

# VERTIKALNA IN HORIZONTALNA VODOPROPUSTNOST BARJANSKIH ZEMLJIN VERTICAL AND HORIZONTAL PERMEABILITY OF MARSHLAND SUBSOILS

ANA GABERC, asistentka, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, FAGG

**POVZETEK:** Na tipičnih barjanskih zemljinah je bila izvedena serija edometriških preiskav, za katere so bili vzorci odvzeti paroma v vertikalni in horizontalni smeri. Pri vsaki bremenski stopnji je bila merjena vodopropustnost. V referatu so prikazani rezultati teh preiskav, tako diagrami stisljivosti  $e = e(\sigma')$  kot tudi sovisnosti količnika vodopropustnosti od količnika por  $k = k(e)$  oz. od efektivnih napetosti  $k = k(\sigma')$ . Podana je primerjava rezultatov laboratorijskih meritev vodopropustnosti pri geoloških obtežbah z rezultati meritev vodopropustnosti na terenu kot jih je možno ugotoviti z disipacijskimi testi med preiskavo s statičnim penetrometrom. Ustreznost laboratorijskih in terenskih vrednosti količnikov vodopropustnosti je preverjena z meritvami upadanja konsolidacijskih pornih tlakov na terenu, izvedenih med gradnjo Ljubljanske južne obvoznice.

**SUMMARY:** A series of oedometric tests was conducted on typical marshland subsoils. The samples were taken vertically and horizontally at each depth. Permeability was measured at each load increment. The results of these tests are presented in this paper. They include compressibility diagrams  $e = e(\sigma')$  as well as relations between the permeability and void ratio  $k = k(e)$  or between the permeability and effective stress  $k = k(\sigma')$ . A comparison of the laboratory permeability results at loads equivalent to the geological stress for the samples and in situ permeability measurements as obtained by the dissipation data after interrupting steady cone penetration (CUPT) is also given. The reliability of laboratory and in situ values of permeability was evaluated with measurements of the excess pore pressures during the construction of the Southern Bypass for the city of Ljubljana.

## UVOD

Pri računu dvodimenzionalne konsolidacije tal, ko imamo v tla vgrajene vertikalne drenaže za pospešitev posedanja, je velikost količnika vodopropustnosti v vertikalni in v horizontalni smeri zelo pomembna. Za ekonomično projektiranje je v takih primerih zlasti horizontalna vodopropustnost odločilna. Meritve posedanja in meritve konsolidacijskih pornih tlakov med gradnjo Južne ljubljanske obvoznice so izkazale hitrejšo konsolidacijo kot pa je bila predvidena na podlagi standardnih laboratorijskih preiskav. Zato smo smatrali, da je horizontalna vodopropustnost barjanskih zemljin večja od vertikalne zaradi lističaste strukture. Ker je v zadnjih dveh letih Gradis pričel z meritvami pornih tlakov pri preiskavah s statičnim konusnim penetrometrom ali krajše CUPT, so bile v treh primerjalnih vrtnah izvedene laboratorijske meritve vodopropustnosti v obeh smereh ter nekaj disipacijskih testov.

V laboratoriju je bila vodopropustnost preiskana na 8 parih vzorcev, disipacijskih testov pa je bilo v teh sondah izvedenih 6, od katerih je bila primerjava možna za 5 vzorcev. To je premajhno število preiskav za praktično uporabo pri računskih napovedih, rezultati so podani kot informacija in morda kot pričetek širše zasnovane raziskave.

## LABORATORIJSKE PREISKAVE VERTIKALNE IN HORIZONTALNE VODOPROPUSTNOSTI

V letošnjem letu je bila opravljena serija laboratorijskih preiskav stisljivosti in vodopropustnosti značilnih barjanskih zemljin, pri katerih so bili vzorci odvzeti v obeh smereh. Konstruiran je bil poseben nož za odvzem edometriških vzorcev iz plastičnih valjev za shranjevanje intaktnih zemljin v pravokotno smeri glede na smer standardnih preiskav stisljivosti in vodopropustnosti. Tako so preiskave potekale vzporedno na parih vzorcev s precejšnjem vodu v horizontalni smeri ter v standardni vertikalni smeri. Prerez vzorcev je bil 38,485 cm<sup>2</sup>, višina pa 1,901 cm. Pregled izvedenih preiskav in osnovne značilnosti zemljin so podane v preglednici 1.

