

INDUCIRANA SEIZMIČNOST

INDUCED SEISMICITY

Andrej Gosar

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

Povzetek

Inducirana seizmičnost je posledica sprememb v napetostnem stanju v Zemljini skorji, ki nastanejo zaradi različnih človeških dejavnosti. Najbolj nevarne so lahko velike rečne pregrade, za katerimi so umetna jezera, vtiskanje vode v porozne plasti kamnin pri izkoriščanju nafte in klasično rudarjenje v globokih rudnikih. Tudi čezmerno črpanje pitne in termalne vode, nafte in plina ali rudarjenje v velikih dnevnih kopih imajo včasih nesorazmerno velike vplive na seizmičnost. V Sloveniji poznamo inducirano seizmičnost zaradi klasičnega rudarjenja premoga, drugih oblik pa za zdaj ne. V Sloveniji je ustrezno zakonsko in v praksi urejeno le opazovanje seizmičnosti na območju velikih vodnih pregrad.

Abstract

Induced seismicity is caused by human activity which alters the stresses in the Earth's crust. The most dangerous can be large artificial lakes behind river dams, the extraction and injection of water in the process of the exploitation of hydrocarbons, and classic mining in deep mines. Excess extraction of fresh and thermal water, oil and gas, or mining in large open pit mines can sometimes have a disproportionately large influence on seismicity. In Slovenia only seismicity induced by classic coal mining is presently known; however, the monitoring of seismicity at large water dams is appropriately regulated and carried out.

Uvod

S pojmom inducirana seizmičnost označujemo vse potrese, ki nastanejo zaradi človeške gospodarske dejavnosti (včasih pa tudi zaradi naravnih pojavov, kot je vtiskanje magme na območju vulkanov), če ta spremeni napetostno stanje v Zemljini skorji. Mehanizmi nastanka so zelo različni, saj obsegajo dodatne obremenitve kamnin zaradi umetnih akumulacij vode, črpanja ali vtiskanja vode v porozne plasti kamnin, razbremenitve zaradi rudarjenja in podobno. Večina induciranih potresov je šibka, lahko pa pride tudi do zelo močnih potresov, ki zahtevajo človeške žrtve in povzročijo gmotno škodo. Zaradi vtiskanja odpadnih slanin vod, ki so nastale ob črpanju nafte, je leta 2016 v Oklahomi nastal potres z magnitudo 5,8, ki je povzročil veliko škodo. Zaradi akumulacijskega jezera Koyna je v Indiji leta 1967 nastal potres z magnitudo 6,3, ki je zahteval 180 življenj in 1500 ranjenih. Celo potres magnitude 8,0 v Sečuanu leta 2008, ki je zahteval 68.000 življenj, številni raziskovalci povezujejo s polnjenjem akumulacije Zippingpu. Zaradi razbremenitve kamnin z velikim dnevnim kopom premoga naj bi leta 1976 nastal potres magnitude 7,3 pri Gazli v Uzbekistanu. Zaradi inducirane seizmičnosti, povzročene s hidravličnim drobljenjem kamnine za izkoriščanje geotermalne energije pri Baslu, so morali leta 2008 projekt opustiti. Čezmerno črpanje pitne vode iz vodonosnika je bilo leta 2011 glavni vzrok za potres magnitude 5,1 v Lorci v Španiji. Čeprav v javnosti v zadnjem času največjo skrb povzroča (ne)varnost hidravličnega drobljenja pri pridobivanju nafte iz peščenjakov

in skrilavcev, so potresi, ki pri tem nastajajo, praviloma šibkejši in ne povzročajo škode na površju, vendar so ponekod tudi ob tem zaznali nekoliko močnejše potresne sunke. V tem prispevku ne bomo obravnavali eksplozij (v kamnolomih, podzemni jedrski poskusi itd.), ki so povzročene umetno, vendar je mehanizem nastanka potresnega valovanja povsem drugačen in za razliko od inducirane seizmičnosti neposreden.

Pri večini potresov, ki so povzročeni s človeško dejavnostjo, se sprosti več napetosti, kot jo umetno dodamo ali odvzamemo v Zemljini skorji. Zato nekateri raziskovalci delijo inducirano seizmičnost v več skupin. Po tej delitvi so pravi »inducirani« (angl. *induced*) potresi tisti, pri katerih je umetna sprememba napetosti primerljiva s strižno napetostjo, ki povzroči zdrs ob prelomu, »proženi« (angl. *triggered*) so tisti, pri katerih je umetna sprememba napetosti precej manjša, in »stimulirani« (angl. *stimulated*) tisti potresi, pri katerih nimamo dovolj podatkov za razločevanje. Ker se je za opis vseh tovrstnih potresov najbolj uveljavil kar splošen izraz »inducirana seizmičnost«, ga bomo uporabljali tudi v tem prispevku (Foulger in sod., 2017).

Pogosto ni mogoče zanesljivo ugotoviti, ali je nek potres naravnega (tektonskega) izvora ali pa gre za inducirano seizmičnost. Vsi morebitni pojavi inducirane seizmičnosti se zato zelo podrobno znanstveno proučujejo, saj lahko le z njihovim dobrim razumevanjem zagotovimo varno opravljanje različnih gospodarskih dejavnosti, predvsem pridobivanja različnih vrst energije.

Vrste inducirane seizmičnosti

Načinov, kako lahko s človeško dejavnostjo spreminjamo napetost v Zemljini skorji, je veliko, zato je tudi klasifikacija inducirane seizmične zelo razvejana. Najbolj se je uveljavila naslednja razdelitev (Foulger in sod., 2017):

dejavnosti na Zemljinem površju

- dodajanje mase
 - zbiranje vode za rečnimi pregradami (umetna jezera)
 - izgradnja visokih stavb
 - nasipanje obale za povečevanje kopnega
- odstranjevanje mase (rudarjenje v velikih dnevnih kopih)

odstranjevanje (izkoriščanje) mase pod površjem

- črpanje podzemne vode
- rudarjenje
 - klasično rudarjenje
 - rudarjenje s topljenjem snovi
 - vrtanje predorov
- izkoriščanje ogljikovodikov
 - plin
 - nafta
- izkoriščanje geotermalne energije

vtiskanje snovi v geološke plasti pod površjem

- tekočine
 - vtiskanje odpadne slane vode, nastale pri črpanju nafte
 - vtiskanje vode za večji izkoristek naftnega ležišča (angl. EOR)
 - geotermalni sistemi, pri katerih v vročo kamnino vtiskamo vodo
 - vračanje izrabljene geotermalne vode
 - hidravlično drobljenje kamnin
 - potapljanje opuščenih rudnikov
- plini
 - podzemno skladiščenje naravnega plina
 - vtiskanje CO₂ za večji izkoristek naftnega ležišča
 - skladiščenje CO₂ za zmanjševanje toplogrednih učinkov

V nadaljevanju bomo podrobneje opisali nekatere pomembnejše vrste inducirane seizmičnosti.

Zbiranje vode za rečnimi pregradami (umetna jezera)

Najbolj znan primer inducirane seizmičnosti zaradi obremenitve površja z veliko količino vode v akumulacijskem

jezeru (slika 1) je povezan s 103 m visoko pregrado Koyna v Indiji, ki je bila zgrajena leta 1962. Za njo je nastalo 75 m globoko in 52 km dolgo jezero. Pet let po njeni zgraditvi je v daljšem nizu potresov nastal tudi najmočnejši potres z magnitudo 6,3, ki je zahteval 180 življenj in nekoliko poškodoval tudi samo pregrado. Potres je nastal v globini, manjši od 5 km, in sicer 10 km nizvodno od pregrade. Po tem se je potresna dejavnost še nadaljevala in je do neke mere povezana s spreminjanjem nivoja vode v jezeru. Povprečno nastane tam vsaka štiri leta potres magnitude, večje od 5,0 (Guha, 2000; Yeats in sod., 1997).

