

Primljen / Received: 12.11.2025.

Ispravljen / Corrected: 14.12.2025.

Prihvaćen / Accepted: 14.12.2025.

Dostupno online / Available online: 15.12.2025.

Preliminarna inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja geohazarda pokrenutih Petrinjskom serijom potresa 2020.-2021.

Autori:

Prof.dr.sc. **Snježana Mihalić Arbanas**, dipl.ing.rud.

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

snjezana.mihalic@rgn.unizg.hr

Autor za korespondenciju

Prof.emer.dr.sc. **Željko Arbanas**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Rijeci

Građevinski fakultet

zeljko.arbanas@gradri.uniri.hrDoc.dr.sc. **Sanja Bernat Gazibara**, dipl.ing.rud.

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

sanja.bernat@rgn.unizg.hrIzv.prof.dr.sc. **Martin Krkač**, dipl.ing.rud.

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

martin.krkač@rgn.unizg.hr

Prethodno priopćenje

Snježana Mihalić Arbanas, Željko Arbanas, Sanja Bernat Gazibara, Martin Krkač

Preliminarna inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja geohazarda pokrenutih Petrinjskom serijom potresa 2020.-2021.

Tijekom petrinjske serije potresa 2020. – 2021. i glavnog potresa 29.12.2020. u 12:19 sati s epicentrom u Petrinji (magnituda $ML = 6,2$ i maksimalne horizontalna akceleracije $0,4 < PGA_{site} < 0,6$ g) aktivirano je više vrsta geohazarda. U radu se opisuju preliminarna inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja koja su provedena neposredno nakon glavnog potresa, u približnom trajanju od oko pola godine, kako bi se omogućila procjena utjecaja katastrofalnog potresa u obliku procjene rizika za cijelo područje zahvaćeno katastrofom. Glavni su rezultati opisanih preliminarnih istraživanja karte geohazarda s prikazom inventara pojava geohazarda i zoniranja prema prostornoj vjerojatnosti pojave geohazarda, koje su izrađene za područje približne veličine 3600 km^2 . Istaknuta je i njihova dugoročna primjena za seizmičko-geotehničko mikrozoniranje na području pogođenom katastrofalnim potresom. Zaključeno je da su preliminarna inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja geohazarda pokrenutih potresom bila nužna, kako za upravljanje krizama nakon katastrofe, tako i za upravljanje rizicima od budućih katastrofalnih potresa, jer predstavljaju alat za ublažavanje i prevenciju koji je moguće kontinuirano primjenjivati i u prostornom planiranju na svim razinama.

Ključne riječi:

Petrinjska serija potresa, likvefakcija, urušne vrtače, klizišta, karte geohazarda, upravljanje rizicima

Research Paper

Snježana Mihalić Arbanas, Željko Arbanas, Sanja Bernat Gazibara, Martin Krkač

Preliminary engineering geological and geotechnical investigation of geological hazards induced by Petrinja Earthquake Series 2020-2021

Following the earthquake with an epicentre in Petrinja (magnitude $ML = 6.2$ and maximum horizontal accelerations of $0.4 < PGA_{site} < 0.6$ g), several types of geohazards were triggered. This paper describes preliminary engineering-geological and geotechnical investigations conducted immediately after the main earthquake, over an approximate period of six months, in order to enable an assessment of the impact of the catastrophic earthquake in the form of risk evaluation for the entire affected area. The main results of these preliminary investigations are geohazard maps showing an inventory of geohazard occurrences and zoning based on the spatial probability of geohazard occurrence, produced for an area of approximately $3,600 \text{ km}^2$. Their long-term application for seismic-geotechnical microzonation of the area affected by the catastrophic earthquake is also highlighted. It is concluded that the preliminary engineering-geological and geotechnical investigations of earthquake-induced geohazards were essential both for post-disaster crisis management and for managing the risk of future catastrophic earthquakes, as they represent a mitigation and prevention tool that can be continuously applied in spatial planning at all levels.

Key words:

Petrinja Series of Earthquakes, liquefaction, sinkholes, landslides, geohazard maps, risk management

1. Uvod

Tijekom mnogih potresa zapaženo je da na visinu i rasprostranjenost šteta značajno utječu lokalni uvjeti tla koji proizlaze iz lokalnog sastava tla, reljefa i pokrenutih opasnih (hazardnih) procesa [1, 2]. Prilikom jakih potresa magnitude $M > 6$ pod određenim okolnostima uslijed valova velikih amplituda nastaju hazardni procesi koji se u stručnoj literaturi nazivaju seizmički inducirani učinci, pod čime se podrazumijeva aktiviranje procesa klizanja, odronjavanja/prevrtanja, bočnog razmicanja i likvefakcije. Zadatak inženjerskih geologa i geotehničara jest evidentirati te procese neposredno nakon potresa, kako bi se mogla procijeniti šteta koju su prouzročili. Također je važno znati da određeno vrijeme nakon potresa ovi procesi mogu i dalje nastajati i pokretati druge štetne procese te na taj način dodatno ugrožavati ljude i materijalna dobra na zahvaćenom području. Sustavna evidencija hazardnih procesa i pojava nakon potresa na području na koje je potres utjecao nužna je za definiranje mjere zaštite ljudi, a i za procjenu mogućnosti za provedbu mjera oporavka i sanacije.

Prema izvješću Seizmološke službe RH, petrinjska potresna serija započela je 28. prosinca 2020., godine kada se u 6 sati i 28 minuta dogodio potres magnitude $M 5,0$ prema Richteru s epicentrom u blizini Petrinje [3, 4]. Ubrzo nakon toga uslijedila su dva potresa $M 4,7$ i $M 4,1$ i niz slabijih potresa istog dana. Ti su potresi prethodili najjačem potresu koji se dogodio naredni dan, 29. prosinca 2021. u 12 sati i 19 minuta, čija je jakost prema Richteru iznosila $M 6,2$, s epicentrom u selu Strašnik na udaljenosti oko 6 km jugozapadno od središta Petrinje. U epicentralnom području procijenjene vrijednosti vršnog ubrzanja tla (PGA) za temeljnu stijenu bile su od 0,29 do 0,44 g. Pretpostavlja se da su rezultirajuće vrijednosti vršnog ubrzanja tla (PGA_{site}) vjerojatno bile između 0,4 i 0,6 g, ovisno o lokalnim karakteristikama lokacije i udaljenosti od epicentra [5]. Intenzitet ovog potresa preliminarno je procijenjen na VIII-IX° EMS ljestvice, a osjetio se diljem Hrvatske i u susjednim zemljama. Glavnim potresom inicirani su i drugi geohazardni procesi (likvefakcija, klizišta, vrtače) koji su povećali štete od potresa [6-8]. U okviru projekta nazvanog "Geološka, inženjerskogeološka, hidrogeološka i geofizička istraživanja za potrebe definiranja djelotvornog koncepta organizirane obnove na područjima pogođenim potresom" Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu i Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci izradili su "Studiju o seizmički induciranim efektima Petrinjske potresne serije 2020.-2021. – preliminarna identifikacija rizika" [9] kao stručnu podlogu za izradu Programa mjera obnove zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije (NN 99/2021) prema Sporazumu između Ministarstva prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine Republike Hrvatske te fakulteta i komora. Sastavni je dio Studije set karata koje predstavljaju tematske slojeve prirodnih ograničenja u odnosu na seizmički inducirane pojave likvefakcije, vrtača i klizišta koja se odnose na prostorno

uređenje i gradnju. Set karata s prikazom prirodnih opasnosti u obliku evidencija pojava i zona podločnosti namijenjen je za primjenu za razvoj hitnih mjera i mjera za obnovu građevina. Sve tematske karte s podacima o pojavama geohazarda pokrenutim Petrinjskom potresnom serijom nastale su kao rezultat preliminarne inženjerskogeoloških istraživanja te u skladu s tim predstavljaju preliminarnu informaciju koja je ključna za daljnja geotehnička istraživanja.

