

Primljen / Received: 4.2.2025.

Ispravljen / Corrected: 3.6.2025.

Prihvaćen / Accepted: 25.6.2025.

Dostupno online / Available online: 10.7.2025.

Iskustva u primjeni zabijenih AB pilota u Hrvatskoj

Autori:



Dr.sc. **Igor Sokolić**, dipl.ing.građ.
Geotehnički studio d.o.o., Hrvatska
igor.sokolic@geotehnicki-studio.hr
Autor za korespondenciju



Boris Kereš, mag.ing.aedif.
Monterra d.o.o., Hrvatska
boris.keres@monterra.hr

Pregledni rad

Igor Sokolić, Boris Kereš

Iskustva u primjeni zabijenih AB pilota u Hrvatskoj

Na hrvatskom tržištu sve češće primjenjuje se tehnologija zabijenih, predgotovljenih armiranobetonskih pilota. Prednost je ove tehnologije razmicanje tla prilikom ugradnje, što doprinosi nosivosti pilota. Proces proizvodnje osigurava pouzdanu kvalitetu materijala i integritet pilota. Moguća je vrlo pouzdana procjena nosivosti pilota na temelju suvremenih metoda proračuna i standardnih istražnih radova, koji uključuju kvalitetna laboratorijska i terenska ispitivanja. Metoda dinamičkog ispitivanja omogućava relativno brzu i povoljnu provjeru nosivosti izvedenih pilota. U radu su prikazana iskustva u primjeni ove tehnologije u Hrvatskoj, uključujući detalje o geotehničkom profilu tla, tehnologiji zabijanja, kontroli kvalitete i postignutoj nosivosti pilota u karakterističnim uvjetima u tlu.

Ključne riječi:

zabijeni piloti, ispitivanje tla, dinamičko ispitivanje nosivosti pilota

Subject review

Igor Sokolić, Boris Kereš

Experience in execution of driven reinforced concrete piles in Croatia

The technology of driven, precast reinforced concrete piles is increasingly being used on the domestic market. The advantage of this technology lies in soil displacement during installation, which enhances the pile's bearing capacity. The production process ensures reliable material quality and pile integrity. The bearing capacity of piles can be quite accurately assessed using modern calculation methods and standard soil investigation procedures, including high quality laboratory and field testing. Dynamic testing methods enable a relatively quick and cost-effective verification of the bearing capacity of installed piles. The paper presents experiences with the application of this technology in Croatia, including details on soil geotechnical profiles, driving technology, quality control, and achieved pile load-bearing capacities under specific soil conditions.

Key words:

driven piles, soil investigation, dynamic pile testing

1. Uvod

U posljednje vrijeme na hrvatskom tržištu sve se više primjenjuje tehnologija zabijenih, predgotovljenih armiranobetonskih pilota. Zabijeni piloti vrsta su pilota za koju je karakteristično da se prilikom izvedbe tlo razmiče prilikom zabijanja (nema iskopa materijala bušenjem), što osigurava povećanje bočnih pritisaka te povećanu nosivost trenjem preko plašta u odnosu na bušene pilote [1]. Dodatno, u usporedbi s tehnologijama bušenja, osiguran je pouzdan integritet konačnog konstruktivnog elementa. Primjenjuju se predgotovljeni armiranobetonski elementi, koji se proizvode u kontroliranim uvjetima u proizvodnim pogonima te gotovi dostavljaju na lokaciju ugradnje. Velika prednost tehnologije zabijenih pilota jest i kontrola kvalitete ugradnje. Naime, prilikom zabijanja svakog pilota prati se protokol zabijanja – potreban broj udaraca utega poznate mase, koji pada s poznate visine da se ostvari određeni prodor pilota. Na temelju registriranih broja udaraca može se posredno procijeniti nosivost svakog ugrađenog pilota. Nosivost pilota moguće je relativno povoljno izmjeriti dinamičkim ispitivanjem. Postupak se provodi na različitim dubinama tijekom zabijanja pilota, neposredno po završetku zabijanja te nakon relaksacije okolnog tla i disipacije porinih pritisaka kada pilot postiže svoju konačnu nosivost. Uz navedene prednosti tehnologije zabijenih pilota, potrebno je istaknuti i njene nedostatke u odnosu na bušene pilote, koji se odnose prvenstveno na mogućnost ugradnje i prilagodbe stvarnom stanju u tlu: potencijalni rizik zabijanja do projektirane dubine ako su materijali na lokaciji čvršći od predviđenog te tehnološki zahtjevnije produljenje pilota na licu mjesta ako se pokaže potrebnim tijekom izvedbe. U radu su prikazana iskustva u primjeni zabijenih AB pilota na nekoliko primjera u Hrvatskoj: sportska dvorana Zeleni brijeg u Sisku (DVORANA), uređaj za pročišćavanja otpadnih voda Đakovo (UPOV), pretovarna stanica u Karlovcu (PRETOVARNA) i supermarket Plodine u Lepoglavi (PLODINE). Za svaku lokaciju dan je cjelovit pregled geotehničkog profila tla, karakteristični protokoli zabijanja te izmjerene nosivosti pilota (ukupno 24 dinamička ispitivanja pilota). Provedena je analiza protokola zabijanja te je dana usporedba proračunate nosivosti i nosivosti izmjerene dinamičkim ispitivanjem. Nosivost pilota procijenjena je primjenom suvremenih metoda proračuna: primarno primjenom CPTU ispitivanja i preporuka prema Bustamante & Ganeselli [2] (postupak detaljno opisan u Lune i dr. [3]) te na temelju ostalih in-situ i laboratorijskih ispitivanja (SPT, DPH, jednoosna čvrstoća) primjenom alfa-beta metode prema API [4]. Treba napomenuti da Eurokod 7 predviđa tri postupka određivanja nosivosti pilota: statičko ispitivanje, dinamičko ispitivanje te procjena na temelju istraživanja tla. Od navedenih postupaka, statičko ispitivanje

osigurava direktno mjerenje veličine (maksimalan otpor prodiranju uslijed vertikalnog utiskivanja) te je metoda kao takva najpouzdanija. Norma Eurokod 7 preporuča da se dinamičko ispitivanje upotrebljava za procjenu tlačne nosivosti pilota uz uvjet da je prethodno provedeno prikladno istraživanje lokacije i umjeravanje metode s pomoću statičkog pokusnog opterećenja iste vrste pilota, slične duljine i presjeka i u usporedivim uvjetima u temeljnome tlu. Unatoč tomu što statička ispitivanja nisu bila dostupna na projektima analiziranim u ovom radu, prikazani su i analizirani rezultati dinamičkih ispitivanja kao vrijedan podatak za ocjenu nosivosti pilota. Imajući u vidu široku primjenu zabijenih pilota u Svijetu i veliko iskustvo u primjeni dinamičkih testiranja pilota za procjenu nosivosti pilota u sličnim uvjetima kakvi su prisutni na lokacijama analiziranim u ovom radu, navedeni pristup se smatra prihvatljivim, a rezultati dinamičkih ispitivanja pouzdanim.

2. Tehnologija izvedbe zabijenih AB pilota

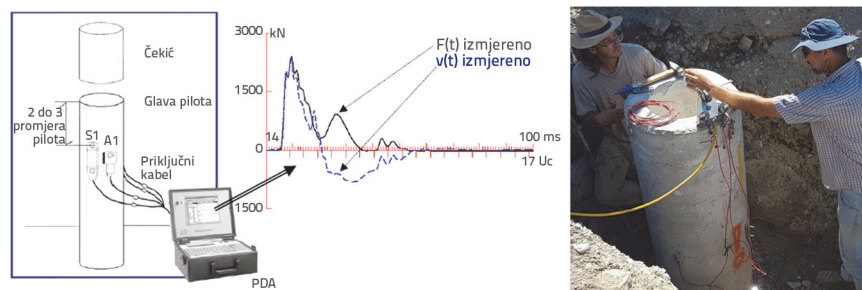
Postupak izvedbe zabijenih AB pilota provodi se u skladu sa zahtjevima norme HRN EN 12699:2015 [5]. Predgotovljeni piloti dostavljaju se na gradilište. S pomoću strojeva za zabijanje piloti se podižu u vertikalni položaj i pozicioniraju na mjesto ugradnje. Slijedi zabijanje pilota s pomoću dizel čekića ili hidrauličkog čekića. Prilikom zabijanja kontrolira se vertikalnost pilota u dvama okomitim smjerovima. S obzirom na uvjete u tlu prilagođava se postupak zabijanja postupnim povećanjem visine s koje pada uteg za zabijanje. Kod hidrauličkog čekića visina pada utega može se manualno kontrolirati, dok je kod dizel čekića ona rezultat otpora tla pri svakom udaru hidrauličkog klipa. Zabijanje se provodi do konačne dubine, pri čemu se geodetski kontrolira konačna visina glave pilota. Prilikom ugradnje pilota bilježi se protokol zabijanja, koji sadrži podatke po dubini o potrebnom broju udaraca čekića za određeni prodor pilota (u radu korišten broj udaraca N_{25} za prodor pilota od 25 cm). Nakon ugradnje pilota po potrebi pristupa se uređenju glave pilota odbijanjem viška betona ili drobljenjem hidrauličkim kliještima. Postupak izvedbe zabijenih AB pilota prikazan je shematski na slici 1. Zabijanje svih pilota analiziranih u ovom radu provela je tvrtka Monterra d. o. o. [6] uz primjenu dizel čekića tipa DELMAG 25-32