Trenutno najvišja vodna pregrada na svetu je 317 m visoka pregrada Nurek v Tadžikistanu, ki zadržuje 10 km³ vode. Najmočnejši potres magnitude 4,6 je nastal leta 1972. Tudi tu je inducirana seizmičnost trajna in večinoma povezana z nivojem vode v jezeru. Največjo prostornino vode na svetu zadržuje 111 m visok Asuanski jez v Egiptu, in sicer 1,64 x 10¹¹ m³. Inducirani potresi nastajajo v dveh globinskih intervalih: 0–10 km in 15–25 km. Najmočnejši potres magnitude 5,7 je nastal leta 1981 v globljem od obeh območij. Redek primer, ko je inducirani potres poškodoval tudi samo pregrado, je iz Xinfengjiana na Kitajskem. Polnjenje jezera za 105 m visoko pregrado se je začelo leta 1959, potresna dejavnost pa en mesec za tem. Leta 1962 je nastal potres magnitude 6,1, ki je v pregradi povzročil manjše razpoke (Guha, 2000).

Raziskovalno predstavlja poseben izziv potres magnitude 8,0 v Wenchuanu na Kitajskem leta 2008. Ker je za 156 m visoko pregrado in približno 1 milijardo m³ vode v umetnem jezeru moč potresa nesorazmerno velika, še vedno ni enotnega mnenja, ali gre res za inducirani potres. Ta je nastal 20 km stran od pregrade na globini 16 km, ko je bilo jezero povsem napolnjeno, in je zahteval vsaj 68.000 življenj (Foulger in sod., 2017).



Slika 1: Velika zbiralna jezera za rečnimi pregradami so pogosto vzrok inducirane seizmičnosti. (foto: A. Gosar)

Figure 1: Large artificial lakes behind river dams are a frequent source of induced seismicity (Photo: A. Gosar).

V Evropi je najbolj znan primer pregrade Vajont v Italiji, ki je z višino 262 m med najvišjimi na svetu, vendar je zgrajena v zelo ozki soteski in zato široka le 27 m. Pri prvem polnjenju so se kmalu začeli pojavljati inducirani potresi, 9. oktobra 1963 pa je v jezero zdrsnil ogromen zemeljski plaz in 50 milijonov m³ vode (ena tretjina vse vode v jezeru) je kot 250 m visok val pljusnilo prek pregrade in porušilo mesto Longarone ter več vasi, umrlo je 1910 ljudi. Sama pregrada ni bila poškodovana, jezero so potem izpraznili in seizmičnost se ni več pojavljala. Pri tej katastrofi so pristojni zavestno ignorirali številne opozorilne znake, ki so kazali na nestabilnost pobočja gore Monte Toc (Wikipedia, 2017).

Trenutno je v svetu pozornost raziskovalcev namenjena 181 m visokemu jezu Treh sotesk na Kitajskem, saj leži na seizmičnem območju, ki ga prečkata dva večja preloma. 40 km³ veliko jezero je bilo prvič napolnjeno leta 2010 in kmalu začelo povzročati inducirano seizmičnost z najmočnejšim potresom magnitude 4,6 leta 2014 (Foulger in sod., 2017).

Izgradnja visokih stavb

Edini znani primer inducirane seizmičnosti zaradi izgradnje visoke stavbe na svetu je 509 m visoka stolpnica Taipei 101 na Tajvanu. Stolpnica ima maso 700 milijonov kg in povzroča na temeljih tlak 0,47 MPa. Zgrajena je na zelo seizmičnem območju, kjer pa je v osmih letih pred izgradnjo nastalo le 9 šibkih potresov z magnitudo pod 2,0. V osmih letih med izgradnjo in po njej pa je na istem območju nastalo 20 potresov z magnitudo do 3,8, zato upravičeno domnevajo, da gre za inducirano seizmičnost (Foulger in sod., 2017).

Odstranjevanje mase zaradi rudarjenja v velikih dnevnih kopih

Najmočnejši potres magnitude 6,1 je zaradi rudarjenja v velikem dnevnem kopu premoga nastal leta 2013 v Kuzbassu v Sibiriji. Porušil je številne zgradbe v bližnjih naseljih. Dnevni kop je 10 km dolg in 2,2 km širok ter sega do 320 m globoko. V njem izkopljejo letno 9 mili-



Slika 2: Potres magnitude 5,1 v Lorci je porušil številne objekte, med njimi cerkev Santiago. (vir: Wikipedia)

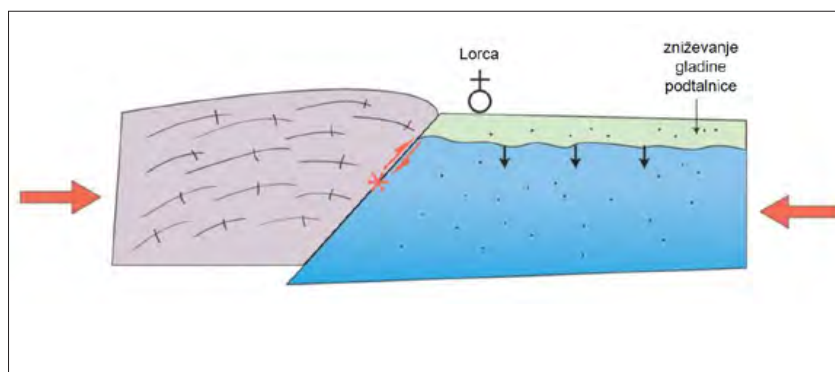
Figure 2: The Lorca magnitude 5.1 earthquake destroyed several buildings, including the Santiago church (Source: Wikipedia).

jonov ton premoga. Zaradi razbremenitve kamnin z velikim dnevnim kopom naj bi leta 1976 nastal tudi potres magnitude 7,3 pri Gazli v Uzbekistanu, kar pa še ni nedvoumno dokazano (Foulger in sod., 2017).

Črpanje podzemne vode

V svetu je znanih pet primerov inducirane seizmičnosti zaradi črpanja podzemne vode in s tem povzročenega zniževanja ravni podtalnice. Potres leta 2011 magnitude 5,1 v Loci v Španiji je povzročil velike poškodbe stavb in zahteval devet življenj (slika 2). Potres je nastal na prelomu, znanem po svoji pretekli seizmičnosti, vendar na nenavadno majhni globini treh kilometrov. Na tem območju se je zaradi črpanja vode v 50 letih raven podtalnice znižala za več kot 250 m (slika 3). Zaradi tega se je površje ugrezalo s hitrostjo okoli 10 cm/leto in skupno za več kot 2 m (Gonzales in sod., 2012).

Tudi za potres Gorkha v Nepalju leta 2015, ki je imel magnitudo 7,8 in je zahteval 8000 življenj (slika 4), nekateri domnevajo, da je lahko povezan s črpanjem vode pod Indijsko nižino, vendar to nikakor ni dokazano. Na tem območju se črpa 23 tisoč milijard m³ vode na leto, kar



Slika 3: Potres v Lorci leta 2011 je nastal zaradi prekomernega črpanja pitne vode, ki je znižalo gladino podtalnice za več kot 250 m. (po Gonzales in sod., 2012)

Figure 3: The Lorca earthquake in 2011 occurred due to the excess extraction of fresh water, which caused the water table to drop by more than 250 m. (after Gonzales et al., 2012)



Slika 4: Potres Gorkha magnitude 7,8 je leta 2015 porušil številne objekte v Katmanduju. [vir: Wikipedia]

Figure 4: Several buildings in Kathmandu were destroyed during the Gorkha magnitude 7.8 earthquake in 2015 [Source: Wikipedia].

povzroča zniževanje podtalnice za 1 m na leto (slika 5). Ker se s tem odstranjuje velika masa v vznožju Himalaje, kjer poteka njena glavna narivna cona, ocenjujejo, da črpanje prispeva k tektonskemu (naravnemu) kopičenju napetosti med 4,5 in 20 % [Kunda in sod., 2015].