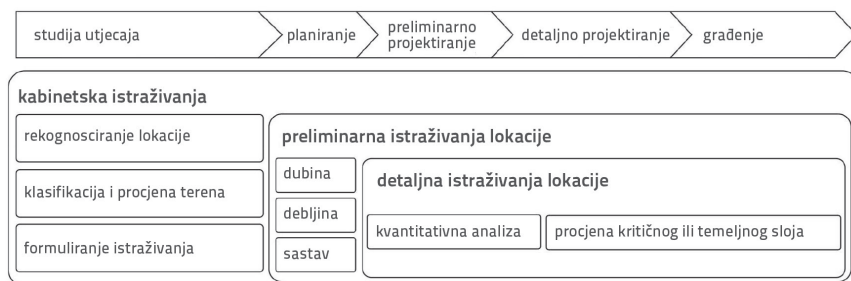
U članku se sažeto opisuju potresom inducirani hazardi Petrinjske serije potresa 2020.-2021. koji su evidentirani neposredno nakon potresa i u idućih šest mjeseci te njihov utjecaj na tlo. Prikazuju se inženjerskogeološke karte geohazarda izrađene za područje približne veličine 3600 km^2 , metodologija njihove izrade i preliminarne informacije koje su iz njih dobivene. Fokus je članka na načinima njihova korištenja širokog spektra korisnika nakon katastrofe, jer pokazalo se da su preliminarne inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja geohazarda pokrenutih potresom bila nužna, kako za upravljanje krizama nakon katastrofe, tako i za upravljanje rizicima od budućih katastrofalnih potresa. Daje se sveobuhvatni prikaz primjene karata geohazarda kao neizostavnih alata za primjenu mjera civilne zaštite za ublažavanje i prevenciju, a isti se alati također koriste i u prostornom planiranju na svim razinama, čime višestruko doprinose održivoj obnovi i odgovornom i održivom razvoju.

2. Općenito o inženjerskogeološkim istraživanjima u funkciji upravljanja katastrofama

Inženjerska geologija definirana je kao znanost posvećena: a) istraživanju, proučavanju i rješavanju inženjerskih i ekoloških problema koji mogu nastati kao rezultat interakcije između geologije i ljudskih radova ili aktivnosti; i b) predviđanju i razvoju mjera za sprječavanje ili sanaciju geoloških opasnosti [10]. Predviđanje geohazarda može se provoditi tijekom kabinetskih istraživanja (engl. *desk study*) koja prethode planiranju i projektiranju građevina, a također i kao regionalna istraživanja većih područja (općina, gradova, država i sl.) za potrebe npr. prostornog planiranja ili upravljanja resursima. U ovom poglavlju prikazuju se regionalna inženjerskogeološka istraživanja provedena sa svrhom predviđanja geohazarda na većem području oko epicentra glavnog potresa iz Petrinjske serije potresa za potrebe planiranja geotehničkih istraživanja, a također za upravljanje katastrofama.

2.1. Geotehnički zahtjevi za različite faze projekata

Preliminarna geotehnička istraživanja, zajedno s detaljnim geotehničkim istraživanjima namijenjena su za prikupljanje podataka za izradu geotehničkog modela koji uključuje interpretaciju prostornog rasporeda materijala tla i stijena, uključujući i podzemne vode, kao i definiranje parametara tla/stijena na dvodimenzionalnom presjeku ili u trodimenzionalnom



Slika 1. Koraci učinkovitog prikupljanja i korištenja geotehničkih podataka u svim fazama projekta [10]

prostoru. Na slici 1. vidi se da se ove vrste geotehničkih istraživanja provode u fazama od planiranja, tijekom preliminarnog i detaljnog projektiranja, a također i građenja. Inženjerskogeološka istraživanja sastavni su dio obiju vrsta geotehničkih istraživanja, a provode se sa svrhom izrade inženjerskogeološkog modela podzemlja koji je podloga za izradu geotehničkih modela.

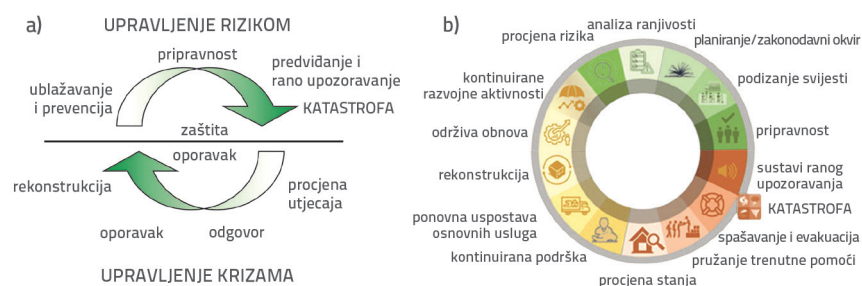
Planiranje geotehničkih istraživanja provodi se na temelju takozvanih kabinetskih istraživanja (engl. *desk study*) koja se sastoje od: rekognosciranja lokacije gradnje, klasifikacije terena s procjenom i formuliranja potrebnih istraživanja. Ova su istraživanja inženjerskogeološka istraživanja tijekom kojih se provodi: rekognosirajuće inženjerskogeološko kartiranje svih značajki šire okolice gradnje (tzv. inženjerskogeoloških uvjeta), klasifikacija terena, po potrebi zoniranje terena temeljem procjene ograničavajućih faktora kao što su geohazardni procesi i formuliranje geotehničkih istraživanja za projektiranje mjera sanacije u slučaju prisustva geohazardnih pojava. Najčešće su prisutno ograničenje za gradnju geohazardne pojave i procesi, i to kao ograničenja različitih stupnjeva, koja je najčešće moguće riješiti prilagođenim projektiranjem građevine, a samo u ekstremnim slučajevima, sprječavaju građenje na nekim lokacijama. Za tu namjenu inženjerska geologija razvija niz kartografskih alata u obliku inženjerskogeoloških karata koje prikazuju geohazardne pojave, u obliku evidencije pojedinačnih pojava (karte inventara), zona prostorne ili vremenske vjerojatnosti procesa geohazarda (karte podločnosti i karte hazarda) i zona gubitaka od geohazarda (karte rizika).

2.2. Ciklus upravljanja katastrofama

Zadaci inženjerske geologije u predviđanju i razvoju mjera za sprječavanje ili sanaciju geoloških opasnosti ovise o tome u kojoj se fazi upravljanja rizicima od katastrofa provode inženjerskogeološka istraživanja. Slika 2.a prikazuje ciklus upravljanja rizikom koji je podijeljen u dva dijela, zaštitu prije

katastrofe i oporavak nakon katastrofe. Gledano iz perspektive glavnog potresa Petrinjske serije potresa 2020.–2021., prva istraživanja geohazarda pokrenuta ovom serijom potresa bila su provedena za potrebe procjene utjecaja katastrofe, odziva i oporavka, a također i za potrebe rekonstrukcije. Nakon rekonstrukcije potreba za predviđanjem seizmički induciranih geohazarda ne prestaje, već se istraživanja geohazarda i dalje trebaju provoditi u svrhu ublažavanja i prevencije rizika, a zatim i pripravnosti, predviđanja

i ranog upozoravanja. Na slici 2.b prikazane su faze upravljanja rizicima iz Strategije upravljanja rizicima od katastrofa do 2030. godine [12]. Iz ovog ciklusa vidljive su potrebe društva u odnosu na katastrofu u cijelosti, od zahvaćenih ljudi do uprava na svim razinama. Definicije pojmova ublažavanje, prevencija, pripravnost, predviđanje i rano upozoravanje, procjena utjecaja, odgovor i oporavak i rekonstrukcija prema terminologiji UN-a [13] dane su u poglavlju 5.1. u kojemu se prikazuje način upotrebe karata geohazarda ovisno o fazi upravljanja rizicima od katastrofalnog potresa. Definicija obnove preuzeta je iz terminologije koju je objavila Stručna radna skupina UN-a za pokazatelje i terminologiju u vezi sa smanjenjem rizika od katastrofa [14].



Slika 2. Upravljanje rizicima od katastrofa: a) ciklus upravljanja rizicima i krizama [15]; b) faze upravljanja [12]

3. Potresom inducirani hazardi petrinjske serije potresa 2020. – 2021.

U ovom poglavlju prikazani su seizmički inducirani hazardi od kojih je većina posljedica glavnog potresa zbog njegove visoke magnitude. Pojave likvefakcije zabilježene su prvi put nakon 111 godina u Republici Hrvatskoj [16] i bile su vrlo brojne. Za razliku od toga zabilježeno je aktiviranje malog broja pojava klizišta, koje su bile ograničene na manji broj malih i plitkih klizišta, uglavnom u dominantno nekoherentnim materijalima, ali i na značajan broj pojava klizišta nastalih mehanizmom bočnih razmicanja. Najopasniji potresom inducirani hazard ove potresne serije predstavljale su urušne vrtače.



