

POJAVA LIKVEFAKCIJE NA PODRUČJU ZAGREBA U PROŠLOSTI I PROCJENA MOGUĆNOSTI PONOVNE POJAVE TIJEKOM JAČEG POTRESA

HISTORICAL OCCURENCE OF LIQUEFACTION IN ZAGREB AREA AND ESTIMATION OF REOCCURENCE IN CASE OF ANOTHER STRONG EARTHQUAKE

¹⁾ ŽELIMIR VEINOVIĆ, ²⁾ DUBRAVKO DOMITROVIĆ, ³⁾ TIHOMIR LOVRIC

^{1) 2)} Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

³⁾ CROSCO d.o.o., Ulica grada Vukovara 18, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

¹⁾ zelimir.veinovic@rgn.hr; ²⁾ dubravko.domitrovic@rgn.hr; ³⁾ tihomir.lovric4@zg.t-com.hr

Ključne riječi: likvefakcija, holocen, apsolutno datiranje, ¹⁴C, matematičke procedure

Key words: liquefaction, Holocene, absolute dating, ¹⁴C, mathematical procedures

Sažetak

Tijekom Velikog zagrebačkog potresa iz 1880. na šest lokacija u okolici Zagreba primijećeni su pokazatelji likvefakcije u vidu pojave "muljnih vulkana" (engl.: *sand boils*) nastalih istjecanjem podzemne vode na površinu. Likvefakcija je po definiciji fenomen kod kojeg se čvrstoća i stabilnost saturiranih nekoherentnih tala smanjuju, do hidrauličkog sloma, pod utjecajem potresa ili nekog drugog dinamičkog opterećenja. Čimbenik važan za pojavu likvefakcije je stanje zbijenosti sedimenata koje dobrim dijelom zavisi od njihove starosti. Određivanjem apsolutne starosti fosiliziranih stabala nađenih u sedimentima savskog aluvija kod Zagreba te na osnovi terenskih ispitivanja zbijenosti tla zaključuje se da je pri potresu magnitude $\geq 6,3$ na zagrebačkom području moguće ponovo očekivati pojavu likvefakcije.

Abstract

During the Great Zagreb's earthquake in 1880 consequences of the liquefaction have been detected at six sites in the vicinity of Zagreb as the occurrence of sand boils. Liquefaction takes place when loosely packed, water-logged sediments near the ground surface lose their strength in response to strong ground shaking. During the liquefaction, due to pore pressure buildup, water may be forced to the surface carrying sand particles through volcano-like sand boils. Important factor for liquefaction occurrence is the state of soil densification which relates to geological age of deposits. Results of the absolute dating of fossilized trees found in Sava's alluvium in the vicinity of Zagreb and the results of the penetration tests show that another earthquake with magnitude ≥ 6.3 can provoke liquefaction once again.

Uvod

Zagreb je 9. studenog 1880. godine pogođen najjačim potresom u povijesti grada. Samo je dvoje ljudi poginulo, iako je oštećeno svih 3830 stambenih i gospodarskih zgrada u gradu (Torbar, 1882). Potres je izazvan Zagrebačkim rasjedom, seizmički najaktivnijim rasjedom u ovom dijelu Hrvatske, ili poprečnim smičnim rasjedom koji se pod kutom sa Zagrebačkim siječe otprilike kod Kašine. Epicentar potresa iz 1880. lociran je u Kašini pokraj Zagreba. Jakost je procijenjena na IX° MCS ljestvice, a kasnijim istraživanjima proračunata je i magnituda 6,3.

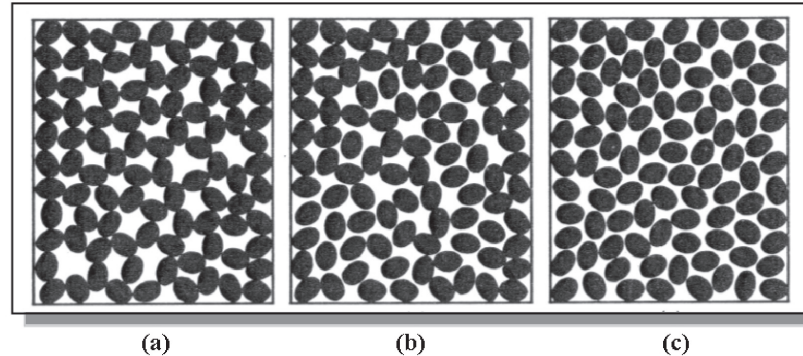
U Izvješću (1882), Torbar piše: "U mjestu Jarunu kod Save prala je ženska rubeninu, pa je vidjela kako se zemlja razpukla te van brizgala mutna i crnkasta ali hladna voda; na drugom opet mjestu probila je voda iz zemlje kao ruka debelom strujom. Kašnje prestala je voda teći na oba mjesta; osušen pjesak iz pukotine bijaše sivkast, iz drugega pako vrućka žučkast kao obični savski pjesak... Izpod Susjeda pak do savskoga mosta pukla zemlja na više mje-

sta te izbacivala za potresa sivkast pijesak. Pukotine išle smjerom prema jugu; kašnje su se opet sklopile."

Navod govori o pojavi likvefakcije, fenomena vezanog uz potrese magnitude ≥ 6 . Pri odgovarajućim uvjetima, stabilna nekoherentna tla i krupnozrnati prahovi s većom posmičnom čvrstoćom (sposobni podnijeti velika opterećenja bez sloma) mogu izgubiti čvrstoću i pretvoriti se u viskoznu tekuću masu, što nazivamo likvefakcijom tla (Allen, 1984). Pri likvefakciji, nekoherentni slojevi na kosinama mogu se pokrenuti pod djelovanjem postojećih naprežanja ili pod pokrovom sedimenata uslijed promjene gradijenta pornog tlaka uzrokovanog potresom. Nakon prestanka djelovanja mehanizama likvefiranja dolazi do redistribucije rasporeda čestica. Ako je "pakiranje" čestica gušće od ranijeg, debljina sloja se smanjuje, a dio pornih fluida istječe (Allen, 1984). Takav slom u složaju (strukturni skeleta) materijala, kad se čestice više ne dodiruju i ne podupiru jedna drugu već postaju privremeno razdvojene i dispergirane u pornom fluidu (sl. 1.), naziva se mehaniz-