Slika 1. Tehnologija izvedbe zabijenih pilota (podizanje, pozicioniranje, zabijanje, uređenje glave pilota kliještima)



Slika 2. Prefabricirani AB piloti (izvedba, vrh pilota – čelični šiljak, glava pilota)



Slika 3. Dinamičko ispitivanje nosivosti pilota: shematski prikaz PDA postupka te fotografija ugradnje senzora

[7], težine utega 2,5 tona (primijenjeno u projektu DVORANA) te hidrauličkog čekiča tipa JUNTAN HHK5 A [8], težine utega 5,0 tona (primijenjeno na projektima UPOV, PRETOVARNA i PLODINE). Predgotovljeni AB piloti proizvedeni su u tvornici betonskih stupova TBS d.o.o. [9]. Piloti su promjera 50 i 60 cm, od betona čvrstoće C40/50, armirani čelikom kvalitete B500B. Proizvedeni su postupkom centrifuge, koji osigurava idealnu geometriju, homogenost i integritet svakog pilota. U postupku proizvodnje na vrhu pilota ugrađuje se čelični šiljak, a po potrebi i čelična spojnica za nastavljivanje pilota duljih od 13 m. Sam je pilot šupljeg poprečnog presjeka s debljinom stijenke 10 do 12 cm (slika 2.).

Nosivost zabijenih pilota može se ispitati statičkim i/ili dinamičkim testiranjem na terenu. S obzirom na brzinu provedbe i mogućnost relativno povoljnog testiranja većeg broja pilota, u praksi se često primjenjuje dinamičko ispitivanje primjenom PDA postupka [10] (engl. *Pile Driving Analyzer*), u skladu s normom ASTM D4945-17 [11]. Postupak podrazumijeva ugradnju mjerne opreme na glavi pilota koja se sastoji od akceleraometra (engl. *accelerometer*) za mjerenje ubrzanja pilota te mjerača relativne uzdužne deformacije (engl. *strain-gauge*). Po dva senzora svakog tipa postavljaju se u paru na udaljenosti 2 do 3 promjera ispod glave pilota. Senzori se spajaju na PDA prijemnik u kojem se provodi prikupljanje i obrada signala te prikaz izlaznih rezultata mjerenja usporedno sa zabijanjem pilota. Za svaki udarac računa se sila udara $F(t)$ _{izmjereno} te brzina prodiranja pilota $v(t)$ _{izmjereno} kao funkcija u vremenu. PDA postupak shematski je prikazan na slici 3. Izmjereni podaci analiziraju se u računalnom programu CAPWAP [12], koji se temelji na teoriji propagacije udarnog vala kroz pilot pridržan serijom elastoplastičnih opruga po plaštu te na bazi pilota. Model tla i pilota pobuđuje se u programu izmjerenim zapisom pomaka glave pilota $v(t)$ _{izmjereno}. Rezultat proračuna je reakcija pilota u vidu realizirane sile na vrhu pilota $F(t)$ _{modelirano}. Povratnom analizom potrebno je kalibrirati

parametre modela kako bi se postiglo maksimalno preklapanje izmjerene $F(t)$ _{izmjereno} i proračunate vrijednosti $F(t)$ _{modelirano}. Na temelju kalibriranih podataka modela moguće je procijeniti maksimalnu aktiviranu nosivost plašta i baze pilota. Također, moguće je modelirati statičko opterećenje pilota te prognozirati radni dijagram nosivosti pilota. Postupak se provodi tijekom izvedbe pilota na odabranim dubinama te na konačnoj dubini zabijanja. Dodatna ispitivanja na konačnoj dubini izvode se u vremenskom odmaku (u pravilu nakon 6 dana i 24 dana) kako bi se procijenilo povećanje nosivosti pilota uslijed konsolidacije tla. Dinamička ispitivanja nosivosti svih pilota prikazanih u ovom radu provela je neovisna tvrtka za ispitivanje Geotest d.o.o. [13], prema akreditiranoj metodi ispitivanja u skladu sa zahtjevima norme ISO 17025:2017.

3. Projekti sa zabijenim AB pilotima

3.1. Sportska dvorana Zeleni brijeg, Sisak (DVORANA)

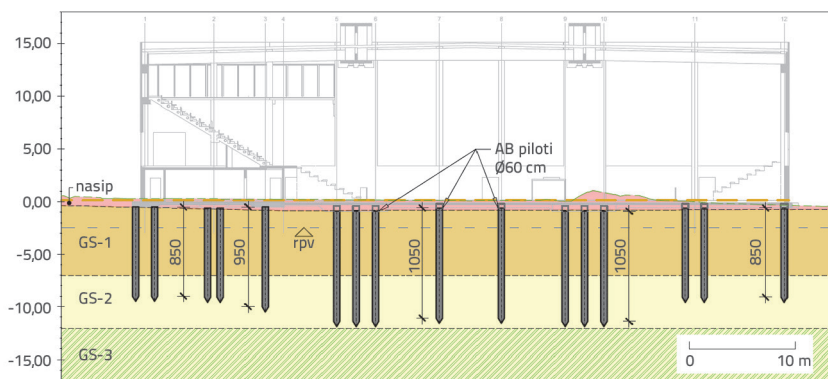
Dvorana Zeleni brijeg u Sisku je tlocrtnih dimenzija oko 60 x 70 m. Izvedena je kao armiranobetonska konstrukcija, kombinacija monolitnih i montažnih elemenata (slika 4.).



Slika 4. Dvorana Zeleni brijeg u Sisku tijekom izgradnje

Glavni krovni nosač raspona 45 m oslanja se na AB jezgre visine oko 13 m. Temeljenje objekta izvedeno je na temeljnim trakama po obodu građevine te na AB ploči ispod jezgre i tribina ispod kojih su ugrađeni AB zabijeni piloti. Piloti su promjera 60 cm, duljine 8,5 do 10,5 m, ugrađeni u nosivi sloj pijeska (slika 5.).

U okviru geotehničkih istražnih radova provedeno je 6 istražnih bušotina, 4 sonde dinamičkom penetracijom (DPH) i 3 sonde statičkom penetracijom uz mjerenje pornog tlaka (CPTU). Tijekom istražnog bušenja provedeno je ispitivanje standardnim penetracijskim testom (SPT)



Slika 5. Karakteristični poprečni presjek dvorane i profil tla

te su provedena laboratorijska ispitivanja za određivanje mehaničkih i fizičkih karakteristika tla (klasifikacija tla, Atterbergove granice plastičnosti, granulometrijski sastav, direktni posmik, edometar). Geotehnički profil tla sastoji se od četiriju karakterističnih geotehničkih sredina (slika 6.): N – nasip od pijeska i šljunka (do dubine oko 2,0 m); GS1 – niskoplastična glina srednje do teško gnječive konzistencije, slabih mehaničkih karakteristika do dubine oko 7,0 m; GS2 – zaglinjeni, slabo građuirani pijesak, srednje zbijenosti (do dubine oko 9,0 m) odnosno zbijeni (do dubine 12 m) te GS3 – vrlo zbijeni pijesak/šljunak (do dubine istraživanja, 16 m). Prema statičkom proračunu, karakteristična nosivost pilota za trajno stanje iznosi ovisno o duljini pilota: 1455 kN (L = 9 m),

