



**HRVATSKO GEOTEHNIČKO DRUŠTVO**  
**5. SAVJETOVANJE**  
**IZVORI RIZIKA U GEOTEHNIČKIM ZAHVATIMA**  
**Osijek, 20-21.05.2009.**

**Geotehnička istraživanja za određivanje lokalnih uvjeta tla na lokaciji Arene Zagreb**

**Geotechnical site investigation for the determination of local conditions at the site of Arena Zagreb**

**Ivan Salković**, Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet, [isalko@rgn.hr](mailto:isalko@rgn.hr),

**Predrag Kvasnička**, Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet, [pkvasnic@rgn.hr](mailto:pkvasnic@rgn.hr),

**Snježana Mihalić**, Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet, [smihalic@rgn.hr](mailto:smihalic@rgn.hr),

**Martin Krkač**, Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet, [mkrkac@rgn.hr](mailto:mkrkac@rgn.hr)

*Sažetak*

*Za potrebe određivanja lokalnih uvjeta tla na lokaciji Arene Zagreb trebalo je prikupiti kvalitativne podatke o karakterističnim geotehničkim profilima (tipovi materijala tla i njihova debljina) i kvantitativne podatke, dobivene in situ i geofizičkim ispitivanjima (rezultati SPP-a i brzine posmičnih valova). Ti podaci su trebali poslužiti i da se temeljno tlo može klasificirati prema eurokodu 8, te za određivanje vrijednosti  $V_{s,30}$  (srednje brzine posmičnih valova za 30 m dubine). Za to je trebalo obaviti: MASW i downhole (geofizička) mjerenja te SPT. Vrijednosti SPT-a su unesene u poznate izraze koji koreliraju to ispitivanje s brzinama posmičnih valova, da se pokušaju dobiti lokalne korelacije tih veličina. Rezultati ovih istraživačkih radova, osim za potrebe seizmičkog projektiranja Arene, dobra su podloga za izradu seizmičke mikrozonacije Grada Zagreba.*

*Ključne riječi: Lokalni uvjeti tla, eurokod 8, mikrozonacija, SPP, down hole, MASW*

*Abstract*

*Site investigations for the sake of site response analysis for the building of Arena Zagreb are presented in the paper. For this purpose qualitative (soil types) and quantitative data, attained through seismic (downhole and MASW) and in situ measurements (SPT) were collected. This data were used for soil classification according to Eurocode 8 and for*

*determining average shear wave velocity for upper 30 m. Well known relationships between data of SPT and of shear wave velocity were checked. The characterization of local site conditions, using presented prospecting techniques, beside for purpose of local site conditions for Arena, represents an important stage for seismic microzonations and urban planning for the City of Zagreb.*

*Keywords: Local site conditions, Eurocode 8, microzonation, SPT, down hole, MASW*

## 1. Uvod

Lokacija Arene Zagreb nalazi se na jugozapadnom dijelu grada Zagreba, u naselju Lanište koje je smješteno u području tzv. savske ravnice, izgrađenom od kvartarno-holocenskih naslaga najniže savske terase (a1) sastavljenih od šljunaka, pijesaka te, podređeno, glina, kao što je prikazano na osnovnoj geološkoj karti, list Zagreb u mjerilu 1:100.000 (Šikić i dr., 1972).

Za potrebe projektiranja i izgradnje objekta Arene Zagreb, 2007. god.. investitor projekta geotehničkih istraživačkih radova bilo je poduzeće Ingra d.d., a izvođač radova bila je tvrtka Geokon-Zagreb d.o.o. Radovi su se sastojali od terenskih istraživačkih radova (istraživačkih bušenja i *in situ* ispitivanja), te laboratorijskih ispitivanja. Istraživački radovi su provedeni u dvije faze, u proljeće i u jesen:

- Svrha prve faze geotehničkih istraživačkih radova bila je odrediti vrste i svojstva materijala temeljnog tla na lokaciji za potrebe projektiranja temelja i zaštite građevne jame.
- U drugoj fazi, za potrebe određivanja utjecaja lokalnog tla na seizmičku pobudu, izbušena je jedna stometerska bušotina, a geotehnička istraživanja upotpunjena su geofizičkim ispitivanjima; u toj bušotini su, do 80 m, izvedena downhole mjerenja (dublje se nije moglo jer se zbog neadekvatnog zacjevljenja, pribor za mjerenje nije mogao dublje spustiti) i obavljena su mjerenja pomoću MASW metode. Geofizička mjerenja provela je tvrtka Moho d.o.o. Svrha geofizičkih istraživanja bila je određivanje brzina posmičnih valova za potrebe određivanja modela za analizu utjecaja lokalnog tla na seizmičku pobudu.