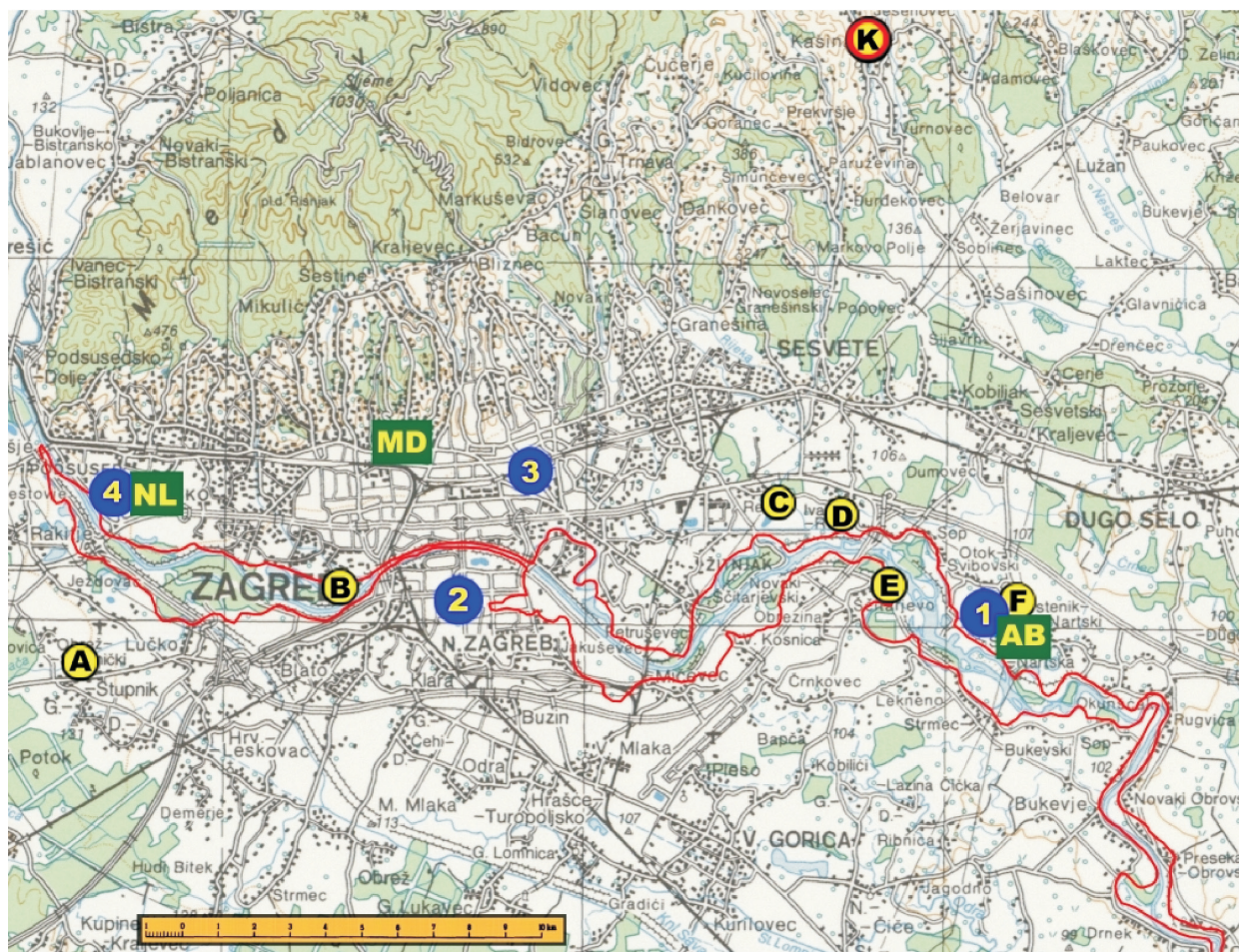
mom likvefiranja odnosno *likvefakcijom* (Cassagrande, 1936).

Na slici 2. prikazane su lokacije na kojima su se pojavile pukotine u tlu s kupama pijeska tijekom potresa iz 1880.



Slika 1. Model likvefakcije pijeska, elipse predstavljaju čestice materijala: (a) stanje mirovanja - čestice se međusobno dodiruju; (b) početak potresa - neka zrna su izdvojena (djelomično likvefirani materijal); (c) dulje trajanje potresa - ni jedna čestica ne dodiruje drugu, potpuno likvefiran (tekući) pijesak (Allen, 1984)

Figure 1 Model of the liquefied sand, elipses are representing sand grains: (a) stand still condition- grains are in contact; (b) beginning of the earthquake - some grains are loose (partially liquefied soil); (c) later during the earthquake - no grains are in contact, totally liquefied sand (Allen, 1984).



Slika 2. Lokacije s dokumentiranom pojavom likvefakcije tijekom zagrebačkog potresa iz 1880. (A - Stupnik, B - Jarun, C - Resnik, D - Ivanja Reka, E - Drenje, F - Trstenik); lokacije pronalaska fosiliziranih stabala (1 - šljunčara "Abesinija", 2 - Siget, 3 - Heinzelova, 4 - Nova loza); istražene lokacije (NL - Nova loza, MD - "Moj dvor", AB - "Abesinija") i epicentar potresa iz 1880. (K). Crvena linija predstavlja granicu recentnog aluvija Save

Figure 2 Locations with the liquefaction occurrence during Zagreb earthquake of 1880 (A - Stupnik, B - Jarun, C - Resnik, D - Ivanja Reka, E - Drenje, F - Trstenik); locations of fossilized trees found in the Zagreb area (1 - gravel pit "Abesinija", 2 - Siget, 3 - Heinzelova, 4 - Nova loza); researched locations (NL - Nova loza, MD - "Moj dvor", AB - "Abesinija") and the epicentre of the 1880 earthquake (K). Red line represents recent alluvial deposits of the Sava River

Aktualne tektonske aktivnosti zagrebačkog područja ovise o pomicanju regionalnog strukturnog okoliša u kojem su primarni pokreti jadranske mikroploče. Hipocentri potresa zagrebačke okolice su dubine do 25 km, a većina ih je dubine 5-15 km. Za potres iz 1880. hipocentar je modernim metodama procijenjen na dubini od oko 10 km. Razoran potres intenziteta VIII° MCS (poput onog iz 1880.), ima za zagrebačko epicentralno područje povratni period od oko 200 godina. Slabiji, ali još uvijek vrlo razorni potresi su češći, pa je, primjerice, vjerojatnost pojavljivanja potresa intenziteta VII° MCS u bilo kojih 50 godina veća od 60 % (Herak et al., 1996).

Sustavno zoniranje prema potencijalu likvefakcije u Republici Hrvatskoj nije provedeno, kao niti na razini manjih teritorijalnih jedinica (županija ili općina). Na lokalnoj razini, kada je u pitanju bila izgradnja pojedinog objekta veće važnosti, ispitivanje mogućnosti pojave likvefakcije je ipak provedeno u više slučajeva.

Pojavu likvefakcije prilikom novog potresa magnitude ≥ 6 može se očekivati na mladim, rahlim, saturiranim sedimentima Save, kao i eventualno na aluvijalnim nanosima medvedničkih potoka. Pojava likvefabilnih materijala prvenstveno je vezana uz slojeve pijeska iz savskih prudova, kao i neke sedimente nastale poplavama. Osim navedenih, za mogućnost pojave likvefakcije značajna su i ispunjena sekundarna korita rijeke Save koja se danas nalaze u sklopu urbaniziranih zona.

