

Temeljenje građevina na poboljšanom tlu

Robert Gotić, Ivan Gotić

Ključne riječi

građevina,
temeljenje,
nenosivo tlo,
poboljšano tlo,
vezana tla,
nevezana tla

Key words

structure,
foundations,
weak soil,
improved soil,
cohesive soil,
cohesionless soil

Mots clés

construction,
fondation,
sol non portant, sol
amélioré,
sols liés,
sols non liés

Schlüsselworte:

Bauwerk,
Gründung,
untragfähiger Boden,
verbessertes Boden,
bindige Böden,
nichtbindige Böden

R. Gotić, I. Gotić

Stručni rad

Temeljenje građevina na poboljšanom tlu

Opisani su postupaci dubinskog vibracijskog zbijanja primijenjeni pri temeljenju građevina na nenosivom tlu. Dane su teorijske osnove, definirane granice primjene te prikazani okviri za interpretaciju geotehničkih parametara nakon izvršenog poboljšanja temeljnog tla. Metode kontrole izvršenog poboljšanja temeljnog tla prikazane su na konkretnom primjeru. Uvodi se, pojam "plitkog temeljenja na poboljšanom tlu" i provodi analiza poboljšanja temeljnog tla za vezana i nevezana tla.

R. Gotić, I. Gotić

Professional paper

Foundations for structures on improved soil

Deep vibration-based compaction procedures, as used in building foundations in cohesionless soil, are described. Theoretical background data are presented, application limits are defined and framework is set for interpretation of geotechnical parameters after improvement of foundation soil. Methods used for checking foundation soil after improvement are presented on a concrete example. The notion of "shallow foundations on improved soil" is introduced and the analysis of foundation soil is performed for cohesive and cohesionless soils.

R. Gotić, I. Gotić

Ouvrage professionnel

Fondations des constructions sur un sol amélioré

L'article décrit les procédés de compactage vibrant en profondeur utilisés pour les fondations des constructions sur un sol non portant. On fournit les bases théoriques, on définit les limites d'application et on présente les cadres de l'interprétation des paramètres géotechniques après les travaux d'amélioration du sol de fondation. Les méthodes de contrôle de l'amélioration du sol de fondation sont présentées sur un exemple concret. On introduit la notion de « fondation peu profonde sur un sol amélioré » et on procède à une analyse de l'amélioration du sol de fondation pour des sols liés et non liés.

R. Gotić, I. Gotić

Fachbericht

Gründung von Bauwerken auf verbessertem Boden

Es werden Verfahren beschrieben für die tiefe Rüttelverdichtung, angewendet bei Gründungen auf untragfähigem Boden. Dargelegt sind theoretische Grundlagen, definiert die Anwendungsgrenzen und die Interpretationsrahmen für die bodentechnischen Parameter nach der ausgeführten Bodenverbesserung dargestellt. Der Begriff "flache Gründung auf verbessertem Boden" wird eingeführt und eine Analyse der Verbesserung von bindigen und nichtbindigen Böden durchgeführt.

Autori: **Robert Gotić**, dipl. ing. građ., Keller Grundbau Wien; prof. dr. sc. **Ivan Gotić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet Varaždin, Hallerova aleja 7

1 Uvod

Neposredni prijenos opterećenja od građevine na temeljno tlo zahtijeva ispunjenje određenih pretpostavki o tlu. Tlo mora zadovoljiti zahtijevanu sigurnost od sloma, a slijeganja građevine moraju biti u dopuštenim granicama za nesmetano funkcioniranje objekta. Ako ti zahtjevi nisu ispunjeni, moraju se svojstva temeljnog tla poboljšati ili opterećenja od građevine odvoditi u dublje, nosive slojeve. Razlikujemo ove načine temeljenja:

- plitko temeljenje
- plitko temeljenje na poboljšanom tlu
- duboko temeljenje

Često je poboljšanje tla uz plitko temeljenje jeftinije rješenje i sve se više primjenjuje u svjetskoj graditeljskoj praksi, a posebno s razvitkom tehnologija koje prate ove metode.

Metodama poboljšanja tla treba postići:

- povećanje nosivosti temeljnog tla
- smanjenje i/ili ubrzanje slijeganja.

