

# TEMELJENJE MOSTU ČEZ REKO LJUBLJANICO NA PRULAH FOUNDATION OF BRIDGE ACROSS RIVER LJUBLJANICA

IVAN LESJAK, dipl.inž.gradb., GIP GRADIS LJUBLJANA d.o.o.  
GORAZD STRNIŠA, dipl.inž.gradb., GIP GRADIS LJUBLJANA d.o.o.

**POVZETEK:** Za nadomestitev starega lesenega mostu čez Ljubljanico na Prulah v Ljubljani se je zgradil nov armirano betonski most. Geotehnične raziskave so zaradi diferenčnih posedkov, ki bi se razvili v primeru plitvega temeljenja, med obrežnima in vmesno podporo mostu narekivale globoko temeljenje s koli. Predlagani so bili trije načini izvedbe globokega temeljenja podpor mostu. Kot najbolj ekonomična se je izkazala varianta, kjer so se obe krajni podpori temeljile z zabitimi betonskimi koli in vmesna z uvrtnimi piloti tipa Benotto. Za napoved nosilnosti zabutih betonskih kolov so se poleg geotehničnih podatkov iz vrtin uporabili tudi podatki iz CPT raziskav. Nosilnost zabutih kolov je bila preverjena z dinamičnim obremenilnim testom-PDA. Izdelana je primerjava med napovedanimi in dejansko izmerjenimi nosilnostmi in posecki temeljnega kolovja. Primerjane so tudi nedrenirane strižne trdnosti v mejnem stanju in v času zabijanja kolov.

**SUMMARY:** Old wooden bridge across river Ljubljanica on Prule in Ljubljana was replaced by a new reinforced concrete bridge. Because of differential settlements on shore and offshore foundation support of bridge, in case of shallow foundation, deep foundation on piles was recommended. Three different foundation technologies were suggested. On shore bridge support founded with driven concrete piles and offshore bridge support with bored Benotto piles was established as the most economical solution. Bearing capacity of driven piles was predicted from CPT results and from borehole data. PDA-dynamic load test was used for verification of predicted bearing capacity of piles. Comparisons between predicted and on site measured bearing capacities and pile settlements are elaborated. Undrained shear strength in limit (peak values) and in the end of pile driving (residual values) was also compared.

## 1. UVOD

Temeljenje objekta na koleh je običajno pomembna postavka v ceni objekta. Zaradi tega je pomembno, da se temeljenje na koleh izvede kar najbolj ekonomično, kar pomeni, da se izbere takšne kole, kateri bodo dali najekonomičnejši rezultat ob potrebnih stopnji varnosti temeljne konstrukcije.

V fazi izdelave projekta temeljenja projektant določi nosilnosti kolov na osnovi geotehničnih raziskavah temeljnih tal in nato število ter razpored kolov. Za zahtevne projekte, tako v finančem kakor v tudi tehnološkem smislu, potrebuje projektant podatke o poizkusnem instaliranju kolov in preverjanje nosilnosti kolov z obremenilnim testom. Na osnovi teh podatkov se določijo vsi elementi temeljenja, razen mogoče dolžine kolov katera se po potrebi korigira med izvajanjem del pilotiranja.

V geotehničnih poročilih se običajno za globoko temeljenje predlagajo na tržišču najbolj poznani ali v lastni hiši izvedljivi sistemi, kar je seveda tudi najbolj razumljivo. Ni pa nujno, da je ponujena tehnologija v danih geotehničnih in časovnih razmerah tudi najekonomičnejša. Zato je potrebno narediti primerjalno študijo za več različnih načinov temeljenja objekta, ki mora vsebovati tako tehnično-tehnološke, kakor tudi ekonomske pokazatelje. Investitorju oz. projektantu je na ta način omogočeno, da se na osnovi primerjalne študije odloči oz. izbere najekonomičnejšo tehnologijo temeljenja.

V prispevku želiva avtorja opisati način temeljenja novega mosta čez Ljubljanico na Prulah v Ljubljani, ki se je zgradil v neposredni bližini starega lesenega mosta. Projektant je na podlagi geotehničnega poročila za temeljenje vseh treh podpor bodočega mosta predvidel po tri uvrtnane kole tipa Benotto. Investitor s samo to rešitvijo ni bil zadovoljen in je

zato naročil, da se pripravi nov predlog temeljenja mosta. V novem predlogu je bilo predvideno temeljenje krajnih podpor mosta s koli sistema jet-grouting, srednja podpora pa naj bi se temeljila na dveh uvrtnih kolih tipa Benotto. Sočasno se je preverjala tudi možnost izvedbe temeljenja mosta s prefabriciranimi betonskimi zabitimi koli, ki naj bi pocenili in skrajšali izvedbo temeljenja, kar se je na koncu izkazalo kot najbolj ugodna varianta temeljenja.

## 2. OSNOVNI PODATKI O PROJEKTU

Lokacija novega mosta je tik ob starem lesenem mostu, ki se je zaradi dotrajanosti pred gradnjo novega podrl. Širina novega armirano betonskega mostu je 15m, dolžina pa ca. 62.6m. Konstrukcija je simetrična glede na vzdolžno os tako, da normalni profil mostu omogoča dvosmerni prevoz motornih vozil na sredini mostu, na zunanjih straneh pa kolesarski promet in prehod peščev. Vzdolžna os novega mostu je v osi starega mostu oz. v osi Opekarske ceste, prečna os pa je v sredini med obena brežinama Ljubljaniče.

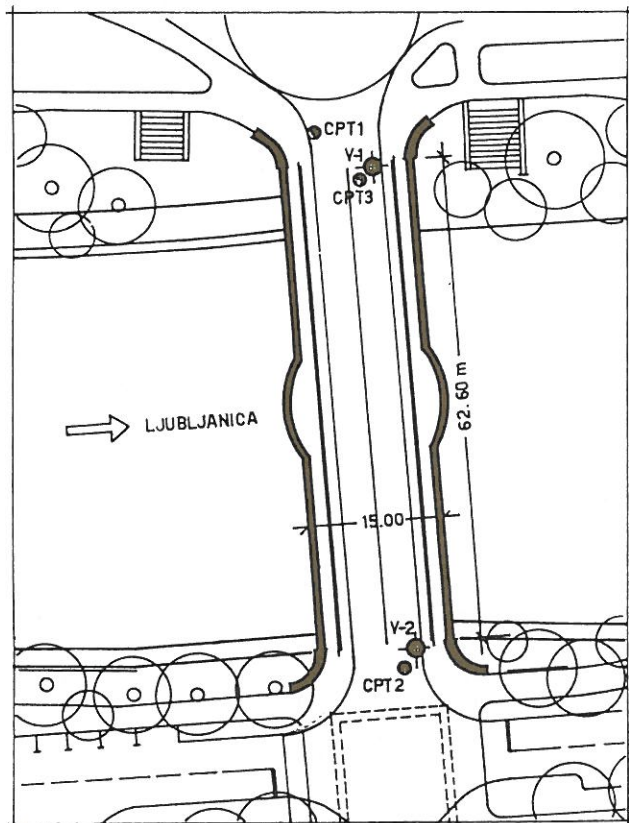
Konstrucijsko gledano je novi most zasnovan kot kontinuiran z eno vmesno in dvema krajnima podporama. Iz vzdolžnega profila mostu je razvidno, da je most tlorisno rahlo konveksno zakrivljen.