Geološke značajke doline rijeke Save na području Zagreba

Dolina rijeke Save na području Zagreba je geološki i geotehnički dobro istraženo područje sa šest dokazanih lokacija s pojavom likvefakcije. Holocenske naslage Save na površini se, prema genetskim tipovima, dijele na: sedimente druge savske terase, sedimente prve savske terase, recentni aluvijalni nanos Save, proluvij i deluvijalno-proluvijalne naslage, sedimente poplava i barske sedimente (Šikić et al., 1972a; Basch, 1969 – 1976). Holocen zapo-

činje s pojavom aluvijalnih nanosa druge savske terase. Druga savska terasa razvijena je uz manje prekide duž čitavog toka rijeke Save na zagrebačkom području. Nastala je usijecanjem Save u aluvijalne sedimente koje je prije nanijela. Uzduž 1 do 2 m visokog odsjeka druge savske terase zamjećuju se aluvijalni sedimenti koji se sastoje od izmjene krupnozrnatih šljunaka i pijesaka. Količina pijeska u odnosu na šljunak se povećava idući od sjeverozapada prema jugoistoku, tj. u smjeru toka Save. Debljina sedimenta druge savske terase dosta varira, jer su taloženi nakon intenzivne erozije. Isto tako, na debljinu ovih sedimenta znatno su utjecali neotektonski pokreti koji su bili vrlo intenzivni u Savskoj dolini. Na području zagrebačke depresije debljina šljunka i pijeska druge savske terase iznosi 10 do 20 m (Šikić et al., 1972b). Prva savska terasa razvijena je duž čitavog toka rijeke Save. Nakon taloženja šljunka i pijeska koji čine drugu savsku terasu nastupila je faza erozije i denudacije. Sava se je usjekla u vlastite sedimente, kao što je bio slučaj kod druge i treće terase. Na mnogo mjesta po čitavoj terasi vidljiva su stara savska korita. Visina terasnog odsjeka pretežno iznosi 1 do 1,5 m, a mjestimice varira od 0,5 do 2 m. Ta terasa ima manju širinu od prethodne. Debljina aluvijalnog nanosa prve savske terase najčešće iznosi 10 do 25 m, a mjestimice su poznate debljine do 45 m. Unutar pijesaka prve savske terase sačuvala se na nekoliko mjesta holocenska mikrofauna. Aluvijalni nanos recentnih tokova Save odnosi se na područja neposredno uz Savu koje ona plavi za vrijeme višega vodostaja. Ovo je područje izbrazdano brojnim kanalima u kojima se mjestimice zadržava voda.

Na ovom području, koliko je autoru poznato, fosilizirana stabla ili grane stabala pronađeni su na nekoliko desetaka lokacija, ali samo su četiri takva uzorka dana na određivanje apsolutne starosti metodom ^{14}C (Veinović, 2007). Na slici 2. prikazane su i četiri lokacije na kojima su uzeti uzorci fosiliziranog drveta kojima je određena apsolutna starost. Starost, dubina pronalaska stabala i krovinsko/podinski materijal dani su u tablici 1.

Tablica 1. Odnosi starosti i dubina pronalaska fosiliziranih stabala s područja Zagreba

Table 1 Relationships between age and depth of fossilized trees found in the Zagreb area

Lokacija <i>Location</i>	Starost [god.] <i>Age [years]</i>	Dubina pronalaska [m] <i>Depth [m]</i>	Krovina/podina <i>Overlaying/underlying</i>
Šljunčara "Abesinija"	1725 +/-100	4-10	Šljunak/glina <i>Gravel/Clay</i>
Siget	2105 +/-115	4-10	Šljunak/šljunak <i>Gravel/Gravel</i>
Heinzlova	3405 +/-120	7,55	Šljunak/šljunak <i>Gravel/gravel</i>
Nova loza	1165 +/- 55	3-6	Šljunak/pijesak <i>Gravel/Sand</i>

Uzorci fosiliziranog drveta s lokacija Siget, Heinzelova i Nova loza uzeti su ciljano za potrebe određivanja apsolutne starosti savskih sedimenata, a uzorak s lokacije Abesinija uzet je poradi određivanja starosti drveta koje se želi iskoristiti za izradu posebne vrste namještaja. Određivanje starosti uzoraka metodom ^{14}C provedeno je na Institutu Ruđer Bošković u Zagrebu. Obrada uzoraka provedena je spaljivanjem, a mjerenje plinskim proporcionalnim brojačem.

Uzorak fosiliziranog drveta sa šljunčare „Abesinija“ je holocenske starosti, a na Osnovnoj geološkoj karti (list Zagreb i list Ivanić Grad) naslage u kojima je nađen označene su kao druga savska terasa. Fosilizirano stablo s kojeg je uzet uzorak jedno je od više stotina stabala koja se na lokaciji šljunčare „Abesinija“ nalaze ispod krovinskih šljunaka u sklopu slojeva glina/treset. Uzorak fosiliziranog drveta s lokacije u Sigetu uzet je s jednog od fosiliziranih stabala pronađenih na ovoj lokaciji tijekom iskopa građevne jame za potrebe izgradnje objekta „Avenue Mall“ (sl. 3.). Uzorak je također holocenske starosti, a na Osnovnoj geološkoj karti (list Zagreb i list Ivanić Grad) naslage u kojima je nađen označene su kao prva savska terasa.

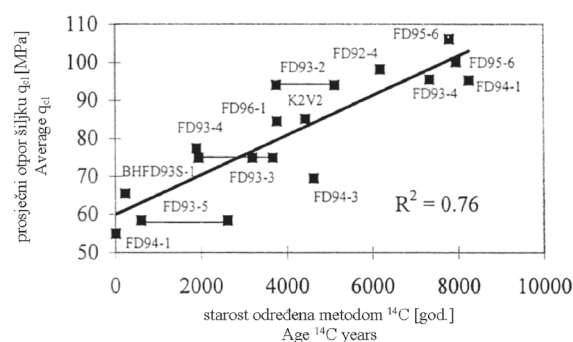


Slika 3. Fosilizirano stablo s lokacije Siget – Avenue Mall

Figure 3 Fossilized tree from Siget – Avenue Mall

Uzorak fosiliziranog drveta s lokacije u Heinzelovoj, uzet je pri iskopu građevne jame iskopane za potrebe izgradnje stambeno-poslovnog objekta uz prostorije tvrtke „Furnir“, Zagreb. Kao i za uzorak iz šljunčare „Abesinija“, za uzorak iz Heinzelove ulice može se reći da je holocenske starosti, a na Osnovnoj geološkoj karti (list Zagreb i list Ivanić Grad) naslage u kojima je nađen označene su kao druga savska terasa. U blizini Nove Loze, na lokaciji gdje se obavlja iskop šljunka, pronađeno je nekoliko desetaka stabala na dubinama od 3 do 6 metara. Na Osnovnoj geološkoj karti (list Zagreb i list Ivanić Grad) naslage u kojima su stabla nađena označene su kao recentni savski aluvij.

