljeno analizo seizmogramov in ugotovili, da so seizmična valovanja, ki so potovala skozi kamnine, jasno vidna le na najbližji opazovalnici (slika 1), ki je bila oddaljena 7,5 km, kar je presenetljivo. Je bil pa zato zračni udar viden na opazovalnicah do razdalje 63 km. Za natančnejše lociranje s pomočjo prihodov zračnega udara so upoštevali tudi smer in jakost vetra, ki je po podatkih bližnje meteorološke postaje v času eksplozije pihal s hitrostjo 14 m/s. To je vplivalo na hitrost



Slika 2: Rekonstrukcija premikov tal v treh ravninah na podlagi meritev s seizmološkim instrumentom, nameščenim v podstrešju stolnice v Kölnu zaradi eksplozije v Euskirchnu. Stranica pravokotnika hodogramov (na vrhu) je dolga 10 μm . (Hinzen, 2014)

Figure 2: Displacement restitution of ground motion in three directions based on measurements from the seismological instrument in the attic of Cologne cathedral. The box length of the hodograms (top) is 10 μm . (Hinzen, 2014)



Slika 3: Eksplozija v bejrutskem pristanišču, kot so jo zaznale številne potresne opazovalnice v regiji. O označuje trenutek eksplozije, Pg, Pn, Sn, Lg, Rg in T pa so seizmološke faze. (Ghalib in sod., 2021)

Figure 3: The Beirut port explosion recorded at several seismological stations in the region. O is the explosion origin time, Pg, Pn, Sn, Lg, Rg and T are the different seismic phases. (Ghalib et al., 2021)

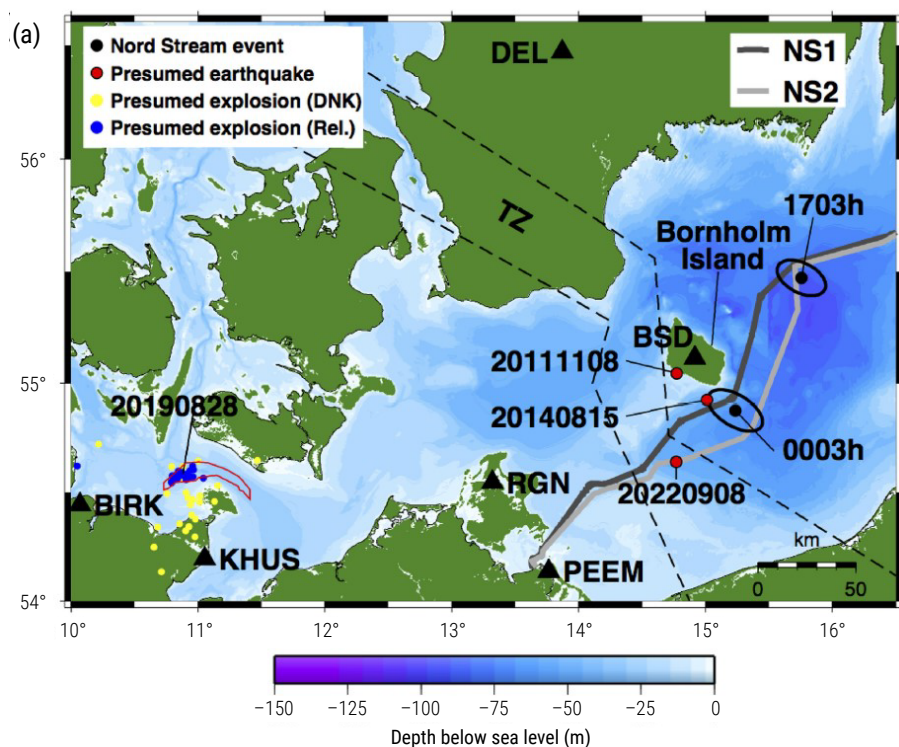
širjenja udara v različnih smereh. Tako so zmanjšali rezidualne čase določitve trenutka eksplozije z 10,5 na 1,3 sekunde. Zanimiva je meritev s seizmološkim inštrumentom, nameščenim v podstrešju kölnske katedrale, 47 m nad tlemi, ki je zaznal njeno nihanje zaradi zračnega udara (slika 2). Ker je zračni udar zadel katedralo skoraj pravokotno na njeno daljšo os, je bilo nihanje največje v smeri sever–jug.

4. avgusta 2020 se je v bejrutskem pristanišču zgodila eksplozija uskladiščenega amonijevega nitrata, ki je imela zelo hude posledice. Več kot 200 ljudi je umrlo, 6500 je bilo ranjenih, poškodovanih je bilo 86.000 stavb in 300.000 ljudi je ostalo brez domov (Ghalib in sod., 2021). Nesreča se je začela s požarom v skladišču, ki mu je sledilo nekaj manjših eksplozij, in končala z ogromno eksplozijo, ki je uničila pristanišče in okoliške soseske. Na mestu skladišča je nastal krater s premerom 140 m. V celotnem mestu so bile poškodovane številne hiše, predvsem stekla. Zračni udar so čutili tudi na 8,5 km oddaljenem bejrutskem letališču. Eksplozijo je zaznalo vsaj 58 potresnih opazovalnicah v Libanonu, Siriji, Turčiji, Jordaniji, Izraelu, Iraku in na Cipru ter več seizmografov na morskem dnu v vzhodnem Sredozemlju. Na podlagi analize seizmogramov (slika 3) so lahko poleg lokacije, ki se je dobro ujemala z dejansko, določili lokalno magnitudo (ML) ekvivalentnega potresa, ki je bila 3,3, kar ustreza eksploziji 2750 ton TNT na površju (Ghalib in sod., 2021). Približno takšna naj bi bila tudi količina uskladiščenega amonijevega nitrata.