Že v preliminarnem geotehničnem poročilu je geomehanik odsvetoval plitvo temeljenje krajnih podpor na temeljni plošči zaradi prevelikih diferenčnih posedkov, ki bi po izračunih, med srednjo in krajnima podporama, znašali ca. 12cm.

Projektant mostu-statik je zato za temeljenje vseh treh podpor mostu predvidel uvrtnane kole sistema Benotto. Ker je investitor zahteval novo rešitev temeljenja mostu, so se v ta namen izdelale dve sondažne vrtnice in pripravil se je



izvedbeni projekt za temeljenje novega mostu. V novem projektu je bilo predlagano temeljenje krajnjih podpor mostu s koli sistema jet-grouting premera 50cm, srednja podpora pa naj bi se temeljila na dveh uvrtnih kolih tipa Benotto premera 150 cm z razširjeno konico, ki naj bi se izvedla z miniranjem tako, da bi bil premer konice oz. noge ca. 2m.



SLIKA 1. Tloris mostu s situacijo geotehničnih raziskav.

Po dogovoru med investitorjem in potencialnim izvajalcem del pilotiranja se je preverjala tudi možnost izvedbe temeljenja mostu s prefabriciranimi prednapetimi armirano betonskimi zabitimi koli dimenzij 35/35cm, ki naj bi pocenili in rokavno skrajšali izvedbo temeljenja in s tem tudi objekta kot celote. V ta namen so bile izvedene dodatne raziskave temeljnih tal s konusnim statičnim penetrometrom (v nadaljevanju CPT). Na osnovi teh raziskav je bil izdelan predlog in kasneje po reviziji tudi projekt temeljenja mostu na zabitih PAB kolih (določitev dopustne obremenitve in posedkov temeljnega kolovja).

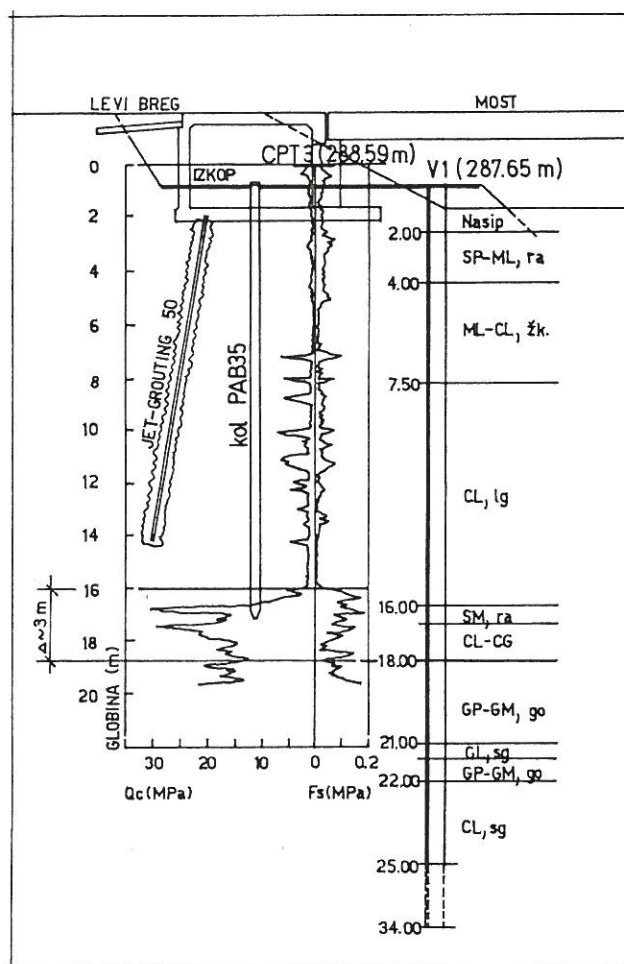
### 3. GEOTEHNIČNE RAZISKAVE TEMELJNIH TAL

V septembru leta 1991 je bila na vsakem bregu izvrtana po ena sondažna vrtina dolžine 34.0m (V-1 na levem bregu) ter 42.0m (V-2 na desnem bregu). Iz geotehničnega poročila je razvidno, da na obeh bregovih nastopajo v zgornjih plasteh zelo heterogena in v splošnem slabo nosilna tla (melj, meljna glina, meljna mivka in puste glinje) do absolutne kote +269.7m na levem bregu ter +272.3m na desnem bregu. Pod omenjenima kotama se nahaja srednje gost prod in

srednje gnetna glina, ki na globini 25.0 m (levi breg) oz. 34.6 m (desni breg) prehaja v gost karbonatni prod.

Geotehnične karakteristike prodno peščenega sloja, v katerem naj bi se nahajala noga Benotto kola (kota +256.50m), so bile privzete na osnovi SPT raziskav. Za napoved statične nosilnosti 26.5m dolgega stoječega Benotto kola premera 150cm (premer noge 2.0m), se je za izračun dopustne obremenitve predvidel strižni kot  $\varphi=35^\circ$ , kohezija  $c=0$  in prostorniska teža zemeljine  $\gamma=21.0$  kN/m<sup>3</sup>. Po obrazcih Meyerhofa je bila napovedana dopustna obremenitev na kol ca. 8950 kN.

Dopustna nosilnost 12m dolgega jet-grouting kola premera 50cm, ki naj bi se uporabili za temeljenje obrežnih podpor, je bila ocenjena na ca. 210 kN. Nosilnost kola je bila računana samo po obodu plašča, ker se je po projektu noga kolov nahajala v meljnih glinah lahko gnetne konsistence. Pričakovani računski posedkki so bili ocenjeni na 5cm in diferenčni na ca. 3cm.



