

# VELIKI TOHOKSKI POTRES NA JAPONSKEM 11. MARCA 2011

## The great Tohoku earthquake in Japan on March 11, 2011

Andrej Gosar\* UDK 550.34(52)"2011"

### Povzetek

Potres z navorno magnitudo 9,0, ki je 11. marca 2011 prizadel Japonsko, je med petimi največjimi potresi na svetu po letu 1900. Učinki potresa so dosegli najvišjo sedmo stopnjo po potresni lestvici Japonske meteorološke agencije. Ob potresu je umrlo 15.842 ljudi, 5890 je bilo poškodovanih in 3485 pogrešanih. Večino žrtev je zahteval cunami, katerega pljus ob obalo je dosegel največjo višino 40,5 metra. Ocenjeno je, da je bila to najdražja naravna nesreča v zgodovini človeštva. Potres je nastal zaradi sunkovitega nariva v Japonskem globokomorskem jarku, kjer se Tihomorska tektonska plošča podriva pod Okhotsko mikroploščo. Pretrg je bil okoli 500 kilometrov dolg in 200 kilometrov širok, narivanje pa je znašalo 5 do 8 metrov, za kolikor se je tudi dvignilo morsko dno, kar je povzročilo cunami. Potres je povzročil premike delov Honšuja proti vzhodu za največ 2,4 metra. Zaradi potresa in prerazporeditve mas se je premaknila os rotacije Zemlje za 10 do 25 centimetrov in dan se je skrajšal za 1,8 mikrosekunde. Zaradi poškodovanih reaktorjev jedrske elektrarne Fukušima je potresu sledila jedrska kriza, ki je trajala več mesecev.

### Abstract

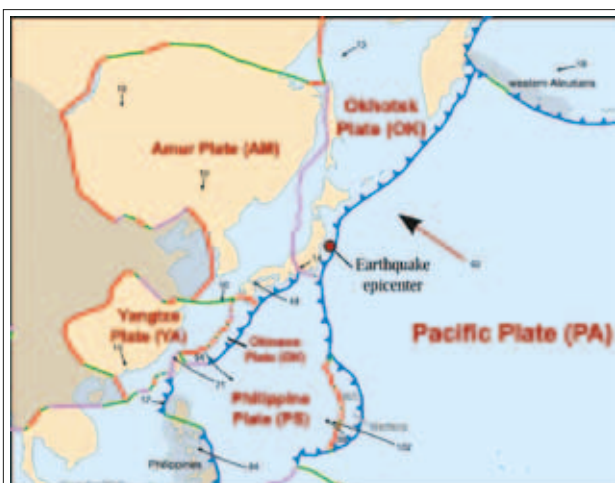
The earthquake with the moment magnitude of 9.0, which hit Japan on March 11, 2011, is among the five largest earthquakes in the world since 1900. Its effects reached the highest, seventh, grade on the Japan Meteorological Agency intensity scale. In the earthquake, 15,842 people died, 5,890 were injured and 3,485 were missing, mostly due to a large tsunami that reached the maximum run-up height of 40.5 metres. It is estimated that this was the most expensive natural disaster in the history of the world. The earthquake was caused by a sudden upthrust in the Japan deep-sea trench where the Pacific tectonic plate is subducting under the Okhotsk microplate. The rupture was about 500 kilometres long and 200 kilometres wide, with the thrusting of 5-8 metres. This is also the height of the sudden uplift of the sea bed, which caused the tsunami. Due to the earthquake, parts of Honshu moved towards the east for up to 2.4 metres. The earthquake shifted the Earth's rotation axis by 10-25 centimetres, due to the redistribution of masses, thus shortening the day by 1.8 microseconds. Due to the damaged reactors of the Fukushima Nuclear Power Plant, the earthquake was followed by a nuclear crisis that lasted several months.

