

EKSPERTNI SISTEM ZA GLOBOKO TEMELJENJE Z ZABITIMI KOLI

EXPERT SYSTEM FOR DEEP FOUNDATION WITH DRIVEN PILES

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

POVZETEK: V prispevku je opisan in na konkretnem primeru predstavljen ekspertni sistem za globoko temeljenje z zabitimi koli. V ta sistem je vključena merilna in programska oprema, ki v ustrezni medsebojni povezavi in nadgradnji omogoča zanesljivo in ekonomično izvedbo pilotiranja z zabitimi koli. Osnovo tega ekspertnega sistema predstavlja s statičnim konusnim penetrometrom, dinamične meritve pilotov pa omogočajo kontrolo analitičnih procedur. Z ustrezno programsko opremo se napove nosilnosti kola v trenutku zabijanja in po določenem času po zabitju, ter napove se posede kolovja. Prav tako so rezultati statičnih penetracij osnova za pripravo ustrezne datoteke (podatki o zemljini), ki je potrebna za izvedbo valovne analize zabijanja kolov. Tako se pridobi osnovne podatke za izdelavo projekta temeljenja, v katerem se določi tudi način in število kontrolnih meritev, ki služijo kot povratna informacija ocenjenim oz. napovedanim vrednostim v projektu.

SUMMARY: In article an expert system for deep foundation with driven piles is represented. This system incorporates field measurements and software which in connection give secure and economical solution for pile driving project. In case of our expert system static cone penetrations are the basis of geotechnical investigations, while pile dynamic measurements offer control and modification of calculation procedure. With special software it is possible to obtain calculated ultimate pile bearing capacity at the end of driving, final ultimate bearing capacity and predicted pile settlements. Results of cone penetration data elaboration are also basis input data (soil data) for driveability wave analysis program. So it is possible to obtain all necessary data for pile project in which also number and procedure of pile control measurements are defined. Results of this measurements (pile bearing capacities) are back information for calculated pile bearing capacities in pile project.

1. UVOD

Pri projektiranju temeljenja objektov je v določenih primerih, ko so temeljna tla nenosilna in stisljiva potrebno projektirati in v končni fazi tudi izvesti globoko temeljenje. Za uspešno izvedbo globokega temeljenja morajo biti najprej izvedene temeljite raziskave terena. Na osnovi teh raziskav se po enem ali več izmed cele vrste postopkov, določijo računske mejne nosilnosti kolov. Ob upoštevanju izbranega količnika varnosti, ki je odvisen tudi od kvalitete geomehanskih raziskav, heterogenosti terena, pomembnosti objekta in samega tehnološkega postopka izbrane tehnologije globokega temeljenja, se določi dopustna obremenitev temeljnega kolovja.

Osnovni razlog, za potrebo po globokem temeljenju, je preprečitev prevelikih posedkov objekta, predvsem pa preprečitev diferenčnih posedkov posameznih delov objekta, ki imajo najbolj negativen vpliv na konstrukcijo.

Iz navedenega je torej možno zaključiti, da je pred izvedbo globokega temeljenja potrebno izvesti sledeče aktivnosti:

- Geomehanske raziskave
- Izbor enega ali več možnih načinov globokega temeljenja
- Določiti (napovedati) mejno (porušno) nosilnost ter dopustno obremenitev kolov
- Določiti pričakovane posedke kolov
- Izdelati projekt kola
- Določiti postopke oz. način vgradnje kolov
- Določiti načine kontrole projektiranih vrednosti

Glede na to, da je vsako od navedenih faz možno izvesti na več načinov in, da so posamezne faze v praksi redko kdaj izvedene koordinirano, podatki, ki sledijo iz ene faze redkokdaj zadoščajo zahtevam naslednje faze.

V kolikor je celoten postopek povezan v celoto lahko temu rečemo ekspertni sistem. Seveda so posamezni ekspertni sistemi vezani na določeno vrsto geomehanskih raziskav, ki so potrebne za projektiranje določene vrste globokega temeljenja s povsem definirano tehnologijo in definiranim postopkom kontrole za preverjanje projektiranih vrednosti.

