

**Geza VOGRINČIČ**

doc.dr., dipl.gradb.inž., Univerza v Ljubljani, FMF, Oddelek za matematiko in mehaniko

**Gorazd STRNIŠA**

dipl.gradb.inž., SLP d.o.o. Ljubljana, Specializirano podjetje za temeljenje objektov

**Ivan LESJAK**

dipl.gradb.inž., SLP d.o.o. Ljubljana, Specializirano podjetje za temeljenje objektov

## **ANALIZA NOSILNOSTI KOLA V NETIPIČNIH BARJANSKIH TLEH**

**POVZETEK:** V članku so analizirani rezultati statične obremenilne preizkušnje in izvršenih dinamičnih preiskav nosilnosti armiranobetonskih prednapetih kolov, ki so bili zabiti v netipična barjanska tla. Napetostno-deformacijsko vedenje preizkusnih kolov je bilo med zabijanjem spremljano s sodobno merilno opremo (analizatorjem zabijanja). Izmerjeni pospeški in deformacije zabijanega kola so rabili za nadaljnjo podrobno numerično analizo z računalniškim programom CAPWAP. Tako izračunane tlačne osne nosilnosti kolov so bile vzporejene z vrednostmi, ki izhajajo iz analiz izmerkov, dobljenih s statičnim obremenilnim preizkusom.

## **BEARING CAPACITY ANALYSIS OF PILE IN UNTYPICAL MARSHLAND SUBSOILS**

**SUMMARY:** This paper summarizes findings from analyses of dynamics and static loading tests performed on prestressed concrete piles driven into the untypical Ljubljana Marsh subsoils. During driving stress-strain piles behaviours were measured with a contemporary electronic equipment (Pile Driving Analyser). These measurements (axial force and pile acceleration versus time) have served for the further analysis according to the computer CAse Pile Wave Analysis Program. The results of the static loading test were then compared with the pile ultimate bearing capacity obtained through PDA measurements and CAPWAP.

## UVOD

V Mestnem logu, kjer Cesta v Mestni log prečka Mali graben, je bila v zvezi s temeljenjem objekta "Poštni center Ljubljana" izvedena vrsta preiskav temeljnih tal in nosilnosti zabutih kolov. Objekt je zasnovan kot hala tlorisnih dimenzij 145 m x 72 m in z gabaritno višino 12 m. Osnovni raster objekta je 12 m x 12 m. Relativna ničelna kota tlaka pritličja je na absolutni nadmorski višini +293.70 m, kar je okrog 1.00 m nad obstoječim terenom. Del objekta je dvoetažen, del troetažen (medetaža). Fasada je iz montažnih armiranobetonskih elementov.

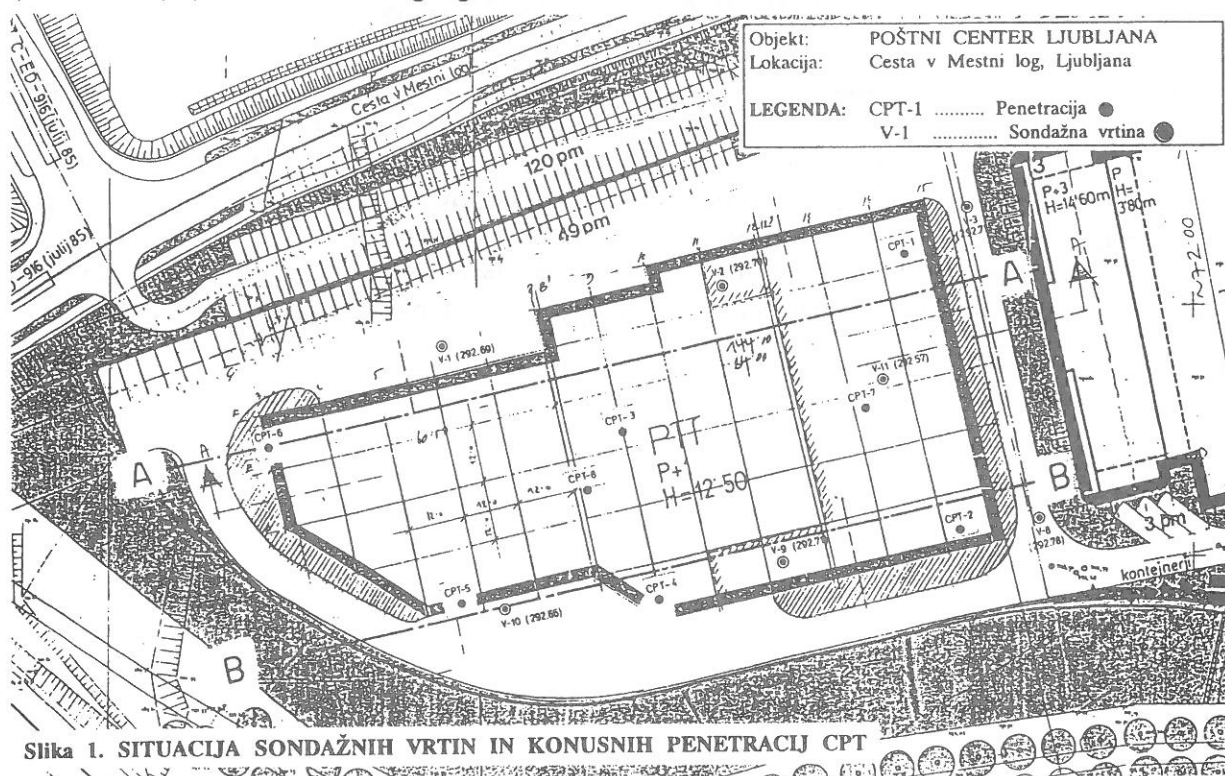
Objekt je temeljen globoko na zabutih prednapetih armiranobetonskih kolih.

## GEOTEHNIČNE RAZISKAVE IN ZNAČILNOSTI TEMELJNIH TAL

Na ožjem območju predvidene gradnje objekta je ZRMK Ljubljana že v letu 1989 opravil geomehanske terenske in laboratorijske raziskave in rezultate prikazal v "Geotehničnem poročilu o raziskavah tal in pogojih temeljenja PTT centra ob Cesti v Mestni log v Ljubljani", Opr. št.: 2-844/89, julij 1989. Na sami lokaciji objekta oziroma neposredno ob njej so bile izvedene vrtine z oznako V-1, V-2, V-3, V-8, V-9, V-10 in V-11, katerih tlorisni položaj prikazuje slika 1.

Na odvzetih neporušenih vzorcih tal so bile izvedene nekatere laboratorijske preiskave (vlažnost, zrnavost, strižna trdnost, stisljivost v edometru itd.). Izvedenih je bilo tudi več in-situ preiskav s standardnim penetracijskim testom (SPT) in s krilno sondo.