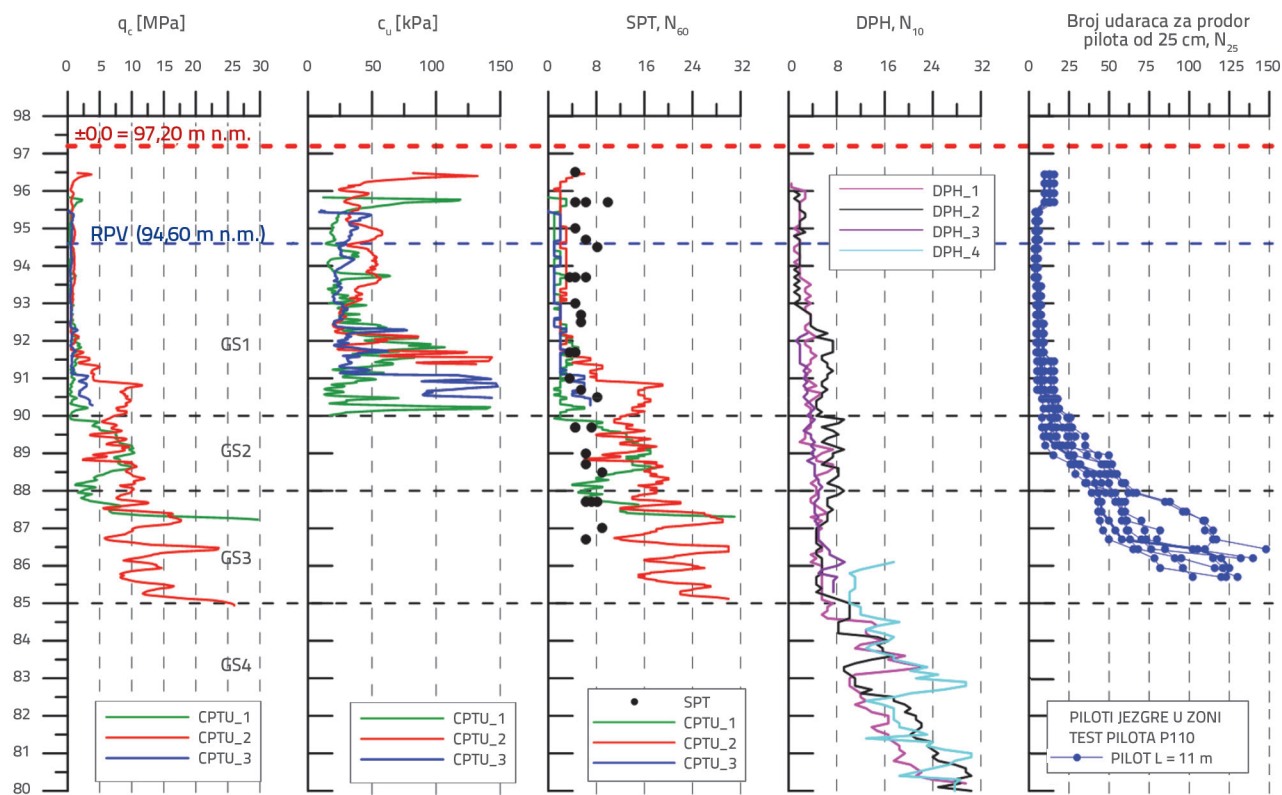
1587 kN (L = 10 m) i 1719 kN (L = 11 m). Nosivost pilota preko baze iznosi oko 70 %, a preko plašta 30 % (pilot koji nosi dominantno na vrh). Dinamičkim testiranjem nosivosti pilota izmjerene su vrijednosti u iznosu: 2084 kN (L = 9 m), 2346 kN (L = 10 m) i 2323 kN (L = 11 m). Mjerenje nosivosti pilota nakon 7 dana ukazuje na minimalno povećanje od svega 4 % (2323 kN → 2415 kN), što je karakteristično za pilote u nekoherentnim materijalima (pijesak).

Broj udaraca prilikom zabijanja za prodor

pilota u duljini 25 cm (N_{25}) iznosi manje od 10 udaraca u sloju GS1, postupno raste u sloju GS2 do oko 50 udaraca te postiže maksimalnu vrijednost do 125 udaraca u sloju GS3 (slika 6.).

3.2. Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda, Đakovo (UPOV)

Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda UPOV Đakovo izveden je na jugoistočnom dijelu grada Đakova, uz kanal Ribnjak. Postrojenje se sastoji od nekoliko karakterističnih objekata: upravna zgrada, zgrada procesnog postrojenja i bioloških bazena, zgrada postrojenja za solarno sušenje mulja (slika 7.). Kritičan objekt s aspekta temeljenja je biološki bazen dimenzija oko 70 x 80 m, visine 6,6 m, od kojih se oko 3,0 m izvodi ispod razine

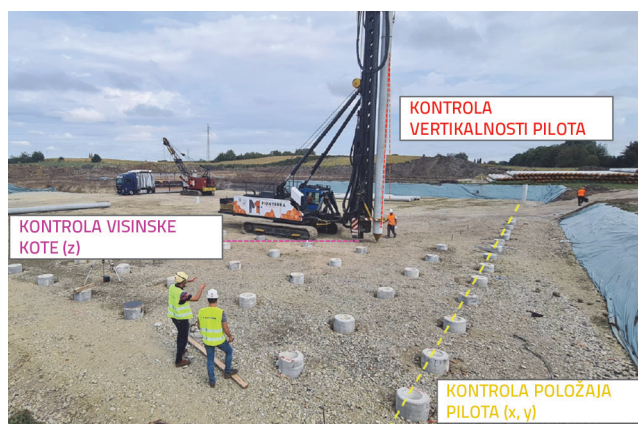


Slika 6. Geotehnički profil tla (rezultati in-situ ispitivanja: CPTU, SPT, DPH) i zapis zabijanja pilota

budućeg nasipa, odnosno oko 2,0 m ispod razine postojećeg terena. U navedenim okolnostima djelovanje na temeljno tlo ispod bazena iznosi oko 80 kPa za slučaj punog bazena, a moguća je i pojava uzgona za slučaj visoke razine podzemne vode u trenutku pražnjenja ili servisiranja bazena do -30 kPa. S obzirom na nepovoljne uvjete u tlu (meke gline i prahovi) objekt je temeljen duboko na zabijenim pilotima promjera 50 cm, duljine 10 i 12 m. Na slici 7. prikazana je izvedba pilota s naznačenom kontrolom kvalitete tijekom zabijanja pilota (geodetska kontrola položaja u x,y,z, smjeru te kontrola vertikalnosti pilota nivelirom).



Slika 7. UPOV Đakovo tijekom izgradnje



Slika 8. Ugradnja pilota s naznačenom kontrolom izvedbe u skladu sa zahtjevima norme HRN EN 12699:2015 (maksimalno odstupanje položaja < 0,1 m te kuta nagiba < 0,04 m/m)

Geotehnički istražni radovi sastojali su se od prethodnih istražnih radova u fazi idejnog projekta (1 istražna bušotina, 3 x CPTU do dubine 8 m) i istraživanja za glavni projekt (3 bušotine, 4 x CPTU do maksimalne dubine utiskivanja, pijezometar s električnim očitanjem razine podzemne vode – DIVER). Geotehnički profil tla sastoji se od površinskog sloja nasipa loših mehaničkih karakteristika (CI/CH gline i MH prahovi, vrlo meke do meke konzistencije), GS1 – gline i prahovi srednje do krute konzistencije, GS2 – prahovi (dubine do oko 5 m), glinoviti s većim udjelom pijeska (na dubini > 12 m) te GS3 – zaglinjeni pijesak (dubine > 14,5 m). Razina podzemne vode registrirana je na dubini 0,6 do