Što se tiče stometerske bušotine, geofizička i ostala relevantna geotehnička svojstva za određivanje utjecaja lokalnog tla, potrebna su da se formira numerički model u programu SHAKE koji je namijenjen za analize utjecaja lokalnog tla, tj. amplificiranje seizmičkog signala od osnovne stijene do površine tla.

Prema eurokodu 8, pod osnovnom stijenom, u seizmičkom smislu, podrazumijeva se: ili prava stijena ili tlo čija je brzina posmičnih elastičnih valova,  $v_s > 800$  m/s (EC 8, tab. 3.1). Kao što će se iz ovdje predloženih mjerenja vidjeti, položaj tako definirane osnovne stijene na lokaciji Arene ovim istraživanjima nije dosegnut. Iz praktičnih i ekonomskih razloga ne bi bilo racionalno bušiti i mjeriti na većim dubinama od cca 100 m za ove namjene. Međutim, položaj osnovne stijene na području grada Zagreba može se približno odrediti i iz drugih izvora i analiza (što predviđa i EC 8, tj. iz „dubinskog geološkog sastava“). Naime, na području Zagreba je izbušeno nekoliko bušotina s ciljem otkrivanja vodonosnika tople vode, te ležišta nafte i plina. Ta su istraživanja poslužila za približno određivanje geološke granice starijih i mlađih geoloških sedimenata (Jurak et al., 1998a i 1998b). Prema tim i novijim istraživanjima (Tomljenović, 2009), na lokaciji Arene, debljina recentnih naslaga je cca 300 m. Što se tiče numeričkog modela, u SHAKE-u se u pravilu ne ispituju modeli deblji od 100

m, pa je za Arenu na tu dubinu postavljena donja granica modela. Same analize utjecaja lokalnog tla za Arenu Zagreb mogu se naći u Kvasnička (2007) i u ovom se članku neće prikazivati.

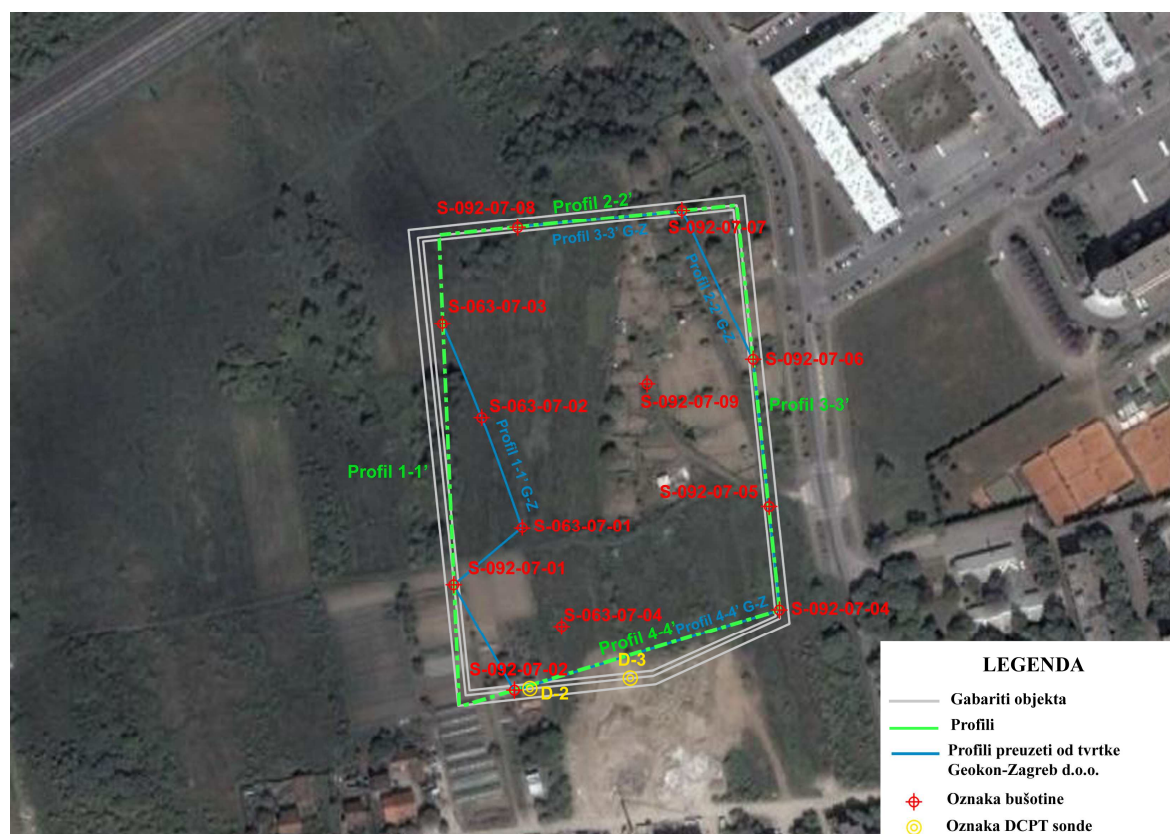
Svrha i način prikupljanja geotehničkih podataka i njihovo spremanje u baze podataka te upotreba tih podataka za analizu utjecaja lokalnog tla na teritoriju grada Zagreba prikazani su u Kvasnička et. al (1996) i (1998) te u Kvasnička i Matešić (2001).