1.1 Povećanje nosivosti temeljnog tla

Nosivost tla ovisi o posmičnoj čvrstoći koja se sastoji od unutrašnjeg trenja i kohezije (kod koherentnih tla). Prema Coulombovu zakonu vrijedi jednačba:

$$\tau = \sigma' \tan \varphi' + c' \tag{1}$$

gdje su:

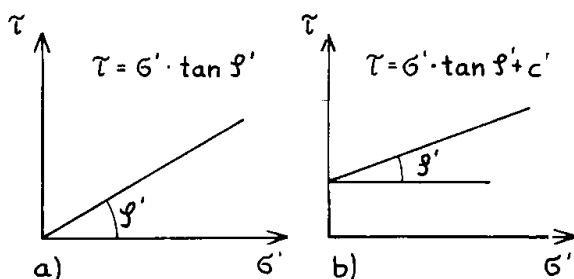
τ - posmična čvrstoća [kN/m²]

σ' - efektivni normalni napon u kliznoj plohi [kN/m²]

φ' - efektivni kut unutrašnjeg trenja [°]

c' - efektivna kohezija [kN/m²]

grafički je to prikazano na slici 1.



Slika 1. Dijagram posmika za nevezana (a) i vezana tla (b)

Orijentacijske vrijednosti za kut unutarnjeg trenja φ' prikazane su u tablici 1., a za φ' , koheziju c' i koheziju u nedreniranom stanju c_u u tablici 2.

Poboljšanjem tla radi povećanja nosivosti postiže se povećanje posmične čvrstoće, i to:

- sprječavanjem klizanja među česticama tla (metodama injektiranja)
- povećanjem zbijenosti tla (metodama površinskog i dubinskog zbijanja)
- dreniranjem tla.

Tablica 1. Orijentacijske vrijednosti koeficijenta unutrašnjeg trenja φ' u ovisnosti o gustoći i obliku zrna za nevezana tla [1]

Vrsta tla	Gustoća	Oblik zrna	Kut unutrašnjeg trenja φ' [°]
Pijesak	rahli	okrugli	30,0
	rahli	šiljasti	32,5
	srednje gusti	okrugli	32,5
	srednje gusti	šiljasti	35,0
	gusti	okrugli	35,0
	gusti	šiljasti	37,5
Šljunak	srednje gusti		37,5

Tablica 2. Orijentacijske vrijednosti koeficijenta unutrašnjeg trenja φ' , kohezije c' i kohezije u nedreniranom stanju c_u u ovisnosti o konzistentnom stanju za vezana tla [1]

Vrsta tla	Stanje konzistencije	Kut unutrašnjeg trenja φ' [°]	Kohezija c' [kN/m ²]	Nedrenirana kohezija c_u [kN/m ²]
Glina	polučvrsto	25	25	50-100
	tvrd	20	20	20-50
	mekan	17	10	10-25
Ilovača	polučvrsto	27,5	10	50-100
	mekano	27,5	-	10-25
Prah		27,5	-	10-50

1.2 Smanjenje i/ili ubrzanje slijeganja

Zbog opterećenja građevine dolazi do elastične i plastične deformacije temeljnog tla. Elastične deformacije nastaju uglavnom promjenom volumena čestica tla, a plastične deformacije nastaju kao posljedica promjene volumena pora u tlu. U nevezanim tlama dolazi do slijeganja odmah po opterećenju, a u vezanim tlama kroz određeno vremensko razdoblje što ovisi u prvom redu o koeficijentu propusnosti k . Vezana zasićena tla mogu se slijegati samo otjecanjem porne vode jer su čestice tla i voda praktično nestlačivi. Stlačivost odnosno stišljivost temeljnog tla opisuje se modulom stišljivosti E_s , koji ovisi uglavnom o naponu u tlu tj. za svaku vrijednost modula stišljivosti mora se definirati pripadno područje naprezanja. Vrijednosti navedene u tablicama 3. i 4. mogu se uzeti samo kao okvirne veličine za pojedine vrste tla.

Tablica 3. Okvirne vrijednosti modula stišljivosti E_s za nevezana tla [1]

Vrsta tla	Gustoća	Oblik zrna	Modul stišljivosti [MN/m ²]
Pijesak	rahli	okrugli	20-50
	rahli	šiljasti	40-80
	srednje gusti	okrugli	50-100
	srednje gusti	šiljasti	80-150
Šljunak	gusti	šiljasti	150-250
	srednje gusti		100-200

Poboljšanje nevezanih i mješovitih tala tj. povećanje modula stišljivosti, a time i smanjenje stišljivosti tla može se postići:

- zbijanjem, čime se smanjuje volumen pora
- ispunjavanjem pora injektiranjem
- smrzavanjem porne vode.

