

IN-SITU ISPITIVANJA TLA ZA POTREBE IZGRADNJE CRPNE STANICE SUSTAVA NAVODNJAVANJA VAŠKA-KAPINCI

IN-SITU SOIL TESTING FOR CONSTRUCTION OF PUMPING STATION OF IRRIGATION SYSTEM VAŠKA-KAPINCI

Marija Đurinek¹, Krešo Ivandić¹, Stjepan Strelec¹

¹Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA,
marija.djurinek@gfv.hr, kreso.ivandic@gfv.hr, stjepan.strelec@gmail.com

Sažetak: U radu se opisuju dvije metode in-situ ispitivanja tla: statički penetracijski pokus (CPT) i ispitivanje teškom udarnom sondom (DPH). Prikazani su rezultati ispitivanja tla na mjestu izgradnje crpne stanice sustava navodnjavanja Vaška-Kapinci koji su uspoređeni s rezultatima dobivenim istražnim bušenjem. Provedena je usporedba kuta unutarnjeg trenja dobivenog iz korelacija sa CPT i DPH ispitivanjem te je izvedena korelacija između otpora na šiljku q_c i broja udaraca N_{10H} .

Cljučne riječi: statički penetracijski pokus, teška udarna sonda, otpor na šiljku, kut unutarnjeg trenja

Abstract: In this paper, two methods of in-situ soil testing are described: Cone Penetration Test (CPT) and Dynamic Probing Heavy (DPH). The results of tests carried out at construction site of pumping station of irrigation system Vaška – Kapinci are represented and compared with borehole data. Comparison of the friction angle derived from correlations with CPT and DPH tests is made and the correlation between cone resistance q_c and number of blows N_{10H} is derived.

Keywords: Cone Penetration Test, Dynamic Penetration Heavy, cone resistance, friction angle

Received: 29.05.2015 / Accepted: 05.06.2015

Published online: 19.06.2015

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Statički penetracijski pokus (Cone Penetration Test, CPT) je u posljednje vrijeme često primjenjiva metoda in-situ ispitivanja tla zbog niza prednosti naspram drugih metoda, kao što su: ekonomičnost, brzo i kontinuirano profiliranje tla, ponovljivi i pouzdani rezultati ispitivanja te dobra teorijska podloga za interpretaciju rezultata uz veliki broj korelacija sa geotehničkim parametrima tla kao i drugim in-situ metodama (Robertson 2012).

Nedostatak ovog pokusa je nemogućnost njegove primjene u uvjetima u kojima postoji mogućnost oštećenja sonde, primjerice u šljunkovitim tlima, pa postoji potreba za izvođenjem određenih dinamičkih penetracijskih postupaka ispitivanja, kao na primjer dinamičko sondiranje tla (Dynamic Probing, DP).

Općenito je preporuka da se prilikom izvođenja geotehničkih istražnih radova kombiniraju najmanje dvije metode in-situ ispitivanja tla kako bi se dobila kompletna slika o ponašanju temeljnog tla.

U ovom radu će se prikazati rezultati in-situ ispitivanja tla za potrebe izvedbe građevinske jame za izgradnju crpne stanice sustava navodnjavanja Vaška-Kapinci, gdje su uz istražno bušenje provedeni statički penetracijski pokus te ispitivanje teškom udarnom sondom (Dynamic Probing Heavy, DPH).

2. STATIČKI PENETRACIJSKI POKUS (CPT)

Statički penetracijski pokus (Cone Penetration Test, CPT) se sastoji od utiskivanja cilindrične sonde sa šiljkom na vrhu vertikalno u tlo pomoću niza šipki, konstantnom brzinom od 2 cm/s, pri čemu se mjere otpor šiljka sonde na statičko prodiranje (q_c) te trenje na plaštu sonde (f_s) (Lunne i dr. 1997). U današnje vrijeme se najčešće koristi suvremena digitalna elektronička oprema za ispitivanje koja omogućuje kontinuirano mjerenje navedenih veličina, za razliku od mehaničke opreme koja se prvi puta koristila u Nizozemskoj, 1930. godine. Ispitivanje tla se provodi u skladu sa zahtjevima danim u normi EN ISO 22476-1 za elektronički CPT, odnosno EN ISO 22476-12 za mehanički CPT.

Standardna sonda za ispitivanje tla statičkom penetracijom ima konusni šiljak sa unutarnjim kutom od 60° , promjera je 35,7 mm (površine 10 cm²) te ima površinu plašta 150 cm². Raznim senzorima dodanim na standardnu sondu, uz otpor na šiljku i trenje na plaštu, moguća su mjerenja i drugih veličina. Najčešće su to porni tlak gdje sonda (Piezocone, CPTu) ima ugrađen porozni prsten iznad šiljka za mjerenje pornog tlaka pri prodiranju sonde (u_2) te brzina seizmičkih valova kada sonda (Seismic Cone, SCPT) ima ugrađen trokomponentni geofon koji registrira seizmičke valove izazvane na površini terena. Upravo zbog toga statički penetracijski pokus ima široku primjenu u raznim vrstama tla.