Rudarjenje

Klasično rudarjenje v podzemnih rudnikih je daleč največji vzrok inducirane seizmičnosti, ki ima tudi največje posledice [Mendecki, 1997]. Zaradi velikih sprememb napetosti, ki jo v kamninah povzročajo odkopavanja, prihaja do »hribinskih udarov« [angl. *rock bursts*] ali »premogovih udarov« [angl. *coal bumps*] (slika 6).

Eden največjih hribinskih udarov z magnitudo 5,6 je nastal leta 1989 v rudniku kalija pri Dürenu v Nemčiji. Na 6 km² velikem območju se je v globini 850–900 m v rudniku zrušilo 3200 podpornih stebrov. Več sto hiš je bilo poškodovanih, 19 se jih je podrlo, trije ljudje so umrli [Foulger in sod., 2017].

Najbolj znano območje močnih hribinskih udarov je Južna Afrika. Zaradi izredno globokih rudnikov, katerih globina ponekod presega 3,5 km, je zmanjševanje nevarnosti hribinskih udarov ena glavnih nalog rudarskih inženirjev, ko načrtujejo potek rovin in optimizirajo rudarsko opremo [Guha, 2000]. Leta 2005 je blizu rudnika zlata Klerksdrop nastal potres magnitude 5,3, ki je ubil dva rudarja in poškodoval bližnje mesto.

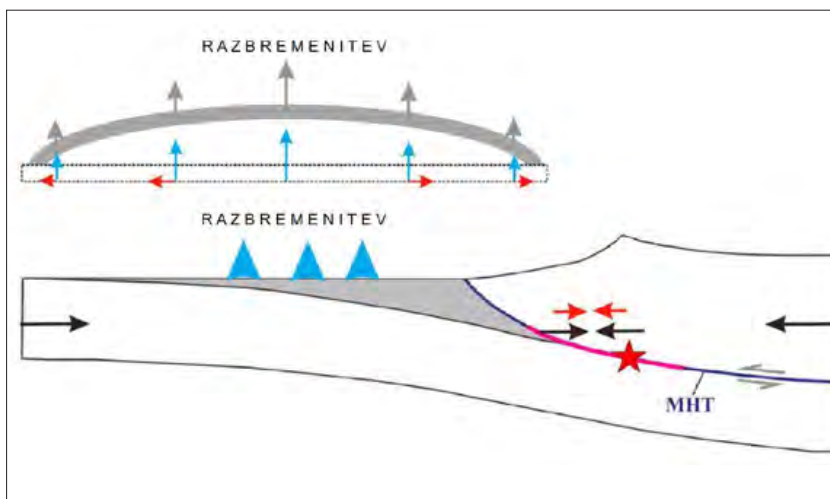
Največ premogovih udarov nastaja na Kitajskem, kjer je v obdobju 50 let v 33 premogovnikih nastalo več kot 2000 močnih udarov, ki so povzročili škodo. Pri tem je umrlo več sto rudarjev. Najmočnejši premogov udar je imel magnitudo 4,3 in je leta 1977 prizadel rudnik Taiji [Foulger in sod., 2017].

Pri rudarjenju z raztapljanjem v rudno telo zavrtajo injekcijsko vrtino in skozi njo vtiskajo topilno tekočino, ki raztopi minerale, raztopino pa izčrpajo skozi produkcijsko vrtino. Tako pridobivajo predvsem zelo veliko soli (NaCl), pa tudi približno polovico svetovne proizvodnje urana. Na svetu je znanih osem primerov inducirane seizmičnosti zaradi rudarjenja z raztapljanjem. V Vauvertu v Franciji tako pridobivajo sol na globini 1900–3000 m. Sol, ki je plastična, večinoma sama zapolni raztopljene prostore, potresi pa nastajajo tam, kjer se to ne zgodi. Zato se stalno dogajajo sicer šibki potresi. V ZDA so znani trije primeri potresov magnitude okoli 5,0, ki so posledica rudarjenja soli z raztapljanjem. V Zigongu na Kitajskem pa je zaradi rudarjenja soli v globini 800–1800 m nastal potres magnitude 4,6 [Foulger in sod., 2017].

Na svetu je znanih okoli 20 primerov, da so zaradi vrtnanja različnih predorov nastali potresi. Pri vrtnanju 57 km dolgega predora pod prelazom Gotthard je v letih 2005–2007 nastalo 112 šibkih potresov z magnitudo do 2,4. Najmočnejši je povzročil tudi nekaj škode v predorski kaverni.

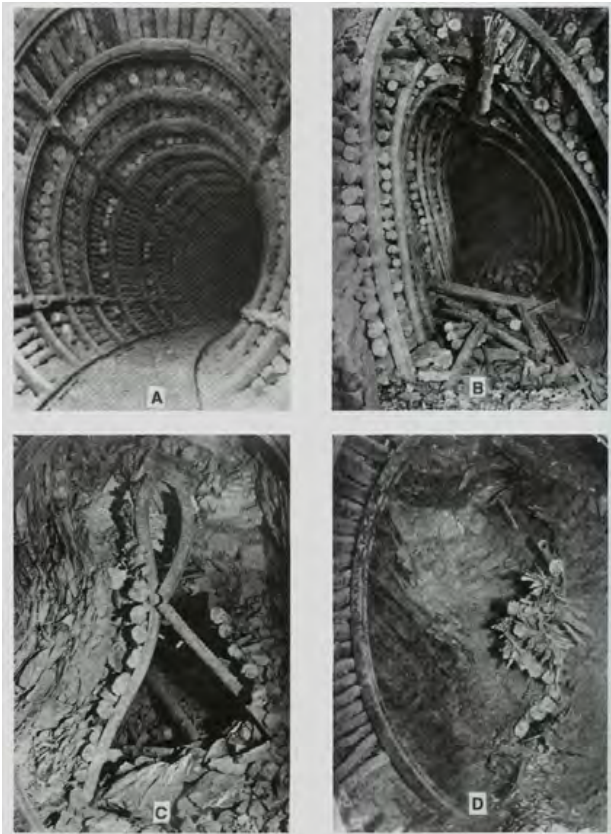
Izkoriščanje ogljikovodikov

Kljub velikim količinam nafte, ki se dnevno načrpa v različnih delih sveta, je poročil o inducirani seizmičnosti



Slika 5: Nastanku potresa Gorkha (žarišče označuje rdeča zvezda, prelomni pretrg pa rožnata črta) je verjetno botrovalo tudi črpanje vode v Indijski ravnini, ki je prispevalo k razbremenitvi glavnega nariva Himalaje (MHT). [po Kundu in sod., 2015]

Figure 5: Groundwater extraction in the India plain contributed to the unloading of the Main Himalayan Thrust (MHT) and probable occurrence of the Gorkha earthquake (the red star is the hypocentre, the pink line is the fault rupture). [after Kundu et al., 2015]



Slika 6: Posledice hribinskega udara v rudniku Champion Reef v Indiji (Guha, 2000)

Figure 6: Damage caused by a rock burst in the Champion Reef mine in India. (Guha, 2000)

nosti, povzročeni s samim črpanjem, razmeroma malo. Črpanje pogosto spremljajo deformacije na območju samega ležišča, vendar je le zelo majhen delež teh deformacij seizmičen. Z opazovanji so ugotovili, da inducirani potresi nastajajo na pred tem neznanih prelomih ali pa ob prelomih, ki so se šteli za neaktivne. V primerih, ko črpanje nafte spremlja vtiskanje odpadne slane vode zaradi njenega odlaganja ali zaradi povečanja izkoristka ležišča (EOR), pa je inducirana seizmičnost pogosto bolj problematična, kar obravnavamo v poglavju o vtiskanju tekočine.

