

# GENERALNO POROČILO ZA 1. GLAVNO TEMO: DOLOČEVANJE GEOTEHNIČNIH ZNAČILNOSTI ZEMLJIN IN KAMNIN

SILVAN VIDMAR, prof. dr., Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, FAGG

V prvo glavno temo so bili uvrščeni trije referati: Strižna trdnost koherentnih zemljin iz rezultatov CPT avtorja Igorja Ajdiča, Vertikalna in horizontalna vodopropustnost barjanskih zemljin avtorice Ane Gaberc in Računalniško vodene geotehnične preiskave avtorjev Bojana Žlendra, Ludvika Traunerja in Stanislava Škrabla. V generalnem poročilu so poleg pripomb in vprašanj podani tudi nekoliko obsežnejši povzetki referatov.

## IGOR AJDIČ: STRIŽNA TRDNOST KOHERENTNIH ZEMLJIN IZ REZULTATOV CPT

V referatu je opisan statični penetrometer, to je merilna naprava za izvajanje terenskih preizkusov strižne trdnosti zemljin s pomočjo utiskavanja konusa v temeljna tla s konstantno hitrostjo. Statični penetrometer je opremljen z merilci odpora tal proti penetriranju konice  $Q_c$ , trenjskega odpora ob plašču penetrometra  $F_s$  in pornih tlakov  $u_i$ , ki se pojavijo v tleh pri penetraciji. Vsi rezultati se sproti beležijo na terenski risalnik in se v digitalni obliki zapisujejo v računalnik.

Nedrenirano strižno trdnost  $S_u$  zemljine je možno iz vrednotiti s pomočjo obrazca za nosilnost tal, obremenjenih s krožno bremensko ploskvijo. Avtor je uporabil obrazec Bruzzija

$$Q_c = N_c S_u + p_0$$

kjer pomeni  $N_c$  faktor nosilnosti in  $p_0$  tlak v tleh v globini konice zaradi lastne teže tal. Ta tlak lahko preračunamo iz podatkov o prostorninskih težah slojev zemljin, vendar pa iz obrazca za nosilnost ne moremo neposredno izračunati nedrenirane strižne trdnosti, če ne

poznamo faktorja nosilnosti  $N_c$ . Tega lahko predpostavimo ali pa določimo iz eventualnih razpoložljivih podatkov, po drugi strani pa lahko faktor  $N_c$  iz gornjega obrazca izračunamo, če poznamo  $S_u$ . V referatu sta podana tudi empirična obrazca za ocenitev  $S_u$  iz podatkov o meji židkosti in o indeksu plastičnosti.

Avtor je usmeril svoje raziskave v ugotavljanje faktorja nosilnosti  $N_c$  za tipična malonosilna koherentna tla na osnovi terenskih neposrednih meritev nedrenirane strižne trdnosti s krilnimi sondami tipa Geonor in RMU. Uporabil je rezultate takšnih meritev na dveh lokacijah na Ljubljanskem barju (križanji Barjanske in Peruzzijske ceste z južno obvoznico) in iz dveh vrtin na izlivu reke Mirne v Jadransko morje. Za to lokacijo je uporabil tudi strižne trdnosti, ocenjene iz podatkov o zgornji lezni meji in o indeksu plastičnosti. Iz teh nedreniranih strižnih trdnosti, prikazanih v odvisnosti od globine, je po statističnih metodah določil regresijsko premico linearnega naraščanja strižne trdnosti z globino. Za vsak izveden penetracijski preizkus je izračunal faktor nosilnosti  $N_c$ , ustrežajoč strižni trdnosti  $S_u$  na regresijski premici, nato pa aritetično sredino faktorjev nosilnosti vzdolž vse globine. Sovisnice strižnih trdnosti  $S_u$ , preračunanih iz izmerjenih odporov  $Q_c$  s povprečnim faktorjem nosilnosti, in globine  $x$  se dobro ujemajo z rezultati krilnih sond, deloma tudi z rezultati strižnih trdnosti iz podatkov o konsistenčnih mejah in ležijo znotraj področja, omejenega s premicama 95% - nega zaupanja za napoved strižne trdnosti.

Povprečne vrednosti faktorjev nosilnosti znašajo za dve lokaciji na Ljubljanskem barju  $N_c = 12,1$  oziroma  $N_c = 16,6$ , za področje izliva reke Mirne pa od 16,7 do 17,1.