Rezultati geotehničkih istraživanja objavljeni su u dva geotehnička elaborata: E-063-07-01 i E-092-07-01 (Geokon-Zagreb, 2007). U diplomskom radu Blagojević (2008) obavljena je sinteza rezultata svih geotehničkih istraživanja.

## 2. Opis geotehničkih istraživačkih radova

### 2.1 Bušotine

U okviru prve faze terenskih radova, provedenih u razdoblju 3.–31.7.2007. i 3.-8.5.2007. god., izvedeno je deset geotehničkih istražnih bušotina dubine 12.0 do 15.0 m i jedna bušotina duboka 25 m (S-063-07-01). Bušenje je izvodila tvrtka MKS inženjering d.o.o. strojnom garniturom *nordmeyer*. Položaj bušotina prikazan je na sl. 2.1. U drugoj fazi izvedena je duboka bušotina (S-092-07-09), dubine 100,70 m. Bušaće radove na toj bušotini izvela je tvrtka Geoteknika inženjering d.o.o.



Slika 2.1. Prikaz položaja bušotina.

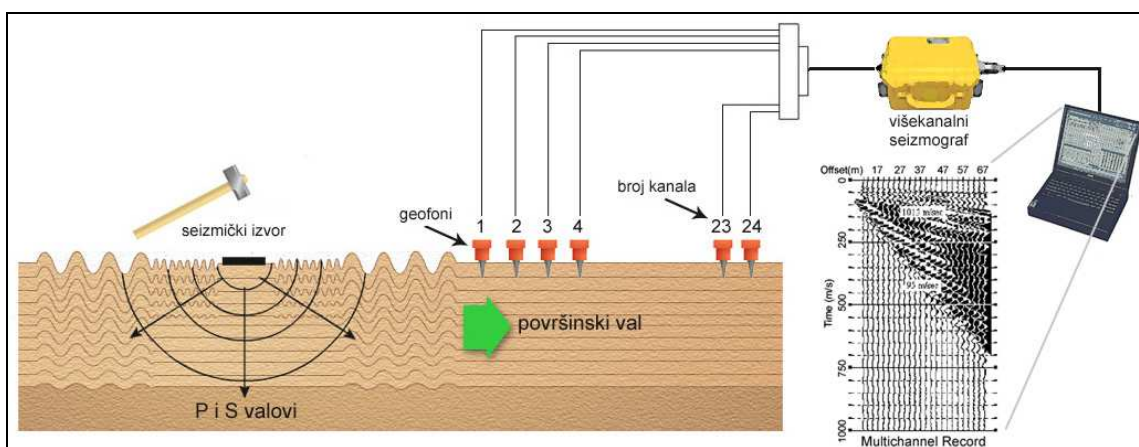
## 2.2 Geofizička mjerenja

Kako je već spomenuto, obavljena su downhole mjerenja u stometarskoj bušotini, a s površine je mjereno MASW metodom. Downhole metodu, kao već od ranije poznatu, nećemo ovdje posebno opisivati. Zadržat ćemo se na metodi koja se tek „probija“, a to je MASW.

MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) metoda (Park, 1999), je nedestruktivna seizmička metoda kojom se analiziraju disperzijska svojstva seizmičkih površinskih valova (osnovnog moda Rayleighevih valova) koji se kreću horizontalno duž istraživane površine terena.

Ova se metoda zasniva na činjenici da su površinski (Rayleighjevi) valovi disperzivni, što znači da njihova brzina rasprostiranja,  $v_R$ , ovisi o valnoj duljini, odnosno frekvenciji. Za primjenu u geotehničkom inženjerstvu, važna je činjenica da je brzina  $v_R$  bliska brzini posmičnog vala  $v_S$  (ovisno o Poissonovom koeficijentu, između  $0,88 v_S$  i  $0,95 v_S$ , Stokoe *et al.*, 1994a).

U ranim 1980-ima, za dobivanje  $v_S$ -profila, bila je uvedena metoda spektralne analize površinskih valova, SASW (Nazarian *et al.*, 1983). SASW metoda sastoji se od snimanja površinskih valova upotrebom dvaju prijemnika i računanjem faznih brzina iz faznog spektra snimljenih podataka. Ova je metoda široko i uspješno korištena na mnogim geotehničkim projektima (Stokoe *et al.*, 1994b). MASW predstavlja unaprjeđenje SASW metode, nadjačavajući malobrojne, ali bitne slabosti SASW metode.