Starost sedimenta ima važnu ulogu pri procjeni pojave livefakcije na određenom području. U svom članku o ovisnosti promjene otpora šiljku, kod statičkog penetraacijskog pokusa, ovisno o starosti slojeva, Monahan et al. (2000b) uspoređuju ovisnost potencijala likvefakcije sa starošću uzoraka organske tvari nađene u tlu na istražanim lokacijama. Rezultati istraživanja na naslagama rijeke Fraser u Kanadi prikazani su na slici 4. Na grafikonu je prikazan odnos korigiranog otpora šiljka (konusa) prema vertikalnom naprezanju nadsloja q_{cl} i starosti organskog materijala nađenog u krovinskim pijescima, određene metodom ^{14}C . Organski materijal je ili drvo ili su školjke.



Slika 4. Odnos srednjih vrijednosti korigiranog otpora šiljku statičkog penetraacijskog pokusa i apsolutne starosti organske tvari iz krovinskih pijesaka određene metodom ^{14}C (Monahan et al., 2000)

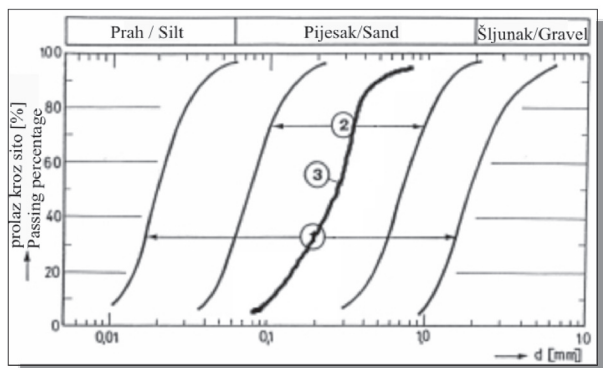
Figure 4 Plot of average normalized tip resistance (q_{cl}) and ^{14}C age of organic material in topset sand (Monahan et al., 2000)

Grafikon pokazuje da linearni porast prosječnih vrijednosti q_{cl} dobro odgovara apsolutnoj starosti krovinskih pijesaka, određenoj metodom ^{14}C , te da iznos q_{cl} raste dvostruko unutar perioda od 8000 godina. Iz slike 4. jasno je vidljivo da sa starošću dolazi do porasta zbijenosti materijala, što znači da s povećanjem starosti sedimenta opada potencijal likvefakcije. Može se zaključiti da su savski nanosi na području Zagreba mladi i prema geološkom kriteriju slabo zbijeni (rahli), što je jedan od osnovnih preduvjeta za pojavu likvefakcije.

Ispitivanja karakteristika materijala s triju lokacija na zagrebačkom dijelu savskog aluvija

Lokacija „Nova loza“ nalazi se u jugozapadnom dijelu Zagreba, na sjevernoj obali Save (sl. 2.). Radi se o površinskom koku na kojem se eksploatacija šljunka obavlja manje-više stihijski, za potrebe izgradnje trgovačkog centra u neposrednoj blizini. Šljunak se vadi do dubine od približno šest metara, gdje se pojavljuje podzemna voda (8. 12. 2007., pri niskoj razini podzemnih voda, u klimatološkom smislu), a na sjevernom dijelu kopa se uz vodu pojavljuju i pijesci.

Rekognosciranjem i terenskim identifikacijskim geotehničkim postupcima stanje zbijenosti pijeska ocijenjeno je kao rahlo. Pijesak je bio žitak, budući da je potpuno saturiran. Granulometrijskom analizom pijeska dobiveni su rezultati uneseni na sliku 5. u dijagram granulometrijskog raspona materijala u kojem je moguća pojava likvefakcije. Iz dijagrama je vidljivo da ovaj pijesak prema granulometrijskom kriteriju spada u kategoriju najlikvefabilnijih materijala.



Slika 5. Granulometrijski raspon materijala tla nužan za pojavu livefakcije: (1) potencijalno likvefabilna sredina, (2) najlikvefabilnija sredina, (3) uzorak pijeska s lokacije Nova loza (modificirani dijagram iz Tsuchida, 1985)

Figure 5 Granulometric curves of liquefiable materials: (1) potentially liquefiable materials, (2) the most liquefiable materials, (3) sand from Nova loza (modified Tsuchida, 1985)

Mogućnost pojave likvefakcije na opisanoj lokaciji tijekom potresa kvalitativno je određena kao realna i to prema:

- granulometrijskom kriteriju – pijesak na lokaciji spada u kategoriju najlikvefabilnijih materijala;
- terenskim identifikacijskim geotehničkim postupcima – određeno je vrlo rahlo stanje zbijenosti pijeska;
- stupnju saturacije pijeska ($S_r = 1$);
- smještaju lokacije – na prvoj savskoj terasi, neposredno uz recentni aluvij, na granici meandra nekadašnjeg rukavca Save;
- kriteriju pojave potresa magnitude do 6,5 (za Zagreb);
- zabilježenom slučaju pojave likvefakcije u prošlosti na lokacijama nedaleko od ove (Jarun, Stupnik).

Da bi se donio kvantitativan zaključak o mogućnosti pojave likvefakcije na ovoj lokaciji prilikom jačeg potresa, nužno je provesti terenska ispitivanja u svrhu točnog određivanja dimenzije sloja pijeska, kao i obaviti penetracijske pokuse ili mjerenja brzina posmičnih elastičnih valova za proračun potencijala likvefakcije odgovarajućim numeričkim procedurama.