Nadaljne meritve penetracij in primerjave s krilnimi sondami na večjem številu lokacij bodo dale boljše povprečje za faktor nosilnosti. Tako bo možno na osnovi penetracijskih preizkusov nedrenirano strižno trdnost neposredno izvednotiti.

Avtor nadalje ugotavlja, da tudi izmerjene vrednosti trenja ob plašču  $F_s$  padajo v območje med premicama 95% -nega zaupanja za napoved rezidualne nedrenirane strižne trdnosti, določenima iz izmerjenih rezidualnih trdnosti s krilnimi sondami. Na osnovi tega navaja, da trenje  $F_s$  predstavlja približek rezidualne strižne trdnosti. Mnenja sem, da je to možno trditi le v primeru, če je strižna trdnost na kontaktu s plaščem penetrometra enaka strižni trdnosti zemljine. Prosim avtorja za njegovo mnenje.

#### ANA GABERC: VERTIKALNA IN HORIZONTALNA VODOPROPUSTNOST BARJANSKIH ZEMLJIN

V prvem delu referata avtorica podaja rezultate meritev vodopropustnosti barjanskih zemljin v laboratoriju v edometrijskih aparatih z višino vodnega stolpca 1,0 m. Intaktni vzorci za preizkuse so bili odvzeti iz treh sondažnih vrtin  $K_1$ ,  $K_2$  in  $K_3$ , ob katerih so bili merjeni v neposredni bližini tudi porni tlaki in njihova časovna disipacija s pomočjo statičnega konusnega penetrometra. Obojne meritve so bile izvajane tako v polžarici (MH, Ig) kot v glini pod polžarico (CI-CH, Ig). V laboratoriju so bili merjeni količniki vodopropustnosti v horizontalni in v vertikalni smeri. Za meritve vodopropustnosti v horizontalni smeri je bil skonstruiran poseben nož za izrezovanje valjastega edometrijskega vzorca s horizontalno osjo valja. En par edometrijskih vzorcev za obe meritvi vodopropustnosti je bil odvzet iz istega sondažnega valja na čim manjši vertikalni medsebojni oddaljenosti. Izmerjeni količniki vodopropustnosti so prikazani v obliki sovisnic  $k_{H,V} = k_{H,V}(e)$  v diagramih, v katerih so prikazane tudi sovisnosti  $e = e(\sigma')$ . Iz diagramov na sliki 1 je razvidno, da po en par vzorcev v splošnem ni imel enake začetne poroznosti  $e_0$ , medtem ko sta celotni krivulji stisljivosti praktično translatorno razmaknjeni za razliko začetnih poroznosti  $e_0$ . To ima seveda vpliv na medsebojno razmerje količnikov vodopropustnosti  $k_H$  oziroma  $k_V$ . V takšnem prikazu je sicer večina vzorcev izkazala večjo horizontalno propustnost od vertikalne, so pa tudi obratni primeri. Zato je avtorica podala še prikaz količnikov vodopropustnosti v odvisnosti od efektivnih normalnih tlakov  $k_{H,V} = k_{H,V}(\sigma')$ . V tem prikazu so količniki vodopropustnosti v horizontalni smeri  $k_H > k_V$  oziroma v nekaterih primerih enaki  $k_V$ .

Po mojem mnenju se razlike v začetnih količnikih por  $e_0$  pojavljajo zaradi poznane heterogenosti tanko uslojenih barjanskih tal. Vzorec za vertikalno meritev vodopropustnosti zajame v sondažnem valju višino ca 2 cm in je njegova homogenost bolj verjetna kot za vzorec za meritev horizontalne vodopropustnosti, kateri zajame v sondažnem valju višino ca 8 cm. Zato menim, da je prikaz  $k_{H,V} = k_{H,V}(\sigma')$  realnejši.