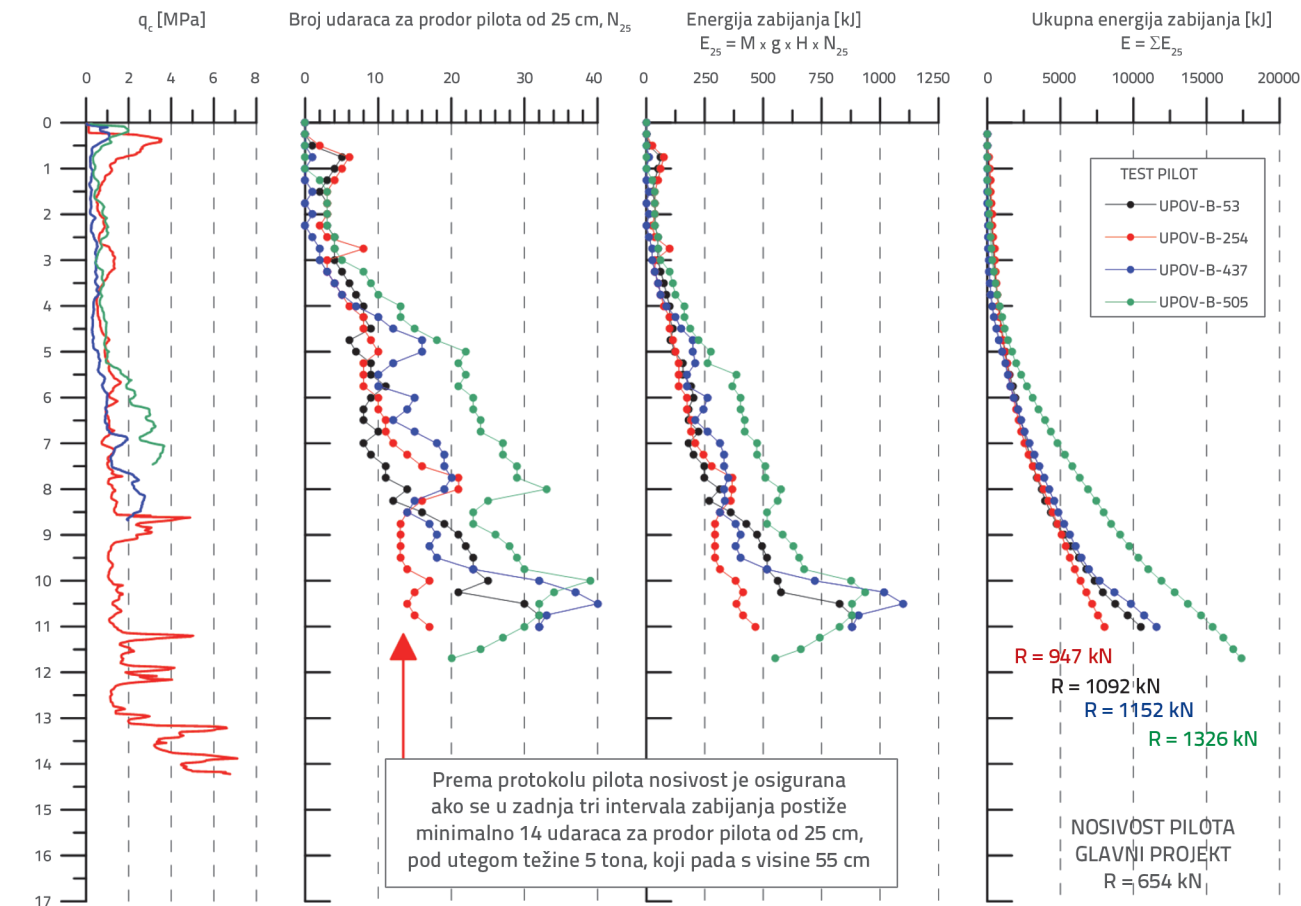
2,4 m ispod razine terena s procjenom podizanja u vlažnom periodu godine. Tijekom izvedbe radova registrirano je podizanje razine podzemne vode u pijezometru praktički do površine terena.

Karakteristična računaska vrijednost nosivosti pilota iznosi ovisno o duljini pilota 572 kN (L = 8 m), 682 kN (L = 10 m) te 1013 kN (L = 12 m). Piloti su takozvani lebdeći piloti, pri čemu se oko 80 % nosivosti realizira preko plašta, a 20 % preko baze.

U fazi izvedbe pilota provedeno je dinamičko testiranje na 4 probna pilota. Na prvom pilotu provedena je PDA analiza za tri karakteristične dubine pilota (8 m, 10 m i 11,1 m) te naknadno testiranje 6 dana nakon ugradnje. Dodatno su testirana još tri pilota, dva odmah po ugradnji (B254, B437) te jedan 6 dana po ugradnji (B505). Odmah nakon ugradnje izmjereni su rezultati nosivosti 1.092, 947 i 1.152 kN, a 6 dana nakon ugradnje povećane vrijednosti 1.342 i 1.326 kN (povećanje oko 22 %).

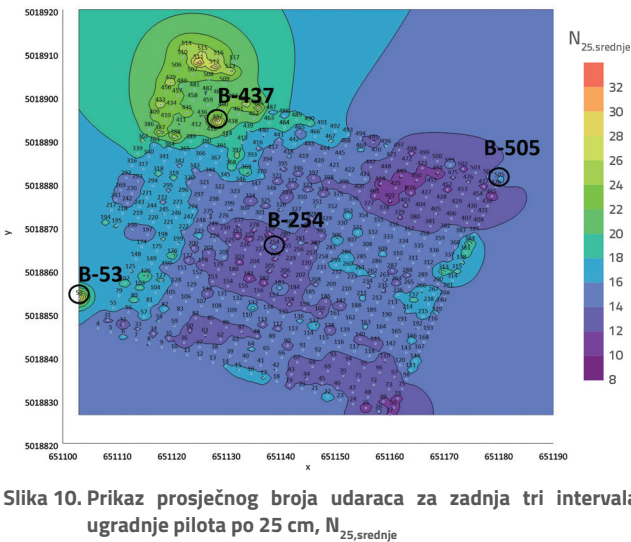
Na slici 9. je prikazan geotehnički profil tla (rezultati CPTU ispitivanja) te zapis zabijanja pilota i pripadne energije zabijanja. Na temelju protokola zabijanja svih izvedenih pilota provedena je analiza nosivosti u odnosu na zadani kriterij. Prikaz prosječnog broja udaraca za zadnja tri intervala ugradnje pilota ($N_{25, \text{srednje}}$) dan je na slici 10. Na slici se jasno razaznaju zone mekšeg i zbijenijeg temeljnog tla u zoni bazena. Statističkom obradom rezultata dobivena je normalna distribucija vrijednosti $N_{25, \text{srednje}}$. Srednja vrijednost izmjerenih rezultata iznosi $N_{25, \text{srednje}} = 15,6$ udaraca, standardna devijacija 3,9 udaraca, a 95 % rezultata postiže vrijednost veću od 10,7 udaraca (slika 11.). Na temelju rezultata ispitivanja nosivosti pilota odmah po ugradnji i pripadnog broja udaraca moguće je nosivost pilota iskazati jednadžbom pravca $R^1 = 10 \times N_{25, \text{srednje}} + 790$, a nosivost 6 dana nakon ugradnje $R^6 = 12,2 N_{25, \text{srednje}} + 964$ (oko 22 % veća).

Norma za geotehničko projektiranje Eurokod 7 definira postupak za određivanje karakteristične vrijednosti nosivosti pilota na temelju statičkih i dinamičkih ispitivanja ili računski na temelju rezultata istražnih radova. Dodatno, karakteristična vrijednost može se odrediti kao 95 % fraktil svih izmjerenih rezultata. U okviru glavnog projekta procijenjena je računaska nosivost prema istražnim radovima za srednje vrijednosti rezultata u iznosu $R_{\text{cal}} = 954$ kN. Primjenom korelacijskog koeficijenta $\zeta_3 = 1,6$ za istražne radove karakteristična nosivost pilota iznosi $R_k = R_{\text{cal}}/1,6 = 596$ kN. Na temelju tri rezultata dinamičkog ispitivanja može se odrediti karakteristična vrijednost nosivosti pilota odmah nakon ugradnja primjenom korelacijskih koeficijenata $\zeta_5 = 1,6$ (za srednju vrijednost); $\zeta_6 = 1,5$ (za minimalnu vrijednost); $R_k = \min(R_{\text{sr}}/1,6; R_{\text{min}}/1,5) = \min(665; 631) = 631$ kN. Dodatno, na temelju statističke obrade rezultata svih izmjerenih energija na kraju zabijanja i primjenom korelacije na nosivost pilota, karakteristična vrijednost za 95 % fraktila iznosi $R_k = 897$ kN. Iz navedenog se može zaključiti da izvedeni piloti zadovoljavaju uvjete iz

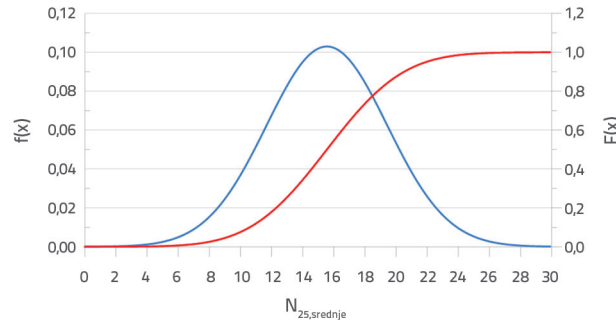


Slika 9. Geotehnički profil tla (rezultati CPTU ispitivanja) i zapis zabijanja pilota i pripadne energije (UPOV)

projekta: karakteristična nosivost pilota dobivena dinamičkim ispitivanjem je veća nego je predviđena u glavnom projektu. Nosivost je zadovoljena ujedno i za pilot izveden sa najmanjim brojem udaraca odmah po ugradnji $R^1(8) = 10 \times 8 + 790 = 870$ kN uz dodatno povećanje nosivosti nakon 6 dana iznosi $R^6(8) = 12,2 \times 8 + 964 = 1066$ kN.