Tablica 4. Okvirne vrijednosti modula stišljivosti E_s za vezana tla [1]

Vrsta tla	Stanje konzistencije	Modul stišljivosti [MN/m ²]
Glina	polučvrsto	5,0-10,0
	tvrd	2,5-5,0
	mekano	1,0-2,5
Ilovača	polučvrsto	5,0-20,0
	mekano	4,0-8,0
Prah		3,0-10,0

Poboljšanje vezanih tala tj. povećanje modula stišljivosti, a time i smanjenje stišljivosti tla može se postići:

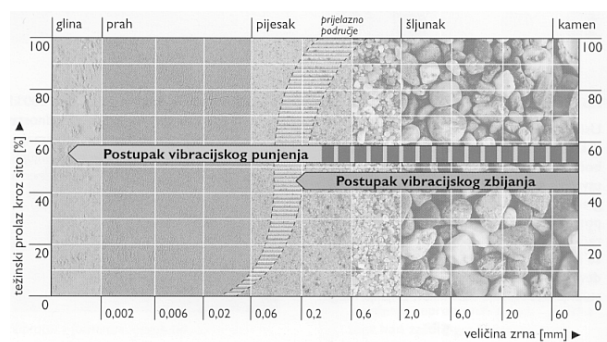
- dreniranjem koje se najčešće prati predopterećenjem
- dovođenjem u više konzistentno stanje npr. iz mekog u tvrdo uz istovremeno smanjenje pora
- izvođenjem kostura od nosivog nekoherentnog materijala koji se sa strane oslanja na okolno nenosivo tlo.

2 Postupci dubinskog vibracijskog zbijanja (PDVZ)

Osnovna karakteristika ovih postupaka je prilagođavanje specifičnim uvjetima temeljnog tla i optimalno iskorištavanje postojećih fizikalno-mehaničkih svojstava tla. Zahvaljujući tome te razvitku pratećih tehnologija ove metode zauzimaju značajno mjesto u niskogradnje [2]. Mitchell naziva uvođenje PDVZ najznačajnijim razvojem struke u posljednjih 50 godina [3].

Bitno je napomenuti da su postupci dubinskog vibracijskog zbijanja znatno jeftiniji od konvencionalnih načina temeljenja. Vrijeme izvođenja je kratko, a postupak izuzetno prilagodljiv terenskim uvjetima. Radovi betoniranja temeljne ploče ili trake mogu uslijediti odmah nakon

završetka poboljšanja tla. Ovim postupcima iskorišteni su postojeći resursi tla te su i zbog ugradnje isključivo prirodnih materijala ekološki vrlo povoljni. Granice primjene PDVZ prikazane su na slici 2.



Slika 2. Granice primjene PDVZ [4]

Pri izvedbi vibrator se spušta do projektom određene dubine i u ovisnosti o vrsti postupka tlo se zbijanje odozdo prema gore ili se izvodi šljunčani stup. Na taj način poboljša se nenosivo tlo i time se opterećenje prenosi unutar granica dopuštenih slijeganja, u dublje nosive slojeve. Nasuprot tome kod konvencionalnog pilotiranja nenosivo tlo se premošćuje nosivim elementima, a svojstva tla ostaju nepromijenjena.

Dubinski vibrator je u obliku cilindra, duljine 3 do 5 m ovisno o tipu te približno 2 tone težak. U donjem dijelu cilindričnog oscilatora, odmah iznad šiljka, nalazi se ekscentrična masa s okretnim pogonom od jakog elektromotora. Na taj način dobije se jaki rotacijski udar velike energije. Dubinski oscilator se produžuje s pomoću cijevi do proizvoljne duljine, a vođenje osigurava posebni uređaj. Tvrtka *Keller* patentirala je dubinski vibrator 1934. g.

Dosad su je postupci dubinskoga vibracijskog zbijanja primjenjivani s uspjehom na gradilištima diljem svijeta za temeljenje najrazličitijih građevina: nasutih brana, cesta, željeznica, stambenih i industrijskih zgrada, mostova, hidrotehničkih i drugih objekata.