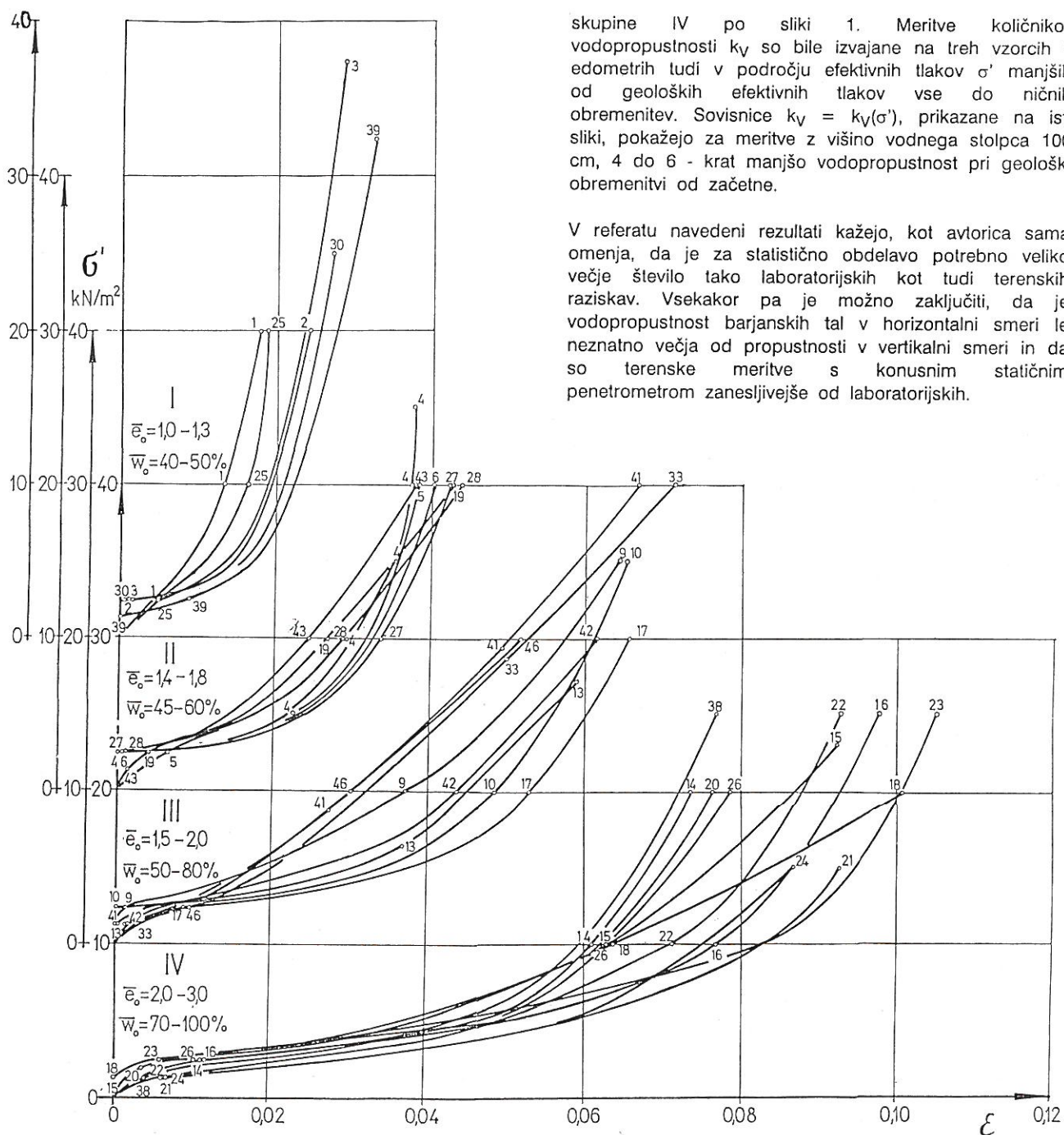
Vprašal bi avtorico za mnenje o prikazu  $k_{H,V} = k_{H,V}(e)$  s tem, da se vzamejo poroznosti  $e$  na "srednji" krivulji stisljivosti, potekajoči med obema sovisnicama  $e = e(\sigma')$ .

V nadaljevanju so podane primérjave laboratorijsko izmerjenih količnikov vodopropustnosti  $k_H$  s količniki, izmerjenimi na terenu ob sondažnih vrtinah s statičnim konusnim penetrometrom in izvednotinimi na osnovi disipacijskih krivulj. V referatu je navedeno, da ima na disipacijo pornih tlakov, če so ti merjeni z merilcem, nameščenim na plašču nad konusom penetrometra, horizontalna propustnost večji vpliv kot horizontalna, vendar pa ta trditev ni pojasnjena.

Laboratorijsko izmerjeni  $k_H$  pri geoloških obremenitvah, ustrežajočih globini izvajanja penetracijskih preizkusov, so bistveno manjši od količnikov  $k_H$ , izmerjenih na terenu s penetrometrom. Razlike med laboratorijsko izmerjenimi  $k_H$  in terenskimi, izvednotenimi po Balighu pri 90% - ni stopnji konsolidacije, so 6 do 30 - kratne, če pa so te izvednotene npr. po Tumayu, pa 14 do 65 - kratne. Če se omejimo samo na polžarico, potem so razlike v povprečju 10 oziroma 30 - kratne.

