

ZGODNJE OPOZARJANJE OB POTRESU

EARTHQUAKE EARLY WARNING

Andrej Gosar

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

Povzetek

Sistemi zgodnjega opozarjanja ob potresu delujejo tako, da informacijo o nastanku močnega potresa, ki smo ga zaznali s potresnimi opazovalnicami blizu žarišča, uporabimo za opozarjanje prebivalstva na prihod rušilnih potresnih valovanj dlje od nadžarišča potresa. Zato potrebujemo dovolj gosto mrežo potresnih opazovalnic, hiter prenos podatkov, hitro samodejno opredelitev potresnih parametrov, modele pojemanja intenzitete tresenja tal z razdaljo in učinkovit način obveščanja, saj je časa za ukrepanje le od nekaj sekund do nekaj deset sekund. Zaradi hitrega razvoja komunikacij za prenos podatkov in obveščanje se sistemi zgodnjega opozarjanja vzpostavljajo v večini potresno bolj ogroženih držav. V sodelovanju s sosednjimi državami smo sistem zgodnjega opozarjanja PRESTo testirali tudi na širšem območju Slovenije. Opozorilni sistemi pred cunamijem delujejo podobno, le da lahko med nastankom potresa in prihodom uničujočih oceanskih valov preteče tudi več ur, zato je časa za ukrepanje več.

Abstract

Earthquake early warning systems are based on information on the occurrence of a strong earthquake, detected by seismic stations close to the epicentre, being used to alert citizens further away from the epicentre before damaging seismic waves reach their location. Each system is composed of a dense network of seismic stations, fast data transmission, fast automatic determination of the earthquake's parameters, attenuation models of the decrease of shaking intensity with distance, and the effective distribution of alerts, since only a few seconds to a few tens of seconds are available for action. Due to the rapid development of communication channels for data transmission and alerts, earthquake early warning systems have been in development in most countries at high risk of earthquakes. We tested the PRESTo early warning system in the wider Slovenia region, in cooperation with neighbouring countries. Tsunami warning systems are based on similar principles, but the time available for the action is longer, since several hours may pass between the occurrence of the earthquake and the strike of damaging ocean waves.

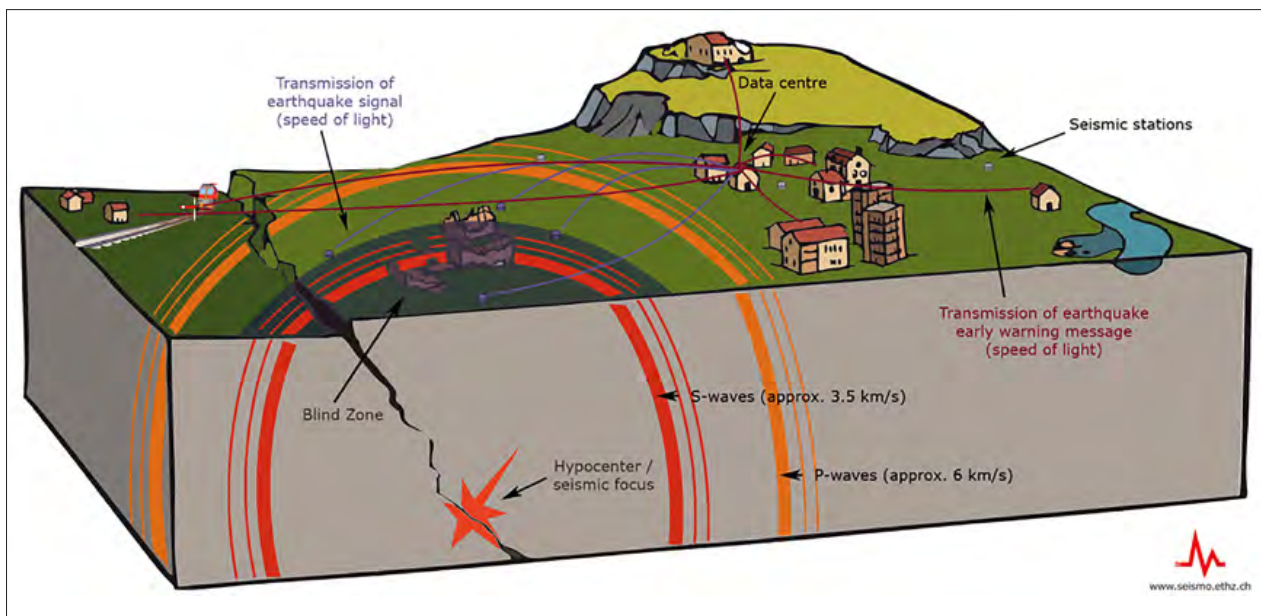
Uvod

Kot je splošno znano, kratkoročno napovedovanje potresov s ciljem evakuacije prebivalstva na varno žal ni mogoče (Gosar, 2013) kljub intenzivnim raziskavam različnih pojavov, ki spremljajo potresno dejavnost in jih imenujemo predhodniki ali znanilci potresov (Gosar, 2011). Poznamo pa sisteme zgodnjega opozarjanja ob potresu, ki temeljijo na tem, da lahko informacija o nastanku močnega potresa sporočimo na ciljno območje hitreje, kot potujejo rušilna potresna valovanja (slika 1). Tako pridobimo nekaj časa (od nekaj sekund do nekaj deset sekund), da ljudje, predvsem pa samodejni elektronski sistemi, izvedejo različne ukrepe, s katerimi se zaščitijo prebivalci in premoženje (Allen, 2013). Sistemi zgodnjega opozarjanja, ki so znani pod angleškim imenom *earthquake early warning* (EEW), uporabljajo gosto mrežo seizmoloških senzorjev, zelo hitro samodejno obdelavo podatkov ter hiter prenos podatkov in opozoril, zato se intenzivneje uvajajo predvsem v zadnjem desetletju (Burkett in sod., 2017). Pred tem so se predvsem na območju Tihega oceana že dlje časa uporabljali sistemi za opozarjanje pred cunamiji, kjer pa je čas med nastankom potresa pod morskim dnem in

trenutkom, ko uničujoči oceanski valovi dosežejo obale, praviloma mnogo daljši (več ur). Pri cunamiji so tudi razdalje, na katerih so ti še vedno uničujoči, mnogo večje (več tisoč kilometrov), poleg tega pa oceanski valovi potujejo bistveno počasneje od seizmičnih valov skozi kamnine, zato je časa za prepoznavanje nevarnosti in alarmiranje prebivalstva veliko več (Gosar, 2012).

Seizmološko ozadje delovanja sistemov zgodnjega opozarjanja ob potresu

Pojem **potres** ima dvojni pomen: a) vzrok širjenja potresnih valov iz žarišča kot posledica nenadnega premika kamnin ob prelomu, ker je nakopičena napetost preseгла njihovo trdnost, in b) vsa tresenja tal na Zemljinem površju, ki so posledica prehoda različnih potresnih valov, nastalih ob prelomnem premiku. Pri zgodnjem opozarjanju ob potresu zaznamo nastanek močnega potresa (*potresni pomen a*) s seizmološkimi opazovanji v ožjem nadžariščnem območju in na podlagi te informacije



Slika 1: Shematski prikaz delovanja sistema zgodnjega opozarjanja ob potresu (vir: ETH Zürich)
 Figure 1: Principle of earthquake early warning system operation (Source: ETH Zürich)