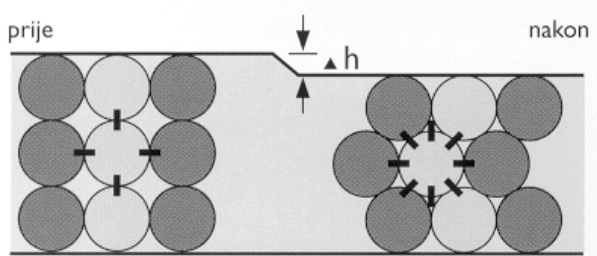
U Hrvatskoj je PDVZ prvi put primijenjen 1997. godine za temeljenje župne crkve *Presvetog srca Isusovog* u Karlovcu. Od tada do danas (2000) izvedeno je još nekoliko projekata primjenom PDVZ i to: TE Plomin 2 (1998.) temeljenje zgrade pročišćivača otpadnih voda; Luka Ploče terminal 5, (1998.) Slavonski Brod (1999.), temeljenje zgrade za preradu pitke vode, Nova Gradiška (1999.); temeljenje silosa i pratećih objekata. Projekt Karlovac biti će kasnije detaljnije opisan.

Principijelno se razlikuju dva tipa PDVZ-a i to:

- PDVZ u nevezanom tlu
- PDVZ s punjenjem odnosno izvođenjem šljunčanih stupova u vezanom i mješovitom tlu

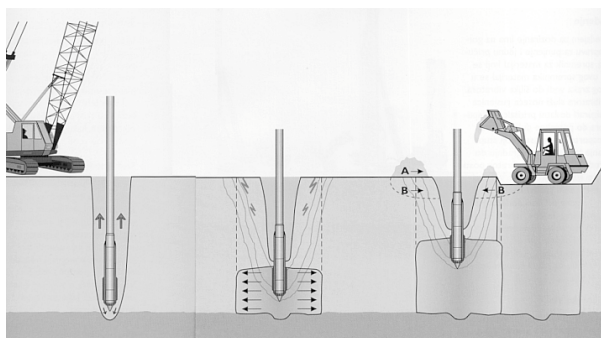
2.1 PDVZ u nevezanom tlu (Vibro-Compaction)

Prirodna ili nasipna nevezana tla gustoće manje od maksimalne mogu se oscilacijama i vibracijama zbiti u gušće pakiranje kao što je prikazano na slici 3.



Slika 3. Zbijenost tla prije i nakon PDVZ [4]

Odvođenje opterećenja u tlo ide preko dodirnih mjesta između zrna tla. Što je broj dodirnih mjesta veći, utoliko je veća i gustoća slaganja zrna, a time i nosivost. Oscilacije vibratora potpomognute tlakom vode svladavaju trenje na dodirnim točkama i zrna padaju u ovisnosti o tlu, tipu vibratora i postupku zbijanja u nove položaje veće gustoće.



Slika 4. Princip izvođenja PDVZ [4]

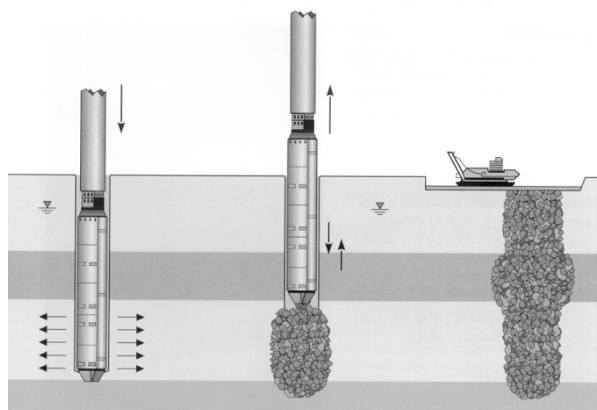
Varijanjem rastera napadnih točaka može se tlo heterogenih karakteristika pretvoriti u temeljno tlo jednolike nosivosti po cijeloj površini. Kao što je već u uvodnom dijelu spomenuto povećanjem gustoće (zbijenosti), a time i kuta unutrašnjeg trenja φ' i modula stižljivosti E_s povećava se nosivost i sigurnost od potresa. Na slici 4. prikazan je princip izvođenja PDVZ.

Ovim postupkom mogu se postići pritisci na temeljno tlo i do 1000 kN/m² kao što je bio slučaj pri temeljenju pilona visećeg mosta preko rijeke Rajne u Düsseldorfu.