Kada se mjerenja provode u sitnozrnatim koherentnim tlima, potrebno je izmjereni otpor na šiljku q_c korigirati zbog utjecaja pornog tlaka koji je vrlo velik zbog male vodopropusnosti sitnozrnatih tla, prema izrazu:

$$q_t = q_c + u_2(1 - a_n) \quad (1)$$

gdje je a_n faktor korekcije. Računa se prema slijedećem izrazu: $a_n = d^2/D^2$, gdje je D vanjski, a d unutarnji promjer sonde. Ovisi o konstrukciji sonde i za većinu sondi se kreće u rasponu $0,55 < a_n < 0,9$ (Lunne i dr. 1997).

Kod pijeska je korekcija minimalna jer je zbog velike vodopropusnosti izmjereni porni tlak gotovo identičan hidrostatskom pornom tlaku.

Značajnija primjena statičkog penetracijskog pokusa jest provedba klasifikacije tla. Precizna i korektna klasifikacija tla se temelji na njegovim fizikalnim karakteristikama (granulometrijski sastav tla, Atterbergove granice plastičnosti). Indirektno se može provesti klasifikacija i na temelju njegova ponašanja prilikom izvođenja statičkog penetracijskog pokusa. Iz tih razloga je usvojen pojam „tip ponašanja tla“ (Soil Behaviour Type, SBT) (Lunne i dr. 1997).

Razvijeni su klasifikacijski dijagrami za određivanje tipa ponašanja tla na temelju izmjerenih otpora na šiljku q_c i trenja na plaštu f_s . Danas je u upotrebi klasifikacijski dijagram kojega je predložio Robertson 1990 godine, slika 1 (Robertson 2012). S obzirom da otpor na šiljku i trenje na plaštu rastu po dubini zbog porasta efektivnog vertikalnog napreznja, u klasifikacijskom se dijagramu koriste slijedeće normalizirane vrijednosti:

- normalizirani otpor na šiljku:

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} \quad (2)$$

- normalizirani indeks trenja:

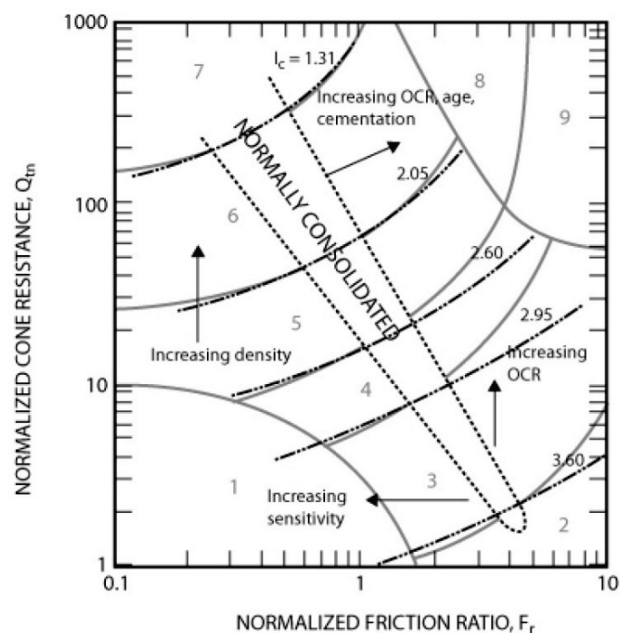
$$F_r = [f_s / (q_t - \sigma_{v0})] \cdot 100\% \quad (3)$$

- normalizirani indeks ponašanja tla:

$$I_c = [(3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2]^{0.5} \quad (4)$$

Klasifikacijski dijagram je podijeljen u 9 područja koja redom predstavljaju slijedeće tipove ponašanja tla:

- 1 – osjetljivo (meko) sitnozrnato tlo
- 2 – organsko tlo do glina
- 3 – glina do prašinasta glina
- 4 – glinoviti prah do prašinasta glina
- 5 – prašnasti pijesak do pjeskoviti prah
- 6 – čisti pijesak do prašnasti pijesak
- 7 – šljunkoviti pijesak do pijesak
- 8 – vrlo kruti pijesak do glinoviti pijesak
- 9 – vrlo kruto tlo.



Slika 1. Normalizirani SBTn klasifikacijski dijagram (Robertson 2012)

Na dijagramu su također vidljivi „smjerovi“ porasta gustoće, koeficijenta prekonsolidacije (OCR) i cementacije krupnozrnatih tla te osjetljivosti i koeficijenta prekonsolidacije (OCR) sitnozrnatih tla. Indeks ponašanja tla I_c je radijus koncentričnih kružnica koje predstavljaju granice između pojedinih tipova tla. Granica između sitnozrnatog (koherentnog) i krupnozrnatog (nekoherentnog) tla je linija koja predstavlja $I_c = 2,60$ (slika 1).

U literaturi (Lunne i dr. 1997; Robertson 2012; HRN EN-1997-2:2012) postoji mnoštvo korelacija za određivanje geotehničkih parametara tla na temelju rezultata statičkog penetracijskog pokusa, kao i korelacija sa drugim metodama in-situ ispitivanja tla. Budući da bi njihovo objašnjenje izašlo izvan opsega i namjene ovog rada, one se neće navoditi i objašnjavati.

3. TEŠKA UDARNA SONDA (DPH)

Ispitivanje tla teškom udarnom sondom (Dynamic Probing Heavy, DPH) jest dinamički penetracijski pokus kod kojeg se sonda zabija u tlo pomoću utega mase 50 kg koji pada s visine od 50 cm. Sonda ima konusni šiljak sa unutarnjim kutom od 90° te promjer 43,7 mm (površina 15 cm^2). Ispitivanje se provodi u skladu sa zahtjevima danim u normi HRN EN ISO 22476-2:2008 te HRN EN ISO 22476-2:2005/A1:2011. Otpornost na dinamičku penetraciju definira se brojem udaraca potrebnih za penetraciju sonde od 10 cm (N_{10H}).