Slika 10. Prikaz prosječnog broja udaraca za zadnja tri intervala ugradnje pilota po 25 cm, $N_{25,srednje}$



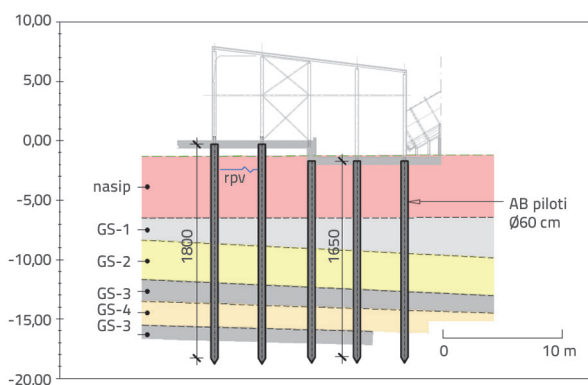
		$N_{25,srednje}$	R^1 [kN]	R^6 [kN]
Srednja vrijednost		15,6	946	1154
Standardna devijacija		3,9	39	47
Fraktili [%]	5	10,7	897	1094
	10	11,3	903	1102
	25	13,0	920	1122
	50	15,0	940	1147
	75	17,0	960	1171
	95	22,8	1018	1242

Slika 11. Statistička obrada podataka o zabijanju pilota: funkcija kumulativne distribucije $f(x)$ te funkcija gustoće vjerojatnosti $F(x)$ (dijagram gore). Izmjerene vrijednosti broja udaraca za zadnja tri intervala ($N_{25,srednje}$), korelirana nosivost pilota odmah nakon zabijanja (R^1) te procijenjena nosivost pilota 6 dana nakon zabijanja (R^6) (tablica dolje)

3.3. Pretovarna stanica, Karlovac

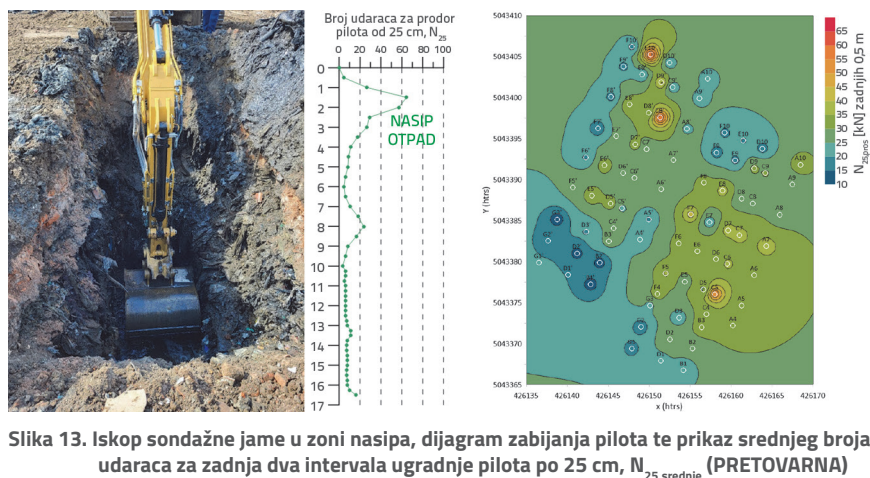
Pretovarna stanica je čelična konstrukcija za pretovar otpadnog materijala. Temeljena je na AB roštilju koji se oslanja na zabijene AB pilote. Odrani su zabijeni AB piloti promjera 60 cm, duljine 16 i 18,5 m. Karakterističan poprečni presjek konstrukcije, temelja i temeljnog tla dan je na slici 12.

Geotehnički profil tla sastoji se od: NASIPA – heterogeni nasuti materijal od komunalnog i građevinskog otpada (dubine do oko 5,5 m), GS1 – sloj nekoherentnog pijeska, rahlo do srednje zbijen (debljine 2 do 4 m), GS2 – sloj gline s pijeskom niske plastičnosti, vrlo meke do meke konzistencije (debljine oko 3 m), GS3 – sloj prahovitog pijeska srednje zbijenosti (debljine oko 1,5 m), GS4 – sloj gline srednje do visoke plastičnosti, srednje konzistencije (debljine oko 15 m). Razina podzemne vode registrirana je tijekom bušenja na dubini 1,1 do 1,6 m.



Slika 12. Karakteristični poprečni presjek objekta i pilota te geotehnički profil tla (PRETOVARNA)

Nosivost pilota izračunata je na temelju in-situ (SPT) i laboratorijskih ispitivanja primjenom API metode. Piloti su tzv. lebdeći piloti, karakteristične nosivosti 879 kN, pri čemu se 80 % nosivosti odnosi na plašt, a 20 % na bazu. Dinamičkim ispitivanjem izmjerene su nosivosti pilota nakon zabijanja na četiri pozicije: 1870, 876, 936 i 954 kN, s povećanjem nosivosti 6 dana nakon zabijanja pilota u iznosu od 16 % (1870 kN → 2737 kN). Evidentan je rasap dobivenih rezultata ispitivanja koji proizlazi iz heterogenosti temeljnog tla, različitih uvjeta u zoni baze pilota te prije svega heterogenosti nasipnog materijala. Rasap rezultata vidljiv je i na grafičkom prikazu prosječnog



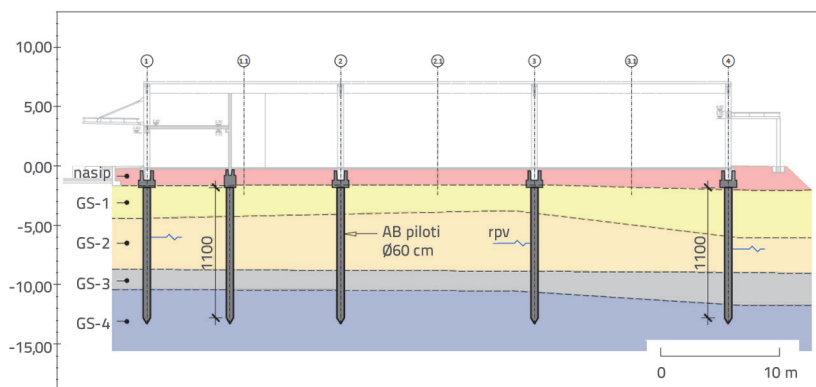
Slika 13. Iskop sondažne jame u zoni nasipa, dijagram zabijanja pilota te prikaz srednjeg broja udaraca za zadnja dva intervala ugradnje pilota po 25 cm, $N_{25,srednje}$ (PRETOVARNA)

borja udaraca za zadnja dva intervala zabijanja pilota $N_{25,srednje}$ (slika 13.). Na temelju zapisa zabijanja pilota može se primijetiti veliki otpor prodiranju u zoni nasipa, što potencijalno može utjecati na nosivost plašta u tom sloju. S obzirom na karakter otpadnog materijala (degradacija tijekom vremena), taj doprinos nosivosti zanemaren je u proračunu (inženjerska procjena na strani sigurnosti). Broj udaraca u temeljnom tlu ispod nasipa relativno je mali (N_{25} = oko 10 do 20 udaraca).