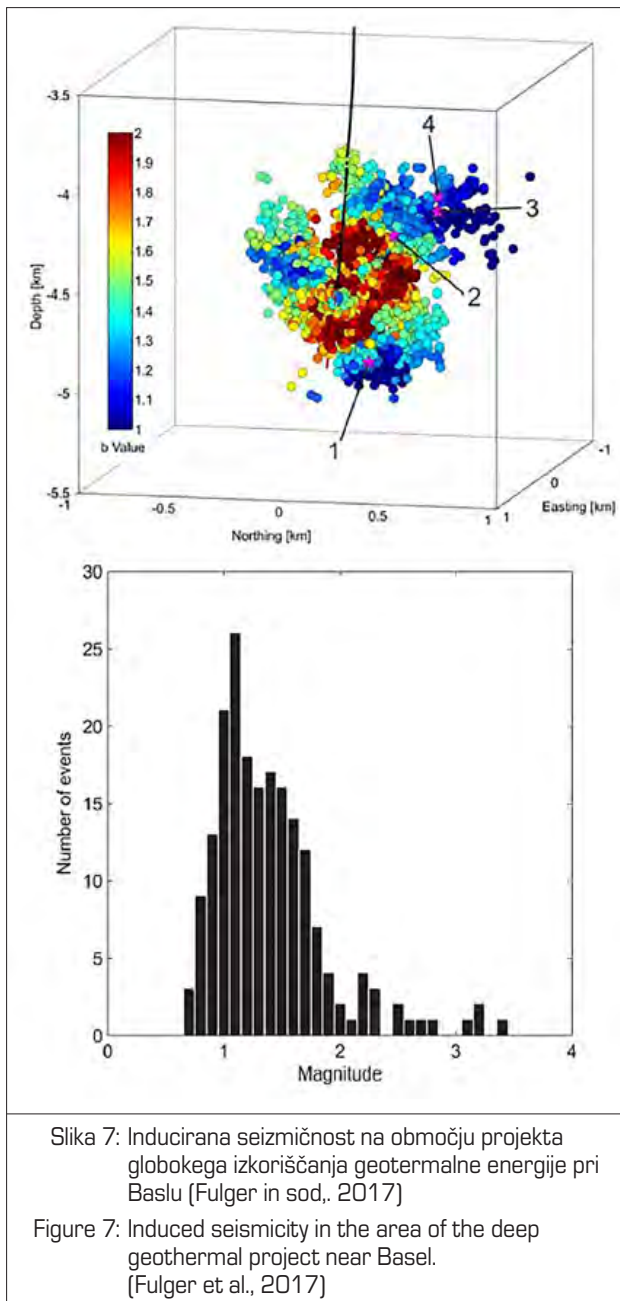
Leta 1952 so pričeli črpati nafto pri Wheeler Ridge v okrožju Kern v Kaliforniji. Po 98 dneh črpanja je na prelomu White Wolf, ki leži pod samo vrtino, nastal zelo močan potres magnitude 7,5, ki je sicer zaradi redke naseljenosti zahteval le 12 življenj. Raziskave so pokazale, da je zaradi črpanja nafte nastala razbremenitev (sprememba napetosti) zgornjega kamninskega bloka nad prelomom velikosti približno 1 bar, kar se v seizmologiji šteje za dovolj visoko vrednost, da se sproži potres (Joel, 2017). Drugi najmočnejši potres zaradi črpanja nafte z magnitudo 6,2 je nastal leta 1983 v Coalingi v Kaliforniji. Tam sta nastala tudi potresa magnitude 6,1 (1985) v Kettleman Nort Dome in magnitude 5,9 (1987) pri Whitter Narrows. Vsi trije potresi so nastali v globini okoli 10 km in povzročili več smrtnih žrtev ter ranjenih. Različni raziskovalci so analizirali vpliv

črpanja na napetostno stanje in vzročno povezavo z nastankom potresov. Glede vplivov na površje je še bolj izrazit primer ležišča Wilmington, prav tako v Kaliforniji. Izkoriščati so ga začeli leta 1936. V naslednjih 30 letih se je površje ugreznilo za 9 m, nekateri deli pa vodovodno premaknili za 3,6 m. Potresi so se začeli, ko se je tlak v ležišču zmanjšal za 10 MPa. Skupaj jih je bilo osem z magnitudo 2,4–5,1. Najmočnejši je nastal leta 1949 in uničil številne naftne vrtine, saj se je površje deformiralo za do 20 cm. Z bližnjega vzhoda, kjer se sicer načrpa največ nafte na svetu, je poročil o inducirani seizmičnosti presenetljivo malo, z dvema primeroma iz Saudove Arabije in Kuvajta s potresi magnitude do 4,7, ki pa nisovzročili resnejše škode (Foulger in sod., 2017).

Pri črpanju zemeljskega plina je v svetu znanih 36 primerov inducirane seizmičnosti. Najhujši primer je nastal na nahajališču Gazli v Uzbekistanu. V letih 1976 in 1984 so tam nastali trije potresi z magnitudo okoli 7,0, ki so resno poškodovali mesto Gazli ter zahtevali eno življenje in okoli sto ranjenih. Nahajališče plina so začeli izkoriščati leta 1966, ko je bil tlak v ležišču 7 MPa, proizvodnja pa je dosegla višek v letih 1968–1971. Ko je tlak v letu 1976 padel na 3,0–3,5 MPa, sta nastala prva dva močna potresa, leta 1984, ko je nastal tretji, pa je bil tlak le še okoli 1,5 MPa. Ležišče se nahaja 2 km globoko in seka ga več slepih prelomov. Domneva se, da so potresi nastali na enem od teh. Nerešeno pa je vprašanje, kako je lahko razmeroma majhna sprememba napetostnega stanja povzročila tako močne potrese. V Evropi je leta 1951 na plinskem polju Caviaga v Padski nižini nastal potres magnitude 5,5, in sicer na območju, kjer sicer ni znana močnejša naravna seizmičnost. Na ležišču Groningen na Nizozemskem, kjer naravnih potresov skoraj ni, je leta 2012 nastal najmočnejši potres magnitude 3,6, pred tem pa že 8 potresov z magnitudo, večjo od 3,0 (Foulger in sod., 2017). Zaradi tega so morali zmanjšati proizvodnjo plina.