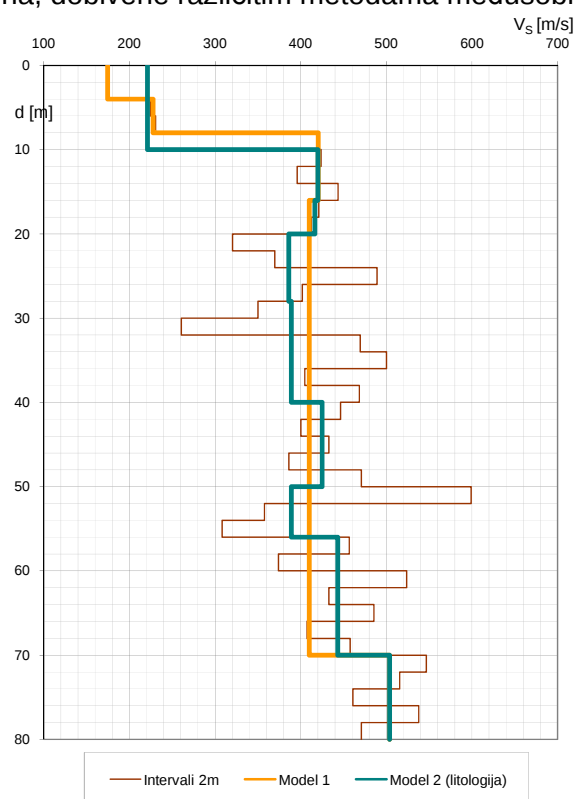


**Slika 2.2.** MASW - prikupljanje podataka.

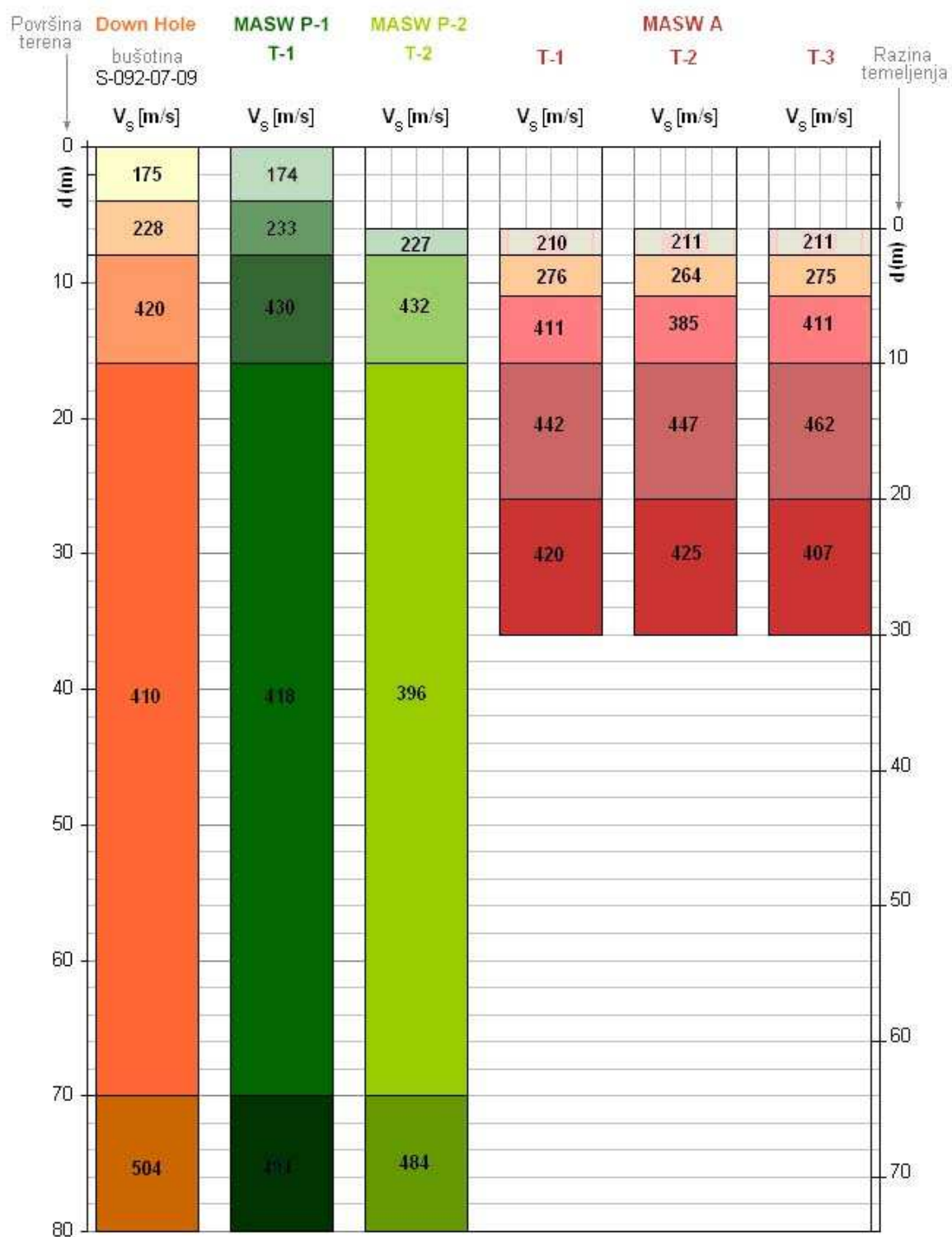
Za prikupljanje podataka na terenu koristi se veći broj prijemnika (geofona), uglavnom 24 ili više, koji su raspoređeni na jednakim udaljenostima duž profila i spojeni na višekanalni seizmograf. Kod tzv. aktivne MASW metode registriraju se površinski valovi izazvani kontroliranim seizmičkim izvorom, obično teškim čekićem (sl. 2.2). Sve vibracije izazvane drugim izvorima smatraju se smetnjama (šumom) te ih treba svesti na najmanju moguću mjeru. Naprotiv, pasivna MASW metoda (tzv. *Passive roadside*, Park i Miller, 2006) koristi upravo pozadinski šum izazvan uglavnom ljudskim aktivnostima, osobito prometom, ili prirodnim pojavama (tzv. *Passive remote*, Park i Miller, 2006). Zbog karaktera signala, posebno značajnog sadržaja energije na niskim frekvencijama, moguće je u pravilu postići veću dubinu istraživanja nego aktivnim postupkom (Okada, 2003).

Za lokaciju Arena, na sl. 2.3 prikazani su  $v_s$ -profili dobiveni downhole mjerenjem. Smeđom bojom prikazane su intervalne brzine za intervale od 2 m. Narančastom bojom prikazan je  $v_s$ -profil koji je dobiven isključivo analizom izmjerenih podataka, neovisno o litološkom stupu. Kao primjer, zelenom bojom prikazan je profil koji je dobiven modeliranjem prema podacima o litološkom stupu gdje granice slojeva profila odgovaraju litološkim granicama utvrđenim bušenjem.

Rezultati MASW modeliranja (za pasivnu metodu) prikazani su na sl. 2.4 gdje je, radi usporedbe, prikazan i model dobiven downhole mjerenjem. Brzine dobivene MASW metodom modelirane su prema debljinama slojeva iz downhole modela. Postoji stanovita razlika između brzina u profilima P-1 i P-2 što se, između ostalog, može pripisati tome što su mjerenja izvedena na dva različita mjesta na lokaciji. Na sl. 2.4 prikazani su svi  $v_s$  profili, uključujući i one dobivene aktivnom MASW metodom. Može se zaključiti da su vrijednosti brzina, dobivene različitim metodama međusobno konzistentne.