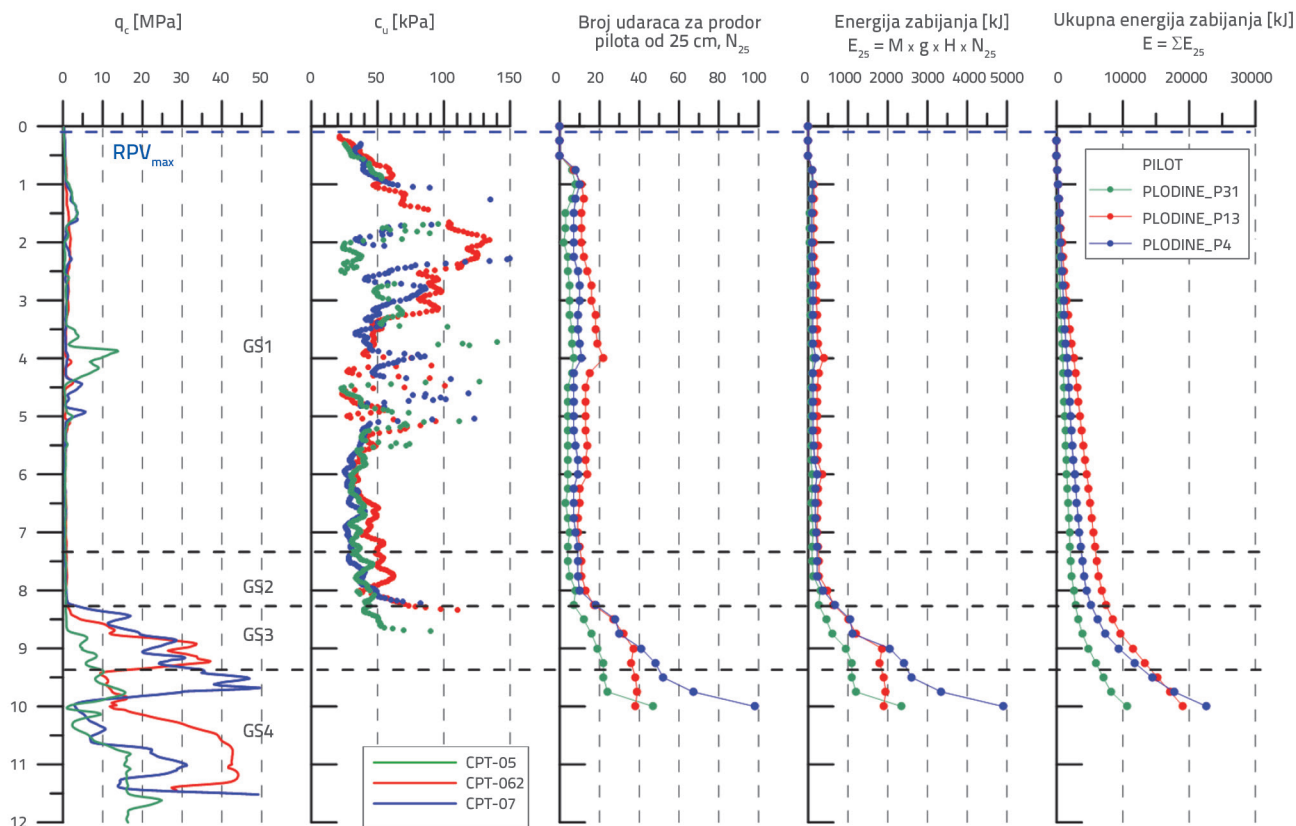
3.4. Supermarket Plodine, Lepoglava

Objekt supermarket Plodine u Lepoglavi okvirna je AB konstrukcija temeljena na pilotima. Na vrhu pilota je čašica u koju se montiraju stupovi. Čašice su povezane veznim AB gredama. Odabrani su zabijeni AB piloti promjera 60 cm, duljine 11 m (slika 14.). S obzirom na pojavu krutih materijala u podlozi na dubini oko 8 m i kapacitet opreme za zabijanje, neki su piloti izvedeni do manje dubine (oko 10 m).

Geotehnički istražni radovi sastojali su se od terenskih istražnih radova (7 x CPTU, 2 x DPH) te jedne kontrolne istražne bušotine u fazi izvedbe konstrukcije dubine 15 m. Geotehnički profil tla sastoji se od: NASIP – od drobljenog kamenog materijala debljine do 75 cm, GS1 – gline i prahovi srednje plastičnosti, srednje do meke konzistencije (do dubine oko 7,3 m), GS2



Slika 14. Karakteristični poprečni presjek objekta i pilota te geotehnički profil tla (PLODINE)



Slika 15. Geotehnički profil tla (rezultati in-situ ispitivanja: CPTU) i zapis zabijanja pilota (PLODINE)

– slabo građirani, prahoviti pijesci, rahlo do srednje zbijeni (dubine do oko 8,0 m), GS3 – pjeskoviti/prahoviti šljunci, vrlo zbijeni (do dubine oko 9,3 m), GS4 – prahoviti trošni lapor, čvrste konzistencije (do dubine ispitivanja 15 m).

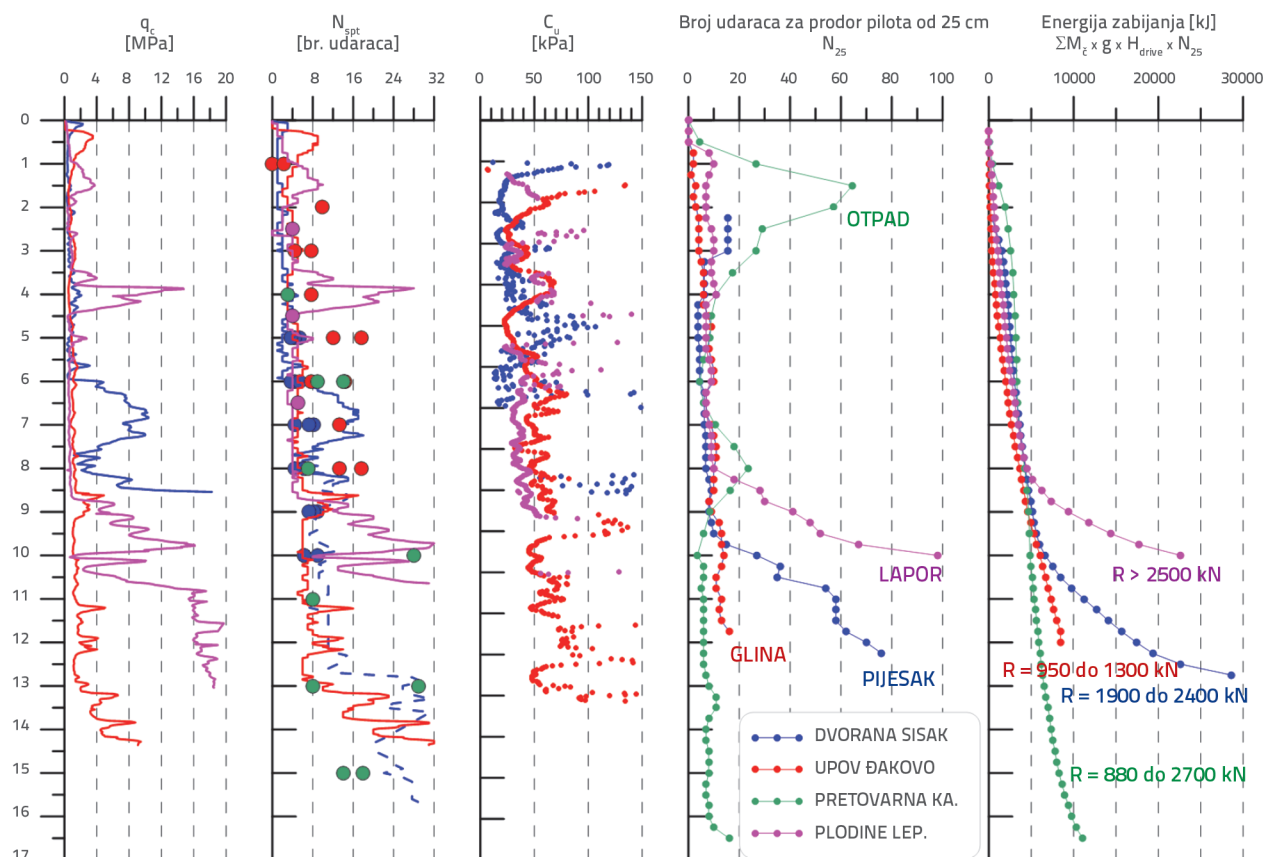
Karakteristična nosivost pilota određena na temelju CPTU ispitivanja za dubinu ugradnje pilota od 10 m iznosi 1700 do 2500 kN, od čega nosivost po plaštu iznosi oko 500 do 650 kN (odnosno oko 25 % ukupne nosivosti). Veći dio nosivosti ostvaruje se preko baze pilota oko 75 % (pilot koji nosi na vrhu). Na slici 15. prikazan je karakteristični rezultat CPTU ispitivanja i protokol zabijanja pilota. Broj udaraca za prodor 25 cm iznosi oko $N_{25} = 10$ u mekim slojevima do pojave nosive podloge. U sloju šljunka broj udaraca naglo raste do konačne vrijednosti zabijanja u sloju lapora $N_{25} > 80$.