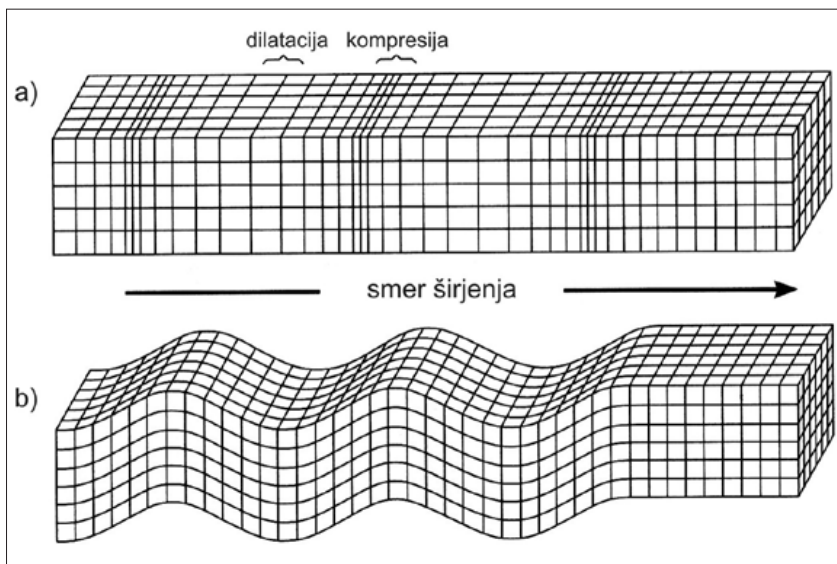
opozorimo prebivalstvo, ki se nahaja dlje od nadžarišča, kamor bodo rušilna potresna valovanja (*potresni pomen b*) prišla šele čez nekaj časa. Osnovna ideja zgodnjega opozarjanja ob potresu je torej v tem, da lahko informacijo o nastanku močnega potresa sporočimo s hitrostjo, ki je blizu svetlobni hitrosti (300.000 km/s), potresna valovanja, ki so najbolj rušilna (S-valovanje in površinska valovanja), pa potujejo s hitrostjo okoli 3,5 km/s ali manjšo, torej reda velikosti stotisočkrat počasneje (Allen, 2013).

Kljub izrednemu razmahu sistemov opazovanja Zemlje na njenem površju, iz satelitov in ponekod tudi v vrtinah pod površjem ali na morskem dnu, nastanka samega potresa z nenadnim zmikom ob prelomu ne moremo neposredno opazovati oziroma le izjemoma, ko pride do površinskega pretrga tudi na površju. Praktično vse, kar seizmologi lahko ugotovimo o dogajanju v žarišču

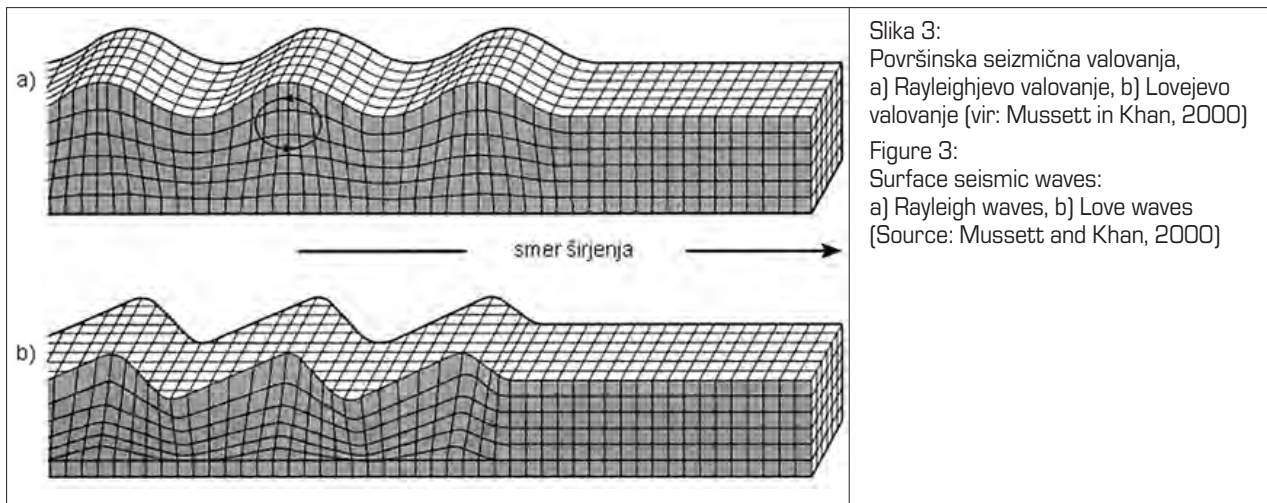
potresa, izvira iz študija različnih vrst potresnih valovanj, ki se iz žarišča radialno širijo na vse strani. Poznamo prostorska in površinska potresna valovanja.

Prostorska valovanja (slika 2) se širijo skozi notranjost snovi (Musset in Khan, 2000):

- P-valovanje ali vzdolžno valovanje, pri katerem delci kamnine nihajo kot zgoščeni ali razredčeni deli (kompresija in dilatacija) v smeri širjenja valovanja. To potresno valovanje je najhitrejše in se v zemeljski skorji širi s povprečno hitrostjo okoli 6 km/s. Amplituda P-valovanja je navadno manjša, zato je to valovanje navadno manj rušilno od drugih vrst valovanj, ki temu sledijo.
- S-valovanje ali prečno valovanje, pri katerem delci kamnine nihajo v prečni (strižni) smeri glede na smer širjenja valovanja. To potresno valovanje je počasnejše (doseže do 60 % hitrosti P-valovanja) in



Slika 2:
 Prostorska seizmična valovanja,
 a) P-valovanje, b) S-valovanje
 (vir: Mussett in Khan, 2000)
 Figure 2:
 Body seismic waves:
 a) P-waves, b) S-waves
 (Source: Mussett and Khan, 2000)



Slika 3:
Površinska seizmična valovanja,
a) Rayleighjevo valovanje, b) Lovejevo
valovanje (vir: Mussett in Khan, 2000)
Figure 3:
Surface seismic waves:
a) Rayleigh waves, b) Love waves
(Source: Mussett and Khan, 2000)

se v zemeljski skorji širi s povprečno hitrostjo okoli 3,5 km/s. Amplituda S-valovanja je večja in zato je bolj rušilno.

Površinska valovanja (slika 3) se širijo vzdolž površja Zemlje (Mussett in Khan, 2000):

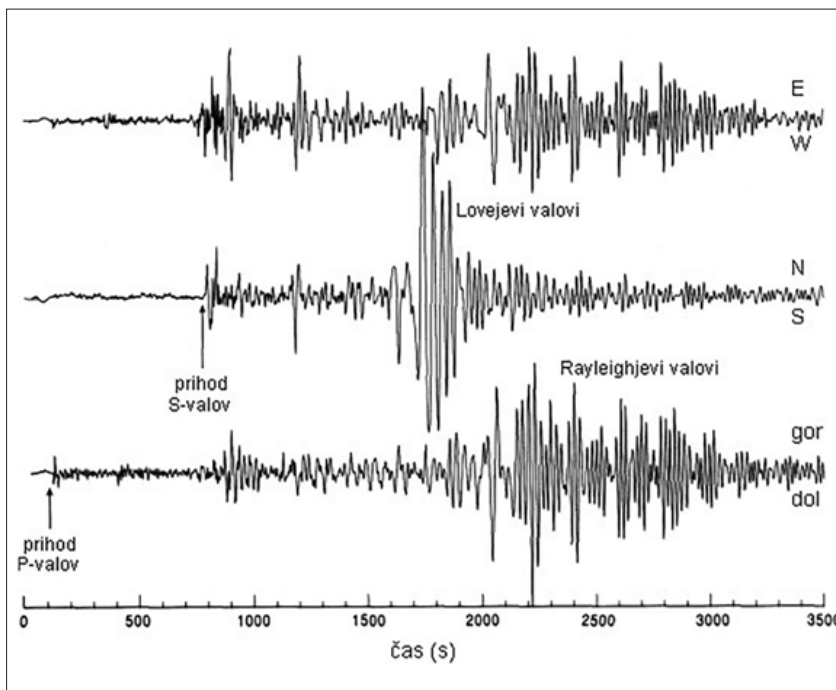
- Rayleighjevo valovanje ima zapleteno nihanje delcev v eliptični smeri, retrogradno na smer njegovega širjenja. Pri velikih potresih je amplituda površinskih valov največja, zato je lahko to najbolj rušilno valovanje.
- Lovejevo valovanje je posebna oblika vodoravno polariziranega S-valovanja na prostem površju, ki nastane, če hitrost z globino zvezno narašča ali če je na površju nizkohitrostna plast.

