

# STRIŽNA TRDNOST KOHERENTNIH ZEMLJIN IZ REZULTATOV CPT

## SHEARING RESISTANCE OF COHESIVE SOILS FROM CPT RESULTS

Mag. Igor Ajdič, dipl.ing.geol. GIP GRADIS LJUBLJANA d.o.o.

**POVZETEK:** Namen članka je prikazati nekaj primerov določanja nedrenirane strižne trdnosti koherentnih zemljin z modernim statičnim penetrometrom. Uvodoma je pregledno opisana empirična metoda določanja omenjenega parametra. Bistvo metode je v začetnem določanju faktorja nosilnosti na osnovi rezultatov vzporednih raziskav nedrenirane strižne trdnosti v laboratoriju ali na terenu. Pretežni del članka je namenjen ugotavljanju strižne odpornosti zemljin s statičnim penetrometrom v območju južne obvoznice na Ljubljanskem Barju in v območju izliva reke Mirne v Jadransko morje. Posebna pozornost je namenjena prav določanju že omenjenega faktorja nosilnosti na osnovi vzporednih preiskav s krilno sondjo. V zaključku je nakazana potreba po intenzivnejšem raziskovalnem delu na tem področju.

**SUMMARY:** The aim of the article is to present some examples of determination of undrained shear strength of cohesive soils by cone penetration tests. Preliminary the empirical method of determination of the parameter as mentioned is shown. The essentials of the method is a determination of bearing capacity factor based on results of comparable investigation of undrained shear strength in the laboratory or in the field. The main part of the article is dedicated to the determination of undrained shear strength in the domain of the southern by-pass road (Ljubljansko Barje) and in the region of the outflow of river Mirna in the Adriatic sea. The main concern is devoted to the determination of the bearing capacity factor by parallel investigation by vane tests. At the end a necessity to intensify a research work in the field as being discussed in this article is expressed.

### 1. UVOD

Strižna odpornost zemljin predstavlja enega od osnovnih vhodnih parametrov za različne geotehnične izračune. V primeru, da sestojeta tla iz mehkih koherentnih zemljin, je težko pridobiti intaktne vzorce za laboratorijske preiskave strižnih karakteristik, zato so se v praksi uveljavili različni "in-situ" preizkusi, predvsem s krilnimi sondami, pa tudi s penetrometri in presiometri.

V zvezi s penetracijskim sondiranjem tal je potrebno omeniti, da se je izhodiščna ideja, pridobiti na ta način kazalce o strižnih lastnostih zemljin, pojavila že v zgodnjih letih tega stoletja (Broms, Flodin: 1988). Prava uporabnost omenjenega postopka pri napovedi različnih trdnostno-deformacijskih parametrov pa se je pričela izkazovati od konca šestdesetih let, ko so se pojavili prvi električni penetrometri s praktično zveznim zajemom in računalniško obdelavo podatkov.

V zadnjem času so se tudi pri nas pričele uveljavljati terenske raziskave zemljin z modernim statičnim penetrometrom (Fašalek, Ajdič; 1989). Hkrati potekajo prizadevanja za čimbolj zanesljivo napovedovanje sestave in geotehnične karakteristike raziskanih tal, za kar je seveda v začetni fazi potreben ustrezen fond rezultatov alternativnih raziskovalnih postopkov.

V članku je obravnavano nekaj primerov določanja parametrov strižne odpornosti tal z modernim statičnim penetrometrom v dveh tipičnih okoljih; v jezerskih sedimentih Ljubljanskega Barja (Južna obvoznica) in v morsko-brakičnih sedimentih ob izlivu reke Mirne v Jadransko morje (Viadukt Mirna).

### 2. SPLOŠNO O RAZISKAVAH S STATIČNIM PENETROMETROM IN INTERPRETACIJI

Preizkus (v nadaljevanju CPT) v osnovi poteka tako, da se med prodiranjem merilne konice s standardno hitrostjo 2 cm/sek ločeno beleži odpor na konici (v nadaljevanju  $Q_c$ ), odpor (trenje) na obodu konice (v nadaljevanju  $F_s$ ) in nagib instrumentirane konice v dveh smereh (za kasnejšo korekcijo globine zaradi ukrivljanja drogova). Meri se lahko tudi porne tlake vode v zemljini, nastale med prodiranjem konice ali pa tako, da prodiranje predhodno ustavimo.