2. OPIS EKSPERTNEGA SISTEMA

V nadaljevanju bo opisan ekspertni sistem, ki je bil izdelan za globoko temeljenje na zabitih koli. Osnovna geotehnična raziskava tal tega sistema je statična konusna penetracija (CPT) medtem ko kontrolni sistem temelji na dinamičnih meritvah in analizah (PDA, CAPWAP, CAPWEAP).

Običajno ekspertni sistem temelji na izkušnjah in analizah iz že izvedenih projektov. Na razpolago moramo torej imeti ustrezne postopke (programske pakete) za analizo oz. določitev mejnih, nato pa dopustnih obremenitev na osnovi geomehanskih raziskav s CPT. Nadalje je potrebno imeti zanesljive podatke o možnih zabijalnih in tehnološko možnih načinih zabijanja kolov. To pomeni, da je potrebno poznati podatek o največji možni dolžini zabijanja kola v enem segmentu, kakšni so možni nagibi vodila zabijalne naprave, kakšne podaljške za zabijanje kolov je možno uporabiti, kakšne so variante zabijalnega sistema itd.

Na osnovi teh podatkov je možno izvesti valovno analizo zabijanja kola z WEAP programom, katerega rezultat so predvideni pogrezki kola na udarec izbranega zabijala, ob predvideni mejni nosilnosti kola na določeni globini.

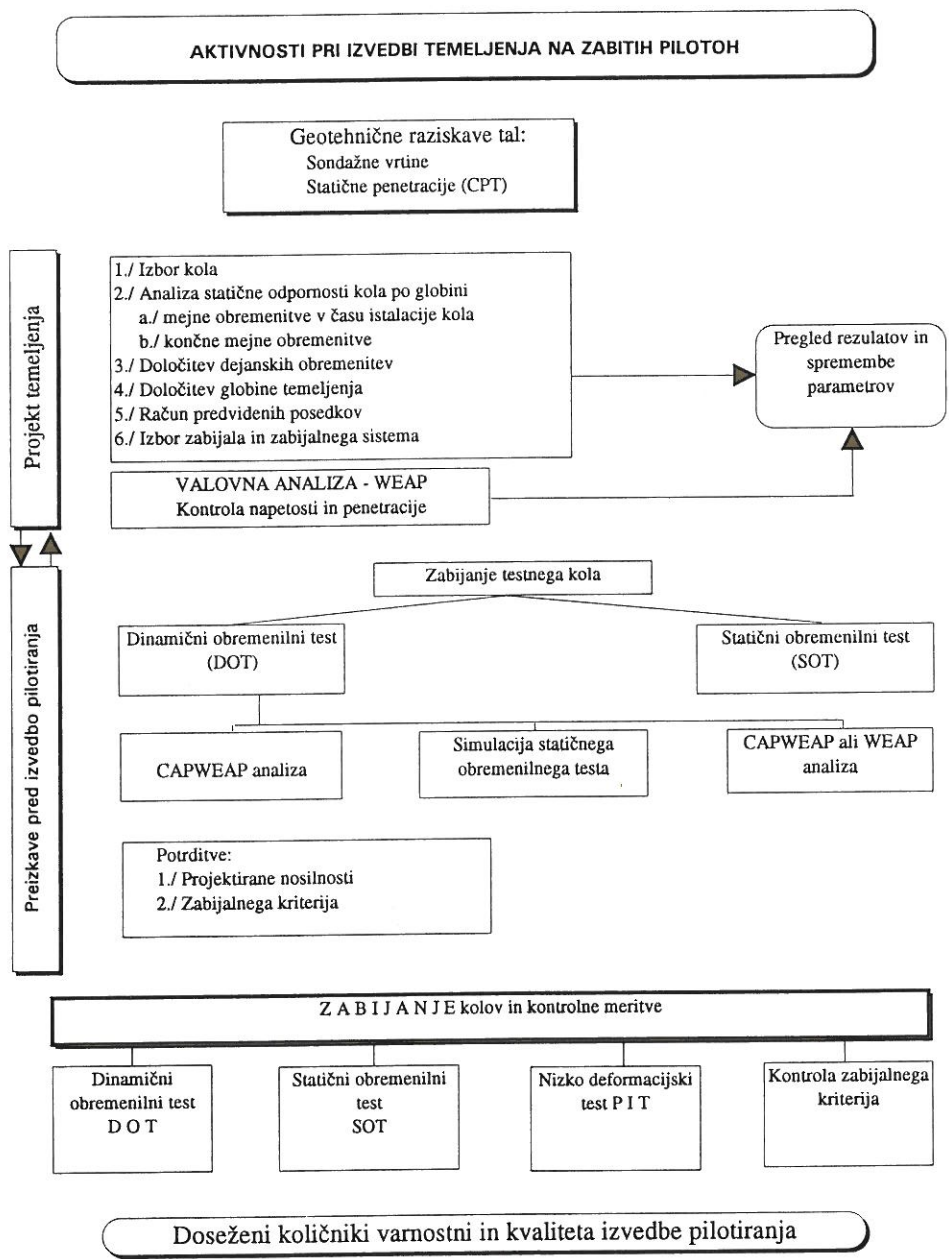
Osnovni podatki za korektno izvedbo valovne analize so poleg dovolj zanesljivega modela zabijala in zabijalnega sistema, predvsem distribucija in vrednosti mejnih statičnih