## Uvod

Potres 11. marca 2011 z navorno magnitudo ( $M_w$ ) 9,0 je bil največji potres, ki je kadar koli prizadel Japonsko, in je med petimi največjimi potresi na Zemlji po letu 1900, ko se je začelo sistematično instrumentalno opazovati potresno dejavnost (preglednica 1). Žarišče potresa je bilo 72 kilometrov vzhodno od obale Tohoka

(otok Honšu) v globini 32 kilometrov (slika 1). Potres je nastal v Japonskem jarku in je trajal šest minut. Ob tem je nastal velik cunami, katerega pljus je pri Miyakouju dosegel višino 40,5 metra in na območju Sendaia poplavljal obalo do 10 kilometrov v notranjost. Ob potresu je umrlo 15.842 ljudi, 5890 je bilo poškodovanih in 3485 pogrešanih. Svetovna banka je ocenila škodo na 235 milijard dolarjev, kar pomeni, da je bila to najdražja naravna nesreča v zgodovini človeštva. Potresu je sledila jedrska kriza zaradi poškodovanih reaktorjev jedrske elektrarne v Fukušimi, ki je trajala več mesecev.

\* dr. Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana, andrej.gosar@gov.si



Slika 1: Tektonske plošče na širšem območju Japonske in nadžarišče potresa

Figure 1: Tectonic plates in the wider Japan region and the earthquake epicentre.

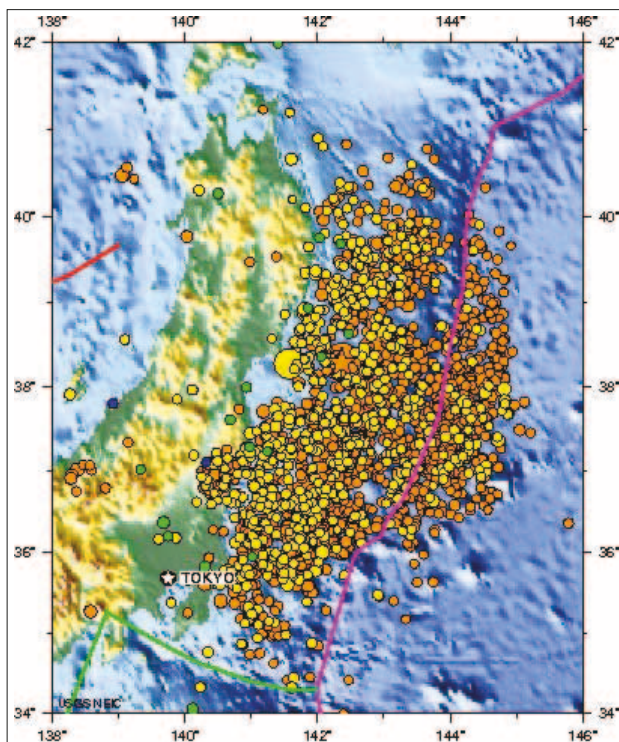
Leto	Lokacija	$M_w$
1960	Čile	9,5
1964	Aljaska	9,2
2004	Sumatra	9,2
2011	Japonska	9,0
1952	Kamčatka	9,0
1906	Ekvador	8,8
2010	Čile	8,8
1965	Aleuti	8,7
2005	Indonezija	8,6
1957	Aleuti	8,6
1950	Assam	8,6
1963	Kurili	8,5
1923	Kamčatka	8,5
1938	Bandsko morje	8,5

Preglednica 1: Najmočnejši potresi na svetu v obdobju instrumentalnega opazovanja (po letu 1900),  $M_w$  - navorna magnituda

Table 1: World's largest instrumentally recorded earthquakes (after 1900).  $M_w$  - moment magnitude.