Tablica 2. Rezultati ispitivanja krilnom sondom na lokaciji stambeno-poslovnog objekta “Moj dvor”

Table 2 Results of Vane shear apparatus testing at the “Moj dvor” location

Točka <i>Piont</i>	Nedrenirana posmična čvrstoća [kN/m ²] <i>Undrained shear strength [kN/m²]</i>
1.	15,0
2.	16,0
3.	17,0
4.	16,0
5.	15,0
6.	16,0
7.	17,0
8.	16,5
9.	14,5
10.	14,0
11.	15,0
12.	13,0
13.	12,5
14.	12,0
15.	18,0
16.	18,0

Tablica 3. Korelacija broja udaraca standardnog penetracijskog pokusa N_{60} i nedrenirane posmične čvrstoće c_u koherentnog, saturiranog materijala tla (Budhu, 2000)

Table 3 Correlation of SPT normalized number of blowcounts N_{60} and undrained shear strength c_u for saturated fine-grained soils (Budhu, 2000)

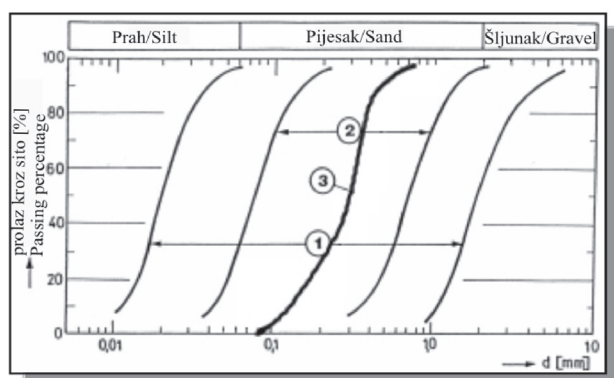
N_{60}	Stanje materijala <i>Description</i>	Nedrenirana posmična čvrstoća [kN/m ²] c_u [kN/m ²]
0-2	Vrlo meko <i>Very soft</i>	< 10
3-5	Meko <i>Soft</i>	10-25
6-9	Srednje meko <i>Medium</i>	25-50
10-15	Čvrsto <i>Stiff</i>	50-100
15-30	Vrlo čvrsto <i>Very stiff</i>	100-200
> 30	Ekstremno čvrsto <i>Extremely stiff</i>	> 200

Za potrebe temeljenja **stambeno-poslovnog objekta “Moj dvor”**, između Ulice Andrije Žaje i Magazinske ulice (sl. 2.) predviđena je dubina iskopa, u odnosu na

postojeću kotu terena, od ≈ 11 m. Na dubini od 3,8 m, pojavljuje se sloj pijeska debljine 2 m u kojem je identificirana razina podzemne vode (Ivandić, 2005). Na lokaciji je, za potrebe određivanja potencijala likvefakcije (Veinović, 2007) provedeno i ispitivanje nedrenirane čvrstoće krilnom sondom *Soiltest*. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 2. Prema Budhu (2000) u tablici 3. dana je korelacija broja udaraca standardnog penetracijskog pokusa N_{60} (vrijednost korigirana prema efikasnosti prijenosa energije) i nedrenirane posmične čvrstoće c_u te stanja prema zbijenosti koherentnog materijala tla.

Redovita primjena krilne sonde je u mekim koherentnim materijalima, ali se uz neke ograde može primijeniti i na pijeske. Odnosi stanja zbijenosti: meko (gline) i rahlo (pijesci) s određenom rezervom predstavljaju usporediva stanja. Tako se rezultati dobiveni mjerenjem krilnom sondom u pijescima mogu donekle korelirati s vrijednostima nedrenirane posmične čvrstoće te se orijentacijski može reći da materijal ispitivan krilnom sondom na lokaciji izgradnje stambeno-poslovnog objekta "Moj dvor" spada u srednje rahle materijale.

Granulometrijskom analizom uzoraka pijeska s ove lokacije dobiveni su rezultati uneseni u dijagram, na slici 6., iz kojeg je vidljivo da i ovaj pijesak, prema granulometrijskom kriteriju, spada u kategoriju najlikvefabilnijih materijala.



Slika 6. Granulometrijski raspon materijala tla nužan za pojavu likvefakcije: (1) potencijalno likvefabilna sredina, (2) najlikvefabilnija sredina, (3) uzorak pijeska s lokacije "Moj dvor" (modificirani dijagram iz Tsuchida, 1985)

Figure 6 Granulometric curves of liquefiable materials: (1) potentially liquefiable materials, (2) the most liquefiable materials, (3) sand from "Moj dvor" (modified Tsuchida, 1985)

Na temelju prikazanih ispitivanja ne može se izvući siguran zaključak o mogućnosti pojave likvefakcije prilikom jačeg potresa na ovoj lokaciji, iako se može dati logična pretpostavka da je likvefakcija moguća. Sloj pijeska bi mogao likvefirati, ali za točniju procjenu potrebno je izvesti dodatna ispitivanja i provesti proračun prema odgovarajućim procedurama.

Šljunčara "Abesinija" smještena je istočno od Zagreba, kod Sesveta, uz samu rijeku Savu (sl. 2.), a u geološkom smislu, nalazi se djelomično na recentnom aluviju i djelomično na drugoj savskoj terasi. Za lokaciju šljunčare „Abesinija“ provedeni su detaljni istraživački radovi i brojne analize materijala u svezi s eksploatacijom šljunka. Šljunčara je smještena na jednom od meandara sekundarnih tokova rijeke Save, za koje se smatra da su nositelji likvefabilnih materijala (Veinović, 2007). Na ovoj lokaciji su nađena i fosilizirana stabla kojima je određena apsolutna starost, a u blizini je zabilježena i pojava likvefakcije u prošlosti.

Unutar krupnozrnatih aluvijalnih sedimenata šljunaka i šljunaka s pijeskom, nalaze se leće pijeska te manjeviše kontinuiran sloj gline i treseta. Na slici 7. prikazan je sintezni litološki stup kao model taloženja materijala na lokaciji šljunčare "Abesinija", izrađen na temelju istraživačkih bušotina, iz više elaborata.

apsolutna starost [god] Absolute dating [year] razina podzemne vode Water level	sintezni litološki stup Generalized lithological column	ac klasifikacija A.C. classification	srednja debljina [m] Average thickness [m]	opis materijala Description	broj udaraca SP T-a SPT Blows
		humus	0.2-0.5	humus	
		CL/ML	2-3	glina/prah niske plastičnosti clay/silt – low plasticity	5-6
		SU	do 3	pijesak jednoliko graduiran well graded sand	6
		GP/GS/GW	4-5	šljunak s primjesama pijeska gravel with sand	12-16
		SU	do 3	pijesak jednoliko graduiran well graded sand	6
		CH	0.2-1	gline visoke plastičnosti clay – high plasticity	
		Pt	1-2	treset (peat)	
		CH	1-2	gline visoke plastičnosti clay – high plasticity	
		SU	do 5	pijesak jednoliko graduiran well graded sand	6
1720 ±100		GW/GS	≈ 30	šljunak dobro/loše graduiran gravel – poor/well graded	15-16
					(dublje) 17-18

Slika 7. Sintezni litološki stup kao geološki model taloženja materijala na lokaciji šljunčare „Abesinija“

Figure 7 Generalized lithological column as the geological model for sedimentation at the gravel pit "Abesinija"

Prema inženjerskogeološkim istraživačkim radovima (Veinović, 2007) zaključuje se da je to područje bilo dio meandra ili više njih u različitim razdobljima jer se na

inženjerskogeološkim profilima može naći dio ciklusa positnjavanja na više. Zaključuje se da je Sava u nekoliko navrata (iz profila se mogu vidjeti dva takva razdoblja) imala vrlo veliku energiju koja je zatim postupno slabila. Drugo razdoblje velike energije toka znatno je kraće od prvog (oko 1700 godina). Podrijetlo materijala može se, kao i za cijelo zagrebačko područje, vezati za sliv gornjeg toka rijeke Save tj. za alpski prostor.