odporov posameznih slojev zemljine in njihove dinamične karakteristike v času instalacije. Rezultat valovne analize zabijanja je podatek o pričakovanih notranjih silah v zabijanem kolu in penetracija kola na udarec zabijala. V kolikor so dovoljene vrednosti notranjih sil presežene, ali pa je pogrezek kola na udarec zabijala premajhen, je potrebno spremeniti zabijalni sistem ali pa zamenjati predvideno zabijalo. To je vsekakor bistveno lažje in ceneje narediti teoretično kot v praksi na terenu.

Ob zabijanju prvih kolov na terenu se z dinamičnim obremenilnim testom, ki se na enem kolu izvede od začetka zabijanja pa do zahtevane globine, preverjajo notranje sile v

kolu in dosežene mejne nosilnosti v času instalacije kola. Doseganje končne predvidene mejne nosilnosti oz. količnika varnosti glede na obremenitev kola se preverja z dodatnimi dinamičnimi obremenilnimi testi in analizami s CAPWAP in CAPWEAP programom. V primerih zelo zahtevnih in obsežnih projektov pa se izvede tudi določeno število statičnih obremenilnih testov.

Povezave posameznih aktivnosti pri pripravi in izvedbi temeljenja na zabitih kolih so prikazane v obliki diagrama na sliki 1, odvisnosti in povezave med vrednostmi pridobljenimi pri raziskavah terena, predpostavkami in rezultati računskih analiz ter rezultati terenskih raziskav pa v diagramu na sliki 2.



SLIKA 1. Primer ekspertnega sistema za globoko temeljenje z zabitimi koli

Najlažje je celoten sistem prikazati na konkretnem praktičnem primeru. V nadaljevanju bo prikazan postopek in povezave med posameznimi fazami pri projektiranju in izvedbi globokega temeljenja poslovnega objekta v Ljubljani.

3. PRIMER EKSPERTNEGA SISTEMA

3.1 Odločitev za globoko temeljenje

Na območju lokacije bodočega objekta so bila izvršena sondažna dela s šestimi vrtinami (dve globoki do 17.0 m in štiri plitve do 7.0 m globine). V geotehničnem poročilu o pogojih temeljenja in rezultatih preiskav je bilo jasno zaključeno, da je potrebno objekt temeljiti globoko.