Hitrost potovanja površinskih valovanj je okoli 90 % hitrosti S-valovanja in je odvisna tudi od valovne dolžine (valovanje je disperzno). Na trikomponentnem seizmogramu (zapis potresa na potresni opazovalnici v treh med

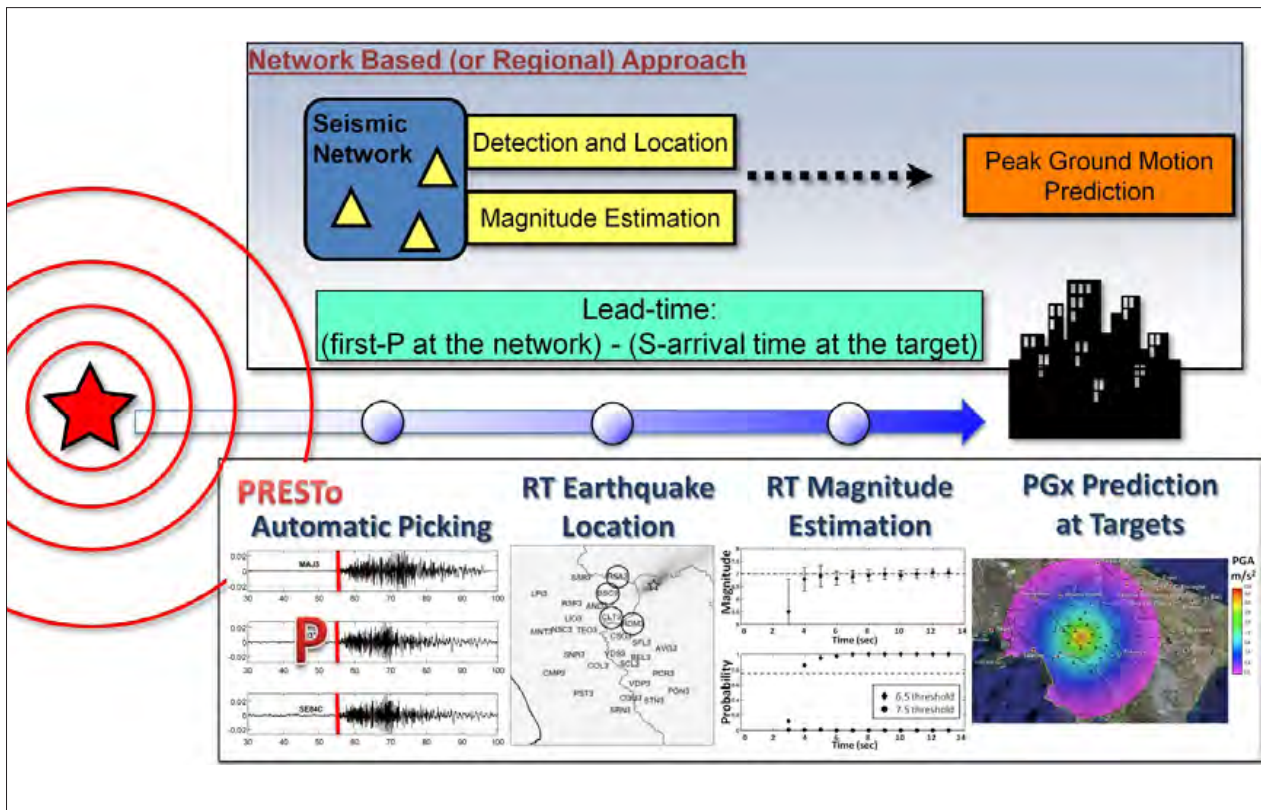
seboj pravokotnih smereh) zaznamo prihode različnih vrst potresnih valovanj ob različnem času (slika 4), izrazito pa se razlikujejo tudi po amplitudi in periodi. Praviloma imajo površinska valovanja največje amplitude in so zato tudi najbolj rušilna. V sedimentacijskih bazenih prihaja dodatno do pretvorbe prostorskih valovanj v površinska, ki imajo zaradi lokalnega ojačenja še višje amplitude, kar poznamo kot vpliv mehkih sedimentov na potresno nihanje tal.

Kako deluje sistem zgodnjega opozarjanja ob potresu

Sistem zgodnjega opozarjanja ob potresu sestavlja mreža seizmoloških senzorjev, ki zazna potres, hiter in zanesljiv prenos signalov v središče za njihovo obdelavo, hitri algoritmi za izračun vseh parametrov ter hitro posredovanje opozorila končnim uporabnikom (sliki 1 in 5) (Allen, 2013).

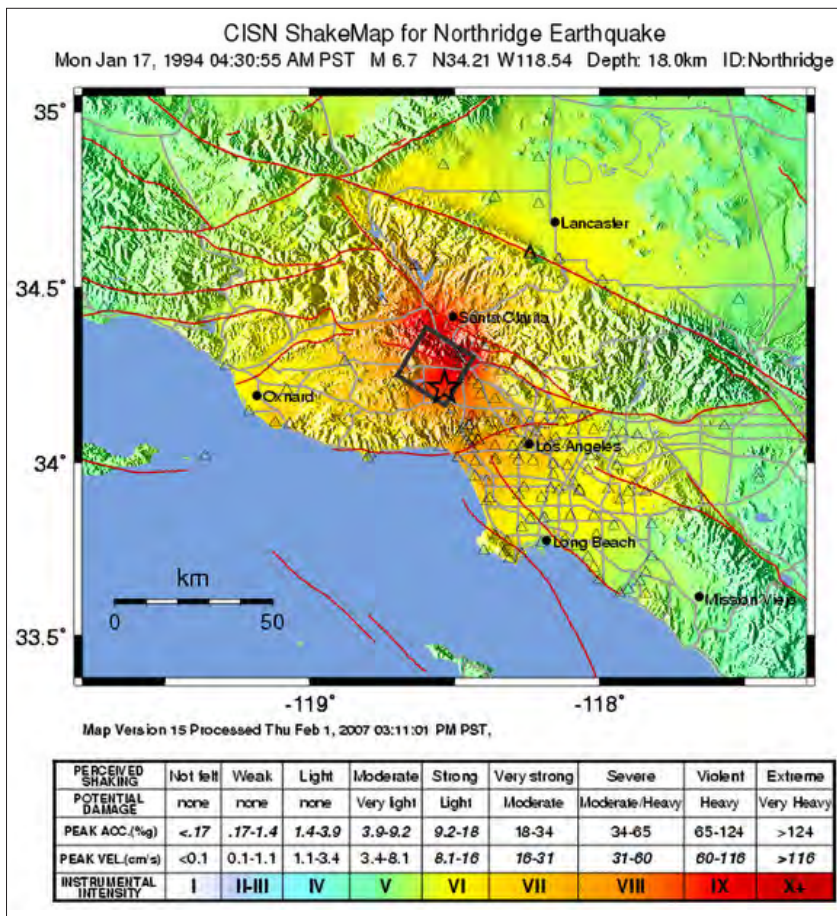


Slika 4:
Seizmogram – zapis potresa na
trikomponentnem seizmografu z
označenimi različnimi potresnimi
valovanji (vir: Doyle, 1995)
Figure 4: Seismogram – three-
component seismograph record with
indication of different seismic waves
(Source: Doyle, 1995)



Slika 5: Princip delovanja sistema zgodnjega opozarjanja ob potresu PRESTo, ki smo ga testirali tudi v Sloveniji. (vir: Satriano in sod., 2011)

Figure 5: Principle of the operation of the PRESTo earthquake early warning system which was tested also in Slovenia (Source: Satriano et al., 2011)