U krupnozrnatom tlu je otpornost na penetraciju ispod razine podzemne vode manja nego iznad razine podzemne vode uslijed manjeg vertikalnog efektivnog napreznja te je potrebno provesti korekciju prema izrazu:

$$N_{10H} = a_1 \cdot N'_{10H} + a_2 \quad (5)$$

gdje je N_{10H} broj udaraca iznad razine vode, a N'_{10H} broj udaraca ispod razine vode, dok su koeficijenti $a_1 = 1,3$ i

$a_2=2,0$ za slabo graduirani pijesak, a $a_1=1,2$ i $a_2=4,5$ za dobro graduirani pijesak i šljunak (prema normi HRN EN ISO 22476-2:2008).

U sitnozrnatim tlima trenje koje se javlja duž šipki ima veliki utjecaj na otpornost na penetraciju, zbog čega ona raste po dubini. Kako bi se smanjio utjecaj trenja, šipke se zakreću za 1,5 okretaja ili do maksimalnog momenta torzije, nakon penetracije svake pojedine šipke (svakih 1 m dubine) te se mjeri moment torzije (T) potreban za zakretanje šipke.

Rezultati ispitivanja tla teškom udarnom sondom mogu se izraziti i preko dinamičkog otpora prodiranju sonde R_d (Cope 2011) koji se računa prema slijedećem izrazu:

$$R_d = \frac{g}{A} \left[\left(\frac{M^2}{M + M'} \right) \frac{h}{0.1} N_{10} + (M + M') \right] - \frac{T}{Ar} \quad (6)$$

gdje su: M – masa utega, M' – masa sonde i šipki, h – visina s koje pada uteg, N_{10} – broj udaraca potrebnih za penetraciju sonde 10 cm, A – površina poprečnog presjeka sonde, T – moment torzije potreban za zakretanje šipke, r – polumjer šipke. Uzimajući u obzir moment torzije, smanjuje

se utjecaj trenja između sitnozrnatih tla i površine oboda šipki na interpretaciju rezultata.

Teška udarna sonda se prvenstveno koristi u kombinaciji sa istražnim bušenjem za određivanje profila tla, a isto kao i kod ispitivanja statičkom penetracijom postoji niz korelacija za određivanje geotehničkih parametara tla kao i korelacija sa drugim in-situ metodama ispitivanja tla, prvenstveno standardnim penetracijskim pokusom (HRN EN 1997-2:2012).

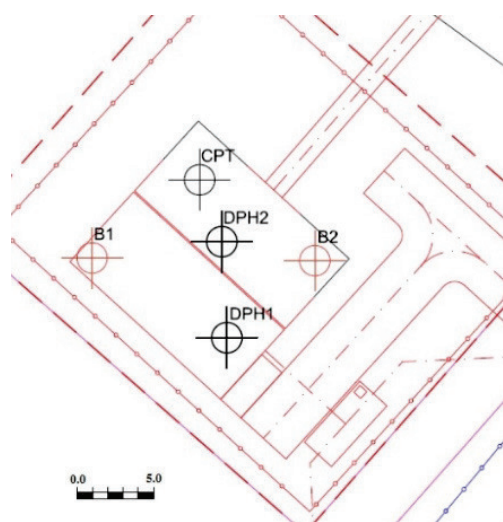
4. ISPITIVANJE TEMELJNOG TLA

4.1. Istražna lokacija

Istražna lokacija se nalazi na mjestu izvedbe građevinske jame za potrebe izgradnje crpne stanice sustava navodnjavanja Vaška-Kapinci u Virovitičko – podravskoj županiji. Crpna stanica će biti smještena s desne strane rijeke Drave (slika 2), u dravskoj potolini koju karakteriziraju sedimentne naslage kvartarne starosti. U sklopu geotehničkih istražnih radova planirano je izvođenje dvije istražne bušotine, dva ispitivanja teškom udarnom sondom te jedno ispitivanje statičkom penetracijom, u točkama čiji je tlocrtni položaj prikazan na slici 3.



Slika 2. Položaj crpne stanice(www.google.hr/maps)