Za sloje polžarice je podana še povprečna vrednost vodopropustnosti  $k_H$ , izvednotena iz meritev pornih tlakov s piezometri tipa BAT pod nasipi južne ljubljanske obvoznice v istih profilih, kot so bile izvrtane vrtine  $K_1$ ,  $K_2$  in  $K_3$ . Ta povprečna vrednost se dobro ujema z meritvami s statičnim konusnim penetrometrom in odstopa od laboratorijskih meritev. Komentar za tako velika odstopanja ni podan. Vzrok za takšna odstopanja bi lahko bila deformacijska anizotropnost zemljin, obremenjenih v edometrijskih aparatih. Večletne raziskave barjanskih tal, izvajane v okviru raziskovalnih nalog Raziskovalne skupnosti Slovenije, so pokazale nepričakovano velike deformacije edometrijskih in triaksialnih vzorcev, obremenjevanih z napetostmi  $\sigma' < \sigma_{geol}$ . Vzrok temu je lahko porušitev prirodne strukture rahlih barjanskih tal že pri odvzemu zaradi distorzijskih deformacij po izvrtanju vrtine in zaradi velikih hidravličnih gradientov ob vdoru porne vode skozi dno v vrtino. Takozvani "intaktni" vzorci so lahko porušeni v tolikšni meri, da se pri začetnih obremenitvah v laboratoriju prirodna struktura lističasto izoblikovanih delcev zemljine spremeni v orientirano - paralelno. Takšna zemljina pa je veliko bolj stisljiva. Iz tega sledi, da bi morala biti poroznost vzorcev po konsolidaciji pri geoloških obremenitvah, veliko manjša od prirodne v ustrezni globini in temu ustrezno tudi veliko manjša vodopropustnost.

Na sliki 1 so prikazane edometrijske krivulje stisljivosti večjega števila vzorcev polžarice, odvzetih na različnih lokacijah Ljubljanskega barja, katerih obremenitve vključujejo tudi bremenske stopnje z efektivnimi tlaki  $\sigma'$  manjšimi od geoloških efektivnih tlakov, ustrežajočih globini vzetja vzorcev. Vzorci so glede na količnike por  $e_0$  in vlage  $w_0$  po odvzetju iz sondažnih vrtin, grupirani v 4 skupine I - IV. Pri vseh krivuljah stisljivosti je opaziti do efektivnih tlakov  $\sigma' = 3kPa$ , ki so bistveno manjši od geoloških, običajno konveksno zakrivljenost



Slika 1. Edometrične krivulje stisljivosti  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma')$  polžarice z raznih lokacij Ljubljanskega barja.

proti abscisni osi  $\varepsilon$ , nato pa začnejo posedki hitro naraščati in preidejo edometrične krivulje v običajno konkavno zakrivljenost šele pri tlakih  $\sigma'$ , ki so večji od geoloških.