Mješovita tla s udjelom sitne frakcije ($d < 0,06$ mm) većim od 20% [5] ne mogu se uglavnom više vibracijama efektivno zbijati te se u takva tla ugrađuje kostur od nosivog nekoherentnog materijala koji se sa strane oslanja na okolno nenasivo tlo. Tada se govori o PDVZ s punjenjem odnosno izvođenjem šljunčanih stupova u vezanom i mješovitom tlu

2.2 PDVZ s punjenjem odn. izvođenjem šljunčanih stupova u vezanom i mješovitom tlu (Vibro-Replacement)

Kohezivna tla, osobito kad su zasićena vodom, ne mogu se samim vibriranjem efektivno zbijati. To je razlog što se u takva tla ugrađuju stupovi od šljunka ili kamena koji odvodi opterećenje do nosivog tla.



Slika 5. Princip izvođenja PDVZ s punjenjem [4]

Zajedno s okolnim tлом, ovakav zrnasti materijal ugrađen pomoću vibratora, ima veću krutost i pruža veći otpor smicanju. Princip izvođenja ovog postupka prikazan je na slici 5., a na slici 6. prikazani su presjeci izvedenih stupova na razini terena.



Slika 6. Šljunčani stupovi nakon izvođenja [4]

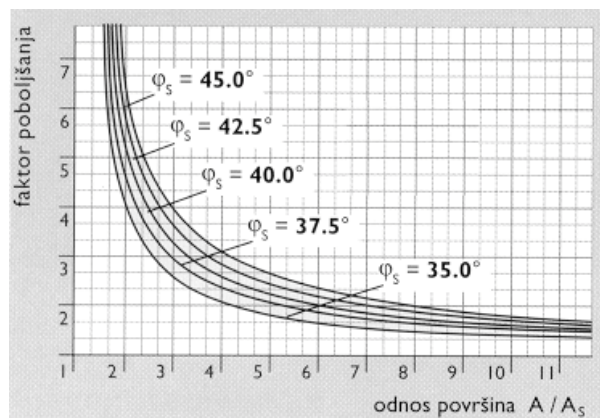
Ovakvo izvedeni nosivi elementi povećavaju nosivost temeljnog tla, smanjuju slijeganja i diferencijalna slijeganja koja su često ograničavajući parametar pri projekti-

ranju temeljenja. Zbog velike vodopropusnosti šljunčanih stupova dolazi do ubrzanja vremena konsolidacije i povećanja posmične čvrstoće temeljnog tla.

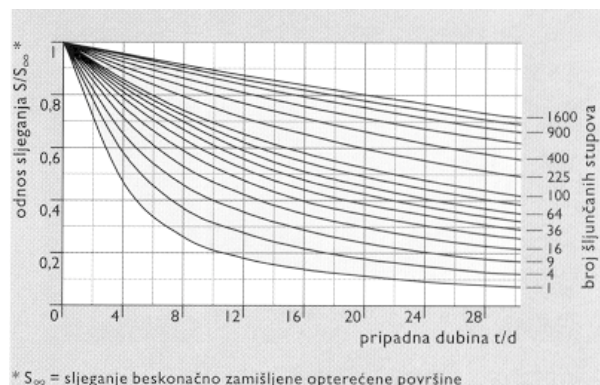
3 Dimenzioniranje i kontrola postupaka dubinskog vibracijskog zbijanja (PDVZ)

Postupak zbijanja odnosno raster napadnih točaka određuje se na osnovi podataka o temeljnom tlu, građevinskih ciljeva, oblika temelja i željenog stupnja poboljšanja tla. Postignuti rezultati zbijanja mogu se jednostavno provjeriti različitim metodama sondiranja kao što su CPT, SPT te teške udarne sonde (TUS). Prva su dva tipa sondiranja ustaljena u geotehničkoj praksi u Hrvatskoj dok su se sondiranja teškom udarnom sondom počela pojavljivati tek posljednjih godina [6]. TUS-om se mjeri broj udaraca utega od 50 kg koji pada s visine od 0,5 m, po 10 cm prodiranja šiljka sonde u tlo. Biedermann [7] daje opsežne korelacije između geotehničkih parametara i rezultata sondiranja te njihove interpretacije. Za procjenu nedrenirane posmične čvrstoće vezanih tla vrlo su korisni pokusi krilnom sondom i dilatometrom.