SLIKA 2. Prerez skozi levo obrežno podporo s podatki vrtine V-1 in penetracije CPT1 ter vrisano pozicijo kola P2/L.

Za dopolnitev fonda podatkov in za potrebe projektiranja temeljenja krajnjih podpor na zabitih PAB kolih so se najprej

izvedle dve CPT sonde, po ena na vsaki obrežni podpori in naknadno še ena dodatna na levem bregu Ljubljance. Penetracija z oznako CPT1 se je izvedla do globine 28m merjeno od absolutne kote +290.46m in penetracija CPT2 do globine 33m, merjeno od kote +290.45m absolutno. Pri tem je penetracija CPT2 izkazala nekoliko boljše trdnostno-deformacijske karakteristike kot penetracija CPT1.

Rezultati raziskave s statičnimi konusnimi penetracijami so pokazale, da znaša debelina prvega prodnega peščenega sloja sloja okoli 6m, relativna gostota 60% do 80%, trenjski kot 37 do 42 in deformacijski modul 35 MPa do 70 MPa.

Po detajlnem pregledu obeh sondažnih vrtin in obeh penetracij smo ugotovili, da nastopa razlika pri določitvi globine prvega nosilnega prodno peščenega sloja na levem bregu (vrtina V-1 in CPT1). Razlika je znašala ca. 3m (glej sliko 2 in preglednico 1), kar nas je močno presenetilo in navedlo na sum, da so globinski podatki iz vrtine V-1 napačni. Zaradi tega smo se odločili izvesti še eno dodatno tj. tretjo penetracijo CPT3, ki se je izvedla samo do globine 19m od absolutne kote +288.59m, tik ob sondažni vrtini V-1. Penetracija CPT3 je potrdila našo prvotno ugotovitev.

**PREGLEDNICA 1.** Absolutne kote prvega nosilnega prodno peščenega sloja ugotovljenega iz sondažnih in CPT raziskav

Oznaka vrtine ali CPT	Absolutna kota proda (m)	Opomba
V1	+ 269.70!	levi breg
CPT1	+ 272.70	levi breg
V2	+ 272.30	desni breg
CPT2	+ 272.70	desni breg
CPT3	+ 272.80	levi breg

## 4. PROJEKT TEMELJENJA NA ZABITIH KOLIH

### 4.1 Napoved nosilnosti kolov

Po izvedbi raziskav tal smo direktno iz rezultatov obdelave CPT podatkov izračunali dopustno obremenitev zabitega kola PAB35 po obrazcih Meyerhof-a (Uradni list SFRJ, št.15/90, marec 1990) in po izvornem postopku SGRD. Ta izvorni postopek je izpeljan na podlagi številnih primerjav rezultatov CPT in dinamičnih obremenilnih testov.

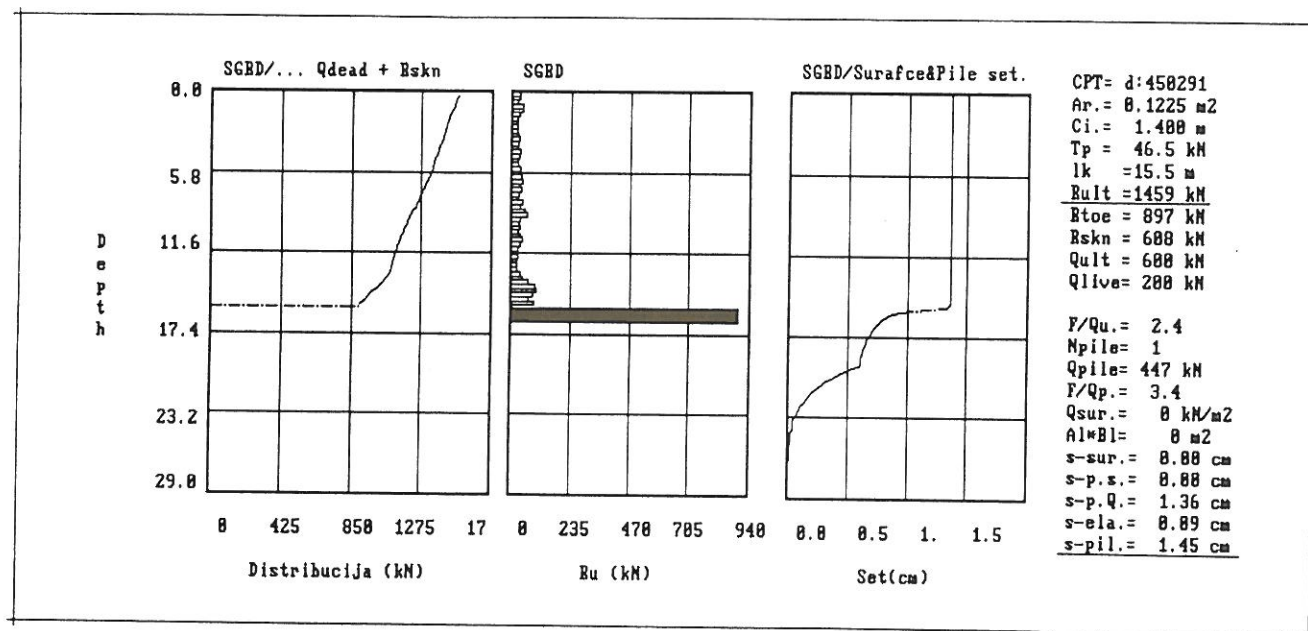
Napovedana dopustna obremenitev zabitega kola PAB35, po obrazcih Meyerhofa, je bila ob upoštevanju lastne teže kola 707 kN. Pri konici kola je bil upoštevan trenjski kot  $\varphi=39^\circ$ .

Izračun mejne nosilnosti zabitega kola PAB35 dolžine 15.0m (od kote dna temeljne plošče ca. +286.80m) direktno iz rezultatov konusne statične penetracije izkazuje povprečno mejno nosilnost preko 1200 kN. Pri upoštevanju varnostnega količnika  $F=2.00$  do  $F=2.50$  je ocenjena dopustna vertikalna obremenitev posameznega zabitega kola PAB35 izkazala vrednost 600 kN. Računska mejna nosilnost na lokaciji penetracije CPT2, ki izkazuje boljše trdnostno-deformacijske karakteristike tal, pa celo 1459 kN (slika 3).