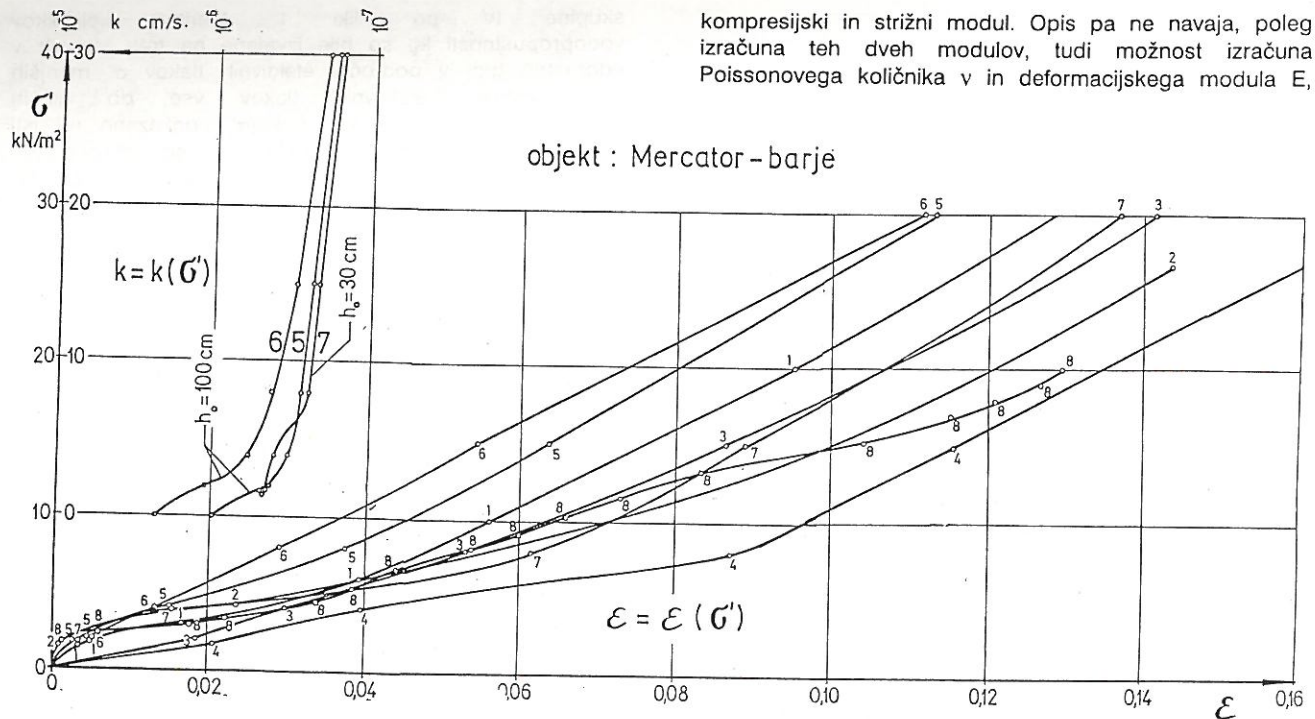
Na sliki 2 so prikazane edometrične krivulje stisljivosti osmih vzorcev polžarice, odvzetih iz sondažnega jaška pri objektu Mercatorja ob Jurčkovi poti. Geološka obremenitev vzorcev je znašala 10kPa. Tudi te krivulje imajo sličen potek in bi jih lahko primerjali s krivuljami

skupine IV po sliki 1. Meritve količnikov vodopropustnosti  $k_V$  so bile izvajane na treh vzorcih v edometrih tudi v področju efektivnih tlakov  $\sigma'$  manjših od geoloških efektivnih tlakov vse do ničnih obremenitev. Sovisnice  $k_V = k_V(\sigma')$ , prikazane na isti sliki, pokažejo za meritve z višino vodnega stolpca 100 cm, 4 do 6 - krat manjšo vodopropustnost pri geološki obremenitvi od začetne.

V referatu navedeni rezultati kažejo, kot avtorica sama omenja, da je za statistično obdelavo potrebno veliko večje število tako laboratorijskih kot tudi terenskih raziskav. Vsekakor pa je možno zaključiti, da je vodopropustnost barjanskih tal v horizontalni smeri le neznatno večja od propustnosti v vertikalni smeri in da so terenske meritve s konusnim statičnim penetrometrom zanesljivejše od laboratorijskih.

#### BOJAN ŽLENDER, LUDVIK TRAUNER, STANISLAV ŠKRABL: RAČUNALNIŠKO VODENE GEOTEHNIČNE PREISKAVE

V uvodu avtorji napovedujejo opis izvedbe konvencionalnih in nekonvencionalnih laboratorijskih preiskav z vpeljavo prednosti, ki jih nudijo računalništvo in nove merilne tehnike. Oboje omogoča vnaprejšnje programiranje poteka preizkusov in sprotnega beleženja



Slika 2. Sovisnice količnikov vodopropustnosti  $k_V = k_V(\sigma')$  in  $\varepsilon = \varepsilon(\sigma')$  v območju majhnih efektivnih tlakov za polžarico iz Ljubljanskega barja ob Jurčkovi poti.

rezultatov. Celoten "merilni modus" sestavljajo laboratorijski aparati, merilna tehnika ter računalniška strojna in programska oprema.