Izkoriščanje geotermalne energije

Najbolj znan primer inducirane seizmičnosti zaradi izkoriščanja geotermalne energije je iz Basla v Švici, ki leži na stiku Zgornjerenskega tektonskega jarka in pogorja Jura. Na tem območju so bili v zgodovini številni močni potresi, vključno z najmočnejšim v tem delu Evrope z magnitudo okoli 6,5, ki je leta 1356 porušil Basel. Z velikim geotermalnim projektom v bližini Basla so mestu želeli zagotoviti toplotno in električno energijo. Izvrtali so 5 km globoko vrtino skozi 2,4 km sedimentnih kamnin in 2,6 km granita ter za opazovanje seizmičnosti namestili mrežo potresnih opazovalnic (Terakawa in sod., 2012). Leta 2006 so v vrtini na globini 4630 m pričeli hidravlično drobiti granit in vtisnili 11.600 m³ tekočine. Načrtovali so, da bo vtiskanje trajalo 21 dni, vendar se je že v prvih šestih dneh seizmičnost močno povečala. Potresi magnitude do 2,6 so nastali na



Slika 7: Inducirana seizmičnost na območju projekta globokega izkoriščanja geotermalne energije pri Baslu (Fulger in sod., 2017)

Figure 7: Induced seismicity in the area of the deep geothermal project near Basel. (Fulger et al., 2017)

globini 4,6–5,0 km (slika 7). Zaradi tega so skladno z odobrenim postopkom prenehali vtiskati tekočino. Pet ur kasneje je nastal potres magnitude 3,4 in v naslednjih 56 dneh še trije potresi z magnitudo, večjo kot 3,0. Zaradi strahu in vznemirjenja, ki so ga ti potresi povzročili med prebivalci, so morali celoten geotermalni projekt opustiti (Meier in sod., 2015).

Tudi pri izkoriščanju geotermalne energije brez vtiskanja vode je znanih več primerov inducirane seizmičnosti, večina je iz Kalifornije in Islandije. V Imperial Valley je ob zmičnem prelomu prišlo do več močnih potresov na območju Viktorija (1979) magnitude 6,6, Cerro Prieto (1980 in 1987) magnitude 6,1 in 5,4. Gre za območje, kjer se stikata tektonski plošči Tihega oceana in Severne Amerike in poteka prelom Imperial z znano seizmično zgodovino močnih potresov. Vodo in paro s temperaturo 250–350 °C črpajo iz globine

1500–3000 m. V letih 1973–1996 so izčrpali več kot 1 km³ vode. Dokazali so vzročno povezanost med povečevanjem količine izčrpane vode in sproščenim seizmičnim navorom. Na geotermalnih območjih Reykjanes in Svartsengi na Islandiji so velike deformacije povezane z razmikanjem tektonskih plošč s hitrostjo do 5 cm/leto. Kljub povečani seizmičnosti s potresi magnitude do 4,1 na območjih črpanja termalne vode zato ni mogoče izključiti, da ne gre za povsem naravno seizmičnost (Foulger in sod., 2017).

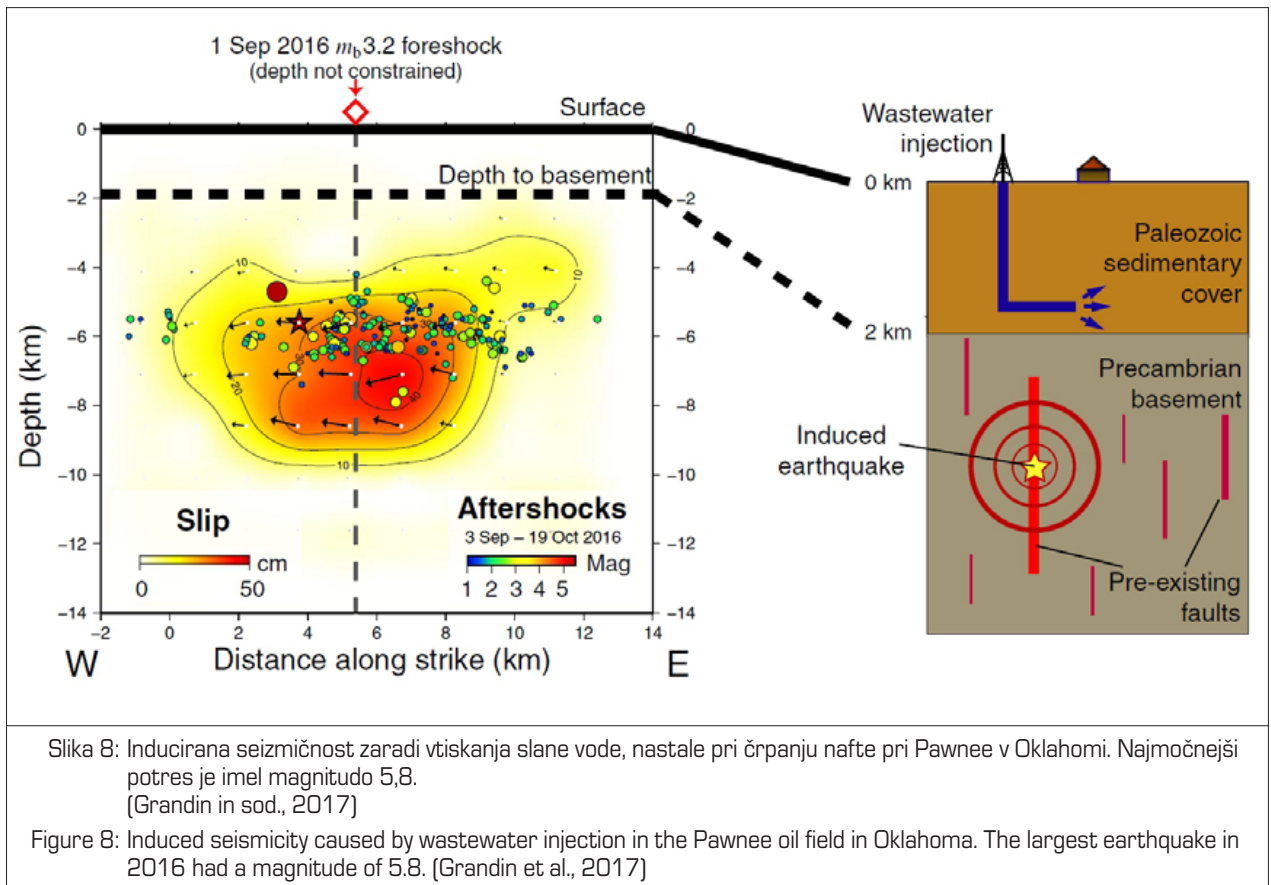
Vtiskanje tekočine pri proizvodnji nafte

Pri izkoriščanju nafte se skozi vrtime v porozne kamnine pogosto vtiska tekočina pod visokim pritiskom za različne namene:

- Trajno odlaganje odpadne vode, ki nastane pri črpanju nafte.
- Vtiskanje tekočine v naftno polje z namenom povečevanja izkoristka črpanja, znano pod imenom *enhanced oil recovery* (EOR).
- Hidravlično drobljenje skrilavcev in peščenjakov, ki omogoča izkoriščanje nafte tudi iz sicer slabo prepustnih kamnin, znano pod imenom *fracking*.
- Trajno odlaganje tekočine, ki je bila uporabljena pri hidravličnem drobljenju.

Pri črpanju nafte se glede na vrsto nahajališča izčrpa tudi večja količina zelo slane vode. Razmerje med vodo in nafto je lahko tudi 20. Zaradi njene visoke slanosti se voda ne sme izlirati v površinske vodotoke, zato se vtiska v opuščena nahajališča, druge porozne plasti ali v aktivna nahajališča za povečanje izkoristka. Na svetu je znanih 33 primerov, da je vtiskanje slane vode povzročilo inducirano seizmičnost, kar 27 od njih je iz ZDA (Foulger in sod., 2017).