### 4.2 Napoved posedkov kolov

Za oceno posedanja smo izvedli izračun na osnovi obdelave rezultatov CPT, kjer smo upoštevali 100% stalne obtežbe in 50% koristne obtežbe. Izračun je bil izveden na dva načina.

Prvi izračun je potekal na osnovi priporočil FHWA-DP-66-1 (Manual on Design and Construction of Driven Pile Foundations), kjer se obtežba na kole v celoti aktivira na 2/3 dolžine kolov in tvori pri konicah kolov bremensko ploskev. V tem primeru so bili posedki za skupino kolov ca. 2cm.



SLIKA 3. Rezultati napovedi nosilnosti, distribucije odpora in pričakovanih posedkov na lokaciji penetracije CPT2.



Drugi način izračuna poteka iz rezultatov CPT tako, da se upošteva raznos obtežbe skladno z aktiviranimi odpori posameznih slojev vzdolž kola in konice na nivo konice kolov. Za izračun posedekov so bili upoštevani deformacijski moduli, kot so bili ugotovljeni v rezultatih obdelave CPT raziskav. Izračun je izkazal vrednost ca. 1.5cm končnega poseodka za skupino kolov.

Rezultati napovedi mejne nosilnosti in končnega poseodka zabitega kola PAB35 iz rezultatov CPT2 raziskav so prikazani na sliki 3.

#### 4.3 Število in razpored kolov

Projektant je za varen prenos reakcije mostu ca. 4500 kN na krajnih podporah izbral 9 zabutih kolov PAB35 dolžine 16.0m in tri dodatne konstruktivne kole. Ker je bila razdalja med posameznimi koli manjša kot 1.5m (1/10L) je projektant ustrezno reduciriral dopustno obremenitev kolov.

Pri varianti z jet-grouting koli pa je bilo predvidenih 21 komadov kolov premera 50cm in dolžine 12.0m. Pri obeh primerih lastna teža armirano betonskega opornika (kinete) ni bila upoštevana, ker se kompenzira z razbremenitvijo zaradi izkopa.

Po izdelavi projekta temeljenja je, zaradi dvomov o zadostni globini temeljenja zabutih kolov, investitor zahteval mnenje neodvisne institucije. Skupaj z izvajalcem in projektantom je bilo dogovorjeno, da se pred dokončno odobritvijo

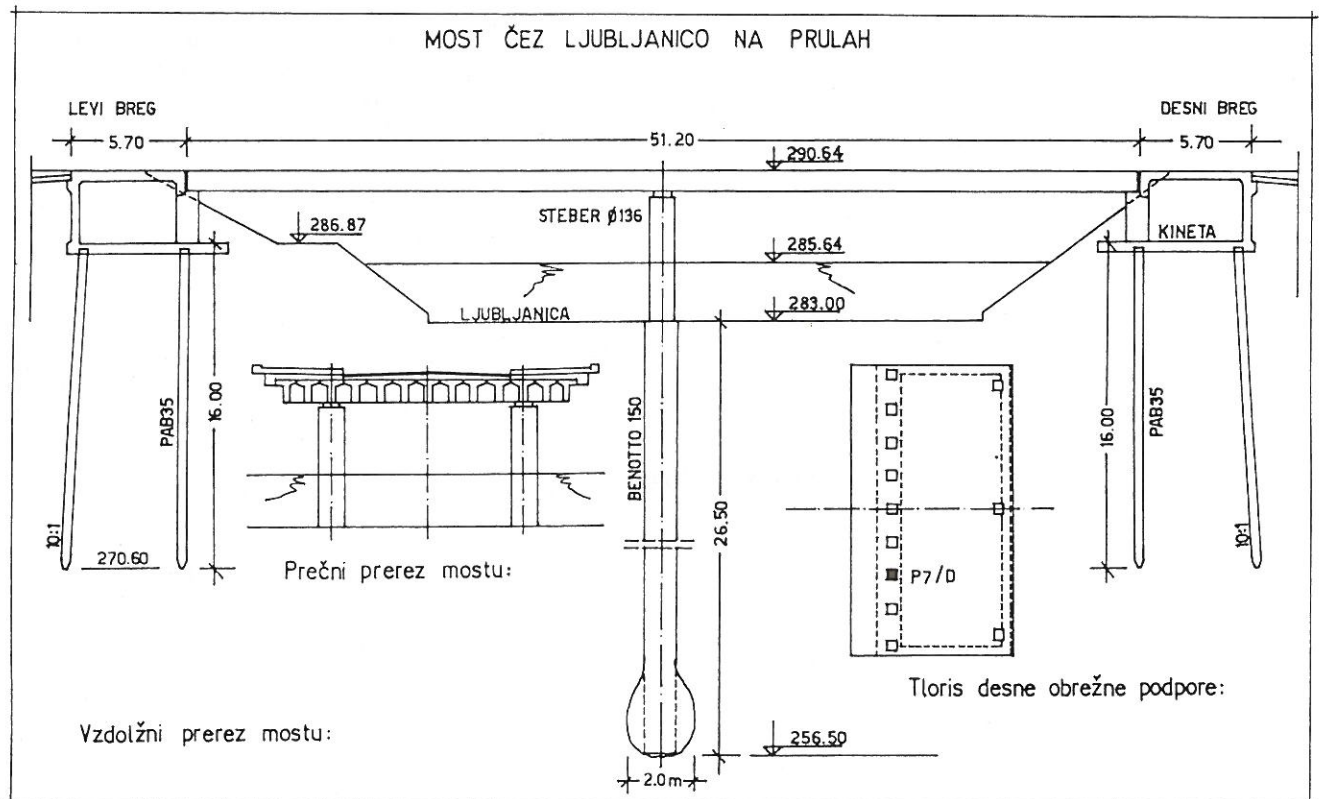
predlaganega temeljenja na zabutih kolih izvede dinamični obremenilni test zabitega kola PAB35.

#### 4.4 Izbor ustreznega zabijala

Pred izvedbo poizkusnega zabijanja je bilo potrebno tudi preveriti s kakšnim zabijalom je mogoče kole varno zabiti do napovedane nosilnosti pri izbranih (poznanih) podatkih o kolu in zemljini. Preverjanje zabijala smo izdelali z valovno analizo-WEAP program.