Sledi opis laboratorijske opreme, ki ni ustrezen in za geomehanika nesprejemljiv ter mestoma nepravilen. Pri opisu direktnega strižnega aparata (pravilno direktni translatorski strižni aparat) standardne izvedbe je navedeno, da ob preizkusu merimo triosno napetostno stanje in porne tlake, niso pa navedene meritve strižnih napetosti v odvisnosti od strižnih pomikov pri normalnih napetostih v drsni ploskvi, ki so v času preizkusa konstantne. Pri opisu rotacijskega strižnega aparata (pravilno: direktni rotacijski strižni aparat) je navedeno, da med preiskavo merimo "osno" obremenitev vzorca (ta je med preiskavo konstantna), ni pa omenjena meritev strižne napetosti oziroma torzijskega momenta v odvisnosti od zasuka. Opis klasičnega edometričnega aparata je omejen le na zasledovanje konsolidacijske krivulje, o krivulji stisljivosti in o modulu stisljivosti pa ni govora. V LMT na TF v Mariboru so razvili prototip edometra z dodatno opremo za merjenje bočnih napetosti in pornih tlakov v raznih nivojih, vendar pa temu aparatu ne ustreza naziv "biaksialni edometer". Biaksialni edometer bi bil edometer z možnostjo obremenjevanja v dveh smereh. V nadaljnjem opisu tega prototipa je navedeno, da izmerjene bočne napetosti omogočajo direkten izračun "elastičnih modulov  $K$  in  $G$ ". Kot je vsem znano modula  $K$  in  $G$  nista elastična modula pač pa imamo zanj strokovna izraza

ob enem z izračunom modula stisljivosti  $M_v$ . Nadalje bi avtorje prosil za obrazložitev razlike med triaksialnim edometrom in multiaksialnim aparatom. Pri opisu cilindričnega triaksialnega aparata ni navedeno, da služi za določanje deformacijskih parametrov  $E$  in  $\nu$  pri osnosimetričnem triosnem napetostnem stanju, kakor tudi ne, da služi za določanje strižne trdnosti zemljin.

Kljub vsemu pa je treba pohvaliti prizadevanje avtorjev za raziskovanja na področju konstrukcij novih aparatov in merilnih tehnik, predvsem na izdelavi prototipa edometra z možnostjo meritev bočnih napetosti in pornih tlakov in edometra s kontinuirnim obremenjevanjem v vertikalni smeri. Koristno bi bilo navesti tudi območje hitrosti obremenjevanja.

V nadaljevanju je opisana merilna in računalniška strojna in programska oprema, ki omogoča interpretacijo rezultatov meritev na ekranu s printerjem ali s ploterjem. Merilni postopek je voden avtomatično z vnaprej programiranim potekom.

Opisana je še uporabnost merilnega modusa za izvajanje konvencionalnih in reduciranih konvencionalnih preizkusov ter za hitre poiskuse s kontinuirnim in inkrementalnim obremenjevanjem.

Na koncu je podan še predlog določanja reoloških parametrov zemljin s postopkom v sedmih korakih.

# DISKUSIJA K REFERATU VERTIKALNA IN HORIZONTALNA VODOPROPUSTNOST BARJANSKIH ZEMLJIN

## DISCUSSION REGARDING THE PAPER VERTICAL AND HORIZONTAL PERMEABILITY OF MARSHLAND SUBSOILS

ANA GABERC, asist., Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, FAGG

**POVZETEK:** Podana so pojasnila v zvezi z vprašanjima, izraženima v glavnem poročilu. Prvo se nanaša na razliko v količniku por pri parih preizkušancev. Prikazan je vpliv na diagrame horizontalne in vertikalne vodopropustnosti, če bi te prikazali v odvisnosti od povprečne poroznosti obeh vzorcev. V tem primeru so horizontalne vodopropustnosti večje od vertikalnih oziroma kvečjemu enake. Kot pojasnilo k drugemu vprašanju so povzeti nekateri rezultati tujih raziskav na področju interpretacije disipacijskih testov s konusnim penetrometrom. Prikazano je časovno spreminjanje pornih tlakov v okolici konusa ter na mestih, kjer so lahko vgrajeni merilci pornih tlakov, kar je bilo dobljeno s konsolidacijsko analizo za linearno izotropen material.