FORENZIČNE ANALIZE PODVODNIH EKSPLOZIJ ALI SABOTAŽ

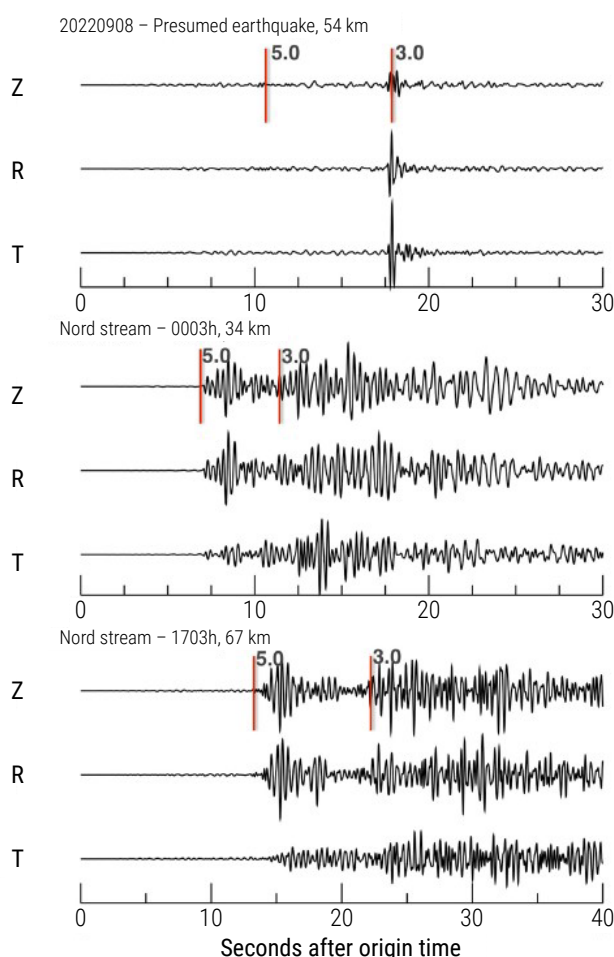
Severni tok 1 in Severni tok 2 sta plinovoda, ki povezujeta Rusijo in Nemčijo po dnu Baltskega morja (slika 4). 27. septembra 2022 so nemški upravljavci zaznali nenaden upad tlaka v plinovodu v bližini danskega otoka Bornholm, najprej v drugi cevi, nekaj ur pozneje pa še v prvi cevi. Istega dne so mediji poročali, da so seizmologi na podlagi opazovanj švedske državne mreže potresnih opazovalnic (slika 5) 26. septembra zaznali dva seizmična dogodka (Heyburn in sod., 2024). Nekaj dni pozneje so podrobne podatke objavili v mednarodni organizaciji, ki nadzira spoštovanje sporazuma o prepovedi jedrskih poskusov (CTBTO). Ta uporablja poleg potresnih opazovalnic, razporejenih po vsem svetu, še infrazvočne in hidroakustične senzorje (Gosar, 2014).

Norveška državna mreža potresnih opazovalnic (NORSAR) je 12. avgusta 2000 zaznala razmeroma močna seizmična dogodka v Barentsovem morju, za katera so domnevali, da sta podvodni eksploziji (slika 6), saj je to sicer povsem neseizmično območje, brez potresne dejavnosti. Kljub temu je v severnem delu Skandinavije in na otočju Svalbard razmeroma veliko potresnih opazovalnic, deloma tudi zato, ker so z njimi v času hladne vojne izvajali monitoring ruskih jedrskih poskusov na testnem območju Nove dežele. V Barentsovem morju je avgusta 2000 potekala velika pomorska vojaška vaja. Prve informacije iz



Slika 4: Karta poteka plinovodov Severni tok 1 (NS1) in Severni tok 2 (NS2) v Baltskem morju z lokacijo eksplozije zaradi domnevne sabotaže in nekaterih potresov, uporabljenih v študiji za razlikovanje naravnih in umetno povzročenih dogodkov (Heyburn in sod., 2024)

Figure 4: Map of Nord Stream 1 (NS1) and Nord Stream 2 (NS2) gas pipelines in the Baltic Sea, with the location of the explosion due to alleged sabotage and some earthquakes used in the study to discriminate natural and artificial events (Heyburn et al., 2024)



Slika 5: Primerjava seizmogramov potresa (zgoraj) in dveh domnevnih eksplozij 26. septembra na plinovodu Severni tok (v sredini ob 00.03 UTC in spodaj ob 17.03 UTC) na potresni opazovalnici BSD z označeno oddaljenostjo (Heyburn in sod., 2024)