Slika 6: Primer izračunane predvidene intenzitete nihanja tal (ShakeMap) za potres magnitude 6,7 pri Northridgeu leta 1994 v Kaliforniji (vir: Wikipedia)

Figure 6: Example of estimated ground motion intensity (ShakeMap) for the magnitude 6.7 Northridge earthquake in 1994 in California (Source: Wikipedia)



Slika 7: Testni primer izdanega alarma ShakeAlert na zaslonu prenosnega telefona za sistem zgodnjega opozarjanja ob potresu v Kaliforniji. 1 – trenutno čelo P- in S-valov, ki se premika v stvarnem času, 2 – nadžarišče potresa in razvoj prelomnega pretrga, 3 – tvoja lokacija, 4 – sekunde do prihoda potresnega valovanja, 5 – pričakovana intenziteta na tvoji lokaciji, 6 – ocenjena magnituda potresa, 7 – intenziteta lestvica (vir: Burkett in sod., 2014)

Figure 7: Test example of ShakeAlert on a mobile phone screen for an earthquake early warning system in California. 1 – current head of P and S-waves, moving in real-time; 2 – earthquake epicentre and development of fault rupture; 3 – your location; 4 – seconds to the arrival of seismic waves at your location; 5 – expected intensity at your location; 6 – estimated magnitude of earthquake; 7 – intensity scale (Source: Burkett et al., 2014)

Osnova sistema je gosta mreža seizmoloških senzorjev (seizmometrov in akcelerometrov), ki so predvsem v bližini vseh prelomov, ki predstavljajo možen vir potresa. Signal tresenja tal v nadžariščnem območju se po hitrih in robustnih telekomunikacijskih kanalih prenese v seizmološko središče za obdelavo podatkov. Z zmogljivimi računalniki se s hitrimi algoritmi določi magnituda potresa in lokacija njegovega žarišča. Na podlagi tega se izračuna polje predvidene jakosti tresenja tal ob prihodu potresnih valovanj do od žarišča potresa nekoliko bolj oddaljenih krajev. Predvidena jakost tresenja tal se izraža z vršnim (največjim) pospeškom in predvsem intenziteto (učinkih) po intenzitetni lestvici, kar je v svetu znano kot *ShakeMap* (slika 6). *ShakeMap* se uporablja tudi neodvisno od sistemov zgodnjega opozarjanja za hitro oceno učinkov potresa z namenom učinkovitejšega organiziranja reševanja. Na podlagi ocenjene intenzitete se pri zgodnjem opozarjanju izda opozorilo (angl. *ShakeAlert*), ki se posreduje upravljavcem kritične infrastrukture in prebivalcem po vseh razpoložljivih komunikacijskih kanalih. Danes se kot medij z največjim dosegom uporabljajo opozorila na prenosnih telefonih in drugih računalniških zaslonih (slika 7). V primeru izdanega opozorila se na zaslonih vseh naprav v ogroženem območju pokaže karta z lokacijo nadžarišča potresa in potresnimi valovanji, ki potujejo proti uporabniku. Zraven je prikazan čas, v

katerem bodo močnejši potresni valovi dosegli uporabnika, in ocenjena intenziteta nihanja. Dodatno se uporablja še zvočno opozorilo, ki odšteva čas do prihoda potresnih valovanj in sporoča pričakovano intenziteto. Podatki o položaju uporabnika se pridobijo večinoma iz GPS sprejemnikov, vgrajenih v prenosne telefone, lahko pa tudi iz baznih postaj (Burkett in sod., 2017).

Okoli nadžarišča vsakega potresa je vedno slepa cona, znotraj katere opozarjanje ni mogoče, saj potresni valovi zaradi bližine učinkujejo, še preden je opozorilo sploh izdano (slika 1). Vsi sistemi zgodnjega opozarjanja torej delujejo z nekajsekundno zakasnitvijo, ki pomeni slepo cono s polmerom do nekaj deset kilometrov. V Kaliforniji, kjer je sistem zgodnjega opozarjanja (*ShakeAlert*) še v fazi testiranja, so od leta 2012 zaznali več tisoč potresov, od katerih sta dva povzročila znatnejšo škodo. Pri potresu 28. marca 2014 (M = 5,1) v La Habri je sistem izdal opozorilo v 4 sekundah, pri potresu 24. avgusta 2014 v južni Napi pa so testni uporabniki v Berkeleyju dobili opozorilo 5 sekund pred prihodom potresnih valov (Burkett in sod., 2017).

Razvoj sistemov zgodnjega opozarjanja ob potresu so omogočile predvsem moderne računalniške in telekomunikacijske tehnologije, ki so doživele nesluhen razmah v zadnjih dvajsetih letih. Tudi gostota seizmo-

loških senzorjev je bila pred dvema desetletjema praviloma mnogo preredka za hitro in avtomatizirano opredeljevanje potresnih parametrov. Razvoj na področju senzorjev (predvsem pospeškometrov ali akcelero metrov) je omogočil njihovo pocenitev in posledično skokovito naraščanje števila potresnih opazovalnic na potresno ogroženih območjih. Poleg nujne tehnologije pa je zelo pomemben element zgodnjega opozarjanja tudi izobraževanje prebivalstva. Ker je časa med izdanim opozorilom in prihodom potencialno rušilnega potresnega valovanja zelo malo, takrat ni časa za daljše razmišljanje in morajo biti vse reakcije avtomatske, kar se doseže le s stalnimi vajami in izobraževanjem.

Uvajanje sistema zgodnjega opozarjanja ob potresu, ki je namenjeno prebivalstvu, je dolgotrajen proces, saj gre za družbeno zelo kompleksen sistem, katerega učinkovitost ne temelji le na ustreznih tehničnih rešitvah. Nujno je daljše testno obdobje, ki dokaže zanesljivost in robustnost sistema. Morebitna lažna ali napačna opozorila morajo biti praktično izključena, saj sicer zelo zmanjšajo zaupanje ljudi v sistem. Omejitve sistemov zgodnjega opozarjanja je podrobno analiziral Minson s sodelavci (2018).

Kaj omogočajo sistemi zgodnjega opozarjanja ob potresu

Sistem zgodnjega opozarjanja ob potresu omogoča v času, ki preteče med prejetim opozorilom in prihodom rušilnih potresnih valovanj, številne ukrepe, ki lahko zaščitijo ljudi in premoženje. Ti ukrepi so lahko avtomatizirani ali pa jih izvedejo ljudje (Burkett in sod., 2017).

Avtomatizirani ukrepi obsegajo:

- Na področju prometa se vlaki ustavijo ali upočasnijo, s čimer se prepreči njihovo iztirjenje.
- Na področju energetskih sistemov se elektrarne in prenosni sistemi (plinovodi, toplovodi, daljnovodi) zaščitijo pred močnimi tresljaji (zaprejo ventili, izklopijo daljnovodi itd.).
- Na področju industrije se ustavijo proizvodne linije, zaščitijo nevarne kemikalije in občutljive naprave preklopijo v varen način delovanja.

- Na področju bivanja se ustavijo dvigala in odprejo njihova vrata.

Človeški ukrepi obsegajo:

- Ljudje v stavbah izvedejo priporočene ukrepe: oddaljijo se od oken, ležejo na tla, poiščejo zaklon pod mizami ali med podboji, pokrijejo glavo in ostanejo v prostoru. Ugasnejo tudi delujoče štedilnike, da preprečijo požar. V angleščini so ti ukrepi znani kot *drop, cover and hold on* kar pomeni *na tla, pokrij in počakaj* (slika 8).
- Ljudje na prostem ustavijo vozila, pešci pa se oddaljijo od stavb, infrastrukturnih objektov in napeljav.
- Na področju zdravstva kirurgi in zobozdravniki prenehajo z operacijami ali vrtanjem zob ter drugimi postopki, ki bi jih močno tresenje ogrozilo.
- Službe, odgovorne za ukrepanje v sili, odprejo požarna vrata, pomagajo ljudem in odredijo nadaljnje prednostne ukrepe.