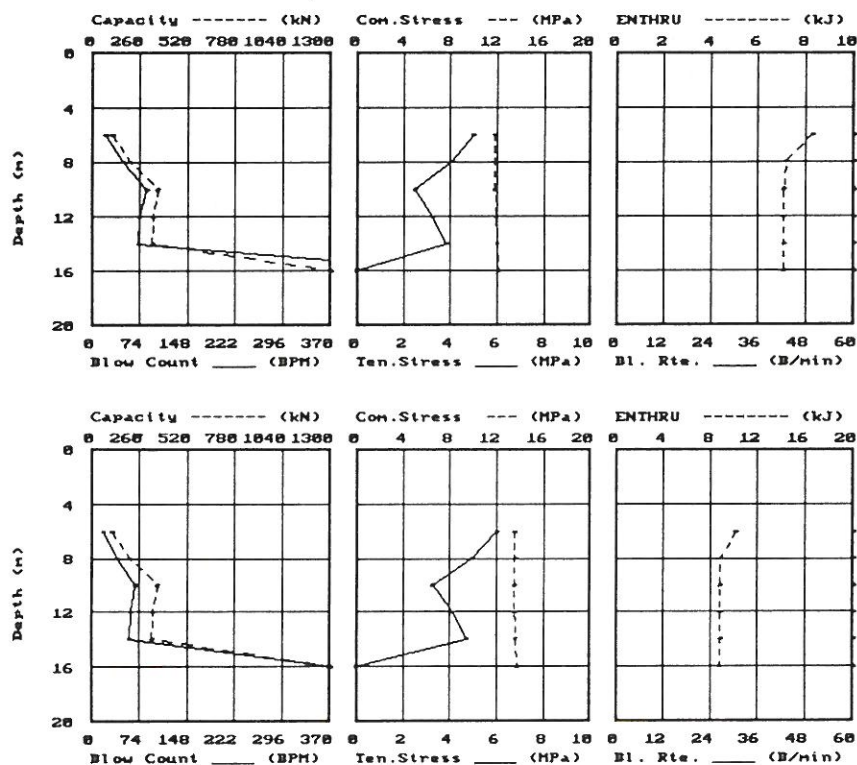
Model zemljine je bil privzet iz posnetka temeljnih tal na lokaciji CPT3, za zabijanje pa smo izbrali prosto padno hidravlično zabijalo JUNTAN s štiri tone težkim batom. Kot dušilni material kola je bila predvidena vezana plošča (trd les) v debelini 35mm. Valovna analiza je bila izvedena po globini penetriranja kola (Blow Count Versus Pile Penetration) tako, da je bilo mogoče iz rezultatov analize predvideti obnašanje kola med zabijanjem.

Podrobnejši pregled rezultatov valovne analize je pokazal, da bo potrebno od začetka kole zabijati z majhno energijo (padec bata zabijala ne sme presegati višine 0.25m), skozi mehkejšo plasti tal, zaradi prevelikih natezih napetosti, ki lahko porušijo kol. Največja absolutna tlačna napetost 13.7 MPa se bo pojavila ob koncu zabijanja (v prodno-peščeni plasti) pri penetraciji kola 16.0m, ki je precej manjša kot dovoljena napetost pri zabijanju. Za doseganje mejne nosilnosti ca. 1200 do 1300 kN bo potrebno na projektirani koti (-16.0m od površja terena) doseči pogredek kola med



SLIKA 4. Vzdolžni in prečni prerez mostu ter tloris razporeditve kolov na desni obrežni podpori.

## W E A P rezultati



SLIKA 5. Rezultati valovne analize po globini za zabijanje kola PAB35 z zabijalom JUNTAN HH4 na lokaciji CPT3.

koti (-16.0m od površja terena) doseči pogrezek kola med 2.5-3.0mm na udarec zabijala oz. 400-330 udarcev za meter penetracije kola.

Na sliki 5 so prikazani rezultati valovne analize. Na zgornjih grafih so prikazane vrednosti, ki veljajo do globine 15m in na spodnjih grafih vrednosti, ki veljajo od globine 15m naprej, ker je v valovni analizi, prav na tej globini, upoštevana sprememba višine padca bata zabijala iz 0.25m na 0.35m.

### 5. DINAMIČNI OBREMILNI TEST

Osnovni namen testiranja (dinamičnega obremenilnega testa) je bil, da se preveri napovedana nosilnost in kontrolira zveznost prečnega prereza merjenega kola. Poleg tega pa je bil namen testiranja tudi določitev ustreznega kriterija zabijanja in preverjanje lege nosilnega gramoznega sloja, ki je bil raziskan v prvotni fazi s sondažnim vrtnjem in naknadno še s konusnimi statičnimi penetracijami.

Dinamični obremenilni test vodilnega kola PAB35 z oznako P2/L se je izvedel na lokaciji leve obrežne podpore mostu od nivoja delovnega platoja na koti +287.47m absolutno. Za zabijanje smo uporabili prostopadno hidravlično zabijalo tipa JUNTAN HH4 s štiri tone težkim batom. Kot dušilni material kola smo uporabili vezano ploščo debeline 35mm.

Pred začetkom zabijanja je bila izkopana ca. 1.30m globoka jama zaradi lažje nastavitve kola v položaj za zabijanje. Po nastavitvi je kol pod lastno težo in težo zabijala lezel (se pogrezal) do globine 5.80m od površine delovnega platoja, ki je bil na koti ca. +286.50m absolutno. Od tu dalje se je kol zabijal pri višini padca zabijala 0.25m do 0.30m kontinuirano do globine 15.10m od površine tal. Pri tej globini se je za nadaljevanje zabijanja povečala energija zabijanja (višina padca bata je bila od 0.25m zvišana na 0.35m) ob istočasni uporabi nastavka (podaljšek iz jeklene cevi), s katerim se je kol zabil do globine 15.90m od površja delovnega platoja.