**Slika 2.3.**  $V_s$ -profili dobiveni downhole mjerenjem.



Slika 2.4. Profili dobiveni down hole i MASW mjerenjem.

### 3. Kvalitativni i kvantitativni pokazatelji lokalnih uvjeta tla i klasifikacija prema eurokodu 8

Lokacija na kojoj su izvršena terenska istraživanja nalazi se na zaravnjenom terenu, karakterističnom za aluvijalnu ravnicu. S obzirom da se istovrsni materijali pravilno izmjenjuju u svim bušotinama, i kontinuitet naslaga se može pratiti u susjednim bušotinama, može se reći da je lokacija jednostavne geološke građe:

- Do dubine od oko 10 m, ispod tankog površinskog sloja humusa i gline, javljaju se slojevi slabograduiranog pijeska, pijeska s prahom, dobro/slabograduiranog šljunka s pijeskom i slabograduiranog šljunka s glinom i pijeskom. Standardnim penetracijskim pokusom dobiveni su rezultati prema kojima su ovi materijali vrlo rahli do rahli. Prema downhole modelu, zona malih brzina (175-228 m/s), nalazi se do dubine od otprilike 8 m. To je zona koja dubinom otprilike odgovara plitkom dijelu izgrađenom od površinskog sloja humusa i gline, vrlo rahlih do rahlih slojeva, pretežno pijeska i šljunka.
- Ispod plitke zone malih brzina nalazi se zona većih brzina posmičnih valova. Izmjenjuju se slojevi gline, pijeska i prašinstog pijeska i gline. Vrijednosti  $v_s$  do istraživane dubine od 80 m ne prelaze vrijednost od 504 m/s, što znači da nije dosegnuta osnovna stijena ( $v_s > 800$  m/s). Podatak ne čudi jer je poznato da debljina aluvijalnih naslaga na ovome području iznosi oko 2 000 m.

Za potrebe klasifikacije tla na lokaciji prema eurokodu 8, rezultati downhole mjerenja mogu se svesti na prosječne brzine S-valova do dubine 30 m prema formuli:

$$v_{s,30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_i}} \quad (3-1)$$

gdje su:  $v_{s,30}$  - brzina S-vala za prvih 30 metara dubine;  $d_i$  - debljina  $i$ -tog sloja;  $v_i$  - brzina S-vala u  $i$ -tom sloju.

Prema (3-1), na mjestu bušotine S-092-07-09,  $v_{s,30} = 321$  m/s, čime bi tlo bilo kategorizirano kao tip tla C. Klasifikaciju tla, prema eurokodu 8 moguće je napraviti i prema prosječnom broju udaraca SPP-a za prvih 30 m dubine prema formuli:

$$N_{SPT} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (3-2)$$

gdje je:  $N_{SPT}$  - prosječan broj udaraca SPT-a za prvih 30 metara dubine;  $d_i$  – debljina sloja tla s kohezijom, bez kohezije ili sloja stijene;  $N_i$  – broj udaraca za tla s kohezijom, tla bez kohezije i slojeve stijene.

Kada se vrijednosti broja udaraca  $N$ , iz bušotine S-092-07-09, uvrste u navedenu formulu, prosječan broj udaraca,  $N_{SPT}$ , za prvih 30 m dubine iznosi 18,75. Tlo je, prema broju udaraca SPP-a, kao i prema geofizičkim mjerenjima, kategorizirano kao tip C. Za slučaj kada je u bušotini korišten šiljak, sve vrijednosti broja udaraca su korigirane faktorom 0.7-0.75 (prema Nonveiller, 1981).