Prvi dijagram za dimenzioniranje PDVZ kod vezanih tla predstavio je Greenwood 1970. godine [9]. Faktor poboljšanja



Slika 7. Dijagram za dimenzioniranje



Slika 8. Dijagram određivanja slijeganja šljunčanih stupova za pojedinačne temelje

šanja η prikazan je u ovisnosti o razmaku šljunčanih stupova i nedrenirane posmične čvrstoće tla. Šljunčani stupovi se najčešće dimenzioniraju prema Priebeu [10]. Na slici 7. prikazan je dijagram za dimenzioniranje šljunčanih stupova, a na slici 8. dijagram određivanja slijeganja za pojedinačne temelje.

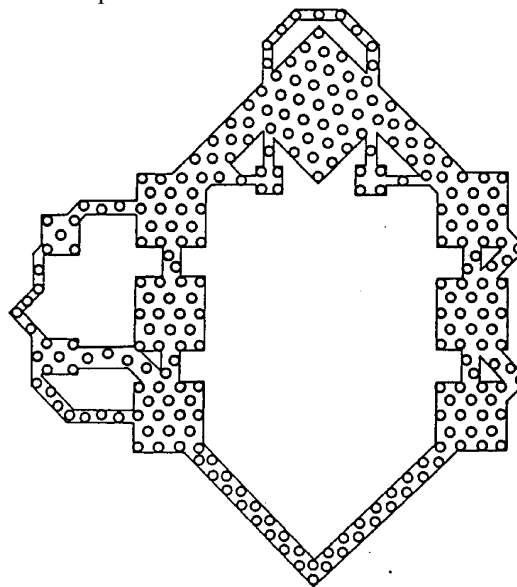
Dijagrami za dimenzioniranje prema Priebeu daju rezultate koji se poklapaju prilično dobro s rezultatima proračuna prema metodi konačnih elemenata [11, 12].

4 Primjena postupaka dubinskog vibracijskog zbijanja u Hrvatskoj

Na primjeru će se prikazati primjena PDVZ te kontrola izvršenih radova u nevezanom tj. mješovitom tlu.

4.1 Temeljenje župne crkve «Presvetog srca Isusova» u Karlovcu

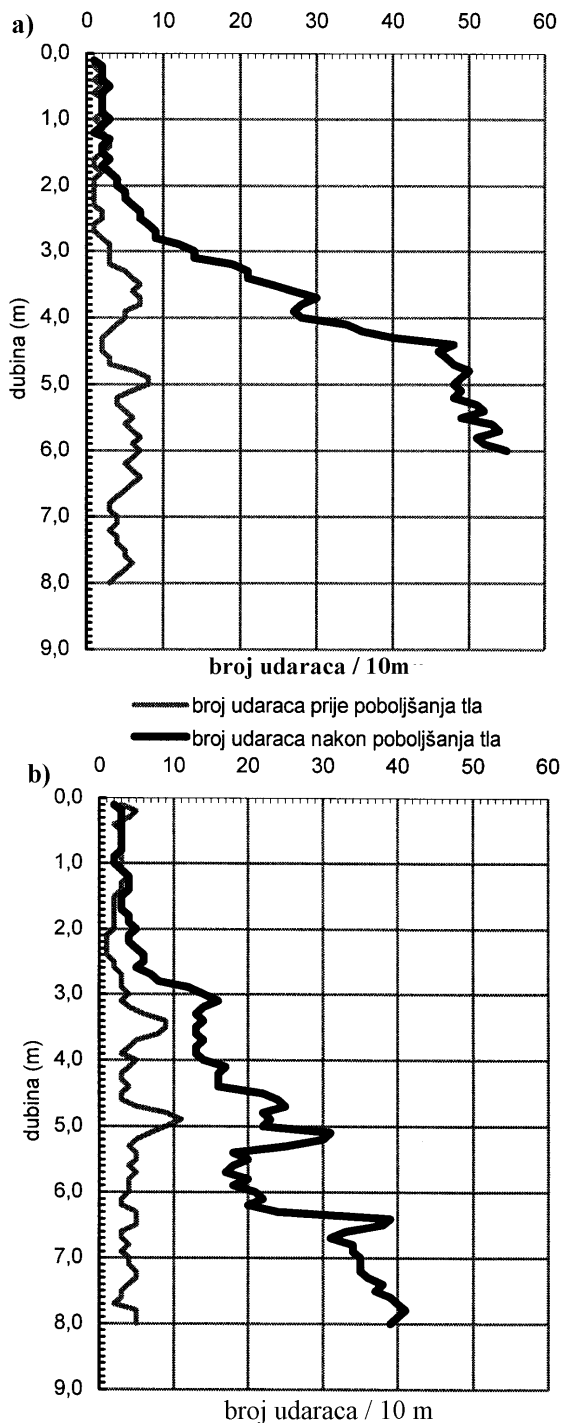
Prema postojećoj dokumentaciji tlo nije pogodno za preuzimanje zadanih opterećenja. Temeljno tlo sastoji se u gornjoj zoni do dubine od 3,0 m od pjeskovitog, glinovitog praha žitke do tvrde konzistencije. Ispod ovoga geotehničkog horizonta nalazi se pijesak, prašinstvo te šljunak, pjeskovit, prašinstvo rahle do srednje guste zbijenosti. Pokusi teškom udarnom sondom (TUS) pokazali su broj udaraca od 0 do 8, a ispitivanja SPT-om između 3 do 7 udaraca. Predloženo je temeljenje na armiranobetonskim pilotima.