Slika 3. Tlocrtni položaj istražnih točaka

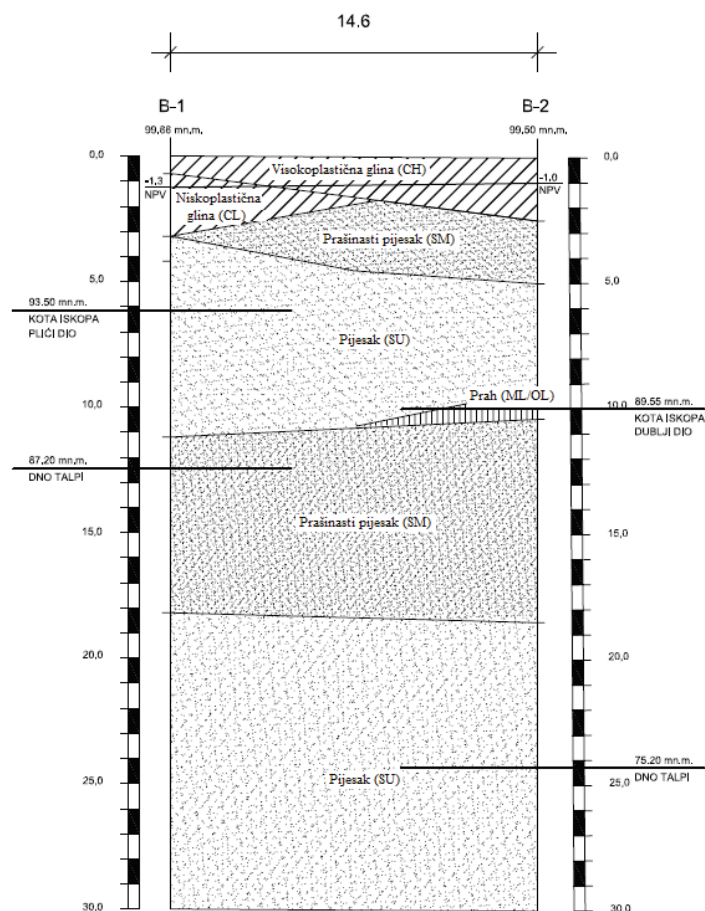
4.2. Istražno bušenje

Istražno bušenje provedeno je u dvije točke (B1 i B2, slika 3) na međusobnoj udaljenosti 14,6 m, jezgrenom cijevi sa ugradnjom zaštitnih kolona.

Obje bušotine izvedene su do dubine 30 m. Tijekom bušenja su izvađeni poremećeni uzorci tla koji su otpremljeni u laboratorij gdje je provedena klasifikacija tla.

Razina podzemne vode je ustanovljena na dubini 1,3 m na prvoj odnosno 1,1 m na drugoj bušotini. Geotehnički profil tla dobiven istražnim bušenjem prikazan je na slici 4. Na slikama 5 i 6 prikazane su izvađene jezgre iz prve odnosno druge bušotine sa 5 – 10 m dubine.

Iz slika je vidljivo kako je nabušeni materijal u najvećoj mjeri jednolično graduirani do prašnasti pijesak.



Slika 4. Geotehnički profil tla



Slika 5. Sondažna jezgra, 1. bušotina, dubina 5-10 m



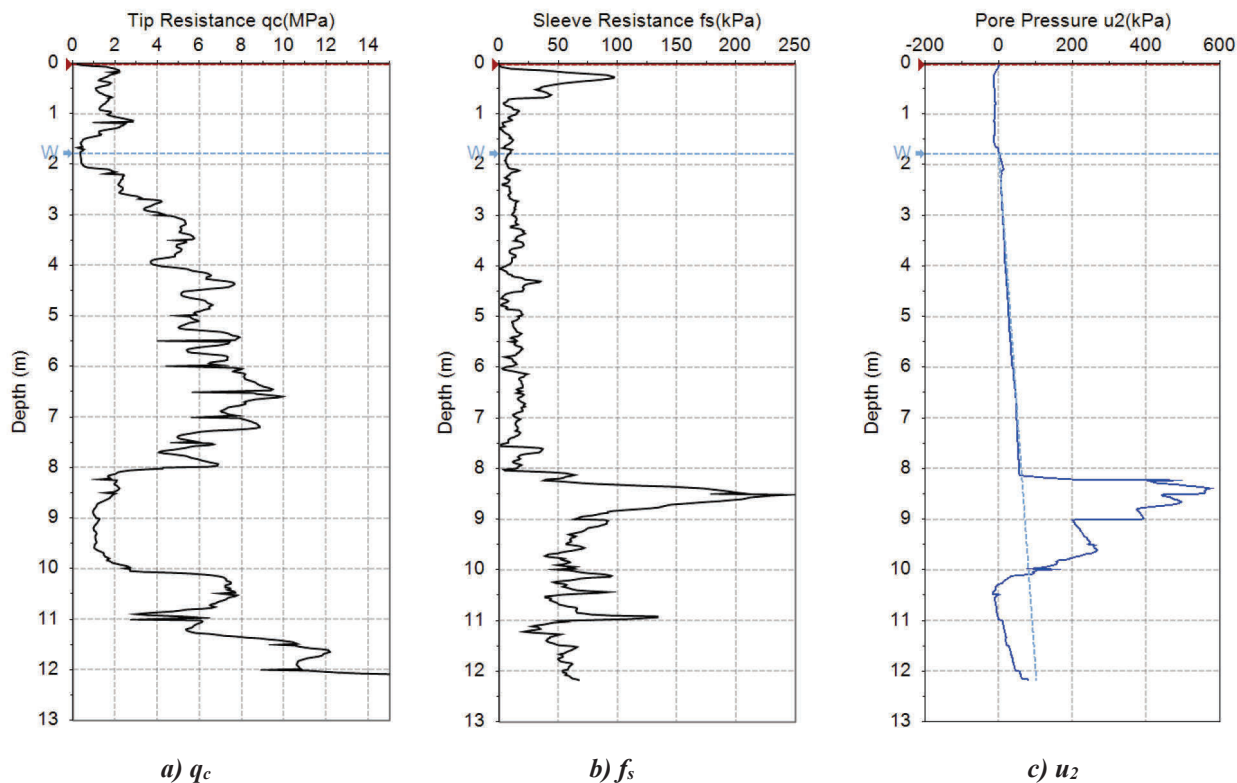
Slika 6. Sondažna jezgra, 2. bušotina, dubina 5-10 m