Med raziskavo se pridobljeni podatki v analogni obliki sproti beležijo na terenski risalnik, hkrati pa v digitalni obliki zapisujejo v računalnik, tako da jih lahko uporabimo za nadaljne obdelave - ocene sestave in osnovnih trdnostno-deformacijskih lastnosti tal.

Metode določanja nedrenirane strižne trdnosti koherentnih zemljin iz rezultatov CPT se dele na teoretične ter empirične. Teoretične metode izhajajo iz enačbe nosilnosti (Bruzzi, 1988):

$$Q_c = N_c \cdot s_u + p_0 \quad (1)$$

v kateri predstavlja

$Q_c$	konusni odpor,
$N_c$	faktor nosilnosti,
$s_u$	nedrenirano strižno trdnost in
$p_0$	totalno vertikalno, horizontalno ali oktaedrsko napetost

Pri teoretičnih metodah se določi  $N_c$  ter ob znani  $p_0$  in izmerjenem  $Q_c$  izračuna  $s_u$ .

Empirične metode prav tako izhajajo iz gornje zveze (1), v kateri se za  $p_0$  privzame totalno vertikalno napetost. Bistvo empiričnih metod je v začetnem izračunu faktorja nosilnosti  $N_c$ , pri znanem  $S_u$ , ki se ga določi z laboratorijskimi ali terenskimi raziskavami. Po različnih literaturnih podatkih lahko znaša faktor  $N_c$  od 5 do preko 20, saj je odvisen od tipa penetrometske konice, vrste zemljine, v veliki meri pa tudi od vrste primerjalnih preiskav (Bruzi, 1988, Meigh, 1987). Ko je faktor nosilnosti za določen tip zemljin znan, se ga privzame za nadaljni izračun nedrenirane strižne trdnosti.

Spričo kompleksnosti penetracijskega procesa in zahtevnosti modeliranja odziva tal se zdi, da se v zadnjem času bolj uveljavljajo empirične metode določanja nedrenirane strižne trdnosti koherentnih zemljin.

V tem članku so obravnavane tudi ocene nedrenirane strižne trdnosti na osnovi naslednjih korelacijskih zvez s konsistenčnimi mejami in efektivnim geološkim tlakom (Bowles, 1985):

$$S_u/p_0' = 0.11 + 0.0037I_p \quad (2)$$

$$S_u/p_0' = 0.45WI \quad (3)$$

Posamezne oznake v izrazih (2) in (3) pomenijo:

$S_u$	nedrenirana strižna trdnost v kPa
$p_0'$	efektivna geološka napetost v kPa
$I_p$	indeks plastičnosti
$WI$	meja židkosti

Zveza (2) velja za normalno konsolidirane zemljine in za  $I_p > 10 + 0.05$ , zveza (3) pa za  $WI > 0.40 + 0.10$ .

Efektivna ter totalna napetost je bila ocenjena iz rezultatov CPT. Kot je znano, je namreč možno iz penetracijskega posnetka sklepati tudi na sestavo tal in s tem na prostorninsko maso posameznih vrst zemljin.

### 3. PREGLED LOKACIJ RAZISKAV

#### Južna obvoznica

V okviru raziskovalne naloge z naslovom "Preverjanje nedrenirane strižne trdnosti na južni obvoznici", katere nosilec je FAGG, OGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, so bile v letu 1992 izvedene raziskave nedrenirane strižne trdnosti obremenjenih in neobremenjenih tal na križišču Barjanske ter Peruzzijeve ceste z južno obvoznico, z različno opremo. (Poročilo GZL, 1993; Poročilo Gradis, 1993; Poročilo ZRMK, 1992).

V tem članku so obravnavani rezultati raziskav z dvema krilnima sondama tipa Geonor, krilno sondo RMU in statičnim penetrometrom na vsaki od obeh omenjenih lokacij, na neobremenjenih tleh. Teren na omenjenih lokacijah sestavlja koherentne zemljine slabih geotehničnih karakteristik, ki v globini okoli 12m (Barjanska c.) oz. 15m (Peruzzijeva c.) pod površjem terena prehajajo v goste peščene prode in prode.