Sondažne vrtine so pokazale, da so raziskana tla netipično barjanska in heterogena; torej zahtevna za temeljenje predvidenega objekta. Površinske plasti sestavljajo do povprečne globine 9.0 m rahle meljaste peščeno prodne zemljine ( $SF_s$ ,  $ML-SU$ ,  $SP$ ,  $GF_s$ ) z vložki melja in gline ( $MI-ML$ ,  $MI-CI$ ). Sledi ostanek mehkih barjanskih zemljin do povprečne globine 12.5 m, ponekod tudi do 13.5 m (pri vrtini V-10). Pod njimi se pojavlja najprej sorazmerno tanka dobro zbita prodna plast (po SPT je  $N=35$  udarcev) in nato sedimentirane glinasto meljne, peščene zemljine vse do globine 28.0 m. Gladina talne vode občutno niha v odvisnosti od padavin in poplavnih vod Malega grabna.



Za potrebe projektiranja globokega temeljenja in izračuna posedkov nasipov zunanje ureditve terena je bilo izvedenih s penetrometrom ISMES osem statičnih konusnih penetracij CPT (slika 1). Na osnovi teh preiskav in predhodnih geotehničnih raziskav lahko temeljna tla podrobneje razvrstimo vzdolž raziskane globine na naslednjih šest globinskih pasov. Poleg opisa zemljin je podana povprečna vrednost izmerjenih odporov pod konico CPT  $Q_c$  in izvrednotena povprečna vrednost modula stisljivosti  $M_v$ :

1. v globini med 0.0 m in 1.3 m: Tanka površinska plast puste gline in glinastega melja (CI-MI) v srednje do težko gnetnem stanju, debeline do 1.0 m, prekrita s humusom debeline okrog 0.3 m.  $M_v = 3.8$  do 4.5 MPa.
2. v globini med 1.3 m do 9.0 m: Peščeno meljni pas. Zemljine so v pretežnem delu rahlo sedimentirane ( $Q_c = 1.6$  MPa) in obstaja možnost pojava likvefakcije pri potresni obremenitvi.  $M_v = 3.6$  do 7.0 MPa; pri večini penetracij so v spodnjem delu tega pasu vrednosti modulov višje - med 7.5 do 9.0 MPa.
3. v globini med 9.0 m in 12.5 m: Pas barjanskih, lahko do srednje gnetnih kohezivnih zemljin (ML, CL) debeline 4 do 5 m ( $Q_c = 0.7$  do 1.1 MPa in  $M_v = 1.5$  do 2.0 MPa), ki leži nad prvim prodno peščenim slojem. Tik nad prodno peščenim slojem se trdnostno deformacijske značilnosti poboljšajo.
4. v globini med 12.5 m in 15.0 m: To je plast zbitega peščenega proda ( $GF_s$ , GW), ki je debela največ do 3 m in predstavlja v obravnavanem primeru nosilno plast za temeljenje na kolih. Prod je zelo gost, saj konusni odpor  $Q_c$  presega vrednost 21 MPa, ponekod pa celo 50 MPa. ( $M_v = 40.0$  do 70.0 MPa).
5. v globini med 15.0 m in 32.0 m: Pod prodno plastjo se do globine 32 m menjavajo kohezivne in organske zemljine v srednje do težko gnetnem stanju ( $Q_c = 2.0$  do 3.0 MPa); prekinjajo jih nepovezani (brez urejene slojevitosti) tanjši, do 1 m debeli sloji peskov in prodov ( $Q_c = 3.0$  do 15.0 MPa). V zgornjem delu tega pasu so vrednosti modulov med 4.0 MPa in 6.0 MPa in z globino naraščajo do 12 MPa; na mestih z vložki peščenih prodov pa dosežajo vrednosti do  $M_v = 30.0$  MPa.
6. v globini večji od 32 m: Druga izrazita peščeno prodna plast, ki je s penetrometrom ni bilo mogoče prebiti in raziskati ( $Q_c > 16.0$  MPa in  $M_v > 50.0$  MPa). Debelina te plasti ni znana, ker tudi sondažne vtine niso segale dovolj globoko. Hribinska osnova se na tej lokaciji nahaja predvidoma na globini okrog 80.0 m.

## PREISKAVE KOLOV

### Dinamični obremenilni testi (DOT)

Dinamični obremenilni testi so bili izvedeni na dvanajstih navpično zabitih kolih (preglednica 1). Prvi test je bil opravljen na prvozabitem kolu na objektu (oznaka kola V15-2) 23. marca 1996, zadnji pa na kolu z oznako V38-2, 21. junija 1996. Preiskave DOT je izvajala firma SLP d.o.o. Ljubljana, Specializirano podjetje za temeljenje objektov.

Kot testni koli so bili uporabljeni delovni koli v temeljni konstrukciji. Testirani prednapeti armiranobetonski koli so imeli kvadratni prečni prerez  $35 \times 35$  cm<sup>2</sup> oziroma  $40 \times 40$  cm<sup>2</sup>. Vsi koli so bili izdelani iz betona kvalitete MB40 v enem segmentu in prednapeti z 8 jeklenimi prameni  $7 \phi 3$  mm.

Za dinamično testiranje kolov je bila uporabljena samohodna zabijalna naprava G20 in hidravlično zabijalo z naslednjimi osnovnimi značilnostmi:

Oznaka zabijala: JUNTAN HH/4, teža udarnega bata 40 kN, teža okvirja 15 kN, teža kape zabijala 5 kN, višina padca udarnega bata do 1000 mm, največja energija 1 udarca bata 40 kNm pri padcu bata 1.0 m. Število udarcev na minuto je odvisno od višine h padca bata. Med betonsko glavo kola in kapo zabijala je bila vložena lesena dušilna plošča.

**Preglednica 1. Podatki o testnih kolih**

| Oznaka kola | Tip kola | Prečni prerez (cm <sup>2</sup> ) | Dolžina kola (m) | Dolžina kola pod merskim mestom (m) | Dolžina kola v tleh (m) |
|-------------|----------|----------------------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| V15-2       | PAB40    | 1600                             | 15.0             | 14.4                                | 14.0                    |
| V154-3      | PAB40    | 1600                             | 14.5             | 14.0                                | 13.9                    |
| V240-5      | PAB40    | 1600                             | 14.5             | 13.7                                | 13.4                    |
| V48-2       | PAB35    | 1225                             | 15.0             | 14.3                                | 14.0                    |
| V236-1      | PAB40    | 1600                             | 14.5             | 13.7                                | 13.7                    |
| V187-1      | PAB40    | 1600                             | 14.5             | 13.9                                | 13.7                    |
| V92-3       | PAB40    | 1600                             | 14.0             | 13.3                                | 13.1                    |
| V66-1       | PAB35    | 1225                             | 15.0             | 14.5                                | 14.4                    |
| V203-2      | PAB40    | 1600                             | 15.0             | 14.3                                | 13.9                    |
| V84-1       | PAB40    | 1600                             | 14.5             | 13.8                                | 12.5                    |
| V227-2      | PAB35    | 1225                             | 15.0             | 14.0                                | 13.6                    |
| V38-2       | PAB35    | 1225                             | 14.0             | 13.0                                | 12.6                    |

*Metoda meritev in analize*

Na testni kol, ki ga zabijamo, pritrdimo na enaki višini pod vrhom kola, na razdalji okrog 2-kratne vrednosti stranice prereza, na dve diametralno nasproti ležeči stranski ploskvi po en merilec deformacij in pospeškov. Z zabijalom povzročeni napetostno-deformacijski val potuje navzdol vzdolž kola in se po odboju, ki je odvisen od robnih pogojev pod konico kola, vrača po kolu navzgor. Z merilci zaznani napetostni valovi se s pomočjo analizatorja zabijanja (Pile Driving Analyser) ustrezno registrirajo in obdelajo, tako da dobimo ob vsakem udarcu zabijala na zaslonu takojšen prikaz dveh časovnih sovisnic: potek osne sile in hitrosti pomika merskega mesta v odvisnosti od časa. Vsi merski podatki se shranijo na trdi disk računalnika PDA-ja, da jih lahko po zabijanju podrobneje analiziramo.