4. Analiza rezultata

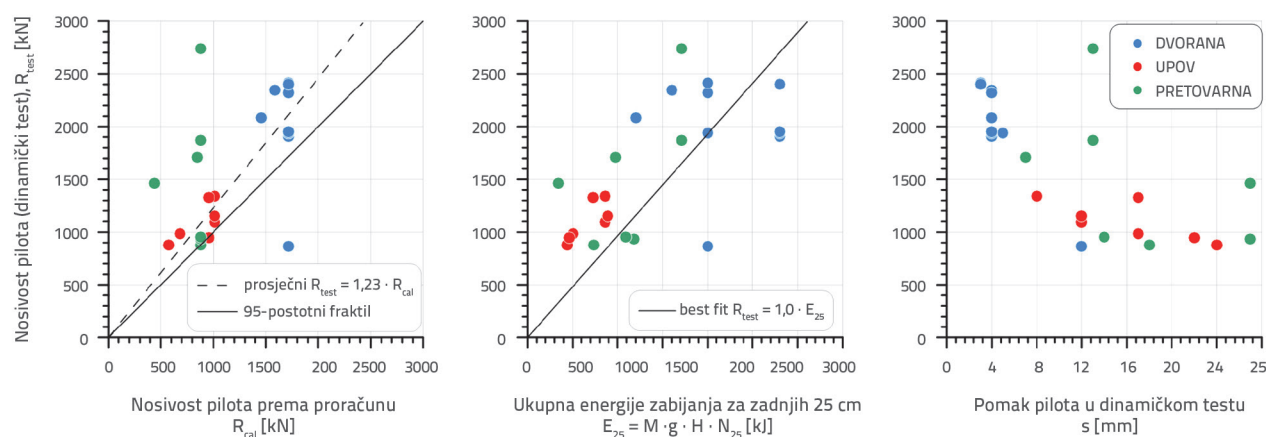
Rezultati istraživanja prikazani su grafički na karakterističnim dijagramima mjerodavnim za ocjenu mehaničkih karakteristika tla (rezultati in-situ ispitivanja CPTU i SPT), s prikazanim protokolima zabijanja pilota (broj udaraca prilikom ugradnje pilota N_{25}), pripadnim ukupnim energijama potrebnim za zabijanje pilota te nosivostima izmjerenim na dinamičkim ispitivanjem. Evidentno je da za sve pilote ukupna energija zabijanja raste približno linearno s dubinom, do pojave čvršćih materijala u podlozi, nakon čega se ukupna energija postupno

povećava. Kod pilota nosivih na vrhu navedeni utrošak energije naglo se povećava (PRETOVARNA – temeljenje u laporu, DVORANA – temeljenje u zbijenom pijesku) nakon čega je za svaki daljnji pomak pilota potreban velik broj udaraca čekića $N_{25} > 70$ uz maksimalan kapacitet opreme (oko 40 do 60 kJ). Općenito, može se zaključiti da je nosivost lebdećih pilota za utrošenu teoretsku energiju zabijanja oko 10.000 kJ veća od 900 kN, a za pilote nosive na vrhu za utrošenu teoretsku energiju zabijanja oko 20.000 kJ veća od 2000 kN. Navedena nosivost lebdećih pilota postiže se uz relativno mali broj udaraca pri kraju zabijanja $15 < N_{25} < 20$ (prodor pilota tijekom testiranja $s > 10$ mm), a pri kraju zabijanja pilota nosivih na vrhu javljaju se znatno veći brojevi udaraca $N_{25} > 70$ pri maksimalnom kapacitetu opreme za zabijanje (prodor pilota tijekom testiranja $s < 4$ mm). Treba napomenuti da su izmjerene nosivosti u uvjetima pilota nosivih na vrhu i do 2700 kN (u pijesku), a procjenjuje se da su i znatno veće u laporu (računska nosivost > 4000 kN).

Detaljni podaci o protokolu zabijanja i dinamičkom testiranju dani su u Tablici 1. Ukupno su provedena 24 dinamička testiranja pilota u okviru kojih je izmjerena energija zabijanja (E_{test}) i slijezanje nakon testiranja (s) te je povratnom analizom procijenjena nosivost pilota (R_{test}). Za svaku dubinu testiranja (L) dani su podaci o protokolu zabijanja test pilota: masa čekića (M_c), visina pada tijekom zabijanja (H_{drive}), pripadna teorijska energija zabijanja (E_{drive}), broj udaraca potrebnih za prodor pilota od 25



Slika 16. Usporedba rezultata za sve analizirane lokacije: istražni radovi (CPT, SPT, c_u), zapis zabijanja pilota (N_{25}) te ukupna energija potrebna za zbijanje pilota



Slika 17. Analiza rezultata testiranja pilota: usporedba ispitane nosivosti pilota (R_{test}) u odnosu na proračunatu vrijednost (R_{cal}); utjecaj energije zabijanja pilota za zadnjih 25 cm (E_{25}) na nosivost pilota (R_{test}); pomak pilota uslijed dinamičkog testiranja (s) i pripadna nosivost (R_{test})

cm (N_{25}) te pripadna energija potrebna za zabijanje pilota 25 cm neposredno prije testiranja ($E_{t,drive} = M_c \cdot g \cdot H_{drive} \cdot N_{25}$, gdje je g - akceleracija sile teže 9.81 m/s^2). Na temelju izmjerene energije prilikom testiranja i prodora pilota ekstrapolirana je pripadna energija potrebna za prodor 25 cm ($E_{25,test} = E_{test} \cdot 250 \text{ mm/s}$). Analiza rezultata prikazana je na slici 17. Može se primijetiti da su izmjerene vrijednosti nosivosti pilota u pravilu

veće od proračunskih vrijednosti, uz manja odstupanja koja su pripisana lokalnom oslabljenju u temeljnom tlu (pilot P127-DVORANA te pilot B254-UPOV). Statističkom obradom podataka (DVORANA, UPOV) srednja vrijednost izmjerenih podataka iznosi oko 23 % više od proračunatih, uz standardnu devijaciju 0,24 %, što daje izvrsnu vrijednost procjene karakteristične nosivosti pilota u vrijednosti 95

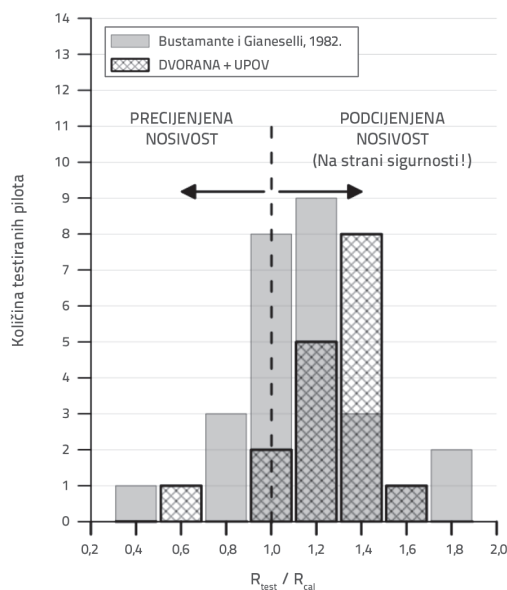
Tablica 1. Podaci o ispitanim pilotima (geometrija i postupak zabijanja, rezultati statičkog proračuna i dinamičkog ispitivanja nosivosti pilota, analiza energije zabijanja i dubine prodiranja uslijed zabijanja)

PROJEKT	PILOT	L [m]	M _č [t]	H _{drive} [cm]	E _{t,drive} [kJ]	N ₂₅ [udaraci]	H _{test} [cm]	E _{t,test} [kJ]	E _{test} [kJ]	s [mm]	R _{test} [kN]	R _{cal} [kN]	R _{test} /R _{cal} []	E _{25,t} [kJ]	E _{25,test} [kJ]
DVORANA	P85-Test 1	9	2,5	-	40	>30	-	40-60	38,5	4	2.084	1.455	1,43	1.200	2.406
DVORANA	P85-Test 2	10	2,5	-	40	>40	-	40-60	37,4	4	2.346	1.587	1,48	1.600	2.338
DVORANA	P85-Test 3	11	2,5	-	40	>50	-	40-60	25,6	4	2.323	1.719	1,35	2.000	1.600
DVORANA	P85-Test 4	11	2,5	-	40	>50	-	40-60	34,3	3	2.415	1.719	1,40	2.000	2.858
DVORANA	P101	11	2,5	-	40	>70	-	40-60	23,9	4	1.906	1.719	1,11	2.800	1.494
DVORANA	P74	11	2,5	-	40	>70	-	40-60	21,5	3	2.404	1.719	1,40	2.800	1.792
DVORANA	P76	11	2,5	-	40	>70	-	40-60	18,9	4	1.936	1.719	1,13	2.800	1.181
DVORANA	P110	11	2,5	-	40	>50	-	40-60	27,5	5	1.936	1.719	1,13	2.000	1.375
DVORANA	P127	11	2,5	-	40	>50	-	40-60	18,7	12	868	1.719	0,50	2.000	390
DVORANA	P105	11	2,5	-	40	>70	-	40-60	19,3	4	1.953	1.719	1,14	2.800	1.206
UPOV	B53-Test 1	8	5,0	45	22,1	20	85	42	41,0	24	878	572	1,53	441	427
UPOV	B53-Test 2	10	5,0	45	22,1	23	85	42	38,5	17	984	682	1,44	508	566
UPOV	B53-Test 3	11	5,0	55	27,0	32	90	44	19,7	12	1.092	1.013	1,08	863	410
UPOV	B53-Test 4	11	5,0	55	27,0	32	95	47	21,3	8	1.342	1.013	1,32	863	666
UPOV	B254	11	5,0	55	27,0	17	90	44	14,7	22	947	954	0,99	459	167
UPOV	B437	11	5,0	55	27,0	33	95	47	23,0	12	1.152	1.013	1,14	890	479
UPOV	B505	11	5,0	55	27,0	27	100	49	37,1	17	1.326	954	1,39	728	546
PRETOVARNA	3A-A10-Test1	15	5,0	100	49,1	7	95	47	21,0	27	1.462	440	3,32	343	194
PRETOVARNA	3A-A10-Test2	16	5,0	100	49,1	20	100	49	23,0	7	1.707	849	2,01	981	821
PRETOVARNA	3A-A10-Test3	17	5,0	100	49,1	35	100	49	23,0	13	1.870	879	2,13	1.717	442
PRETOVARNA	3A-A10-Test4	17	5,0	100	49,1	35	100	49	22,0	13	2.737	879	3,11	1.717	423
PRETOVARNA	3B-FB	17	5,0	100	49,1	15	100	49	18,0	18	876	879	1,00	736	250
PRETOVARNA	3B-F4	15,5	5,0	60	29,4	40	100	49	18,0	27	936	879	1,06	1.177	167
PRETOVARNA	3A-A7	15,5	5,0	60	29,4	37	100	49	18,0	14	954	879	1,09	1.089	321
PLODINE	40	11	5,0	100	49,1	>90	-	-	-	-	-	2.500	-	4.415	-

