



Europska unija
Zajedno do fondova EU



Operativni program
**KONKURENTNOST
I KOHEZIJA**



Izrada:

Centar Građevinskog Fakulteta d.o.o.
Sveti Duh 129, 10000 Zagreb
OIB: 51108551424

Naručitelj:

Grad Zagreb
Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb
OIB: 61817894937

PROCJENA POTRESNOG RIZIKA NA PODRUČJU GRADA ZAGREBA

- GEOTEHNIČKI ELABORAT -

Projekt:

Multisenzorsko zračno snimanje Republike Hrvatske
dio b: Potresni rizik na području grada Zagreba

Aktivnost:

Aktivnost 2:

Definiranje potresnog hazarda na području grada Zagreba

Broj T.D.:

GEL-069/2023

Voditelj izrade:

izv.prof.dr.sc. Mario Bačić, mag.ing.aedif.

Suradnici:

izv.prof.dr.sc. Lovorka Librić, mag.ing.aedif.
Vedran Pavlić, dipl.ing.građ.
Marijan Car, dipl.ing.geod.
Nicola Rossi, mag.ing.aedif.
Stjepan Matić, mag.ing.aedif.

Direktorica:

prof.dr.sc. Danijela Jurić Kaćunić, dipl.ing.građ.

Mjesto i datum:

Zagreb, rujan 2023.

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



NARUČITELJ: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

PROJEKT: Potresni rizik na području grada Zagreba

AKTIVNOST: Definiranje potresnog hazarda na području grada Zagreba

ELABORAT: Geotehnički elaborat

BROJ T.D.: GEL-069/2023

1 OPĆI DIO



I. SADRŽAJ DOKUMENTA

1	OPĆI DIO.....	2
	I. SADRŽAJ DOKUMENTA.....	3
	II. IZVADAK IZ SUDSKOG REGISTRA.....	4
	III. RJEŠENJE O IMENOVANJU VODITELJA IZRADE ELABORATA.....	9
	IV. POTVRDA O UPISU U IMENIK OVLAŠTENIH INŽENJERA	10
2	TEHNIČKI DIO	11
2.1.	OPĆENITO O PROJEKTU	12
2.2.	ZNAČAJ GEOTEHNIČKOG POTRESNOG INŽENJERSTVA	14
2.3.	PREGLED RELEVANTNIH PODLOGA.....	17
2.4.	SEIZMIČKA MIKROZONACIJA.....	22
2.5.	AMPLIFIKACIJA POTRESNOG SPEKTRA – KATEGORIZACIJA TLA PREMA EC8.....	29
2.6.	LIKVEFAKCIJSKI POTENCIJAL GRADA ZAGREBA	43
2.7.	POTENCIJAL KLIZANJA TLA U GRADU ZAGREBU.....	57
2.8.	ZAKLJUČAK SA SMJERNICAMA ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA	64

Napomena: slika aktivnog klizišta s naslovne strane je preuzeta sa denissinger.wordpress.com

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



II. IZVADAK IZ SUDSKOG REGISTRA



REPUBLIKA HRVATSKA
TRGOVAČKI SUD U ZAGREBU

Elektronički zapis

Datum: 27.09.2022

IZVADAK IZ SUDSKOG REGISTRA

SUJECJT UPISA

MBS:

080737876

OIB:

51108551424

EUID:

HRSSR.080737876

TVRTKA:

- 1 CENTAR GRAĐEVINSKOG FAKULTETA d.o.o. za projektiranje i nadzor nad gradnjom
- 1 CENTAR GRAĐEVINSKOG FAKULTETA d.o.o.

SJEDIŠTE/ADRESA:

- 1 Zagreb (Grad Zagreb)
Sveti Duh 129

ADRESA ELEKTRONIČKE POŠTE:

- 4 cgf@grad.hr
- 4 djk@grad.hr

PRAVNI OBLIK:

- 1 društvo s ograničenom odgovornošću

PREDMET POSLOVANJA:

- 1 * - projektiranje, građenje, uporaba i uklanjanje građevina
- 1 * - nadzor nad gradnjom
- 1 * - obavljanje djelatnosti upravljanja projektom gradnje
- 1 * - stručni poslovi prostornog uređenja
- 1 * - stručni poslovi zaštite okoliša
- 1 * - kupnja i prodaja robe
- 1 * - obavljanje trgovackog posredovanja na domaćem i inozemnom tržištu
- 3 * - ispitivanje usklađenost mjerila
- 3 * - ovjeravanje zakonitih mjerila
- 3 * - ispitivanje usklađenost pakovina i bocu kao mjernih spremnika
- 3 * - vodenje evidencije ovjerenih zakonitih mjerila
- 3 * - provođenje službenih mjerjenja
- 3 * - pregledavanje, popravak i ispitivanje zakonitih mjerila i/ili mjernih sustava radi pripreme za ovjeravanje
- 3 * - posredovanje u prometu nekretnina
- 3 * - poslovanje nekretninama
- 3 * - izrada elaborata stalnih geodetskih točaka za potrebe osnovnih geodetskih radova
- 3 * - izrada elaborata izmjere, označivanja i održavanja

Izrađeno: 2022-09-27 15:59:45
Podaci od: 2022-09-27

0004

Stranica: 1 od 5



IZVADAK IZ SUDSKOG REGISTRA

SUJEKT UPISA

PREDMET POSLOVANJA:

- državne granice
- 3 * - izrada elaborata izrade Hrvatske osnovne karte
- 3 * - izrada elaborata izrade digitalnih ortofotokarata
- 3 * - izrada elaborata izrade detaljnih topografskih karata
- 3 * - izrada elaborata izrade preglednih topografskih karata
- 3 * - izrada elaborata katastarske izmjere
- 3 * - izrada elaborata tehničke reambulacije
- 3 * - izrada elaborata prevodenja katastarskog plana u digitalni oblik
- 3 * - izrada elaborata prevodenja digitalnog katastarskog plana u zadalu strukturu
- 3 * - izrada elaborata za homogenizaciju katastarskog plana
- 3 * - izrada parcelacijskih i drugih geodetskih elaborata katastra zemljišta
- 3 * - izrada parcelacijskih i drugih geodetskih elaborata katastra nekretnina
- 3 * - izrada parcelacijskih i drugih geodetskih elaborata za potrebe pojedinačnog prevodenja katastarskih čestica katastra zemljišta u katastarske čestice katastra nekretnina
- 3 * - izrada elaborata katastra vodova i stručne geodetske poslove za potrebe pružanja geodetskih usluga
- 3 * - tehničko vodenje katastra vodova
- 3 * - izrada posebnih geodetskih podloga za potrebe izrade dokumenata i akata prostornog uredenja
- 3 * - izrada posebnih geodetskih podloga za potrebe projektiranja
- 3 * - izrada geodetskih elaborata stanja građevine prije rekonstrukcije
- 3 * - izrada geodetskoga projekta
- 3 * - iskolčenje građevina i izradu elaborata iskolčenja građevine
- 3 * - izrada geodetskog situacijskog nacrta izgradene građevine
- 3 * - geodetsko praćenje građevine u gradnji i izrada elaborata geodetskog praćenja
- 3 * - praćenje pomaka građevine u njezinom održavanju i izrada elaborata geodetskog praćenja
- 3 * - geodetski poslovi koji se obavljaju u okviru urbane komasacije
- 3 * - izrada projekta komasacije poljoprivrednog zemljišta i geodetski poslovi koji se obavljaju u okviru komasacije poljoprivrednog zemljišta
- 3 * - izrada posebnih geodetskih podloga za zaštićena i štićena područja
- 3 * - stručni nadzor nad:
- 3 * -- izradom elaborata katastra vodova i stručnih geodetskih poslova za potrebe pružanja geodetskih usluga



IZVADAK IZ SUDSKOG REGISTRA

SUJEKT UPISAPREDMET POSLOVANJA:

- 3 * -- tehničkim vodenjem katastra vodova
- 3 * -- izradom posebnih geodetskih podloga za potrebe izrade dokumenata i akata prostornog uređenja
- 3 * -- izradom posebnih geodetskih podloga za potrebe projektiranja
- 3 * -- izradom geodetskih elaborata stanja građevine prije rekonstrukcije
- 3 * -- izradom geodetskog projekta
- 3 * -- iskolčenjem građevina i izradom elaborata iskolčenja građevine
- 3 * -- izradom geodetskog situacijskog nacrta izgrađene građevine
- 3 * -- geodetskim praćenjem građevine u gradnji i izradom elaborata geodetskog praćenja
- 3 * -- praćenjem pomaka građevine u njezinom održavanju i izradom elaborata geodetskog praćenja
- 3 * -- izradom posebnih geodetskih podloga za zaštićena i štićena područja
- 3 * -- tehničko ispitivanje i analiza
- 3 * -- energetsko certificiranje, energetski pregled zgrade i redoviti pregled sustava grijanja i sustava hlađenja ili klimatizacije u zgradama
- 3 * -- istraživanje i razvoj u području graditeljstva, arhitekture i elektrotehnike i strojarstva
- 3 * -- istraživanje i eksploatacija mineralnih sirovina
- 3 * -- izrada projekta građenja rudarskih objekata i postrojenja
- 3 * -- građenje ili izvođenje pojedinih radova na rudarskim objektima i postrojenjima
- 3 * -- usluge informacijskog društva
- 3 * -- djelatnost javnoga cestovnog prijevoza putnika ili tereta u unutarnjem cestovnom prometu
- 3 * -- prijevoz putnika u unutarnjem cestovnom prometu
- 3 * -- javni prijevoz putnika u međunarodnom linijском cestovnom prometu
- 3 * -- prijevoz tereta u unutarnjem i međunarodnom cestovnom prometu
- 3 * -- prijevoz za vlastite potrebe
- 3 * -- savjetovanje u vezi s poslovanjem i upravljanjem
- 3 * -- promidžba (reklama i propaganda)
- 3 * -- istraživanje tržišta i ispitivanje javnog mnenja
- 3 * -- organiziranje seminara, kongresa, savjetovanja
- 3 * -- računalne i srodne djelatnosti
- 3 * -- računovodstveni poslovi

OSNIVAČI/ČLANOVI DRUŠTVA:

- 1 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET, pod MBS: 080255190,
upisan kod: Trgovački sud u Zagrebu, OIB: 62924153420
Zagreb, fra Andrije Kačića Miošića 26

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



REPUBLIKA HRVATSKA
TRGOVAČKI SUD U ZAGREBU

Elektronički zapis
Datum: 27.09.2022

IZVADAK IZ SUDSKOG REGISTRA

SUJEKT UPISA

OSNIVAČI/ČLANOVI DRUŠTVA:

1 - jedini osnivač d.o.o.

OSOBE OVLAŠTENE ZA ZASTUPANJE:

5 DANIJELA JURIĆ KAĆUNIĆ, OIB: 12298392783
Koprivnica, Trg Eugena Kumičića 9
3 - direktor
3 - zastupa društvo pojedinačno i samostalno odlukom člana
društva od 17.07.2015. godine

TEMELJNI KAPITAL:

1 20.000,00 kuna

PRAVNI ODNOŠI:

Osnivački akt:

1 Izjava o osnivanju društva od 05.07.2010. godine
3 Odredbe Izjave o osnivanju društva od 05.07.2010. godine
promijenjene su Odlukom člana društva u članku 3. o predmetu
poslovanja te je sastavljen pročišćeni tekst Izjave o osnivanju
d.o.o. koji se dostavlja u zbirku isprava.

FINANCIJSKA IZVJEŠĆA:

Predano	God.	Za razdoblje	Vrsta izvještaja
eu	26.04.22	2021 01.01.21 - 31.12.21	GFI-POD izvještaj

Opise u glavnu knjigu proveli su:

RBU Tt	Datum	Naziv suda
0001 Tt-10/8922-2	04.08.2010	Trgovački sud u Zagrebu
0002 Tt-14/9467-2	24.04.2014	Trgovački sud u Zagrebu
0003 Tt-15/21733-2	29.07.2015	Trgovački sud u Zagrebu
0004 Tt-20/34548-2	24.09.2020	Trgovački sud u Zagrebu
0005 Tt-22/17154-1	08.04.2022	Trgovački sud u Zagrebu
eu /	07.03.2012	elektronički upis
eu /	12.03.2013	elektronički upis
eu /	26.02.2014	elektronički upis
eu /	27.02.2015	elektronički upis
eu /	05.05.2016	elektronički upis
eu /	23.06.2017	elektronički upis
eu /	22.05.2018	elektronički upis
eu /	06.08.2019	elektronički upis
eu /	27.02.2020	elektronički upis
eu /	25.02.2021	elektronički upis
eu /	26.04.2022	elektronički upis

Izrađeno: 2022-09-27 15:59:45
Podaci od: 2022-09-27

0004
Stranica: 4 od 5

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



REPUBLIKA HRVATSKA
TRGOVAČKI SUD U ZAGREBU

Elektronički zapis
Datum: 27.09.2022

IZVADAK IZ SUDSKOG REGISTRA

SUJEKT UPISA

Sudska pristojba po Tbr. 29. st. 3. Uredbe o tarifi sudske pristojbi (NN br. 53/19 i 92/21), za izvadak iz sudskega registra u iznosu od 5.00 Kn / 0.66 € (fiksni tečaj konverzije 7.53450) naplačena je elektroničkim putem.



Ova isprava je u digitalnom obliku elektronički potpisana certifikatom:
CN=sudreg, L=ZAGREB,
O=MINISTARSTVO PRAVOSUDA I UPRAVE HR72910430276, C=HR



Broj zapisa: 00jpq-H3qil-0gsir-v0Q3N-rP0fV
Kontrolni broj: OUpag-3bUuL-vrX83-dd5Wh

Skeniranjem ovog QR koda možete provjeriti čvrstost podataka.
Isto možete učiniti i na web stranici
http://sudreg.pravosudje.hr/registar/kontrola_izvornika/ unosom gore navedenog broja zapisa i kontrolnog broja dokumenta.
U oba slučaja suscav će prikazati izvornik ovog dokumenta. Ukoliko je ovaj dokument identičan prikazanom izvorniku u digitalnom obliku, Ministarstvo pravosuda i uprave potvrđuje čvrstost isprave i skanje podataka u trenutku izrade izvacka.
Provjera čvrstosti podataka može se izvršiti u roku tri mjeseca od izdavanja isprave.

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



III. RJEŠENJE O IMENOVANJU VODITELJA IZRade ELABORATA

Na temelju „Zakona o komori arhitekata i komorama inženjera u graditeljstvu i prostornom uređenju“ (NN 78/15, NN 114/18, NN 110/19), donosi se:

RJEŠENJE

kojim se izv.prof.dr.sc. Mario Bačić, mag.ing.aedif. imenuje voditeljem izrade slijedeće tehničke dokumentacije:

PROJEKT: **Potresni rizik na području grada Zagreba**

AKTIVNOST: **Definiranje potresnog hazarda na području grada Zagreba**

ELABORAT: **Geotehnički elaborat**

BROJ T.D.: **GEL-069/2023**

Zagreb, rujan 2023.

Direktorica Centra Građevinskog Fakulteta d.o.o.:

prof.dr.sc. Danijela Jurić Kaćunić, dipl.ing.građ.



IV. POTVRDA O UPISU U IMENIK OVLAŠTENIH INŽENJERA

KLASA: 360-01/23-03/509
 URBROJ: 251-500-03
 Zagreb, 10. ožujka 2023.

Hrvatska komora inženjera građevinarstva na temelju članka 159. Zakona o općem upravnom postupku ("Narodne novine", br. 47/2009), po zahtjevu koji je podnio dr.sc. Mario Bačić, mag.ing.aedif., Zagreb, Nova Cesta 1, izdaje

POTVRDU

- Uvidom u službenu evidenciju koju vodi Hrvatska komora inženjera građevinarstva razvidno je da je dr.sc. Mario Bačić, mag.ing.aedif., upisan u Imenik ovlaštenih inženjera građevinarstva, s danom upisa **30.11.2018.** godine, pod rednim brojem **6190**, te je stekao pravo na uporabu strukovnog naziva "**ovlašteni inženjer građevinarstva**", zaposlen u: **Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb.**
- Uvidom u službenu evidenciju Hrvatske komore inženjera građevinarstva utvrđeno je da imenovan nije stegovno kažnjavan te da mu nije izrečena mjera zabrane obavljanja poslova.
- Ova potvrda se može koristiti samo u svrhu dokazivanja da je imenovan član Hrvatske komore inženjera građevinarstva u aktivnom statusu i da nije stegovno kažnjavan.

 REPUBLIKA HRVATSKA HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA	Vrijeme izdavanja: 10.03.2023. 12:22:34 Izdavatelj certifikata: CN=HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA, L=ZAGREB, 2.5.4.97=VATHR-65080653676, O=HKIG, C=HR Serijski broj: 65080653676.6.37 Algoritam potpisa: SHA256withRSA Broj zapisa: 2023-404 Kontrolni broj: 353-591-495 Elektronički pečat: MIIBIjANBgkqhkiG9w0BAQEAAQCAQ8AMIIIBCgKCAQEAA4stMemHhlcrMsgrdwDnJ84aWmfbPgjtG M3X1c76WFzqcCgSASt/yB03l2Or1B/g4x12FotFr/T6SUK/9/btc000u3QiEBGHswWXdrtkhfDTKEwqhV PsNOwzX9vpf3y0VSAfl6HDj3WxDEqCV4MILCGOUmzPrK6yHP7dvZOMX8LyGShkFjyIFATsau7QdJV cRDrM16OeQ3V2C3EQOZsM+m+k+zzYjuLn6sHDjginnOpoeNY26lZaoaRWyGIG3nFHv2jyptKDJ/ jrhBHBI8SCIRHJEJvVxzgjXMKDadQz43YwC/MO)6HSu1qfEU3ypJ08v2PLKCHKla430HXUQIDAQAB
Informacije za provjeru dokumenta:	Elektronički zapisi se čuvaju najviše 3 mjeseca od trenutka generiranja te se u tom roku može izvršiti provjera elektroničkog zapisa uvidom u elektronički zapis kojem se pristupa putem broja zapisa i kontrolnog broja otisnutog u kontrolnom dijelu elektroničkog zapisa, putem Internet adrese https://egrud.hkig.hr/dokumenti-provjera .

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



NARUČITELJ: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

PROJEKT: Potresni rizik na području grada Zagreba

AKTIVNOST: Definiranje potresnog hazarda na području grada Zagreba

ELABORAT: Geotehnički elaborat

BROJ T.D.: GEL-069/2023

2 TEHNIČKI DIO



2.1. OPĆENITO O PROJEKTU

Projekt "Multisenzorsko zračno snimanje Republike Hrvatske za potrebe procjene smanjenja rizika od katastrofa" je sufinanciran pod prioritetnom osi 5 Operativnog programa "Konkurentnost i kohezija" naziva "Klimatske promjene i upravljanje rizicima" i to u sklopu investicijskog prioriteta (IP) "5B Poticanje ulaganja koja se odnose na posebne rizike, osiguranje otpornosti na katastrofe i razvoj sustava za upravljanje katastrofama".

Poseban dio ovog projekta je i **PROCJENA POTRESNOG RIZIKA ZA GRAD ZAGREB** koja uključuje izradu metodologije za procjenu potresnog rizika, definiranje hazarda i proračun potresnog rizika za područje grada Zagreba koje se provode kroz zadane aktivnosti propisane u tehničkim specifikacijama.

U Republici Hrvatskoj uspostavljen je dobar zakonski okvir, donijeti su potrebni zakoni i propisi koji definiraju mјere i aktivnosti koje su obuhvatile cjelokupni sustav zaštite i spašavanja u slučaju prirodnih i tehničko tehnoloških ugroza, te su formirane odgovarajuće institucije na državnom, regionalnim i lokalnim razinama. Međutim, te institucije nemaju znanstveno-istraživačke i ljudske resurse potrebne za provedbu projekata iz kojih bi se moglo sagledati činjenice i načini procjene nužne za donošenje odluka o kratkoročnim i srednjoročnim djelovanjima u svrhu prethodne zaštite stanovništva i imovine kao i djelovanja nakon što se prirodna nepogoda, u ovom slučaju potres, dogodi. Prvo istraživanje potresnog rizika za grad Zagreb provedeno je 1983. godine, ali su rezultati zbog povjerljivosti objavljeni tek nakon nekoliko godina. U toj je studiji zaključeno da bi snažni potres intenziteta VIII ljestvice MCS (ubrzanje $a = 0,20g$) prouzročio golemu materijalnu štetu i veliki broj ljudskih žrtava. Procijenjeno je da bi 11 % (24.000) stanova bilo uništeno uz 13.500 ranjenih i 2.000 poginulih osoba. Ta je studija bila izrađena za potrebe civilne zaštite i jedina je te vrste u posljednjih 30 godina načinjena za Zagreb. No niti ona nije cijelovita budući nije obuhvatila opasnosti kojima je izložena gradska infrastruktura, javne građevine i kulturna dobra. Podaci i zaključci studije iz 1983. godine danas su zastarjeli.

Sva znanstvena područja povezana s potresnim rizikom su u međuvremenu postigla veliki napredak: seismologija, geoznanosti, potresno inženjerstvo i projektiranje konstrukcija. Dostupne računalne metode i digitalni kartografski prikazi omogućuju pouzdanije, detaljnije i preglednije analize i zaključke.

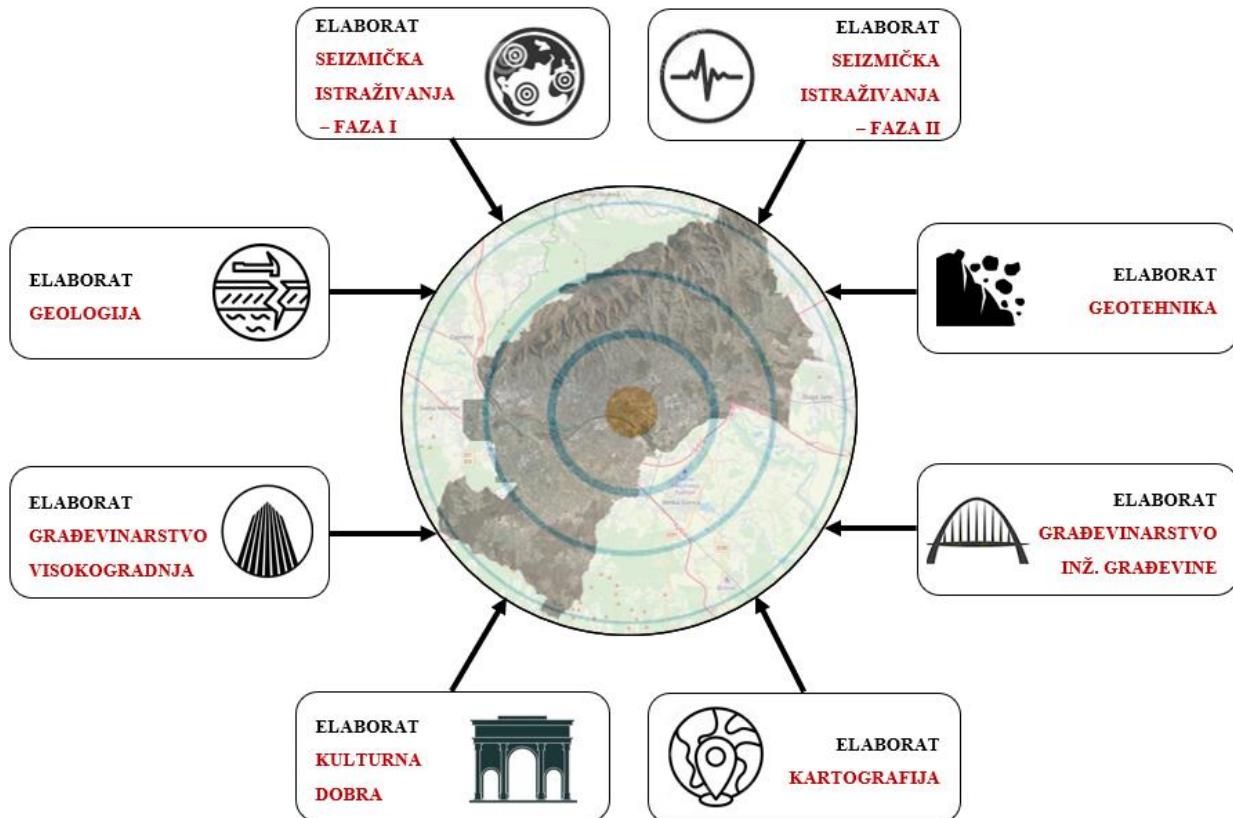
Do danas je svjetski fond istraživanja oštetljivosti građevina neizmjerno povećan, a svakodnevna informiranost eksperata omogućena pristupom internetskim podacima i svakodnevnom



međunarodnom suradnjom također. Danas su u Republici Hrvatskoj, za projektiranje konstrukcija, u upotrebi europske norme, ukupno 57 dokumenata s odgovarajućim nacionalnim dodacima koji odražavaju nacionalne specifičnosti.

Posebnu skupinu važnu za ovaj projekt čini niz norma HRN EN 1998 koje obuhvaćaju projektiranje građevina otpornih na potres i koji su izrazito važni za Republiku Hrvatsku kao vrlo seizmički aktivno područje. U njihovu sklopu nalaze se i suvremene karte potresnih područja s poredbenim vršnim ubrzanjima temeljnog tla (osnovne stijene) koje su rezultat novih seismoloških istraživanja i neposredno su primjenjive za projektiranje građevina. Međutim, jednako tako je važno prilikom projektiranja u obzir uzeti sve ostale okolnosti koje imaju izravan utjecaj na građevinske zahvate, uključivo geološke i geotehničke uvjete u temeljnem tlu.

U okviru provedbe projektne aktivnosti 2 "Definiranje elemenata potresnog hazarda na području grada Zagreba", predviđeno je prikupljanje i analiziranje relevantnih dostupnih podataka te izradu osam (8) elaborata iz područja seismologije, geologije, geotehnike, visokogradnje, inženjerskih građevina, kulturnih dobara i kartografije, slika 1. Ovim dokumentom se daje elaborat iz područja geotehnike.