#### Viadukt Mirna

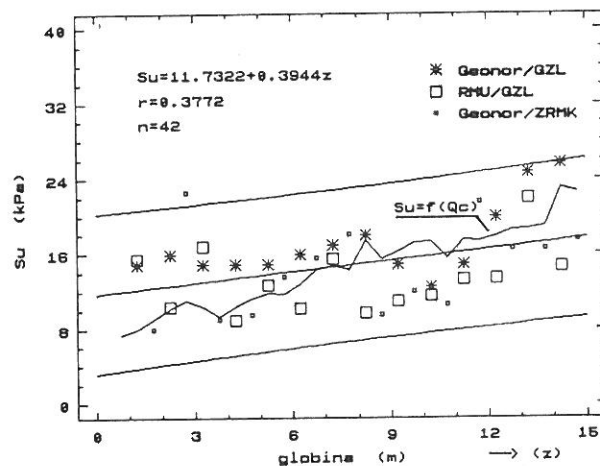
Območje raziskav, ki jih članek obravnava, se nahaja okoli 2km gorvodno od izliva reke Mirne v Jadransko morje pri Novigradu. Na tem območju sta bili leta 1990 izvedeni po naročilu tedanjega instituta Geoexpert - Zagreb za potrebe načrtovanja viadukta dve raziskavi tal s statičnim penetrometrom, omenjeni institut pa je v bližini penetracij izvedel sondažno vrtanje in raziskave s krilno sondo. Za lažje vrednotenje rezultatov penetracij je naročnik izvajalca seznanil z rezultati sondažnega vrtanja in raziskav s krilno sondo. S penetracijama je bila dosežena globina 73.7m in 76.6m.

Območje raziskav prekrivajo pretežno zelo stisljive gline do globine okoli 100m. V globini med 30m in 41m nastopajo v glini tanki vložki peska. Glina je do globine okoli 30m v židkem do lahkognetnem konsistenčnem stanju navzdol pa konsistenčno stanje postopoma prehaja v srednje in težkognetno. Hribinsko osnovo sestavlja apnenec.

### 4. REZULTATI RAZISKAV

#### Južna obvoznica

Rezultati ugotovljenih vrhunskih in rezidualnih strižnih trdnosti v odvisnosti od globine so podani za območje pri Peruzzijevi ceste v slikah 1 in 2 ter za območje pri Barjanski cesti v slikah 3 in 4. Točke v omenjenih slikah predstavljajo posamezne rezultate testa s krilnimi sondami, lomljena črta ocene strižne trdnosti iz CPT pri faktorju  $N_c = 16.6$  (slika 1 in 3) oz. trenje po plašču (slika 2 in 4), ravne črte pa regresijsko premico za posamezne rezultate krilnih sond in pripadajoče območje 95% zaupanja za napoved.



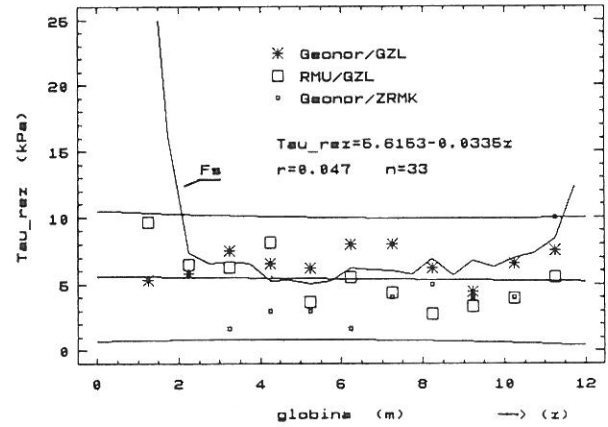
Slika 1. Nedrenirana strižna trdnost; Peruzzijeva cesta

Iz slik 1-4 je opazno razhajanje med rezultati meritev s posameznimi vrstami krilnih sond, kar rezultira v širokem območju 95% zaupanja za napoved vrednosti, ugotovljenem z regresijsko analizo. Ugotovitev velja tako za vrhunske kot rezidualno strižno trdnost.