V Oklahomi, kjer se obsežno izkoriščata nafta in plin, je injekcijskih vrtime več kot 7000. Večina od njih se uporablja za trajno odlaganje odpadne vode, saj je delež vode v izčrpani nafti razmeroma velik, deloma pa tudi za EOR, ki se uporablja že od leta 1930. Oklahoma leži v osrednjem območju ZDA, kjer je bilo v zadnjih sto letih potresov razmeroma malo, čeprav se zaradi nekaterih zgodovinskih potresov šteje za območje povečane potresne nevarnosti. V seizmičnem območju New Madrid je imel najmočnejši potres po letu 1950 magnitude 4,9, kar je razmeroma malo. Po letu 2008 pa se je zaradi obsežnega izkoriščanja nafte, ki vključuje vtiskanje odpadne slane vode skozi vrtime v porozne kamnine, seizmičnost močno povečala. V obdobju 2008–2013 je bila Oklahoma tako seizmično najbolj dejavna zvezna država, kjer je število potresov z magnitudo, večjo kot 3,0 preseglo tudi njihovo število v potresno sicer najbolj izpostavljeni Kaliforniji. Leta 2011 je pri mestu Prague nastal potres z magnitudo 5,7, ki ga nedvoumno pripisujejo vtiskanju odpadne vode v opuščeno naftno polje.



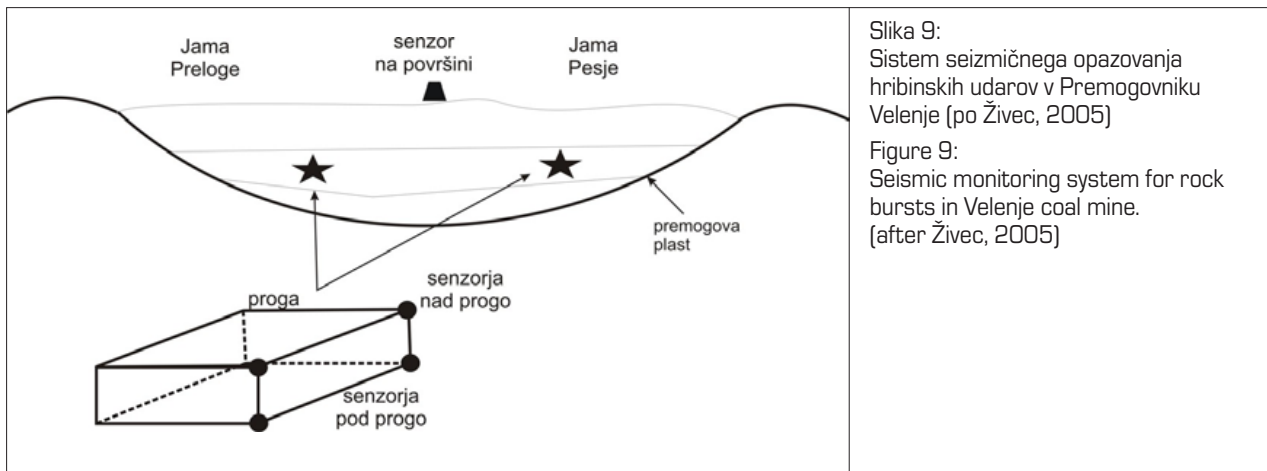
Potres je uničil 14 hiš in poškodoval dve osebi. Leta 2016 je pri mestu Pawnee nastal še močnejši potres z magnitudo 5,8, ki je v nadžariščnem območju povzročil velike poškodbe, te pa so nastale celo v 450 km oddaljenem Kansas Cityju, ranjena je bila ena oseba (Yeck in sod., 2016). Na tem območju vtiskajo vodo v 2 km debele sedimentne kamnine na globini 1,5–1,8 km, pod sedimenti pa je predkambrijska skalna podlaga, v kateri so številni prelomi (slika 8). Potresni pretrg je nastal v globini 6–10 km. To sta najmočnejša znana potresa na svetu, ki sta nastala zaradi vtiskanja odpadne vode pri proizvodnji nafte. Raziskave so dokazale vzročno povezanost med povečevanjem količine vtisnjene vode in povečano seizmičnostjo (Grandin in sod., 2017). Poleg Oklahome je pomembnejša inducirana seizmičnost zaradi vtiskanja slane vode v ZDA nastala tudi v Koloradu (potres magnitude 4,3 leta 2000) in v Ohio (potres magnitude 4,9 leta 1986). Slednji je še posebej pomemben, saj je nastal le 17 km od jedrske elektrarne Perry, pospešek nihanja tal pa je dosegel 0,23 g (Grandin in sod., 2017).

Na Kitajskem je največ primerov inducirane seizmičnosti zaradi vtiskanja slane vode iz območja sečuankega sedimentacijskega bazena, kjer je nastal najmočnejši potres magnitude 5,2. V Italiji so nekateri domnevali, da je potres v Emiliji – Romaniji (2012) magnitude 5,9, ki je zahteval 27 življenj in povzročil veliko gmotno škodo, povezan z izkoriščanjem naftnega polja Mirandola in geotermalnega območja Casaglia. Sledile so podrobne raziskave, ki so pokazale, da čeprav se antro-

pogenega vpliva ne da popolnoma izključiti, je ta zelo malo verjeten (Foulger in sod., 2017).

Hidravlično drobljenje kamnin

Pri hidravličnem drobljenju (frakturiranju) v slabo propustno kamnino (skrilavec, peščenjak) v vrtino, ki je v globini navadno izvrtana vodoravno, vtiskamo mešanico vode, peska in kemičnih dodatkov pod velikim pritiskom. Zaradi tega kamnina razpoka, pesek pa preprečuje, da bi se razpoke ponovno zaprle. Hidravlično drobljenje se veliko uporablja v ZDA in Kanadi, v evropske države pa zaradi skrbi, da je lahko škodljivo za okolje, prodira le počasi. Ena od skrbi je tudi, da povzroča inducirano seizmičnost. Pri tem je treba ločiti med tem, da že samo frakturiranje neposredno povzroča šibkejše potrese, saj v kamninah nastajajo nove razpoke, in morebitnim širšim vplivom drobljenja zaradi spreminjanja napetostnega stanja in hidravličnih razmer na bližnjih prelomih, ob katerih lahko nastane močnejša inducirana seizmičnost. Na svetu je bilo do zdaj izvedenih več kot 2,5 milijona hidravličnih drobljenj, poročila o močnejših potresih pa so znana le za 21 primerov, od tega jih je 12 iz Kanade, osem iz ZDA in po eden iz Anglije in Kitajske (potres magnitude 4,7). V Kanadi so o srednje močnih potresih poročali iz Britanske Kolumbije (potresi magnitud 3,8 do 4,4) in iz Alberte (potres magnitude 3,8). V ZDA so najmočnejši inducirani potresi zaradi hidravličnega drobljenja nastali v Ohio in Oklahomi, in sicer skupaj štirje potresi



Slika 9:
Sistem seizmičnega opazovanja
hribskih udarov v Premogovniku
Velenje (po Živec, 2005)
Figure 9:
Seismic monitoring system for rock
bursts in Velenje coal mine.
(after Živec, 2005)

magnitudo, večje od 3,0 (Foulger in sod., 2017). Pri tem je treba upoštevati, da se ta tehnika uporablja predvsem v redko naseljenih ali nenaseljenih območjih. V Angliji je bil prvi poskus hidravličnega drobljenja v Lancashiru leta 2011, in sicer v 1000 m debeli plasti karbonskega skrilavca. Kmalu po izvedenem drobljenju je nastal potres magnitude 2,3, ki so ga ljudje čutili. Zato so postavili dodatne seizmične opazovalnice, saj tam ni znanih naravnih potresov, vendar niso zaznali novih. Nato so nadaljevali z drobljenjem in šest tednov kasneje je nastal potres magnitude 1,5 približno 1 km stran od vrtine, ki so ga ljudje prav tako čutili. Zaradi protestov so projekt prekinili za leto in pol. Oblasti so nato pripravile natančne predpise za hidravlično drobljenje, ki vključujejo predhodni seizmološki monitoring naravne seizmičnosti in natančno spremljanje med izvajanjem drobljenja. Če se pojavijo potresi z magnitudo, večjo od 0,5, je treba injektiranje ustaviti ali spremeniti njegov način (Foulger in sod., 2017).