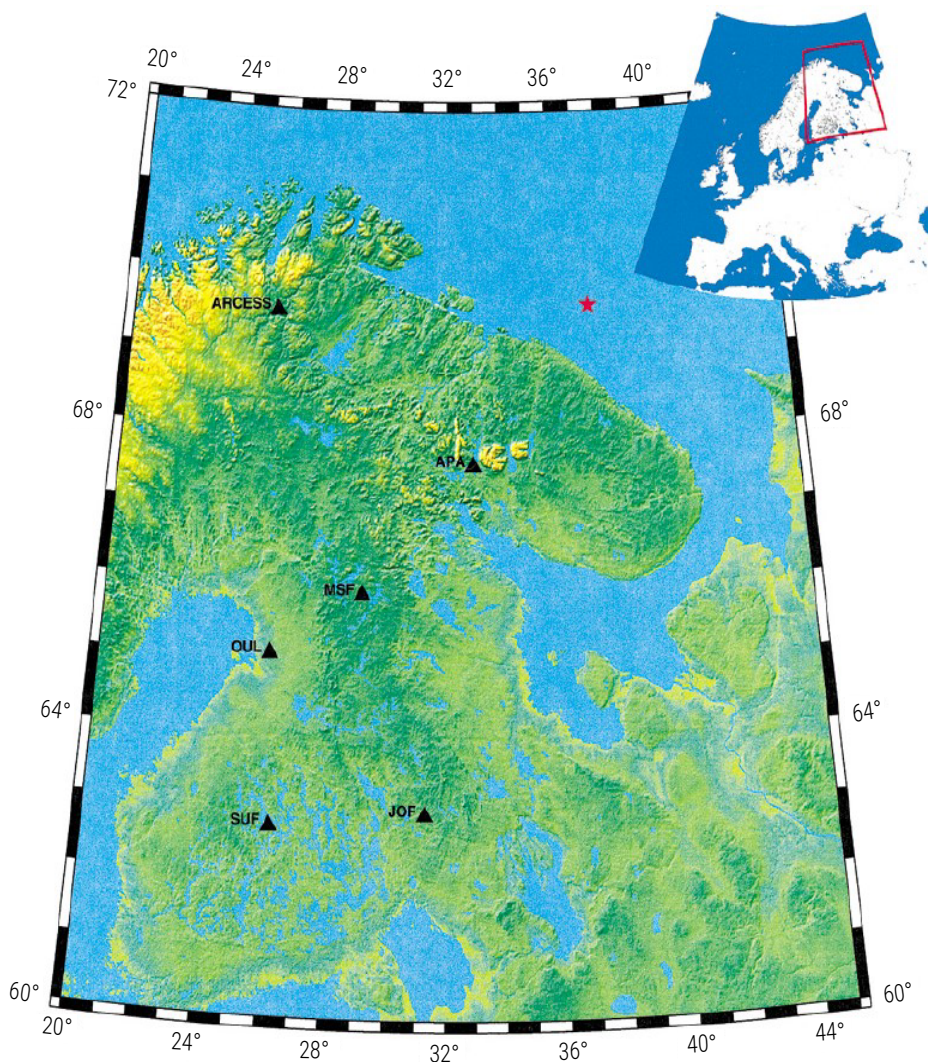
Figure 5: Comparison of the seismograms of an earthquake (top) and two presumed explosions on 26 September by the Nord Stream gas pipeline (middle at 00:03 UTC and bottom at 17:03 UTC) at the seismological station BSD with indicated distance (Heyburn et al., 2024)

Rusije, kaj se je zgodilo 12. avgusta, so bile zelo skope, pozneje pa se je razvedelo, da je prišlo do nesreče na podmornici Kursk, ki je bila v sodelujoči floti najmodernejša. Sledile so poglobljene seizmološke analize razpoložljivih podatkov, da bi osvetlili razsežnost nesreče in njen potek (Savage in Helmberger, 2001; Koper in sod., 2001; Gitterman, 2002).

Prvo eksplozijo z magnitudo 2,2 so zaznale le najbližje potresne opazovalnice v Skandinaviji. Po dveh minutah in 15 sekundah se je zgodila druga, ki je imela magnitudo 4,2, kar je že zelo močan dogodek in so ga zato zaznale potresne opazovalnice v večjem delu Evrope in drugod do 5000 km daleč (Koper in sod., 2001). Valovanja, ki nastanejo pri podvodni eksploziji,

se razlikujejo od tistih, ki nastanejo ob potresu, trku dveh teles ali padcu meteorita. Zato so z analizo seizmogramov (slika 7) nedvoumno potrdili, da gre za eksploziji in ju tudi precej natančno locirali (Savage in Helmberger, 2001). Večji izziv sta bili ocena globine dogodkov in predvsem ocena količine razstreliva pri obeh eksplozijah. Čeprav se za laično ponazoritev velikosti potresov ali jedrskih poskusov uporabljajo približne zveze s količino klasičnega (TNT) eksploziva, je natančnejša ocena zelo zahtevna in mora upoštevati številne dejavnike. Ker se večina zvez nanaša na razstreljevanja v kamnolomih ali pod zemljo (jedrski poskusi), je za podvodne eksplozije zelo malo empiričnih podatkov. Tako lahko razložimo zelo širok razpon ocen količine detoniranega eksploziva za drugo, močnejšo eksplozijo, ki so bile po različnih virih med 1,5 in 7 tonami ekvivalenta TNT. V resnici so količine veliko manjše, saj se je v torpedih in raketah, ki jih je nosil Kursk, uporabljal precej močnejši eksploziv. Najbolj poglobljene raziskave je opravil Gitterman (2002), ki je seizmogram primerjal s tistimi, ki so jih registrirali ob kalibracijskem poskusu za monitoring jedrskih poskusov nekaj let prej, ko so v Mrtvem morju na globini 70 m sprožili tri eksplozije z maso razstreliva 500 kg, 2000 kg in 5000 kg. Zadnja je povzročila potres z magnitudo 4,0 in jo je mogoče primerjati z močnejšo od obeh na Kursku. Gitterman (2002) je ocenil, da se je ob prvi eksploziji detonirala ekvivalentna količina od 16 do 17 kg TNT, ob drugi pa od 1500 do 1650 kg TNT, kar je manj od ocen drugih. Savage in Helmberger (2001) sta za močnejšo eksplozijo ocenila, da je bilo nekaj več kot 4000 kg ekvivalenta TNT, kar potrjuje zahtevnost tovrstnih analiz in njihovo razmeroma veliko nezanesljivost.