Napovedi vrhunske nedrenirane strižne trdnosti iz rezultatov CPT pri tedaj privzetem faktorju nosilnosti  $N_c=16.6$  so v območju 95% zaupanja za napoved glede na rezultate raziskav s krilnimi sondami.

Zanimivo je, da so tudi vrednosti  $F_s$ , ki predstavljajo približek rezidualni strižni trdnosti, v območju 95% zaupanja za napoved.

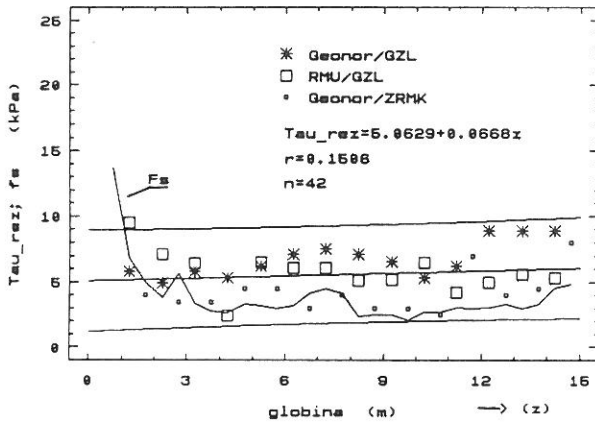
Zaradi izkazanega raztrosa rezultatov raziskav s krilno sondo so bili faktorji nosilnosti  $N_c$  v skladu z izrazom (1) preračunani samo glede na napoved z regresijo ne pa glede na posamezne merjene vrednosti. Raztros tako ugotovljenih faktorjev  $N_c$  je razviden iz histogramov v slikah 5 in 6.



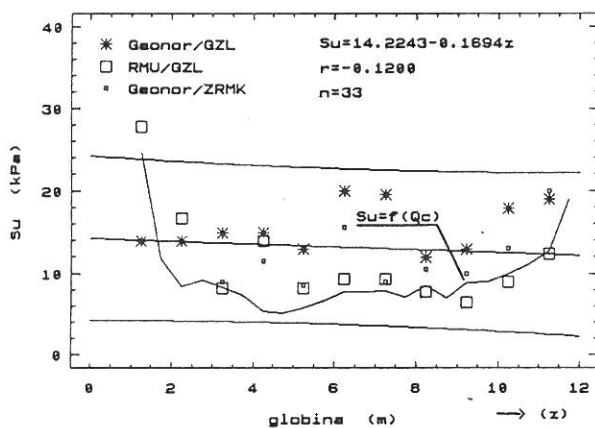
Slika 4. Rezidualna strižna trdnost; Barjanska cesta

Povprečen faktor nosilnosti (aritmetična sredina) naj bi tako znašal za območje Barjanske ceste okoli 12.1 in za območje Peruzzijeva ceste okoli 16, pripadajoča standardna odklona pa 5.7 in 3.0. Oba faktorja sta v območju, ki ga navaja literatura (Bruzi, 1988, Meigh, 1987).

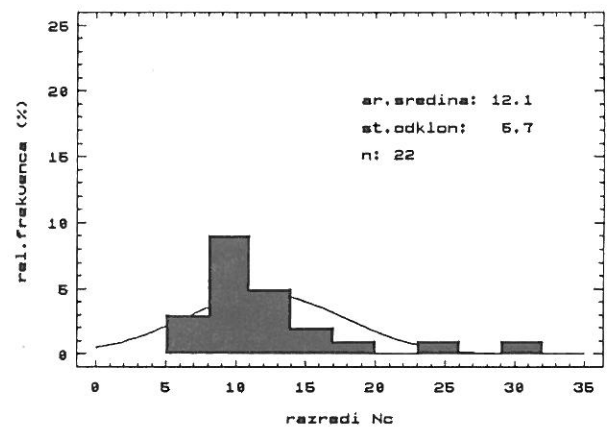
Določeno kontrolo ugotovljenih rezultatov vrhunske nedrenirane strižne trdnosti predstavlja razmerje  $le-te$  s pripadajočim efektivnim geološkim tlakom. Omenjeno razmerje naj bi v normalno konsolidiranih do rahlo prekonsolidiranih zemljinah znašalo od 0.16 do 0.6, za približno določanje  $S_u$  pa se v praksi privzame kar 0.33 (Hunt, 1986). Iz slike 7 je razvidno, da razmerje vrhunske strižne trdnosti z efektivnim geološkim tlakom z globino pada in da v zgornjem delu (približno od 0m do 3m) ne ustreza omenjenemu kriteriju za normalno konsolidirane zemljine.