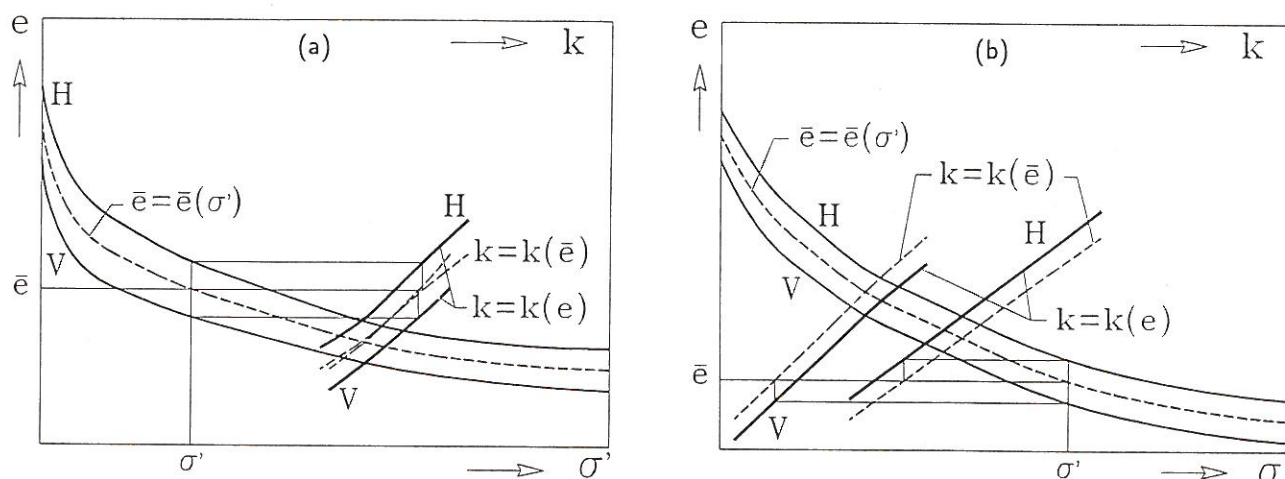
**SUMMARY:** The explanations regarding two questions dealt with in the general report are given. First question refer to the differences in the void ratios of the pairs of samples. The influence of the intermediate values of the void ratios of both samples on the horizontal and vertical permeability is presented. In this case the horizontal permeability is greater or equals the vertical one. In order to explain the second question some results of foreign analyses in the field of interpretation of the dissipation tests with cone penetrometer are summarised. The rate of excess pore pressures in the area of the cone and in the locations of the porous sensing element as obtained by the consolidation analysis for a linear isotropic material are presented.

### PRIKAZ VODOPROPUSTNOSTI V ODVISNOSTI OD POVPREČNEGA KOLIČNIKA POR

V referatu so bile na sliki 1 prikazane krivulje stisljivosti za vzorce, ki so bili izrezani v vertikalni in v horizontalni smeri. Količniki por se pri večini preiskav med seboj nekoliko razlikujejo, čeprav so bili pari vzorcev odvzeti zaporedno iz valjev za shranjevanje zemljin. Kot je navedeno že v referatu, se te razlike pojavijo deloma zaradi nehomogenosti zemljin in deloma tudi

zaradi napak pri meritvah. Tudi diagrami vodopropustnosti  $k = k(e)$  so nekoliko zamaknjeni za eno ali drugo smer precejanja vode. Pri večini preiskav je izražena pri določenem količniku por  $e$  nekoliko večja vodopropustnost v horizontalni smeri.

Logično bi bilo nanesti vodopropustnosti v odvisnosti od srednjega, to je povprečnega količnika por obeh vzorcev, ki ustreza efektivnim napetostim  $\sigma'$ . V tem primeru se krivulji vodopropustnosti pri nekaterih pre-



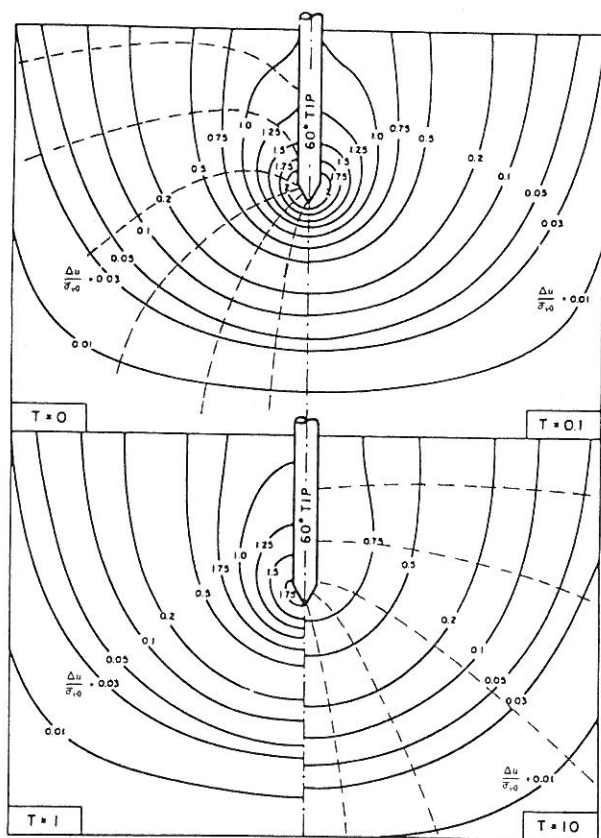
**Slika 1.** Prikaz vodopropustnosti v odvisnosti od povprečnega količnika por: (a) zmanjšanje razlik, (b) povečanje razlik med vodopropustnostjo v horizontalni in vertikalni smeri.

iskavah za obe smeri približata ali celo pokrijeta, torej je vodopropustnost v obeh smereh enaka, kar je shematsko prikazano na sliki 1(a). Pri drugih preiskavah pa se krivulji še bolj razmakneta, vendar vedno tako, da je horizontalna vodopropustnost večja od vertikalne. Tak primer je shematsko prikazan na sliki 1(b).