Koper in sodelavci (2001) so z uporabo nekaterih znanih podatkov o bojni opremljenosti podmornice Kursk in vojaški vaji ter s seizmološkimi analizami obeh eksplozij predvideli potek dogodkov. Tik pred prvo eksplozijo naj bi podmornica dobila dovoljenje za izstrelitev torpeda, zato domnevajo, da je pri tem prišlo do okvare in takojšnje detonacije, ki je povzročila, da se je podmornica začela nenadzorovano potapljati proti dnu na globini od 80 do 100 m. Udarec podmornice ob dno ali pa požar, ki se je razširil po prvi eksploziji, naj bi po dveh minutah in 15 sekundah sprožil detonacijo protiladijskih raket. Po znanih podatkih imajo take rakete okoli 750 kg težko polnjenje in jih je verjetno eksplodiralo več hkrati. Seizmološke analize nesreče Kurska so pokazale pomen tovrstnih forenzičnih raziskav, saj je tak dogodek ali slabo dokumentiran ali pa ostane skrit zaradi vojaških razlogov.



Slika 6: Karta lokacije podmornice Kursk ob nesreči (rdeča zvezdica) in potresne opazovalnice (črni trikotniki) v Skandinaviji, ki so zaznale eksplozijo (Savage in Helmberger, 2001)

Figure 6: Map showing the location of the Kursk submarine at the moment of the accident (red star) and seismological stations (black triangles) in Scandinavia, which recorded the explosion (Savage and Helmberger, 2001)

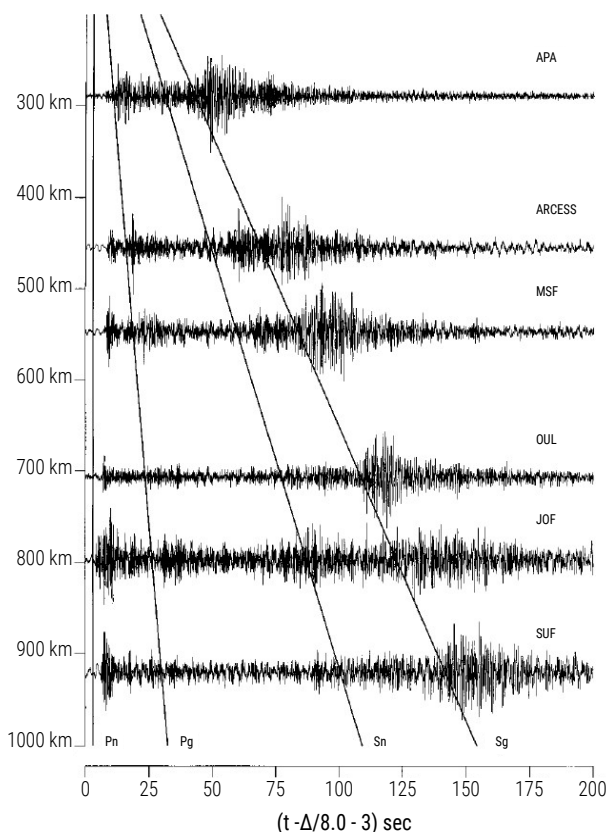
FORENZIČNE ANALIZE EKSPLOZIJ PLINOVODOV

19. avgusta 2000 sta dve mreži potresnih opazovalnic v Novi Mehiki in Teksasu (ZDA) zaznali signale več eksplozij, povezanih s plinovodom (Koper in sod., 2003). Prva je bila eksplozija znotraj zakopane cevi, v kateri je bil plin pod visokim pritiskom, zaradi česar je cev raztrgalo (slika 8). Čez 15 sekund je sledila eksplozija uhajajočega plina. Narava tretje eksplozije, ki se je zgodila 18 sekund za drugo, pa ni jasna, vendar je verjetno prav tako posledica sekundarnega vžiga uhajajočega plina (slika 9). Poleg tega so seizmografi zaznali tudi dva daljša signala, ki sta se začela hkrati s prvima eksplozijama. Prvi je posledica izhajanja plina iz uničene cevi, preden je prišlo do njegovega vžiga, in je trajal okoli 24 sekund. Drugega pa je povzročilo bučanje močnega ognja in je trajal okoli ene ure (Koper in sod., 2003). Ker se je nesreča zgodila na nenaseljenem območju, so bili vsi opisani dogodki zabeleženi le s seizmološkim

opazovanjem, ki je tako pomenilo edino dokumentiranje poteka dogodkov od začetne eksplozije. Zato je to še posebno pomembno za analizo vzrokov nesreče in sprejemanje ukrepov za zmanjševanje tveganja v prihodnje. Pomanjkanje drugih opazovanj nesreče je po drugi strani omejevalo zmožnost seizmoloških analiz za podrobnejšo razjasnitev dogajanja.

Blizu Ghislenghien v Belgiji, 40 km jugozahodno od Bruslja, je 30. julija 2004 eksplodiral plinovod, kar so zabeležili tri bližnje potresne opazovalnice in številni infrazvočni senzorji v zahodni Evropi (Evers in sod., 2007). Ker je bil najbližji ventil na plinovodu oddaljen 15 km, je zgorelo kar 2 milijona m³ plina, preden so se cevi izpraznile, 18 ljudi je pri tem umrlo. S seizmoakustično analizo so določili natančen trenutek eksplozije in jo ocenili na ekvivalent 41 ton TNT. Pri analizi zračnega udara se je pokazal pomen uporabe večjega števila senzorjev (array-processing) in metode sledenja poti valovanja skozi različne modele atmosfere (Evers in sod., 2007).