Uvajanje opozorilnih sistemov v svetu

Večina potresno bolj ogroženih držav je vzpostavila sisteme zgodnjega opozarjanja po katerem od rušilnih potresov, ki so zahtevali večje število smrtnih žrtev. Na Japonskem so tak sistem vzpostavili po potresu leta 1995 v Kobeju, ki je zahteval 6400 življenj. Investicija je sicer znašala kar 600 milijonov ameriških dolarjev, vendar jo po anketah podpira več kot 90 % Japoncev. Sistem omogoča, da vsak državljan prejme opozorilo o prihodu in intenziteti močnejših tresljajev od Japonske meteorološke agencije (JMA), ki na Japonskem pokriva področje seizmologije. Zahvaljujoč sistemu zgodnjega opozarjanja, se leta 2011 ob velikem tohokskem potresu magnitude 9,0 (Gosar, 2012) noben vlak ni iztiril, saj so jih pravočasno upočasnili ali ustavili (Fujinawa in Noda, 2013).

V Združenih državah Amerike so v Kaliforniji, ki je potresno najbolj ogrožena, pričeli sistem *ShakeAlert* razvijati leta 2006, od leta 2012 sistem deluje testno, od februarja 2016 pa kot »prototipni« sistem, ki omogoča izbranim uporabnikom razvijati aplikacije za izdajo opozoril v zaščitne namene (Burkett in sod., 2017).



Slika 8:
Shematski prikaz pravilnega odziva ob potresu, znan kot *drop, cover and hold on* kar pomeni na tla, pokrij in počakaj. (vir: www.civildefence.govt.nz)

Figure 8:
Correct response in the event of an earthquake, known as *drop, cover and hold on* (Source: www.civildefence.govt.nz)

Na Kitajskem so sistem zgodnjega opozarjanja vzpostavili po potresu leta 2008 v Wenchuanu, ki je zahteval 87.600 življenj, na Tajvanu po potresu Chi Chi, ki je leta 1999 zahteval 2400 življenj, v Turčiji po izmitskem potresu leta 1999, ki je zahteval 17.100 življenj, in v Mehiki po potresu leta 1985, ki je v prestolnici Ciudad de Mexico zahteval 10.200 življenj.

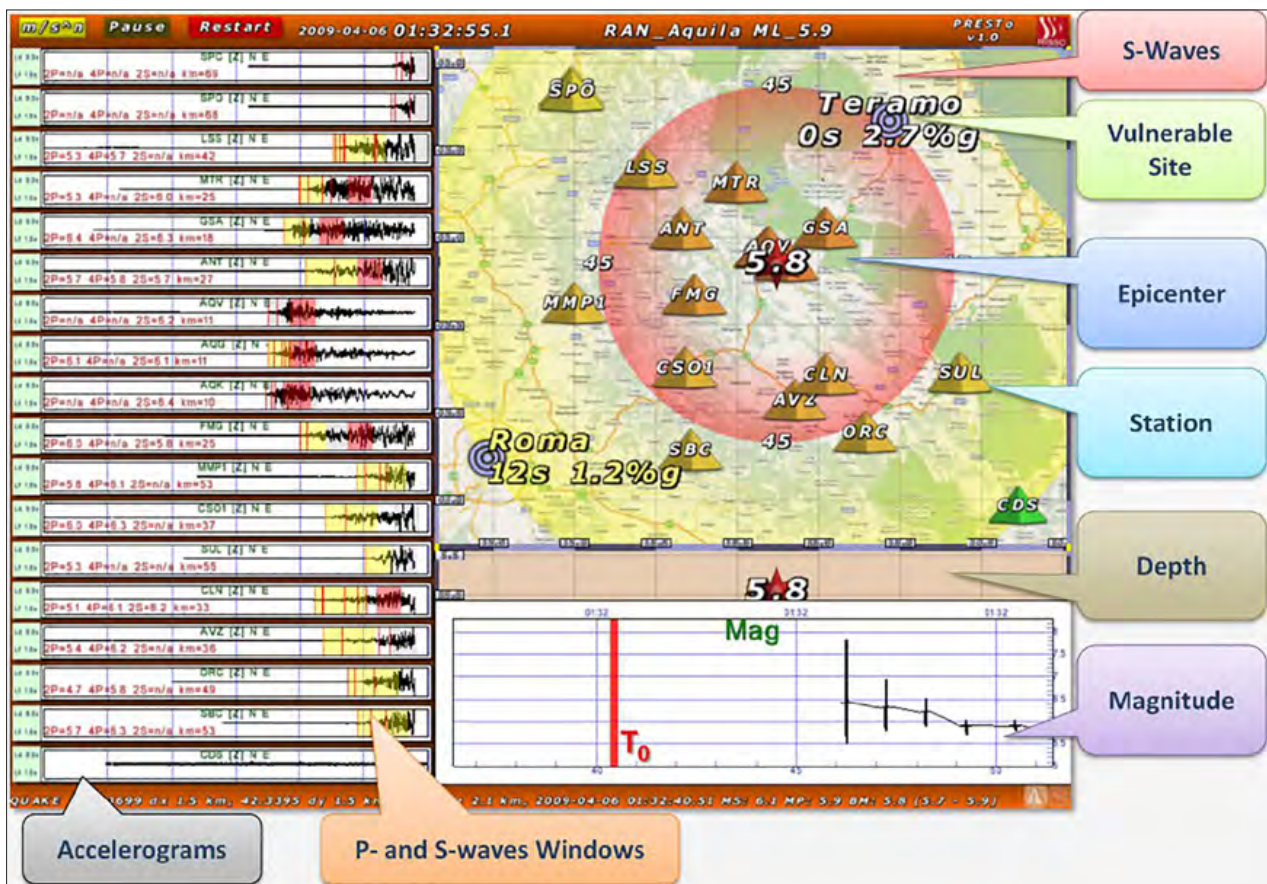
Pomen zgodnjega opozarjanja ob potresu je prepoznal tudi UNESCO in leta 2015 ustanovil *International Platform on Earthquake Early Warning Systems* (IP-EEWS) z namenom pospešiti razvoj takšnih sistemov po celem svetu ter okrepiti sodelovanje med raziskovalci, tehniki, odločevalci in končnimi uporabniki.

Testiranje sistema zgodnjega opozarjanja ob potresu PRESTo na širšem območju Slovenije

Za širše območje Slovenije je značilna razmeroma velika potresna nevarnost, ki je na območju stika med Alpami, Dinaridi in Panonskim bazenom med večjimi v