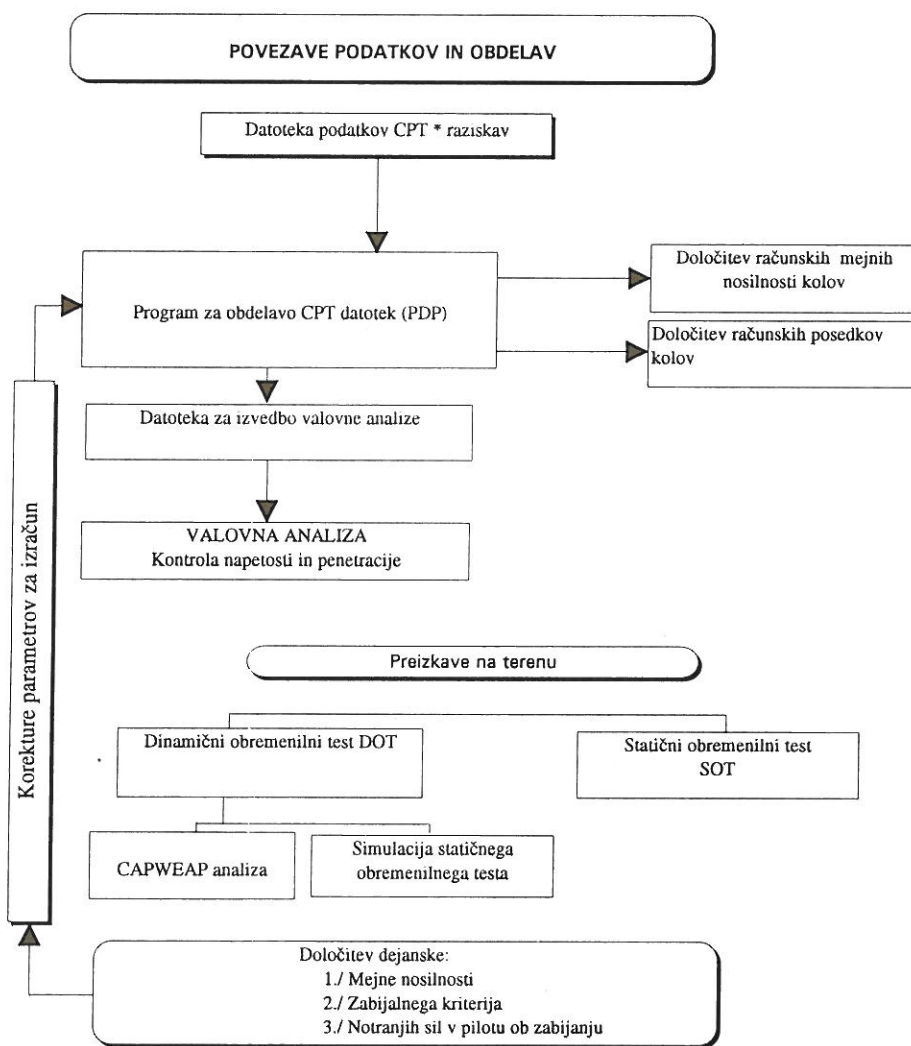
Sondažna vrtanja, terenske in laboratorijske preiskave so pokazale, pod slojem nekontroliranega umetnega nasipa, da raščena tla tvorijo peščeno meljne zemljine z občasnimi tanjšimi glinastimi vložki. Na posameznih globinah so zemljine v židkem stanju. Na globini ca. 14.0m preidejo tla v prodno peščeno meljno zemljino (GFs).

3.2 Izvedba statičnih konusnih penetracij

Za potrebe globokega temeljenja so se po naročilu potencialnega izvajalca del pilotiranja izvedle dodatne geotehnične raziskave tal s konusnim statičnim penetrometrom (CPT). Namen teh raziskav je bil, da se z dopoljenim fondom podatkov, izdelata analiza globokega temeljenja z izračunom (napovedjo) nosilnosti zabitih kolov in določi dolžine zabitih kolov.

V ta namen sta se najprej izvedli dve CPT preiskavi tal do globine 14.7m oz. 16.2m, nato pa še dve tako, da se je prebil nosilni prodno peščeni sloj na globini 14.0 m. Penetraciji sta se končali na globini 21.4m oz. 21.7m od površja terena.