Slika 1. Definiranje potresnog hazarda na području grada Zagreba



Problematika vezana uz geo-hazarde (u širem smislu) je analizirana na širem području grada Zagreba već desetljećima. Posljednjih 50-ak godina sve veća pažnja posvećuje se istraživanjima vezanim uz geo-hazarde te je jasno da su ovakva istraživanja izrazito važna i potrebna za adekvatno urbanističko planiranje i njegovu provedbu. Procjena potresnog rizika za grad Zagreb je svakako važan aspekt pri procjeni moguće ugroze stanovništva i imovine, odnosno ista predstavlja korak naprijed prema ublažavanju negativnih posljedica potresa.

Osim pregleda dosadašnjih npora i istraživanja te **detaljnog prikaza geotehničkih hazarda** relevantnih za grad Zagreb, važan dio elaborata su **preporuke i smjernice za unaprjeđenje procedura za definiranje geotehničkog hazarda** na području grada Zagreba.

2.2. ZNAČAJ GEOTEHNIČKOG POTRESNOG INŽENJERSTVA

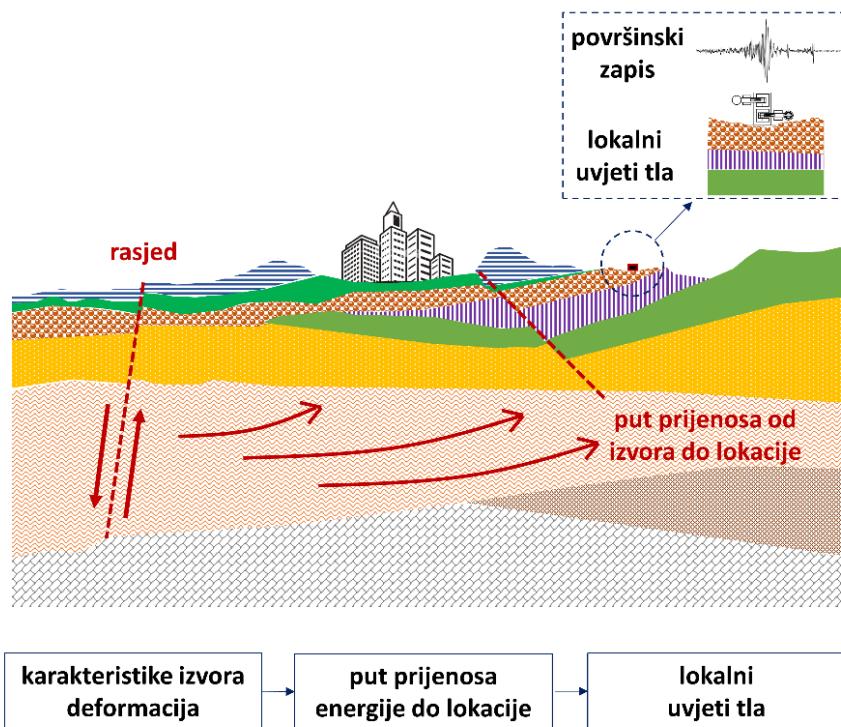
Geotehničko potresno inženjerstvo, kao sastavni dio potresnog inženjerstva, je disciplina koja "još uvijek uči". Svaki novi jači svjetski potres donosi nova saznanja, a često i promjene u inženjerskoj praksi i propisima. Dobar primjer za navedeno su potresi koji su 2020. godine zadesili grad Zagreb, odnosno područje sisacko – moslavačke županije. Potonji potres je rezultirao nizom geotehničkih fenomena koji su imali izravan utjecaj na objekte i infrastrukturu u područjima zahvaćenim potresom. Kao prostorno najrašireniji fenomen koji je uzrokovao brojne štete je pojava likvefakcije gdje se tijekom seizmičkih djelovanja tlo pretvorilo u gustu tekućinu, što je za posljedicu imalo prekoračenje nekog od graničnih stanja stambenih i infrastrukturnih objekata. Osim pojave likvefakcije, od geotehničkih pojavnosti treba izdvojiti i aktiviranje niza klizišta u županiji kao i otvaranje urušnih vrtača. "Zagrebački" potres iz 2020. godine nije rezultirao sa značajnijim geotehničkim nestabilnostima tla, ponajprije jer je potresna magnituda bila relativno mala da uzrokuje navedene probleme. Manji broj pokrenutih, ili bar registriranih, klizišta se donekle može objasniti i relativno niskom saturacijom tla na lokacijama većeg potencijala klizanja. Međutim, s obzirom na potresni hazard na području grada Zagreba, problemi povezani s tlom se itekako mogu očekivati, što je potvrdio i potres iz 1880. godine, kako je i prikazano u nastavku ovog elaborata.

Svi navedeni geotehnički seizmički fenomeni su izravno povezani s razvojem prevelikih deformacija i rušenja građevinskih konstrukcija te je nužno iste tretirati na adekvatan način. Međutim, kako navode Bačić i dr. (2020), usprkos znanju i kapacitetima znanstvene i stručne zajednice, praktična



implementacija znanja najčešće izostaje, ponajviše radi nedovoljno reguliranih zakona i propisa. Razlog za ovo treba tražiti u činjenici da se potres najčešće razmatra kao "apstraktni" hazard, suprotno "realnim / vidljivim" hazardima kao što su poplave, klizišta, požari itd. Zbog toga integrirani pristup suočavanja s potresom, njegovim uzrocima i njegovim posljedicama, u pravilu izostaje (Bačić i dr., 2020), iako procjena potresne opasnosti i djelovanja na građevine, uključivo i njegov geotehnički dio, predstavlja obvezni dio građevinskog projektiranja koja je u Hrvatskoj obuhvaćena normom HRN EN 1998. U ovoj normi, kao i ranijim seizmičkim propisima koji su bili na snazi, ističe se nužnost razvoja seizmičkih projektnih kriterija karakterističnih za predmetnu lokaciju izgradnje, koji moraju uzeti u obzir i lokalnu geologiju, seizmičnost, geotehničke uvjete i prirodu projekta.

Na slici 2 je shematski prikazan put potresnih valova od žarišta (izvora) u dubini Zemljine kore, kroz geološke formacije u podzemlju i temeljno tlo na lokaciji građevine do površine terena na kojoj se pomaci tla manifestiraju kao djelovanja na građevine i infrastrukturu. Pomaci na površini terena su posljedica prolaska i modifikacija valova duž cijelog navedenog puta.



Slika 2. Put potresnih valova od žarišta do lokacije građevine (Bačić i dr., 2020)

Seizmologija i strukturna geologija su znanosti koje se bave karakteristikama potresnog izvora i puta do određene razmatrane lokacije. Lokalni uvjeti tla su predmet interesa inženjerske geologije i geotehnike. Važno je naglasiti da geotehniki promatra naslage tla iznad osnovne stijene kao



"konstrukciju" koja pri potresnoj pobudi iz dubine ima svoj odziv i dominantna gibanja, i koju čine materijali prepoznatljivih mehaničkih (krutost, čvrstoća, prigušenje) i hidrauličkih svojstava. I oblik spektra odziva gibanja tla određen je relativnim utjecajima spektralnih značajki izvora potresa u regiji i atenuacijskih značajki geoloških materijala koji prenose seizmičke valove od osnovne stijene do lokacije.

Temeljem svega navedenog, geotehničke okolnosti na pojedinoj lokaciji koje tijekom istražnih radova treba odrediti ili ocijeniti su sljedeće:

a) **profil temeljnog tla:**

- odziv lokalnog tla pri širenju seizmičkih valova od osnovne stijene do površine terena (amplifikacija i modifikacija spektra odziva)
- pojave dinamičke nestabilnosti tla (likvefakcija) i prekomjernih slijeganja

b) **globalna stabilnost lokacije:** pojava aktivnih rasjeda i nestabilne padine

c) **povećanje zemljanih pritisaka** na temeljne, potporne, nasute i ukopane konstrukcije zbog djelovanja potresa

Ovim elaboratom se analiziraju geotehničke okolnosti za područje grada Zagreba koje su najrelevantnije za sveobuhvatnu seizmičku mikrozonaciju grada Zagreba, hazard, a to su amplifikacija spektra odziva, pojava likvefakcije i nestabilnost padina u seizmičkim uvjetima.



2.3. PREGLED RELEVANTNIH PODLOGA

U sklopu izrade predmetnog elaborata korištene su podloge popisane u nastavku.

Andrus, R. D., and Stokoe, II, K. H., Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity, J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 126 (2000), 11, pp 1015–1025.

Baćani, A., Posavec, K., Elaborat o zonama zaštite izvorišta grada Zagreba, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 2014.

Bačić, M., Ivšić, T., Kovačević, M. S.: Geotechnics as an unavoidable segment of earthquake engineering, GRAĐEVINAR, 72 (2020) 10, pp. 923-936, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2968.2020>

Boulanger, R., Wilson, D., Idriss, I., Examination and Reevaluation of SPT-Based Liquefaction Triggering Case Histories. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 138 (2012), 8, pp. 898-909

Boulanger, R., Idriss, I., CPT and SPT based liquefaction triggering procedures, Department of Civil & Environmental Engineering, College of Engineering, University of California, 2014.

Chen, C. J., Juang, C. H.: Calibration of SPT- and CPT-Based Liquefaction Evaluation Methods. Innovations and Applications in Geotechnical Site Characterization (2000). doi:10.1061/40505(285)4

COST Akcija TU1206, A European network to improve understanding and use of the ground beneath our cities, URL: <http://sub-urban.squarespace.com>, 5.9.2023.

Dobry, R., Ladd, R., Yokel, F., Chung, R., Powell, D., Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method. NBS Building Science Series 138, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1982.

EGPV - Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske: Geologija zagrebačkog vodonosnog sustava, 2000.

Dobry, R., Abdoun, T., Cyclic Shear Strain Needed for Liquefaction Triggering and Assessment of Overburden Pressure Factor K_o , Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 141 (11), 2015-11

GDDA (General Directorate of Disaster Affairs): Seismic Microzonation for Municipalities – Manual, Republic of Turkey, Ministry of Public Works and Settlement, General Directorate of Disaster Affairs, 137 p., 2004.

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



Geotehnika – Geoexpert, Geološki zavod Zagreb, PMF – Geofizički zavod, Rudarsko-geološkonaftni fakultet, Seizmička mikrorajonizacija grada Zagreba (14 općina), 1988.

Herak M., Miklin Ž., Allegrett I., Dasović I., Fiket T., Herak D., Ivančić I., Kuk K., Kuk V., Marić K., Markušić S., Prevolnik S., Podolszki L., Sović I., Stipčević J. Seizmičko i geološko mikrozoniranje prema standardima Eurokoda 8 za zapadni dio podsljemenske urbanizirane zone. Knjiga 1: Seizmološka istraživanja i rezultati studije, Prirodoslovni-matematički fakultet, Geofizički odsjek, Zagreb, 2013.

HGI - Hrvatski geološki institut. Procjena potresnog rizika grada Zagreba - geološki elaborat, Zagreb, 2023.

HRN EN 1997-1:2012 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje -- 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004+AC:2009)

HRN EN 1997-2:2012 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje -- 2. dio: Istraživanje i ispitivanje temeljnoga tla (EN 1997-2:2007+AC:2010)

HRN EN 1998-1:2011 Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009)

HRN EN 1998-5:2011 Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 5. dio: Temelji, potporne konstrukcije i geotehnička pitanja (EN 1998-5:2004)

Idriss, I.M., Response of Soft Soil Sites During Earthquake. J.M. Duncan, ed., Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium, BiTech Publishers, Vancouver, 1990.

Idriss, I., Boulanger, R., 2nd Ishihara Lecture: SPT- and CPT-based relationships for the residual shear strength of liquefied soils, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 68 (2015), pp. 57-68

IGH Institut, Izvještaj s pregleda klizišta Trstenik u Čučerju, 2014.

Ishihara, K., Okada, S.: Effects of stress history on cyclic behavior of sand, Soils And Foundations, (1978) 18, pp. 31–45

ISSMGE (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering): Manual for zonation on seismic geotechnical hazards. The Japanese Geotechnical Study, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 209 p., 1999.

Juang, C.H., Jiang, T., Andrus, R.D.: Assessing probability-based methods for liquefaction evaluation." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, (2002) 128 (7), pp. 580-589

Jurak, V., Kvasnička, P., Dujmić, D., Kuk, V., Seizmička podina u nizinskom dijelu grada Zagreba. Zbornik radova Znanstvenog skupa "Andrija Mohorovičić – 140 obljetnica rođenja", Zagreb, 1998, str.125-139.



Jurak, V., Ortolan, Ž., Ivšić, T., Herak, M., Šumanovac, F., Vukelić, I., Jukić, M., Šurina, Z. Geotehničko i seizmičko mikrozoniranje grada Zagreba – pokušaji i ostvarenje. Zbornik radova s konferencije razvitak Zagreba, Zagreb, 2008.

Krkač, M., Gazibara, S.B., Sečanj, M., Sinčić, M., Arbanas, S.M. Kinematic model of the slow-moving Kostanjevka landslide in Zagreb, Croatia. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Vol. 36 No. 2, 2021.

Kvasnička, P. Određivanje proračunskog ubrzanja i hrvatski nacionalni dodatak za Eurokod 8. RGN, 2009.

Kvasnička, P. i Matešić, L. Geotechnical Data Base for the City of Zagreb and its Application in Site Response Analyses. International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 2001.

Latečki, H., Stipčević, J., Molinari, I. Seismic shaking scenarios for city of Zagreb, Croatia. Proceedings of 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering, Edited by Lakušić, S. and Atalić, J., 1CroCEE Zagreb, Croatia - March 22nd to 24nd, 2021.

Lee, K. W., Finn, W. D. L., DESRA-2, Program for the Dynamic Effective Stress Response Analysis of Soil Deposits with Energy Transmitting Boundary Including Assessment of Liquefaction Potential, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, June, 1978.

Librić, L., Bačić, M., Kovačević, M.S., Utilization of CPTU for evaluation of liquefaction probability below the flood protection embankment in Croatia, Proceedings of the 3rd International Conference on Natural Hazards and Infrastructure, 2022. pp. 1-8

Mihalinec, Z., Bačić, M., Kovačević, M., Risk identification in landslide monitoring , GRAĐEVINAR, 65 (2013) 6, pp. 523-536, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.717.2012>

Miklin, Ž., Mlinar, Ž., Brkić, Ž., Hećimović, I. Detaljna inženjerskogeološka karta Podsljemenske urbanizirane zone mjerila 1:5.000 (DIGK-Faza I). Hrvatski geološki institut, Zagreb, 2007, Knjige 1-4, 44 karte, HGI arhiva

Miklin, Ž., Podolszki, L., Novosel, T., Sokolić, Ž., Sokolić, I., Ofak, J., Padovan, B., Zailac, K. Detaljna inženjerskogeološka karta Podsljemenske urbanizirane zone mjerila 1:5000 (DIGK-Faza II), Hrvatski geološki institut, Zagreb, 2018, Knjige 1-6, 41 karta, HGI arhiva

Miklin, Ž., Podolszki, L., Novosel, T., Sokolić, I., Ofak, J., Padovan, B., Sović, I. Studija Seizmička i geološka mikrozonacija dijela Grada Zagreba, Hrvatski geološki institut, Zagreb, 2019, Knjige 1-4, 1 karta, HGI arhiva

Nonveiller, E., Kliženje i stabilizacija kosina, Školska knjiga, Zagreb, 1987.



Olson, S. M., Green, R. A., Obermeier, S. F.: Geotechnical analysis of paleoseismic shaking using liquefaction features: a major updating, *Engineering Geology* (2005) 76, pp. 235–261

Österreichisches Staatsarchiv, Arcanum Adatbázis Kft. Provinz Kroatien (1783–1784) - First Military Survey.

Ortolan, Ž., Jurak, V., Ivšić, T., Herak, Vukelić, I., Geotehničke okolnosti – rubni uvjet održivog razvijanja „podsljemenske urbanizirane zone“. *Zbornik radova s konferencije razvitak Zagreba*, Zagreb, 2008.

PHYS.org, URL: <https://phys.org/news/2021-02-strong-earthquake-japan-northeastern-coast.html>, 19.9.2023.

Podolszki, L., Stereoskopska analiza klizišta i relativne opasnosti od klizanja na južnim obroncima Medvednice. Doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2014,

Polak, K., Klemar, M., Nejkova, M., Radošević, N., Stepan, Z., Miroslav, M., Križanić, Z., Litološka obrada i kategorizacija terena prema stabilnosti tla obronaka Medvednice na području grada Zagreba. *Geotehnika-Geoexpert*, Zagreb, 102 str., 1979.

Pribičević, B., Đapo, A. Analiza pomaka na Geodinamičkoj mreži Grada Zagreba iz različitih vremenskih epoha, *Geodetski list*, Vol. 70 (93) No. 3, 2016.

PRI-MJER, karte izrađene od Gazibara, i dr. (2023), URL: www.pri-mjer.hr

Rollins, K., Roy, J., Assessing liquefaction in gravelly soils based on field case histories, Proceedings of the 2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering - 2CroCEE, Zagreb, Croatia, 22-24.03.2023., 31-45, DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/2CroCEE.2023.141>

Salković, I., Kvasnička, P., Mihalić, S., Krkač, M. Geotehnička istraživanja za određivanje lokalnih uvjeta tla na lokaciji Arene Zagreb. Izvori rizika u geotehničkim zahvatima. *Zbornik radova s 5. savjetovanja HGD*, Osijek, 2009.

Seed, H.B., Idriss, I.M.: Simplified procedure for evaluating soil Liquefaction Potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 97 (1971), pp. 1249-1273.

SM Working Group: Guidelines for Seismic Microzonation, Conference of Regions and Autonomous Provinces of Italy – Civil Protection Department, Rome, 2015.

Suzuki, T., Toki S.: Effects of preshearing on liquefaction characteristics of saturated sand subjected to cyclic loading, *Soils And Foundations* (1984) 24, pp.16–28

Torbar, J., Izvješće o zagrebačkom potresu 9. studenoga 1880. Djela JAZU, knj.1, VIII+141str., 1882, Zagreb.

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



Uglešić, J.S., Markušić, S., Padovan, B., Stanko, D. Semi-empirical estimation of the Zagreb ML 5.5 earthquake (2020) ground motion amplification by 1D equivalent linear site response analysis. Vol. 38 No. 2 (2021): Special issue "The 22 March 2020 ML 5.5 Zagreb earthquake", 2021.

Urvois, M., Grellet, S., Lorenz, H., Haener, R., Loiselet, C., Harrison, M., Krivic, M., Pedersen, C.B., Wiese, M., Baptie, A. and Nayembil, M., 2022. Integrating geological data in Europe to foster multidisciplinary research. Array, 65(3), p.DM319, DOI: 10.4401/ag-8817

USGS, Vs30 Models and Data—Earthquake Hazards Program, URL: <https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/>, 7.9.2023.

Velić, J., Saftić, B. Dubinskogeološki odnosipodručja smetlišta „Jakuševec“ – čimbenik sanacije, Zbornik radova „IV. međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom – Zagreb 96“, 1996.

Veinović, Ž., Kvasnička, P., Jurak, V. Geohazardno obilježje prisavske ravnice na području Zagreba. Zbornik radova s konferencije razvitet Zagreb, Zagreb, 2008.

Wang, S., Yang, J., Onyejekwe, S.: Effect of Previous Cyclic Shearing on Liquefaction Resistance of Mississippi River Valley Silt, Journal of Materials in Civil Engineering (2013) 25, pp. 1415–1423

Weatherill G.A, Crowley H., Rouillé A., Tourlière B, Lemoine A., Gracianne Hidalgo C., Kotha S.R., Cotton, F., Dabbeek J. European Site Response Model Datasets Viewer (v1.0). DOI: 10.7414/EUC-EUROPEAN-SITE-MODEL-DATA-VIEWER, 2021.

Yamagishi, H.; Yamazaki, F. Landslides by the 2018 Hokkaido Iburi-Tobu earthquake on September 6. Landslides (2018), 15, 2521–2524.

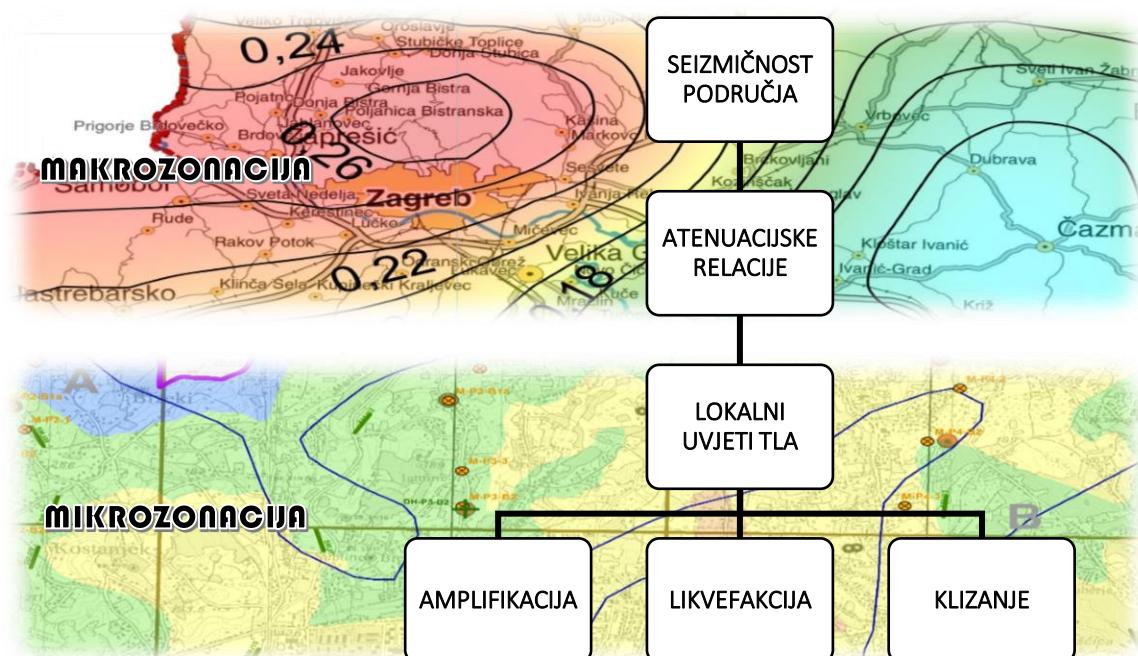
ZG GEOPORTAL, URL: <https://geoportal.zagreb.hr/Karta>, 08.07.2023.



2.4. SEIZMIČKA MIKROZONACIJA

2.4.1. Važnost sveobuhvatnog pristupa seizmičkoj mikrozonaciji

Seizmičko zoniranje, kao postupak kartiranja područja koja se pri potresu slično ponašaju, je prvi korak u procjeni potresnog rizika (vjerojatnosti šteta), koja se dobiva konvolucijom (unakrsnom korelacijom) seizmičkog hazarda s ranjivošću i izloženošću. Pri tome se razlikuju pojmovi seizmičkog makrozoniranja i seizmičkog mikrozoniranja, vidi sliku 3.



Slika 3. Seizmičko makrozoniranje i mikrozoniranje

Rezultat **makrozonacije** je karta seizmičkog hazarda na kojoj je prikazano vršno ubrzanje (PGA) osnovne stijene (tip tla A prema EC8 s posmičnom brzinom većom od 800 m/s) čiji se iznosi očekuju premašiti s vjerovatnošću koja odgovara odabranoj razini rizika u skladu s povratnim razdobljem za koji je napravljena karta.

Oscilacije površine tla su različite od oscilacija na razini osnovne stijene, radi lokalnih uvjeta tla, zbog čega je potrebno provesti postupak seizmičke **mikrozonacije**. Mikrozoniranje je izdvajanje područja istih ili sličnih svojstava, na kartama detaljnijeg mjerila, koje omogućuje lokalno razlikovanje specifičnog



utjecaja ili razmatranog kriterija izdvajanja. Kartiranje seizmičkog hazarda na površini tla uključuje određivanje lokalnih uvjeta tla.

U državama povećane seizmičnosti, kao što je primjerice Japan (ISSMGE, 1999), Turska (GDDA, 2004) ili Italija (SMWG, 2015), postoji snažna potreba **sveobuhvatne seizmičke mikrozonacije**, pa se nastoji formalizirati standardni pristup seizmičkom mikrozoniranju. Pri tom se mikrozoniranje prvenstveno fokusira na geotehničke fenomene uzrokovane seizmičkim djelovanjem na lokaciji i u temeljnog tlu kao što su amplifikacija i pomaci tla, ali se u procesu uvažavaju i nestabilnosti tla, uključivo klizišta i likvefakciju. Kao osnovu za izradu karata seizmičke mikrozonacije najveće rezolucije smjernice, ISSMGE (1999) navodi detaljna geotehnička ispitivanja tla. U tablici 1 izdvojene su uobičajene metode ispitivanja tla i ulazni podaci potrebni za realizaciju seizmičke mikrozonacije.

Tablica 1 Ulazni podaci i metode – seizmička mikrozonacija

ULAZNI PODACI	ADEKVATNE METODE
topografija	LiDAR - digitalni model terena
razina podzemne vode	piezometri, istražne bušotine, CPT, *sezonski utjecaj
IG sredine	kartiranje, <i>in situ</i> pokusi, istražno bušenje, geofizika
svojstva IG sredina uključujući posmičnu brzinu	laboratorijske korelacije sa SPTom i CPTom, geofizika
seizmička podina	Istražno bušenje, geofizika
iscrtavanje strukture bazena	geofizičke dubinske metode, mikrotremor

2.4.2. Aktivnosti mikrozoniranja grada Zagreba

Površina grada Zagreba, unutar njegovih administrativnih granica iznosi oko 640 km^2 , od čega je otprilike (1) 150 km^2 područje Medvednice i Parka prirode Medvednica; (2) 175 km^2 područje Podsljemenske urbanizirane zone na južnim obroncima Medvednice; (3) 185 km^2 šire područje Prisavske ravnice; (4) 70 km^2 prijelazno područje Prisavska ravnica – terasna izdignuća te (5) 60 km^2 područje Vukomeričkih gorica.