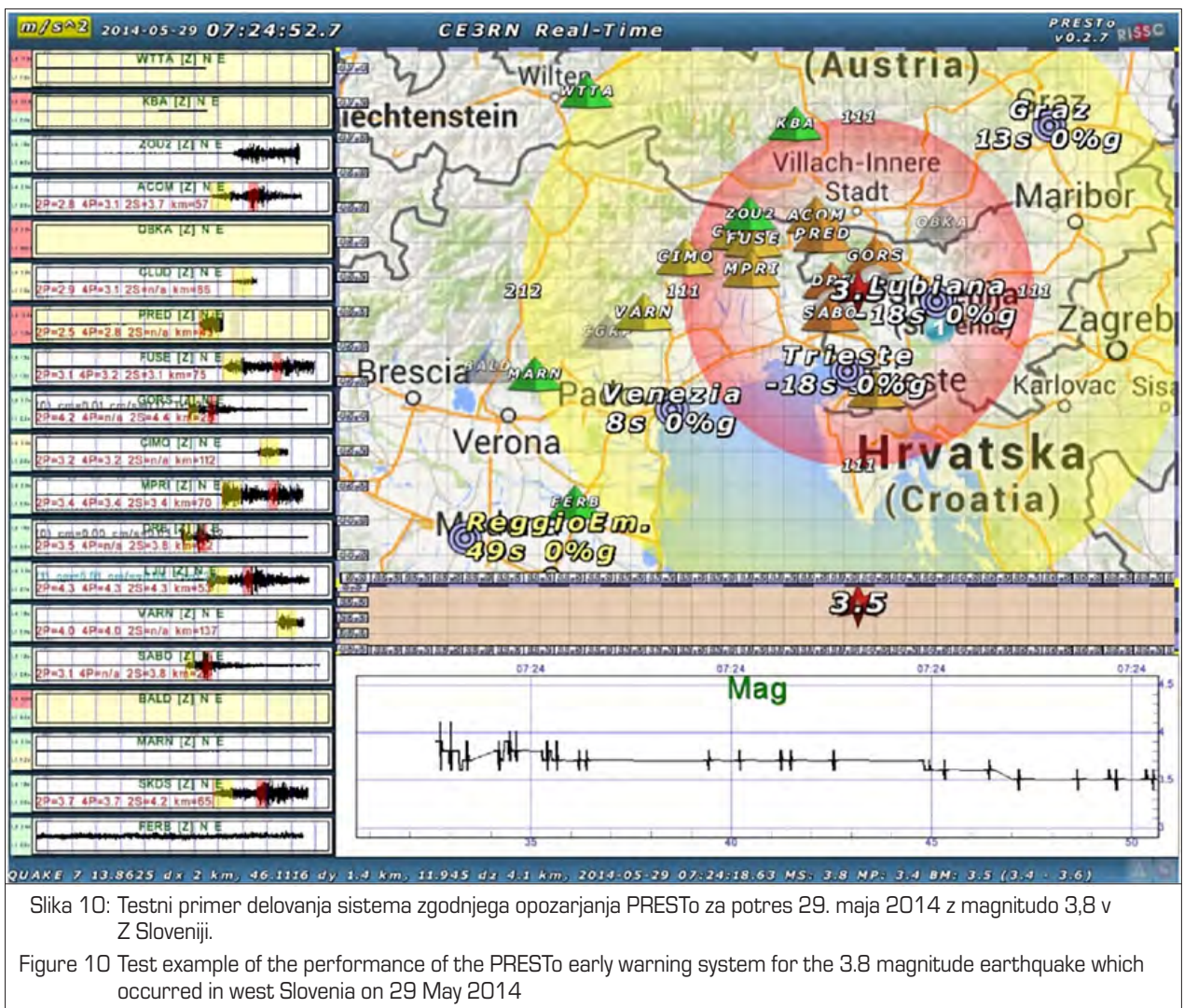
Evropi. Organizacije sosednjih držav, ki skrbijo za seizmološki monitoring, že od leta 2002 izmenjujejo seizmološke podatke v stvarnem času, kar je pripomoglo k hitrejšemu in zanesljivejšemu opazovanju potresne dejavnosti. Na podlagi uspešnega sodelovanja so *Agencija RS za okolje* (ARSO), *Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale* (OGS), *Univerza v Trstu* (UniTS) iz Trsta in *Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik* (ZAMG) z Dunaja leta 2014 tudi uradno povezale svoje mreže potresnih opazovalnic v raziskovalno omrežje *Central and Eastern European Earthquake Research Network* (CE³ERN). Tej iniciativi so se kasneje pridružile še seizmološke organizacije iz Hrvaške, Madžarske, Češke, Romunije, Bolgarije, Ukrajine in Albanije.

Ena prvih aktivnosti v okviru omrežja CE³ERN je bilo testiranje sistema zgodnjega opozarjanja ob potresu na območju SV Italije (Furlanija), Slovenije in Avstrije. Uporabili smo sistem PRESTo (*PRobabilistic and Evolutionary early warning System*), ki so ga razvili na Univerzi Federico II v Neaplju (Satriano in sod., 2011), kot odprtokoden program. Algoritmi PRESTo v stvarnem času analizirajo signale akcelerometrov mreže potresnih opazovalnic in zaznajo prihode



Slika 9: Primer zgodnjega opozarjanja s sistemom PRESTo za potres leta 2009 v L'Aquili. Oznake na sliki; od leve proti desni: akcelerogrami, okna P- in S-valov; od zgoraj navzdol: S-valovi, lokacija, ki je ranljiva ob potresu, nadžarišče potresa, potresna opazovalnica, globina, magnituda (vir: Satriano in sod., 2011)

Figure 9: Example of the operation of the PRESTo early warning system for the L'Aquila earthquake in 2009 (Source: Satriano et al., 2011)



Slika 10: Testni primer delovanja sistema zgodnjega opozarjanja PRESTo za potres 29. maja 2014 z magnitudo 3,8 v Z Sloveniji.

Figure 10 Test example of the performance of the PRESTo early warning system for the 3.8 magnitude earthquake which occurred in west Slovenia on 29 May 2014

P-valovanj (slika 5), čemur sledi opredelitev lokacije žarišča potresa in magnitude, ki se z dotokom novih podatkov sprti izboljšujeta. Na podlagi tega in pa modelov pojemanja se izračuna predvidena intenziteta nihanja tal v širšem (regionalnem) območju. Izdano opozorilo se posreduje po internetu končnim uporabnikom (Festa in sod., 2017). Ker so močni potresi na srečo razmeroma redki, je zelo koristna lastnost algoritmov PRESTo, da omogočajo testiranje učinkovitosti sistema tudi za pretekle potrese s »predvajanjem« (playback) dotoka seizmoloških podatkov v sistem. Primer delovanja PRESTo sistema zgodnjega opozarjanja za rušilni potres navorne magnitude 6,3 (lokalna magnituda 5,8–5,9) leta 2009 v L'Aquili ja na sliki 9. Na levi strani slike so prikazani seizmogrami z označenimi prihodi P- in S-valovanj, na spodnji strani čas nastanka potresa (T_0) ter časovni potek opredelitve magnitude in globine žarišča. Na karti je prikazana lokacija nadžarišča potresa, uporabljene potresne opazovalnice, slepa cona (rdeče) in območje, za katero sistem napoveduje čas prihodov S-valovanja ter predvideno intenziteto tresenja tal (rumeno). V prikazanem primeru bo S-valovanje doseglo Rim (Roma) po 12 sekundah, predvidena intenziteta nihanja tal pa bo 1,2 % g (Satriano in sod., 2011).

Pri testiranju sistema PRESTo na mejnem območju Italije, Slovenije in Avstrije smo najprej izvedli simulacijo (Picozzi in sod., 2015) za potres magnitude 6,5, ki je leta 1976 prizadel Furlanijo in Posočje ter zahteval skoraj tisoč življenj. Pri tem smo uporabili takrat še zelo redke delujoče potresne opazovalnice, seveda analogne, ob predpostavki, da bi njihove podatke lahko sprti prenašali z današnjo tehnologijo v središče za obdelavo podatkov. Simulacija je pokazala, da bi bila prva ocena magnitude na podlagi podatkov dveh opazovalnic 6,8, kar je dovolj blizu končni vrednosti. Slepa cona, znotraj katere bi S-valovanje prispelo še pred možnostjo izdati opozorilo, bi imela polmer 36 km. To zelo nazorno ilustrira, kako pomembna je dovolj gosta mreža potresnih opazovalnic, da je sistem zgodnjega opozarjanja lahko učinkovit. Kljub temu bi bilo za potres v Furlaniji možno izdati opozorila za nekatere kraje, kjer je bila intenziteta VII (poškodbe), kot je 65 km oddaljeni Pordenone, za katerega bi bil čas med opozorilom in prihodom S-valovanja 9 sekund. Za večje kraje z intenziteto VI (manjše poškodbe) bi bil za Trst ta čas 14 sekund, za Treviso pa 21 sekund. Z uporabo podatkov iz danes razpoložljivih potresnih opazovalnic omrežja CE³RN bi bil v večjih mestih, kot so Pordenone, Trst in Ljubljana, kjer bi bila intenziteta VI, čas med izdanim

opozorilom in prihodom S-valovanja precej daljši od 10 sekund, kar je že lahko dovolj za učinkovito ukrepanje prebivalstva, če so ljudje seveda ustrezno izobraženi.