4.3. Statički penetracijski pokus (CPT)

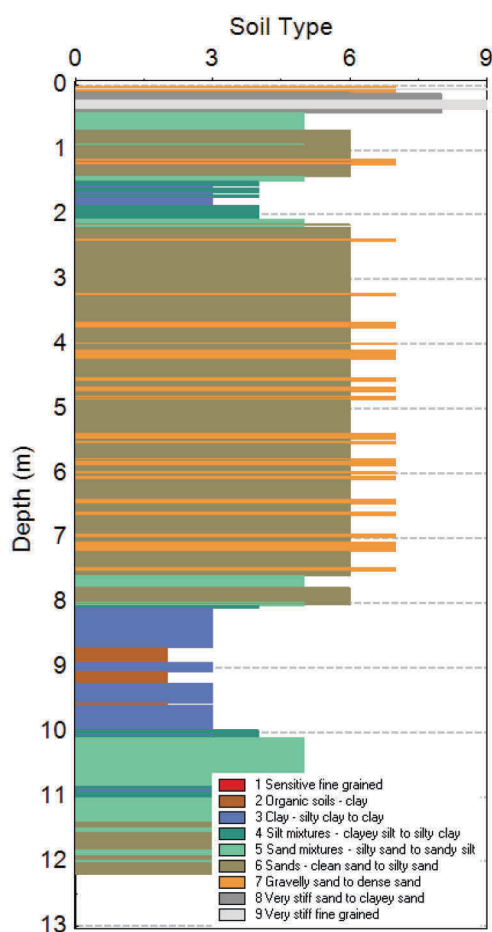
CPT izveden je do dubine 12 m, u točki prikazanoj na slici 3. Razina podzemne vode ustanovljena je na dubini 1,78 m. Rezultati ispitivanja tla obrađeni su u računalnom programu NovoCPT ©2012 (Novo Tech Software Ltd.). Na sl. 7a prikazan je izmjereni otpor na šiljku sonde q_c (MPa), na sl. 7b izmjereno trenje na plaštu f_s (kPa), a na slici 7c izmjereni porni tlak u_2 (kPa). Na sl. 8 prikazan je tip ponašanja tla po dubini, a na sl. 9 normalizirani klasifikacijski dijagram prema Robertsonu (1990).

4.4. Ispitivanje teškom udarnom sondom (DPH)

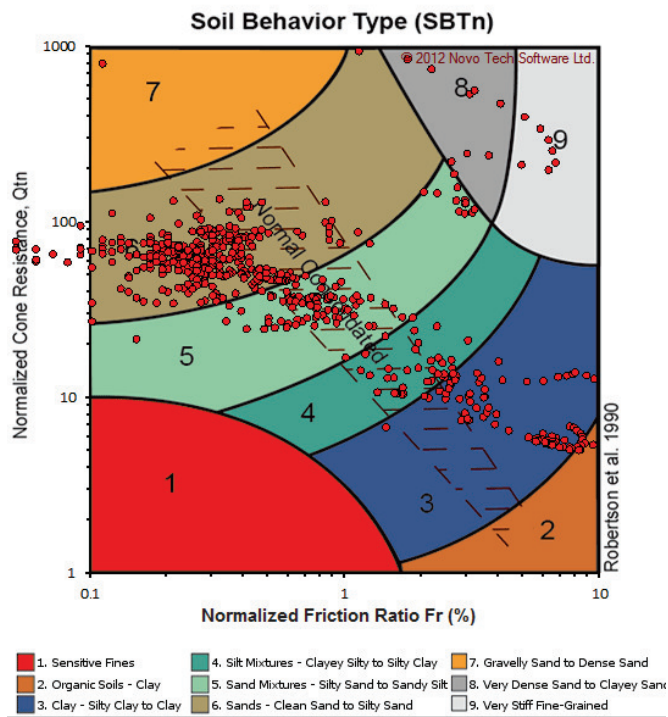
Ispitivanje tla teškom udarnom sondom provedeno je u dvije točke (slika 3) do dubine 14 m. Mjeren je broj udara N_{10H} na svakih 10 cm dubine te moment torzije T na svakih metar dubine. Izmjerene vrijednosti su obrađene i prikazane na slikama 10 i 11. Razina podzemne vode je u obje točke zabilježena na dubini 1,8 m. DPH koristi uteg koji pada s visine od 50 cm.