Posredno, prema paralelnim in situ mjerenjima na nekim lokacijama, vrijednost  $v_{s,30}$  moguće je odrediti i iz podataka SPP-a ili CPT-a, uvrštavanjem vrijednosti broja udaraca ( $N$ ),

ili otpora šiljka ( $q_c$ ), u empirijske formule. Kao primjer može se dati formula prema Iyisanu iz 1996. (DRM, 2004):

$$v_s = 51.5N^{0.516} \quad (3-3)$$

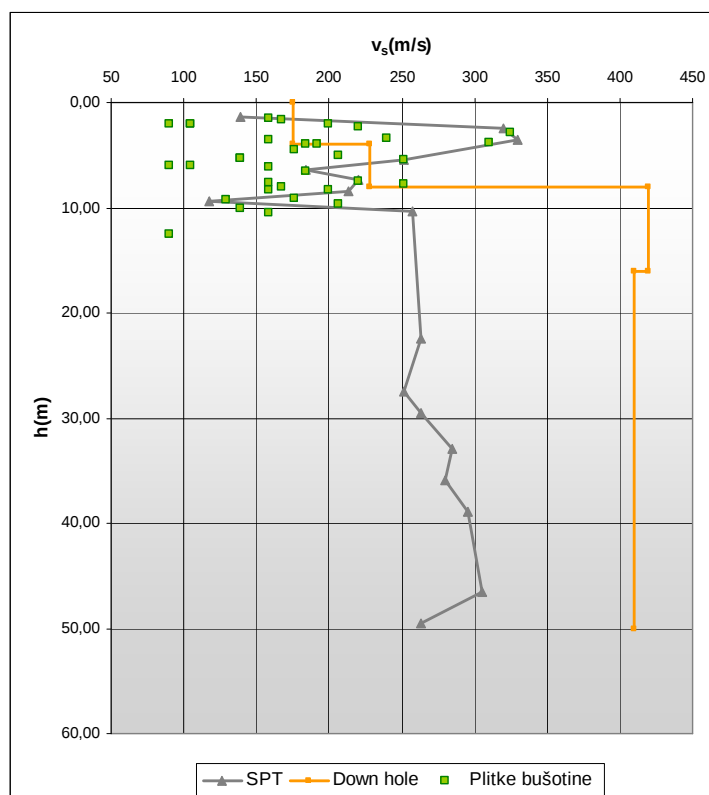
gdje je:

$v_s$  - brzina S-vala;

$N$  - prosječan broj udaraca SPT-a.

Gornja formula trebala bi vrijediti za sve tipove tala. Međutim, s obzirom da se radi o iskustvenim formulama, poželjno ih je provjeriti za konkretan problem. Tako se za lokaciju Arene, uvrštavanjem  $N_{SP} = 18,75$  (prema vrijednostima  $N$  za bušotinu 092-07-09), dobije se vrijednost;  $v_{s,30} = 233$  m/s. Ovako dobivena vrijednost  $v_{s,30}$  je znatno niža od vrijednosti dobivene geofizičkim mjerenjima. Iako postoje razne formule koje omogućavaju procjenu vrijednosti  $v_s$  iz podataka dobivenima mjerenjem *in situ* i često se susreću u stručnoj literaturi i brojnim znanstvenim radovima, stručni priručnici (npr. DRM, 2004) preporučuju upotrebu empirijskih korelacija samo za preliminarne procjene.

Na sl. 3.1 prikazana su dva profila brzina S-valova na mjestu duboke bušotine. Jedan je dobiven downhole mjerenjem, a drugi profil brzina dobiven je korelacijom prema formuli (3-3). Vidi se da su vrijednosti brzina preko SPT-a osjetno manje u odnosu na mjerene veličine. U gornjih desetak metara ucrtane su vrijednosti brzina dobivene navedenom korelacijom iz podataka SPT-a, izvedenog u sedam plitkih bušotina.



**Slika 3.1.** Vrijednosti brzina dobivene korelacijom iz podataka SPT-a izvedenog u plitkim bušotinama (zeleno).

#### 4. Zaključak

Za određivanje uvjeta lokalnog tla, potrebni su osnovni podaci o geologiji i geotehničkim svojstvima koji su na lokaciji Arene Zagreb prikupljeni bušenjem, izvođenjem SPT-a, te geofizičkim mjerenjima - downhole i MASW metodom. Teren je ravan, karakterističnom za aluvijalnu ravnicu i može se reći da je tlo jednostavne geološke građe. Na lokaciji nema opasnosti od pojave seizmički induciranih efekata kao što su klizanja ili likvefakcija, niti su ustanovljena tla koja spadaju u posebne tipove tala (prema eurokodu 8), zbog kojih bi trebalo provesti posebno detaljna istraživanja. Vrijednosti  $v_s$  do istraživane dubine od 80 m ne prelaze vrijednost od 504 m/s, što znači da nije dosegnuta osnovna stijena ( $v_s > 800$  m/s), no za pretpostaviti je da se s povećanjem dubine geotehnička svojstva materijala poboljšavaju, na što ukazuje i porast seizmičkih brzina. Klasifikacija tla prema eurokodu 8 napravljena je na temelju downhole mjerenja. Prema srednjoj vrijednosti brzine posmičnog vala za 30,0 m dubine,  $v_{s,30} = 321$  m/s, tlo je kategorizirano kao tip tla C. Opis stratigrafskog profila za tip tla C glasi: zbijeni ili srednje zbijeni pijesak, šljunak ili čvrsta glina debljine nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara. U literaturi prihvaćene korelacije  $v_s$  – SPT nisu dale zadovoljavajuće rezultate, pa bi trebalo poraditi na određivanju lokalnih korelacija.