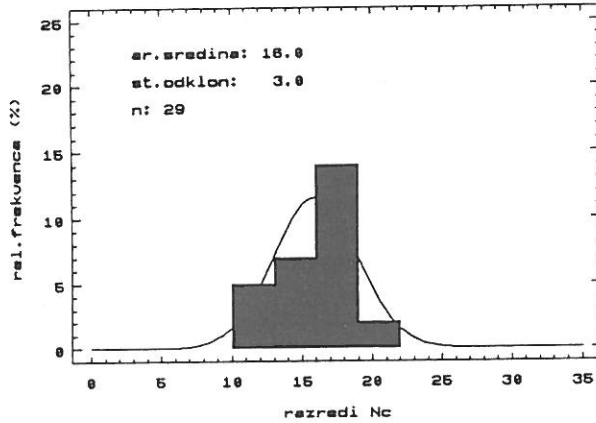
Slika 2. Rezidualna strižna trdnost; Peruzzijeva cesta



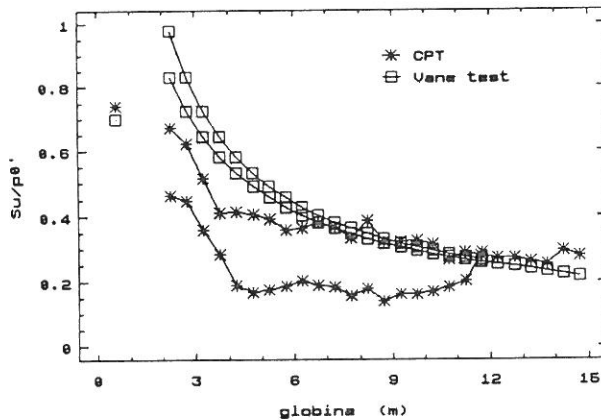
Slika 3. Nedrenirana strižna trdnost; Barjanska cesta



Slika 5. Porazdelitev faktorja  $N_c$ ; Barjanska cesta



Slika 6. Porazdelitev faktorja Nc; Peruzzijsva cesta



Slika 7. Su/p0'; Barjanska in Peruzzijsva cesta

### Viadukt Mirna

Sliki 8 in 9 prikazujeta korigirane vrhunske in rezidualne strižne trdnosti iz meritev s krilno sondo glede na indeks plastičnosti, ocene na osnovi konsistentnih mej po obrazcih 2 in 3, oceno vrhunske strižne trdnosti iz rezultatov CPT pri  $Nc=16.6$  in trenje po plašču (Fs), za posamezni lokaciji.

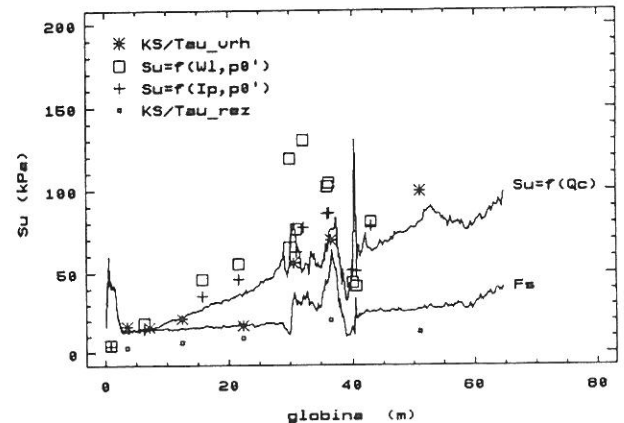
Iz slik 8 in 9 je razvidna dobra skladnost med rezultati CPT in krilnih sond, ocene na osnovi konsistentnih mej pa nekoliko odstopajo navzgor. Tudi trenje po plašču izkazuje nekoliko višje vrednosti od rezidualne strižne trdnosti.