Potrnila se je ugotovitev iz sondažnih raziskav, da je sestava tal heterogena in da nosilni prodno peščeni sloj nastopa na globini ca. 14.0m od površine terena v debelini ca. 2m do 3m, pod njim pa je sloj peščeno meljnih zemljin, srednje gnetne konsistence, z vložki organskih zemljin.



SLIKA 2. Povezave podatkov in obdelav pri ekspertnem sistemu za globoko temeljenje z zabitimi koli

3.3 Določitev mejnih nosilnosti določenega tipa zabitega kola po globini v času vgradnje in končne pričakovane mejne nosilnosti

Z računalniškimi programi PDP so bile CPT raziskave obdelane in določene računске mejne nosilnosti ter kasneje tudi pričakovani posedki prednapetega armirano betonskega kola dimenzij 35/35cm (PAB35).

PREGLEDNICA 1. Računska mejna nosilnost kola 35/35cm določena s programom PDP

Globina (m)	Računska mejna nosilnost kolov (kN)					
	NpED	NkED	SGED	NpRD	NkRD	SGRD
Penetracija CPT1						
14.0	349	226	533	705	226	889
15.0	337	520	852	760	520	1235
15.5	396	623	973	797	623	1373
Penetracija CPT2						
14.0	294	538	789	605	538	1100
15.0	323	766	1044	663	766	1384
15.5	349	827	710	710	827	1490
Penetracija CPT3						
14.0	254	483	695	534	483	975
14.5	272	712	941	569	712	1238
Penetracija CPT4						
14.0	283	573	814	586	573	1117
15.0	321	768	1044	657	768	1380
15.5	343	824	1120	698	824	1475

Legenda:

NpED.....mejna nosilnost plašča ob koncu zabijanja
 NkED.....mejna nosilnost konice ob koncu zabijanja
 SGED.....mejna nosilnost kola ob koncu zabijanja
 NpRD.....končna mejna nosilnost plašča
 NkRD.....končna mejna nosilnost konice
 SGRD.....končna mejna nosilnost kola

Povprečna pričakovana mejna nosilnost kola dolžine 15 m ob koncu zabijanja je bila 972 kN, končna mejna pa 1312 kN.

3.4 Določitev globine temeljenja za izbran količnik varnostni

Dolžine kolov je bilo mogoče določiti iz podatkov raziskav s CPT. Osnova za določitev dolžine kolov je bil izračun nosilnosti, katerega rezultati so prikazani v preglednici 1.

Tako je bila pri izbranem količniku varnosti $F=2.0$ ocenjena dopustna obremenitev zabitega kola PAB35 na ca. 600 do 700 kN. Pri tem je bila upoštevana dolžina kola 15m in pogoj, da se konice kolov zabije v nosilni prodno peščeni sloj najmanj 0.5m globoko.

3.5 Določitev obremenitev v času eksploatacije

Na osnovi projekta objekta so bile določene tudi obremenitve na posamezne podporne točke oz. glave kolov. Maksimalna vertikalna obremenitev posameznih kolov je bila maksimalno 710 kN. Povprečne obremenitve posameznih podpornih točk pa od 350 kN do 650 kN. Navede obremenitve predstavljajo seštevek stalne in maksimalne koristne obremenitve, ki v polni meri nastopa le izjemoma.

3.6 Določitev posedkov kola ali skupine kolov

Na osnovi obdelave CPT raziskav pridobljeni oz. določeni deformacijski moduli za posamezne sloje so se uporabili za izračun predvidenih posedkov posameznega kola, dvojice in skupine štirih kolov. Rezultati računskih posedkov določeni z analizo direktno iz CPT raziskav, s PDP programom, so prevedeli posedke med 1.2 do 2.3 cm pri povprečni stalni obremenitvi 490 kN.

3.7 Izbor zabijala in postopka zabijanja kola (valovna analiza zabijanja-WEAP program)

Pri zabijanju kolov je bila predvidena in nato tudi uporabljena zabijalna naprava G20 s hidravličnim prosto padnim zabijalom JUNTAN HH4 s težo udarnega bata 40 kN in maksimalno tovarniško deklarirano energijo pri enem udarcu bata 40.0 kNm (pri padcu bata $h=1.0$ m).