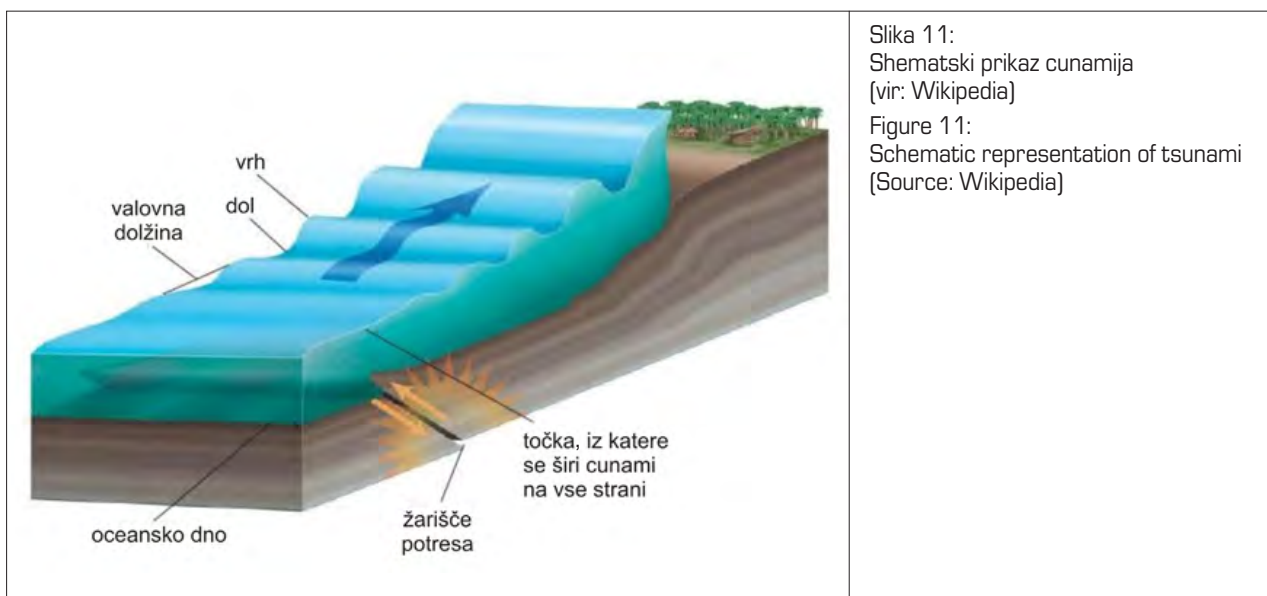
Sistem zgodnjega opozarjanja PRESTo smo nato testirali devet mesecev med majem in decembrom 2014 (Pesaresi in sod., 2017). Primer delovanja sistema za potres magnitude 3,4, ki se je zgodil 29. maja 2014 pri Cerknem, je na sliki 10 (Picozzi in sod., 2015). Njegova intenziteta je dosegla IV-V EMS-98. Sistem PRESTo je zelo natančno določil magnitudo in lokacijo žarišča potresa. Seveda pa je pri potresu takšne magnitude pričakovana intenziteta tresenja tal na razdalji, ki bi prišla v poštev za zgodnje opozarjanje, zelo nizka. V testiranem obdobju je sistem analiziral 24 potresov z magnitudo med 1,7 in 4,1. Od tega je bilo 14 potresov pravilno zaznanih in za njih izračunani potresni parametri, štirih potresov sistem ni zaznal, trije dogodki pa so bili napačno prepoznani kot lokalni potresi (lažni alarm). Čeprav je bilo obdobje testiranja razmeroma kratko, se je pokazalo, da omrežje CE³RN omogoča učinkovito delovanje modernega sistema zgodnjega opozarjanja ob potresu, zaradi česar je smiselno nadaljevati z njegovim razvojem.

Sistemi za zgodnje opozarjanje pred nevarnostjo cunamija

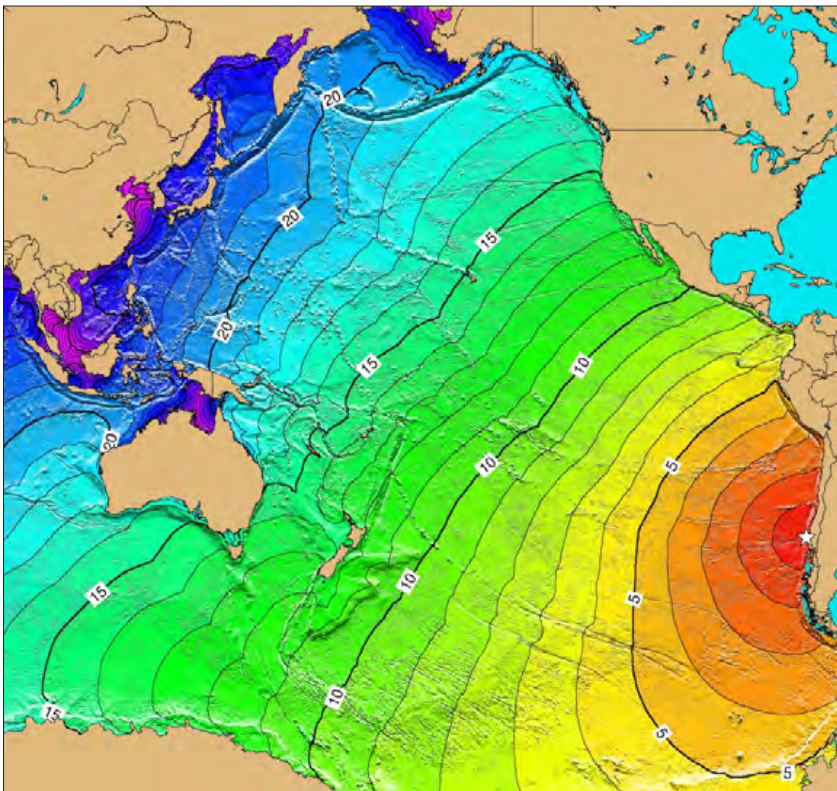
Cunami je edini potresni pojav (slika 11), kjer lahko med potresom in uničujočim valom mine več ur. Zato je tudi časa za ustrezno ukrepanje razmeroma veliko, če le imamo vzpostavljen učinkovit sistem zgodnjega opozarjanja. Cunami, ki nastane na primer na območju Havajev, bo dosegel Japonsko v sedmih do osmih urah, zahodno obalo ZDA pa v petih do šestih urah. Najmočnejši potres v zgodovini z magnitudo 9,5, ki se je zgodil leta 1960 pod morjem pri Čilu, je povzročil cunami, ki je potreboval kar 21 ur, da je dosegel Japonsko (slika 12), vendar je kljub temu tam zahteval 150 življenj.

Prvi sistem za zgodnje opozarjanje pred nevarnostjo cunamija so vzpostavili na Havajih že leta 1946 po cunamiju, ki je prizadel mesto Hilo na tem otočju. Ta sistem je temeljil na obveščanju o močnih potresih v tihomorskem obrobju, ki ga imenujejo tudi ognjeni obroč. Kmalu se je pokazalo, da sistem, ki temelji le na podatkih o močnih potresih, ni učinkovit, saj je bilo več kot 75 % opozoril lažnih, in sicer zato, ker ne povzroči vsak močan potres pod morskim dnom tudi cunami. Če je potres nastal zaradi vodoravnega premika med dvema blokoma kamnine in ne navpičnega dviga (ob reverznem prelomu), cunami ne bo nastal, saj ne pride do dviga morskega dna in vode nad njim. Naprednejši opozorilni sistem so začeli razvijati po dveh najmočnejših potresih v prejšnjem stoletju v Čilu (1960) in na Aljaski (1964). Cunami slednjega je opustošil obale Aljasko in Havajev. Ustanovili so Tihomorski center za opozarjanje pred cunamiji (*Pacific Tsunami Warning Center*), v katerem sodeluje 25 držav z območja Tihega oceana.