FORENZIČNE ANALIZE TERORISTIČNIH DEJANJ

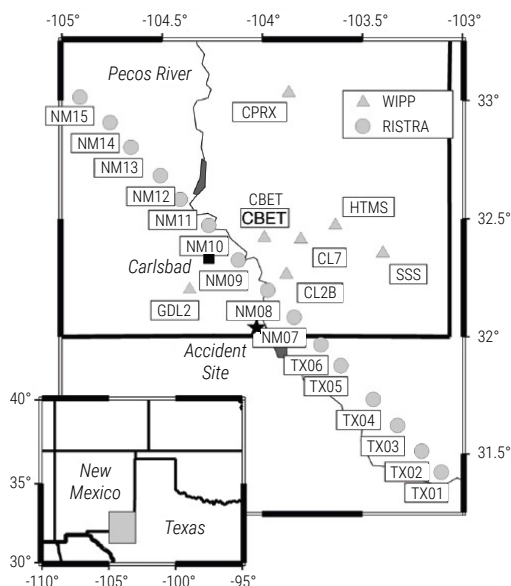


Slika 7: Seizmogrami eksplozije podmornice Kursk, ki so jih zabeležile potresne opazovalnice, prikazane na sliki 6. Ravne črte pomenijo teoretične čase prihodov različnih seizmoloških faz. (Savage in Helmberger, 2001)

Figure 7: Seismograms of the Kursk submarine explosion recorded by seismological stations shown in Fig. 6. The lines show the theoretical arrival times for the different seismological phases. (Savage and Helmberger, 2001)

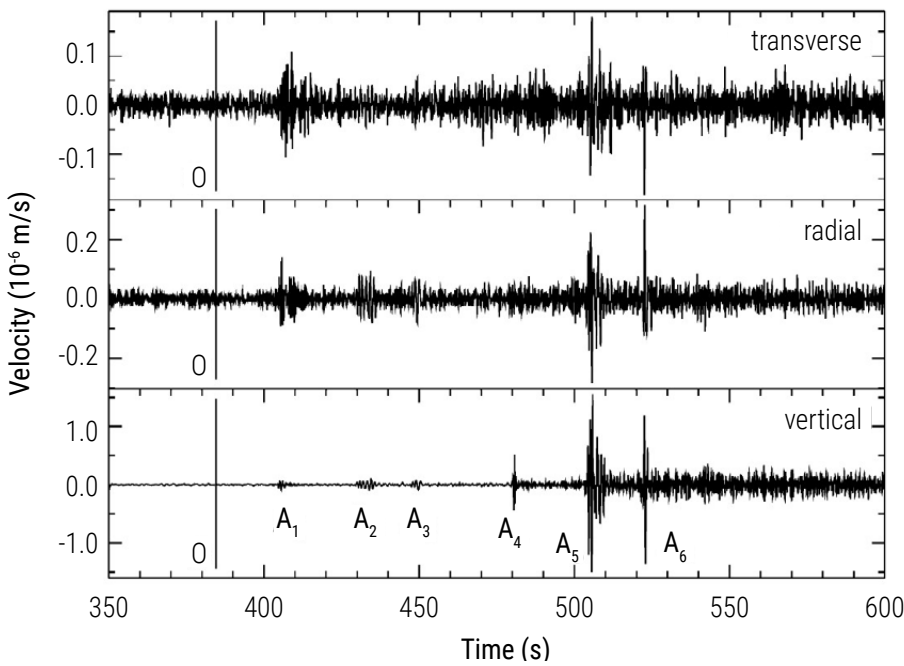
7. avgusta 1998 so teroristi s tovornjakom, polnim eksploziva, napadli ameriško veleposlaništvo v Nairobiju. Pri tem jim sicer ni uspelo prebiti varovalnih barrier in se stavba veleposlaništva ni porušila, je pa eksplozija povsem uničila sosednjo poslovno stavbo. V napadu je umrlo vsaj 220 ljudi, 4000 pa je bilo ranjenih (Koper in sod., 1999). Eksplozijo so registrirali s trikomponentnim širokopasovnim seizmometrom Univerze v Nairobiju, ki je bil 3 km stran. Na seizmogramu (slika 10) se zelo jasno vidijo prihodi prostorskih (P) in površinskih (Rayleighovih) valov ter zračnega udara in njegovih odmevov. Z uporabo podatkov o geološki zgradbi pod Nairobijem, ki vpliva na hitrost potovanja seizmičnih valov in zvočne hitrosti, so lahko zelo natančno določili trenutek in moč eksplozije ter kakšen delež se je pretvoril v potresno nihanje tal (Koper in sod., 1999). Izračunali so, da je eksplozija ustrezala 17 tonam TNT. Večina energije pri taki eksploziji se porabi za rušenje in nastanek kraterja ter zračni udar. Delež, ki se spremeni v seizmično valovanje, imenujemo ga seizmična učinkovitost, pa je pri nadzemni eksploziji razmeroma majhen in je bil v tem primeru ocenjen na 0,6 do 3 odstotke.