Slika 3. Pojave likvefakcije nastale kao posljedica glavnog potresa 29.12.2020.: a) izbacivanje pijeska kroz bunar u Letovaniću; b) oštećenje kolničke konstrukcije u Ul. Nikole Šipuš u Sisku i izbacivanje instalacija prema površini; c) stošci pijeska kraj Bresta Pokupskog; d) pukotine razmicanja tla u naselju Brest Pokupski; e) pukotina na cesti u Boku Palanječkom koja ulazi u naselje; f) pukotina nastala kao posljedica razmicanja na nasipu uz Savu u Galdovu, Sisak; g) zona likvefakcije u naselju Palanjek

3.1. Likvefakcija

Pojave likvefakcije nastale su kao posljedica glavnog potresa u Petrinji $M = 6,2$ na području gradova Petrinje, Siska i Gline i njihove okolice, pri čemu su likveficali slojevi pijesaka u fluvijalnim naslagama koje izgrađuju riječne doline Save, Kupe i Gline. Likvefakcija se definira kao nagli gubitak čvrstoće rahlih slojeva pijeska zasićenih vodom uslijed djelovanja seizmičkih valova izazvanih potresom magnitude $M = 6,0$ i veće [17–19]. Pojednostavljeno opisano, sloj pijeska ispod površine tla i ispod razine podzemne vode uslijed potresanja tijekom potresa pretvara se u tekućinu, a gornji slojevi tla izazivaju pritisak u tom trenutno tekućem sloju. Tekućina pod pritiskom izbija na površinu povlačeći za sobom pijesak i to traje sve dok se ne uspostavi ravnoteža pritiska u vremenskom razdoblju od oko jedan sat nakon nastanka potresa. Površinski čvršći slojevi tla praktično “zaplivaju” na tekućem sloju i nastupa njihovo pomicanje (bočno širenje) uslijed potresanja. Prema povijesnim zapisima, u Hrvatskoj se likvefakcija dogodila nakon Pokupskog potresa 1909. godine [16] i nikad poslije. Važno je napomenuti da slabiji potresi koji su slijedili glavni potres u Petrinjskoj seriji potresa nisu mogli izazvati novu pojavu likvefakcije jer nisu dosegli ni magnitudu niti akceleraciju koje su uvjet za ovu pojavu. U fluvijalnim naslagama rijeka Save, Kupe i Gline, pojave likvefakcije nastale su uz aktivna i napuštena riječna korita, u meandarskim sprudovima i mrtvajama zbog toga što su ti dijelovi fluvijalnog okoliša izgrađeni od likvefabilnih naslaga koje se nalaze ispod površinskih nelikvefabilnih naslaga debljine oko šest metara te su zasićene vodom zbog visoke razine podzemne vode. Potres u Petrinji imao je dovoljno veliku magnitudu da pokrene takav proces i prema našim istraživanjima ustanovljene su ukupno 53 pojave likvefakcije, i to unutar urbanih dijelova gradova Petrinje, Siska i Gline, kao i u njihovim okolnim naseljima (Brest Pokupski, Žažina, Letovanić, Palenjak, Hrastelnica, Erdedska Tišina, Dvorišće i druga). Posljedice likvefakcije očitovale su se u izbacivanju vode i pijeska i formiranju stožaca pijeska na površini terena (slika 3.a), a i izbacivanju ukopanih instalacija (slika 3.b). Najveća oštećenja likvefakcija je izazvala u naseljima Brest Pokupski (slika 3.c, 3.d) i Bok Palanječki (slika 3.e). U Naselju Brest Pokupski likvefakcija je zahvatila područje u duljini od oko 700 m i širini od oko 120 m. Uslijed potresanja dio naselja pomaknuo se po pukotini dugačkoj oko 400 metara koja se protezala kroz cijelo naselje, a koja je na mjestima prošla kroz građevine i izazivala odvajanje dijelova građevina. Dio građevina unutar likvefiranog područja “potonuo” je u tlo. U naselju Bok Palanječki dio naselja pomaknut je prema Savi za približno 30 cm, što je procijenjeno na osnovi

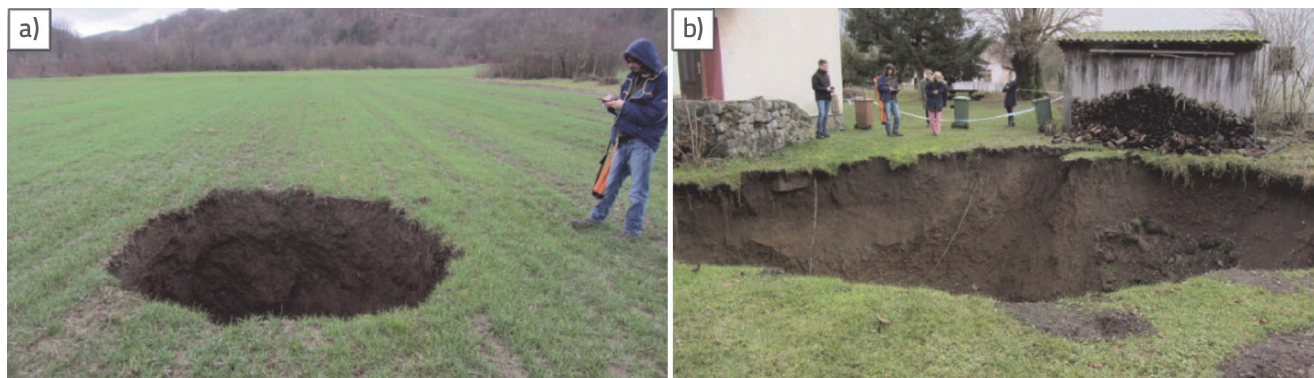
vidljivih pukotina. Područje naselja Palanjek u cijelosti je zahvaćeno likvefakcijom na području od približno 800 m duljine i širine oko 600 m (slika 3.g) i cijelo je naselje pomaknuto prema Savi za oko 20 cm. Velika šteta nastupila je i na nasipima uz Savu (slika 3.f) i Kupu. Bočno razmicanje na nasipima izazvalo je duboke pukotine koje značajno umanjuju funkcije zaštite nasipa, pa su nužno poduzeti radovi za njihovo pojačanje koje provode Hrvatske vode. Most Brest preko Kupe također je oštećen zbog likvefakcije ispod nasipa pristupnih cesta prema upornjacima mosta. Štete uslijed likvefakcije uglavnom su nastupile za vrijeme i neposredno nakon potresa, ali i dugotrajna slijezanja građevina i tla tijekom dva mjeseca nakon potresa izazvala su i dodatne manje štete na građevinama.

3.2. Klizišta i odroni

Najveći broj klizišta aktiviranih potresom nastao je mehanizmom klizanja u nasipima cesta (slika 4.a), a manji dio u prirodnom tlu i to na obalama korita rijeka. Uglavnom su aktivirana plitka klizišta čija sanacija je moguća standardnim inženjerskim metodama. Međutim, kao posljedica likvefakcije nastao je veći broj pojava klizišta mehanizmom bočnog razmicanja. Ova vrsta klizišta od sada u Republici Hrvatskoj nije evidentirana, a sada su nastala isključivo zbog pomaka tla po slojevima pijeska na većim dubinama, povezano s pojavom likvefakcije. Posljedično, ova su klizišta većih dubina, pretpostavlja se do 15 metara. Bočno se razmicanje na površini odražava otvaranjem subvertikalnih pukotina, što je dovelo do oštećenja nasipa, ali i drugih građevina, kao što su prometnice i obiteljske kuće (slika 4.b). Odronjavanje također predstavlja vrstu klizišta, a kao posljedica razornog potresa nastao je vrlo mali broj odrona. Jedan odron registriran je na prometnici (slika 4.c), a drugi veći odron dogodio se visoko u šumi iznad naselja, ali zbog svoje udaljene lokacije nije predstavljao prijetnju za ljude ili građevine.



Slika 4. Pojave klizišta nastale kao posljedica glavnog potresa 29.12.2020.: a) plitko klizište na cesti kod naselja Donji Hruševac registrirano 4.1.2021.; b) pukotina nastala bočnim razmicanjem u naselju Bok Palanječki registrirana 3. 1. 2021.; c) odron na cesti prema mjestu Pecki nastao 29.12.2020. registriran 3.1.2021.