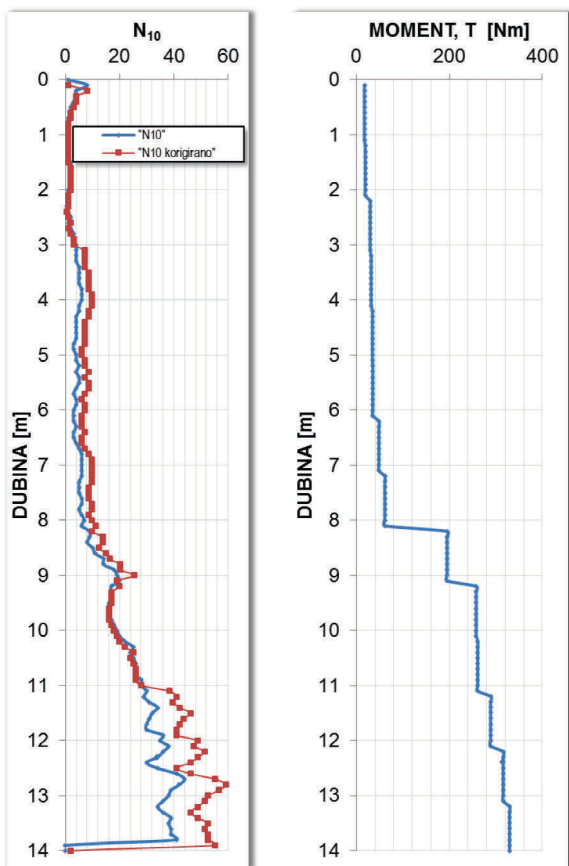
Slika 7. Rezultati CPT pokusa



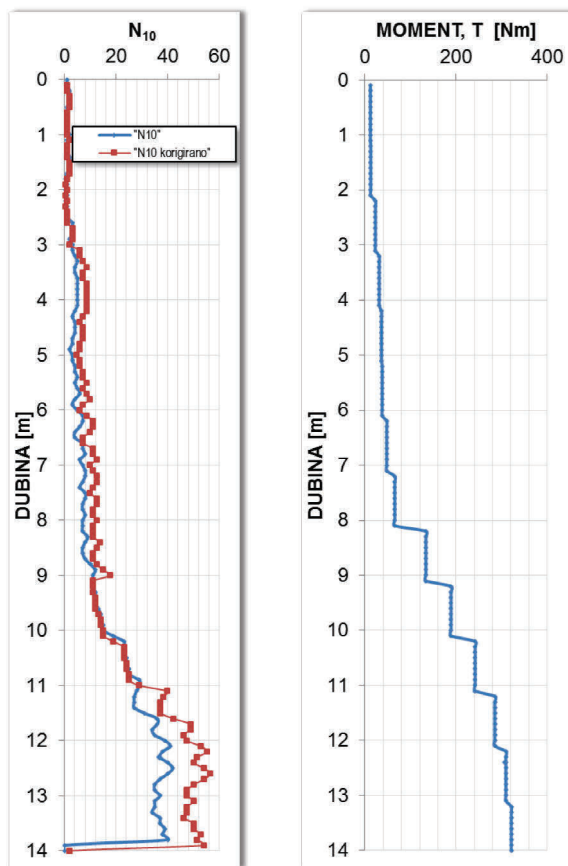
Slika 8. Tip ponašanja tla, SBTn



Slika 9. SBTn klasifikacijski dijagram



Slika 10. N_{10} i moment torzije u točki 1



Slika 11. N_{10} i moment torzije u točki 2

4.5. Diskusija rezultata ispitivanja tla

Usporedbom rezultata ispitivanja tla statičkom penetracijom s rezultatima dobivenim istražnim bušenjem uočava se podudaranje do dubine 8 m te na dubini 10 – 12 m. Vidljiva je prednost CPT ispitivanja kojim se dobivaju rezultati na svakih 2 cm dubine za razliku od istražnog bušenja gdje se uzorkovanje tla provodi u pojedinačnim točkama po dubini.

Određeno odstupanje rezultata CPT ispitivanja i istražnog bušenja uočava se na dubini 8 – 10 m. Na slici 7 vidljivo je značajno smanjenje otpora na šiljku sonde na spomenutoj dubini, kao i povećanje trenja po plaštu sonde i pornog tlaka što ukazuje na prisustvo gline.

Na slikama 8 i 9 vidljivo je da je na dubini 8 – 10 m tlo prema normaliziranom Robertsonovom klasifikacijskom dijagramu klasificirano kao glina do prašinasta glina (područje 3) s proslojcima organskog materijala (područje 2). Istražnim bušenjem na bušotini B1 na spomenutoj dubini nije detektirana glina, što je vidljivo na slici 5 (jezgra sa dubine 5 – 10 m).

Na bušotini B2 je na dubini 10 m detektiran tanki sloj praha s proslojcima organskog materijala, što je vidljivo na slikama 4 i 6.

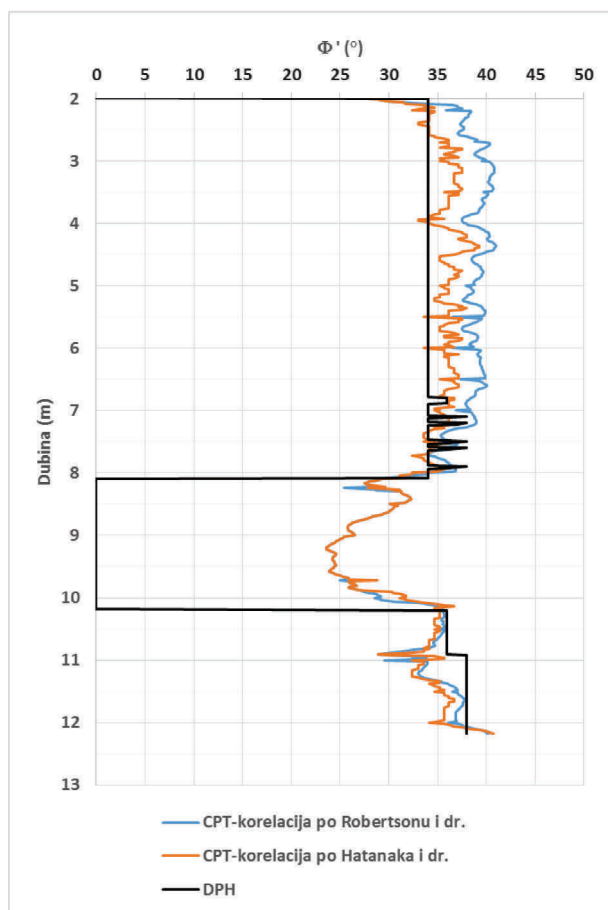
Rezultati DPH ispitivanja također ukazuju na postojanje gline na dubini 8 – 10 m. Na slici 10 je vidljivo značajno povećanje momenta torzije na dubini 8 m te zanemarivo povećanje na dubini 10 m gdje završava sloj gline. Na slici 11 također je vidljivo značajnije povećanje momenta torzije na dubini 8 m.