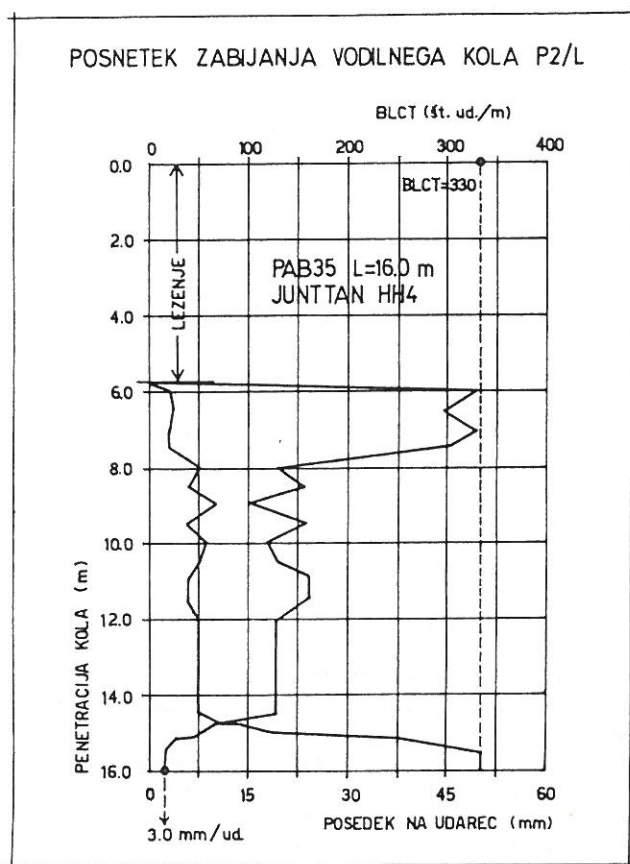
Dokler se konica kola ni dotaknila nosilnega prodno peščenega sloja, je bil posedek kola na udarec zabijala med 2cm do 5cm. Posedek kola na udarec zabijala je pričel hitro upadati na globini ca. 14.80m in na projektirani koti (na globini 15.90m od površja platoja) ob koncu zabijanja (ED) dosegel vrednost 3.0mm oz. 330 udarcev za meter penetracije kola (BLCT). Konica kola je segala približno 1.0m v prodno peščena tla (glej sliko 2).

Ob dobjanju kola čez približno dve uri, pri istih pogojih zabijanja, je bil izmerjen posedek na udarec zabijala 1.5 mm.

Po zaključku terenskih meritev smo podatke testiranega vodilnega kola P2/L obdelali s CAPWAP programom.



Ugotovili smo, da je znašala mejna nosilnost v času ob koncu instaliranja kola (ED) ca.1350 kN. Pri ponovnem testiranju čez ca. dve uri RD(1) po instalaciji kola, pa je mejna nosilnost narasla na ca. 1460 kN. Iz rezultatov teh dveh meritev je opaziti (glej preglednico 2), da se je nosilnost povečala samo po plašču (iz 455 kN na 559 kN), medtem ko je na konici kola ostala ista. Kljub nekoliko majhnim stalnim posedkom kola ob testiranju smo mnenja, da smo v celoti ali vsaj v pretežni meri aktivirali celoten odpor zemljine, saj so bili dinamični pomiki kola med testiranjem med 8mm do 10mm.



**SLIKA 6.** Posnetek penetriranja (zabijanja) vodilnega kola P2/L po globini

**PREGLEDNICA 2.** Rezultati dinamičnih obremenilnih testov in CAPWAP analiz

Oznaka kola	Način meritev	CAPWAP (kN)			Posedek kola (mm/ud.)
		plašč	konica	skupaj	
P2/L	ED	455	899	1354	3.0
P2/L	RD(1)*	559	904	1463	1.5
P7/D	RD(1)	554	711	1265	2.0

**Opombe:**

ED ... testiranje ob koncu zabijanja

RD(dni) ... testiranje po preteku določenega časa od zabitja kola

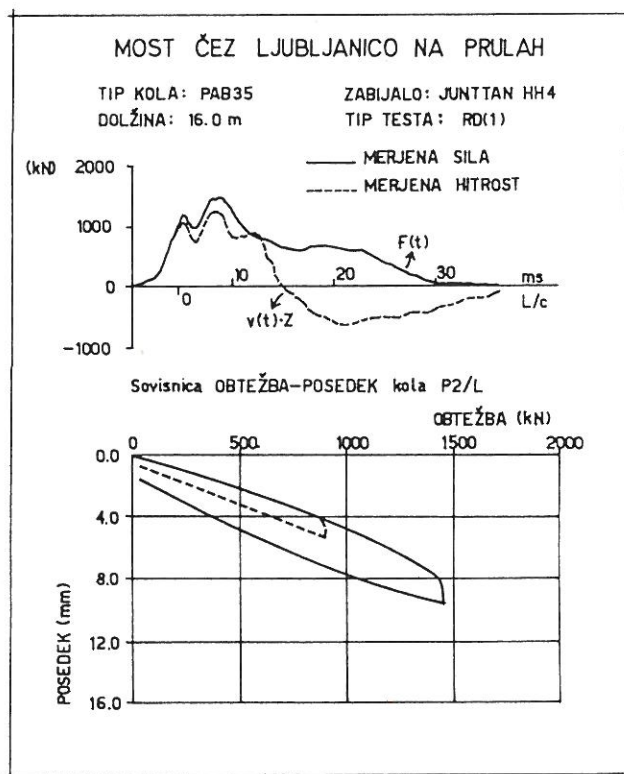
\* ..... kol je bil ponovno testiran dve uri po instalaciji

CAPWAP analiza je tudi pokazala, da je pri mejni nosilnosti 1463 kN elastična deformacija zemljine ob plašču 2.54mm in na konici 5.52mm ter, da je dušenje zemljine (Smith) ob plašču 0.33 s/m in na konici 0.36 s/m.

Revident je iz dobljenih rezultatov zaključil, da so projektirani zabiti betonski koli PAB35 primerni za temeljenje obrežnih opornikov mostu čez Ljubljano na Prulah kot je bilo predlagano s projektom izdelanim v novembru 1991. Na osnovi revidentovega mnenja je izvajalec tudi dobil investitorjevo zaupanje in naročilo, da opravi predvideno pilotiranje.

Izvajalec pilotiranja je upošteval in tudi realiziral revidentov predlog, da je potrebno enak dinamični obremenilni test za dokaz nosilnosti izvesti tudi na nasprotni obrežni opori.

Testiranje vodilnega kola P2/L je bilo osnova za izdelavo "Protokola zabijanja kolov" v katerem je bil predpisan način zabijanja s hidravličnim prosto padnim zabijalom JUNTTAN HH4 in zabijalni kriterij t.j. potrebna globina zabitja v nosilni prodno peščeni sloj in posedek kola na 1 udarec zabijala v dveh zaporednih serijah po 10 udarcev. Zaradi prisotnosti nateznih sil v koles, ki so nastopile med zabijanjem skozi gornje nenosilne plasti zemljin, je bila višina padca bata zabijala, od začetka zabijanja do kote ko se za nadaljevanje zabijanja uporabi nastavek, omejena na maksimalno 0.25m. Od tam naprej pa do končne kote so se koli zabijali z višino padca bata zabijala 0.35m .



**SLIKA 7.** Odziv merjenega kola v obliki krivulje  $F(t)-v(t)*Z$  in rezultat dinamičnega obremenilnega testa kot sovisnica obtežba-posedek za vodilni kol P2/L.