Slika 5. a) Vrtača nastala u naselju Mečenčani usijedanjem aluvijalnih naslaga zbog propadanja u kaverne u okršenoj stijeni podloge registrirana 3.1.2021.; b) vrtača na kojoj je vidljivo proširenje vrtače nastalo dan poslije zbog urušavanja strmih stijenki

3.3. Urušne vrtače

Jedna od najopasnijih pojava nastala kao posljedica glavnog potresa su urušne vrtače koje su se manifestirale stvaranjem rupa okruglog ili elipsastog oblika na površini (slika 5.). Do trenutka izrade Studije [9], istraživači s Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci ukupno su zabilježili 128 vrtača koje su nastale uslijed prirodnih uzroka i dvije vrtače koje su nastale kao posljedica ispiranja materijala u blizini komunalne infrastrukture. Promjeri sedam vrtača nastalih u selu Mečenčani (Općina Donji Kukuruzari) neposredno nakon glavnog potresa, do 5. siječnja 2021. godine, su 1,5 do 10-ak metara. Najveća vrtača promjera oko 15 do 20 metara nastala je 6. siječnja 2021. godine od 12 do 14 sati. U razdoblju od samo nekoliko mjeseci nakon glavnog potresa nastalo je više desetaka novih pojava urušnih vrtača na tom području. S obzirom na to da je pojava vrtača vezana za područje specifične geološke građe materijala na površini i plitko ispod površine, ova je opasnost prisutna samo na ograničenom području pogođenom potresom koje je detaljnije opisano u poglavlju 4.2, a vidljivo je na slici 5.b.

4. Metodologija i rezultati

Preliminarna inženjerskegeološka i geotehnička istraživanja nakon glavnog potresa Petrinjske serije potresa osmišljena su za umanjivanje opasnosti i posljedica seizmički induciranih pojava likvefakcije, klizišta i urušnih vrtača. Započela su u fazi upravljanja krizom nakon katastrofe, nastavila su se u fazi oporavka i rekonstrukcije do danas. Istovremeno se mogu provoditi u fazi ublažavanja i prevencije hazarda i rizika od istih prijetnji. U ovom poglavlju sažeto se opisuje metodologija istraživanja po kronološkom slijedu kako su provođena, a također i karte geohazarda koje su glavni rezultati ovih istraživanja, ali i nužni alati za njihovu provedbu.

4.1. Metodologija istraživanja

Slijed preliminarnih inženjerskegeoloških i geotehničkih istraživanja potresom induciranih geohazarda, pojava likvefakcije,

klizišta i urušnih vrtača kronološki je naveden u tablici 1. Započeo je 2.2.2021. godine kabinetskim istraživanjima u okviru kojih su pripremane kartografske podloge i mobilna GIS aplikacija za terensko rekognosciranje svih triju tipova geohazarda. Tijekom nekoliko mjeseci sustavno su kartirane na terenu pojedinačne pojave svih triju tipova geohazarda na području 16 gradova i općina na kojima se dogodila najveća šteta od potresa iz Petrinjske serije. U prvih šest mjeseci nakon glavnog potresa, izrađene su karte inventara geohazardnih pojava i prostorne vjerojatnosti pojava geohazarda, a zatim i karte podločnosti geohazardima koje su objavljene u "Studiji o seizmički induciranim efektima Petrinjske potresne serije 2020.-2021. – preliminarna identifikacija rizika" [9]. Svrha izrade karata podločnosti bila je dobiti cjeloviti uvid na svim lokacijama unutar istraživanih područja o vjerojatnosti svake od analiziranih pojava. Tijekom tog razdoblja kartografski podaci i informacije koristili su se za brzu procjenu rizika koju je provodila Svjetska banka s Vladom Republike Hrvatske i objavila ju je u RDNA (engl. *Rapid Damage and Needs Assessment*) izvješću [20]. Istovremeno su isti podaci korišteni za brze procjene građevinskih inženjera [21] na lokacijama na kojima su oštećeni temelji građevina i temeljno tlo. S obzirom na veliki broj korisnika karata geohazarda tijekom procjene utjecaja katastrofe, karte inventara i podločnosti geohazardima objavljene su na ISPU-u (Informacijski sustav prostornog uređenja) kako bi bile javno dostupne. Za kritične lokacije s obzirom na rizik od geohazarda, ove karte korištene su za planiranje preliminarnih i detaljnih istraživanja podzemlja (geofizičkih, geotehničkih), za donošenje odluka o sigurnom privremenom smještaju ljudi i sigurnom transportu pomoći.

Tijekom oporavka i rekonstrukcije nakon izvanrednog stanja obje vrste karata geohazarda osigurale su cjelovite informacije za izradu Programa mjera obnove zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije (NN 99/2021) u dijelu koji se odnosi na pristup obnovi vezano za preliminarna i detaljnija istraživanja lokacija. Također, podaci i informacije s karata geohazarda izrađenih 2021. godine nakon katastrofe pružaju preliminarne informacije za izradu programa detaljnijih geotehničkih istraživanja prema

Tablica 1. Metodologija preliminarnih inženjerskogeoloških i geotehničkih istraživanja nakon katastrofalnog glavnog potresa iz petrinjske serije potresa

Faza upravljanja katastrofama		Metode preliminarnih inženjerskogeoloških i geotehničkih istraživanja	Vrijeme primjene
UPRAVLJANJE KRIZAMA	PROCJENA UTJECAJA KATASTROFE / ODGOVOR NA KATASTROFU	kabinetska istraživanja pripreme kartografskih podloga (geološke i morfološke karte) u GIS-u i za mobilnu GIS aplikaciju u svrhu pripreme za rekognoscirajuće kartiranje (evidentiranje) seizmički induciranih pojava geohazarda	siječanj 2021.
		preliminarna rekognoscirajuća kartiranja pojava geohazarda (likvefakcije, klizišta, urušnih vrtača) na terenu	siječanj - lipanj 2021.
		izrada karata inventara pojava geohazarda	veljača - lipanj 2021.
		izrada karata prostorne vjerojatnosti pojava geohazarda (karata podložnosti geohazardima)	travanj - lipanj 2021.
		objava karata geohazarda na ISPU	lipanj 2021.
		korištenje karata geohazarda kao preliminarne informacije za brzu procjenu rizika na državnoj razini, za RDNA izvješće [18]	veljača - travanj 2021.
		korištenje karata geohazarda kao preliminarne informacije o geohazardima uz brze procjene statičara	veljača 2021. - prosinac 2022.
		korištenje karata geohazarda kao preliminarne informacije za preliminarna i detaljna istraživanja podzemlja za donošenje odluka o sigurnosti ljudi i dobara tijekom izvanredne situacije	veljača - rujan 2021.
	OPORAVAK / REKONSTRUKCIJA	korištenje karata geohazarda kao preliminarne informacije za Program mjera obnove zgrada (NN 99/2021) u svrhu donošenja odluka za pristup obnovi	srpanj 2021. - rujan 2021.
		korištenje karata geohazarda kao preliminarne informacije za programe detaljnijih geotehničkih istraživanja u programu obnove	ožujak 2021. - prosinac 2025.
UPRAVLJANJE RIZICIMA	UBLAŽAVANJE I PREVENCIJA	korištenje karata geohazarda kao preliminarne informacije za seizmičko-geotehničko mikrozoniranje (u svrhu definiranja potreba)	siječanj 2024.-

spomenutom Programu mjera obnove koji se provodi od 2021. do danas.