Mikrozoniranje dijela grada Zagreba, tj. podsljemenske urbanizirane zone po suvremenim principima započinje 2004. godine izradom Detaljne inženjerskogeološke karte (DIGK) mjerila 1 : 5 000 (DIGK-Faza I), a završava drugom fazom 2018. godine (Miklin i dr., 2018). Za potrebe kartiranja 175 km^2

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

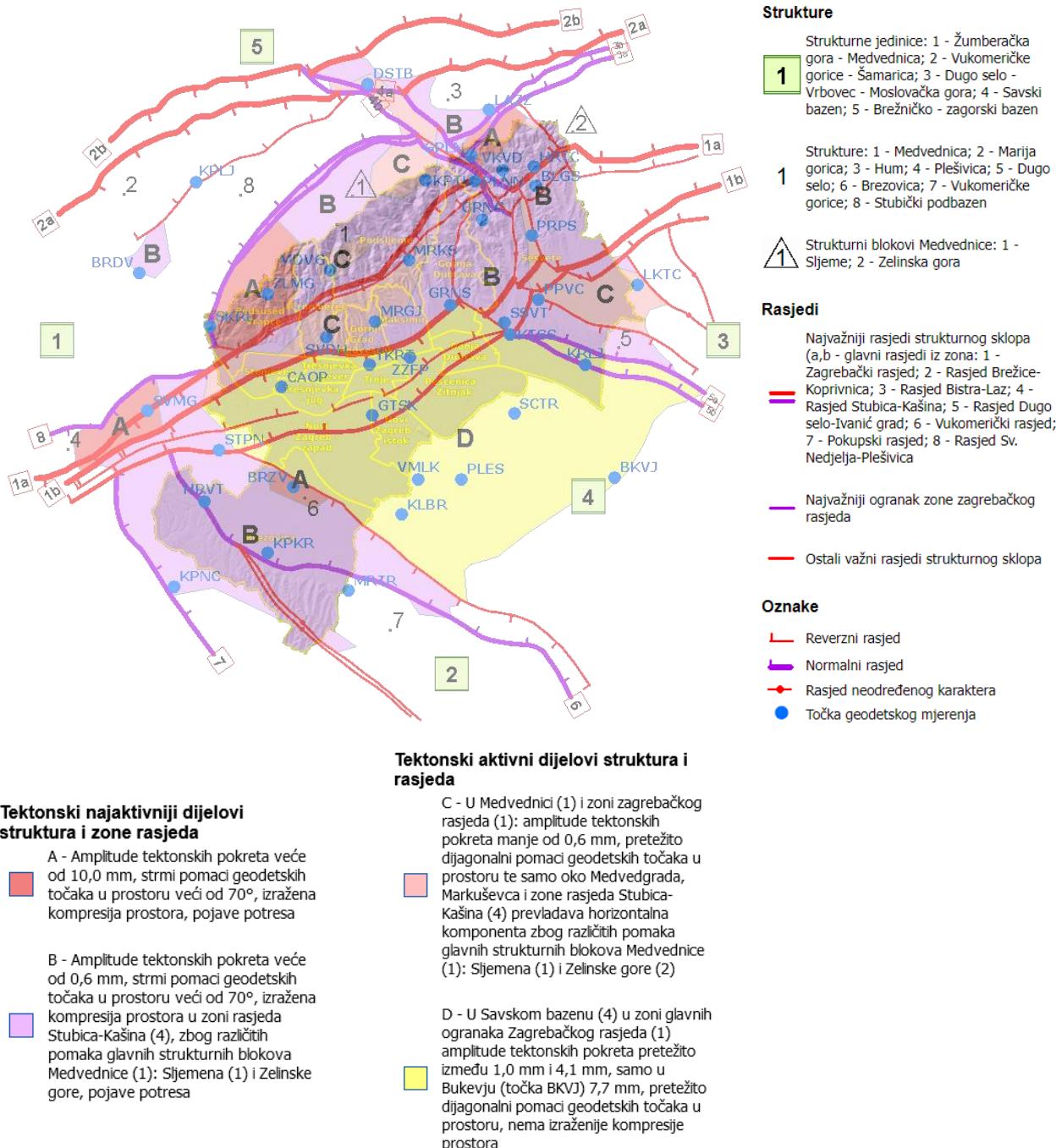
Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



podsljemenske zone obavljena su opsežna geofizička i geotehnička istraživanja na osnovu kojih su izdvojena klizišta i nestabilne padine te preliminarne zone tipova tla prema normi Eurokod 8. Budući da nisu posebno izdvajane ili preklapane zone potencijalnih nestabilnosti uslijed seizmičkog djelovanja (potencijal likvefakcije, ocjena seizmičke stabilnosti padina) ovo zoniranje ne predstavlja potpunu seizmičku mikrozonaciju, a kad nastupi nova generacija Eurokoda 8, postojeće obrade će trebati revidirati.

Napori prilikom izrade DIGK rezultirali su objavom dijela istraživanja i na web stranicama grada Zagreba (vidi vezu: <https://geoportal.zagreb.hr/Karta>), gdje je, među ostalim moguće vidjeti sloj nestabilnih i potencijalno nestabilnih padina u podsljemenskoj zoni.

Na istom stranicama se nalazi i karta tektonskih aktivnosti i recentnog strukturnog sklopa Medvednice i Zagreba, proizašla iz višegodišnjeg vrijednog istraživanja u sklopu projekta "Geodinamička mreža grada Zagreba" (Pribičević i Đapo, 2016), a prikazana na slici 4.



Slika 4. Prikaz karte tektonskih aktivnosti (ZG GEOPORTAL, 2023)

U sklopu ovog projekta su znanstveno-istraživačke aktivnosti obuhvatile praćenje geodinamičkih procesa kroz prizmu interdisciplinarnog pristupa, odnosno sinergiju istraživačkih metoda iz domena različitih geoznanstvenih disciplina kao što su geodezija, geologija i geofizika (seismologija). Na prikazanoj karti je vidljivo da se područje južnog dijela Medvednice nalazi u zoni tzv. zagrebačkog rasjeda u kojoj su žarišta većine potresa, a rubovi zone (linije 1a i 1b) idu kroz podsljemensku urbanu



zunu (sjeverni krak) i podnožjima brda (južni krak) iznad Ilice, Maksimirske ceste i u gornjoj Dubravi. Na karti su prikazani i drugi važniji rasjedi (primjerice rasjed Botinec – Most mladosti koji prolazi kraj stalnih geodetskih točaka STPN, GTSK, SSVT), a bojama su predočeni tektonski aktivni dijelovi struktura i rasjeda. Prikazani rasjedi predstavljaju prognoznu usku zonu procijenjenu na osnovu geoloških pokazatelja na terenu, topografije, aerosnimaka i sporadičnih dubinskih istraživanja.

Međutim, za karakterizaciju i točnije identificiranje stanja u dubini tla na aktivnim rasjedima, nestabilnim padinama, području podložnom likvefakciji, lokacijama infrastrukturnih objekata i građevina veće važnosti (primjerice, kulturna baština), potrebna su opsežna inženjerskogeološka, geofizička i geotehnička istraživanja. Rezultati istraživanja, zajedno s podacima o litologiji te inženjerskogeološkim i hidrogeološkim karakteristikama, poslužili bi kao osnova za izradu karte seizmičkog mikrozoniranja.

Cjelovita seizmička mikrozonacija grada Zagreba treba rezultirati izradom karata primjerenog mjerila (1 : 25 000 – 1 : 5 000) uključivo sljedeće navedene karte:

- detaljna inženjerskogeološka karta;
- karta kategorizacije tla prema EC8;
- karta hidrogeoloških uvjeta;
- karta debljine pokrovног sloja;
- karta geotehničkih modela sa sinteznim geotehničkim stupom;
- karta spektra odziva tla; karta amplifikacije;
- karta očekivanog prirasta vršne horizontalne akceleracije;
- karta podložnosti likvefakciji;
- karta podložnosti klizanju;
- karta potresnog rizika.

Ovakve karte trebaju biti izrađene za cijelo područje administrativnih granica grada Zagreba, a sam se postupak seizmičke mikrozonacije može podijeliti u tri faze navedena u nastavku:

1. faza – prikupljanje i obrada podataka;
2. faza – izrada osnovnih i tematskih karata;
3. faza – uklapanje u GIS Zagreba i geotehnički katastar.



Karte i skupljene podatke je potrebno obraditi kao seriju GIS slojeva te ažurirati i provjeravati svakih 15 godina.

Značajnu ulogu u budućim aktivnostima seizmičkog mikrozoniranja bi trebao imati i Geotehnički katastar grada Zagreba, koji predstavlja središnju bazu podataka vezanu uz tlo i njegove karakteristike, a sastavni dio katastra su i prethodno navedene osnovne i tematske karte. Geotehnički katastar je osnovan 1961. godine sa zadatkom prikupljanja, provjere i sređivanja geoloških, geomehaničkih i hidroloških podataka. Odlukom Izvršnog vijeća Skupštine grada Zagreba iz 1962. godine su sva poduzeća ili ustanove koje se bave geotehničkim istraživanjima morala dostaviti jedan primjerak Geotehničkoj dokumentaciji (katastru). Iako je odredba bila samo djelomično poštovana, omogućila je prikupljanje velikog broja podataka (do kraja 1993. godine, kada katastar prestaje s radom, preko 2500 elaborata), ali varijabilne kvalitete i stupnja obrade. Odlukom iz 2001. godine inicira se ponovna uspostava geotehničkog kataстра.

Danas bazom podataka upravlja Odjel za Geotehnički katastar (<https://www.zagreb.hr/geotehnicki-katastar/184177>). U Odjelu za Geotehnički katastar obavljaju se poslovi:

- prikupljanja i pohrane geotehničke dokumentacije (primjerice, elaborati istraživanja, projekti sanacije, studije, izvješća o monitoring, itd.);
- praćenja aktivnosti vezanih uz geotehničke istraživačke radove na području grada Zagreba;
- povezani s izradom i dopunom osnovnih i tematskih karata u odgovarajućem mjerilu;
- davanja podataka i informacija o geotehničkoj kategoriji, seizmičkoj zoni, razinama podzemnih voda za pojedinu parcelu, katastarsku česticu i/ili šиру zonu za namjenu planiranja, projektiranja;
- davanja mišljenja o programu geotehničkih istraživanja, o rezultatu geotehničke kategorizacije tla, o posebnim geotehničkim uvjetima za gradnju u postupcima izdavanja akata kojima se odobrava namjeravani zahvat u prostoru;
- suradnje s drugim gradskim upravnim tijelima, tijelima državne uprave, znanstvenim i stručnim ustanovama te drugim sudionicima u poslovima povezanim s geotehničkim katastrom;
- osiguravanja dostupnosti i ažuriranje mjerodavnih podataka iz djelokruga Odjela na Geoportalu Grada Zagreba.

U radu (Kvasnička i Matešić, 2001) predložen je i opisan daljnji razvoj baze podataka geotehničkog katastra čiji osnovni element treba biti geotehnički stup bušotine koji sadrži raspodjelu svojstava tla s



dubinom. Kao „pilot“ projekt digitalizirano je i geolocirano 150 bušotina u zapadnom dijelu grada Zagreba.

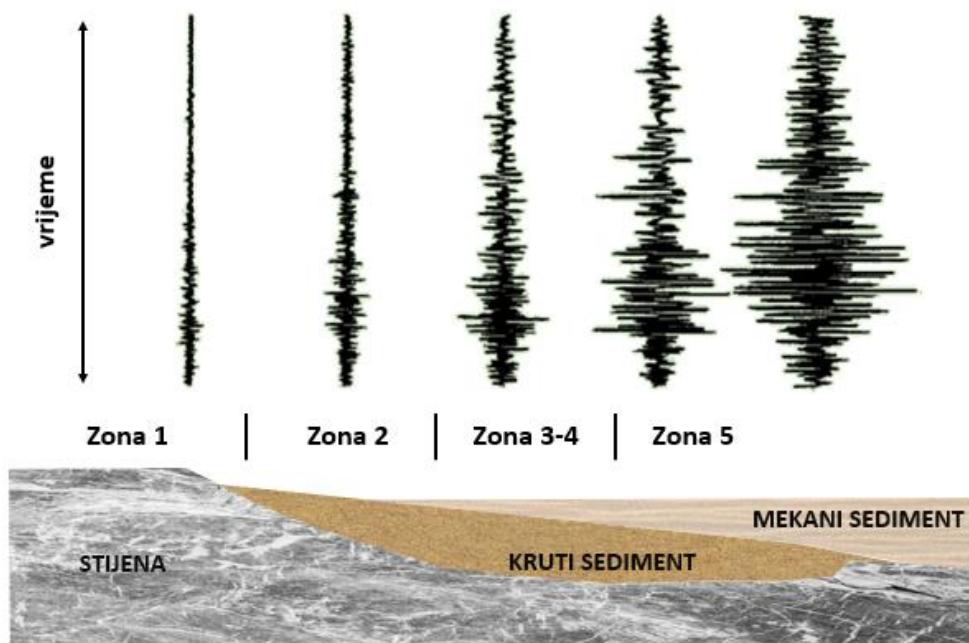
Sa sređenom bazom podataka, koja bi trebala biti postavljena na način da je jednostavno nadopunjavati i ažurirati, moguće je dobiti cjelovitiju sliku o geološkim i geotehničkim uvjetima u tlu na području grada Zagreba. Da bi se navedeno moglo postići potrebno je po uzoru na brojne gradove u Europi, posebnim propisima i uredbama definirati obvezu i način predaje podataka u traženom formatu za sva seizmička, geološka i geotehnička istraživanja u Zagrebu. Primjeri dobre prakse formiranja baza podataka na temelju geoloških i geotehničkih istražnih radova, provedenih u znanstvene ili komercijalne potrebe, se može primjerice pronaći u COST Akciji TU1206 - *SUB-URBAN - A European network to improve understanding and use of the ground beneath our cities* (www.sub-urban.squarespace.com) ili u *EPOS - the European Plate Observing System* inicijativi (Urvois i dr., 2022) koja raspolaže s preko 2.2 milijuna bušotina zaključno s 2021. godinom. Na taj način bi se formirala harmonizirana i uniformna baza podataka koja omogućava aktivnosti na ažuriranju karata, a u nekim naknadnim fazama i izrada sveobuhvatnih trodimenzionalnih modela podzemlja (4. faza). Navedeni modeli bi bili od izrazite koristi za aktivnosti prostornih planiranja, kako na površini tako i ispod površine, a model bi omogućio i dobivanje raspodjele svojstava tla s dubinom za bilo koju lokaciju ili profil na površini terena (statistički prikaz ključnih parametara tla dobiven sintezom podataka iz najbližih bušotina).



2.5. AMPLIFIKACIJA POTRESNOG SPEKTRA – KATEGORIZACIJA TLA PREMA EC8

2.5.1. Općenito o amplifikaciji potresnog spektra

Jedan od važnih aspekata potresnog inženjerstva je i razmatranje utjecaja lokalnih inženjerskogeoloških uvjeta u tlu s obzirom da oni mogu značajno promijeniti amplitudu i spektralni sastav seizmičkih vibracija koje putuju od izvora prema površini, slika 5.



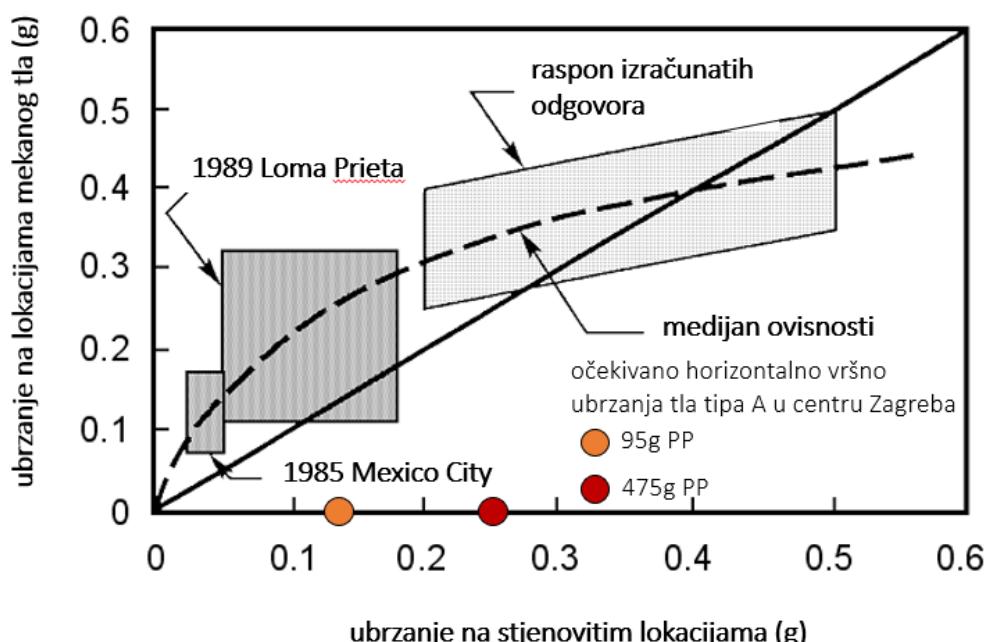
Slika 5. Amplifikacija seizmičke pobude ovisno o uvjetima lokalnog tla (Bačić i dr., 2020)

Pri tome su vrsta i stanje zbijenosti tla, debljina sedimenata i razina podzemna vode najvažniji faktori koji utječu na amplifikaciju seizmičke pobude koja je posljedica razlike u impedanciji između površinskih slojeva tla i osnovne stijene, koja predstavlja otpor titranju čestica tla (Bačić i dr., 2020). Osim toga, utjecaj na amplifikaciju ima i prigušenje amplitude valova uzrokovano neelastičnošću i heterogenošću sustava.

Pouzdana procjena veličine amplifikacije zahtijeva adekvatno definirani geotehnički seizmički model, uključivo poznavanje brzine posmičnih valova karakterističnih slojeva, gustoće tla u slojevima i nelinearnih odnosa modula posmika i prigušenja s posmičnom deformacijom, te dubinu profila do osnovne stijene (karakterizirane brzinama posmičnih valova većih od 800 m/s). S obzirom da određivanje ovih veličina zahtijeva opsežan program geotehničkih istraživanja s raznovrsnim



geofizičkim mjerjenjima do većih dubina, te primjerena laboratorijska ispitivanja, isti se u pravilu provode kod s većih i složenijih objekata kod kojih su prisutni značajniji rizici. Za građevine "uobičajene" namjene se utjecaj lokalnih uvjeta u tlu na amplifikaciju seizmičke pobude određuje pojednostavljenim postupkom, prema trenutno važećoj normi za projektiranje građevina, HRN EN 1998-1. U ovoj normi se definiraju različiti tipovi tla, na temelju kojih se dalje određuju relevantni linearni spektri odziva kao ulazni podatak za seizmičke proračune konstrukcija. Tipu tla su pridruženi amplifikacijski faktori, tablica 2, koji s uglavnom mjerodavni za mala seizmička ubrzanja. Naime, amplifikacija se može očekivati pri manjim seizmičkim ubrzanjima podloge, dok je u literaturi zabilježeno da pri većim ubrzanjima, kada dolazi čak do "de-amplifikacije", problem postaju znatni pomaci, slika 6.



Slika 6. Ovisnost amplifikacije u mekanim tlima o razini seizmičkog ubrzanja podloge (stijene), modificirano prema (Idriss, 1990)

**Tablica 2** Tipovi tla prema trenutno važećoj verziji norme HRN EN 1998-1

Tip tla	Opis geotehničkog profila	$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (n / 30cm)	C_u (kPa)	Amp. faktor S
A	Stijena ili druga geološka formacija uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini.	>800	-	-	1.00
B	Nanosi vrlo zbijenog pijeska, šljunka ili vrlo krute gline debljine najmanje nekoliko desetaka metara, sa svojstvom postupnog povećanja mehaničkih svojstava s dubinom.	360-800	>50	>250	1.20
C	Debeli nanosi srednje zbijenoga pijeska, šljunka ili srednje krute gline debljine od nekoliko desetaka do više stotina metara.	180-360	15-50	70-250	1.15
D	Nanosi slabo do srednje koherenti (sa ili bez mekih koherentnih slojeva) ili s predominantno mekim do srednje krutim koherentnim tlama.	<180	<15	<70	1.35
E	Profili koji sadrže površinski sloj koji karakterizira brzina v_s tzv. tipove tla C i D i debljine od 5 m do 20 m, a ispod njih je kruti materijal s brzinom većom od 800 m/s.				1.40
S1	Nanosi koji sadrže najmanje 10 m debeli sloj mekane gline s visoko plastičnim indeksom ($PI > 40$) i visokim sadržajem vode.	<100		10 - 20	
S2	Nanosi likvefakcijski osjetljivog tla pijeska i gline ili bilo koji tip tla koji nije opisan od A do E i pod S1.				

Izbor odgovarajućeg spektra provodi se za različite tipove tla koji se "kompromisno" ocjenjuju na osnovi podataka u gornjih 30 m profila, a koji najčešće obuhvaćaju prosjek brzina posmičnih valova određenih geofizičkim metodama, ili alternativno podatke o nedreniranoj čvrstoći tla ili o broju udaraca *in-situ* SPT ispitivanja. Trenutna verzija norme predlaže V_{s30} brzinu koja se definira kao:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}} \quad (1)$$

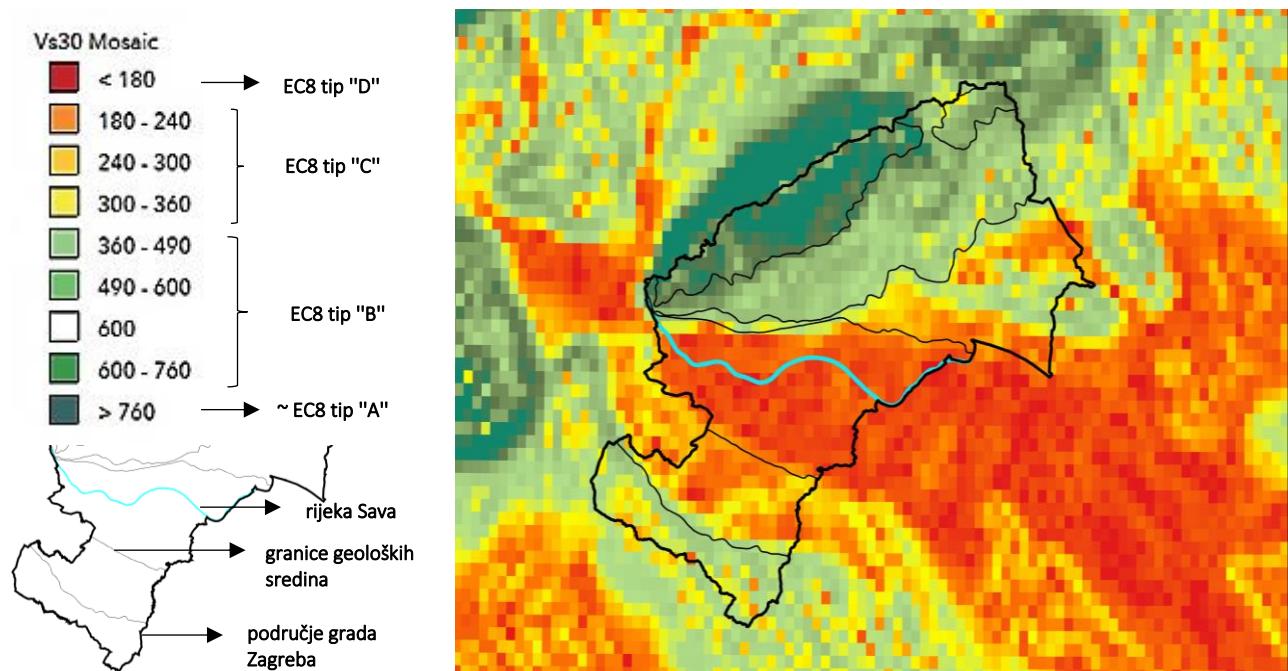


gdje su h_i [m] i v_i [m/s] debljina sloja, odnosno brzina posmičnih valova (pri posmičnoj deformaciji od 10^{-5} ili manjoj) za i-ti sloj, a N je ukupan broj slojeva u gornjih 30 m tla.

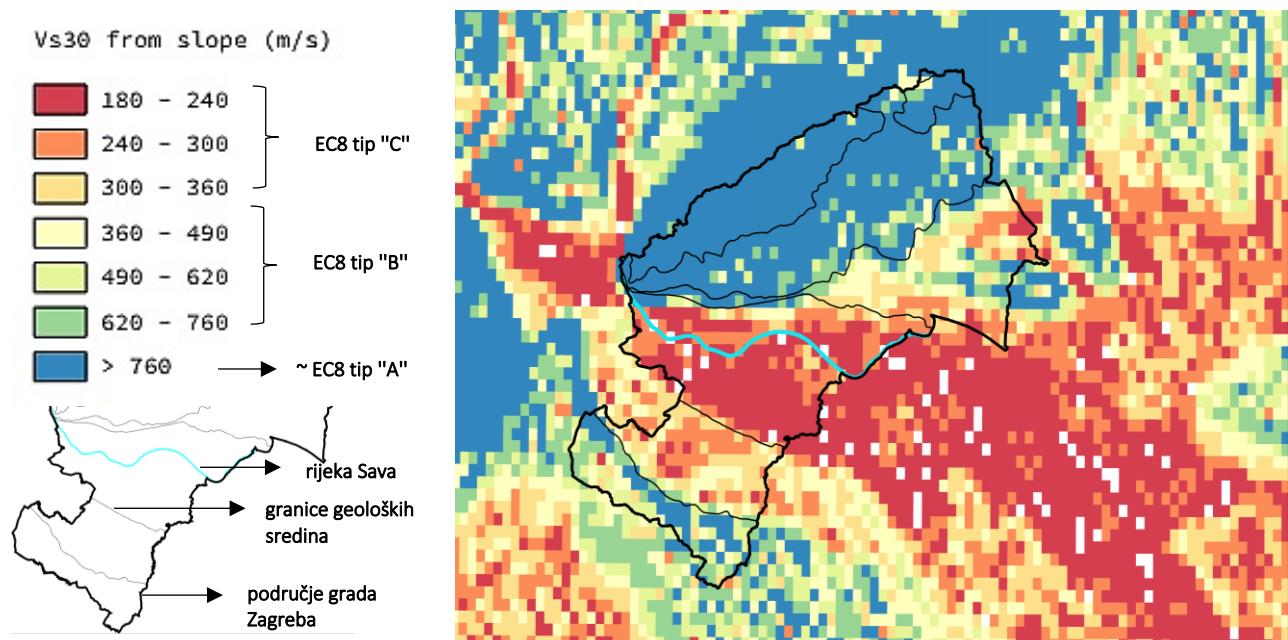
Određeni problemi s ovako definiranom podjelom tipova tla su identificirani te će se određene promjene implementirati u novoj generaciji Eurokoda 8, ali navedeno je van opsega ovog dokumenta.