L – duljina pilota u tlu; M_č – masa čekića; H_{drive} – visina pada čekića tijekom zabijanja; E_{t,drive} – teorijska energija zabijanja (= M_č × H_{drive} × g); N₂₅ – broj udaraca čekića za prodor pilota od 25 cm; H_{test} – visina pada čekića u dinamičkom testu; E_{t,test} – teorijska energija testiranja (= M_č × H_{test} × g); E_{test} – izmjerena energija testiranja, s – prodor pilota u dinamičkom testu; R_{test} – nosivost pilota izmjerena dinamičkim testom; R_{cal} – računski nosivost pilota; E_{25,t} – teoretska energija utrošena za zabijanje zadnjih 25 cm pilota u zoni testiranja (= M_č × H_{test} × g × N₂₅); E_{25,test} – ekstrapolirana energija utrošena za zabijanje zadnjih 25 cm pilota prema rezultatima testa (= E_{test} × 250 mm/s)

%-tnog fraktila u skladu s preporukama Eurokoda 7. Na dijagramima su prikazani i utjecaj energije zabijanja za zadnjih 25 cm pilota na nosivost pilota te slijeganje pilota uslijed testiranja.

Na slici 18. prikazana je analiza rezultata s aspekta procjene računske nosivosti pilota (precijenjena ili podcijenjena nosivost). Rezultati su uspoređeni s bazom podataka prema Bustamante i Gianceselli [3], na temelju koje su navedeni autori dali preporuku za proračun nosivosti pilota prema CPTU ispitivanju. Evidentna je sličnost u dobivenim rezultatima, pri čemu se većina rezultata ovog istraživanja grupira oko nešto veće vrijednosti $R_{test}/R_{cal} = 1,4$, a rezultat iz baze navedenih autora kreće se oko vrijednosti 1,2. Razlog tomu pripisuje se većoj realnoj nosivosti baze pilota u zbijenim pijescima na lokaciji Dvorana Sisak koje su proračunate na bazi manje pouzdanih istražnih radova (SPT, DPH), pa je računski nosivost za te pilote podcijenjena. Navedena metoda za proračun nosivosti pilota prema CPTU ispitivanju [3] ocijenjena je ujedno i kao najbolja metoda za proračun nosivosti Frenki pilota i MEGA pilota izvedenih u sličnim geotehničkim sredinama (vidi Vukičević et al. [14]).



Slika 18. Rezultati testiranja pilota za DVORANU Sisak i UPOV Đakovo (omjer izmjerene i proračunate nosivosti pilota, R_{test}/R_{cal}) te usporedba s podacima ispitivanja pilota prema Bustamante i Gianceselli [3]

5. Zaključak

U radu je prikazano iskustvo u izvedbi zabijenih AB pilota na četiri lokacije u Hrvatskoj. Prikazani su rezultati geotehničkih istražnih radova koji predstavljaju osnovu za proračun nosivosti pilota u fazi projektiranja. Prikazani su karakteristični protokoli zabijanja pilota te rezultati 24 dinamička testiranja pilota. Na temelju analize rezultata dane su grube smjernice za procjenu nosivosti pilota na temelju utrošene energije zabijanja te očekivano slijeganje uslijed testiranja ovisno o tipu pilota (lebdeći pilot ili piloti koji nose na vrh). Na primjeru dviju lokacija (Dvorana Sisak, UPOV Đakovo) na kojima su provedeni izuzetno kvalitetni istražni radovi u svim slojevima materijala (istražno bušenje i laboratorij do dubina većih od duljine pilota, SPT, CPTU, DPH) statističkom obradom podataka dokazano je da je karakteristična nosivost pilota računata prema suvremenim metodama danim u referentnoj literaturi [2, 3] na strani sigurnosti u odnosu na izmjerenu nosivost te da odgovara približno 95 %-tnom fraktilu svih istraženih pilota, što je u skladu s preporukama Eurokoda 7. U radu je prikazana dosljednost u primijenjenoj metodologiji istraživanja, proračuna i kontrole nosivosti pilota, pri čemu je važno naglasiti da je ključni element za kvalitetnu procjenu

nosivosti pilota provedba kvalitetnih istražnih radova: istražno bušenje i laboratorijska ispitivanja tla do dubina ispod dna pilota, CPTU ispitivanje kao primarna in-situ metoda za određivanje mehaničkih karakteristika mekih glina i prahova te rahlih pjeskovitih materijala, SPT i DPH ispitivanja u svim materijalima, a naročito u slojevima gdje nije moguće utisnuti CPTU sondu. Kvalitetni istražni radovi osiguravaju pouzdanu osnovu za odabir optimalnog tehničkog rješenja i procjenu nosivosti pilota u skladu s preporukama Eurokoda 7, a metoda dinamičkog ispitivanja relativno brzo i pouzdanu kontrolu stvarne nosivosti pilota.

Zahvala

Zahvala prof. dr. sc. Antunu Szavits-Nossanu na korisnim savjetima i raspravama tijekom izrade ovog rada te u fazi projektiranja i istraživanja za potrebe projekata opisanih u ovom radu (revident za geotehniku na projektima DVORANA, UPOV, PRETOVARNA). Zahvala kolegi Tomi Moroviću na suradnji pri analizi i interpretaciji dinamičkih testiranja pilota prikazanih u ovom radu te stručnom i predanom radu u provedbi ispitivanja.

LITERATURA

- [1] Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M., Elson, K.: Pile engineering, Third edition, Taylor & Francis, 2009
- [2] Bustamante, M., Gianselli, L.: Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT, Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II, Amsterdam, 2 (1982), pp. 493-500, Balkema Pub., Rotterdam.
- [3] Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M.: Cone penetration testing in geotechnical practice, Blackie academic and professional, 1997.
- [4] API Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms. Report RP-2A. American Petroleum Institute, 1987
- [5] HRN EN 12699:2008, Izvedba posebnih geotehničkih radova -- Piloti s razmicanjem tla (EN 12699:2000)
- [6] Internet stranica tvrtke Monterra d.o.o., www.monterra.hr, 2025
- [7] Diesel Pile Hammers, DELMAG GmbH & Co. KG, www.delmag.com, 2025.
- [8] Hydraulic Impact Hammer HHK5/7/9/A(880), JUNTAN OY, www.yunttan.com, 2025.
- [9] Katalog zabijenih pilota, T.B.S. TVORNICA BETONSKIH STUPOVA d.o.o., www.tbs.hr, 2025.
- [10] CAPWAP Signal Matching Software, Pile Dynamics, Inc., www.pile.com, 2025.
- [11] ASTM D4945-17: Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations, 2017
- [12] Dynamic load tester, Pile Dynamics, Inc., www.pile.com, 2025.
- [13] Internet stranica tvrtke Geotest d.o.o., www.geotest.hr, 2025
- [14] Vukičević, M., Marjanović, M., Pujević, V., Nikola, O.: Evaluation of methods for predicting axial capacity of jacked-in and driven piles in cohesive soils, GRAĐEVINAR, 70 (2018) 8, pp. 685-693, <https://doi.org/10.14256/JCE.2175.2017>