Preliminarni zabijalni kriterij ob koncu zabijanja je bil izbran na osnovi WEAP analize in računskih predvidenih mejnih nosilnosti ob času zabijanja iz preglednice 1 (SGED). Osnovna datoteka (podatki o zemljini) za izvedbo valovne analize je bila pridobljena direktno iz PDP programa.

Računski kriterij zabijanja na projektirani globini je znašal ca. 5.0-6.0mm/udarec zabijala, ob višini padca bata zabijala $h=0.5$ m in pri pogoju, da mora konica kola segati vsaj 50cm v nosilni sloj.

3.8 Meritve testnega (vodilnega) kola na gradbišču in preverjanje rezultatov WEAP analize (zabijalni kriterij)

V času zabijanja kolov so se izvedle kontrolne meritve nosilnosti zabitih kolov z dinamičnim obremenilnim testom. Poleg približne ocene nosilnosti kola, ki nam jo takoj ob izvajanju meritev omogoča PDA, so bile takoj za tem izvršene skrbne analize z računalniškimi programi CAPWAP. Program nam omogoča, da ob postopni uskladitvi ene od merjenih krivulj odziva z računskim odzivom, določenim na osnovi predpostavljenega modela kola in zemljine ter druge merjene krivulje odziva, določitev, med drugim tudi, mejne osne nosilnosti kola v trenutku zabitja.

Z dinamičnim obremenilnim testom in kasnejšo analizo na vodilnem kolu je bilo ugotovljeno, da znaša mejna nosilnost zabitega kola PAB35 ob koncu zabijanja (ED) 1000 kN, kar je bilo blizu napovedanim vrednostim (preglednica 1) ob koncu zabijanja. V povprečju so koli dosegli izmerjen posedek v zadnji seriji po 10 udarcev od 3.6mm do 5.8 mm na udarec hidravličnega zabijala tipa JUNTAN HH4.

3.9 Kontrolne meritve nosilnosti kolov

Ob ponovnem testiranju vodilnega kola po preteku 28 dni od zabitja (RD28) je bilo ugotovljeno, da se je mejna nosilnost zaradi utrjevanja zemljine po koncu zabijanja povečala tako, da je v času testiranja znašala 1203 kN pri posedku 2.4 mm/udarec zabijala.

Kasneje se je v fazi izvajanja pilotiranja izvedlo še osem dinamičnih obremenilnih testov na osmih zabitih kolih (preglednica 2). Vsi navedeni testi so se izvedli po preteku določenega časa od zabitja kola (oznaka RD/dni). Dokazana je bila mejna nosilnost testiranih kolov od 958 kN (kol testiran po manj kot dveh dneh od instalacije) do največ 1497 kN.

V spodnji preglednici 2 podajamo mejne nosilnosti in določene z dinamičnim obremenilnim testom (DOT).

PREGLEDNICA 2. Dosežene mejne nosilnosti kolov v času dinamičnega obremenilnega testa (PDA)

Oznaka kola	Mejna nosilnost (kN)	Način testiranja	Doseženi posedki p1/p2 (mm/udarec)
2	1203	RD(28)	3.5/2.4
22	1060	RD(2)	4.0/2.0
108	1179	RD(9)	3.8/3.0
122	1488	RD(22)	4.2/2.5
144	1497	RD(8)	3.8/2.0
174	1218	RD(14)	3.5/2.2
199	1290	RD(16)	4.0/2.5
268	1323	RD(8)	3.3/2.0
281	958	RD(2)	4.5/3.0

Opombe:

p1.....posedek ob koncu zabijanja ED
 p2.....posedek ob ponovnem zabijanju RD
 RD(dni)..testiranje po preteku določenega časa po zabitju kola

3.10 Doseženi količniki varnosti

PREGLEDNICA 3. Doseženi količniki varnosti glede na maksimalno osno obtežbo in mejno nosilnost kola v času meritve (PDA)