V opozorilni sistem so najprej vključili mareografe, ki na morskih obalah spremljajo plimovanje, kar je bilo zadovoljivo za lokalne potrese, na pa za oddaljene. Zato so začeli v Tihem oceanu nameščati posebne boje DART (*deep-ocean assesment and reporting*). Do leta 2003 so postavili v globokih predelih Tihega oceana sedem takšnih naprav. Vsaka je sestavljena iz merilca tlaka, ki je sidran na morskem dnu, in boje na površini. Podatki se med senzorjem na dnu in bojo prenašajo s pomočjo akustičnih valov, iz boje pa prek satelita v zbirni center. Senzor lahko zazna spremembo vodnega tlaka zaradi cunamija, ki je dvignil morsk gladino za manj kot 3 centimetre pri globini oceana do 6000 m. Sistem obveščanja je večstopenjski. Vsak potres z magnitudo, večjo kot 6,5, alarmira osebje centra, ki prične analizirati podatke, pridobljene iz boj in obalnih mareografov. Če zaznajo, da se je razvil cunami, izdajo opozorilo. Razvite države ob obalah Tihega oceana imajo podrobno razdelane sisteme za opozarjanje prebivalstva v obalnih predelih in načrte evakuacije. Poleg tega se prebival-



Slika 11:
Shematski prikaz cunamija
(vir: Wikipedia)
Figure 11:
Schematic representation of tsunami
(Source: Wikipedia)



Slika 12:
Čas potovanja (v urah) cunamija prek
Tihega oceana ob potresu magnitude
9,5 leta 1960 v Čilu (vir: Wikipedia)

Figure 12:
Travel time (in hours) of tsunami
waves across the Pacific Ocean for
a magnitude 9.5 Chile earthquake in
1960 (vir: Wikipedia)

stvo na rednih vajah izobražuje za pravilno ukrepanje ob nevarnosti cunamija.

Leta 2004, ko je pri Sumatri nastal tretji najmočnejši znani potres v zgodovini z magnitudo 9,3, v Indijskem oceanu še ni bil vzpostavljen sistem opozarjanja pred nevarnostjo cunamija, kot ga poznamo v Tihem oceanu. Zadnji večji cunami v Indijskem oceanu je namreč povzročil izbruh Krakataua davnega leta 1883. Valovi cunamija, ki so leta 2004 zadeli obale, so bili do 30 m visoki in zahtevali kar 283.000 žrtev (Gosar, 2015). Največ žrtev je bilo v Indoneziji, na Šrilanki, v Indiji in na Tajskem, prizadete pa so bile tudi nekatere zelo oddaljene afriške države. To je botrovalo vzpostavitvi sistema opozarjanja tudi v Indijskem oceanu, ki je postal operativen leta 2006. Sistem zgodnjega opozarjanja je zapleten, saj vključuje seizmološki del za hitro opredelitev parametrov močnega potresa in tudi natančno opazovanje sprememb v gladini oceana z bojami DART, da se izognejo lažnemu alarmiranju ob močnih potresih, ki ne povzročijo cunamija. Zelo močan potres 28. marca 2005 z magnitudo 8,7 in žariščem na istem območju pri Sumatri na primer ni povzročil uničujočega cunamija,

ampak le nizko in neškodljivo valovanje (Gosar, 2015). Bolj kot sam instrumentalni sistem pa je bilo zahtevno vzpostaviti učinkovit sistem hitrega obveščanja prebivalstva pred nevarnostjo, še posebej v razmeroma revnih državah, ki obkrožajo Indijski ocean. Temu mora slediti tudi stalno izobraževanje prebivalcev, da se ob nevarnosti cunamija ustrezno odzovejo.

Sklepne misli

Hiter razvoj seizmološke merilne opreme, računalniških algoritmov in predvsem komunikacijskih poti za prenos podatkov in opozoril v stvarnem času je v zadnjem desetletju omogočil velik napredek pri sistemih zgodnjega opozarjanja ob potresu, ki se zato vzpostavljajo v večini razvitih držav, ki so potresno bolj ogrožene. Čeprav so učinkoviti sistemi praviloma zelo dragi, predstavljajo poleg potresno odporne gradnje tudi edini način, da lahko ob močnem potresu rešujemo človeška življenja tako z avtomatiziranimi sistemi, ki na primer ustavljajo hitre vlake, kot s pravilnim ukrepanjem prebivalstva pred prihodom rušilnih potresnih valovanj.

Viri in literatura

1. Allen, R., 2013. Seismic hazards, seconds count. *Nature*, 3 October 2013, vol. 502, 29–31.
2. Burkett, E. R., Given, D. D., Jones, L. M., 2017. ShakeAlert – An earthquake early warning system for the United States west coast. USGS Fact Sheet 2014–2083, 4 str., <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20143083>.
3. Doyle, H., 1995. *Seismology*. Wiley, 218 str., Chichester.
4. Festa, G., Picozzi, M., Caruso, A., Colombelli, S., Cattaneo, M., Chiaraluce, L., Elia, L., Martino, C., Marzorati, S., Supino, M., Zollo, A., 2017. Performance of earthquake early warning systems during the 2016–2017 Mw 5–6.5 Central Italy sequence. *Seismological Research Letters*, 89/1, 1–12.

5. Fujinawa, Y., Noda, Y., 2013. Japan's earthquake early warning system on 11 March 2011 – performance, shortcomings, and changes. *Earthquake Spectra*, 29/1, 341–368.
6. Gosar, A., 2011. Predhodniki (znanilci) potresov – pregled opazovanj in pojasnjevalnih modelov. *Ujma*, 25, 178–185.
7. Gosar, A., 2012. Veliki tohokski potres na Japonskem 11. marca 2011. *Ujma*, 26, 86–91.
8. Gosar, A., 2013. Obsodba znanstvenikov po rušilnem potresu v L'Aquili. *Ujma*, 27, 303–308.
9. Gosar, A., 2015. Deset let od cunamija v Indijskem oceanu – po številu žrtev druga največja potresna katastrofa v zgodovini. *Ujma*, 29, 312–317.
10. Minson, S. E., Meier, M., Baltay, A. S., Hanks, T. C., Cochran, E. S., 2018. The limits of earthquake early warning: Timeliness of ground motion estimates. *Science Advances*, 4: eaaq0504.
11. Mussett, A. E., Khan, M. A., 2000. *Looking into the Earth, an introduction to geological geophysics*. Cambridge university press, 470 str., Cambridge.
12. Picozzi, M., Elia, L., Pesaresi, D., Zollo, A., Mucciarelli, M., Gosar, A., Lenhardt, W. A., Živčić, M., 2015. Trans-national earthquake early warning (EEW) in north-eastern Italy, Slovenia and Austria: first experience with PRESTo at the CE3RN network. *Advances in Geosciences*, 40, 51–61.
13. Pesaresi, D., Picozzi, M., Živčić, M., Lenhardt, W. A., Mucciarelli, M., Elia, L., Zollo, A., Gosar, A., 2017. A cross-border regional earthquake early warning system: PRESTo@CE3RN. *Natural Hazards*, 86, 431–440.
14. Satriano C., Elia L., Martino C., Lancieri M., Zollo A., Iannaccone G., 2011. PRESTo, the earthquake early warning system for Southern Italy: concepts, capabilities and future perspectives. *Soil Dyn Earthq Eng*, 31, 137–153.
15. Wikipedia, 2018a: Earthquake warning system. https://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_warning_system.
16. Wikipedia, 2018b: Earthquake Early Warning (Japan). [https://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_Early_Warning_\(Japan\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_Early_Warning_(Japan)).
17. Wikipedia, 2018c: 1994 Northridge earthquake. https://en.wikipedia.org/wiki/1994_Northridge_earthquake
18. Wikipedia, 2018d: Tsunami. <https://en.wikipedia.org/wiki/Tsunami>