Slika 9. Tlocrtna skica temelja s rasterom napadnih točaka poboljšanja tla

Tvrtka *Geotechnik* d.o.o. izradila je u suradnji s tvrtkom *Keller* iz Beča projekt izvođenja poboljšanja temeljnog tla PDVZ. Na slici 9. prikazana je tlocrtna skica temelja te

raster napadnih točaka poboljšanja tla s dimenzijama 1,4 m x 1,1 m i prosječnom dubinom od 8,5 m. Ovaj način temeljenja bio je 30% jeftiniji od prvobitno predloženog rješenja. Radovi su na veliko zadovoljstvo investitora završeni za 17 dana, a odmah nakon završetka moglo se započeti s izvođenjem temelja.



Slika 10. Rezultati dinamičkog sondiranja TUS-om na dvjema lokacijama prije i nakon poboljšanja tla, a) u sredini temelje samce, b) ispod temeljne trake

Osim interne *Kellerove* kontrole (kompjutersko praćenje i ispis svih relevantnih parametara pri izvođenju PDVZ) Geotehničkog fakulteta iz Varaždina obavila je kontrolu kvalitete izvršenih radova i to:

- dinamičkim sondiranjem TUS-om prije i poslije poboljšanja temeljnog tla
- seizmičkim metodama.

Rezultati dinamičkog sondiranja TUS-om prikazani su dijagramima na slici 10. Efekt zbijanja vidljiv je odmah nakon završetka PDVZ-a na temelju relativno velikog udjela nekoherentnih čestica u sastavu temeljnog tla.

Iz dijagrama a) i b) vidi se da je prazni hod vibratora iznosio je 1,5 m (spuštanje vibratora bez vibracija) dok se od dubine 2 m može pratiti sukcesivan porast broja udaraca TUS-e nakon izvršenog poboljšanja, a time i porast modula stišljivosti E_s te koeficijenta unutrašnjeg trenja ϕ' prema tablici 5. Dubina temeljenja objekta iznosila je 1,5m.

Kontrola poboljšanja temeljnog tla provedena je i s pomoću *plitke refrakcijske seizmike mjerenjem brzina primarnih i sekundarnih valova* prije i nakon poboljšanja. Izmjerena brzina P vala prije PDVZ-a na dubini 2,5 m iznosila je približno 1500 m/s što pokazuje malu relativnu zbijenost koja se potvrdila rezultatima dinamičkog sondiranja, i to TUS i SPT. Vrijednost SPT do dubine 6 m nije prelazila 5 N (broj udaraca za prodor šiljka/noža za 30 cm). Brzina S vala prije PDVZ-a iznosila je oko 200 m/s.

Nakon PDVZ-a brzina P vala povećala se na 2300 m/s, a brzina S vala na 800 m/s. Uzrok povećanja brzina P i S vala jest u povećanju relativne zbijenosti temeljnog tla, što se vidi u rezultatima dinamičkog sondiranja, i to TUS-om i SPT-om kojem su se vrijednosti N nakon PDVZ kretale od 25 do 35 na dubini od 2,5 do 6,0 m. Seizmička mjerenja izvršena su aparaturom švedske tvrtke ABEM.

Osim brzine P i S valova mjerene su *brzine oscilacija čestica tla* koje nastaju zbog dinamičkog utjecaja PDVZ-a. Ova su potresanja vrlo slaba u odnosu prema potresanjima izazvanim silama potresa, ali zbog trajnosti djelovanja izazivaju deformacije i utječu na ponašanje tla.