Metodo in postopek meritev predpisuje standard ASTM D4945-89 [1], podan pa je tudi v priporočilu združenja nemških geomehnikov (Recommendation for dynamic pile tests of Technical Committee 5 of the German Geotechnical Society).

Po izvedbi dinamičnega obremenilnega testa se posneti analogni podatki o časovnem spreminjanju sile in pospeška digitalizirajo za analizo po programu CAPWAP (CAse Pile Wave Analysis Program) na računalniku IBM-PC [2], [3], [4]. Program je osnovan na teoriji valovne enačbe. Za izbran reološki model kola in zemljine uporabimo pri računalniški analizi kot vhodne podatke eno izmed omenjenih časovnih sovisnic in izračunamo drugo časovno sovisnico. To izračunano sovisnico primerjamo z ustreznimi izmerjenimi vrednostmi. Z iterativnim postopkom poiščemo takšne parametre zasnovanega reološkega modela kola in zemljine, ki dajejo največjo skladnost izračuna in izmerkov. S postopnim obremenjevanjem tako določenega reološkega modela kola in okolne zemljine dobimo sovisnost obtežbe (tlačne osne sile na glavi kola) in osnega pomika glave kola (računalniška simulacija statičnega obremenilnega testa).

*Potek testiranja kolov*

Prvi dinamični obremenilni test je bil izveden na kolu V15-2 takoj ob koncu zabijanja (ED). Pokazal je, da ima kol že v tistem trenutku mejno nosilnost okrog 1500 kN. Na osnovi tega

preizkusnega zabijanja je bil postavljen kriterij za zabijanje ostalih kolov na objektu (Protokol zabijanja kolov). Vsi ostali testni koli so bili testirani po preteku enega ali več dni po zabitju. Testno ponovno udarjanje je obsegalo od 5 do 20 dodatnih udarcev z zabijalom. Dosežen pogrezek kola je bil izmerjen z natančnim nivelirjem.

#### Rezultati dinamičnih obremenilnih testov

V preglednicah 2 in 3 so prikazani rezultati izvršenih CAPWAP analiz, s katerimi smo določili mejno nosilnost preizkušanih kolov v času testiranja. Poleg oznake kola, tipa kola in datuma meritev je iz preglednic razvidna vrsta izmerjenih in z računalniško analizo ugotovljenih veličin; pomen kratic, ki te veličine podajajo, je pojasnjen pod vsako preglednico.

Povprečni izkoristek zabijala med testnim zabijanjem je bil 69%, povprečna vrednost največje prenešene energije z zabijala na kol je bila  $E_{max} = 19.8$  kNm pri povprečni višini padca udarnega bata  $h = 0.7$  m.

**Preglednica 2: Rezultati CAPWAP analiz testiranih kolov**  
(parametri reološkega modela okolne zemljine in mejne nosilnosti kolov)

| Kol    | Dne   | Čas<br>(dni) | Pen<br>(m) | h<br>(m) | Pos<br>(mm) | Parametri  |            |             |             | Mejna nosilnost |                |                |
|--------|-------|--------------|------------|----------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|-----------------|----------------|----------------|
|        |       |              |            |          |             | Qk<br>(mm) | Qp<br>(mm) | Jk<br>(s/m) | Jp<br>(s/m) | Plašč<br>(kN)   | Konica<br>(kN) | Skupaj<br>(kN) |
| V15-2  | 25.3. | ED           | 14.0       | 0.5      | 3.0         | 8.6        | 1.0        | 0.6         | 0.2         | 498             | 996            | 1494           |
| V154-3 | 16.4. | 4            | 13.9       | 1.0      | 4.0         | 10.1       | 1.6        | 0.2         | 0.9         | 798             | 916            | 1714           |
| V240-5 | 23.4. | 3            | 13.4       | 0.7      | 2.5         | 7.5        | 2.5        | 0.3         | 1.0         | 804             | 840            | 1644           |
| V48-2  | 7.5.  | 7            | 14.0       | 0.8      | 2.5         | 5.8        | 1.5        | 0.1         | 0.7         | 961             | 731            | 1692           |
| V236-1 | 7.5.  | 2            | 13.7       | 0.9      | 2.2         | 5.2        | 1.6        | 0.5         | 0.7         | 891             | 800            | 1691           |
| V187-1 | 23.5. | 30           | 13.7       | 0.6      | 4.5         | 11.8       | 2.0        | 0.6         | 0.4         | 1096            | 213            | 1309           |
| V92-3  | 23.5. | 6            | 13.1       | 0.6      | 1.3         | 5.7        | 2.8        | 0.6         | 1.5         | 676             | 1138           | 1814           |
| V66-1  | 23.5. | 1            | 14.4       | 0.6      | 3.5         | 7.9        | 2.0        | 0.6         | 0.8         | 684             | 448            | 1132           |
| V203-2 | 4.6.  | 0.5          | 13.9       | 0.8      | 2.8         | 7.5        | 2.5        | 0.4         | 0.9         | 678             | 787            | 1465           |
| V84-1  | 4.6.  | 1            | 12.5       | 0.8      | 2.5         | 8.0        | 2.5        | 0.3         | 0.7         | 902             | 913            | 1815           |
| V227-2 | 17.6. | 3            | 13.6       | 0.6      | 2.0         | 11.8       | 1.5        | 0.4         | 0.7         | 900             | 495            | 1395           |
| V38-2  | 18.6. | 3            | 12.6       | 0.7      | 2.0         | 7.2        | 1.3        | 0.2         | 0.8         | 928             | 702            | 1630           |

Pomen oznak:

- Kol ..... Oznaka testnega kola,
- Dne ..... Datum izvajanja meritev (vse meritve so bile opravljene v letu 1996)
- Čas ..... Čas, ki je minil po končanem zabitju kola do testiranja (dni)
- ED ..... ED pomeni meritev, opravljeno takoj po zabitju kola
- Pen ..... Dolžina kola v tleh, v času meritve (m)
- h ..... Višina padca udarnega bata (m)
- Pos ..... Izmerjen povprečni pogrezek kola na en udarec zabijala (mm)
- Qk ..... Elastična deformacija zemljine pod konico (mm)
- Qp ..... Elastična deformacija zemljine ob plašču kola (mm)
- Jk ..... Dušenje zemljine pod konico (s/m)
- Jp ..... Dušenje zemljine ob plašču kola (s/m)