Procjena vrijednosti V_{s30} na svjetskoj i na europskoj razini je dana USGS (2023), odnosno EFEHR (Weatherill i dr, 2021) kartama, koje parametar procjenjuju na temelju topografije, odnosno nagiba terena, vidi sliku 7. S obzirom na ograničenu pouzdanost i nedovoljnu rezoluciju ovakvih karata, preporuča se procjena V_{s30} na temelju geofizičkih ispitivanja na konkretnoj lokaciji ili alternativno na temelju SPT vrijednosti ili nedrenirane čvrstoće tla.

Iz predmetnih karata vidljivo je da su najmanje posmične brzine vezane za prisavsku ravnicu, tj. područje uz rijeku Savu. Lijevo i desno od Save povećava se nagib terena, a time i posmična brzina. Najveće brzine se odnose na gorje Medvednice, sjeverno od rijeke Save.



(a)

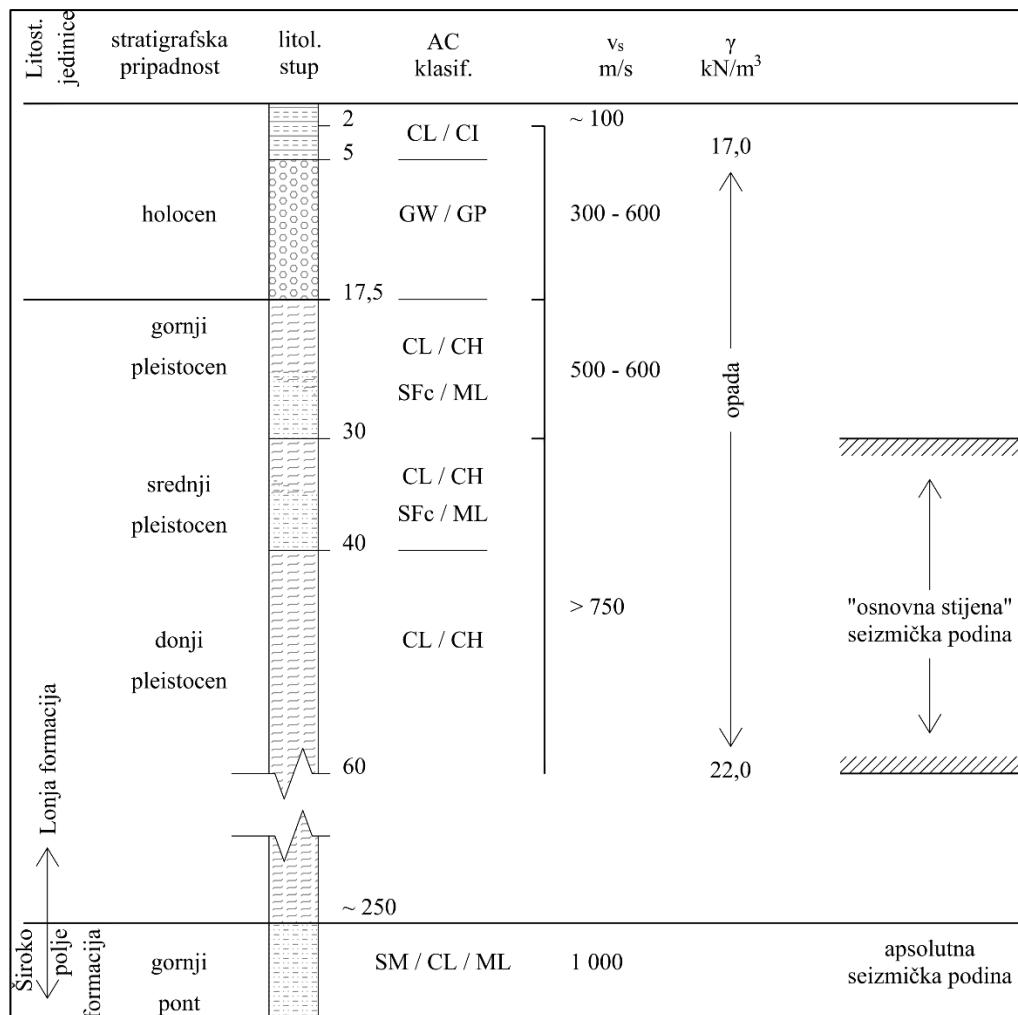


(b)

Slika 7. Karte V_{s30} područja grada Zagreba: a) prema modelu USGS (2023) V_{s30} topografije; b) prema EFEHR modelu (Weatherill i dr, 2021) V_{s30} topografije

2.5.2. Povijesni izvori

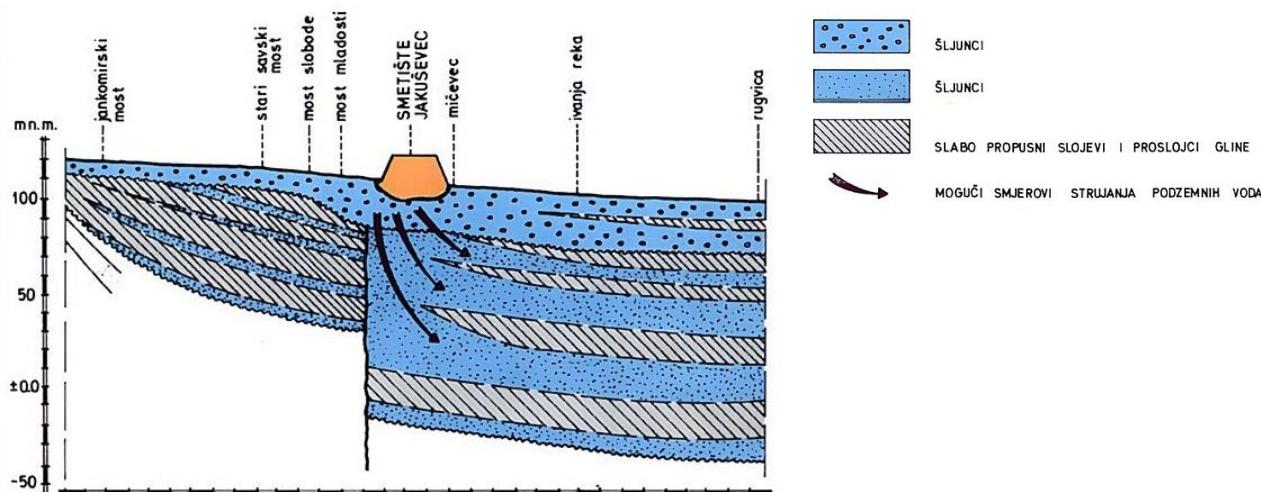
Studija Seizmička mikrorajonizacija Zagreba - 14 općina (Geotehnika-Geoexpert, 1988) omogućila je određivanje brzine posmičnih valova plićeg dijela sinteznog litološkog stupa prisavske ravnice (Jurak i dr., 1998.), vidi sliku 8. Prvih pet metara dubine vrijednost posmične brzine je oko 100 m/s. Brzina posmičnih valova u rasponu od 300–600 m/s je od 5 do 30 m dubine, dok je seizmička podina na dubini 250–300 m (granica formacija Lonja i Široko polje), a karakterizira je brzina posmičnih valova od 1 000 m/s.



Slika 8. Sintezni litološki stup prisavske ravnice (Jurak i dr., 1998)



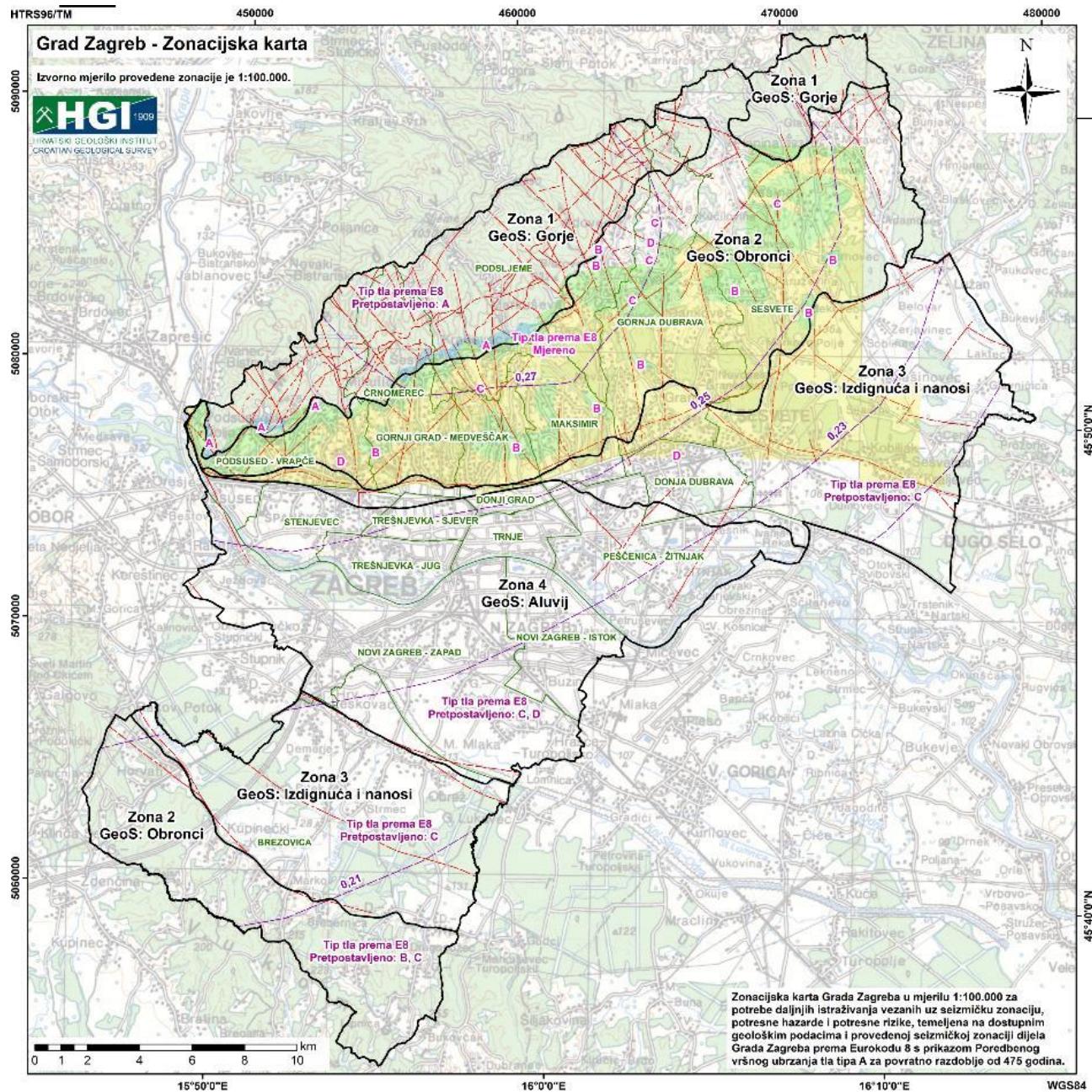
Predmetni litološki stup ponajviše vrijedi za područje zapadno od rasjeda Botinec – Most mladosti. Od njega donekle odstupaju modeli za HTC Resničinu (Ivanja Reka) i smetlište Jakuševac. Razlika granice holocen/pleistocen zapadno i istočno od rasjeda je oko 40 m (slika 9).



Slika 9. Uzdužni presjek rijeke Save u blizini smetlišta Jakuševac (Velić i Saftić, 1996)

2.5.3. Kategorizacija tla prema EC8 na području grada Zagreba

Prema Hrvatskom geološkom institutu (HGI, 2023), na temelju geoloških podataka, područje grada Zagreba je podijeljeno na četiri zone sličnih uvjeta (gorje, obronci, izdignuća/nanosi, aluvij), vidi sliku 10. Ukoliko se uzme rijeka Savu kao referentna krivulja (koja je u zoni aluvija) na lijevoj strani su izdignuća i nanosi sjever, južni obronci Medvednice i gorska jezgra Medvednice. Na desnoj strani su izdignuća i nanosi jug te obronci Vukomeričkih Gorica.



Slika 10. Zone sličnih geoloških uvjeta na području grada Zagreba (HGI, 2023)

Podsljemenska zona, dio na slici 10 koji je osjenčan bojama, detaljno je istražena u studijama (Miklin i dr., 2007, Miklin i dr., 2018, Herak i dr., 2013, Miklin i dr., 2019). Na osnovu 388 MASW mjerena, 75 seizmičkih refrakcijskih profila, preko 25 downhole mjerena i drugih podataka kategorizirano je područje podsljemenske zone grada Zagreba:

- Gorska jezgra Medvednice – kategorija A;
 - Južni obronci Medvednice – kategorija B i C (35 % B, 65 % C);
 - Izdignuća i nanosi sjever – kategorija C;



Statističkom analizom provedenih 388 MASW mjerena u podsljemenskoj zoni, vidljivo je da se za kategoriju tla B, brzine posmičnih valova V_{s30} kreću u rasponu od 361 m/s do 680 m/s, pri čemu je prosječna brzina svih mjerena 436 m/s, a medijan brzine iznosi 408 m/s. Za kategoriju tla C, brzine posmičnih valova kreću u rasponu od 226 m/s do 360 m/s, pri čemu je prosječna brzina svih mjerena 306 m/s, a medijan brzine iznosi 311 m/s.

Na temelju postojeće zonacije podsljemenske zone, razmatranih geoloških, hidrogeoloških i inženjerskogeoloških podataka, kategorije tla su procijenjene i za desnu obalu rijeke Save, tj. izdignuća i nanose jug te obronke Vukomeričkih Gorica (potrebno provjeriti istraživačkim radovima), vidi sliku 11. Poseban slučaj je prisavska ravnica.

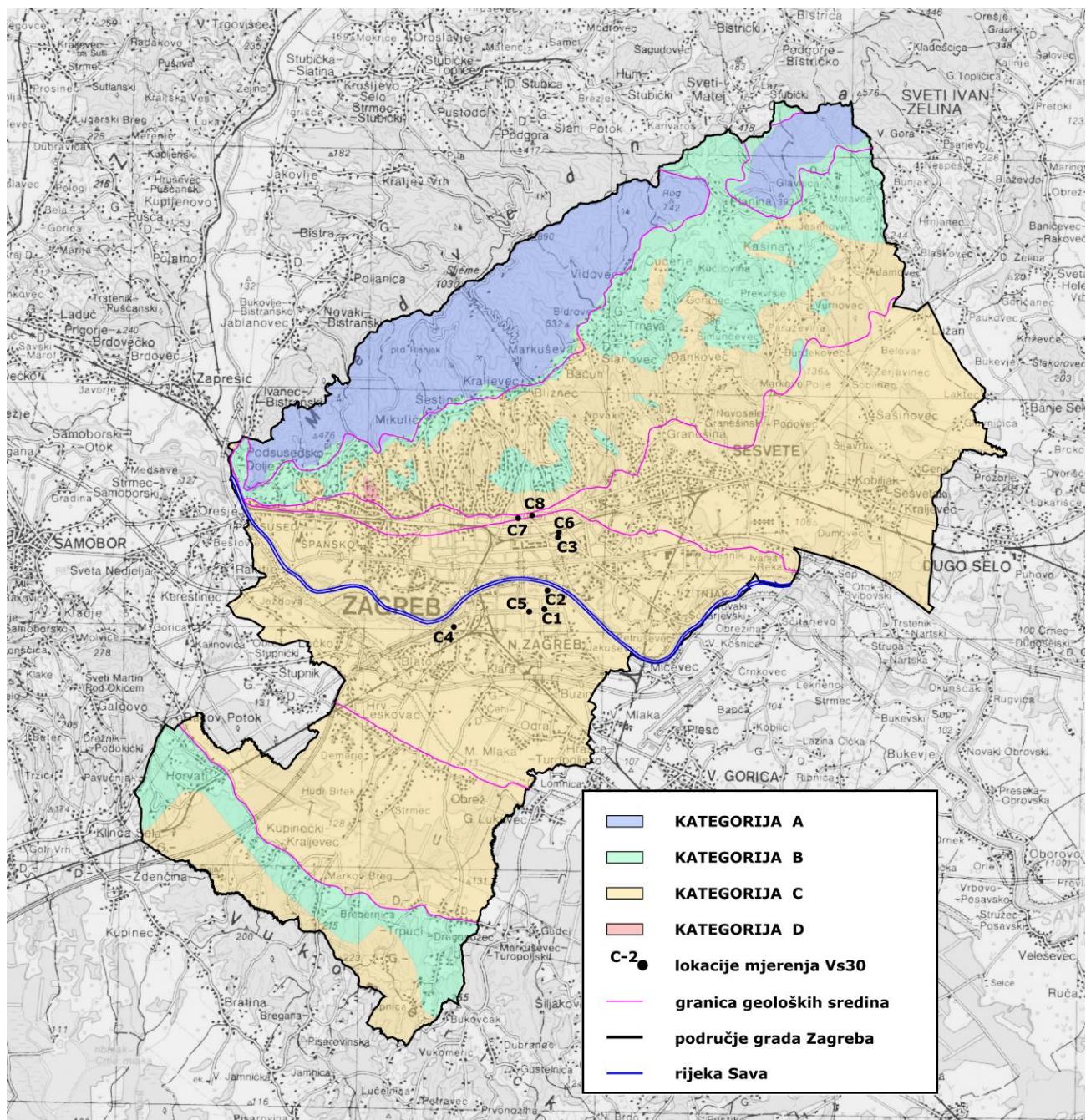
Prisavska ravnica je opisana kao ravničarsko područje izgrađeno od pokrovnih naslaga (gline i praha) i aluvijalnih naslaga (šljunaka i pijesaka). Aluvijalne naslage čine vodonosnik s vodnom plohom u stalnom kontaktu s rijekom Savom, gdje promjene vodostaja Save utječu na promjene razina podzemne vode. Na predmetnom području lokalno je moguća pojava likvefakcije i poplava zbog čega je savski aluvij potrebno prioritetno istražiti.

Budući da obim istraživanja nije dovoljan za detaljnu analizu na osnovu inženjerskogeološkog modela (slika 8) i dostupnih podataka (tablica 3) procjenjuje se da je cijela prisavska ravnica kategorije C (prema EC8 tu pripadaju brzine raspona 180 do 360 m/s), tj. da je V_{s30} veći od 180 m/s. Iako se uvidom u prikupljena istraživanja MASW i *downhole* metodom (tablica 3) može vidjeti da su sva ispitivanja u granicama od oko 300 do 360 m/s čime su bliži gornjoj granici kategorije C.

U prisavskoj ravnici lokalno su moguće i pojave tipa tla D i S2 (tla podložna likvefakciji), zbog čega je potrebno provesti detaljne istraživačke radove.

Tablica 3 Dostupni mjereni podaci MASW i *downhole* ispitivanja u prisavskoj ravnici

Oznaka	Lokacija	X	Y	V_{s30}	Kategorija	Izvor
C1	I. Gimnazija	460495	5071029	350 m/s	C	Uglešić, 2021.
C2	Bundek	460617	5071806	334 m/s	C	Uglešić, 2021.
C3	Hilton Garden	461057	5074033	293 m/s	C	Uglešić, 2021.
C4	Arena	456720	5070287	321 m/s	C	Kvasnička, 2009.
C5	HL - Sopot	459861	5070931	357 m/s	C	CGF d.o.o., 2022.
C6	Zavrtnica	461097	5074234	318 m/s	C	TC d.o.o., 2016.
C7	Trg bana J. J.	459398	5074823	357 m/s	C	TC d.o.o., 2017.
C8	Importanne Galleria	459983	5074930	297 m/s	C	IGH d.d., 1994.



Slika 11. Kategorizacija tla na području administrativnih granica grada Zagreba prema EC8 s lokacijama mjerjenja u prisavskoj ravnici – sintetizirani prikaz

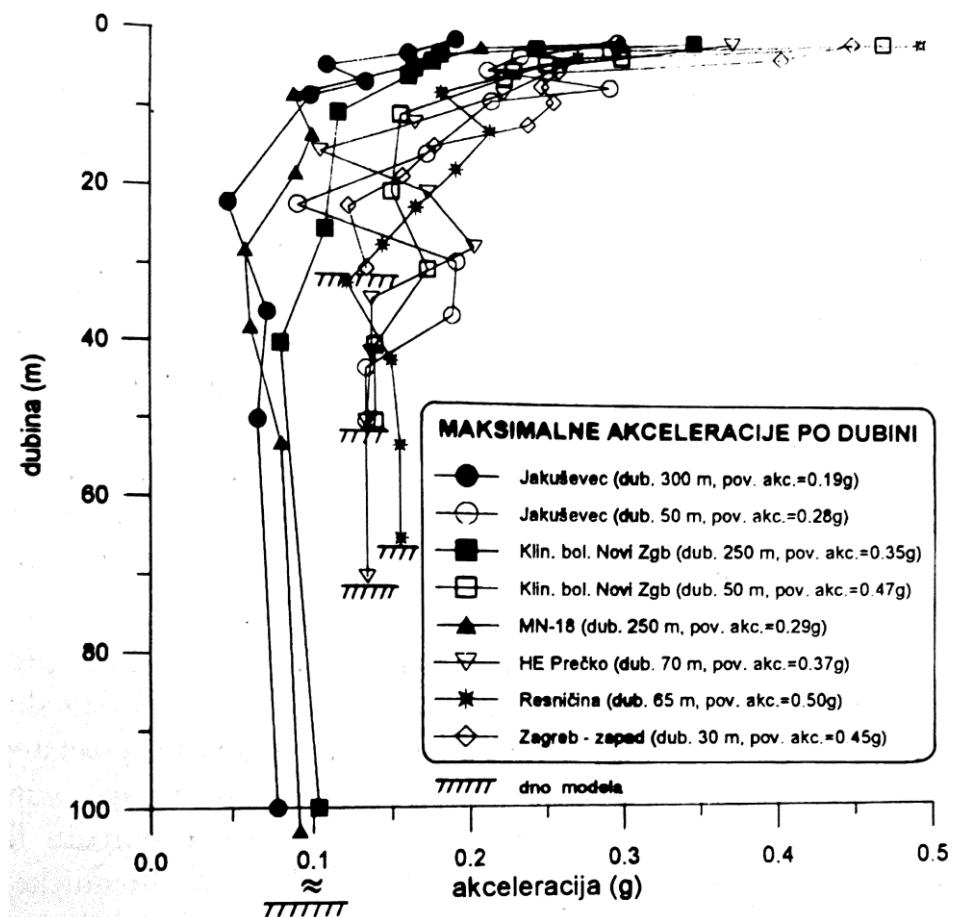
2.5.4. Izračun amplifikacije na području grada Zagreba

Dok navedena kategorizacija tla po HRN EN 1998-1 omogućava izravan odabir amplifikacijskog faktora, pojednostavljajući pritom njihov odabir za potrebe projektiranja, činjenica je da je amplifikacija u tlu nelinearne prirode. Neophodno je stoga, za građevine s izraženim sigurnosnim aspektima i važnosti



kao što su energetski objekti, velike brane ili mostovi, ali i za "manje važne" građevine kada za to postoje mogućnosti, provesti detaljan izračun lokalne amplifikacije. Takvi proračuni će omogućiti veću sigurnost građevina i ljudi i smanjiti štetu nastalu od budućih potresa, a koji će se neminovno dogoditi.

Ovisno o lokalnim uvjetima tla mogu se očekivati različite amplifikacije potresnog gibanja na površini. Primjerice, na području prisavske ravnice prvih 30 m tla sastoji se od šljunka s proslojcima pjeska i gline, a ovisno o debljini slojeva ovisi i amplifikacija (deblji slojevi gline - veća amplifikacija, deblji slojevi šljunka – manja amplifikacija). Rezultati proračuna (Jurak i dr., 1998) prikazani na slici 12 pokazuju da amplifikacija ovisi i o dubini osnovne stijene, gdje se za manje dubine osnovne stijene dobiva veća amplifikacija. Kako bi se točnije modelirao odziva tla, prilikom istraživačkih radova potrebno je predvidjeti dublje bušotine, tj. dobiti informaciju o svojstvima tla iz većih dubina.