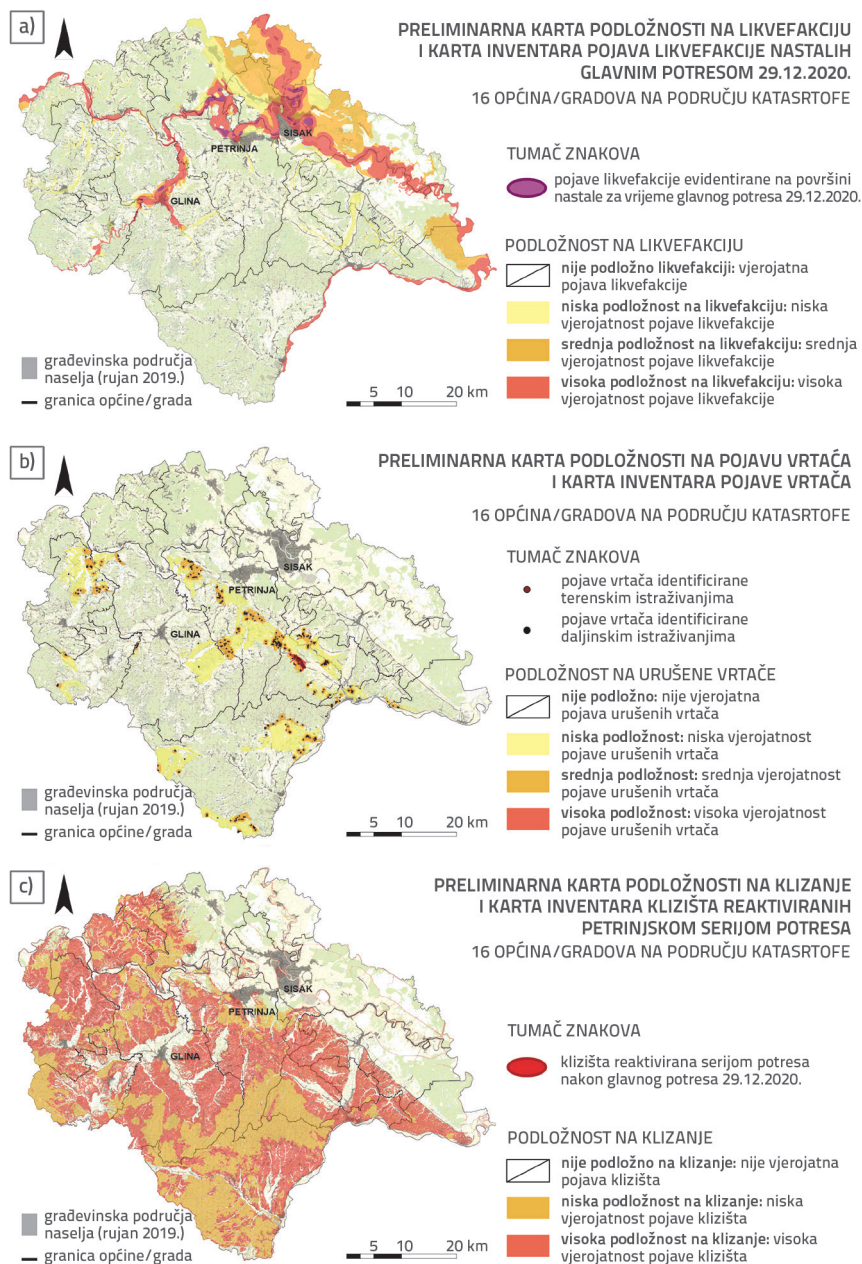
S obzirom na vremenski odmak od katastrofe, trenutno je aktualna faza upravljanja rizicima od budućih katastrofalnih potresa, tijekom koje se provode aktivnosti ublažavanja i prevencije. Glavna funkcija preliminarnih karata geohazarda jest definirati područja na kojima je potrebno izraditi detaljnije procjene za sva tri seizmički inducirana geohazarda, a također pružati iskustvene informacije o pristupima i kriterijima za seizmičko-geotehničko mikrozoniranje.

4.2. Karte geohazarda

Sadržaj karata geohazrada bili su seizmički inducirani učinci potresa ili koseizmički učinci (pojave likvefakcije, urušnih vrtača i klizišta) koji su imali utjecaj na primjenu hitnih mjera tijekom upravljanja krizama, ali i za obnovu potresom pogođenog područja, uključujući prostorno planiranje i gradnju. U okviru Studije [9] izrađeno je šest vrsta karata, tri karte inventara pojava geohazarda i tri karte podložnosti na geohazarde za područje površine 3600 km² koje obuhvaća 16 gradova i općina u Sisačko-moslavačkoj, Karlovačkoj i Zagrebačkoj županiji. Sve

karte inventara geohazardnih pojava izrađene su u krupnom mjerilu 1:5.000 kako bi se omogućio kartografski prikaz granica pojava likvefakcije i klizišta. Izuzetak predstavlja karta inventara urušnih vrtača istog mjerila na kojoj su vrtače prikazane točkom, neovisno o njihovoj veličini. Sve evidentirane pojave geohazrada pohranjene su u GIS kartografskoj bazi podataka. Sve karte podložnosti na geohazarde izrađene su primjenom heurističkih metoda koje se zasnivaju na poznavanju prirodnih preduvjeta za pojavu određenog geohazardnog procesa. Detaljan opis metoda za svaku pojedinačnu kartu podložnosti dan je u Studiji [9]. Karte podložnosti na geohazarde izrađene su u mjerilu 1:50.000 zbog nedostatka ulaznih podataka u obliku tematskih karata preduvjeta geohazarda.

Karta inventara pojava likvefakcije (slika 6.a) izrađena je na osnovi podataka prikupljenih terenskim i daljinskim istraživanjima. Prilikom terenskih istraživanja identificirane su površinske manifestacije pojave likvefakcije kao što su pješčani stošci na površini, zapunjavanje bunara pijeskom i/ili izbacivanje pijeska iz bunara, izbacivanje pijeska uz temelje građevina unutar i izvan građevina. Granice pojave likvefakcije određene su pomoću GPS-a, a naknadno su korigirane s obzirom na topografiju s Hrvatske osnovne karte mjerila 1:5.000. Veće pojave likvefakcije



Slika 6. Karte geohazarda izrađene nakon glavnog potresa Petrinjske potresne serije 2020. – 2021. u okviru Studije [9] nastale preklapom karta inventara pojava geohazarda originalnog mjerila 1:5.000 i karata podložnosti na geohazarde originalnog mjerila 1:50.000: a) karta likvefakcije; b) karta urušnih vrtača; c) karta klizišta

snimane su fotogrametrijski iz bespilotne letjelice (drona), nakon čega su izrađene georeferencirane ortofoto podloge na kojima su kartirane granice pojava likvefakcije. Karta podložnosti na likvefakciju izrađena je na temelju inventara pojava likvefakcije i sljedećih morfoloških, geoloških i hidroloških preduvjeta: geološke jedinice holocenskih aluvijalnih naslaga, površinski vodotoci i mrtvaje te nadmorske visine. Na slici 6.a prikazane su preklapljene obje karte likvefakcije koje prikazuju evidenciju svih registriranih pojava, a također i četiri zone prostorne vjerojatnosti.

Vidljivo je da su zone visoke vjerojatnosti procesa likvefakcije prisutne u fluvijalnim dolinama rijeka Save, Kupe, Gline i Une.

Karta inventara urušnih vrtača (slika 6.b) izrađena je na osnovi podataka prikupljenih terenskim i daljinskim istraživanjima, pri čemu su prikupljeni podaci o ukupno 563 vrtače. Terenska istraživanja provedena su samo na područja naselja Mečenčani i Borojevići i njihove okolice u Općini Donji Kukuruzari. Na terenu su prikupljene informacije o 125 urušnih vrtača, od kojih je približno 65 % otvoreno tijekom Petrinjske serije potresa, a oko 35 % pripada fosilnim pojavama nastalim prije 29.12.2020. Informacije o položajima vrtača na cijelom području istraživanja (ukupno 438 vrtača) prikupljene su iz Topografske karte M1:25.000, HOK-a M1:5.000 i satelitskih snimaka (Google Earth). Karta podložnosti na vrtače izrađena je na temelju inventara svih pojava urušnih vrtača i geoloških preduvjeta, odnosno geoloških jedinica s relativno velikim udjelom karbonatnih stijena. Na slici 6.b prikazane su preklapljene obje karte urušnih vrtača koje prikazuju evidenciju svih registriranih pojava, a također i četiri zone prostorne vjerojatnosti procesa urušavanja vrtača. Vidljivo je da su zone visoke vjerojatnosti prisutne u područjima Mečenčana i Borojevića, a također sjeveroistočno od naselja Donji Bjelovac (Općina Donji Kukuruzari), u okolici naselja Jošavica, Strašnik, Klinac, Veliki Šušnjar i zapadno od naselja Donje Mokrice (Grad Petrinja), u okolici naselja Velika Graduša (Općina Sunja), južno od naselja Gledići i u okolici naselja Bekići (Općina Gvozdo).

Karta inventara klizišta (slika 6.c) izrađena je na osnovi podataka prikupljenih terenskim istraživanjima nakon glavnog potresa, tijekom kojih su kartirane granice klizišta, interpretirana je vrsta materijala

i stanje aktivnosti klizišta te je procijenjena opasnost i rizik koji predstavljaju. Pozicioniranje granica klizišta provedeno je s pomoću GPS-a te je korigirano s obzirom na topografsku podlogu mjerila 1:5.000. Inventar klizišta sadrži 65 klizišta površine od 15 m² do 13.300 m² (najveće klizište u Prnjavoru Čuntićkom), a prosječna površina klizišta je oko 1.100 m². S obzirom na mehanizam, oko 85 % pojava predstavlja klizanje u užem smislu (došlo je do razvoja klizne plohe na kojoj materijali imaju rezidualne parametre čvrstoće), 8 % predstavlja bočno razmicanje