## Seizmološki podatki

Potres se je zgodil 11. marca 2011 ob 5.46 po svetovnem času (UTC) oziroma ob 14.46 po lokalnem času. Pred glavnim potresom je bilo več močnih predpotresov z najmočnejšim 9. marca ( $M_w = 7,2$ ) z nadžariščem 40 kilometrov stran od glavnega potresa. Isti dan so mu sledili še trije predpotresi, ki so preseglili  $M_w = 6,0$ . Glavnemu potresu je sledilo več tisoč popotresov. V prvi uri so se zgodili trije od štirih popotresov z navorno magnitudo 7,0 ali več ( $M_w = 7,0, 7,4$  in  $7,2$ ). Četrty tak potres se je zgodil 7. aprila ( $M_w = 7,1$ ) in je povzročil smrt štirih ljudi. Število popotresov je sledilo Omorijevemu zakonu, po katerem se pogostost njihovega pojavljanja zmanjšuje recipročno s časom, ki preteče od



Slika 2: Potresnost na območju vzhodno od Honšuja v letu 2011 kaže veliko število popotresov.

Figure 2: Seismicity in the area east of Honshu in 2011 shows a large number of aftershocks.

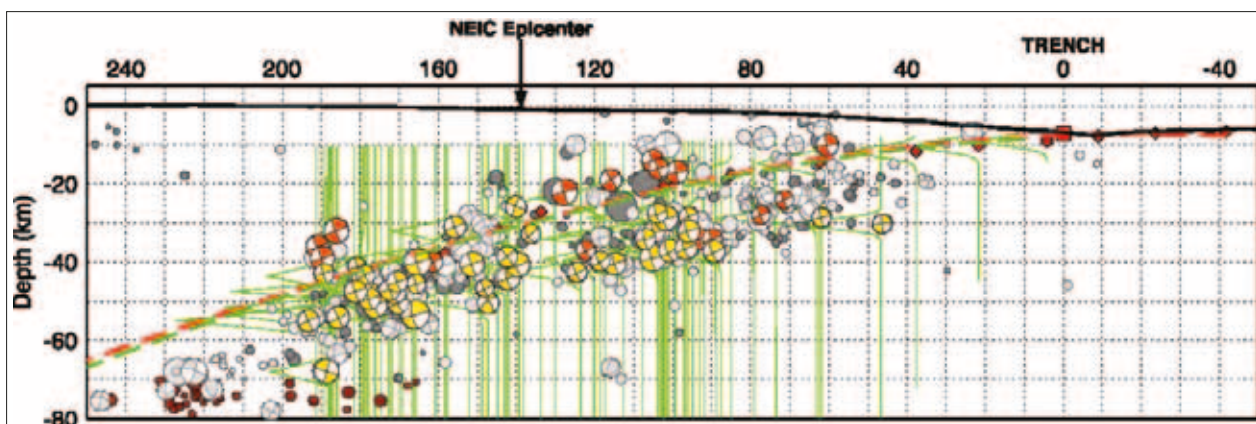
glavnega potresa. Skupno se je zgodilo več kot 60 popotresov z navorno magnitudo večjo od 6,0 in več kot 800 popotresov z magnitudo večjo od 4,5 (slika 2 in 3).

Potres je dosegel največjo intenziteto 7 po sedemstopenjski lestvici Japonske meteorološke agencije (JMA) v Kurihari (prefektura Miyagi). V treh prefekturah (Fukušima, Ibaraki in Tochigi) je bila intenziteta 6+, v štirih drugih prefekturah pa 6 (slika 4). V Tokiu, ki je oddaljen 373 km od potresa, je bila intenziteta 5 JMA. Najbližje veliko mesto Sendai je bilo od potresa oddaljeno 130 km. Največji vršni pospešek nihanja tal so izmerili v Tsukidati (prefektura Miyagi), in sicer kar 2,93 g, pri čemer je g normalen težni pospešek Zemlje ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ). V Tokiu je bil vršni pospešek tal le še 0,16 g. Likvefakcijo oziroma utekočinjenje tal so opazili na različnih območjih, predvsem tam, kjer je šlo za umetna nasutja. Zaradi nje se je porušilo 30 hiš, 1046 drugih zgradb pa je bilo poškodovanih.

Vso sproščeno energijo ob potresu je Ameriški geološki zavod (USGS) ocenil na  $3,9 \times 10^{22}$  džulov. To ustreza 9320 gigatonam TNT ali 600 milijonom energij atomske bombe, vržene na Hirošimo.