Zaradi podobnosti smo posnetka z obeh lokacij združili in skušali z regresijsko analizo ugotoviti faktor nosilnosti. Obrazec (1) namreč lahko pišemo tudi v obliki:

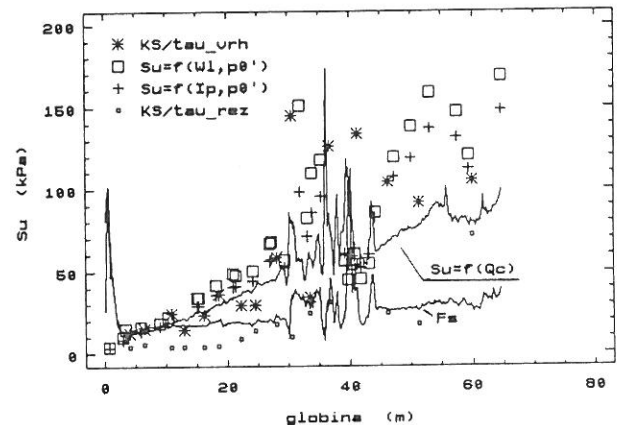
$$Su = (Qc - p_0) / Nc = qt / Nc \quad (4)$$

ter izvedemo linearno regresijsko analizo med "neodvisno" spremenljivko qt ter "odvisno" spremenljivko Su:

$$Su = a + b \cdot qt \quad (5)$$



Slika 8. Su in Fs; Viadukt Mirna; prvi posnetek

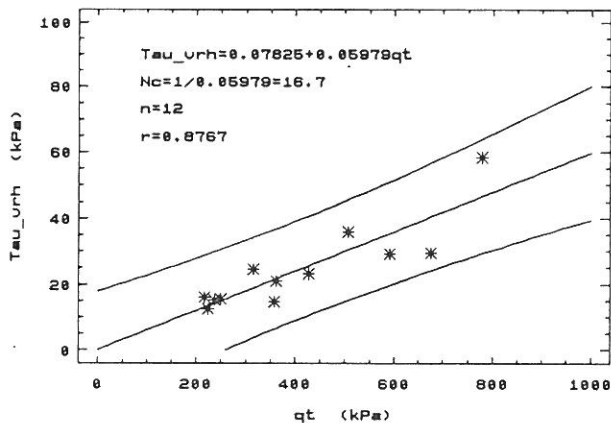


Slika 9. Su in Fs; Viadukt Mirna; drugi posnetek

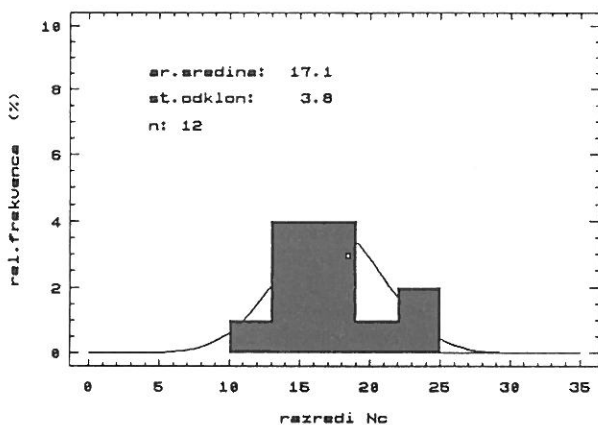
V primeru realnih vrednosti obeh spremenljivk je pričakovati, da bo recipročna vrednost ugotovljenega regresijskega koeficienta b enakega velikostnega razreda kot faktor nosilnosti, regresijski koeficient a pa blizu vrednosti 0.

Rezultat regresijske analize je za združeni posnetek do globine 30m razviden s slike 10. Ugotovljeni faktor  $Nc=16.7$  je praktično identičen vrednosti, ki jo v praksi uporabljamo za oceno nedrenirane strižne trdnosti za manj raziskane zemljine.

Vrednost z regresijsko analizo ugotovljenega faktorja nosilnosti lahko dodatno preverimo z izračunom aritmetične sredine posameznih vrednosti, ki ustrezajo posameznim rezultatom vrhunske nedrenirane strižne trdnosti. Rezultat je, obenem s porazdelitvijo faktorja nosilnosti, razviden s slike 11. Aritmetična sredina znaša 17.1 kar je blizu prej ugotovljeni vrednosti 16.7, standardni odklon pa 3.8.