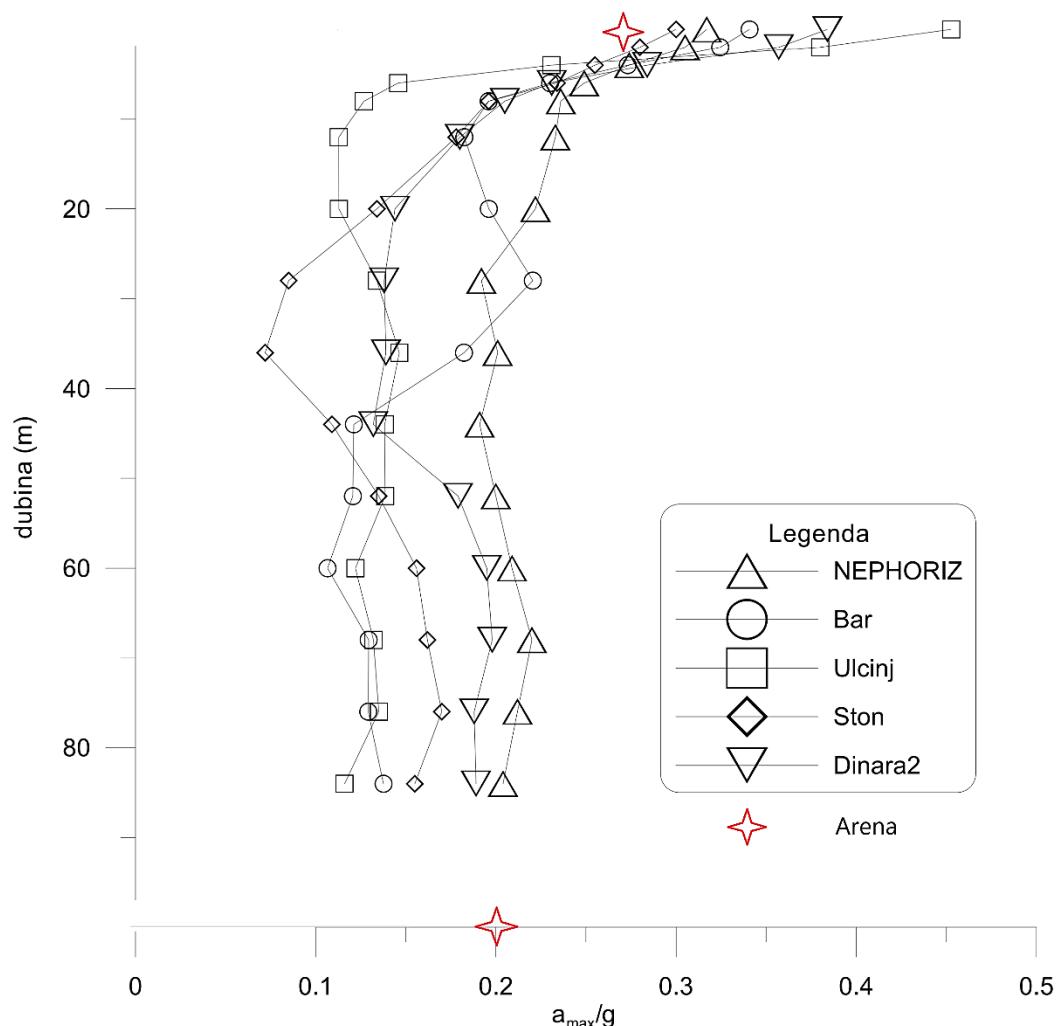
Slika 12. Amplifikacija na području prisavske ravnice (Jurak i dr., 1998)

Za potrebe određivanja lokalnih uvjeta tla na lokaciji Arene Zagreb (Salković i dr., 2009., Kvasnička, 2009.) geološki i geotehnički podaci prikupljeni su: bušenjem (izvedena je čak jedna stometarska



bušotina), izvođenjem standardnog penetracijskog pokusa te geofizičkim mjeranjima (*downhole* i MASW metode).

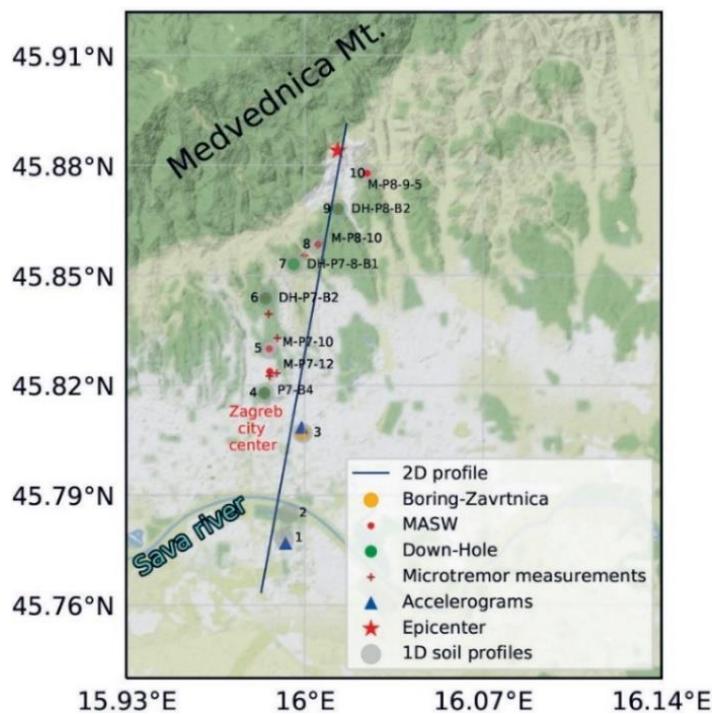
Arena Zagreb je smještena u području prisavske ravnice na naslagama prve savske terase. Na lokaciji nema opasnosti od likvefakcije, posmične brzine ne prelaze 500 m/s (brzine su mjerene do 80 m dubine) što znači da nije dosegnuta osnovna stijena, tj. seizmička podina (tip tla A prema HRN EN 1998-1 s posmičnim brzinama većim od 800 m/s), A tlo je kategorizirano kao tip tla C (prosječne posmične brzine 321 m/s). Na osnovu geotehničkog modela provedena je numerička analiza odziva tla pomoću programa SHAKE2000 te je dobiveno vršno ubrzanja tla na površini od 0,27 g (ubrzanje tla na razini osnovne stijene je 0,20 g), vidi sliku 13.



Slika 13. Amplifikacija na lokaciji Arene Zagreb, modificirano prema Kvasnička (2009)



U radu Uglešić i dr. (2021) provedena je analiza seizmičkog odziva tla pomoću programa DEEPSOIL na profilu Utrina (savski aluvij) – Markuševac (južni obronci Medvednice), vidi sliku 14a. Procijenjena amplifikacija tla za scenarij Zagrebačkog potresa iz 2020. godine pokazala je oko dva puta veće vršno ubrzanje tla na površini PGA_{surf} u odnosu na ubrzanje na razini osnovne stijene PGA_{rock} , vidi sliku 14b.



(a)

Site No.	Epicentral distance (m)	V_{S30} (m/s)	PGA_{rock} (g)	PGA_{surf} (g) “case 1”	PGA_{surf} (g) “case 2”
1 (QARH)	11873	350	0.1087	0.3114	0.2024
2	11101	334	0.1128	0.2930	0.1981
3 (QUHS)	8631	293	0.1288	0.3097	0.2390
4	7684	291	0.1350	0.3876	0.3157
5	6367	371	0.1440	0.3289	0.2778
6	4987	285	0.1566	0.3699	0.3419
7	3699	302	0.1612	0.3402	0.3212
8	2909	292	0.1653	0.3069	0.2973
9	1767	354	0.1696	0.3283	0.3251
10	1122	398	0.1714	0.3563	0.3559

(b)

Slika 14. Amplifikacija: a) lokacija profila Utrina – Markuševac; b) rezultati medijana vršnog ubrzanja tla za svih 10 lokacija: case 1 – hipocentar je ispod svake lokacije; case 2 – epicentar odgovara potresu iz 2020. (Uglešić, 2021)

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



Zbog osjetljivosti numeričkih modela, određivanja dubine seizmičke podine i velikog raspona vršnog ubrzanja na površini od 0,19 – 0,50 g (Jurak, 1998., Kvasnička, 2009., Uglešić i dr., 2021.) potrebno je provesti detaljne istraživačke radove koji uključuju: istražno buđenje uz jezgrovanje i determinaciju jezgre, klasifikacijske pokuse, *in situ* i geofizička ispitivanja. Nakon provedbe istraživačkih radova potrebno je napraviti sintezne geotehničke modele (sintezni geotehnički stup) za određeno područje grada Zagreba. Sintezni modeli su podloga za numeričku analizu odziva tla i zoniranje terena prema amplifikacijskim značajkama.



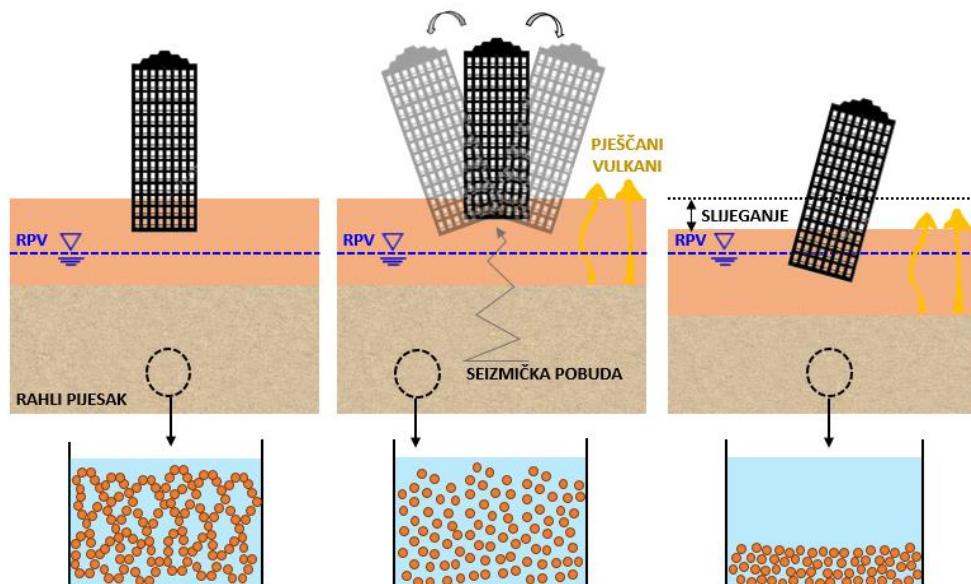
2.6. LIKVEFAKCIJSKI POTENCIJAL GRADA ZAGREBA

2.6.1. Općenito o likvefakciji

Uslijed jakih potresa u vodom zasićenom zrnatim materijalima može doći do pojave likvefakcije. Na pojavu likvefakcije kao prirodnog fenomena koji se događa do dubine od oko 12 – 15 m utječe niz faktora, pri čemu:

1. temeljno tlo mora biti građeno od rahlih nekoherenčnih depozita (najčešće čisti i sitni pjesak, rijeđe šljunak);
2. moraju biti prisutni saturirani uvjeti (zasićenost podzemnom vodom);
3. potres mora biti odgovarajuće (dovoljno velike) magnitude predstavljen maksimalnim (vršnjim) seizmičkim ubrzanjem.

Kada su zadovoljeni ovi preduvjeti, uslijed potresa dolazi do naglog i privremenog pretvaranja materijala u gustu tekućinu (materijali "likvefiraju"), gubeći pritom svoju posmičnu čvrstoću, slika 15. Likvefakcija se stoga manifestira kao gubitak nosivosti temelja, prekomjerne horizontalne i vertikalne deformacije, te prevrtanje ili naginjanje građevina. Bočni pomaci, odnosno širenje tla, utječu i na potporne (najčešće - priobalne) konstrukcije, a u nagnutim terenima mogu se pojaviti i klizišta.



Slika 15. Ilustrativni prikaz tri karakteristične faze pojave likvefakcije uslijed cikličkog potresnog djelovanja
(Bačić i dr, 2020)



Kako navode Bačić i dr. (2020), iz zabilježenih slučajeva likvefakcije po svijetu pokazuje se da je njena pojava na istoj lokaciji vrlo nepravilna, te vjerojatno ovisi i o drugim detaljima u profilu temeljnog tla. Potrebno je naglasiti da tlo koje je jednom likvefiralo, nije nužno steklo dovoljno otpornost na likvefakciju, tj. pri naknadnim trešnjama može doći do ponovne likvefakcije (tzv. *re-liquefaction effect*).

Štoviše, brojna istraživanja (Ishihara i Okada, 1978; Suzuki i Toki, 1984; Olson i dr, 2005; Wang i dr., 2013) su pokazala da je tlo koje je jednom likvefiralo i dalje vrlo vjerojatno podložno likvefakciji, gdje je pokazano da je tlo čak više likvefabilno tijekom sljedećeg (drugog) potresa nego tijekom prvog jakog udara.

2.6.2. Povijesni izvori

Potres magnitude Mw = 6,2 (Latečki, 2021) pogodio je Zagreb 1880. godine. Iz izvještaja o potresu (Torbar, 1882) moguće je prepoznati pet lokacija manifestacije likvefakcije, tj. izbijanja likvefiranog pijeska na površinu (tzv. *sand boils*, Kramer, 1996). Lokacije likvefakcije određene su prema povijesnoj karti grada Zagreba iz 1783./1784. godine (slike 17 - 19) i opisima u izvještaju, primjerice:

- “*Izpod Susjeda pak do savskog mosta*” ⇒ Podsused – most;
- “*U mjestu Jarun kod Save prala je ženska rupeninu*” ⇒ Jarun – obala umjetnog jezera (regatna staza);
- “*U močvarnom ... priedjelu kod Resnika, iza samog sela*” ⇒ Resnik – iznad pročistača otpadnih voda;
- “*... kod sela Drenje ... preko Save*” ⇒ Drenje Šćitarjevsko – desna obala Save, 1 km nizvodno od mosta;
- “*... blizu Narta*” ⇒ Nart Savski – jezero Siromaja.

U izvještaju se spominje izbijanje sivkastog pijeska (u gusto-žitkom stanju) iz pukotina u zemlji, formiranje kupčića (visine do 70 cm) te naknadno zatvaranje pukotina. Prema izvještaju drenjske pukotine (iz kojih je izbio pijesak) su u istom smjeru kao i resničke (JI - SZ). Smjer odgovara i nartskim pukotinama.

Budući da je lokacija pojave likvefakcije, točka A na slici 20 udaljena više od 3,5 km od korita Save, provjeren je opis iz 1882. godine (slika 16). Točkom 9. označeno je šire područje Stupnika, a opis lokacije A se odnosi na Podsused (*izpod Susjeda*) i Podsusedski most (*do savskog mosta*). Navedeno odgovara pretpostavci da je pojava likvefakcije vezana za korito rijeke Save, tj. aluvijalni nanos.



9. Sa Stupnika do 8 kilom. od Zagreba izvesti g. učitelj: Početak potresa dne 9. stud. u isto gotovo vrieme, kako i u Zagrebu, smjer mu bijaše od SZ—JL. Za potresa čula se podzemna tutnjava, a na zemlji se smračilo, kao da ju je gusta magla pritisla. Židane zgrade u veliko popucale, ponajviše sa sjevero-zapadne strane. Križ na zvoniku magnuo se prama jugu, a zvonik puknuo u sredini do dva hvata na dugačko na istočnoj strani. Isti tako popucaše i kapele ali najviše sa zapadne strane. Priedmeti zanjihajuće se od sivega prama ingu, a stvari popadale većinom prama jugu. Izpod Susjeda pak do savskoga mosta pukla zemlja na više mjesta te izbacivala za potresa sivkast piesak. Pukotine isle smjerom prama jugu; kašnje su se opet sklopile. Drveće se naklanjalo

Slika 16. Izvadak iz izvještaja (Torbar, 1882)



Slika 17. Povijesna karta Zagreba 1783/1784 - list 27 (Österreichisches Staatsarchiv) – lokacija pojave likvefakcije Podsused (Torbar, 1882)

Naručitelj:

Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

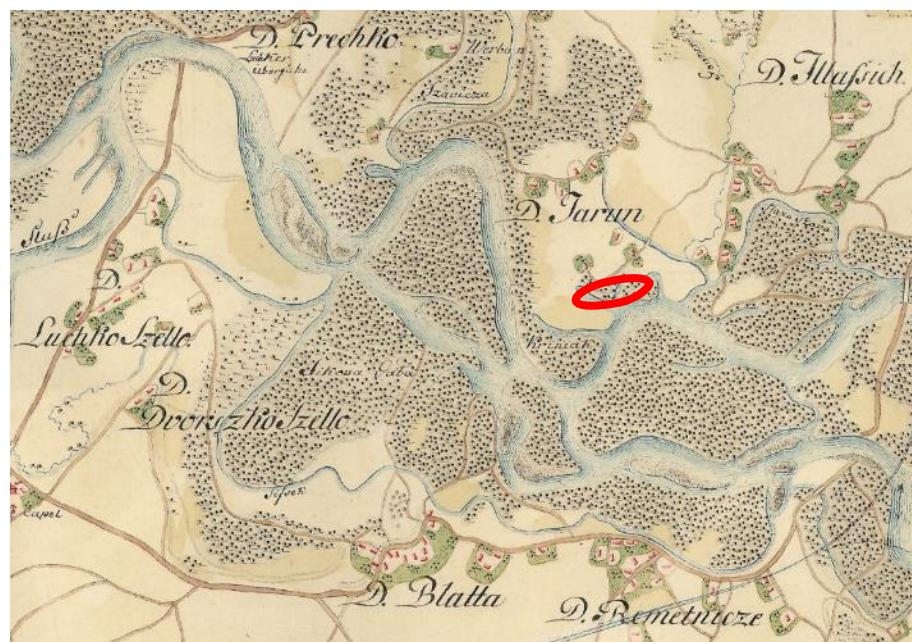


Elaborat:

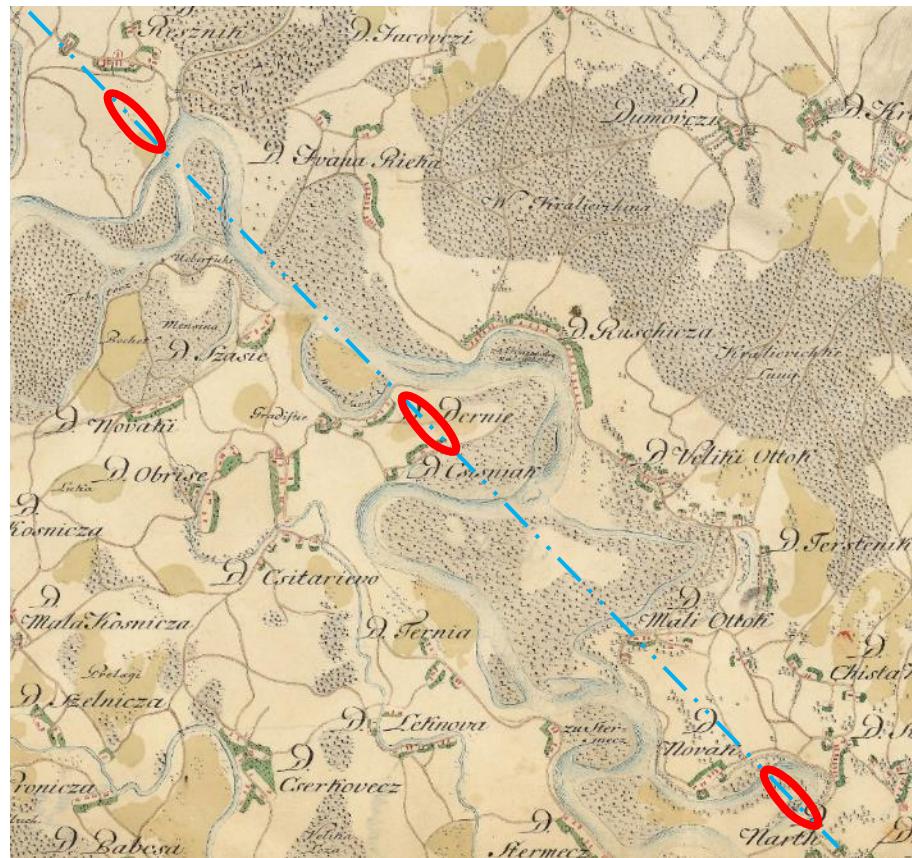
Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum:

Zagreb, rujan 2023.



Slika 18. Povjesna karta Zagreba 1783/1784 - list 27 (Österreichisches Staatsarchiv) – lokacija pojave likvefakcije Jarun (Torbar, 1882)

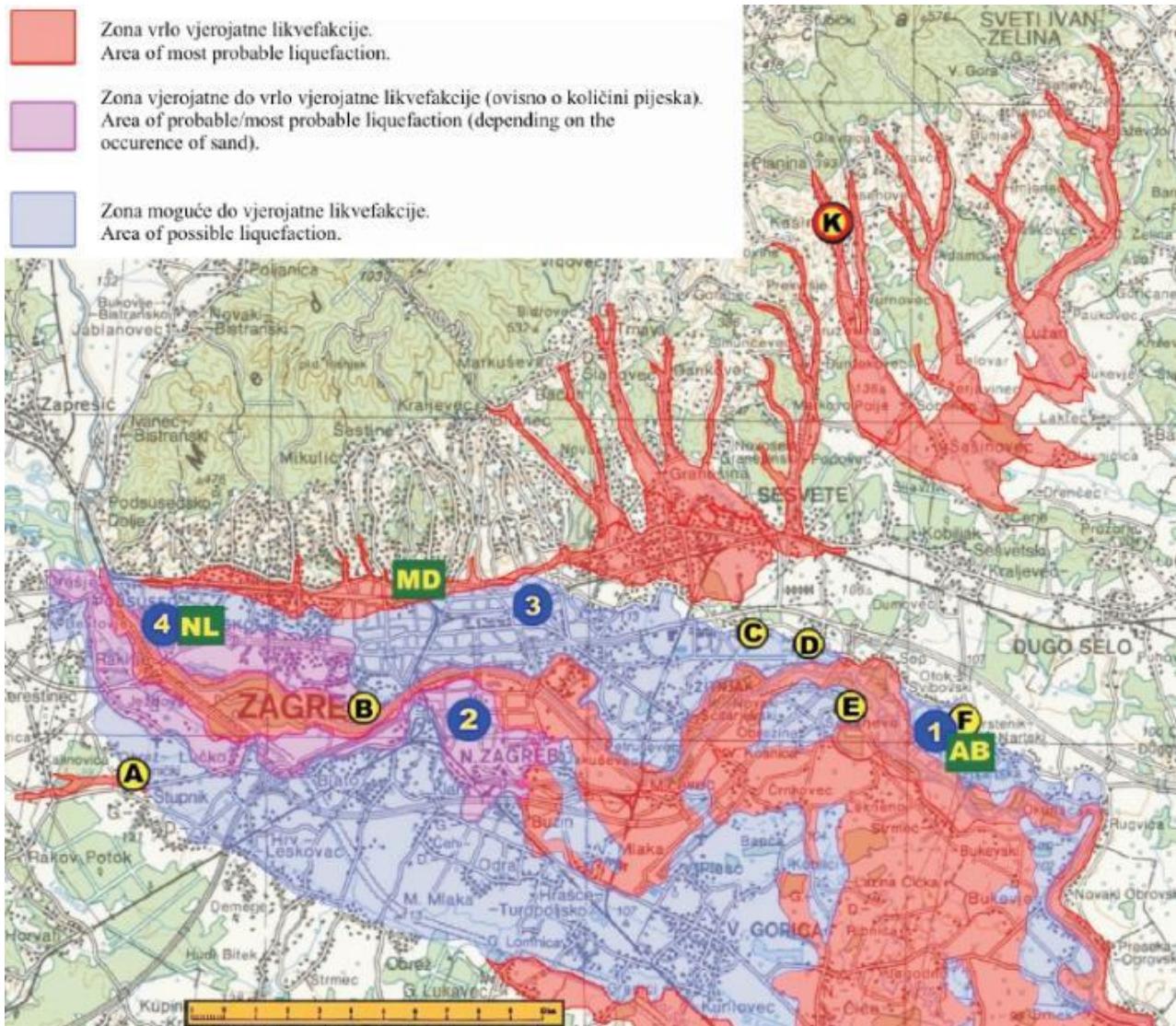


Slika 19. Povjesna karta Zagreba 1783/1784 - list 33 (Österreichisches Staatsarchiv) – lokacije pojave likvefakcije Resnik, Drenje, Nart (Torbar, 1882)



Prema radu Veinovića (2007), na području grada Zagreba likvefakcija se očekuje u mlađim slojevima saturiranih nekoherenčnih materijala na području prisavske ravnice i u aluvijalnim naslagama nekih potoka s Medvednice, vidi sliku 20. Za ovaku makrozonaciju potencijala likvefakcije su korišteni pojednostavljeni kriteriji zoniranja prema ISSMGE (1999), gdje korištena metodologija prilikom određivanja zona potencijala likvefakcije uključuje sljedeće podatke/procjene:

- Povijesni podaci iz 1880. godine;
- Hidrogeološki podaci za zagrebački vodonosnik;
- Podaci o starosti naslaga;
- Procjeni maksimalnog doseg likvefakcije;
- Geološkom mikromodelu pojave likvefabilnih materijala;
- Iskustvima drugih istraživača.



Slika 20. Preliminarno kvalitativno zoniranje zagrebačkog područja po potencijalu likvefakcije (Veinović, 2007)



Rezultat istraživanja je preliminarna kvalitativna karta zoniranja zagrebačkog područja po potencijalu likvefakcije, slika 20, temeljena na starosti i genezi slojeva, pri čemu autor navodi da nisu uzete u obzir razine podzemne vode. Autori navode da se karta može koristiti tek kao grubi orijentir te daju preporuke za izradu točnije karte: potrebno je kartirati položaj meandara sekundarnih korita, tj. leća pjeska i prašinastih materijala ili njihovih smjesa; izvesti dodatna istraživanja; analizirati sve dostupne elaborate istraživačkih radova; razviti model pojave likvefakcije u savskim pjeskovitim šljuncima. Potonja mogućnost pojave likvefakcije u šljuncima je zasigurno od interesa za područje prisavske ravnice u kojoj prevladavaju aluvijalne naslage (šljunci i pijesci). Sveobuhvatan prikaz preduvjeta pojave likvefakcija u šljuncima, kao i prikaz niza lokacija u svijetu gdje je došlo do pojave likvefakcije u šljuncima, dali su Rollins i Roy (2023) u pozvanom predavanju u sklopu druge hrvatske konferencije o potresnom inženjerstvu. U radu se navodi da je u svijetu zabilježena likvefakcija šljunaka na lokacijama 27 potresa u posljednjih 130 godina, te se naglašava da šljunci podložni likvefakciji obično sadrže više od 25% pjeska što smanjuje njihovu propusnost i čini ih podložnim na likvefakciju.