Proračun vjerojatnosti pojave likvefakcije obavljen je modificiranim programom PROLIQ2 (Atkinson et al., 1986) koji koristi procedure Seed-a i Idriss-a (1983) za proračun potencijala likvefakcije s probabilističkim seizmičkim modelom razvijenim za Nacionalne norme za građenje u Kanadi (Monahan et al., 2000a).

Tablica 4. Rezultati proračuna vjerojatnosti pojave likvefakcije programom PROLIQ-mod

Table 4 Probability of liquefaction occurrence calculated with the PROLIQ-mod software

Bušotine Boreholes											
B-30 (27)				B-31 (28)				B-32 (29)			
Dubina [m] Depth [m]	Normalizirani broj udaraca N_L Normalized blowcounts N_L	Materijal Soil type	Vjerojatnost pojave likvefakcije [god.] Probability of liquefaction occurrence	Dubina [m] Depth [m]	Normalizirani broj udaraca N_L Normalized blowcounts N_L	Materijal Soil type	Vjerojatnost pojave likvefakcije [god.] Probability of liquefaction occurrence	Dubina [m] Depth [m]	Normalizirani broj udaraca N_L Normalized blowcounts N_L	Materijal Soil type	Vjerojatnost pojave likvefakcije [god.] Probability of liquefaction occurrence
2,00	14,4	S	0,00797	2,00	5,5	N_L	0,00000	1,00	6,0	N_L	0,00000
5,00	6,3	S	0,09117	4,00	6,4	N_L	0,00000	3,00	6,0	S	0,08551
8,00	14,9	N_L	0,00000	5,00	6,0	S	0,08849	5,00	14,8	N_L	0,00000
11,00	13,5	N_L	0,00000	8,00	13,3	N_L	0,00000	7,00	14,5	N_L	0,00000
18,00	10,2	N_L	0,00000	11,00	12,8	N_L	0,00000	9,00	13,4	N_L	0,00000
20,00	3,9	S	0,29788	17,00	10,0	N_L	0,00000	12,00	12,9	N_L	0,00000
-	-	-	-	20,00	9,8	N_L	0,00000	-	-	-	-
-	-	-	-	23,00	9,0	N_L	0,00000	-	-	-	-

Vrste materijala: S – pijesak, N_L – nelikvefabilan materijal
Soil type: S – sand, N_L – nonliquefiable material

Iz tablice 4 moglo bi se zaključiti da je mogućnost pojave likvefakcije u pedeset godina niska, no ovdje treba u obzir uzeti više čimbenika:

- pojava likvefabilnih materijala prema definicijama u programu (pijesak, pijesak s primjesama praha) ograničena je na slojeve relativno male debljine;
- modificirani program PROLIQ2 koristi starije verzije procedura;
- terenski istraživački radovi nisu rađeni sustavno niti ciljano za potrebe određivanja pojave likvefakcije;
- u blizini lokacije na kojoj su ispitivanja provedena zabilježena je pojava likvefakcije tijekom potresa u prošlosti, što znači da je likvefakcija moguća, ali i da je materijal tla vjerojatno nešto zbijeniji nego u prošlosti;

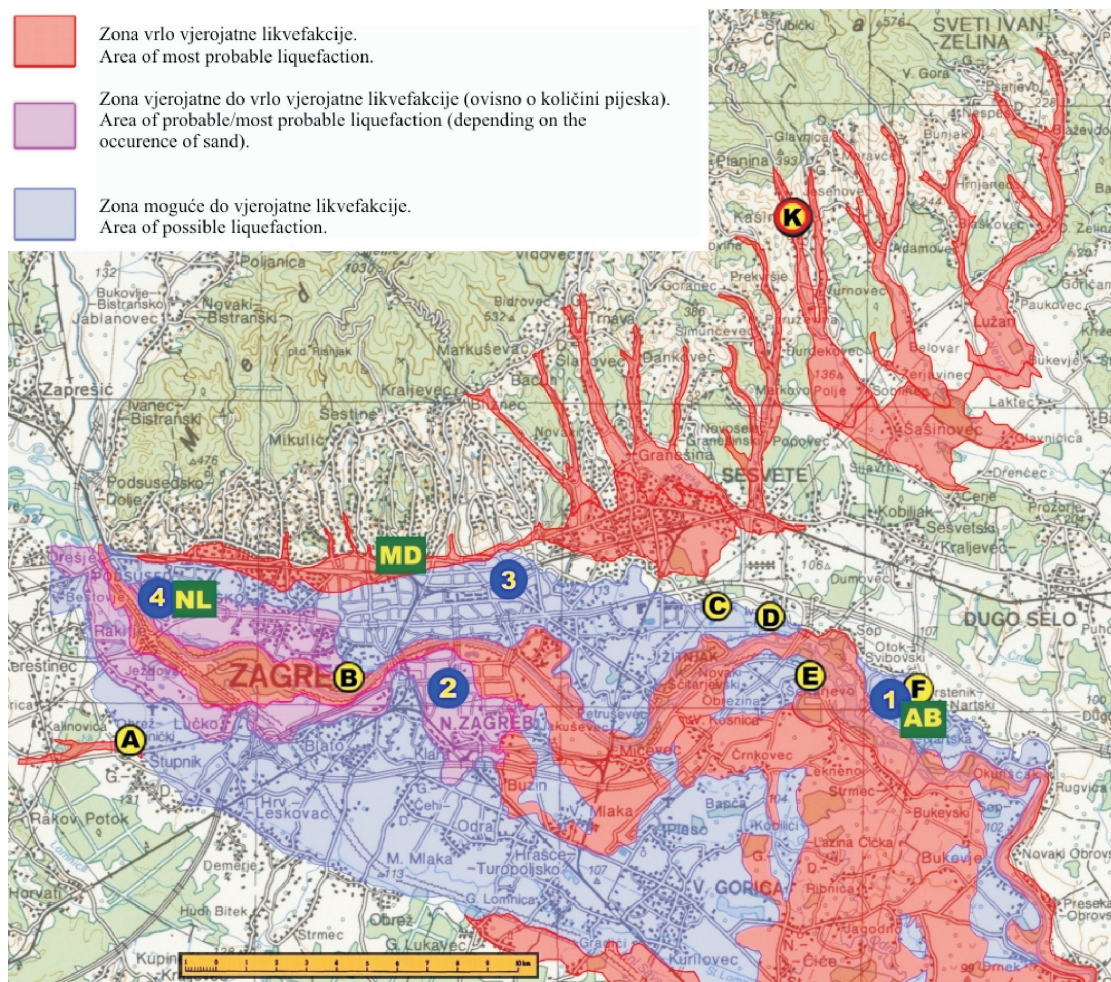
- starost materijala tla određena preko apsolutne starosti fosiliziranog drveta u podini likvefabilnog sloja pijeska je manja od 2000 godina, što bi značilo da je materijal u prilično rahlom stanju;
- rezultati standardnog penetracijskog pokusa u pijescima imaju normalizirane vrijednosti 3,9-6,3, što govori o vrlo rahlom materijalu;
- pojava likvefakcije u slojevima šljunka i šljunka s primjesama pijeska u literaturi još nije dobro definirana, a za ovu lokaciju s postojećim podacima nije ju bilo moguće proračunati.