## Tektonski vidiki potresa

Potres je nastal na območju Japonskega globokomorskega jarka, v katerem se Tihomorska plošča podriva pod Okhotsko mikroploščo, ki je fragment večje Sever-



Slika 3: Profil prek žarišnega območja jasno kaže podrivanje Tihomorske plošče.

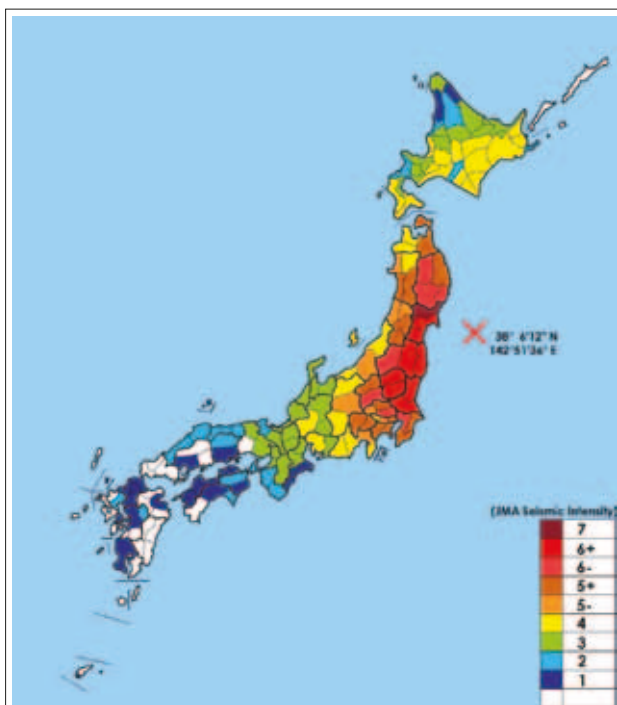
Figure 3: Cross-section of the hypocentral area clearly indicates the subduction of the Pacific plate.

noameriške plošče (slika 1). Tihomorska plošča se premika s hitrostjo 8–9 centimetrov na leto proti zahodu in se začne v Japonskem jarku podrivati pod Japonsko otočje (slika 3). Nekateri raziskovalci razlikujejo na tem območju več mikroplošč, ki skupaj določajo relativne premike med Tihomorsko, Severnoameriško in Evrazijsko ploščo. Pomembni sta predvsem Okhotska mikroplošča kot del Severnoameriške in Amurska mikroplošča kot del Evrazijske plošče (USGS, 2011).

V podrivnem območju prihaja zaradi vleke zgornje plošče navzdol do nenehnega kopičenja napetosti, ki se občasno sprošča kot potres, ob katerem se morsko dno nenadoma dvigne za nekaj metrov. Ob tem potresu je bil

pretrg dolg 500 in širok okoli 200 kilometrov. Nenadno narivanje krovninskega bloka na talninskega je znašalo kar 5 do 8 metrov, za kolikor se je dvignilo tudi morsko dno (Fujiwara in sod., 2011).

Za ocenjevanje potresne nevarnosti sta pomembna dva podatka: kolikšna je največja mogoča dolžina pretrga ob potresu in koliko časa mine med dvema zaporednima potresoma. Zadnje namreč določa, koliko napetosti se je nakopičilo v vmesnem obdobju. Velikost japonskega potresa je bila za raziskovalce presenetljiva zaradi izjemne dolžine pretrga (Normile, 2011). Ker je meja plošč na tem območju precej neravna in ker je južno (na geografski širini Tokia) trojni stik Tihomorske, Okhotske in Filipinske plošče (slika 1), so bile pričakovane dolžine pretrga manjše in zato niso pričakovali potresov z navorno magnitudo večjo od 8,0. Preteklo seizmičnost na tem območju pa opredeljujejo predvsem trije veliki potresi v letih 869, 1896 in 1933. Za vse tri je iz zgodovinskih virov in paleoseizmoloških raziskav znano, da so povzročili cunamije (Monasterky, 2011). Sicer se potresi z magnitudo okoli 7,5 dogajajo na tem območju vsakih 30 do 40 let. Zadnji z magnitudo 7,4 je bil leta 1978. Takrat je umrlo 28 ljudi, potres pa je povzročil le manjši cunami (Normile, 2011).