Hamas je iz Gaze izvedel napad na ozemlje Izraela 7. oktobra, 2023, kar je vodilo v eskalacijo konflikta med Izraelom in Palestino, ki še vedno traja. Napad so izvedli v soboto zjutraj, ko je v Izraelu dela prost



Slika 8: Lokacije potresnih opazovalnic, ki so zaznale eksplozijo plinovoda pri Carlsbadu (Nova Mehika), in krater, ki ga je povzročila eksplozija. (Koper in sod., 2003)

Figure 8: Positions of the seismic stations which recorded the Carlsbad (New Mexico) gas pipeline explosion and the crater created by the blowout. (Koper et al., 2003)

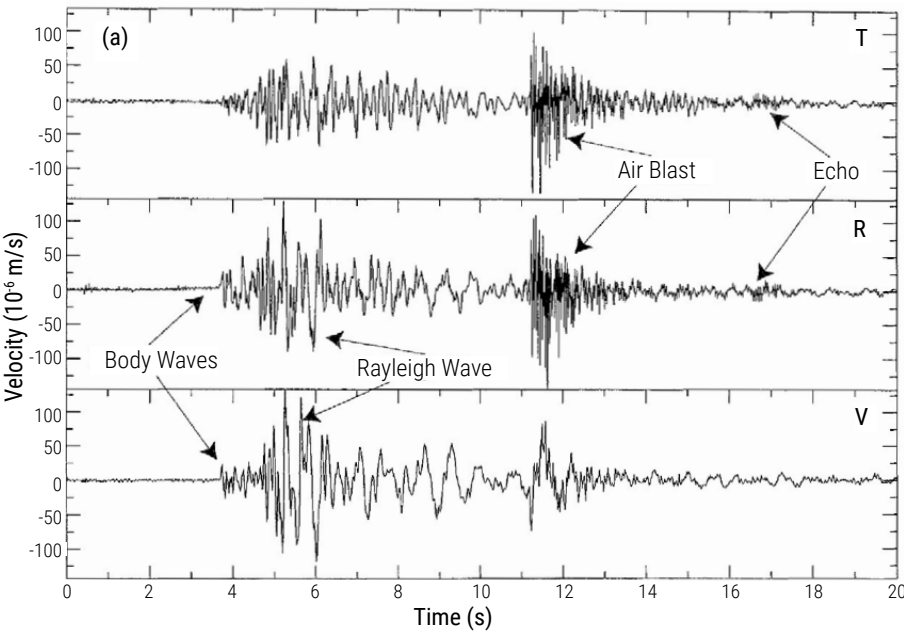


Slika 9: Seizmogrami eksplozije plinovoda pri Carlsbadu, zapisani na potresni opazovalnici NM09, ki je bila 31,4 km stran. Prihodi šestih Rayleighovih valov so označeni z A1–A6, začetni čas prvega od treh glavnih dogodkov pa z O. (Koper in sod., 2003)

Figure 9: Seismograms of the Carlsbad gas pipeline explosion at the NM09 station located 31.4 km away. The six primary Rayleigh-wave arrivals are labelled A1-A6, and the origin time of the first of the three main sources is indicated by O. (Koper et al., 2003)

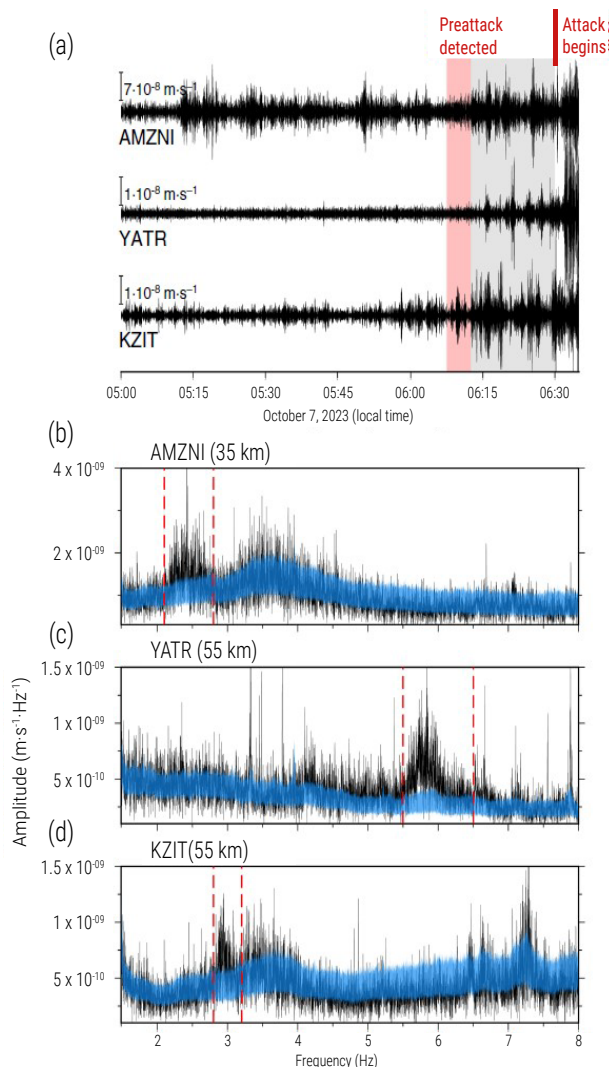
dan, poleg tega mu je sledil še državni židovski praznik. Raven antropogenega seizmičnega šuma (industrijska dejavnost, promet) je bila zato zelo nizka, prav tako tudi naravnega, saj ni bilo dežja, veter pa je bil običajen. Tri potresne opazovalnice izraelske državne seizmološke mreže so zabeležile mobilizacijske aktivnosti že pred napadom, čeprav so bile razmeroma daleč od Gaze (35–55 km). Poznejša analiza seizmogramov (slika 11) je pokazala nenađen dvig seizmičnega nemira nad predhodno nočno raven pol ure pred začetkom napada (Inbal, 2024). V napadu so bili uporabljeni številni poltovornjaki in motorji ter buldožerji, s katerimi so prebili ograjo na nekaterih lokacijah za vstop na ozemlje Izraela.