S obzirom da je za potrebe građenja Arene, prikupljena veća količina geoloških i geotehničkih podataka, oni mogu biti upotrijebljeni za određivanje lokalnih uvjeta tla, onako kako to zahtijevaju suvremeni europski konstrukcijski kodovi i priručnici za mikrozonaciju.

Kako seizmička mikrozonacija na području Grada Zagreba nije provedena, a u skorije vrijeme postojati će i obaveza primjene europskog seizmičkog propisa eurokoda 8, dobiveni podaci mogu se upotrijebiti kao preliminarne informacije za potrebe seizmičkog projektiranja i urbanističkog planiranja.

#### Literatura

- DRM, 2004. *Seismic Microzonation for Municipalities. Manual.*, DRM Disaster Risk Management Switzerland SA, SUPSI Trevano, 6952 Conobbio-Lugano, Switzerland.
- Jurak, V., Kvasnička, P., Dujmić, D. i Kuk, V., (1998a). Javno predavanje: "Seizmička podina u nizinskom dijelu grada Zagreba", Hrvatsko geološko društvo, Odsjek za inženjersku geologiju, Hrvatska nacionalna grupa IAEG, Zagreb.
- Jurak, V., Kvasnička, P., Dujmić, D. i Kuk, V. (1998b). "Seizmička podina u nizinskom dijelu grada Zagreba". *Znanstveni skup: Andrija Mohorovičić - 140. obljetnica rođenja. Drž. hidrometeorološki zavod.* pp. 125-139.
- Kvasnička, P., Matešić, L. i Čoza, E. (1996). "Razvoj geotehničke podloge grada Zagreba prema načelima GIS-a". CADForum'96- Komunikacija u projektiranju, 7. međunarodni simpozij o razvoju i primjeni kompjutorske tehnologije u arhitekturi, dizajnu i prostornom planiranju, Zagreb, UDK 52:681.3.
- Kvasnička, P., Matešić, L. i Skračić, S. (1998). "Geotehnička podloga grada Zagreba". *Građevinar.* Hrvatski savez građevinskih inženjera, 50/1. pp. 119-127.
- Kvasnička, P. & Matešić, L. (2001). "Geotechnical data base for the City of Zagreb and its application in site response analyses." *Fourth. Int. Conf. Recent Advances Geotechn. Earthq. Engng, San Diego Cal.*, paper. 11-15.
- Kvasnička, P. (2007). "Seizmološka istraživanja lokacije sportskog centra Arena, kao objekta izvan kategorija, te njihova obrada i definiranje projektnih seizmičkih parametara za izradu glavnog projekta" RGNf.

- Nazarian, S, Stokoe, K. H. & Hudson, W. R. (1993). Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems. *Transport. Res. Record*, 930, 38–45.
- Okada, H., (2003). *The microtremor survey method*. Geophysical monograph series, no. 12, published by Society of Exploration Geophysicists (SEG), Tulsa, OK.
- Park, C. B., & Miller, R.D. (2006). *Roadside passive MASW*. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (*SAGEEP 2006*), Seattle, Washington, April 2-6, p. 1116-1127.
- Stokoe, K. H., Wright, G. W., Bay, J.A., Roesset, J.M., (1994a). *Characterization of geotechnical sites by SASW method*. Geophysical characterization of sites, ISSMFE Technical Committee #10, edited by R. D.Woods, Oxford Publishers, New Delhi.
- Stokoe, K. H., Wright, G. W., James, A. B., Jose, M. R., (1994b). *Characterization of geotechnical sites by SASW method*. Woods, R. D., Ed., Geophysical characterization of sites: Oxford Publ.
- Tomljenović, B. (2009). *Usmena priopćenja autorima.*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.