(klizanje čvršćeg, kompetentnog, materijala po materijalu manje čvrstoće, nastalo uslijed pojave likvefakcije), 6 % su pojave puzanja (nije došlo do sloma materijala i razvoja klizne plohe) a 1 % predstavlja tečenje (materijal u klizanju se ponaša kao viskozni fluid). Od ukupnog broja klizišta, oko 52 % uzrokuje ili predstavlja potencijalnu štetu na prometnicama, oko 25 % uzrokuje ili predstavlja potencijalnu štetu na obiteljskim kućama, a oko 23 % uzrokuje štetu na poljoprivrednim i šumskim područjima. S obzirom na stanje aktivnosti i utjecaj potresa, sva identificirana klizišta interpretirana su kao trenutačno neaktivna u trenutku kartiranja, što znači da su mirovala, ali pretpostavljeno je da su reaktivirana glavnim potresom M 6,2, odnosno u razdoblju od tri mjeseca nakon njega. Za trenutačno neaktivna klizišta može se očekivati promjena stanja aktivnosti u reaktivirano stanje uslijed intenzivnijih oborina ili potresanja tijekom budućih potresa. Za trenutačno neaktivna klizišta karakteristične su česte izmjene faza mirovanja i ubrzanog gibanja te zbog toga predstavljaju visoku opasnost i rizik za ljude i materijalna dobra u neposrednoj okolini klizišta. Karta podločnosti na klizanje izrađena je na temelju inventara pojava klizišta i morfoloških i geoloških preduvjeta u kombinaciji s korištenjem zemljišta, pri čemu su analizirani nagib terena, geološke jedinice te prisutnost šumskog pokrivača. Na slici 6.c prikazane su preklapljene obje karte klizišta koje prikazuju evidenciju svih registriranih pojava, a također i tri zone prostorne vjerojatnosti procesa klizanja i tečenja. Vidljivo je da su zone visoke vjerojatnosti prisutne u velikom dijelu brdovitog područja, što je također posljedica i metode procjene, jer preciznijim bi se procjenama zastupljenost vjerojatnosti na klizanje značajno smanjila.

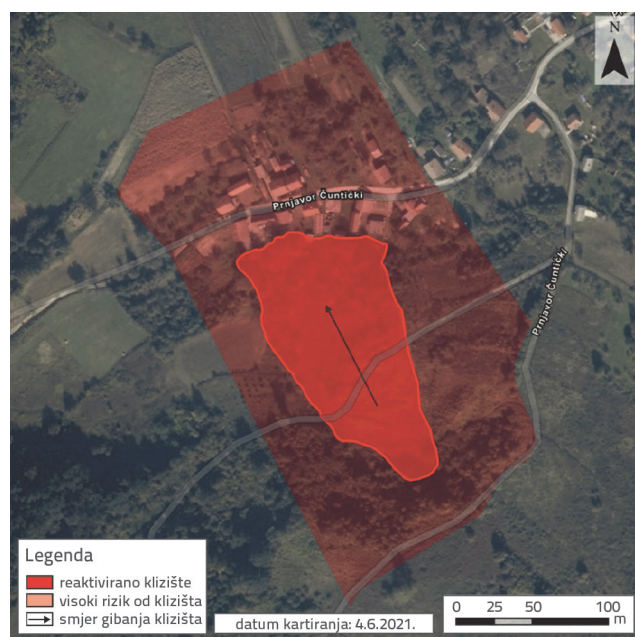
5. Primjena karata geohazarda

Karte geohazarda izrađene su na razini preliminarne informacije o seizmički induciranim učincima, pojavama likvefakcije, urušnih vrtača i klizišta, namijenjene prvenstveno stručnjacima, inženjerskom geolozima i geotehničarima za preliminarne procjene uvjeta na pojedinim lokacijama (kabinetska istraživanja, slika 1.) i izrade programa za detaljna istraživanja. U ovom poglavlju opisuje se kako su korištene u fazama upravljanja krizama nakon katastrofalnog potresa u svrhu oporavka od katastrofe, za procjenu utjecaja katastrofe, odgovor na katastrofu, oporavak i rekonstrukciju. Također se mogu koristiti kao preliminarne informacije u fazi upravljanja rizicima prije katastrofe u svrhu zaštite od katastrofe. U ovom poglavlju navodi se njihova primjena za ublažavanje i prevenciju seizmički induciranih rizika od likvefakcije, urušnih vrtača i klizišta na području pogođenom potresom, a i šire u Republici Hrvatskoj.

5.1. Primjena u fazi procjene utjecaja i odgovora na katastrofu

Prema terminologiji UN-a [13], odgovor na katastrofu (slika 2.a) podrazumijeva aktiviranje hitnih službi i javne pomoći tijekom ili neposredno nakon katastrofe da se spase životi, smanji utjecaji

na zdravlje, osigura sigurnost i zadovolje osnovne egzistencijalne potrebe pogođenih ljudi. Ova faza pretežno je usmjerena na neposredne i kratkoročne potrebe i ponekad se naziva "pomoć u katastrofi". Granica između ove faze i naknadne faze oporavka nije jasno definirana. Neke mjere odgovora, poput opskrbe privremenim smještajem i zalihama vode, mogu se provoditi i u fazi oporavka. Prema Strategiji za upravljanje rizicima RH [12], u ovoj fazi se provodi: spašavanje i evakuacija, pružanje trenutne pomoći, procjena stanja, kontinuirana podrška i ponovna uspostava osnovnih usluga.



Slika 7. Položaj reaktiviranog klizišta u Prnjavoru Čunčickom s prikazom više od 10 obiteljskih kuća koje se nalaze u nožici klizišta

Preliminarna inženjersko-geološka i geotehnička istraživanja i karte geohazarda primjenjivali su se da se smanji utjecaj na zdravlje tijekom Petrinjske serije potresa, a osobito nakon glavnog potresa da geohazardne pojave ne izazovu dodatne ljudske žrtve i ozljeđivanja ljudi. Također su primjenjivane i za osiguravanje sigurnosti i zadovoljavanje osnovnih egzistencijalnih potreba pogođenih ljudi za smještajem. Na slici 7. prikazano je jedno od reaktiviranih klizišta na području Grada Petrinje čiji su pomaci vrlo rizični zbog toga što predstavljaju rizik za 10-ak kuća u podnožju klizišta koje im prijeti zatrpavanjem. S karte klizišta jasno je vidljivo koje su kuće bile ugrožene od klizišta, iz kojih je na temelju toga bilo nužno iseliti stanovnike. U ovom je slučaju podatak s karte klizišta poslužio kao dodatan kriterij za korekciju odluke o iseljavanju na temelju brze procjene statičara budući da su kuće procijenjene kao sigurne s obzirom na stanje, odnosno nedostatak oštećenja konstrukcije. Prisustvo prijetnje od geohazarda (pojave klizišta, urušnih vrtača ili likvefakcije) dodatno je povećalo rizik za neke od zgrada, stoga je moralo biti uzeto u obzir prilikom svake brze procjene.

Drugi je primjer određivanje sigurne zone za smještaj kontejnerskog naselja kada su se karte geohazarda primijenile kao podloga za izradu programa detaljnih geofizičkih istraživanja na temelju kojih je određena sigurna zona u Mečenčanima s obzirom na urušne vrtače.

Značajna primjena karata geohazarda također je bila i sveobuhvatna brza procjena gubitaka zbog katastrofe i to u svrhu dobivanja cjelovite slike za cijelo zahvaćeno područje kada je bilo nužno u RDNA izvještaju [20] identificirati područja pogođena potresom, procijeniti učinke katastrofe i procijeniti utjecaj katastrofe po županijama, opisno i kvantitativno iskazano s procjenom troškova.

5.2. Primjena u fazi oporavka i rekonstrukcije

Prema terminologiji UN-a [13], oporavak (slika 2.a) uključuje obnovu i, gdje je to primjereno, poboljšanje građevina, sredstava za život i životnih uvjeta zajednica pogođenih katastrofom, uključujući napore za smanjenje čimbenika rizika od katastrofe. Zadatak oporavka, rehabilitacije i rekonstrukcije započinje ubrzo nakon završetka faze izvanrednog stanja i trebao bi se temeljiti na već postojećim strategijama i politikama koje olakšavaju jasne institucionalne odgovornosti za djelovanje oporavka i omogućuju sudjelovanje javnosti. Programi oporavka, zajedno s povećanom sviješću i većim angažmanom javnosti nakon katastrofe, pružaju vrijednu priliku za razvoj i provedbu mjera za smanjenje rizika od katastrofa i primjenu načela "obnoviti bolje" (engl. *build back better*). Obnova znači srednjoročnu i dugoročnu obnovu i održivu obnovu otporne kritične infrastrukture, usluga, stambenog prostora, građevina i sredstava za život potrebnih za potpuno funkcioniranje zajednice ili društva pogođenog katastrofom, u skladu s načelima održivog razvoja i "obnoviti bolje" kako bi se izbjegao ili smanjio budući rizik od katastrofa.