**PREGLEDNICA 3.** Vrednosti količnikov varnosti med mejno nosilnostjo zabutih kolov in maksimalno obtežbo na kole

Oznaka kola	Qm Mejna nosilnost (kN)	N Obtežba na kol (kN)	Varnost $F=Qm/N$
P2/L	1460	600	2.43
P7/D	1260	600	2.10

**Opomba:**

Mejna nosilnost je bila določena en dan po instalaciji obeh kolov (glej preglednico 2)

V preglednici 3 sta prikazana količnika varnosti med mejno nosilnostjo zabutih kolov in maksimalno obtežbo na kole, ki je znašal v času meritev (ni v polni meri upoštevan časovni efekt naraščanja nosilnosti kolov) povprečno  $F=2.25$ , kar zadovoljuje projektne zahteve.

**6. PRIMERJAVA REZULATATOV**

Povratne informacije so zmeraj koristne in pomembne, da se ugotovi razlika med projektiranimi (računsko napovedanimi) in dejansko izmerjenimi vrednostmi. V našem primeru nas seveda najbolj zanima razlika med napovedanimi in izmerjenimi nosilnostmi pilotov ter posedkov zabitega kolovja. Prav tako so zanimiva tudi razmerja med na različne načine določenimi trdnostnimi karakteristikami tal, kar bomo prikazali v nadaljevanju prispevka.

**PREGLEDNICA 4.** Primerjava računsko napovedanih in dejansko izmerjenih nosilnosti zabutih kolov PAB35

Način napovedi oz. izmerjenja	NOSILNOST (kN)		
	plašč	konica	skupaj
* MEYERHOF (CPT)	441	342	707
* SGRD (CPT1)	559	781	1295
**CAPWAP (P2/L)	559	904	1463
* SGRD (CPT2)	608	897	1459
**CAPWAP (P7/D)	554	771	1265

**Opombe:**

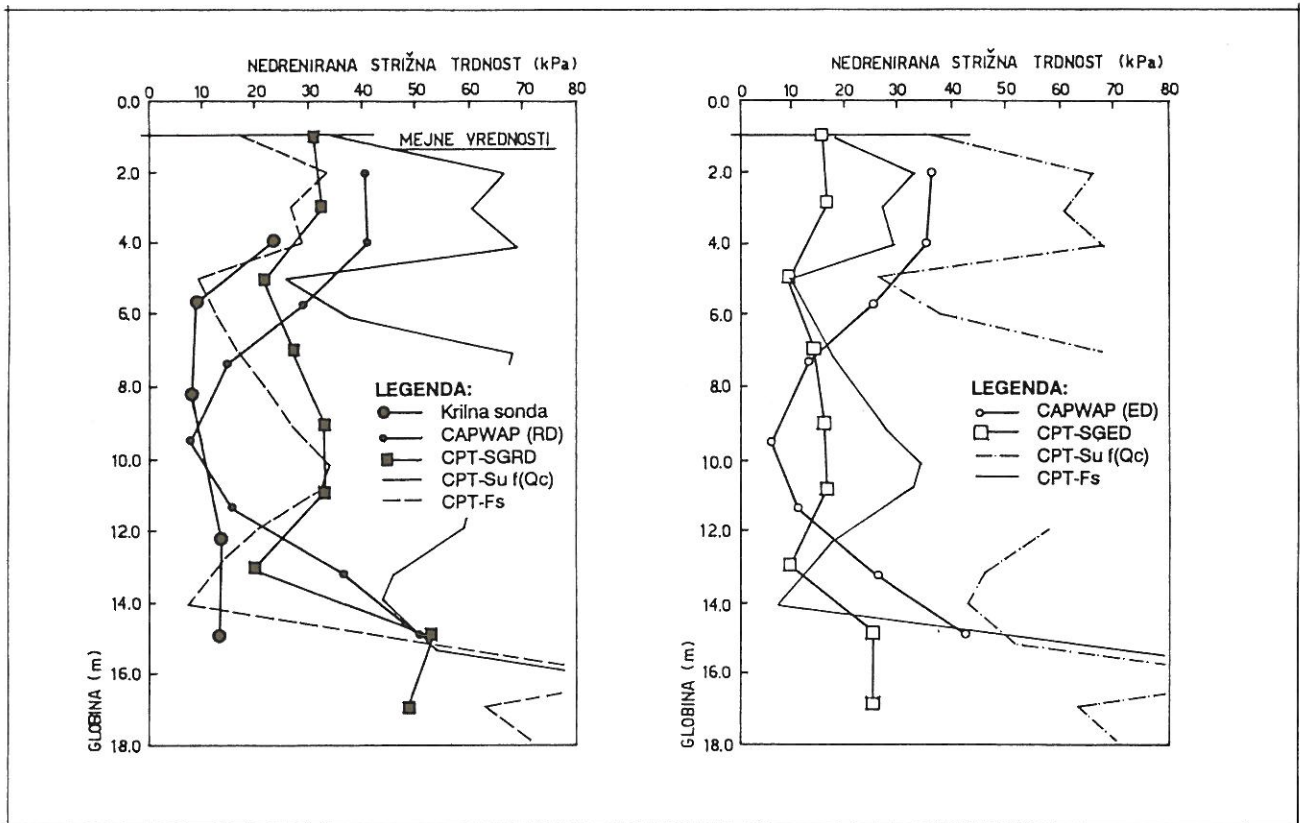
Vrednosti napovedane po Meyerhofu so dopustne, medtem ko so ostale vrednosti mejne

\* .... napovedane vrednosti

\*\* ... izmerjene na terenu (dinamični obremenilni test)

V preglednici 4 ja razvidno, da je ujemanje mejne nosilnosti določene z dinamičnim obremenilnim testom (CAPWAP) in mejne nosilnosti določene po postopku SGRD iz CPT, izjemno dobro. Opazno je, da kljub dobremu ujemanju celotne mejne nosilnosti nastopa določena razlika pri mejni nosilnosti po plašču in na konici kola. Ob upoštevanju globalnega količnika varnosti  $F=2.0$  pri računu dopustne obremenitve po Meyerhofu (CPT), je tudi v tem primeru ujemanje več kot zadovoljivo ( $Qm=707 \text{ kN} * 2.0=1414 \text{ kN}$ ).