**Preglednica 3: Rezultati CAPWAP analiz testiranih kolov**

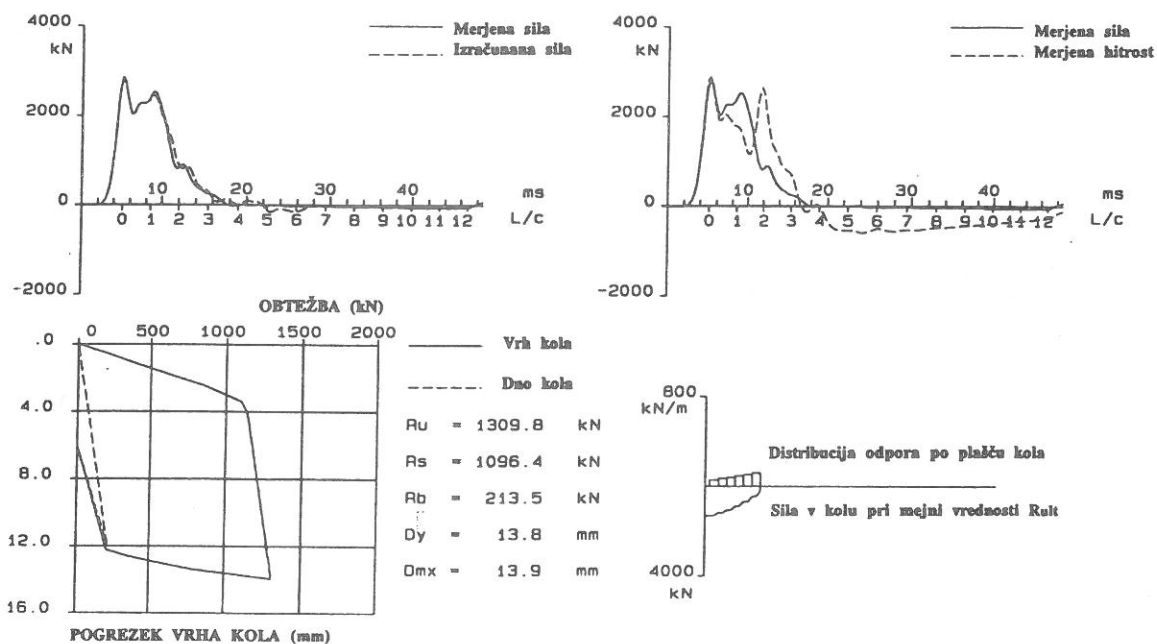
(največje notranje osne sile in največje normalne napetosti)

| Oznaka kolov | Tip kola | Prerez A (cm <sup>2</sup> ) | F <sub>max</sub> (kN) | σ <sub>max</sub> (MN/m <sup>2</sup> ) | F <sub>min</sub> (kN) | σ <sub>min</sub> (MN/m <sup>2</sup> ) |
|--------------|----------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| V15-2        | PAB40    | 1600                        | 2558                  | 16.0                                  | -236                  | -1.5                                  |
| V154-1       | PAB40    | 1600                        | 3266                  | 20.4                                  | -144                  | -0.9                                  |
| V240-5       | PAB40    | 1600                        | 3275                  | 20.5                                  | -126                  | -0.8                                  |
| V48-2        | PAB35    | 1225                        | 2270                  | 18.5                                  | -75                   | -0.6                                  |
| V236-1       | PAB40    | 1600                        | 2600                  | 16.3                                  | -105                  | -0.7                                  |
| V187-1       | PAB40    | 1600                        | 2900                  | 18.1                                  | -170                  | -1.1                                  |
| V92-3        | PAB40    | 1600                        | 2603                  | 16.3                                  | -150                  | -0.9                                  |
| V66-1        | PAB35    | 1225                        | 2155                  | 17.6                                  | -51                   | -0.4                                  |
| V203-2       | PAB40    | 1600                        | 2624                  | 16.4                                  | -13                   | -0.1                                  |
| V84-1        | PAB40    | 1600                        | 2940                  | 18.4                                  | -13                   | -0.1                                  |
| V227-2       | PAB35    | 1225                        | 3327                  | 27.2                                  | -12                   | -0.1                                  |
| V38-2        | PAB35    | 1225                        | 2591                  | 21.2                                  | -20                   | -0.2                                  |

Pomen oznak:

- A ..... Ploščina prečnega prereza kola (cm<sup>2</sup>)
- F<sub>max</sub> ..... Največja izmerjena tlačna (+) osna sila v kolu med testnim zabijanjem (kN)
- F<sub>min</sub> ..... Največja izmerjena natezna (-) osna sila v kolu med testnim zabijanjem (kN)
- σ<sub>max</sub> ..... Največja tlačna (+) osna normalna napetost v kolu med testnim zabijanjem (MN/m<sup>2</sup>)
- σ<sub>min</sub> ..... Največja natezna (-) osna normalna napetost v kolu med testnim zabijanjem (MN/m<sup>2</sup>)

Na sliki 2 je za preiskan kol z oznako V187-1 prikazana z iterativnim postopkom dobljena usklajenost izmerjenih in izračunanih (CAPWAP) časovnih sovisnic sile F=F(t). Prikazan je tudi raznos mejne obtežbe vzdolž kola in razporeditev odporov zemljine ob trupu kola. Prav tako so podani tudi rezultati računalniške simulacije statične obremenilne preizkušnje.