Prikaz vodopropustnosti v odvisnosti od povprečnega količnika por  $k = k(\bar{e})$  pa je glede razlik v vodopropustnostih v obeh smereh enak kot prikaz količnikov vodopropustnosti v odvisnosti od efektivnih napetosti  $k = k(\sigma')$ . Ker so diagrami  $k = k(\sigma')$  v preračunih velikokrat bolj praktični od diagramov  $k = k(e)$ , sem na sliki 2 v referatu raje prikazala te sovsnice.

### VPLIV POLOŽAJA MERILCA PORNIH TLAKOV V KONUSU NA POTEK DISIPACIJSKEGA TESTA

Pri izvajanju penetracije s statičnim penetrometrom se pojavijo porni tlaki, torej neko potencialno hidravlično polje, ki pa se med disipacijskim testom spreminja. Na sliki 2 so prikazani sistemi ekvipotencialnih ploskev okoli

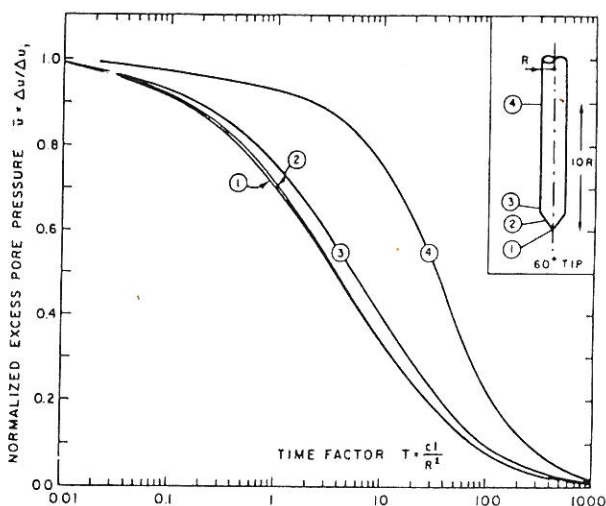


Slika 2. Sistemi ekvipotencialnih ploskev pri različnih faktorjih časa  $T$ .

konusa za štiri različne čase oz. pri štirih zaporednih faktorjih časa  $T$ . Iz tega prikaza je razvidno, da so strujnice na konici penetrometra obrnjene na vse strani, torej je precejno področje prostorsko. Pri merilcu, ki je znatno odmaknjen od konice, pa je strujanje porne vode radialno v horizontalni smeri, precejno področje je cilindrično. Merilec pornih tlakov v tem primeru meri horizontalno vodopropustnost zemljin.

V referatu so opisani disipacijski testi, ki jih je izvajala Raziskovalna enota GIP Gradis, Ljubljana, s konusom, pri katerem se nahaja merilec nekoliko za pričetkom valjastega dela. Strujanje je v tem primeru tako, da nanj v začetku delno vpliva tudi propustnost v vertikalni smeri, proti koncu disipacijskega procesa pa pretežno v horizontalni smeri. Z laboratorijskimi preiskavami barjanskih zemljin ni bila ugotovljena bistvena razlika med vodopropustnostjo v horizontalni in vertikalni smeri, zato za naše preiskave in rezultate glede smeri izmerjene vodopropustnosti položaj merilca ni tako pomemben.

Položaj merilca v konusu je pomembnejši glede časovnega poteka, saj je upadanje pornih tlakov ob konici hitrejše kot nekje dovolj zadaj na plašču valjastega dela. Slika 3 prikazuje časovni potek konsolidacije za različno postavljene merilce pornih tlakov.



Slika 3. Časovni potek konsolidacije v odvisnosti od položaja merilca pornih tlakov.

### SLOVSTVO

Baligh, M.M., Levadoux, J.N. (1986). Consolidation after Undrained Piezocone Penetration. Prediction and interpretation, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 7, New York.