Za kvantifikaciju potencijala likvefakcije je svakako potrebna informacija o saturiranosti aluvijalnih depozita u prisavskoj ravnici. Zagrebački vodonosnik, površine 350 km^2 , smješten je između Medvednice, Vukomeričkih Gorica, Podsuseda i Rugvice. Površina zagrebačkog vodonosnika određena je na osnovu kvartarnih naslaga koje definiraju domenu vodonosnika (slika 21), dok su analizom dotjecanja/otjecanja (pomoću 295 piezometra) određeni rubni uvjeti:

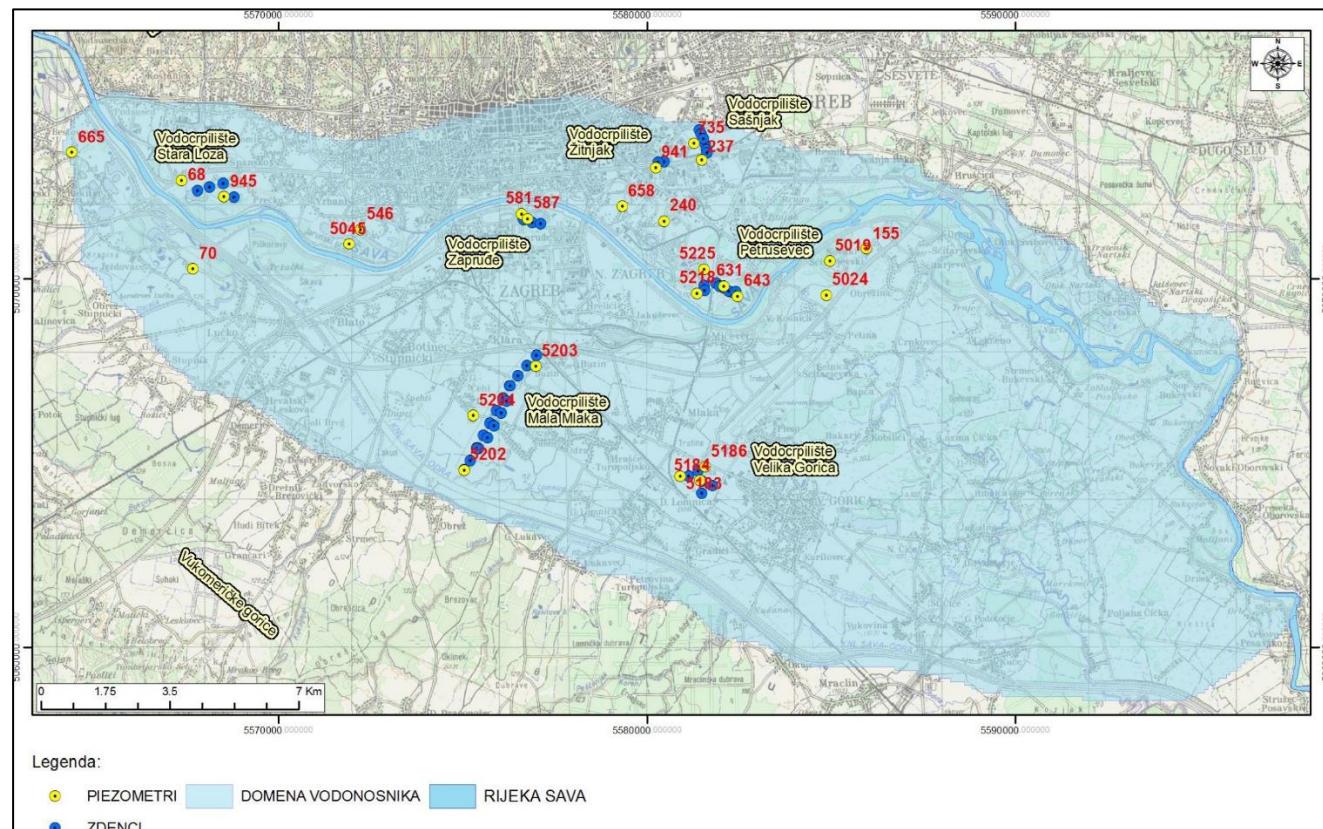
- na sjevernoj granici nema značajnijeg dotjecanja (Medvednica je građena pretežno od nepropusnih naslaga – na predmetnom području prevladava površinsko otjecanje potocima);
- zapadna granica je granica dotjecanja, a istočna otjecanja;
- zbog malog broja piezometara na južnoj granici se procjenjuje određeno dotjecanje.

Promjene u razinama podzemnih voda izravno su uvjetovane varijacijama vodostaja Save, ali i izgradnjom TE-TO Zagreb.

Sustav podzemnih voda na području grada Zagreba pripada strukturnoj jedinici Zagrebačka depresija koju karakterizira aluvij debljine preko 40 m (istočni dio grada) i pokrovne naslage male debljine (do 5 m) koje mjestimično nisu niti prisutne. Glavni smjer toka podzemne vode je od zapada prema istoku, paralelno s rijekom Savom, dok lokalni smjerovi toka podzemne vode ovise o vodostaju Save. Dubina



visoke podzemne vode od zapada prema istoku je od 4 do 15 m i od sjevera prema jugu od 2 do 9 m, dok je razlika između niske i visoke podzemne vode od 2 do 4 m.



Slika 21. Kartografski prikaz domene zagrebačkog vodonosnika (Bačani i Posavec, 2014)

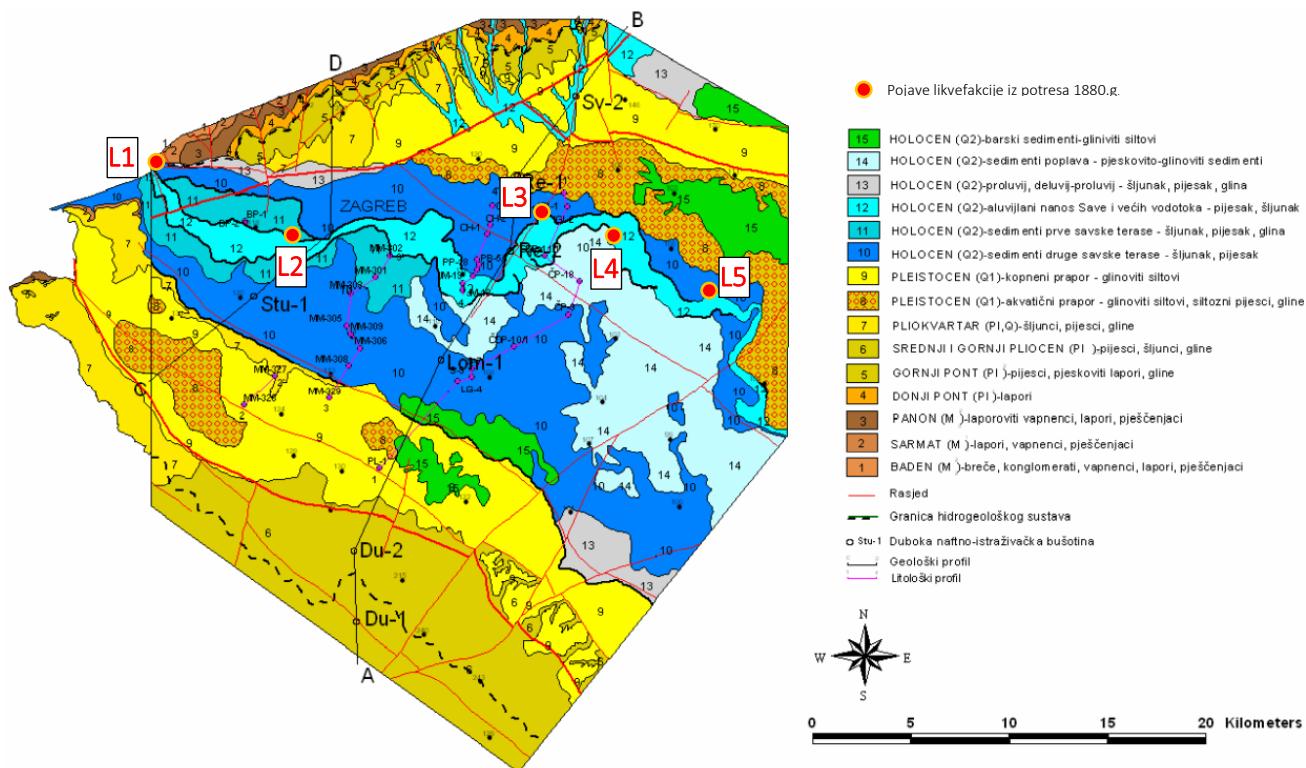
U aktivnostima identifikacije vodonosnika u gradu Zagrebu, vrijedi izdvojiti i projekt Geotwinn (www.geotwinn.eu), Obzor2020 Twinning projekt, u kojemu je Hrvatski geološki institut razvio napredni trodimenzionalni geološki model zagrebačkog vodonosnika podzemne vode, s prikazanim klastičnim aluvijalnim naslagama vodonosnika i neogenskim stijenama u podlozi.

Svakako je zanimljivo vidjeti i položaj pojave likvefakcije iz potresa iz 1880. g. na karti geologije zagrebačkog vodonosnog sustava. Grubom usporedbom i preklopom geološke karte i lokacija manifestacije likvefakcije iz 1880. g. može se prepostaviti da je do likvefakcije došlo na spoju aluvija sa: sedimentima druge savske terase (L1, L3, L5), sedimentima prve savske terase (L2) i sedimentima poplava (L4).

Iako se radi o relativno grubom preklopu, prilikom budućih istraživanja preporuča se izvođenje geofizičkih ispitivanja, a na temelju njihovih rezultata i istraživačkih bušotina duž granice aluvija.



Ukoliko se nakon provedbe detaljnih istraživačkih radova uspije uspostaviti veza granica aluvija/sedimenti – likvefakcija, bit će moguće točnije predvidjeti područje podložno likvefakciji te na taj način smanjiti potresni rizik i povećati zonu gradnje uz rijeku Savu.



Slika 22. Preklop pojave likvefakcije iz potresa 1880.g na karti geologije zagrebačkog vodonosnog sustava (EGPV, 2000)

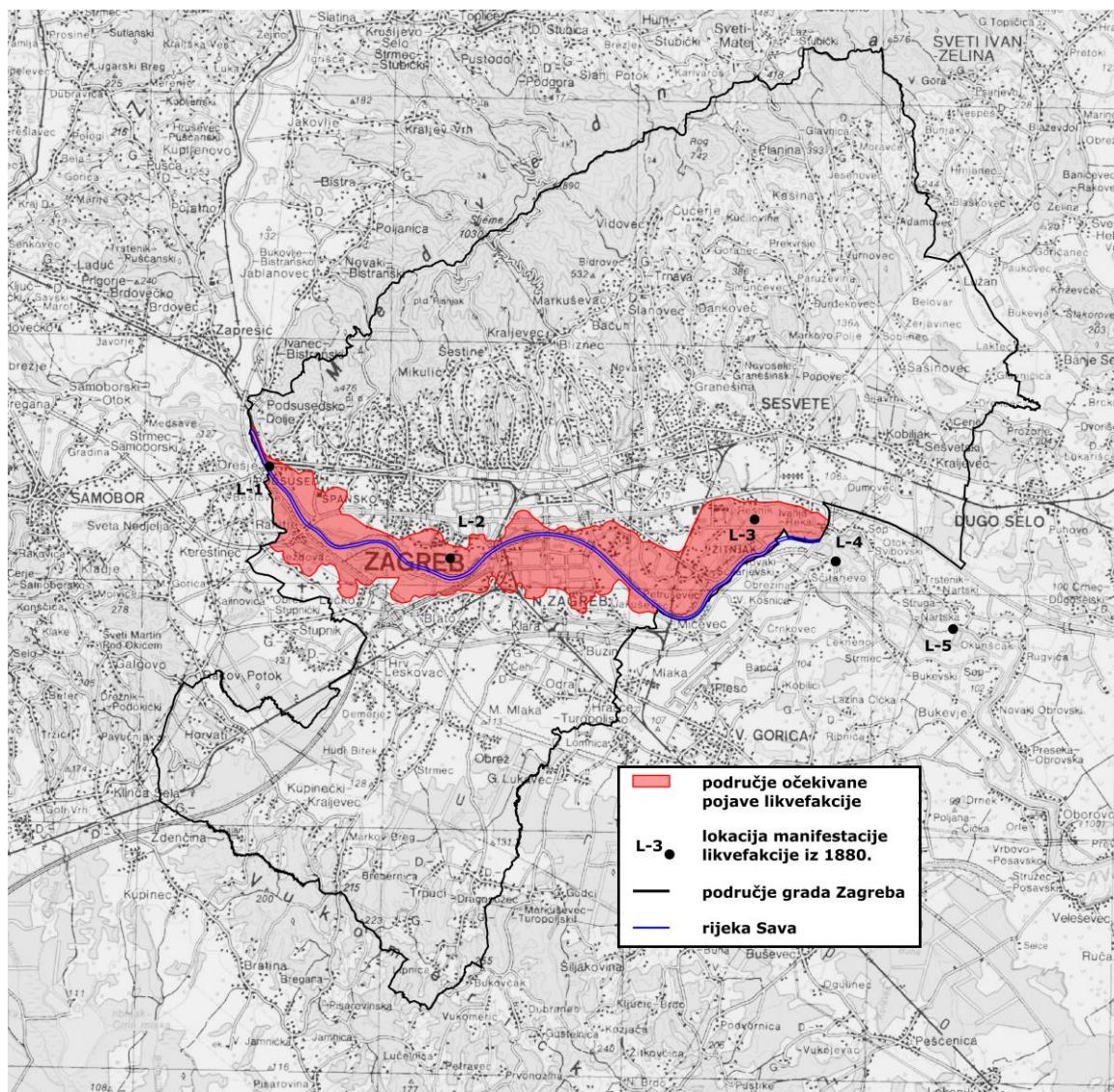
Potres magnitude $M_w = 5,3$ (Latečki, 2021) pogodio je Zagreb 2020. godine. Iako za predmetni potres ne postoji detaljni izvještaj, pojava likvefakcije nije zabilježena. Dva su moguća razloga: magnituda potresa nije dovoljno velika i/ili razina podzemne vode je bila niska (sušna godina).

U radu HGI (2023), područje grada Zagreba je zonirano na četiri zone (vidi sliku 10). Pojavu likvefakcije moguće je očekivati za aluvij te lokalno za zone izdignuća/nanosa.



2.6.3. Određivanje područja podložnog likvefakciji – prisavska ravnica

Iz povijesnih izvora vidljivo je da je pojava likvefakcije vezana uz nekadašnji tok rijeke Save. Potencijal likvefakcije pada s povećanjem konsolidiranosti naslaga (starošću), zbog čega u smjeru: sedimenti druge terase (a2) – sedimenti prve terase (a1) – aluvijalni nanos (a, sedimenti neposredno uz korito Save) potencijal raste. Na osnovu povijesnih karata iz 1783./1784. određene su granice utjecaja rijeke (močvare, pritoci, mrvlje, poplavno područje, rub obale, meandri, ade). Na predmetnom području moguće je očekivati pojavu likvefakcije, vidi sliku 23. Navedenu pretpostavku je potrebno dokazati istražnim radovima, vidi poglavlje 2.8.



Slika 23. Područje očekivane pojave likvefakcije u prisavskoj ravnici i povijesne (potres iz 1880. godine) lokacije manifestacije likvefakcije (L1 - Podsused, L2 - Jarun, L3 - Resnik, L4 - Drenje Šćitarjevsko, L5 - Nart)



2.6.4. Postupak određivanja potencijala likvefakcije

Postoji nekoliko pristupa određivanja potencijala potrebnog za aktivaciju likvefakcije, primjerice:

- Pristup cikličkog naprezanja (cyclic stress approach, Seed i Idriss, 1971);
- Pristup cikličke deformacije (cyclic strain approach, Dobry i dr., 1982);
- Pristup analize odziva temeljene na efektivnim naprezanjima (effective stress-based response analysis approach, DESRA - Lee i Finn, 1978).

U nastavku je dan primjer određivanja potencijala prema pristupu cikličkog naprezanja. Nakon provođenja istraživačkih radova na području prisavske ravnice preporuča se uz ovdje prezentirani pristup koristiti i pristup cikličke deformacije (Dobry, 2015).

U pristupu cikličkog naprezanja (karakterizacija opterećenja) intenzitet potresnog djelovanja je kvantificiran omjerom primjenjenog posmičnog i efektivnog vertikalnog naprezanja:

$$CSR = \frac{\tau_c}{\sigma_{v0}} \quad (2)$$

Dok je prilikom laboratorijskog ispitivanja (kontrolirano naprezanje) vrijednost τ_c konstantna, na terenu je promjenjiva. Zbog navedenog posmično naprezanje je potrebno aproksimirati brojem ciklusa i konstantnim posmičnim naprezanjem:

$$\tau_c = 0,65 \times \tau_{max} \quad (3)$$

Maksimalno posmično naprezanje sloja tla τ_{max} pri površini (površinski sloj debljine h) može se procijeniti uzimanjem u obzir pretpostavke da se stupac tla ponaša kao kruti blok tijekom djelovanja potresa:

$$\tau_{max} = \frac{a_{max}}{g} \times \sigma_{v0} \quad (4)$$

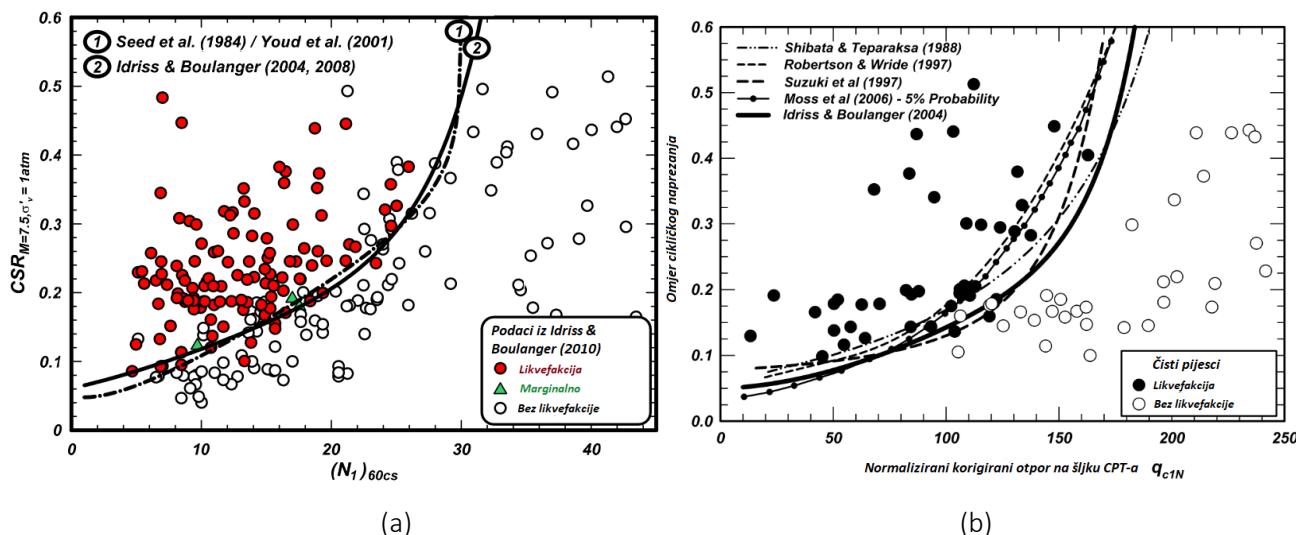
Budući da se maksimalno posmično naprezanje smanjuje s dubinom (stupac tla ispod površinskog sloja debljine h ne ponaša se kao kruti blok) izraz se množi faktorom redukcije r_d ; nakon čega se dobije konačan izraz:

$$CSR = 0,65 \times \frac{a_{max}}{g} \times \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \times r_d \quad (5)$$



U pristupu cikličkog naprezanja (karakterizacija otpora) potrebno je odrediti otpor tla u odnosu na gubitak posmične čvrstoće, tj. aktivaciju likvefakcije. Otpor tla se može odrediti na osnovu laboratorijskih testova (primjerice NGI-DSS) i procijeniti pomoću *in-situ* ispitivanja: standardni penetracijski pokus, ispitivanje statičkim prodiranjem (CPT) i brzinom posmičnih valova.

Dok laboratorijska ispitivanja mogu ponuditi detaljniji uvid u likvefakcijski potencijal nekog materijala te se njima mogu dobiti adekvatni podaci o parametrima tla za složene numeričke modele u efektivnim naprezanjima (Bačić, 2020), u praksi se za rutinsku evaluaciju koristi pojednostavljena metoda zasnovana na navedenim *in-situ* ispitivanjima, i empirijski tzv. likvefakcijski dijagrami (karte) koji se povremeno ažuriraju (Boulanger i dr., 2012; Idriss i Boulanger, 2015), vidi sliku 24. Važeća norma HRN EN 1998-5 navodi da istraživanja za likvefakciju moraju obuhvatiti najmanje provedbu na terenu SPT-a ili CPT-a te određivanje krivulja granulometrijskog sastava u laboratoriju. Ujedno, norma eksplisitno daje u kojim se slučajevima likvefakcija može zanemariti (ako je sadržaj gline u pijesku veći od 20% s indeksom plastičnosti većim od 10; ako je sadržaj praha u pijesku veći od 35% s korigiranim brojem udaraca SPT-a većim od 20; ako je pijesak čist i ima korigirani broj udaraca SPT-a veći od 30).

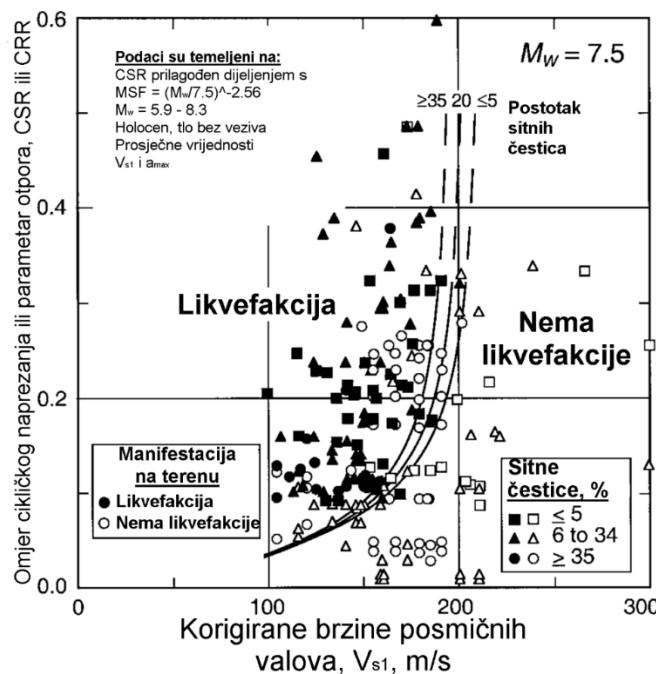


Slika 24. Primjer dijagrama aktivacije likvefakcije temeljenih na rezultatima SPT (a) i CPT (b) ispitivanja, modificirano prema Boulanger i Idriss (2014)

U pogledu likvefakcijskih dijagrama svakako je zanimljiva mogućnost primjene dijagrama aktivacije likvefakcije temeljenog na rezultatima ispitivanja posmičnih brzina u tlu, slika 25. Ovakav postupak je u praksi manje zastupljen u odnosu na dijagrame bazirane na SPT ili CPT ispitivanjima, a vjerodostojnija i kvalitetnija informacija o brzini posmičnih valova se može dobiti iz skupljih i sporijih *downhole* ispitivanja, u odnosu na brža i jeftinija površinska MASW ispitivanja. Međutim, bez obzira što bi se



navedena površinska seizmička ispitivanja morala kalibrirati na temelju laboratorijskih ispitivanja i na temelju SPT i CPT ispitivanja, površinska ispitivanja mogu biti od koristi, obzirom da bi njima "pokrio" veliki volumen, tla a rezultati kojih bi se, osim za procjenu kategorije tla prema HRN EN 1998-1, mogli koristiti i u istraživanjima vezanim za procjenu likvefakcijskog potencijala prisavske ravnice.



Slika 25. Dijagram aktivacije likvefakcije za potrebe magnitude 7,5 temeljen na posmičnim brzinama, modificirano prema Andrus i Stokoe (2000)

Na osnovu predmetnih dijagrama, tj. krivulja određuje se parametar otpora CRR. Parametar CRR je vrijednost CSR-a potrebna kako bi se aktivirala likvefakcija. Do aktivacije likvefakcije dolazi kada je:

$$CSR \geq CRR \quad (6)$$

Odnos parametra CRR i CSR daje faktor sigurnosti:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (7)$$

Na osnovu dobivenih faktora sigurnosti, moguće je generirati kartu potencijala likvefakcije za procijenjeno vršno ubrzanje na površini tla. Kartama bi se odredila osjetljiva područja i potresni rizik. Nastavno na postupke izračuna faktora sigurnosti determinističkim metodama, Chen i Juang (2000) predložili su klasifikaciju tla na temelju probabilističkih pristupa, s obzirom na vjerojatnost likvefakcije



(PL) i faktor sigurnosti (FS), a ovisanu o metodi ispitivanja tla (SPT, CPT). Pri tome se za vjerojatnost pojave likvefakcije koristi izraz:

$$PL = \frac{CRR}{\left[1 + \left(\frac{FS}{A}\right)\right]^B} \quad (8)$$

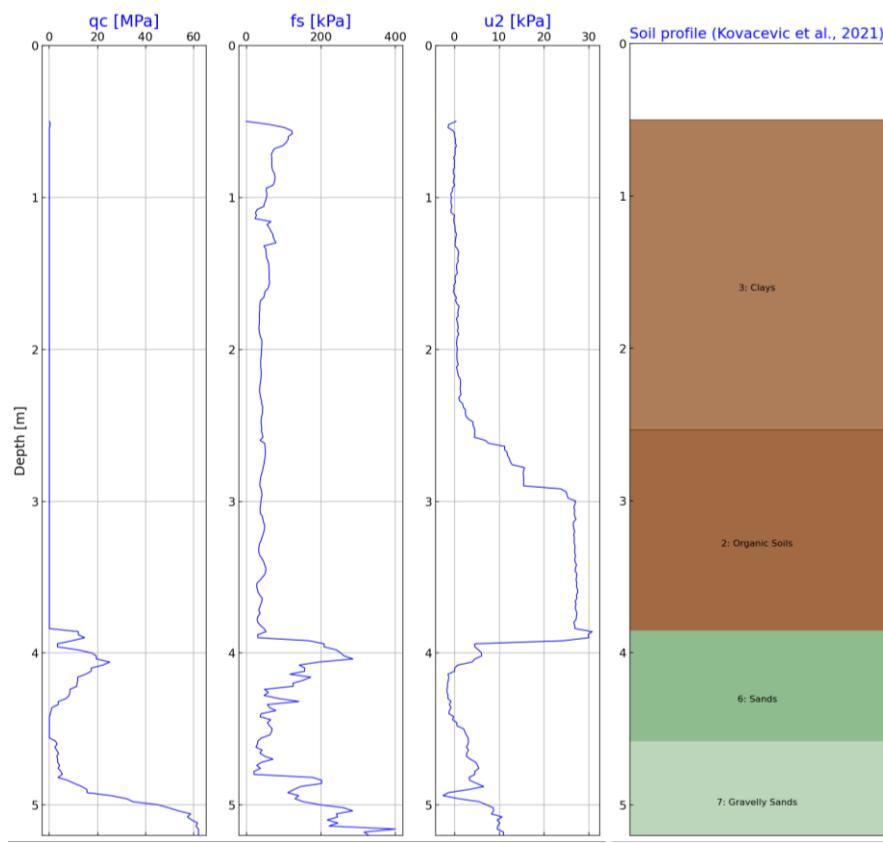
pri čemu A i B predstavljaju koeficijente koji ovise o vrsti provedenog terenskog ispitivanja. Klase vjerojatnosti likvefakcije su dane u tablici 4.