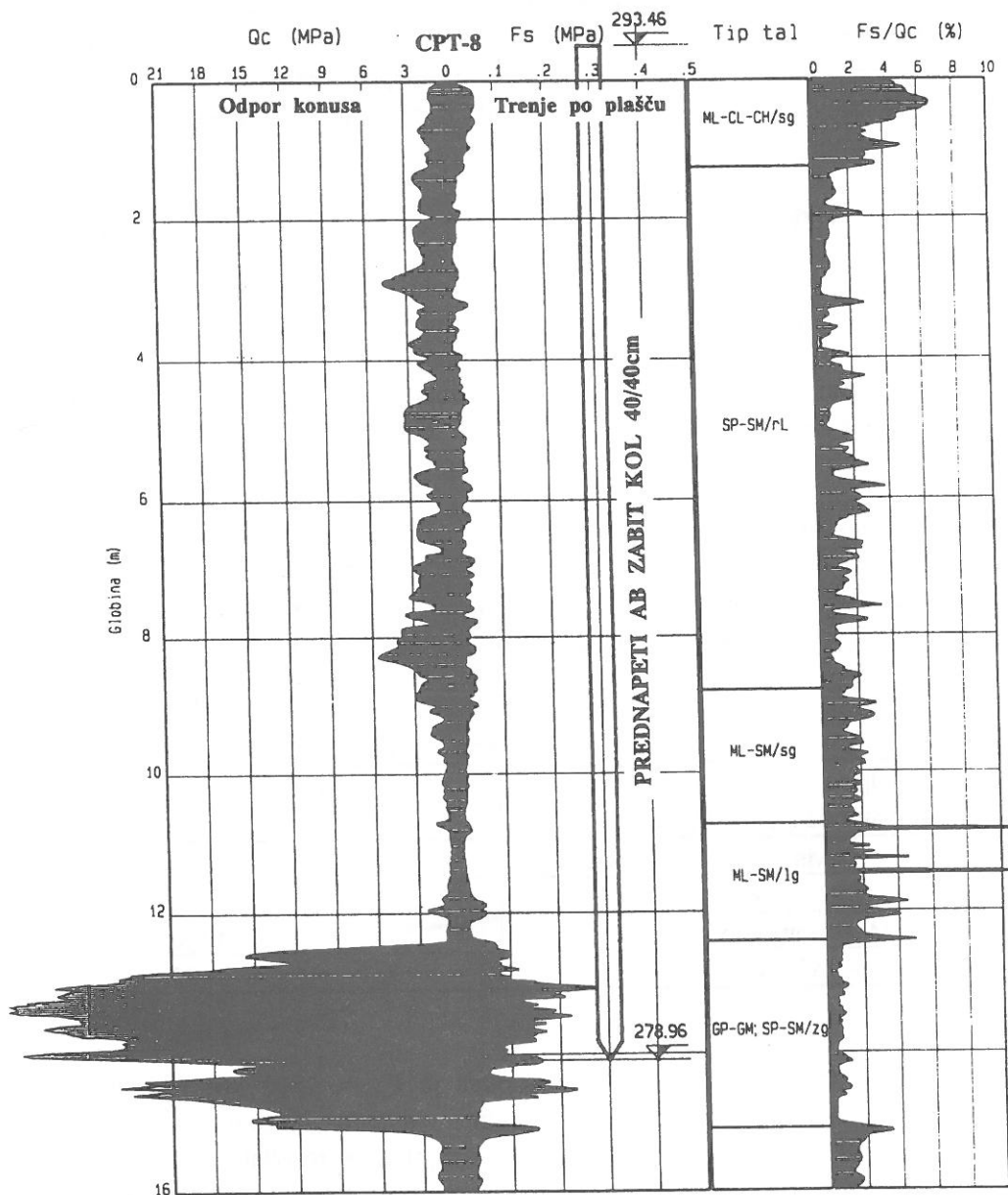


Slika 2. REZULTATI "CAPWAP" ANALIZE ZA PREIZKUSNI KOL V187-1

## Statični obremenilni test

### Podatki o kolu

Za statično obremenilno preizkušnjo je bil izbran kol PAB40 z oznako V187-1, ki je bil zabetoniran 23. marca 1996 in zabit dne 23. aprila 1996. Temu kolu najbližja je sondažna vrtina V-10 in najbližja konusna statična penetracija CPT-8 (slika 3). Dolžina kola skupaj s konusno izoblikovano konico je 14.5 m, prerez kola 40 x 40 cm<sup>2</sup> in teža kola 58 kN. Prednapet je z jeklenimi prameni 8 x 7 φ 3 mm s silo prednapetja N=6.19 kN. Projektirana tlačna trdnost betona je MB40 MN/m<sup>2</sup>, porušna tlačna trdnost odvzetih betonskih kock pa je bila 48 MN/m<sup>2</sup>. Kol je bil zabit v enem segmentu dolžine 14.5 m in ob koncu zabijanja s hidravličnim prostopadnim zabijalom JUNTTAN HH/4 pri višini padca bata 0.5 do 0.6 m ni dosegel predpisanega kriterija pogrezka, ki bi naj bil enak ali manjši od 3.5 mm/udarec.



Slika 3. PROFIL TAL SONDE CPT-8 OB TESTNEM KOLU V187-1

Po končani statični obremenilni preizkušnji je bil pri ponovnem zabijanju (re-driving) izmerjen pogrezek med 4.0 in 4.5 mm/udarec. Za primerjavo naj poudarimo, da je bil pri ostalih kolih, ki so bili zabiti v skladu s predpisanim kriterijem, med testiranjem pri ponovnem zabijanju izmerjen pogrezek le okrog 1.5 do 2.0 mm/udarec. Pred obremenilno preizkušnjo je konica kola segala 13.8 m globoko v temeljna tla (do kote 278.96 m) in vrh 0.7 m nad površje umetno nasutega terena. Glede na navodila podana izvajalcu zabijanja v "Protokolu zabijanja" je bil kol zabit pregloboko, saj se je konica kola ustavila le slab meter pred koncem peščeno prodnatega sloja.

#### *Oprema za obremenjevanje in opazovanje preizkusnega kola*

Za kontroliran način obremenjevanja glave kola z navpično (osno) silo smo uporabili balast iz betonskih kvadrov skupne teže preko 2300 kN, ob katerega sta se opirali dve, med seboj vzporedno povezani hidravlični dvigalki s skupno zmogljivostjo 3800 kN. Ob poskusu "dvigovanja" balasta se je na kol prenašala ustrezna reakcijska sila.

Med preizkušanjem smo merili vertikalne pomike dveh točk na glavi kola z dvema mikrometroma pomik tretje točke z natančnim nivelirjem; nepomičnost repnih nosilcev z mikrometroma in stojišča nivelirja smo preverjali z dodatnim viziranjem na nepomično točko izven vplivnega območja izvajanja obremenjevanja.

#### *Postopek obremenjevanja*

Za določitev sovisnosti med osnimi navpičnimi pomiki glave kola  $u_v$  in osno obtežbo kola  $P_v$  smo uporabili t.i. "ML test", pri katerem večamo obtežbo postopoma, tako da pred prehodom na večjo bremensko stopnjo vršimo opazovanja posebkov kola vse do ustrezne umiritve [5]. Na sliki 4 je prikazana sovisnost med aplicirano obtežbo in izmerjenimi pomiki glave kola ob koncu vsake bremenske stopnje  $u_v = u_v(P_v)$ , na sliki 5 pa sta prikazani časovni sovisnici stopnjevanja osne obtežbe  $P_v = P_v(t)$  in razvoja pogrezkov kola  $u_v = u_v(t)$ .