Slika 4: Karta intenzivnosti potresa po sedemstopenjski potresni lestvici Japonske meteorološke agencije (JMA)

Figure 4: Seismic intensity map showing earthquake effects on the seven-grade Japan Meteorological Agency (JMA) intensity scale.

## Geofizikalni učinki potresa

GPS-meritve so pokazale, da je potres povzročil premik delov severovzhodne Japonske proti Severni Ameriki za največ 2,4 metra (slika 5), posledica česar je razširitev otoka Honšu. Poleg tega se je obala pogreznila na dolžini 400 kilometrov za 0,6 metra. Tudi zato so bili učinki cunamija večji, saj je potoval hitreje in dlje v notranjost. Ocene premika morskega dna so različne. Najzanesljivejša predvideva, da se je morsko dno med nadžariščem in Japonskim jarkom premaknilo za 50 metrov proti vzhodu-jugovzhodu in dvignilo za okoli 7 metrov (Fujiwara in sod., 2011). Potres je povzročil na morskem dnu tudi številne plazove.

Dva dni po potresu je izbruhnili vulkan Shinmoedake. Ker pa je izbruhnili tudi dva meseca pred tem, januarja 2011, ni znano, ali je bil tokratni izbruh povezan s potresom ali ne.

Raziskovalci so ocenili, da se je zaradi potresa premaknila os rotacije Zemlje za 10 do 25 centimetrov. To je posledica velike prerazporeditve mas na Zemljinem površju, ki je spremenila njen vztrajnostni moment. Zaradi ohranitve vrtilnega navora se je posledično nekoliko povečala hitrost vrtenja Zemlje oziroma zmanjšala dolžina dneva za 1,8 mikrosekunde.

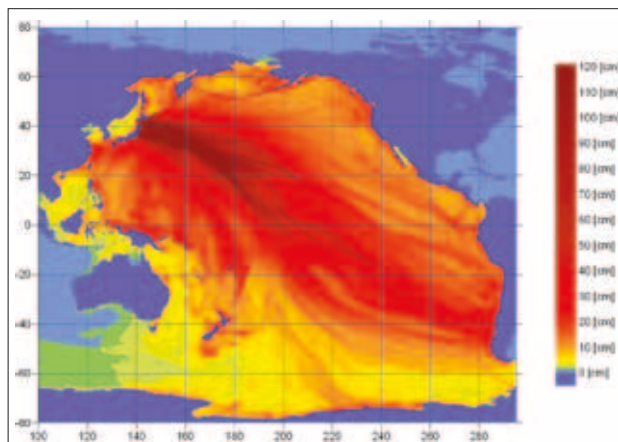


Slika 5: Obpotresni premiki ozemlja proti vzhodu, izmerjeni z GPS-opazovalnicami  
Figure 5: Co-seismic displacements of land towards the east, recorded with GPS stations.

## Cunami

Zaradi kakovostne gradnje in oddaljenosti žarišča od obale je povzročil potres kljub izjemni moči razmeroma malo porušitev in posledično smrtnih žrtev. Uničujoč je bil cunami (slika 6), katerega višina je presegla ocenjena pričakovanja na tem območju. Od skupno 13.135 žrtev, ki so jih odkrili v prvem mesecu po potresu, jih je kar 12.143 ali 92,5 odstotka umrlo zaradi utopitve. Večina mest in kritičnih objektov, kot so jedrske elektrarne, je na vzhodni obali Honšuja sicer zavarovana z visokimi obrambnimi zidovi, ki pa so bili žal večinoma prenizki. Najbližjo točko obale je dosegel cunami 26 minut po potresu. Največji učinki cunamija so bili vzdolž 670 kilometrov dolgega odseka obale med Erimom na severu in Oaraijem na jugu (slika 7). Višina vala cunamija sicer ni presegla 10 metrov, izjemoma pa je lahko dosegel »pljus« zaradi oblike obale in morskega dna v nekaterih predelih ob strmi obali izjemne višine. Pri Miyakoku je dosegel kar 40,5 metra. Cunamijski valovi so bili visoki v Miyakoku 8,5 metra, v