Slika 10. Določanje faktorja  $N_c$ ; Viadukt Mirna; združena posnetka do globine 30m



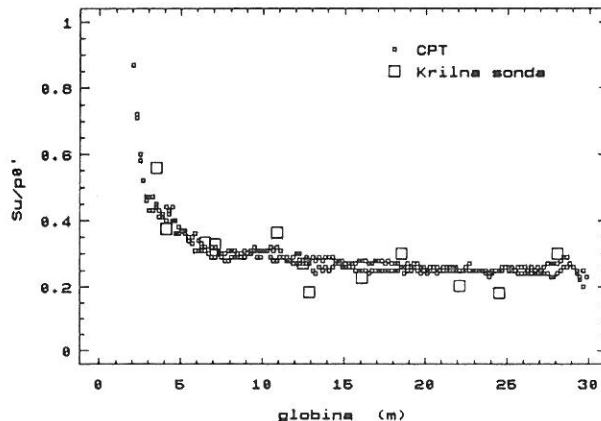
Slika 11. Porazdelitev faktorja  $N_c$ ; Viadukt Mirna; združena posnetka do globine 30m

Razmerje vrhunske nedrenirane strižne trdnosti z učinkovitim geološkim tlakom za že omenjeni združeni posnetek je podano na sliki 12, ločeno za rezultate CPT in krilne sonde. Tudi tu je opaziti, podobno kot pri barjanskih zemljinah, v zgornjih dveh metrih zemljinkega profila vrednosti preko 0,6, nato pa se z globino razmerje približa vrednosti 0,3.

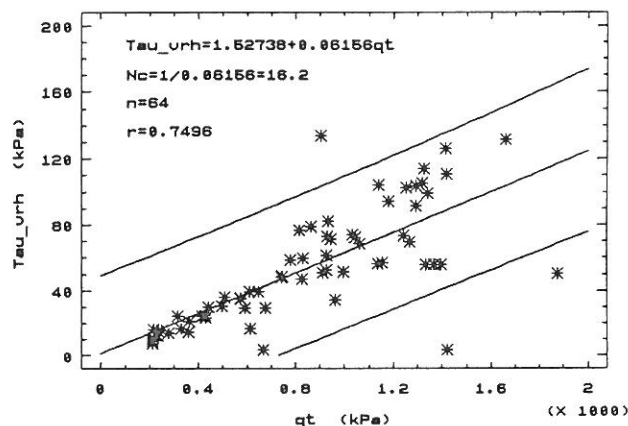
Do sedaj navedeni rezultati veljajo za združeni posnetek do globine 30m, do katere sta si penetraciji najbolj podobni, v nadaljevanju pa so obravnavani rezultati določanja faktorja nosilnosti iz združenega posnetka za celotno globino. Upoštevane so tudi ocene nedrenirane strižne trdnosti iz konsistenčnih mej po obrazcih (2) in (3) ter korigirane (podobno kot rezultati raziskav s krilnimi sondami) glede na indeks plastičnosti.

Sliki 13 in 14 ponazarjata, podobno kot sliki 10 in 11, določitev faktorja nosilnosti. Regresijska analiza izkazuje za povečano bazo podatkov vrednost 16,2 (slika 13), aritmetična sredina pa znaša ponovno 17,1 in standardni odklon 5,7. Razlika med obema vrednostima  $N_c$  je posledica različnih načinov določanja.

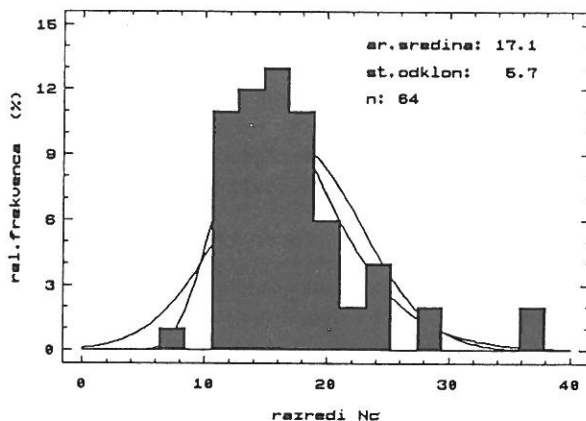
Ker so bile vrednosti strižne trdnosti korigirane glede na indeks plastičnosti, je za popolnejšo predstavitev rezultatov zanimiv tudi podatek ali se indeks plastičnosti z globino spreminja.