Razlog zašto glina nije detektirana istražnim bušenjem jest bočno istiskivanje gline izvan jezgrene cijevi zbog čega je u njoj preostao samo uzorak pijeska.

4.6. Usporedba kuta unutarnjeg trenja tla dobivenog CPT i DPH ispitivanjima

Budući da se na mjestu izgradnje crpne stanice planira izvesti građevinska jama, potrebno je odrediti parametre čvrstoće tla. Na slici 12 prikazana je usporedba efektivnog kuta unutarnjeg trenja temeljnog tla (ϕ') dobivenog iz korelacija sa rezultatima CPT i DPH pokusa. Korišteni su rezultati DPH pokusa izvedenog u točki 2 (4 m od CPT pokusa, slika 3).

Efektivni kut unutarnjeg trenja dobiven iz DPH pokusa je izveden iz korelacije sa indeksom zbijenosti (HRN EN 1997-2:2012), dok je iz CPT pokusa radi usporedbe izveden iz korelacija po Robertsonu i dr. (1983) te Hatanaka i dr. (1996) za krupnozrnato tlo i Senneset i dr. (1989) za sitnozrnato tlo.



Slika 12. Usporedba efektivnog kuta unutarnjeg trenja (ϕ') dobivenog iz CPT i DPH pokusa

Iz DPH ispitivanja se ne dobivaju kvalitetni podaci za kut unutarnjeg trenja u sitnozrnatom materijalima zbog čega on nije interpretiran za sloj gline na dubini 8 – 10 m te na slici 12 na spomenutoj dubini poprima vrijednost 0° . Na slici 12 je vidljivo da u sloju pijeska do dubine 8 m korelacijom preko DPH ispitivanja dobivamo manje vrijednosti kuta unutarnjeg trenja u odnosu na korelacije dobivene preko CPT ispitivanja, dok nakon 10 m dubine, gdje završava sloj gline, vrijednosti kuta unutarnjeg trenja dobivenih preko DPH postaju nešto veće. Do povećanja dolazi uslijed povećanja trenja prilikom penetracije između gline i površine oboda šipki, što utječe na interpretaciju rezultata i ukazuje na određeni nedostatak kada se između dva sloja krupnozrnatom materijala nalazi sloj gline.

4.7. CPT – DPH korelacija

Iako postoji veliki broj korelacija između statičkih i dinamičkih penetracijskih pokusa, one se uglavnom odnose na korelacije između statičkog i standardnog (SPT) pokusa. U literaturi (HRN EN 1997-2:2012; Czado & Pietras 2012; Lunne i dr. 1997; Mahler & Szendefy 2009) je pronađen vrlo mali broj CPT-DPH korelacija i one se uglavnom odnose na krupnozrnata tla ili su usko vezane za određene lokacije.

Biedermann (1984) je ustanovio linearnu zavisnost između otpora na šiljku q_c i broja udaraca za razne vrste di-

namičke penetracije (Mahler & Szendefy 2009). Ovi koeficijenti su ovisno o vrsti tla za tešku udarnu sondu prikazani u tablici 1.

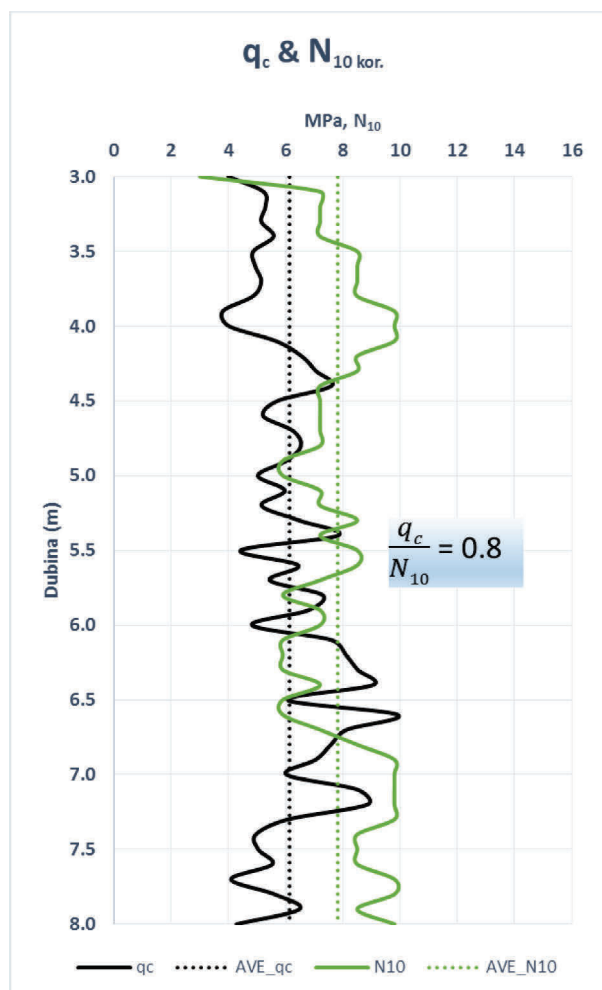
Tablica 1. CPT-DPH korelacija prema Biedermannu (Mahler & Szendefy 2009)