Podzemno skladiščenje zemeljskega plina

Podzemno skladiščenje zemeljskega plina v poroznih plasteh kamnin je najbolj razširjen način uravnavanja neenakomerne dobave in porabe med letom. V Evropi je prek 270 takšnih skladišč, v ZDA pa več kot 400. Pri tem se uporabljajo izčrpana nahajališča ogljikovodikov, vodonosniki in raztopljene kaverne v solnih čokih. Na svetu je znanih sedem primerov inducirane seizmičnosti, povezane s tovrstnim skladiščenjem. V Bergermeerju na Nizozemskem je ob vtiskanju plina nastalo nekaj potresov magnitude od 0,7, v Hajeju na Češkem pa do 15 potresov na mesec z magnitudo do 1,5. Najbolj je raziskan primer projekta Castor v Španiji, kjer so za skladiščenje uporabili izčrpano naftno polje v morju pri Valencii, 20 km daleč od obale. Načrtovali so skladiščenje 1,3 milijarde m³ plina, kar predstavlja 25 % španskih potreb. Kmalu po začetku vtiskanja plina leta 2013 so se pričeli pojavljati potresi, med katerimi je imel najmočnejši magnitudo 4,3. Zaradi vznemirljivosti javnosti in negativne izkušnje z rušilnim potresom

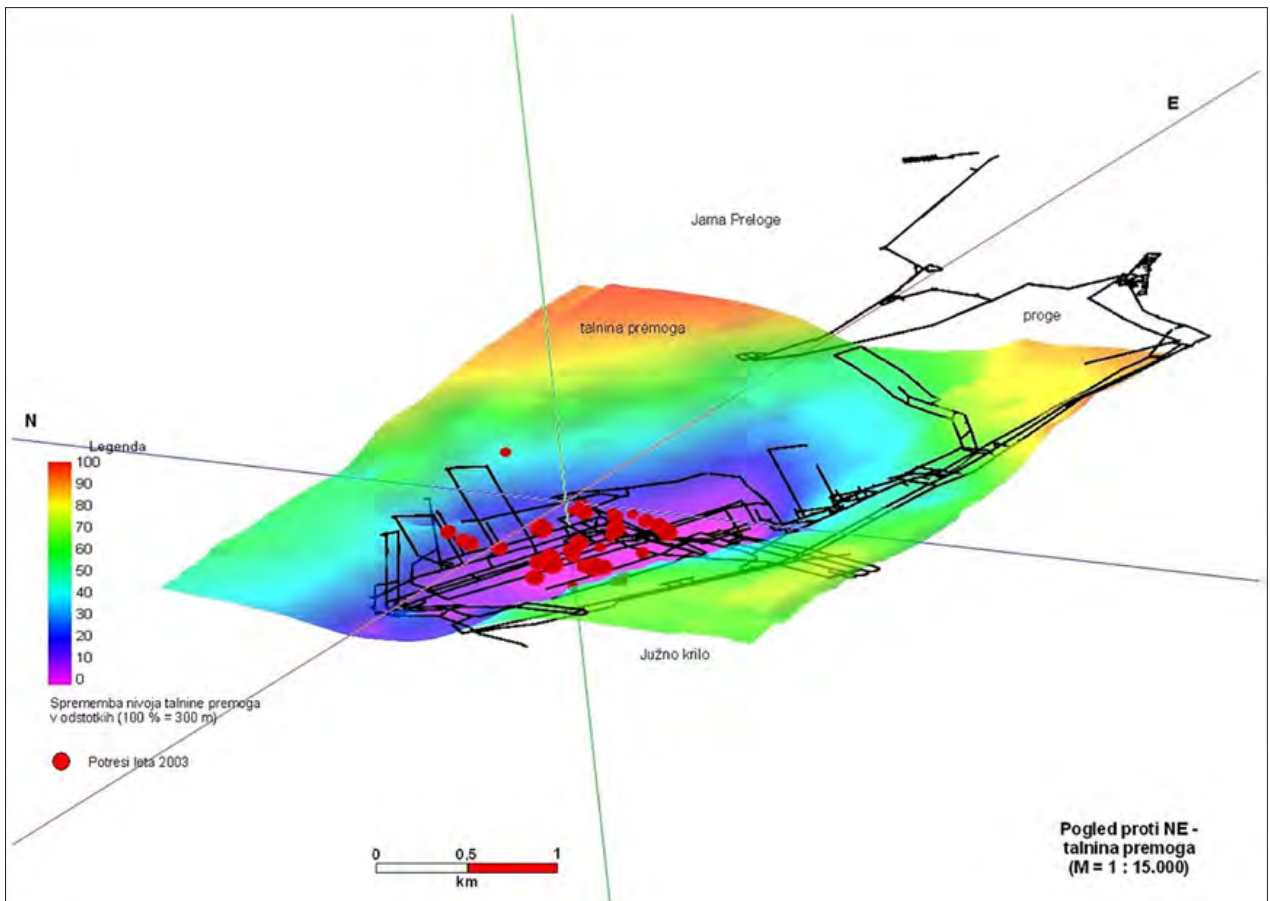
magnitudo 5,1 v Lorci leta 2011, povzročeni s črpanjem pitne vode, so morali projekt opustiti. Med črpanjem nafte, ki so ga opustili leta 1989, niso uporabljali vtiskanja vode (EOR), saj so bili naravni pogoji ugodni. Ko so pričeli s testnim vtiskanjem razmeroma majhne količine zemeljskega plina v globino 1,75 km, pa se je takoj pojavila seizmičnost z magnitudami do 2,6, zato so vtiskanje prekinili. Kljub temu je dva tedna po prekinitvi nastal potres magnitude 4,3 (Gaité in sod., 2016).

Podzemno odlaganje CO₂

Podzemno odlaganje CO₂ je metoda, od katere si človeštvo obeta, da bi lahko v prihodnje zmanjšala izpuste toplogrednih plinov. Pri tem se uporabljajo opuščena naftna in plinska polja ali vodonosne plasti, ki imajo nad seboj neprepustno zaporno plast (Gosar, 2005). Inducirana seizmičnost, ki bi lahko pri tem nastala, ni problematična samo zaradi samega tresenja na površju, ampak bi lahko potres pretrgal neprepustno zaporno plast in s tem bi se odložen plin ponovno sprostil v okolje. Tehnologija je večinoma še v fazi preizkušanja na 20–30 testnih območjih po vsem svetu, osem lokacij pa je že v dejanski rabi.

Na norveškem plinskem polju Sleipner v Severnem morju že od leta 1996 iz zemeljskega plina letno ločijo okoli milijon ton CO₂ in ga z vtiskanjem odlagajo v plitvejšo vodonosno plast. Od takrat so v bližini zaznali dva potresa z magnitudo 3,5 in 2,5, vendar je natančnost lokacije njunih žarišč majhna, saj so potresne opazovalnice na kopnem precej daleč.

Na plinskem polju In Salah v Alžiriji so v desetih letih (2004–2013) v isto plast, iz katere črpajo plin, vendar na drugi lokaciji, odložili 3,85 milijona ton CO₂. Zato je na tem območju v plasti narastel tlak s prvotnih 18 na 30 MPa, površje pa se zaradi deformacij dviguje do 1cm/leto. Samo v letu 2010 so na območju injekcijske vrtine zaznali več kot 1000 potresov. Zaradi nevarnosti, da se pretrgajo neprepustne zaporne plasti, so nadaljnje vtiskanje opustili (Foulger in sod., 2017).