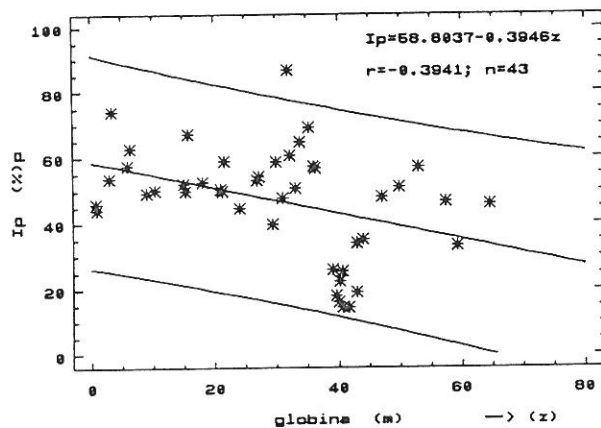
Slika 12.  $S_u/p_0'$ ; Viadukt Mirna; združena posnetka do globine 30m



Slika 13. Določanje faktorja  $N_c$ ; Viadukt Mirna; združena posnetka



Slika 14. Porazdelitev faktorja  $N_c$ ; Viadukt Mirna; združena posnetka



Slika 15. Sprememba  $I_p$  z globino; Viadukt Mirna; združena posnetka

Rezultati regresijske analize razpoložljivih podatkov so razvidni s slike 15 in kažejo, da indeks plastičnosti z globino nekoliko upada, vendar trend ni izrazit.

## 5. ZAKLJUČEK

Iz prikazanega lahko zaključimo, da je možno zanesljivo določati strižne karakteristike koherentnih zemljin tudi iz rezultatov raziskav s statičnim konusnim penetrometrom. Prednost tovrstnih raziskav v primerjavi z ostalimi, omenjenimi v tem prispevku, je v hitrosti izvedbe, ponovljivosti raziskav, količini registriranih podatkov in relativno najmanjši občutljivosti na razne vire napak, ki so nujni spremljevalec vsakega merilnega postopka.

Seveda pa je glavna pomanjkljivost statičnega penetrometra pri določanju nedrenirane strižne trdnosti zemljin, da tega parametra ne meri direktno. Povedano drugače, je potrebno za zanesljivo oceno nedrenirane strižne trdnosti nekega manj poznanega tipa tal predhodno izvesti alternativne raziskave v statistično primernem obsegu in primerne natančnosti ter nato določiti že omenjeni faktor nosilnosti.

## LITERATURA

- Bowles, J.E. (1985). Physical and geotechnical properties of soils. 2<sup>nd</sup> ed. McGraw-Hill. Singapore, 464.
- Broms, B., Flodin, N. (1988). History of soil penetration testing. Proc. of 1<sup>st</sup> ISOPT-1, Orlando, Vol. 1, 187.
- Bruzzi, D., Battaglio, M. (1988). Pore pressure measurements during cone penetration tests. Publikacija Ismes s.p.a. št.229, Bergamo, 94-98
- Fašalek, M., Ajdič I. (1989). Predstavitev sodobnega statičnega penetrometra. Gradbeni Vestnik, Ljubljana, Št. 38, 327-333.

Hunt, R.E. (1986). Geotechnical Engineering Techniques and Practices, McGraw-Hill Book Comp., New York.

Meigh, A.C. (1987). Cone penetration testing. London, 40-47.

Poročilo o geotehničnih raziskavah tal na južni obvoznici (Priključek Kardeljeve in Peruzzijske ceste). GZL, Institut za ggg. Arh.št.: J-II-30 d/a-174/78-148. Ljubljana, januar 1993.

Poročilo o raziskavah tal s statičnim penetrometrom na južni obvoznici v Ljubljani. št.Fagg01/93. Gradis, Razvojno tehnološka enota, Ljubljana, februar 1993.

Rezultati meritev nedrenirane strižne trdnosti s krilno sondo Geonor H 350. Poročilo (dopis) ZRMK št. 2-871/92 z dne 1.12.1992.