#### *Rezultati statične obremenilne preizkušnje*

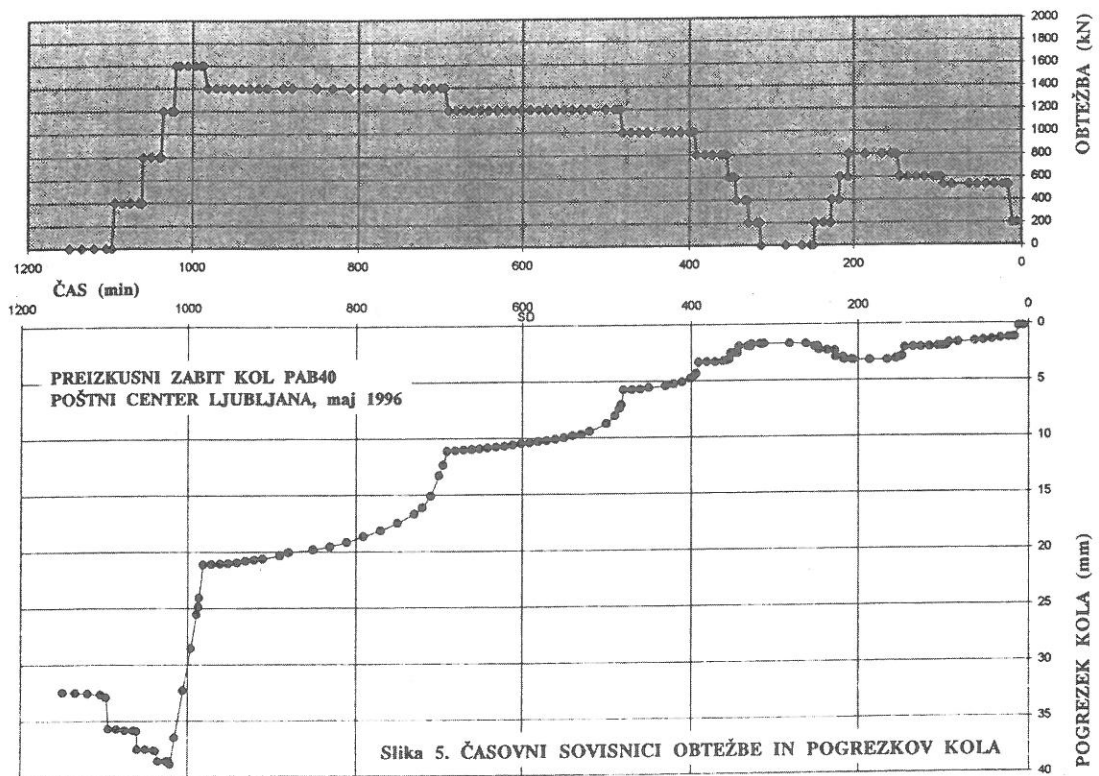
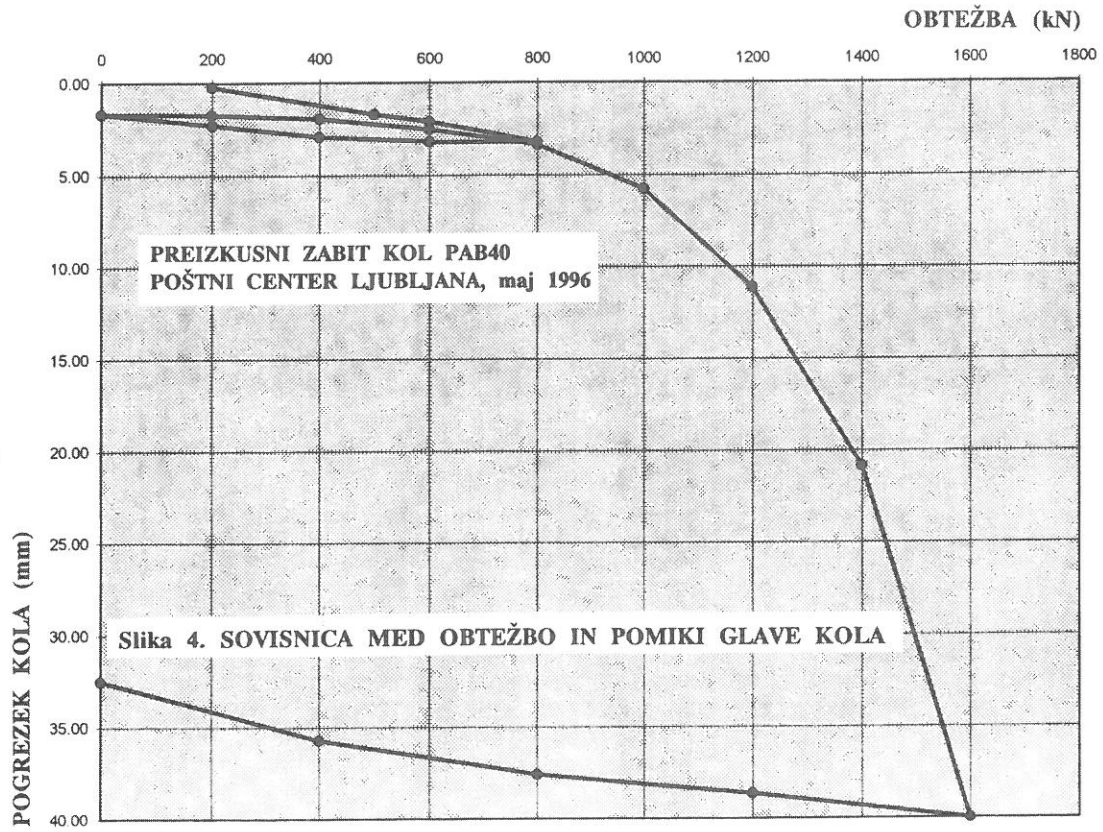
Izmerke preizkusnega obremenjevanja smo analizirali po štirih različnih priznanih metodah [6], [7]. Posamezna izvedenja ilustrirajo slike 6 do 9, dobljene rezultate pa prikazuje preglednica 4.