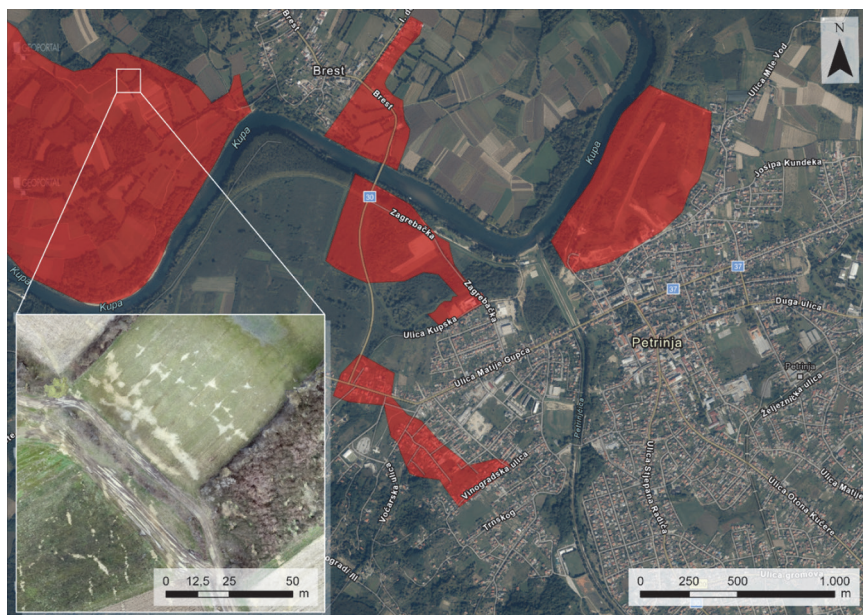
Prema Strategiji za upravljanje rizicima RH [12], u ovoj fazi upravljanja rizicima provodi se rekonstrukcija i održiva obnova. Preliminarna inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja i karte geohazarda primjenjivale su se za izradu Programa mjera obnove zgrada oštećenih potresom (NN 99/2021) kako bi se moglo predvidjeti da se u svim postupcima na pravilan način uzimaju u obzir geohazaradi i time kontinuirano sprječava njihov negativan učinak na obnavljanje građevina u svim fazama gradnje, uključujući i u fazi korištenja građevine. Na slici 8. prikazane su pojave likvefakcije kartirane 2021. godine dok su bile jasno vidljive na površini terena. Ovi kartografski podaci dovoljno su točni za precizno određivanje je li neko temeljno tlo i zgrada pretrpjelo oštećenja zbog likvefakcije.

S obzirom na to da obnova traje do danas, karte geohazarda i dalje su u funkciji davanja preliminarne informacije o pojavama geohazarda i vjerojatnosti procesa geohazarda. Naime, Studija [8] je ukazala na nužnost provedbe istražnih radova za potrebe obnove (rekonstrukcijske obnove i gradnje zamjenskih i novih građevina), ali cilj Studije nije bio definirati programe istražnih radova, već samo područja podložnosti na likvefakciju. Istražni radovi na dijelu lokacija u razdoblju neposredno nakon potresa provedeni su na osnovi prijedloga pojedinih geotehničkih tvrtki koji su zbog nedostatka znanja o geohazardima ponekad bili neodgovarajući do te mjere da su preporučivali geotehnička istraživanja likvefakcije čak i na lokacijama na kojima je pojava likvefakcije nemoguća. Stručne službe Ministarstva prostornoga uređenja, gradnje i državne imovine stoga analiziraju svaku pojedinačnu lokaciju na temelju podataka s karata geohazarda i s obzirom na tip i veličinu konstrukcije. Do danas su karte geohazarda primjenjivane za donošenje odluka o detaljnim geotehničkim istraživanjima koja se provode u okviru obnove na više od 500 lokacija. Na taj se način dodatno smanjuju rizici i od budućih katastrofa uslijed seizmički induciranih geohazarda.

Osim toga, takav način odlučivanja značajno je doprinio racionalizaciji potrebnih istraživanja, ali i brzini u provođenju radova obnove.

5.3. Primjena u fazi ublažavanja i prevencije

Opisana preliminarna istraživanja ne predstavljaju samo odgovor na neposredne posljedice katastrofe, nego i temelj za dugoročno upravljanje rizicima. Njihova primjena u seizmičko-geotehničkom mikrozoniranju i prostornom planiranju predviđena je kroz sustavan pristup smanjenju rizika od budućih potresa, kako je opisano u RDNA izvještaju [20]. Seizmičko-geotehničko mikrozoniranje za regionalnu i lokalnu primjenu treba proizvesti niz karata za svih 16 gradova/



Slika 8. Prikaz pojava likvefakcije na karti inventara likvefakcije mjerila 1 : 5.000 i na ISPU-u.

općina za potrebe planiranja korištenja zemljišta i gradnje. Karte moraju sadržavati informacije o seizmičnosti, seizmotektonici i seizmički izazvanim učincima (potresanje, klizišta, likvefakcija, vrtače) te geotehničkim parametrima. Sve treba biti izrađeno u odgovarajućem mjerilu i u skladu s relevantnim međunarodnim/europskim preporukama i standardima [22–24]. Na temelju tematskih karata seizmički induciranih geohazarda, potrebno bi bilo izraditi nove prostorne planove regionalne i lokalne razine. Na ovaj način regionalne i lokalne samouprave uzimale bi u obzir ograničenja zbog geohazarda (klizišta, likvefakcija i urušne vrtače) u statičkim i dinamičkim uvjetima. Prostorni planovi regionalne razine, izrađeni na temelju kartografskih informacija o geohazardima, potrebni su za sve županije pogođene potresom. Osim toga, principe i metode izrade preliminarnih karata geohazarda moguće je primijeniti i na drugim područjima u Republici Hrvatskoj s istim ili sličnim geomorfološkim uvjetima i geološkom građom.

6. Rasprava i zaključak

Rezultat preliminarnih inženjerskogeoloških i geotehničkih istraživanja geohazarda pokrenutih Petrinjskom serijom potresa 2020.–2021. su šest tematskih slojeva koji predstavljaju prirodna ograničenja u odnosu na seizmički inducirane efekte, pojave likvefakcije, urušnih vrtača i klizišta. Tri su tematska sloja karte evidencije pojava likvefakcije, urušnih vrtača i klizišta, a tri su tematska sloja karte podločnosti na predmetne pojave. Osnovna razlika između ovih dviju grupa tematskih slojeva jest što karte evidencije prikazuju područja gdje su nastala oštećenja na tlu, a karte podločnosti područja koja su potencijalno ugrožena ovim pojavama. Zone podločnosti mogu se smatrati (kvazi) homogenim s obzirom na geološke i geomorfološke preduvjete za nastanak analiziranih seizmički induciranih pojava, a time su to zone iste relativne opasnosti za ljude, materijalna dobra i ostalo.

Karte evidencije geoloških pojava koje su oštetile površinu tla (pojave likvefakcije, vrtača i klizišta) primjenjivane su za izradu hitnih planskih i provedbenih mjera za obnovu jer sadrže informacije o evidentiranim pojavama koje su se nastale tijekom potresa. Zbog toga su korištene za dobivanje informacija o prirodnim ograničenjima u odnosu na tlo, u procesu prostornog planiranja i projektiranja novih građevina. Na temelju karata evidencija (inventara) geoloških pojava likvefakcije propisane su mjere za obnovu zgrada koje se nalaze na zemljištima oštećenim analiziranim pojavama geohazarda. Ove mjere propisale su obavezu provođenja geotehničkih i geofizičkih istraživanja kojima se utvrđuje potencijal likvefakcije, stabilnost kosina s klizištima i potencijal stvaranja novih vrtača / urušavanja pokrova tla, odnosno obavezu istraživanja za projekte sanacija u skladu s lokalnim geotehničkim uvjetima. Na kartama su prikazana i prirodna ograničenja u prostoru u odnosu na potencijalne/moguće štetne pojave likvefakcije, klizišta, vrtače, tzv. karte podločnosti. To su karte koje prikazuju gdje postoje prirodni

preduvjeti da se navedene pojave ponove ili dogode nove geološke pojave u slučaju jakog potresa. Ove informacije potrebne su za prostorne planove nove generacije, kao i za planiranje seizmičko-geotehničkog mikrozoniranja.

Pouzdanost karata geohazarda prvenstveno ovisi o kvaliteti ulaznih podataka odnosno dostupnosti ulaznih podataka, geoloških, morfoloških i drugih. S obzirom na to da su ove karte izrađivane neposredno nakon potresa te da su u međuvremenu u Republici Hrvatskoj dostupni kvalitetniji podaci, preporuka je izraditi nove tematske karte za potrebe seizmičko-geotehničkog mikrozoniranja u krupnijem mjerilu.