Osim proračuna programom PROLIQ2, provedena je ocjena mogućnosti pojave likvefakcije na ovoj lokaciji, prema iskustvenim, geološkim, hidrogeološkim obilježjima tla i zbijenosti materijala određenoj standardnim penetracijskim pokusom te je zaključeno da postoji mogućnost pojave likvefakcije na ovoj lokaciji.

Makrozoniranje po potencijalu likvefakcije – šire zagrebačko područje

Da bi se procijenila mogućnost pojave likvefakcije i izdvojile potencijalno likvefabilne zone na području Zagreba, korišteni su pojednostavljeni kriteriji za prvi stupanj zoniranja prema *Priručniku za zoniranje seizmičkih geotehničkih hazarda* (ISSMGE, 1999). Istraživanja u okviru prvog stupnja zoniranja sastoje se od: procjene područja maksimalnog doseganja likvefakcije i procjene podložnosti tla likvefakciji, temeljenih na postojećim podacima. U sklopu procjene podložnosti likvefakciji za-

snovanoj na postojećim podacima razmatraju se geološki i geomorfološki kriteriji te indeks intenziteta likvefakcije. Za procjenu prema geološkom i geomorfološkom kriteriju nužno je naglasiti da prema stranim iskustvima postoji mogućnost višestrukog ponavljanja likvefakcije na nekoj lokaciji (Seed i Idriss, 1971; Kishida, 1966). Kao indikator ponovnog pojavljivanja likvefakcije tijekom budućih potresa u obzir se mogu uzeti karte koje pokazuju područja na kojima se likvefakcija dogodila u prošlosti. Ako je uspostavljena korelacija između likvefakcije u prošlosti i geoloških odnosno geomorfoloških značajki, ona se može iskoristiti za prognoziranje budućih pojava likvefakcije.



Slika 8. Preliminarna kvalitativna karta zoniranja zagrebačkog područja po potencijalu likvefakcije s lokacijama s dokumentiranom pojavom likvefakcije tijekom zagrebačkog potresa iz 1880. (A – Stupnik, B – Jarun, C – Resnik, D – Ivanja Reka, E – Drenje, F – Trstenik); lokacijama pronalaska fosiliziranih stabala (1 – šljunčara “Abesinija”, 2 – Siget, 3 – Heinzelova, 4 – Nova loza); istraženim lokacijama (NL – Nova loza, MD – “Moj dvor”, AB – “Abesinija”) i epicentrom potresa iz 1880. (K)

Figure 8 Preliminary qualitative liquefaction potential map of Zagreb area with the locations of liquefaction occurrence during Zagreb earthquake of 1880 (A – Stupnik, B – Jarun, C – Resnik, D – Ivanja Reka, E – Drenje, F – Trstenik); locations of fossilized trees found in the Zagreb area (1 – gravel pit “Abesinija”, 2 – Siget, 3 – Heinzelova, 4 – Nova loza); investigated sites (NL – Nova loza, MD – “Moj dvor”, AB – “Abesinija”) and the epicentre of the 1880 earthquake (K)

Na geološkoj podlozi (Osnovna geološka karta RH – listovi Zagreb i Ivanić Grad), kao osnovi za izradu preliminarnu kvalitativnu kartu zoniranja zagrebačkog područja po potencijalu likvefakcije (sl. 8), zone hazarda pojave likvefakcije određene su na temelju slijedećih kriterija:

- povijesnih podataka o pojavi likvefakcije na području Zagreba (1880.);
- hidrogeoloških podataka za zagrebački vodonošnik;
- podataka o starosti naslaga (stratigrafski i podaci o apsolutnoj starosti);
- procjeni područja maksimalnog dosega likvefakcije;
- geološkom mikromodelu pojave likvefabilnih materijala na ovom području u sklopu savskih prudova, sedimenata poplava, aluvija potoka te u nasutim starim savskim koritima (Veinović, 2007)
- iskustvima drugih istraživača koji su obrađivali sličnu problematiku.

Komentari vezani uz kartu su slijedeći:

- karta može poslužiti samo kao grubi orijentir, jer je podjela na njoj temeljena na starosti i genezi slojeva, pri čemu u obzir nisu uzete lokalne pojave pijeska/praha i razine podzemne vode;
- izraz "vrlo vjerojatna likvefakcija" ne znači da će se, u slučaju potresa odgovarajuće magnitude, na cijelom području koje je na karti označeno kao zona vrlo vjerojatne likvefakcije, ona i pojaviti, već da se s velikom vjerojatnošću na tom području očekuju lokalne pojave likvefakcije na lokacijama koje sadrže likvefabilne materijale, a isto vrijedi i za druge dvije zone;
- općenito – sve tri zone mogu sadržavati mikrolokacije na kojima će se likvefakcija, pri uvjetima iz njene definicije, dogoditi tijekom potresa $M = 6,5$;
- točniju kartu bi se dobilo primjenom geološkog mikromodela, što podrazumijeva kartiranje položaja meandara sekundarnih korita, odnosno leća pijeska, prašastih materijala ili njihovih smjesa;
- detaljnija karta bi zahtijevala dodatna istraživanja i uporabu svih dostupnih postojećih elaborata istraživačkih radova s relevantnim podacima;
- preciznu kartu zoniranja ovog područja moguće je izraditi u slučaju razvoja točnog modela pojave likvefakcije u savskim pjeskovitim šljuncima.

Zaključci i smjernice za nastavak ispitivanja

Obzirom na seizmičnost teritorija Republike Hrvatske, izvješća o razornim potresima u prošlosti, kao i pojavama likvefakcije tijekom tih potresa, pri projektiranju potrebno je u obzir uzeti dinamičku komponentu proračuna prema kriterijima: amplifikacije seizmičke pobude, mogućnosti

pojave klizišta tijekom potresa te potencijala likvefakcije. Podatke prema kojima se obavlja procjena potencijala likvefakcije treba pribaviti opsežnim i pažljivim geotehničkim istraživačkim radovima na terenu i u laboratoriju. Prikupljeni geotehnički podaci, uneseni u odgovarajuću bazu podataka, zajedno s podacima o litologiji te inženjersko-geološkim i hidrogeološkim značajkama, bili bi temelj za izradu mikrozonacijske karte potencijala likvefakcije, koja bi uvelike olakšala posao prostornog planiranja i projektiranja konkretnih objekata.