Predvsem slednji so zaradi svoje velike mase predvidoma povzročili največji dvig seizmičnega šuma, med napadom pa rušenje ograj. Analiza seizmogramov treh opazovalnic, predvsem površinskih seizmičnih valov, je omogočila približno določitev izvorov seizmičnega šuma in njihovega gibanja, ko so se vozila premikala iz osrednjega dela Gaze proti meji. Avtor raziskave (Inbal, 2024) v sklepnem delu sicer navaja možnosti sprotne analize seizmičnega nemira na mreži potresnih opazovalnic za prepoznavanje morebitnih bodočih mobilizacij voznega parka napadalcev, kar samo po sebi seveda ne bi zadoščalo, lahko pa koristno dopolnjuje druge opazovalne sisteme.



Slika 10: Seizmogrami eksplozije tovornjaka bombe, s katerim so napadli veleposlaništvo ZDA v Nairobiju, na 3 km oddaljeni potresni opazovalnici. (Koper in sod., 1999)

Figure 10: Seismograms of the truck bomb blast at the USA embassy in Nairobi recorded at a seismological station located 3 km away. (Koper et al., 1999)



Slika 11: Seizmogrami (a) in spektri (b–d) treh potresnih opazovalnic izraelske seizmološke mreže, ki so zaznale neobičajno dejavnost na območju Gaze v jutru Hamasovega napada 7. oktobra, 2023. Rdeč pravokotnik označuje čas, ko so amplitude začele presegati nočno raven seizmičnega nemira. Spektri (b–d) so izračunani za čas, ki ga označuje siv pravokotnik na seizmogramih (a). Moder trak označuje mediano šuma ozadja, rdeče črčkane linije pa omejujejo območje z največjim razmerjem signal – šum. (Inbal, 2024)

Figure 11: The seismograms (a) and spectra (b–d) of the three Israeli seismic network stations which recorded the unusual activity in Gaza on the morning of 7 October 2023 Hamas attack. The red rectangle indicates the timeframe when seismic amplitudes began rising above the night-time level of seismic noise. The blue strip shows the median background noise level, and the red-dashed lines bracket the frequency band showing the maximal signal-to-noise ratio. (Inbal, 2024)

LETALSKE IN LADIJSKE NESREČE

Uporaba seizmoloških podatkov pri forenzični analizi letalskih in ladijskih nesreč se zdi manj pomembno področje, saj so navadno dobro dokumentirane z drugimi viri. Kljub temu so za razumevanje vseh okoliščin tudi lahko uporabne.

Du in sodelavci (2024) so analizirali strmoglavljenje letala Boeing 737-800 družbe China Eastern Airlines 21. marca 2022 v okrožju Tengxian v južni Kitajski. Čeprav je udarec letala ob tla povzročil le šibek potres z magnitudo 0,6 in ga je zaznala le ena potresna opazovalnica, oddaljena 21 km, je bila mogoča analiza, ki je osvetlila to nesrečo. Z inverzijo trikomponentnega seizmograma so lahko izračunali smer udarca letala ob tla in iz poznavanja mase letala ocenili njegovo hitrost ob udarcu na 200–264 m/s. To se ujema z zadnjimi radarskimi podatki in izmerjenim kotom spuščanja. Du in sodelavci (2024) še navedajo, da bi ob strmoglavljenju letala na odmaknjenih nenaseljenih območjih, če so tam potresne opazovalnice, lahko seizmološke analize pomagale pri hitri oceni točne lokacije strmoglavljenja, kar bi lahko bilo ob slabi vidljivosti zaradi vremena pomembno za usmerjanje reševalcev.

Ena najbolj znanih ladijskih nesreč se je zgodila 12. januarja 2012, ko je potniška ladja za križarjenje Costa Concordija zaplula preblizu italijanskega otoka Giglio in zadela ob njegov rt. V uri in pol se je ladja močno nagnila in deloma potopila, umrlo je 32 ljudi. Udarec ladje ob obalo je zaznala tudi 18 km oddaljena potresna opazovalnica MAON na polotoku Argentario v Toskani. Seizmogram je zanimiv in se razlikuje od drugih nesreč, ki so posledica udarca, saj je trajanje signala razmeroma dolgo, po sedmih sekundah pa mu sledi še en, krajši udarec. Mucciarelli (2012) je opravil poglobljeno analizo seizmograma in dogajanje razložil z naslednjo hipotezo. Zaradi ogromne mase ladje (114.200 ton) in hitrosti v trenutku trka (15 vozlov ali 27,9 km/h) je imela zelo veliko vztrajnost. Po začetnem trku so skale razparale ladijski trup v dolžini 50 m (ladja je dolga 290 m), kar se ujema s sedem sekund dolgim signalom pri zaradi trka zmanjšani hitrosti ladje na 14 vozlov. Ker se frekvenca drugega pulza na seizmogramu precej razlikuje od predhodnega, je sklepal, da se je v parajoči se trup najprej zagostila večja skala, ki pa je nato izpadla. To se ujema s posnetki nagnjene ladje, saj se v razparanem delu trupa vidi večja rana.

SKLEPNE MISLI

Zelo občutljivi širokopasovni seizmometri danes omogočajo, da seizmologi poleg potresov zaznajo tudi številne druge dogodke, ki zaradi udarne narave povzročijo širjenje seizmičnega valovanja na vse strani ali pa le dvignejo raven seizmičnega šuma. Visokofrekvenčno digitalno vzorčenje signalov omogoča

napredne postopke obdelave in analize podatkov, da iz njih izluščijo različne zanimive informacije, ne le čas, lokacijo in moč dogodka, kar je bilo zaradi manj zmogljivih naprav še pred desetletjem skoraj nemoogoče. V posebnih pogojih so celo na analognih zapisih seizmogramov na papirju vidni kakšni zanimivi zgodovinski dogodki, Leon-Rios in sodelavci (2025) so pred kratkim analizirali arhivirane analogne seizmogramne iz septembra 1973, posnete v Santiagu (Čile), ko se je tam zgodil državni udar. Seizmograf Teledyne Geotech je bil namreč nameščen samo 2 km od predsedniške palače La Mondea. Tudi na