Vrsta tla	q_c/N_{10}
Slabo graduirani pijesak	0.7
Dobro graduirani pijesak	1.0
Šljunkoviti pijesak	1.5
Glina	1.0

Na slici 13 je prikazana CPT-DPH korelacija izvedena sa rezultatima ispitivanja temeljnog tla, za sloj jednoliko graduiranog pijeska ispod razine podzemne vode, od 3 - 8 m dubine (slika 4). Izračunate su srednje vrijednosti otpora na šiljku q_c i broja udaraca $N_{10, kor}$. te je dobiven slijedeći omjer:

$$\frac{q_c}{N_{10, kor}} = 0.8 \quad (7)$$

gdje je q_c – izmjereni otpor na šiljku sonde, a $N_{10, kor}$ korigirana vrijednost broja udaraca potrebnih za penetraciju teške udarne sonde 10 cm. Korekcija je provedena zbog utjecaja podzemne vode prema izrazu 5.



Slika 13. CPT-DPH korelacija

Uočava se podudaranje s korelacijom prema Biedermannu za slabo gradiirani pijesak za kojeg omjer iznosi 0,7.

5. ZAKLJUČAK

Statički penetracijski pokus (CPT) je zbog svojih prednosti i mogućnosti primjene u gotovo svim vrstama tla jedna od najčešće primjenjivanih metoda in-situ ispitivanja tla. U radu su prikazani rezultati ispitivanja temeljnog tla statičkom penetracijom u kombinaciji s ispitivanjem teškom udarnom sondom. Općenito je preporuka da se prilikom ispitivanja tla kombiniraju najmanje dvije metode. Generalno se rezultati ispitivanja podudaraju s rezultatima dobivenim istražnim bušenjem. Određeno odstupanje uočeno je na dubini 8 – 10 m, gdje rezultati CPT i DPH pokusa ukazuju na prisustvo gline, a koja nije detektirana istražnim bušenjem. Razlog tome je bočno istiskivanje gline izvan jezgrene cijevi prilikom bušenja.

Usporedbom kuta unutarnjeg trenja dobivenog iz korelacija sa CPT i DPH ispitivanjem uočeno je da DPH daje manje vrijednosti kuta unutarnjeg trenja u sloju pijeska do 8 m dubine, dok vrijednosti na dubini 10 m gdje završava sloj gline i započinje sloj pijeska postaju nešto veće. Do povećanja kuta unutarnjeg trenja dolazi uslijed povećanja trenja između gline i oboda šipki, što utječe na interpretaciju rezultata.

Izvedena je linearna zavisnost između otpora na šiljku (q_c) statičkog penetracijskog pokusa i korigiranog broja udaraca teške udarne sonde potrebnih za penetraciju 10 cm ($N_{10, kor}$). Dobiven je slijedeći omjer za jednoliko gradiirani pijesak: $q_c/N_{10, kor} = 0,8$. Dobiveni omjer se podudara s korelacijom prema Biedermannu. Detaljnija analiza navedene korelacije prelazi opseg i namjenu rada te stoga ona nije provedena.

6. LITERATURA

Cope M (2011) Dynamic probe theory revisited – effective interpretation of dynamic test results, Formerly of Geotek Services Limited, Auckland, New Zealand

Czado B, Pietras J S (2012), Comparison of the cone penetration resistance obtained in static and dynamic field tests, AGH Journal of Mining and Geoengineering 36 1 97-105

Hatanaka M, Uchida A (1996), Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils, Soils and foundations, 36 4 1-9

HRN EN 1997-2:2012 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje- 2.dio: Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla

HRN EN ISO 22476-2:2008 Geotehničko istraživanje i ispitivanje- Terensko ispitivanje- 2.dio: Dinamička penetracija

HRN EN ISO 22476-2:2005/A1:2011, Geotehničko istraživanje i ispitivanje- Terensko ispitivanje- 2.dio: Dinamička penetracija – Amandman I

Lunne T, Robertson P K, Powell J J M (1997), Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Spon Press, London

Mahler A, Szendefy J (2009), Estimation of CPT resistance based on DPH results, Periodica Polytechnica, 53 2 101-106

NovoCPT User's Manual (2009), Novo Tech Software Ltd., North Vancouver, Canada

Robertson P K (2012), Guide to Cone Penetration Testing, California

Robertson P K, Campanella R G (1983) Interpretation of cone penetration tests, part I: sand, Canadian Geotechnical Journal, 20 4 718-733

Senneset K, Sandven R, Janbu N (1989) Evaluation of soil parameters from piezocone tests: Transportation Research Record no. 1235 24-37