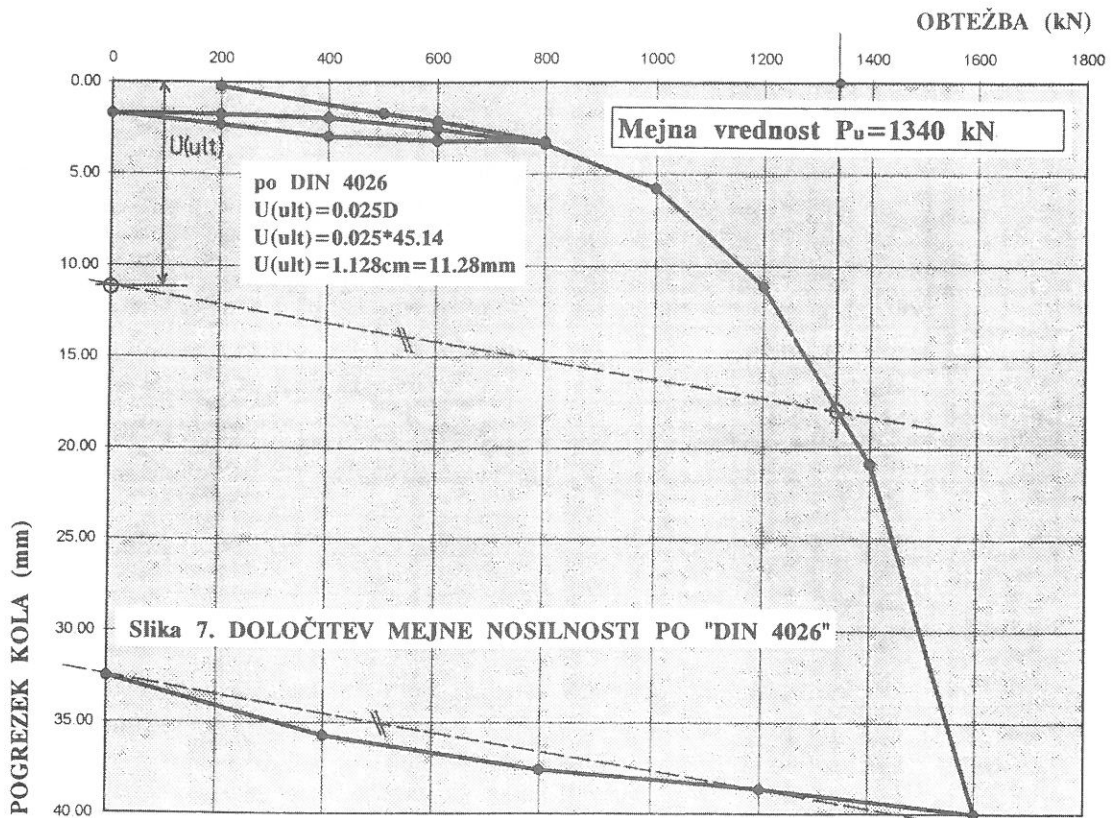
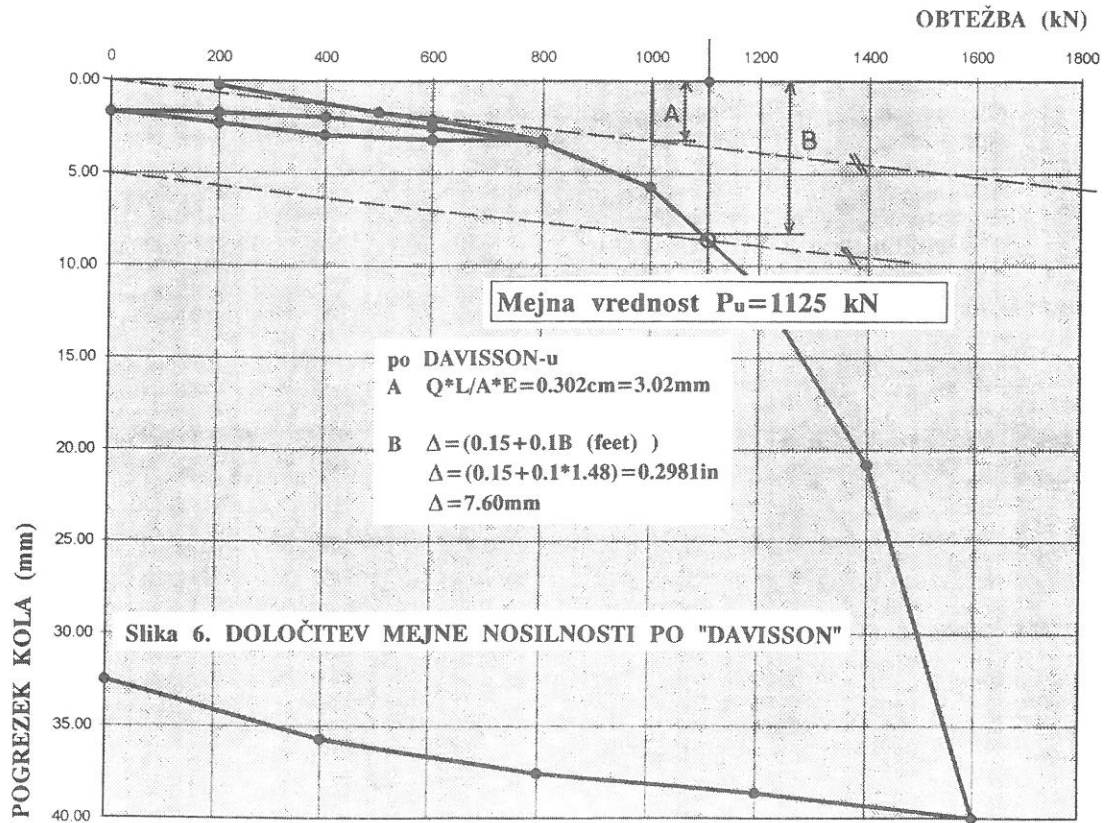
**Preglednica 4:** Mejne nosilnosti kola, izvednotene po različnih metodah

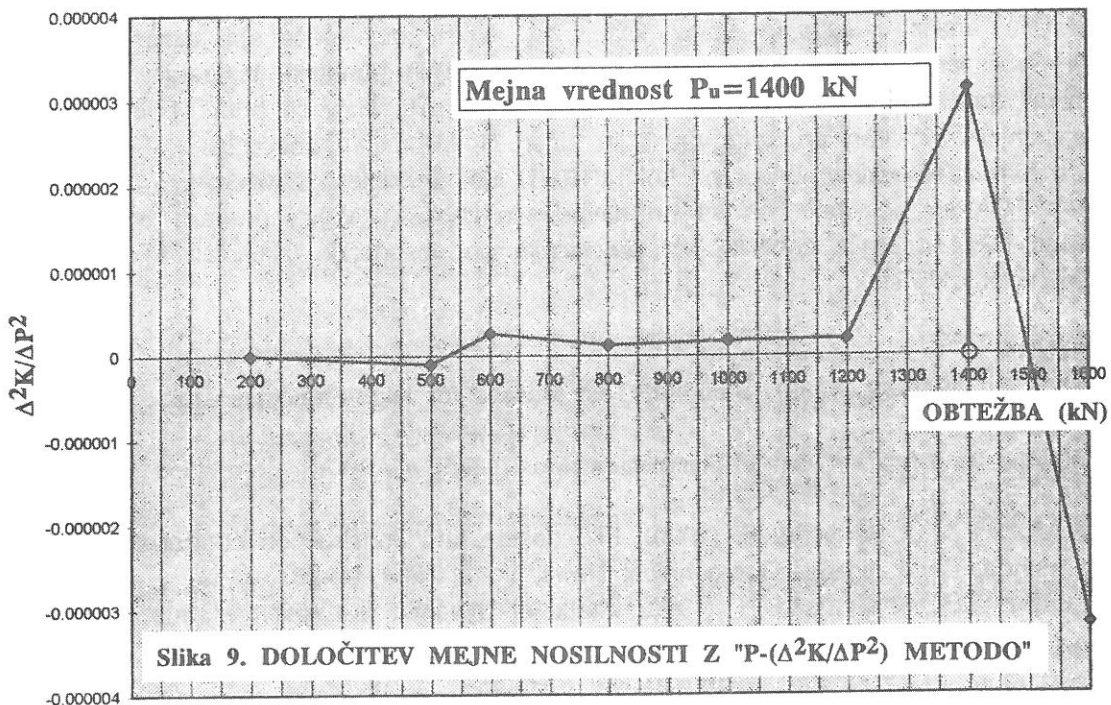
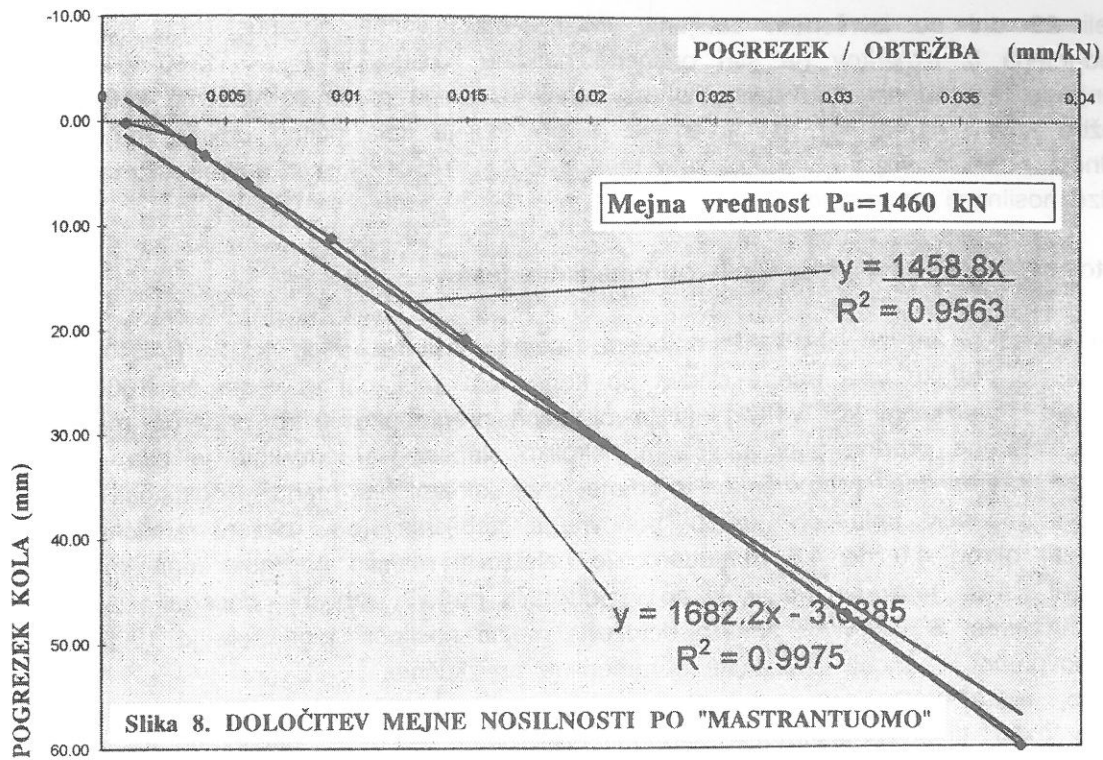
| Metoda uporabljene metode izvednotenja mejne nosilnosti kola $P_u$ (kN) | Mejna nosilnost kola $P_u$ (kN) |
|---|---------------------------------|
| Davisson  | 1125                            |
| DIN 4026  | 1340                            |
| Mastrantuomo  | 1460                            |
| $P - (\Delta^2K/\Delta P^2)$  | 1400                            |