Pozicija kola	Maksimalna obtežba na kol P (kN)	Mejna nosilnost Qm (kN)	Količnik varnosti F=Qm/P
2	529	1203	2.27
22	529	1060	2.00
108	693	1179	1.70
122	665	1488	2.23
144	665	1497	2.25
174	671	1218	1.81
199	350	1290	3.68
268	575	1323	2.30
281	412	958	2.32

V preglednici 3 podajamo dosežene količnike varnosti med maksimalno (lastno in polno koristno) vertikalno osno obtežbo na kole in mejno nosilnost kola PAB35 v času meritve s PDA. Iz gornje preglednice je razvidno, da so količniki varnosti na maksimalne osne obtežbe od F=1.70 do F=3.68. Ob tem je potrebno poudariti, da so mejne nosilnosti zabitih kolov določene v trenutku meritve (z dinamičnim obremenilnim testom) in se bodo s časom še nekoliko povečale. Zaradi tega je realno pričakovati povečanje količnika varnosti na vrednost F=2.0 tudi za oba testirana kola št.108 in št.174.

3.11 Posedki objekta

Dosedanje meritve posedkov objekta na devetih reperjih, kažejo, da so se v roku dveh let opazovanja razvili absolutni posedki med 0.8cm do 1.4cm in da bodo končni posedki objekta v rangu pričakovanih vrednosti 1.2cm do 2.3cm.

4. ZAKLJUČEK

Razvoj moderne merilne tehnike in računalnikov je omogočil uporabo sodobnih metod analiz, ki so rezultat tujega in lastnega znanja. Povezava posameznih postopkov v celoto predstavlja ekspertni sistem za določeno tehnologijo dela.

V tem prispevku je na kratko opisan in na praktičnem primeru predstavljen ekspertni sistem za globoko temeljenje z zabitimi koli, ki je bil zasnovan in izdelan tako, da ga je možno nenehno vsklajevati z novimi spoznanji in razvojem tehnologije. Na splošno pa ta ekspertni sistem omogoča:

- najmanjši možen obseg raziskav za čimvečji učinek
- hitrost izvedbe projektantskega in kontrolnega dela sistema
- hitro preverjanje več variant temeljenja
- minimalen negativen vpliv človeškega faktorja
- realno oceno varnosti in s tem ekonomičnost izvedbe temeljenja
- možnost korekcij izhodišč s povratnimi informacijami, kot način stalnega dopolnjevanje sistema.

Predstavljen ekspertni sistem se je v vsakdanji inženirski praksi izkazal kot zelo uporaben in na nekaterih projektih temeljenja tudi kot odločilna prednost pri tehnologiji zabitih kolov.

LITERATURA

- Geotehnično poročilo o pogojih temeljenja za "Trgovsko poslovni center TPC MURGLE", Oper.št.ev.:22/90-JC-LT, Univerza v Mariboru, Tehniška fakulteta, Inštitut za gradbeništvo, Laboratorij za mehaniko tal, avgust 1990
- 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.
- Lesjak, I., Strniša, G. (1992). Primer zahtevnega temeljenja objekta na zabitih kolih, Gradbeni vestnik XXXXI, Ljubljana, 34-44.
- Likins, G., Hussein, M., Rausche F. (1988). Design and testing of pile foundations, Proc. of 3rd International Conference on the Application of stress-wave theory to

piles, Ottawa, 644-658.

Poročilo o raziskavah tal s statičnim penetrometrom na lokaciji "Trgovsko poslovnega centra TPC-MURGLE", št.4/91, GIP GRADIS LJUBLJANA, Sektor za raziskave in razvoj, januar 1991

Poročilo o dinamičnih obremenilnih testih na zabatih kolih PAB35 na lokaciji objekta "TPC MURGLE" v Ljubljani, št.:PD1501/91, GIP GRADIS LJUBLJANA, Sektor za raziskave in razvoj, avgust 1991

Rausche F., Goble G., Likins G. (1992). Investigation of dynamic soil resistance on piles using GRLWEAP, Proc. of 4th International Conference on the Application of stress-wave theory to piles, The Hague, 137-142.

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.

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.