Preliminarna inženjerskogeološka i geotehnička istraživanja provedena nakon Petrinjske serije potresa 2020.–2021. rezultirala su kartama geohazarda koje su se pokazale da su ključan i nezamjenjiv alat za razumijevanje rasprostranjenosti i intenziteta seizmički induciranih geohazarda na području od približno 3.600 km². Sustavna identifikacija pojava likvefakcije, klizišta i urušnih vrtača omogućila je izradu tematskih karata koje su služile kao temeljni alat za brzo donošenje odluka tijekom kriznog upravljanja te za planiranje obnove i sanacije, čemu i danas služe. Korištenje tih preliminarnih karata od strane širokog spektra dionika – od operativnih službi i projektanata do donositelja odluka i tijela prostornog uređenja – potvrđuje njihovu važnost u procjeni rizika, određivanju prioriteta aktivnosti obnove i definiranju potreba za daljnjim detaljnim geotehničkim istraživanjima. Time se potvrđuje da su ovakva istraživanja nužna ne samo za oporavak i sanaciju nakon katastrofalnog događaja (u fazama upravljanja krizama), već i za izgradnju otpornijih zajednica te održiv i siguran razvoj prostora, ako se koriste u fazama upravljanja rizicima.

Dugoročno gledano, znanstvena vrijednost ovih istraživanja ogleda se u mogućnosti njihovog integriranja u strategije seizmičko-geotehničkog mikrozoniranja, čime se podiže razina otpornosti infrastrukture i smanjuje ranjivost zajednica. Ovaj rad naglašava važnost interdisciplinarnog pristupa te kontinuiranog praćenja geohazarda kao sastavnog dijela odgovornog upravljanja prostorom. Zaključno, preliminarna istraživanja provedena nakon Petrinjske serije potresa ne samo da su bila nužna za upravljanje krizom, već su postavila temelje za dugoročno smanjenje seizmičkih rizika, čime doprinose održivom razvoju i sigurnosti društva.

Zahvala

Članak je izrađen u okviru institucionalnog istraživačkog projekata Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu "Primjena inženjerskogeoloških istraživanja za održivi razvoj kroz smanjenje rizika od geohazarda u Republici Hrvatskoj" (GEO-RIZ) financiranog iz NPOO sredstava. Autori zahvaljuju svim suradnicima koji su sudjelovali u izradi "Studije o seizmički induciranim efektima Petrinjske potresne serije 2020.–2021. – preliminarna identifikacija rizika" Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.

LITERATURA

- [1] Mihalić, S., Oštrić, M., Krkač, M.: Seismic Microzonation: A Review of Principles and Practice, *GEOFIZIKA*, 28 (2011), pp. 5–20.
- [2] Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, ISSMGE: Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards. The Japanese Geotechnical Society, 1999.
- [3] Herak, M., Herak, D.: Properties of the Petrinja (Croatia) Earthquake Sequence of 2020–2021–Results of Seismological Research for the First Six Months of Activity, *TECTONOPHYSICS*, 853 (2023), pp. 229885, doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229885
- [4] Stipčević, J., Dasović, I., Herak, D., Herak, M., Latečki, H., Sećanj, M., Tomljenović, M.: The Great Petrinja Earthquake-A Year After, https://www.pmf.unizg.hr/geof/en/popularization_of_geophysics/the_petrinja_2020_mw6.4_earthquake_series, 26.01.2022.
- [5] Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivančić, I., Bjelotomić Oršulić, O., Korbar, T., Sarhosis, V.: Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020 – Preliminary Multidisciplinary Research, *REMOTE SENSING*, 13 (2021), pp. 1095, doi.org/10.3390/rs13061095
- [6] Karimzadeh, S., Matsouka, M.: A Preliminary Damage Assessment Using Dual Path Synthetic Aperture Radar Analysis for the M 6.4 Petrinja Earthquake (2020), Croatia, *REMOTE SENS*, 13 (2021) 12, pp. 2267, doi.org/10.3390/rs13122267
- [7] Atalić, J., Demšić, M., Baniček, M., Uroš, M., Dasović, I., Prevolnik, S., Kadić, A., Šavor Novak, M., Nastev, M.: The December 2020 Magnitude (Mw) 6.4 Petrinja Earthquake, Croatia; Seismological Aspects, Emergency Response and Impacts. *BULL EARTHQ ENG*, 21 (2023), pp. 5767–5808.
- [8] Šumanovac, F., Pekaš, Ž.: Modelling Cover-Collapse Sinkholes That Appeared after the M6.2 Petrinja Earthquake in Croatia Using Electrical Resistivity Tomography Data, *SUSTANABILITY*, 15 (2023) 2, pp. 1124, doi.org/10.3390/su15021124
- [9] Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Rijeci Građevinski fakultet: Studija o seizmički induciranim efektima Petrinjske potresne serije 2020.–2021. – preliminarna identifikacija rizika. Knjiga 1. Kartografski podaci o likvefakciji, klizištima, podzemnoj vodi i urušnim vrtačama u GIS-u kao tematski slojevi prirodnih ograničenja vezanih uz tlo za primjenu u prostornom planiranju, Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, <https://katalog.mgipu.hr/service/api/public/metadata/prilog/c0017406-6f14-46a3-8de5-c9403f56aa60/22526>, 19.5.2025.
- [10] IAGG: Statutes, <https://iaeg.info/wp-content/uploads/2018/12/iaeg-statutes.pdf>, 29.11.2025.
- [11] Look, B.G.: Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables, Second Edition. CRC Press, 2014.
- [12] Hrvatska platforma za smanjenje rizika od katastrofa: Strategije upravljanja rizicima od katastrofa do 2030. godine, MUP Ravnateljstvo civilne zaštite https://civilna-zastita.gov.hr/UserDocsImages/CIVILNA%20ZA%20C5%A0TITA/PDF_ZA%20WEB/Strategija_i_AkcijskiPlan_katastrofe_rizici.pdf, 29. 11. 2025.
- [13] United Nations International Strategy for Disaster Reduction, UNISDR: UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. Geneva: UNISDR, 2009.
- [14] UN Expert Working Group on Indicators and Terminology Relating to Disaster Risk Reduction: Report of the Open Ended Intergovernmental Expert Working Group on Indicators and Terminology Relating to Disaster Risk Reduction. Geneva: United Nations General Assembly, 2016.
- [15] FAO Subregional Office for Southern and East Africa Harare: Drought Impact Mitigation and Prevention in the Limpopo River Basin, Rome: Food and Agriculture Organization of the UN, 2004.
- [16] Mohorovićić, A. Godišnje izvješće zagrebačkog meteorološkog opservatorija za godinu 1909. Godina IX, dio IV. – polovina 1. Potres od 8. X. 1909., 1910.
- [17] Szavits-Nossan, A.: Kontroverze oko likvefakcije, IV. kongres Saveza društava za seizmičko građevinarstvo Jugoslavije, Cavtat, pp. 117–124, 1986.
- [18] Ishihara, K.: Stability of Natural Deposits During Earthquakes, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, pp. 321–377, 1986.
- [19] Idriss, I. M., Boulanger, R. W.: Soil Liquefaction During Earthquakes. Monograph MNO–12, Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 2008.
- [20] Bogaerts, V.R., Ivos, S., Katic, K., Orsanic, D., Stanton-Geddes, Z., Uhliar, Z.: Croatia December 2020 Earthquake – Rapid Damage and Needs Assessment, Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/311901608097332728>, 29. 11. 2025.
- [21] Uroš, M., Šavor Novak, M., Atalić, J., Sigmund, Z., Baniček, M., Demšić, M., Hak, S.: Procjena oštećenja građevina nakon potresa – postupak provođenja pregleda zgrada. *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 12, pp. 1089–1115, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2969.2020>
- [22] Youd, T.L., Perkins, D.M.: Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential, *J GEOTECH ENG DIV*, 104 (1978) 4, doi. org/10.1061/AJGEB6.0000612
- [23] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine: State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and its Consequences. Washington, DC: The National Academies Press, 2021, doi.org/10.17226/23474
- [24] DRM – World Institute for Disaster Risk Management: Seismic Microzonation for Municipalities, Manual, Republic of Turkey, Ministry of Public Works and Settlement, General Directorate for Disaster Affairs, https://eqe.bogazici.edu.tr/sites/eqe.boun.edu.tr/files/uploaded/merm_manual.pdf, 29. 11. 2025.