Tablica 4 Klase vjerojatnosti pojave likvefakcije, prema Chen i Juang (2000)

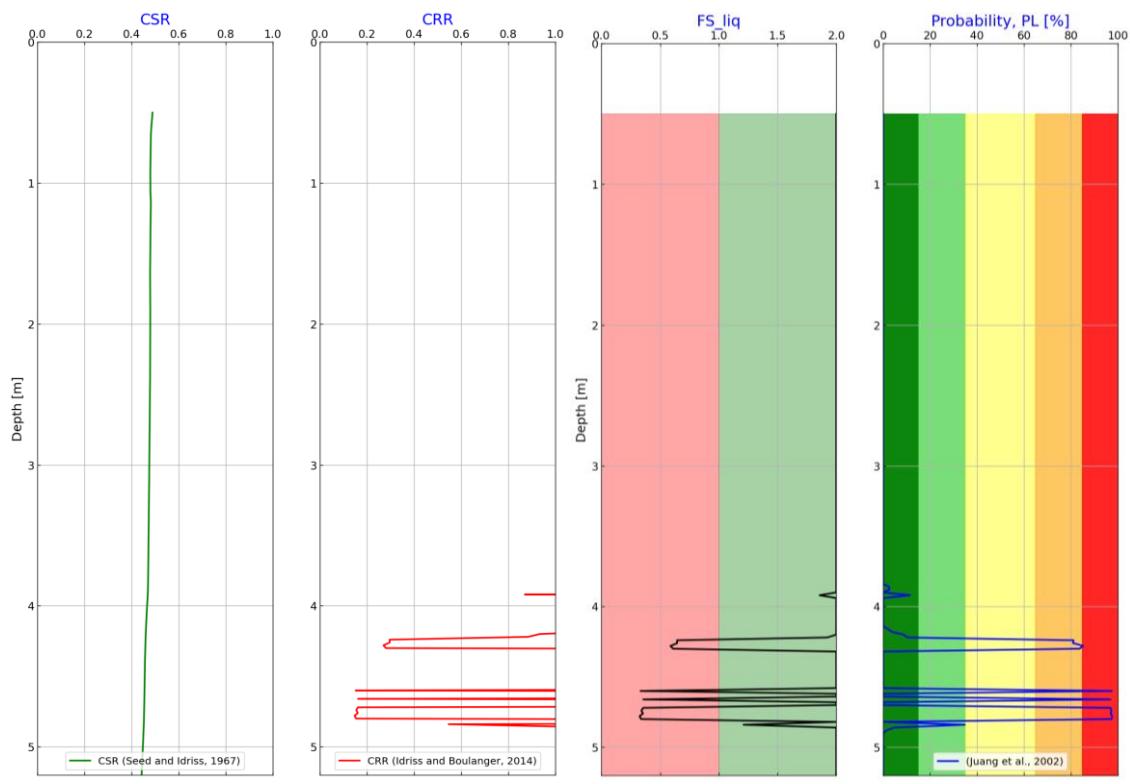
Vjerojatnost likvefakcije	Klasa	Opis
0.85 ≤ PL	5	Gotovo sigurno će tlo likvefirati
0.65 ≤ PL < 0.85	4	Vrlo je izgledno da će tlo likvefirati
0.35 ≤ PL < 0.65	3	Likvefakcija / ne-likvefakcija je jednako vjerojatna
0.15 ≤ PL < 0.35	2	Nije izgledno da će tlo likvefirati
PL < 0.15	1	Gotovo sigurno tlo neće likvefirati

Niz ispitivanja statičkim penetracijskim ispitivanjem je provedeno duž nasipa za obranu od poplava na području grada Zagreba i zagrebačke županije, u sklopu projekta CROSScade (Prekogranično upravljanje kaskadnim rizicima za kritičnu infrastrukturu na slivu Save) koji se su-financira od strane Europske Unije kroz program Mehanizma Civilne Zaštite (2022 – 2024) i koordiniran je od strane Građevinskog Fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Jedna od ispitnih CPT lokacija se nalazi neposredno kraj Podsusedskog mosta, na istoj lokaciji zabilježena likvefakcija pijeska uslijed potresa iz 1880. g., lokacija L1 na slici 23. Koristeći algoritam (Librić i dr., 2022) ocjene faktora sigurnosti na likvefakciju i vjerojatnosti pojave likvefakcije, prema gore opisanoj proceduri proračuna, na slici 26 su prikazani rezultati. Identificiran je značajan potencijal likvefakcije (klasa 5) na dubini od 4 m u debljini od 60-ak cm. Pri tome je kao referentno ubrzanje korištena vrijednost za 475 g. povratni period i tip tla C prema HRN EN 1998-1, a za magnitudu potresa je korištena vrijednost od 6,2 koja odgovara magnitudi potresa iz 1880. godine.

Iako se neposredno ispod sloja pijeska CPT ispitivanje naišlo na sloj krutog šljunka koji je onemogućio daljnje CPT ispitivanje te bi bilo potrebno provesti dodatna istraživanja kako bi se potvrdila prisutnost likvefabilnih slojeva, prikazano je indikator potencijalne korisnosti ovih ispitivanju u identifikaciji likvefakcijskog potencijala tla.



(a)



(b)

Slika 26. CPTU ispitivanje na lokaciji Podsusedskog mosta: (a) sirovi rezultati ispitivanja i interpretirani profil tla; (b) proračunati CSR, CRR, faktor sigurnosti na likvefakciju i potencijal likvefakcije za predmetnu lokaciju



2.7. POTENCIJAL KLIZANJA TLA U GRADU ZAGREBU

2.7.1. Općenito o klizanju u potresnim uvjetima

Kako navode Jurak et al. (2008), klizišta u tkivu grada predstavljaju komunalni, ekološki i socioekonomski problem. Općenito, stabilnost neke padine ovisi o nizu faktora, uključivo njezinu geometriju, vrstu tla, razinu podzemne vode, stalna i prolazna djelovanja, itd. Mogu biti formirana kao rezultat oblikovanja reljefa (tzv. paleoklizišta), ali i uslijed antropogenih aktivnosti, najčešće graditeljskih aktivnosti.

Jedan od možebitnih uzroka aktiviranja klizišta jesu i potresna djelovanja. Ocjena stabilnosti padina je zahtjevan zadatak već i u statičkim uvjetima, dok se u dinamičkim uvjetima povećavaju inercijska opterećenja, a moguć je i gubitak posmične čvrstoće materijala uslijed cikličkog opterećenja. Kako je ranije navedeno, manji broj pokrenutih klizišta tijekom potresa iz ožujka 2020. godine se donekle može objasniti relativno malom potresnom magnitudom, ali i relativno niskom saturacijom tla na lokacijama većeg potencijala klizanja. Međutim, potres iz prosinca 2020. godine je pokrenuo neka nova klizišta i aktivirao neka postojeća klizišta u sisačko – moslavačkoj županiji. Svjetska literatura prepoznaje brojne slučajeve aktiviranja klizišta uslijed potresnog djelovanja, kao što je primjerice niz klizišta u gradovima Atsuma i Sapporo u Japanu, slika 27, aktiviranih nakon potresa magnitude 6.7 iz 2018. godine.



Slika 27. Primjer klizišta u Japanu, aktiviranih uslijed potresnog djelovanja (preuzeto iz Yamagishi i dr. 2018; fotografija: Asahi Shimbun)



Za naglasiti je da su klizišta podložna promjenama tijekom vremena s obzirom na niz faktora, uključivo uzrok pokreta, veličinu zahvaćenog područja, stupanj aktivnosti, izvršene mjere sanacije, itd. U novije vrijeme klimatskih promjena, klizišta postaju sve izraženiji problem. Duži sušni periodi mogu uzrokovati pojavu vlačnih pukotina na površini, a oborine koje slijede, a za koje se predviđa manje događaja, ali većeg intenziteta, mogu time lakše saturirati tlo.

2.7.2. Povijesni izvori

Problematika pojave klizišta na širem području grada Zagreba, naročito na južnim obroncima Medvednice, prepoznata je već desetljećima. Sustavno se tim problemom u Zagrebu, ali i u ostaku Hrvatske, počeo baviti profesor E. Nonveiller koji je svoja iskustva prikazao u knjizi (Nonveiller, 1987), prvoj na hrvatskom jeziku koja je analizirala klizišta.

Vezano na razmatranu problematiku nestabilnih padina, Grad Zagreb je donio više Odluka, od kojih je možda najvažnija "Odluka o donošenju Prostornog plana grada Zagreba" iz 2001. godine, a prema kojoj je, za utvrđivanje stabilnosti padine u prirodnim uvjetima, potrebno pobliže utvrditi (ili realno procijeniti) relevantne elemente nestabilnosti. Ovo je bio inicijalni korak za uspostavu "Projekta kompleksnih geotehničkih i seizmičkih istraživanja za potrebe planiranja i građenja na području grada Zagreba" koji je rezultirao s vrijednim istraživanjima.

U radovima Polak i dr. (1979), Ortolan i dr. (2008), Podolszki (2014) te Miklin i dr. (2018) istraženo je područje južnih obronaka Medvednice ("Podsljemenska zona"). Obronke karakteriziraju brojne glinovite zone niske posmične čvrstoće (kontinuirani glinoviti slojevi velike plastičnosti), nepovoljan nagib slojeva niz padinu, erozija nižih dijelova padina zbog usijecanja korita brojnih vodotoka, prisutnost arteških vodonosnika koji generiraju visoke porne tlakove, prisutnost rasjeda te brojnih aktivnih i starih klizišta. Zaključci istraživanja su sljedeći;

- Naslage u kojima najčešće dolazi do klizanja su laporovito-prahovito-glinene naslage na kontaktu pliopleistocena i gornjeg ponta koje karakteriziraju veliki indeksi plastičnosti i granice tečenja te vertikalna promjena koeficijenta vodopropusnosti (propusno/slabo propusno);
- Na području istraživanja se uglavnom javljaju plitka klizišta (klizna ploha je do 5 m dubine) čiji uzroci su obilne oborine, zasijecanje padine ili kombinacija navedenih uzroka;



- Karakteristična je aktivacija klizišta nakon sušnih godina i saturacije tla vodom; ukoliko se opisanoj situaciji doda djelovanje potresa mogu se očekivati masovna klizanja.

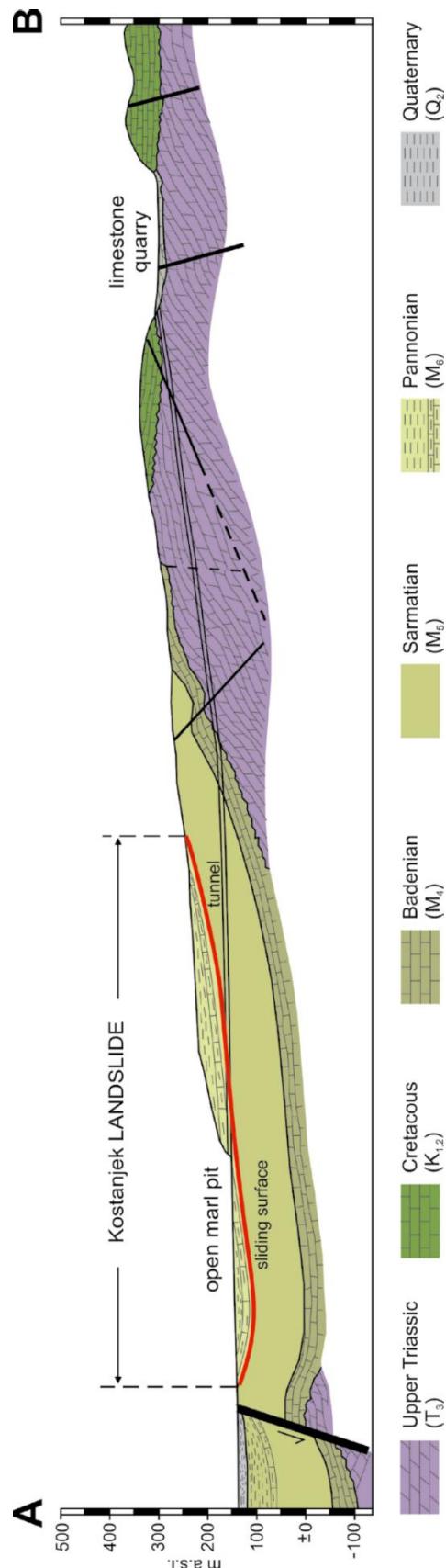
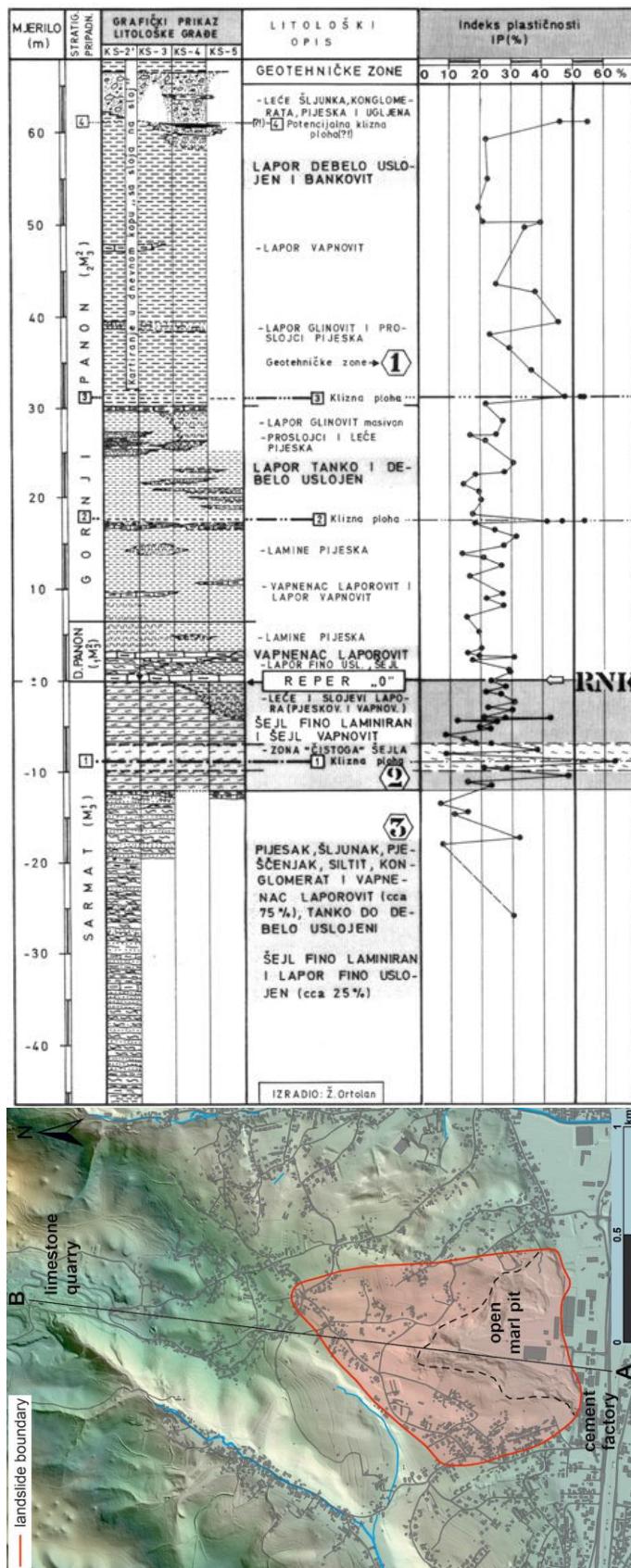
Obrađen je veliki broj klizišta, a u katastarski list 2018. godine uvršteno je 213 klizišta identificiranih na temelju prijava lokacija klizišta i dostupnih izrađenih elaborata na području istraživanja površine $\sim 175 \text{ km}^2$, na južnim obroncima Medvednice. Rezultati ovih aktivnosti je implementiran i na web stranicama grada Zagreba (ZG GEOPORTAL, 2023), u vidu sloja nestabilnih i potencijalno nestabilnih padina u podsljemenskoj zoni.

Među ovim klizištima svakako treba izdvojiti i ono najveće, klizište Kostanjek (Podsused). U nastavku će biti opisano i klizište Trstenik (Čučerje) koje predstavlja karakteristično klizište (po dubini klizne plohe) na području grada Zagreba. Čitav je niz drugih klizišta na području grada Zagreba prisutan u literaturi, kao što je primjerice veliko klizište Grmoščica (Mihalinec i dr., 2013).

Klizište Kostanjek u Podsusedu ima površinu 1 km^2 , maksimalnu dubinu od 90 m i volumen od $32 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (slika 28b). Tijekom istraživanja klizišta (Ortolan i dr., 2008.) nađeni su dokazi da sloj okršenih vapnenaca (dobro propusne naslage) koji leži na dolomitima (slabo propusne naslage) predstavlja arteški vodonosnik i može generirati velike porne pritiske vode te utjecati na aktivaciju klizišta u gornjim, relativno propusnim naslagama, vidi sliku 28c. U radu je dana preporuka za sanaciju klizišta koja uključuje zahvate (arteški bunari, drenažna galerija) na predmetnom vodonosniku kako bi se smanjili porni pritisci vode te dobio novi izvor pitke vode.

Duboko višeslojno klizište ima tri klizne plohe (slika 28a): na dubini od 80 do 90 m utvrđen je sloj čistog šejla debljine 3m (sarmatske naslage) u kojem je formirana najdublja klizna ploha; na dubini 37 i 50 m nađena su dva tanka kontinuirana sloja gline debljine nekoliko mm do nekoliko cm u kojima su formirane dvije pliće klizne plohe. Klizne plohe, tj. slojeve u kojima su formirane karakterizira niska posmična čvrstoća.

Praćenjem klizišta (Krkač i dr., 2021) moguće je razdvojiti razdoblja bržeg i sporijeg gibanja (klizište Kostanjek spada u spora klizišta). Prostorno su zabilježene veće brzine gibanja u središnjem dijelu nego na rubovima. Za period od 2013. do 2019. godine prosječna brzina horizontalnog gibanja središnjeg dijela iznosila je 90 mm/godina, a rubova 30 mm/godina. Najveća zabilježena brzina gibanja je 4,5 mm/dan.

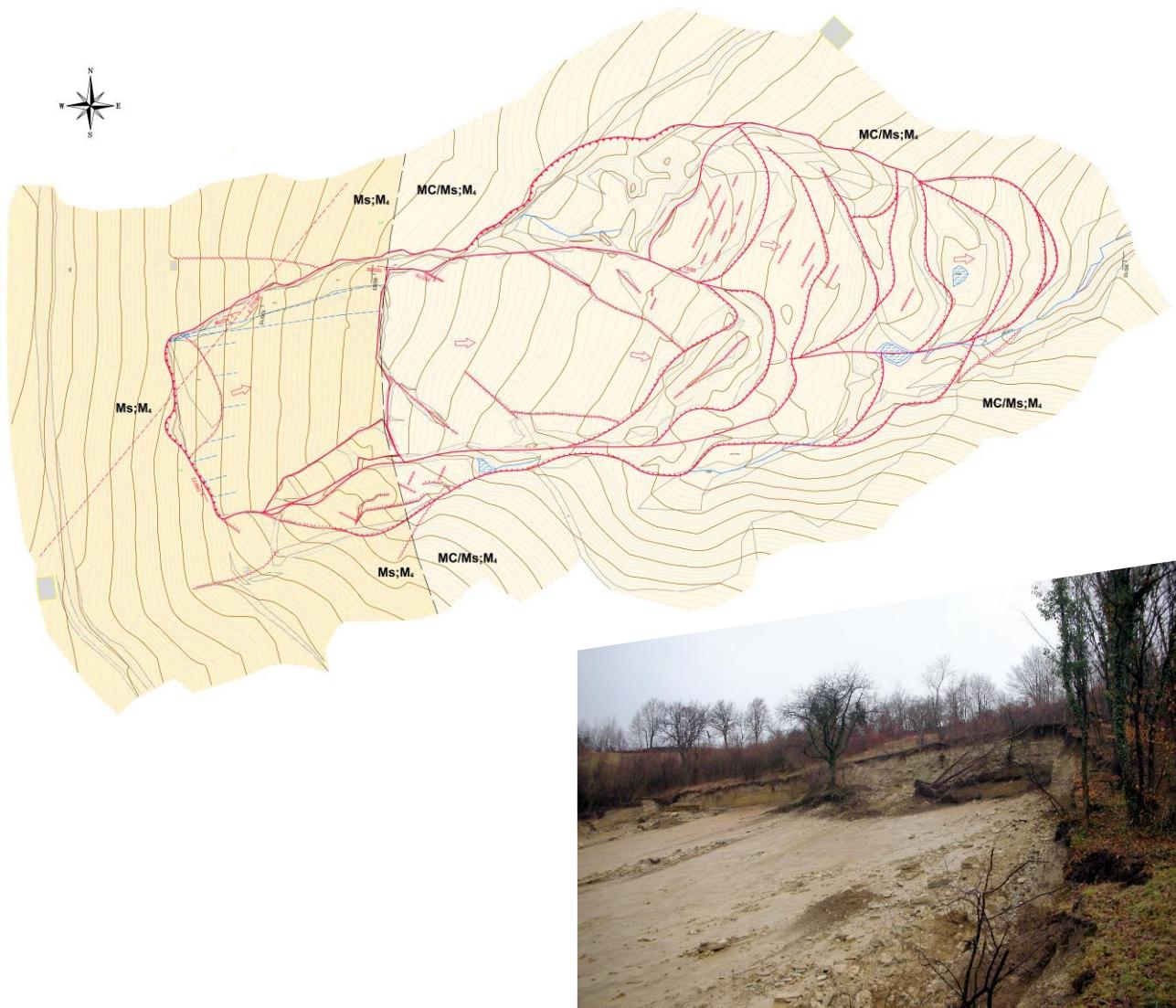


Slika 28. Klizište Kostanjek u Podsusedu: a) geotehnički stup klizišta (Ortolan i dr., 2008); b) lokacija klizišta (Krkač i dr., 2021); c) profil klizišta A-B (Krkač i dr., 2021)



Između 11. i 12. veljače 2014. godine aktivirano je translacijsko klizište Trstenik, duljine 250 m, širine 60 m i dubine klizne plohe od 5,5 m, vidi sliku 29. Klizište se pokrenulo nakon otapanja snijega i velike količine oborina. Lokaciju izgrađuju srednje trošni lapori u podlozi te trošni lapori i koluvijalne naslage na površini.

U gornjem dijelu klizišta vidljivo je klizanje po slojnoj plohi pravilne geometrije, jednolikog nagiba i potpuno ravne površine te vertikalno čelo visine 6 m. Klizište je formirano u prirodnoj uvali, a konfiguracija terena (suženje jaruge) je zaustavila kliznu tijelo. Klizno tijelo je u svom gornjem dijelu ostalo kompaktno, u srednjem dijelu je došlo do velikih deformacija i izdizanja (preko 3 m), a u donjem dijelu je zatrpan izvor povremenog potoka.