Precej manjša pa je na ta način določena mejna nosilnost, v



**SLIKA 8.** Primerjava vrednosti nedreniranih strižnih trdnosti na lokaciji vrtine V-1 in CPT3, kjer je bil zabiti in izmerjen kol P2/L.



kolikor bi se za račun nosilnosti konice po Meyerhofu privzel strižni  $\varphi = 35^\circ$ .

Iz primerjave predvidenega poteka zabijanja kolov (slika 5) in na terenu izmerjenih posedkov kola na udarec zabijala (slika 6) je razvidno zelo dobro ujemanje posedkov v spodnjem delu (pri globini kola od 15m do 16m), medtem ko je v zgornjem delu kol namesto napovedanih 15mm dejansko penetriral povprečno 20 mm/udarec. Potrebno je poudariti, da je razlika med merjeno in z WEAP analizo določeno v kol prenešeno energijo, le ca. 10%, še manjša pa je razlika med napovedano in merjeno maksimalno silo v kolu ob koncu zabijanja.

Primerjave na različne načine določenih strižnih trdnosti zemljin (slika 8) izkazujejo precejšnja odstopanja, predvsem pa v srednjem delu grafa (od 7m do 11m), kjer je h koherentnim materialom primešan droben pesek. Povsem neobičajno pa je, da je odpor po plašču  $F_s$  (CPT), na pretežnem delu profila, večji kot je izmerjena vrhunska strižna trdnost (Vane Share Test).

Čprav so reperji na posameznih podporah mostu vgrajeni, se posedki iz nam nepoznanih razlogov ne merijo tako, da jih ne moremo primerjati z napovedanimi posedki, ki znašajo od 1.5cm do 2.0cm. Edini podatek, ki obstaja, so izmerjeni posedki nad krajno podporo mostu pri statični obremenilni preizkušnji po koncu gradnje mostu, ki so znašali do 1.1mm, po razbremenitvi pa 0.20mm.

## 7. SKLEP

Izkušnje pridobljene pri temeljenju objektov na koleh pokažejo, da je mogoče z dobro napovedjo o nosilnosti kolov doseči določene prihranke, ki omogočajo prednost za pridobitev dela oz. da se izogne stroškom zaradi napačne napovedi pogojev temeljenja (večje število kolov ali pretirano velik količnik varnosti).

Napoved nosilnosti kolov na osnovi geomehanskega poročila, vendar brez poizkusnih kolov in obremenilnega testa, je običajno tvegana naloga. Tudi določeno število obremenilnih testov v heterogenih materialih ni dovolj velika garancija za zanesljivost izbrane rešitve. Številni v svetu in pri nas objavljeni rezultati o raziskavah kolov prikazujejo določeno neskladje v oceni nosilnosti in tudi dejstvo, da redko kdaj dve metodi dajeta isti rezultat.

Vsakemu inženirju, ki je videl CPT rezultate raziskav, izvedenih na kratkih medsebojnih razdaljah, je takoj jasno, da je nemogoče točno predvideti mejno nosilnost kolov. Lahko govorimo samo o razumnih mejah razpona nosilnosti posameznih kolov na lokaciji. Predvidevanja, ki se gibljejo v mejah od 15% je mogoče privzeti kot zelo dobra.

V našem primeru je primerjava rezultatov računskih nosilnosti kolov določenih na osnovi in-situ raziskave tal s CPT pokazala dobro ujemanje z na terenu izmerjenimi vrednostmi (dinamični obremenilni test). Primerjava na različne načine določenih strižnih karakteristik pa kaže na precejšnje disperzijo rezultatov.

## LITERATURA

- Dunncliff, J. (1988). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance, John Wiley & Sons, New York, 467-479.
- Edde, R.D., Fellenius, B.F. (1990). Static or dynamic test-Which to trust?, Geotechnical News, Toronto, Vol. 8, 28-32.
- Hussein, M., Rausche, F. (1990). Pile design and construction control by dynamic methods-Case history, Geotechnical News, Toronto, Vol. 8, 24-28.
- Hunt, R.E. (1986). Geotechnical Engineering Techniques and Practices, McGraw-Hill Book Comp., New York, 331-443.
- Likins, G.E., Hussein, M., Rausche F. (1988). Design and testing of pile foundations, GRL & Associates, Inc., Cleveland, USA, Proc. of 3rd International Conference on the Application of stress-wave theory to piles, Ottawa, 644-658.
- Lesjak, I., Strniša, G. (1992). Primer zahtevnega temeljenja objekta na zabutih kolih, Gradbeni vestnik XXXI, Ljubljana, 34-44.
- Mure, J.N., Kinghtley, M.L., Gravare, C.J., Hermansson, I. (1983). CAPWAP an economic and comprehensive alternative to traditional methods of load testing of piles, Proc. of the International Conference on Advances in Piling and Ground for Foundations, ICE, London, 225-232.
- Poročilo o preiskavah tal s statičnim konusnim penetrometrom in pogojih temeljenja na zabutih kolih na objektu "Most čez Ljubljano" na Prulah, GIP GRADIS LJUBLJANA, Sektor za raziskav in razvoj, por.št.GE4501/91, november 1991.
- Poročilo o dinamičnih obremenilni testih na zabutih kolih PAB35 na lokaciji objekta "Most čez Ljubljano" na Prulah, GIP GRADIS LJUBLJANA, Sektor za raziskave in razvoj, por.št.PD4502/91, december 1991.
- Poročilo o geomehanskih raziskavah za temeljenje novega "Mostu čez Ljubljano" na Prulah, ZRMK, DN.:2-367/91, oktober 1991.
- Strniša, G., Ajdič, I. (1991). Pile bearing capacity prediction with cone penetration test and dynamic loading test, Proc. of the 4th International Conference on Piling and Deep Foundations, Stresa, 451-456.
- Strniša, G., Lesjak, I. (1987). Določitev statične nosilnosti kolov z analizatorjem zabijanja-PDA, Gradbeni vestnik XXXVI, Ljubljana, 55-58.
- Strniša, G., Lesjak, I. (1987). Metoda "CAPWAP" kot alternativa klasični statični obremenilni preizkušnji, Gradbeni vestnik XXXVI, Ljubljana, 64-68.
- Tang, X. J., Zhoum, J., Xie, Y. (1982). Prediction of limit load of driven pile by CPT, Proc. of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Vol.2, Amsterdam, 957-961.
- Vogrincič, G., Strniša, G. (1991). Bearing capacity of large diameter steel pipe pile determined by static loading test and dynamic testing, Proc. of the 4th International Conference on Piling and Deep Foundations, Stresa, 659-664.