Slika 10: Inducirana seizmičnost na območju Premogovnika Velenje v letu 2003 (po Živec, 2005)
 Figure 10: Induced seismicity in the Velenje coal mine in 2003. (after Živec, 2005)

V Decaturju v Illinoisu so v treh letih vtisnili 1 milijon CO₂ v 460 m debelo porozno plast peščenjaka v globini 2,1 km. V dveh letih je v neposredni bližini nastalo 180 potresov z magnitudo do 1,3 (Foulger in sod., 2017).

Inducirana seizmičnost v Sloveniji

V Sloveniji poznamo le inducirano seizmičnost zaradi podzemnega rudarjenja, predvsem v Premogovniku Velenje (Mayer in sod., 2002; Bajc in sod., 2004; Živec, 2005). Na premogovnik so prebivalci Šoštanja in okolice redno naslavljali pritožbe zaradi povečanega tresenja tal. Zato je bil v bližnjih naseljih, pa tudi na odkopih, postavljen mikrosezmični sistem za spremljanje tresljajev na površini. Rezultati meritev so bili podrobno analizirani in predstavljeni zainteresirani javnosti skupaj z raznimi standardi in predpisi za še varno tresenje tal, ki veljajo v posameznih državah. Poleg tega je bil postavljen sistem za samodejno zapisovanje podatkov o tresenju tal in objavljanje teh na spletnih straneh. Rutinske mikrosezmične nadzorne meritve tresenja tal so tako postale del obratovalnega nadzora, saj so se pokazala določena pravila pri seizmičnem odzivu okoliške hribine na rudarska dela (Medved in sod., 2008). Močnejši hribinski udari so

se zgodili v marcu 2018, ko so bili poškodovani štirje rudarji, februarja 2013, ko je bilo poškodovanih šest rudarjev, pred tem pa decembra 2010, ko so bili poškodovani štirje rudarji.

Področje zakonsko predpisanega opazovanja seizmičnosti na območju večjih zbiralnikov vode je v Sloveniji urejeno s posebnim Pravilnikom o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade (Uradni list, 2003). Velika pregrada je po tem pravilniku vsaka, ki je višja od 15 m, in vse tiste, visoke med 10 in 15 m, ki izpolnjujejo še enega od pogojev (Godec in sod., 2003): dolžina krone je večja od 500 m, prostornina zbiralnika je večja od 1 milijona m³, maksimalna visoka voda, ki vpliva na pregrado, je večja od 2000 m³/s, pregrada, ki je imela težke pogoje temeljenja ali pregrada neobičajne konstrukcije. Pravilnik predpisuje najmanjše število seizmografov, vrsto opreme in način njene postavitve glede na velikost pregrade ter način opazovanja in poročanja. Skladno s tem pravilnikom so s sistemom seizmološkega opazovanja opremljene vse pregrade hidroelektrarn na rekah Drava, Sava in Soča ter še nekatere druge pregrade vodnih zadrževalnikov (Godec in sod., 2003). Za zdaj v Sloveniji še ne poznamo primera inducirane seizmičnosti zaradi zbiralnikov vode. So pa količine vode v teh zbiralnikih v primerjavi s primeri, opisanimi iz tujine, seveda razmeroma majhne.

Sklepne misli

Inducirano seizmičnost povzročajo različne gospodarske dejavnosti, ki spreminjajo napetosti v Zemljini skorji. Posledice pa pogosto niso sorazmerne s posegom v naravno okolje, zato so predmet podrobnega znanstve-

nega proučevanja, saj ni vedno lahko razlikovati med naravno in inducirano seizmičnostjo. Prav na področju opazovanja inducirane seizmičnosti je bil z razvojem seizmološke merilne opreme in računalniških orodij za obdelavo in analizo podatkov v zadnjih letih dosežen veliki napredek k boljšemu razumevanju tega pojava.

Viri in literatura

1. Bajc, J., Živčić, M., Gostinčar, M., 2004. Seizmična aktivnost v Šaleški dolini spomladi 2002. Potresi v letu 2002. Agencija RS za okolje, 55–70.
2. Gaithe, B., Ugalde, A., Villaseñor, A., Blanch, E., 2016. Improving the location of induced earthquakes associated with an underground gas storage in the Gulf of Valencia. [Spain]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 254, 46–59.
3. Godec, M., Vidrih, R., Sinčič, P., 2003. Opazovanje seizmičnosti na območju velikih pregrad. *Ujma*, 17–18, 208–217.
4. González, P. J., Tiampo, K. F., Palano, M., Cannavo, F., Fernandez, J., 2012. The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading. *Nature Geoscience*, 5, 821–825.
5. Gosar, A., 2005. Možnost zmanjšanja učinka tople grede z geološkim skladiščenjem CO₂ globoko pod Zemljinim površjem. *Ujma*, 19, 201–205.
6. Grandin, R., Vallee, M., Lacassin, R., 2017. Rupture process of the Oklahoma Mw 5.7 Pawnee earthquake from Sentinel-1 InSAR and seismological data. *Seismol. Res. Lett.*, 88/4, 996–1004.
7. Guha, S. K., 2000. *Induced Earthquakes*. Kluwer Academic Publishers, 314 str., Dordrecht.
8. Joel, L., 2017. How to trigger a massive earthquake. *EOS – Earth & Space Science News*, 98/12, 4–5.
9. Foulger, G. L., Wilson, M., Gluyas, J., Julian, B. R., Davies, R., 2017. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, doi: 10.1016/j.earscirev.2017.07.008.
10. Meier, P. M., Rodríguez, A. A., Bethmann, F., 2015. Lessons learned from Basel: New EGS projects in Switzerland using multistage stimulation and a probabilistic traffic light system for the reduction of seismic risk. *Proceedings of World Geothermal Congress*, 1–8, Melbourne.
11. Uradni list RS, 2003. Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade. Uradni list RS, št. 92/99 in 44/03, Ljubljana.
12. Kundu, B., Vissa, N. K., Gahalaut, V. K., 2015. Influence of anthropogenic groundwater unloading in Indo-Gangetic plains on the 25 April 2015 Mw 7.8 Gorkha, Nepal earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 10607–10613.
13. Mayer, J., Mavec, M., Zadnik, I., Lah, R., 2002. Spremljanje rudarsko induciranih seizmičnih pojavov v Premogovniku Velenje. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 49/1, 51–60.
14. Medved, M., Dervarič, E., Vižintin, G., Likar, J., Mayer, J., 2008. Analysis of seismic events at the Velenje coal mine. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 55/4, 464–475.
15. Mendecki, A. J., 1997. *Seismic monitoring in mines*. Chapman and Hall, 262 str., London.
16. Terakawa, T., Miller, S. A., Deichmann, N., 2012. High fluid pressure and triggered earthquakes in the enhanced geothermal system in Basel, Switzerland. *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, 117.
17. Yeats, R. S., Sieh, K., Allen, C. R. 1997. *The geology of earthquakes*. Oxford University Press, 568 str., Oxford.
18. Yeck, W. L., Hayes, G. P., McNamara, D. E., Rubinstein, J. L., Barnhart, W. D., Earle, P. S., Benz, H. M., 2016. Oklahoma experiences largest earthquake during ongoing regional wastewater injection hazard mitigation efforts. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 711–717.
19. Wikipedia, 2017. Induced seismicity. https://en.wikipedia.org/wiki/Induced_seismicity
20. Živec, T., 2005. Analiza potresne dejavnosti na območju Premogovnika Velenje. Diplomsko delo, Naravoslovnotehniška fakulteta, 69 str., Ljubljana.