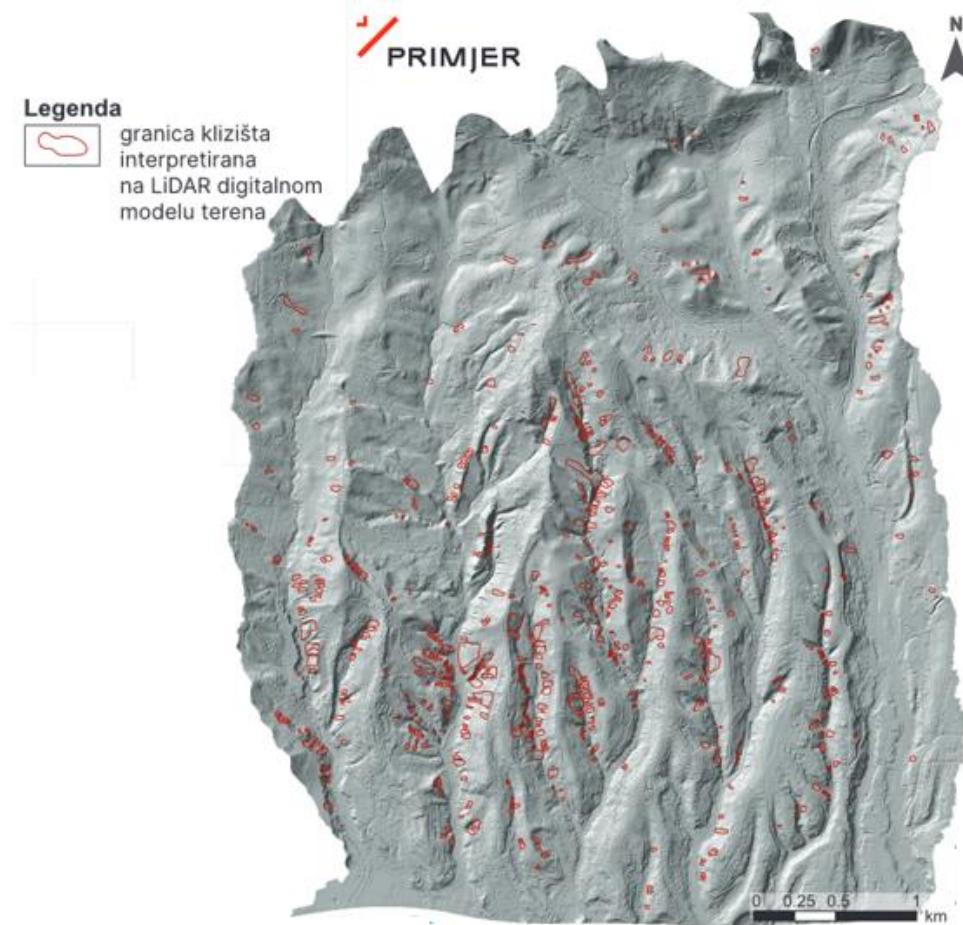
Slika 29. Klizište Trstenik u Čučerju: a) inženjerskogeološka karta (IGH, 2014); b) fotografija klizišta (preuzeto sa: www.zagreb.hr)



2.7.3. Najrecentnija istraživanja na području grada Zagreba

Najrecentnija istraživanja klizišta na području grada Zagreba su dana u sklopu projekta PRI-MJER (2023) u okviru kojeg su razvijene brojne korisne karte, uključivo kartu inventara klizišta, kartu zoniranja podložnosti na klizanje grada Zagreba, kao i kartu ugroženosti od klizišta. Sve karte su javno dostupne (PRI-MJER. 2023). Treba naglasiti da su sve ove detaljne karte izrađene za 20 km^2 podsljemenske zone grada Zagreba.

Karta inventara klizišta je nastala korištenjem digitalnog modela terena (LiDAR DMT), analizom nagiba i zakrivljenosti terena te vizualnom identifikacijom i kartiranjem klizišta, vidi sliku 30.

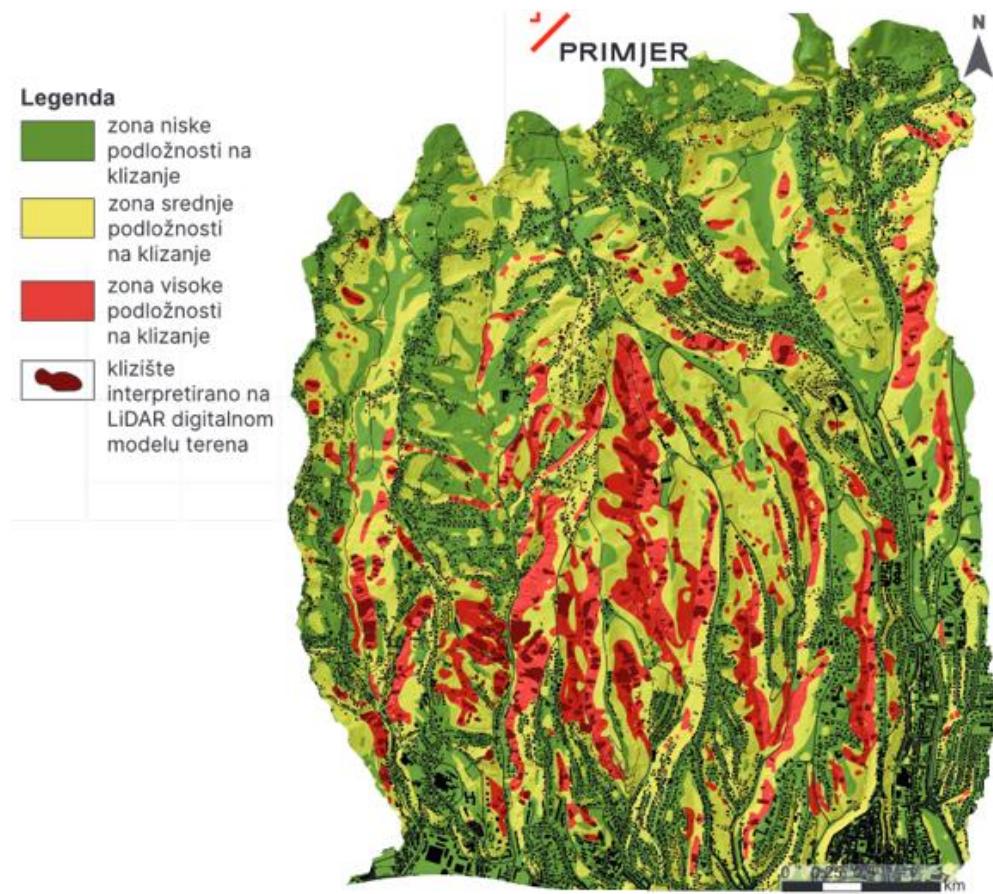


Slika 30. Karta inventara klizišta dijela Grada Zagreba (PRI-MJER, 2023)

U sklopu istoga projekta je područje grada Zagreba zonirano prema podložnosti na klizanje. Zone podložnosti na klizanje određene su heurističkom metodom na temelju vrste stijena i nagiba terena te gustoće stanovnika. Zone prostorne vjerojatnosti daju informaciju gdje se mogu aktivirati procesi



klizanja, vidi sliku 31. Na temelju ovih karata je identificirano da je na oko najviše 48 posto područja Grada mogu nastati klizišta s obzirom na prirodne preduvjete, a autori ističu da s ove informacije važne za prostorno planiranje i sustav civilne zaštite, odnosno za gradske četvrti grada Zagreba.,



Slika 31. Karta zoniranja podložnosti na klizanje dijela Grada Zagreba: zelena zona – niska podložnost, žuta zona – srednja podložnost, crvena zona – visoka podložnost (PRI-MJER, 2023)

2.7.3. Određivanje područja podložnog klizanju - obronci Vukomeričkih Gorica

Prikazana istraživanja su svakako od koristi za identifikaciju područja sklonih klizanju u podsljemenskoj zoni. Međutim, nužno bi bilo provesti i istraživanja vezana za potencijal klizanja na obroncima Vukomeričkih Gorica. Sintezne karte dobivene heurističkom metodom treba koristiti kao početnu informaciju o podložnosti terena na klizanje. Nakon označavanja prioritetnih zona potrebno je provesti detaljnije istražne radove navedene u preporukama za buduća istraživanja.



2.8. ZAKLJUČAK SA SMJERNICAMA ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Ovim elaboratom se daje **pregled i analiza geotehničkih hazarda relevantnih za definiranje potresnog rizika grada Zagreba**. Elaborat je jedan od osam predviđenih elaborata koji se izrađuju u okviru provedbe aktivnosti 2 "Definiranje elemenata potresnog hazarda na području grada Zagreba", koja osim geotehničkog elaborata, predviđa izradu elaborata iz područja seismologije, geologije, geotehnike, visokogradnje, inženjerskih građevina, kulturnih dobara i kartografije.

Geotehnički problemi (fenomeni) prilikom djelovanja potresa su: amplifikacija seizmičkog vala na površini terena (u odnosu na razinu osnovne stijene), likvefakcija u saturiranim nekoherentnim materijalima, ciklička degradacija u koherentnim materijalima, seizmički izazvano zbijanje i slijeganje tla te seizmički izazvano klizanje terena. Ovim elaboratom se daje osvrt na neke najznačajnije fenomene i njihovu pojavnost u gradu Zagrebu.

Niz zasebnih znanstveno – istraživačkih i stručnih projekata je provođen s ciljem identifikacije seizmičkih, geoloških, inženjerskogeoloških, hidrogeoloških, geotehničkih i geodinamički značajki grada Zagreba, većinom vezanih za samo pojedinu od navedenih značajki. Rezultati ovih istraživanja su važni za definiranje geo-hazarda nužnih za analizu potresnog rizika. Međutim, kako bi se procijenio potresni rizik, tj. predvidjela oštećenja izazvana geotehničkim fenomenima, potrebno je provesti cjelovitu seizmičku mikrozonaciju Grada Zagreba i odrediti lokalne uvjete tla.

Nužnost provedbe **sveobuhvatnih istraživanja za cijelo područje administrativnih granica grada Zagreba** je već odavno prepoznata. Grad Zagreb zadnjih 60-ak godina kontinuiranu ulaze finansijska sredstva i sudjeluje u provedbi niza projekata, u cilju formiranja podloga za cjelovitu seizmičku mikrozonaciju grada. Međutim, konkretniji koraci su dani tek kroz napore "Projekta kompleksnih geotehničkih i seizmičkih istraživanja za potrebe planiranja i građenja na području grada Zagreba" te kroz aktivnosti znanstveno-stručnog projektnog Savjeta za vođenje i realizaciju projekta, osnovanog 2004. g.

Iz rada ovog Savjeta su proizašli projektni zadaci koji su služili kao znanstveno – stručna podloga za izradu detaljne inženjerskogeološke karte podsljemenske urbanizirane zone, provođene kroz dvije faze, koji predstavlja najsveobuhvatnije i najvrjednije istraživanje seizmičke mikrozonacije u gradu. U



sklopu navedenog kartiranja, u mjerilu 1:5000, posebno su **izdvojena klizišta i nestabilne padine**, a prikazane su i preliminarne zone tipova tla (A-D) prema aktualnoj normi HRN EN 1998-1. Južni obronci Medvednice kategorizirani su u B i C kategoriju, gdje je omjer površine koju zahvaćaju 35% (B) / 65 (C). Analizom mjerenih podataka određeno je sljedeće:

- tlo kategorije B ima prosječnu brzinu svih mjerenja 436 m/s i medijan brzine 408 m/s;
- tlo kategorije C ima prosječnu brzinu svih mjerenja 306 m/s i medijan brzine 311 m/s.

Budući da nisu posebno izdvajane ili preklapane zone potencijalnih nestabilnosti uslijed seizmičkog djelovanja (potencijal likvefakcije, ocjena seizmičke stabilnosti padina) ovo **zoniranje ne predstavlja potpunu seizmičku mikrozonaciju**, a kad nastupi nova generacija Eurokoda 8 i ove postojeće obrade će trebati revidirati. Kako bi se dobila obuhvatniji pregled kategorije tla prema HRN EN 1998-1, za preostali dio grada ovim su elaboratom prepostavljene kategorije tla na temelju dostupnih podataka.

S obzirom da na podsljemensku zonu otpada oko 175 km², naspram 640 km² koliko otprilike iznosi površina grada Zagreba, jasno je da se u narednom periodu mora provesti detaljno kartiranje ostalih dijelova, naročito prisavske ravnice koju karakterizira drugačija geotehnička problematika, pa i pristup istraživanjima i zoniranjima prvenstveno treba biti zasnovan na tzv. dubinskom kartiranju. Preporuka je da se na osnovi postojećih podataka i manjeg opsega terenskih pregleda programiraju ciljani geofizički radovi nakon kojih će slijediti implementacija istražnog bušenja s in-situ pokusima, uzimanje uzoraka tla i laboratorijski pokusi na uzorcima te provedba statičkog penetracijskog pokusa. Na osnovu zapažanja prilikom seizmičkog mikrozoniranja podsljemenske zone u Zagrebu (Herak i dr., 2013.) te inženjerskogeoloških i geotehničkih značajki područja daju se smjernice za buduća istraživanja.

Prva (I) faza istraživanja obuhvaća provedbu sveobuhvatnih istražnih radova na neistraženom području grada Zagreba, tj. na 465 km² (**faza Ia**):

Ia-1 Inženjerskogeološko kartiranje;

Ia-2 Mjerenja posmične brzine tla pomoću MASW metode (1 mjerjenje/km² i 20 % kontrolnih mjerena na istim pozicijama s vremenskim odmakom od tjedan dana)

Ia-3 Bušenje uz determinaciju jezgre dubine 30 m (1 bušotina/km²);



- Ia-4 Standardne penetracijske pokuse i ostala relevantna in-situ ispitivanja te uzimanje neporemećenih uzoraka (uz rijeku koristiti vakumski uzorkivač) naizmjenično svakih metar bušotine;
- Ia-5 Mjerenje posmične brzine tla u odabranim bušotinama (minimalno njih 25%) pomoću *downhole* postupka;
- Ia-6 Laboratorijsko ispitivanje i obradu rezultata.

Za **određivanje područja podložnog likvefakciji** te njegovog **likvefakcijskog potencijala** potrebne su dodatne aktivnosti prve faze (**faza Ib**):

- Ib-1 Odrediti razine podzemne vode pomoću dostupnih piezometara i razine vode u koritu rijeke Save te generirati plohu od hidroizohipsa visokih voda i usporediti je s plohom digitalnog modela terena (dobivenom iz LiDAR snimaka#);
- Ib-2 Geodetski snimiti korito rijeke Save i postaviti uzdužni profil;
- Ib-3 Na određenom rasteru (minimalno svakih kilometar) po uzdužnom profilu postaviti okomite poprečne profile, tj. prognozne inženjerskogeološke profile;
- Ib-4 Uzduž poprečnih profila (minimalno deset lokacija – kraj rijeke gušće, zatim rjeđe) i na lokacijama pojave likvefakcije iz 1880. godine provesti istraživačke radove faze Ia (obuhvatiti aluvijalni nanos, sedimente prve i druge savske terase);
- Ib-5 Odabrati dodatne uzorke pijeska (min. 20 uzoraka) i ispitati cikličkim pokosima (preporuča se ispitivanje pomoću NGI-DSS uređaja- ukoliko predmetni uređaj nije dostupan može se koristiti troosni uređaj namijenjen cikličkom ispitivanju uz određene korekcije);
- Ib-6 Provesti dodatna ispitivanja statičkim penetracijskim pokusom u zoni aluvijalnog nanosa (1 CPTU/km²).

U ovom dijelu mogu biti korisni podaci i rezultati analiza iz elaborata o zonama zaštite izvorišta grada Zagreba. Dodatno bi od koristi bila i izvedba dužih profila geoelektrične tomografije (ERT) kako bi se jasnije razlučile granice depozita savskog aluvija u prisavskoj ravnici.



Za određivanje podložnosti terena na klizanje, odnosno za razvoj karte inventara klizišta i podložnosti na klizanje za područje Vukomeričkih gorica, u okviru prve faze istraživanja nužna provedba dodatnih ispitivanja (**faza Ic**):

- Ic-1 Provjeru prijava klizišta od strane građana;
- Ic-2 Analizu topografije pomoću LiDAR snimaka[#];
- Ic-3 Analizu prirodne stabilnosti padina na osnovu: litološkog sastav sedimenata, debljine i sastava tla, geotehničkih parametara, maksimalne razine podzemne vode (potrebno mjeriti veljača - svibanj), nagiba padina, nagiba slojeva tla ukoliko su izraženi i pojava erozije;
- Ic-4 Detaljno inženjerskogeološko kartiranje površine terena, izdanaka i sondažnih jama uz registriranje, fotografiranje, ispitivanje na terenu (penetrometrom, krilnom sondom, PLT-om, Schmidt-ovim čekićem), uzimanje uzoraka i laboratorijsko ispitivanje (Atterbergove granice, zapreminska težina, direktni posmik, granulometrija, kemijska analiza stijena/tla).

U ovim aktivnostima mogu poslužiti rezultati LiDAR snimaka koje su na raspolaganju kroz projekt "Multisenzorsko zračno snimanje Republike Hrvatske za potrebe procjene smanjenja rizika od katastrofa". Naime, kroz ovaj projekt, čiji je sastavni dio i projekt "Potresni rizik na području grada Zagreba" u okviru kojeg se izrađuje ovaj elaborat, je vršeno snimanje LiDAR metodom i obrada podataka gdje je izvan urbanih područja snimano gustoćom snimanja 4 točke/m², dok su urbana područja snimana s većom gustoćom od 8 točaka/m².

Za izračun amplifikacije potresnog gibanja na površini nužna je provedba dodatnih ispitivanja (**faza Id**):

- Id-1 Izvedba strateških bušotina dubine oko 300 m (najmanje 3 bušotine u području prisavske ravnice i jedna na obrovcima Vukomeričkih gorica) radi utvrđivanja seizmičke podine, tj. sloja čija je posmična brzina veća od 800 m/s uz determinaciju jezgre i provedbu ispitivanja la-4, la-5 i la-6.
- Id-2 Snimanje mikroseizmičkog nemira (5 točaka / km²) s ciljem upoznavanja i kvantificiranja dinamičkog odziva gornjih slojeva tla na amplifikacijskom spektru i rezonantnim periodima osciliranja tla na mjernim točkama.

Nakon multidisciplinarnih obrada podataka, slijedila bi **druga (II) faza istraživanja** - izrada karata, slično kao i za podsljemensku zonu, a koje bi uključivale osnovne karte (detaljna inženjerskogeološka karta,



karta geotehničke kategorizacije terena, karta seizmičkog hazarda za razne povratne periode te karta kategorizacije tla s aspekta seizmičkog odziva), kao i niz tematskih karata (karta hidrogeoloških uvjeta, karta debljina pokrovног sloja, karta geotehničkih modela, karta likvefakcije za prisavsku ravnicu, karta podložnosti terena na klizanje za Vukomeričke gorice). Svakako bi bila nužna izrada i faktorske karte za izradu karte geo-hazardnih događaja u statičkim i seizmičkim uvjetima, što predstavlja dokument prognostičkih karaktera.

Provedbom navedenih aktivnosti prve faze bi se, na temelju stvarnih mjerena, razvile karte kategorizacije tla prema Eurokodu 8 za cijeli grad. Ovakve karte bi bile od koristi i za svakodnevnu praktičku upotrebu pri projektiranju, međutim za veće infrastrukturne projekte i građevine većeg značaja bi trebalo provesti nelinearnu analizu amplifikacijskog odziva tla. Zbog osjetljivosti numeričkih modela pomoću kojih se računa amplifikacija tla potrebno je provesti detaljne istraživačke radove te odrediti dubinu osnovne stijene i zonirati teren na način da svaka zona ima karakterističan (sintezni) geotehnički stup, tj. model.

Treća (III) faza istraživanja bi obuhvatila i formalno "spajanje" osnovnih i tematskih karata za sva područja unutar administrativnih granica grada Zagreba te uklapanje rezultata i kartografskih prikaza (faktografskih i interpretativnih karata) u GIS Zagreba i geotehnički katastar. Na ovaj način će se digitalizacijom svih rezultata, kao i njihovim geopozicioniranjem, formirati vrijedna digitalna baza podataka za bilo kakve naredne obrade i povezivanja s drugim bazama.

Dok je osnovne i tematske karte potrebno nadopuniti i ažurirati svakih 15 godina, geotehnička baza podataka se treba nadopunjavati kontinuirano, nakon svake provedbe istraživačkih radova na području grada Zagreba. Ovo se može postići posebnim propisima, uredbama i uvjetima koji definiraju obvezu i način predaje podataka u traženom formatu za sva seizmička, geološka i geotehnička istraživanja u Zagrebu. Ovdje glavnu ulogu treba imati Geotehnički katastar koji bi operativno provodio takve propise i uredbe.

U dugoročnim planovima, **četvrtoj (IV) fazi istraživanja**, svakako mora biti i primjena objedinjenih podataka za razvoj sveobuhvatnih trodimenzionalnih modela podzemlja grada Zagreba, po uzoru na brojne europske gradove, što je od izrazite koristi za aktivnosti prostornih planiranja, kako na površini tako i ispod površine, za planiranju izgradnje infrastrukturnih i većih građevina na području grada te doprinose smanjenju rizika od potresa i drugih geo-hazarda. Model bi omogućio i dobivanje raspodjele

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



svojstava tla s dubinom za bilo koju lokaciju ili profil na površini terena (statistički prikaz ključnih parametara tla dobiven sintezom podataka iz najbližih bušotina).

Sve navedene aktivnosti iziskuju velike finansijske izdatke, što je i dominantna prepreka njihovoj implementaciji. Ono gdje bi se mogao tražiti model za zatvaranje finansijske konstrukcije ovako opsežnih istraživanja su programi Europske Unije, kao što je primjerice Europski fond za regionalni razvoj (EFRR) kao jedan je od glavnih instrumenata europske kohezijske politike, a kroz koji je i sufinanciran projekt "*Multisenzorsko zračno snimanje Republike Hrvatske za potrebe procjene smanjenja rizika od katastrofa*" čiji je dio i projekt "*Potresni rizik Grada Zagreba*".



Popis slika

Slika 1. Definiranje potresnog hazarda na području grada Zagreba

Slika 2. Put potresnih valova od žarišta do lokacije građevine (Bačić i dr., 2020)

Slika 3. Seizmičko makrozoniranje i mikrozoniranje

Slika 4. Prikaz karte tektonskih aktivnosti (ZG GEOPORTAL, 2023.)

Slika 5. Amplifikacija seizmičke pobude ovisno o uvjetima lokalnog tla (Bačić i dr., 2020)

Slika 6. Ovisnost amplifikacije u mekanim tlama o razini seizmičkog ubrzanja podloge (stijene), modificirano prema (Idriss, 1990)

Slika 7. Karte V_{s30} područja grada Zagreba: a) prema modelu USGS (2023) V_{s30} topografije; b) prema EFEHR modelu (Weatherill i dr, 2021) V_{s30} topografije

Slika 8. Sintezni litološki stup prisavske ravnice (Jurak i dr., 1998)

Slika 9. Uzdužni presjek rijeke Save u blizini smetlišta Jakuševac (Velić i Saftić, 1996)

Slika 10. Zone sličnih geoloških uvjeta na području grada Zagreba (HGI, 2023)

Slika 11. Kategorizacija tla na području administrativnih granica grada Zagreba prema EC8 s lokacijama mjerena u prisavskoj ravnici – sintetizirani prikaz

Slika 12. Amplifikacija na području prisavske ravnice (Jurak i dr., 1998)

Slika 13. Amplifikacija na lokaciji Arene Zagreb, modificirano prema (Kvasnička, 2009)

Slika 14. Amplifikacija: a) lokacija profila Utrina – Markuševac; b) rezultati medijana vršnog ubrzanja tla za svih 10 lokacija: *case 1* – hipocentar je ispod svake lokacije; *case 2* – epicentar odgovara potresu iz 2020. (Uglešić, 2021)

Slika 15. Ilustrativni prikaz tri karakteristične faze pojave likvefakcije uslijed cikličkog potresnog djelovanja (Bačić i dr, 2020)

Slika 16. Izvadak iz izvještaja (Torbar, 1882)

Slika 17. Povijesna karta Zagreba 1783/1784 - list 27 (Österreichisches Staatsarchiv) – lokacija pojave likvefakcije Podsused (Torbar, 1882)



Slika 18. Povijesna karta Zagreba 1783/1784 - list 27 (Österreichisches Staatsarchiv) – lokacija pojave likvefakcije Jarun (Torbar, 1882)

Slika 19. Povijesna karta Zagreba 1783/1784 - list 33 (Österreichisches Staatsarchiv) – lokacije pojave likvefakcije Resnik, Drenje, Nart (Torbar, 1882)

Slika 20. Preliminarno kvalitativno zoniranje zagrebačkog područja po potencijalu likvefakcije (Veinović, 2007)

Slika 21. Kartografski prikaz domene zagrebačkog vodonosnika (Bačani i Posavec, 2014)

Slika 22. Preklop pojave likvefakcije iz potresa 1880.g na karti geologije zagrebačkog vodonosnog sustava (EGPV, 2000).

Slika 23. Područje očekivane pojave likvefakcije u prisavskoj ravnici i povijesne (potres iz 1880. godine) lokacije manifestacije likvefakcije (L1 - Podsused, L2 - Jarun, L3 - Resnik, L4 - Drenje Šćitarjevsko, L5 - Nart)

Slika 24. Primjer dijagrama aktivacije likvefakcije temeljenih na rezultatima SPT (a) i CPT (b) ispitivanja, prema (Boulanger i Idriss, 2014)

Slika 25. Dijagram aktivacije likvefakcije za potrese magnitude 7,5 temeljen na posmičnim brzinama, modificirano prema Andrus i Stokoe (2000)

Slika 26. CPTU ispitivanje na lokaciji Podsusedskog mosta: (a) sirovi rezultati ispitivanja i interpretirani profil tla; (b) proračunati CSR, CRR, faktor sigurnosti na likvefakciju i potencijal likvefakcije za predmetnu lokaciju

Slika 27. Primjer klizišta u Japanu, aktiviranih uslijed potresnog djelovanja (preuzeto iz Yamagishi i dr. 2018; fotografija: *Asahi Shimbun*)

Slika 28. Klizište Kostanjek u Podsusedu: a) geotehnički stup klizišta (Ortolan i dr., 2008); b) lokacija klizišta (Krkač i dr., 2021); c) profil klizišta A-B (Krkač i dr., 2021)

Slika 29. Klizište Trstenik u Čučerju: a) inženjerskogeološka karta (IGH, 2014); b) fotografija klizišta (preuzeto sa: www.zagreb.hr)

Slika 30. Karta inventara klizišta dijela Grada Zagreba (PRI-MJER, 2023)

Slika 31. Karta zoniranja podložnosti na klizanje dijela Grada Zagreba: zelena zona – niska podložnost, žuta zona – srednja podložnost, crvena zona – visoka podložnost (PRI-MJER, 2023)

Naručitelj: Grad Zagreb, Trg Stjepana Radića, 10000 Zagreb

Elaborat: Geotehnički elaborat - Procjena potresnog rizika na području grada Zagreba

Mjesto i datum: Zagreb, rujan 2023.



Popis tablica

Tablica 1. Ulazni podaci i metode – seizmička mikrozonacija

Tablica 2. Tipovi tla prema trenutno važećoj verziji norme HRN EN 1998-1

Tablica 3. Dostupni mjereni podaci MASW i *downhole* ispitivanja u prisavskoj ravnici

Tablica 4. Klase vjerojatnosti pojave likvefakcije, prema Chen i Juang (2000)