Somi 9,3 metra, v Ofunatu 8,0 metra in v Ishinomaki 7,6 metra. Poplavna voda cunamija je na položnih delih obale segala ponekod do 10 kilometrov v notranjost (sliki 8 in 9). Skupno je bilo na Japonskem poplavljenih 561 kvadratnih kilometrov obale. Pretresljivi so bili posnetki hiš in avtomobilov, ki jih je odnašala voda, na letališču Sendai pa je odneslo celo več letal.



Slika 6: Model potovanja cunamija prek Tihega oceana z višino vala  
Figure 6: A model of tsunami travel across the Pacific Ocean with wave heights.



Slika 7: Največje višine cunamija ob vzhodni obali Japonske  
Figure 7: Peak tsunami wave heights along the eastern coast of Japan.

Kljub temu da je Japonska meteorološka agencija (JMA) izdala opozorilo pred cunamijem takoj po potresu, je bilo časa za evakuacijo razmeroma malo, njegova višina pa je bila večja od napovedane. Študija japonske vlade je pokazala, da je le 58 odstotkov ljudi iz obalnih območij Iwate, Miyagi in Fukušime takoj upoštevalo opozorilo pred cunamijem in odhitelo na dvignjena območja. Od tistih, ki so upoštevali opozorilo, je le 5 odstotkov ljudi zajela voda. Po drugi strani pa jih je med tistimi, ki niso upoštevali



Slika 8: Satelitski posnetek uničenja zaradi cunamija na območju Sendaia

Figure 8: Satellite image of the damage caused by the tsunami in the Sendai area.

opozorila, kar 49 odstotkov zajela voda. Kljub razmeroma kratkemu času, ki je bil na voljo, je ta primer znova pokazal, kako pomemben je sistem za zgodnje opozarjanje pred

nevarnostjo cunamija, saj je z njim mogoče rešiti večino življenj na ogroženih območjih.

Cunami je potoval prek celotnega Tihega oceana (slika 7). Na odprtem morju je bila višina vala nizka, hitrost potovanja pa visoka. Ko pa se je približal obali, se je hitrost upočasnila, zato pa se je izrazito povišala njegova višina. V Kaliforniji in Oregonu je dosegel ponekod višino 2,4 metra ter poškodoval več pristanišč in dokov. Cunami je še v oddaljenem Čilu dosegel ponekod višino 3 metre in poškodoval 200 domov. Na Antarktiki, 13.000 kilometrov stran, se je zaradi cunamija odlomila okoli 80 metrov debela ledena plošča, velika kar 125 kvadratnih kilometrov.

Kljub izjemni moči potresa je bila višina cunamija presenetljiva. Zelo pomembne podatke za razumevanje tega pojava so pokazale analize satelitskih meritev gladine Tihega oceana z radarjem raziskovalcev iz NASE in državne univerze Ohaia v naslednjih mesecih. Uspelo jim je dokazati združevanje valov več cunamijev, kar je podvojilo skupno višino vala (NASA, 2011). Znanstveniki so že dolgo domnevali, da se to lahko zgodi, vendar zaradi pomanjkanja opazovanj hipoteze ni bilo mogoče potrditi. Predvsem za veliki čilski potres leta 1960, ki je bil z navorno magnitudo 9,5 najmočnejši potres v zgodovini in katerega cunami je zahteval 200 žrtev celo zelo daleč stran na Havajih in na Japonskem, so domnevali, da je vzrok tako visokega vala v združevanju cunamijev. K tokratnemu uspehu raziskovalcev je pripomoglo izjemno srečno naključje, da so bili ob potresu nad tem delom Tihega oceana kar trije sateliti, opremljeni z radarji za merjenje višine morske vode z natančnostjo nekaj centimetrov. Analize so pokazale dve različni valovni čeli, ki bi potovali vsako po svoje, če ju ne bi odklonili podvodni grebeni. Zato sta se že daleč na odprtem morju združili, kar je podvojilo višino vala, ki je nato lahko prepotoval veliko razdaljo brez znatne izgube moči. To odkritje pomaga razumeti, zakaj cunamiji včasih prepotujejo široke oceane in povzročijo ponekod opustošenje, drugod pa so njihovi učinki skoraj zanemarljivi. Raziskovalci so do zdaj pri opozarjanju pred nevarnostjo cunamija upoštevali le obliko morskega dna v bližini obal, ki najbolj vpliva na višino vala. Spoznanje, da prav topografija oceanskega dna na odprtem morju določa, ali bo prišlo do združevanja različnih valovnih čel, bo zato omogočala pripravo bistveno natančnejših napovedi širjenja cunamijev in zanesljivejše opozarjanje pred njihovo nevarnostjo.