teh preprostih seizmogramih, zapisanih na papir, se glede seizmičnega šuma lahko na primer ločita mirnejši nočni čas in jutranja prometna konica. Tako so v seizmogramih prepoznali tudi vojaško intervencijo (premike vojaških vozil), bombardiranje predsedniške palače in po končanem prevratu tudi uvedbo policijske ure. V času njenega trajanja se je antropogeni šum bistveno zmanjšal, kar je povečalo občutljivost naprav za zaznavanje potresov, ki so v Čilu razmeroma pogosti. Zmanjšanje antropogenega šuma so po vsem svetu opazovali tudi med pandemijo covid-19, v obdobjih ustavitve javnega življenja.

Viri in literatura

- Ding, S., Wang, H., Zhu, H., Xu, H., Xu, X., 2024. Discrimination of seismic events in the North Korean test site and surrounding area using MDAC spectral ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 114/2, 1140–1150.
- Du, H., Zhang, Y., Zhang, X., Fang, L., 2024. Investigation of the crash process of China Eastern Airlines flight MU5735 based on seismic data. *Seismological Research Letters*, 96/3, 1747–1757.
- Edwards, W. N., De Groot-Hedlin, C. D., Hedlin, M. A. H., 2014. Forensic investigation of a probable meteor sighting using USArray acoustic data. *Seismological Research Letters*, 85/5, 1012–1018.
- Ekström, G., Lopez Luna, J., Richards, P. G., 2024. On magnitudes and inferred yields of the 39 underground nuclear test explosions at the Novaya Zemlya test site. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 114/2, 1167–1177.
- Evers, L. G., Ceranna, L., Haak, H. W., Le Pichon, A., Whitaker, R. W., 2007. A seismoacoustic analysis of the gas-pipeline explosion near Ghislenghien in Belgium. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97/2, 417–425.
- Ghalib, H. A. A., Kraft, G., Alchalbi, A., Wagner, R., 2021. Seismic location of the 4 August 2020 Beirut port chemical explosion. *Seismological Research Letters*, 93/1, 33–44.
- Gitterman, Y., 2002. Implications of the Dead Sea experiment results for analysis of seismic recordings of the submarine Kursk Explosions. *Seismological Research Letters*, 73/1, 14–24.
- Gosar, A., 2005. Možnost zmanjšanja učinka tople grede z geološkim skladiščenjem CO₂ globoko pod Zemljinim površjem. *Ujma*, 19, 201–205.
- Gosar, A., 2014. Podzemni jedrski poskus Severne Koreje 12. februarja 2013 in seizmološko nadzorovanje sporazuma o prepovedi poskusov. *Ujma*, 28, 170–176.
- Gosar, A., 2018. Inducirana seizmičnost. *Ujma*, 32, 229–238.
- Heyburn, R., Green, D. N., Nippress, A., Selby, N. D., 2024. The 26 September 2022 Nord Stream events: Insights from nearby seismic events. *Seismic Record*, 4/1, 1–10.
- Hinzen, K. G., 2014. Seismic analysis of the accidental WWII bomb explosion in Euskirchen, Germany, on 3 January 2014. *Seismological Research Letters*, 85/4, 825–835.
- Inbal, A., 2024. Forensic seismic evidence for precursory mobilization in Gaza leading to the October 7 Hamas attack. *The Seismic Record*, 4/4, 288–298.
- Koper, K. D., Wallace, T. C., Hollnack, D., 1999. Seismic analysis of the 7 August 1998 truck bomb at the American embassy in Nairobi, Kenya. *Seismological Research Letters*, 70/5, 512–521.
- Koper, K. D., Wallace, T. C., Taylor, S. R., Hartse, H. E., 2001. Forensic seismology and the sinking of the Kursk, *Eos Trans. AGU*, 82, 37–46.
- Koper, K. D., Wallace, T. C., Aster, R. C., 2003. Seismic Recordings of the Carlsbad, New Mexico, Pipeline Explosion of 19 August 2000. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93/4, 1427–1432.
- Leon-Rios, S., Gutierrez Crocco, I., Riffó Valdebenito, S., Perez, M., Madariaga, R., Comte, D., Ruiz, S., 2025. Decoding the narrative of the Chilean coup d'état through the seismograms of September 1973. *Seismological Research Letters*, 96/2, 1181–1193.
- Mucciarelli, M., 2012. The seismic wake of Costa Concordia, *Seismological Research Letters*, 83, 636–638.
- Pasyanos, M. E., Myers, S. C., 2018. The coupled location/depth/yield problem for North Korea's declared nuclear tests. *Seismological Research Letters*, 89/6, 2059–2067.
- Pyle, M. L., Walter, W. R., 2019. Investigating the effectiveness of P/S amplitude ratios for local distance event discrimination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109/3, 1071–1081.
- Savage, B., Helmberger, D. V., 2001. Kursk Explosion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91/4, 753–759.
- Spurný, 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, 1392–1407.
- Stump, B., Hayward, C., Golden, P., Park, J., Kubacki, R., Cain, C., Arrowsmith, S., McKenna Taylor, M. H., Jeong, S. J., Ivey, T., MacPhail, M., Pace, C. C., Jeon, J. S., Che, I. Y., Kim, K., Kim, B. il, Kim, T. S., Shin, I. C., Jun, M. S., 2022. Seismic and infrasound data Recorded at regional seismoacoustic research arrays in South Korea from the six DPRK underground nuclear explosions. *Seismological Research Letters*, 93/4, 2389–2400.