Određivanje apsolutne starosti fosiliziranog drveta iz sedimenata prisavske ravnice potvrdilo je dio stratigrafskih podataka s Opće geološke karte (OGK), listovi Zagreb i Ivanić Grad za lokacije na kojima su oni nađeni. Uzorku s graničnog područja prve savske terase i recentnog aluvija (Nova loza) određena je starost od 1165 +/- 55 god., uzorku s prve savske terase starost od 2105 +/-115 god. (Siget – holocen prema OGK), a s druge savske terase starost od 3405 +/-120 god. (rani holocen prema OGK). Uzorak uzet na lokaciji šljunčare "Abesinija", koja se također nalazi na drugoj savskoj terasi, datiran je na 1725 +/-100 god., a nađen je na dubini od oko 10 m pod slojem šljunka. Ovo neslaganje predstavlja dodatni razlog za nastavak istraživanja savskog aluvija radi boljeg razumijevanja i poznavanja građe opisanog područja. Unatoč tome, savski nanosi su vrlo mladi i po kriteriju starosti podložni pojavi likvefakcije.

Ispitani materijali na nekoliko lokacija ukazuju na mogućnost pojave likvefakcije po kriteriju granulometrijskog sastava, kao i stanju zbijenosti materijala (rahlo stanje). S obzirom da je pojava likvefabilnih materijala u užem smislu riječi – jednoliko građuiranih pijesaka, pijesaka s primjesama praha i krupnozrnatih prahova, na području Zagreba ograničena (Veinović, 2007), nužno je ispitati mogućnost pojave likvefakcije u šljuncima. Svjetska iskustva (Valera et al., 1994 i Lin et al., 2004) govore o pojavi likvefakcije u šljuncima, a sa sigurnošću se može reći da se na više (šest potvrđenih) lokacija na području Zagreba likvefakcija pojavila tijekom zadnjeg jakog potresa. Uzme li se to u obzir, ispitivanje mogućnosti pojave likvefakcije u savskim šljuncima nameće se kao prioritet za valjano provođenje projekta mikrozoniranja zagrebačkog područja po potencijalu likvefakcije.

Konačni rezultat ispitivanja prikazan je kvalitativnom prognostičkom kartom potencijala likvefakcije za područje Zagreba. Može se zaključiti da postoji vjerojatnost pojave likvefakcije tijekom jačeg potresa na području Zagreba, a likvefakcija se očekuje u mlađim slojevima saturiranih nekoherentnih materijala na području prisavske ravnice, kao i u aluvijalnim naslagama nekih potoka s Medvednice.

Received: 20.09.2007.

Accepted: 04.10.2007.

Literatura

- Allen, J. R. L. (1984): Sedimentary structures, their character & physical basis. Elsevier, 663 pp, Amsterdam.
- Atkinson, G., M., Finn, L., & Charlwood, R., G. (1986): PROLIQ2 - A Computer Program for Estimating the Probability of Seismic Liquefaction Including Both Areal & Fault Sources; UBC Canada, Vancouver.
- Basch, O. (1976): Osnovna geološka karta, M 1:100000, list Ivanić Grad, Savezni geološki zavod, Beograd.
- Budhu, M. (2000): Soil mechanics & foundations. John Wiley & Sons, 586 pp, New York.
- Casagrande, A. (1936): Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes & Earth. Jour. of the Boston Soc. of Civ. Eng., 13-32, Boston.
- Herak, M., Herak, D. & Markušić, S. (1996): Revision of the earthquake catalogue & seismicity of Croatia 1908-1992. Terra Nova, 8, 86-94.
- ISSMGE (1999) Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards.- The Japanese Geotechnical Study, ISSMGE – 209 pp.
- Ivandić, K. (2005): Geotehnički elaborat – Stambeno-poslovni objekt “Moj dvor”, GEOKOD d.o.o., Zagreb.
- Kishida, H. (1966): Damage to Reinforced Concrete Buildings in Niigata City with Special Reference to Foundation Engineering, Soils & Foundations, JSSMFE, 6(1), 71-88.
- Lin, P., S., Chang, C., W. & Chang, W., J. (2004): Characterization of liquefaction resistance in gravelly soil: large hammer penetration test & shear wave velocity approach. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, No. 24, Elsevier, 675-687.
- Monahan, P. A., Levson, V. M., Henderson, P. & Sy, A. (2000a): Relative liquefaction & amplification of ground motion hazard maps of greater Victoria, Report & expanded legend to accompany British Columbia geological survey geoscience map 2000-3, British Columbia, Ministry of Energy & Mines, Energy & Minerals Division, Geological Survey Branch, 27 pp.
- Monahan, P. A., Luternauer, J., L., Barrie, J.V. & Clague, J.J. (2000b): Variation of CPT tip resistance with age & its application to liquefaction susceptibility mapping in the Fraser river delta, British Columbia. Proc. 6th International Conference on Seismic Zonation, 637-642, Palm Springs.
- Seed, H. B., Arango, I. & Idriss, I. M. (1983): Evaluation of liquefaction potential using field performance data, J. Geotech. Eng. Div. ASCE 109(3), 458-82.
- Seed, H., B. & Idriss, I., M. (1971): Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Journal of the Soil mechanics & foundation division, ASCE, Vol.97, No.SM9, 1249-73.
- Šikić, K., Basch, O. & Šimunić, A (1972a): Osnovna geološka karta, M 1:100 000, List ZAGREB, Savezni geološki zavod, Beograd.
- Šikić, K., Basch, O. & Šimunić, A (1972b): Tumač za list Zagreb, Savezni geološki zavod, 81 pp., Beograd.
- Torbar, J. (1882): Izvješće o Zagrebačkom potresu. Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti, 141 pp, Zagreb.
- Tsuchida (1985): Liquefaction of soils during earthquakes. Commission on engineering & technical systems, National research Council, National Academy Press, Washington D.C.
- Valera, J., E., Traubenik, M., L., Egan, J., A. & Kaneshiro, J., Y. (1994): A practical perspective on liquefaction of gravels, Geotechnical Special Publication, No. 44, Ground failures under seismic conditions, ASCE, 241-258.
- Veinović, Ž. (2007): Ocjena mogućnosti pojave likvefakcije i definiranje osnove za likvefakcijsko zoniranje na teritoriju Republike Hrvatske, disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 332 pp, Zagreb.
- Velić, J. & Saftić, B. (1996): Dubinskogeološki odnosi područja smetlišta “Jakuševac” – čimbenik sanacije, ZGO Gospodarenje otpadom, Nov. 20-22, 197-205, Zagreb.