Povprečna vrednost izvednotenih mejnih nosilnosti je  $P_u = 1330$  kN. Najnižjo vrednost daje analiza po Davisson-u. Ostale metode, posebno metoda Mastrantuoma in novejša  $P - (\Delta^2K/\Delta P^2)$  metoda [8], dajeta po našem mnenju verjetnejše rezultate, saj se je pri statičnem obremenjevanju kola z obtežbo 1400 kN pogrezanje kola tudi še "umirilo" (povprečna hitrost pomikov v zadnji uri opazovanja kola je bila manjša od 0.3 mm oz. manjša od 0.1 mm na 20 minut).









## ZAKLJUČEK

### Ugotovitve na osnovi statične obremenilne preizkušnje

Preiskovani prednapeti armiranobetonski kol PAB40 je bil zabit s hidravličnim prostopadnim zabijalom JUNTAN HH/4 skozi heterogene netipične sloje barjanskih tal v prvi peščeno prodni sloj do kote 278.96 m (13.8 m globoko). S statičnim obremenjevanjem kola smo

pričeli 25 dni po izvršenem zabijanju. Mejna osna tlačna nosilnost tega testnega kola, iz vrednotenja iz izmerkov na štiri priznane različne načine, je  $P_u = 1340$  kN. Po našem mnenju je ta vrednost pod dejansko, saj menimo, da je glede na vedenje kola pod testno obtežbo kola  $P=1400$  kN, pri kateri se je pogrezanje kola očitno umirilo, dejanska mejna nosilnost nekoliko višja, t.j. v intervalu med 1400 in 1450 kN, kar najbolj ustreza rezultatom analize nosilnosti po metodi  $P-(\Delta^2K/\Delta P^2)$ .

#### Ugotovitve na osnovi dinamičnih obremenilnih testov

Z računalniško analizo CAPWAP določena mejna nosilnost vseh kolov PAB40, ki so bili testirani po preteku vsaj enega dneva po končanem zabijanju je večja od 1600 kN. Edina izjema je preizkusni kol V187-1, ki je bil zabit pregloboko in to prav na mestu, kjer je nosilna peščeno prodna plast tanjša in nekoliko slabša. Na tem kolu je bila po zaključku statične obremenilne preizkušnje, izvedena tudi dinamična meritev nosilnosti (DOT). Že izmerjen posedek kola ob koncu ponovnega zabijanja (po izvršeni statični preizkušnji nosilnosti) okrog 4.0 do 4.5 mm/udarec je nakazoval manjšo nosilnost tega kola glede na nosilnosti ostalih testiranih kolov, ki so v podobnih pogojih zabijanja dosegali pogrezek pod 2.5 mm/udarec. S CAPWAP analizo določena mejna nosilnost tega kola je 1309 kN, kar je blizu povprečni vrednosti iz statične obremenilne preizkušnje.

Najnižjo, s CAPWAP analizo določeno mejno nosilnost 1132 kN, je pokazal kol PAB35 z oznako V66-1, ki je bil testiran le slab dan po rednem zabijanju. Nedvomno bo tudi ta kol s časom zaradi "utrjevanja okolne zemljine" (set-up efekt), presegel željeno načrtovano vrednost 1200 kN.

Računalniška analiza testiranih kolov kaže, da je bil ob končanem zabijanju povprečni statični odpor zemljine ob plašču 23 kN/m<sup>2</sup>, pri kasnejših ponovnih testiranjih pa povprečno 41.6 kN/m<sup>2</sup> (pri kolu V187-1, po 30 dneh celo 52 kN/m<sup>2</sup>). Največji odpor pod konico je bil med testiranjem aktiviran pri kolu V92-3, in sicer 71 MN/m<sup>2</sup>, v povprečju pa 57 MN/m<sup>2</sup> (ne da bi pri tem upoštevali vrednost pri kolu V187-1, kjer je bil le 1.3 MN/m<sup>2</sup>).

Meritve s PDA so pokazale, da se pri navpičnem zabijanju v kol prenese od 56 do 82% (povprečno 69%) energije zabijala, kar predstavlja po dosedanjih izkušnjah s tem zabijalnim sistemom velik izkoristek.

#### LITERATURA

- (1) ASTM D4945-89 (1989). Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles
- (2) Goble Rausche Likins and Associates, Inc. (1995). CAPWAP Correlation studies. Rev.5/95, 27 strani.
- (3) Hussein, M., Rausche, F. (1990). Pile design and construction control by dynamic methods-Case history. Geotechnical News, Vol.8, No.4, 24-28.
- (4) Edde, R.E., Fellenius, B.H. (1990). Static or dynamic test-Which to trust? Geotechnical News, Vol.8, No.4, 28-32.
- (5) ASTM D1143-81 (1981). Standard test Method for piles Under Static Axial Compressive Load
- (6) Fellenius, B.H. (1994). Limit States Design for Deep Foundations. Proc.of Int. Conf. on Design and Construction of Deep Foundations. Vol.2, Session 1/4, Orlando, 415-426.
- (7) Hunt, R.E., (1986). Geotechnical Engineering Techniques and Practices, McGraw-Hill Book Company, New York, 331-443.
- (8) Baohan, S., Dongsheng, N. (1991). A new method for determining the yield load of piles  $P-(\Delta^2K/\Delta P^2)$ . Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Piling and Deep Foundation, Beijing, 36-40.