Mjerenje je izvedeno s četiri trokomponentna geofona koji su bili na 5, 10, 15 i 20 m od izvora pobude. Iz dobivenih snimaka računa se rezultatna brzina oscilacija u trenutku najvećeg poremećaja prema jednadžbi:

$$v_R = \sqrt{v_u^2 + v_p^2 + v_v^2} \tag{2}$$

gdje su:

v_u, v_p, v_v - komponente brzina oscilacije.

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Rezultati mjerenja trokomponentnim geofonima

Broj mjerenja	Udaljenost od izvora pobude [m]	Komponente brzine [cm/s]			Rezultanta brzina [cm/s]	Rezultantno ubrzanje [cm/s]	Posmična deformacija [$\times 10^{-5}$]
		vertikalna	uzdužna	poprečna	v_R	a_R	γ'
1	5	0,197	0,481	0,350	0,63	19,7	313
2	10	0,131	0,208	0,252	0,35	11,5	176
3	15	0,126	0,104	0,134	0,21	6,62	105
4	20	0,052	0,049	0,071	0,10	3,16	5

Na temelju provedenih kontrolnih istražnih radova može se zaključiti:

- Mjerodavni čimbenici tla, tj. modul stišljivosti, kohezija i kut unutrašnjeg trenja u funkciji su relativne gustoće odnosno zbijenosti tla.
- Kod većeg broja mjerenja primijećeno je da su pri većim dubinama zbijanja amplitude oscilacija čestice tla veće, a samim tim i rezultantno ubrzanje oscilacija i posmična deformacija.
- Oscilacije izazvane vibratorom imaju približno istu frekvenciju.
- Što je frekvencija oscilacija tla viša, veće je slabljenje s udaljenošću. Razlog tome je karakteristika prigušivanja tla koja je ovisna o frekvenciji cikličkog opterećenja.
- Rezultantna brzina oscilacije čestica tla brzo pada s udaljenošću.

5 Zaključak

Opisan je postupak dubinskog vibracijskog zbijanja (PDVZ), dane su teorijske osnove za njegovu primjenu, definirane granice primjene te prikazani okviri za interpretaciju geotehničkih parametara nakon izvršenog poboljšanja temeljnog tla. Osim klasične podjele na plitko i duboko temeljenje uvodi se pojam *plitkog temeljenja na poboljšanom tlu* i provodi analizu poboljšanja vezanih i nevezanih temeljnih tala.

LITERATURA

- [1] Schnell, W., Vahland, R.: *Verfahrenstechnik der Baugrundverbesserungen*, B.G. Teubner Stuttgart, pp 370., 1997.
- [2] Gotić, I.: *Uvod u Geotehniku*, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet Varaždin, pp 96., 1995.
- [3] Mitchell, J. K.: *Soil Improvement - State of the Art Report*, Stockholm XI ICSMFE, pp 509.-565., 1981.
- [4] Tvrtka Keller Grundbau: *Tehnike temeljenja – Poboljšanje tla postupkom dubinskog vibriranja*, Geotechnik d.o.o. Varaždin, pp 12., 1999.
- [5] Gotić, R., Schwab, E., Zinsenhofer, M.: *Wirtschaftliche Fundierung durch Bodenverbesserung*, Porec - XI Donau - Europäische Konferenz, pp 892.-897., 1998.
- [6] Gotić, R.: *Izješće o izvođenju poboljšanja tla u svrhu temeljenja župne crkve u Karlovcu*, Geotechnik d.o.o. Varaždin, pp 28., 1997.
- [7] Biedermann, B.: *Dynamische und statische Sonden und ihre praktische Bedeutung in der Bodenmechanik*, Symposium - Sondierungen und *in situ* Messungen, OFPZ Arsenal, pp 5.-85., 1979.
- [8] Greenwood, D.A.: *Mechanical Improvement of Soils Below Ground Surface*, London - Proc. Ground Engng. Conf Inst. of Civ. Engineers, pp 11.-22., 1970.
- [9] Priebe, H.: *Die Bemessung von Rüttelstopfverdichtung Mechanical*, Bautechnik 3, pp 183.-191., 1995.
- [10] Balaam, N.P., Poulos, H.G.: *Settlement Analysis of Soft Clays Reinforced with Granular Piles*, The University of Sidney, School of Engineers, 1977.
- [11] Kirsch, K.: *Erfahrungen mit der Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttler*, Geotechnik 1/79, pp 21.-32., 1979.