## Sklepne misli

Potres 11. marca 2011 vzhodno od Honšuja je bil izjemen po različnih naravnih in družbenih vidikih. Že dejstvo, da se območje velikosti 500 krat 200 kilometrov nenadno narine za 5 do 8 metrov, kaže, da gre za izjemen naravni pojav, ki je povzročil enega od petih najmočnejših znanih potresov. Potres tako velike magnitude je bil na tem območju glede na geometrijo stikov tektonskih plošč presenetljiv. Znanstvenikom je pri tem potresu prvič



Slika 9: Uničenje zaradi cunamija na območju Rikuzentakata  
Figure 9: Tsunami destruction in the Rikuzentakata area.

uspelo dokazati pojav združevanja valovnih čel zaradi njihovih odklonov, povezanih s topografijo oceanskega dna, kar lahko višino cunamija podvoji. Japonska družba je najbolje na svetu pripravljena na potrese, zato je bilo kljub izjemni moči žrtev zaradi tresenja tal zelo malo. Žal pa je vse presenetila višina cunamija, ki je presegla varovalne zidove ob obali. Analize so pokazale, da bi dosledno upoštevanje opozorila pred cunamijem sicer rešilo večino življenj. O obsežnosti katastrofe kažejo podatki, da je bilo uničenih 46.000 domov in 144.000 poškodovanih, voda pa je odnesla kar 230.000 vozil. Najbolj dolgoročne posledice pa bodo imele poškodbe jedrskih reaktorjev v Fukušimi, ki so sicer tresenje tal razmeroma dobro prestali, usoden pa je bil cunami, ki je uničil dizelske generatorje, nujne za zagotavljanje hlajenja. Vse to je povzročilo, da je bil tohotski potres najdražja naravna nesreča v zgodovini, odpravljanje njegovih posledic pa bo trajalo desetletja.

### Viri in literatura

1. Toshiya, Fujiwara, Shuichi, Kodaira, Tetsuo, No, Yuka, Kaiho, Narumi, Takahashi, Yoshiyuki, Kaneda, 2011. The 2011 Tohoku-Oki earthquake: displacement reaching the trench axis. *Science*, 334, 2. december 2011.
2. Nasa, 2011. NASA finds Japan tsunami waves merged, doubling power. Dostopno na: <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm?release=2011-374>.
3. Normile, D., 2011. Deviating earthquake defied expectations. *Science*, 331, 18. marec 2011.
4. Monastersky, R., 2011. Seismi puzzle, giant shock rattles ideas about quake behaviour. *Nature*, 471, 17. marec 2011.
5. USGS, 2011. Magnitude 9.0 earthquake – near the east coast of Honshu, Japan. Dostopno na: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/usc0001xgp/>.
6. Wikipedia, 2011. Tōhoku earthquake and tsunami. Dostopno na: [http://en.wikipedia.org/wiki/2011\\_T%C5%8Dhoku\\_earthquake\\_and\\_tsunami](http://en.wikipedia.org/wiki/2011_T%C5%8Dhoku_earthquake_and_tsunami).