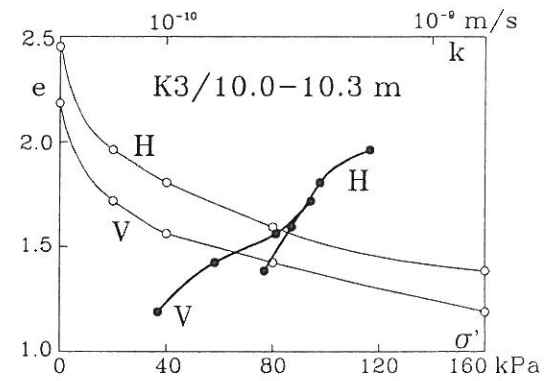
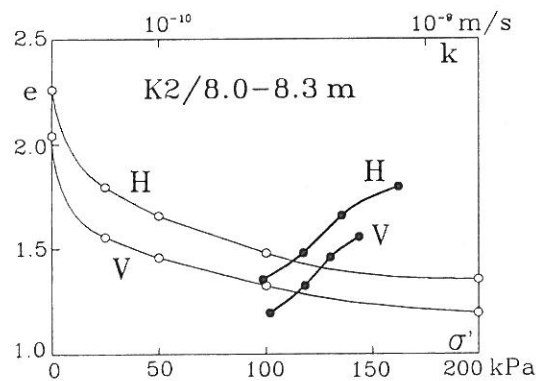
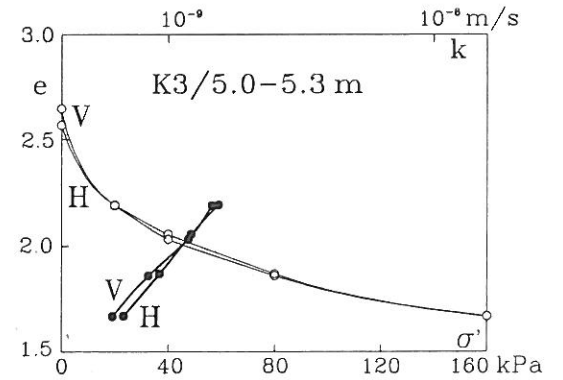
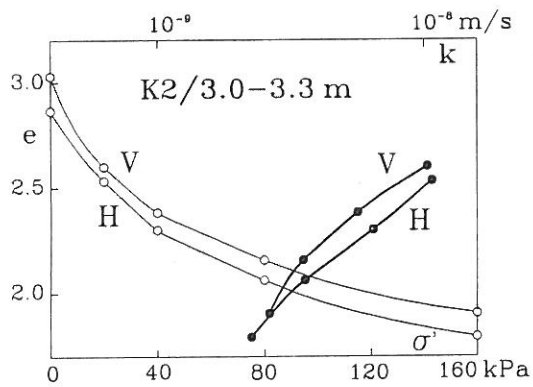
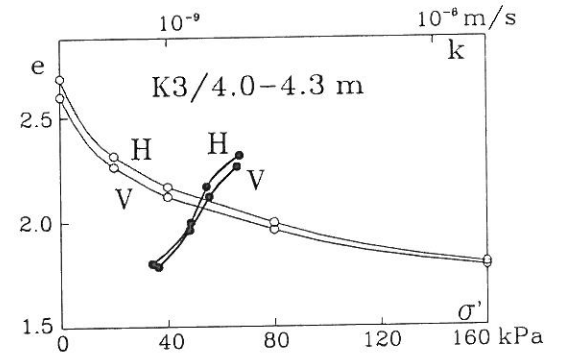
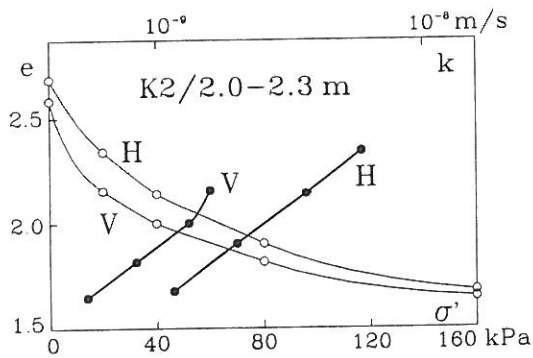
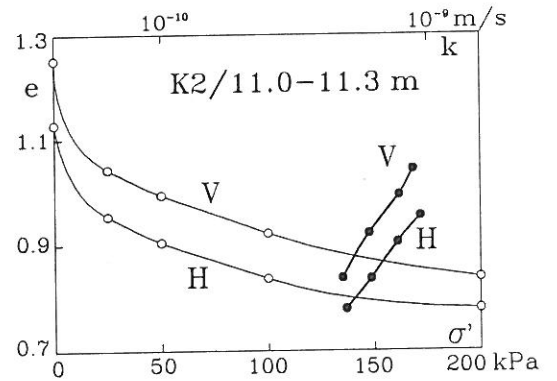
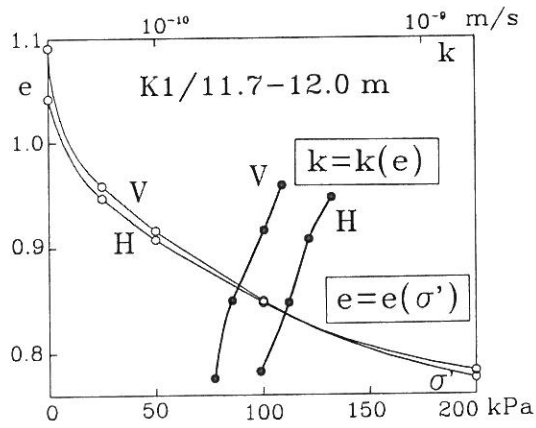
**Preglednica 1.** Pregled vzorcev zemljin

Sonda	Globina m	AC klasif.	$w_0$ %	$w_L$ %	$w_P$ %	$I_P$
K1	11,7-12,0	MI-ClIlg	41,8	45,7	26,7	19,0
K2	2,0-2,3	MHž	98,9	-	-	-
	3,0-3,3	MHž	106,1	96,5	64,6	31,9
	8,0-8,3	MHIlg	76,1	81,2	41,5	39,7
	11,0-11,3	MH-CH-ClIlg	47,3	49,4	27,2	22,2
K3	4,0-4,3	MHIlg	101,6	113,1	54,9	58,2
	5,0-5,3	MHIlg	96,0	102,3	53,8	48,5
	10,0-10,3	CHIlg	86,0	95,3	37,5	57,8

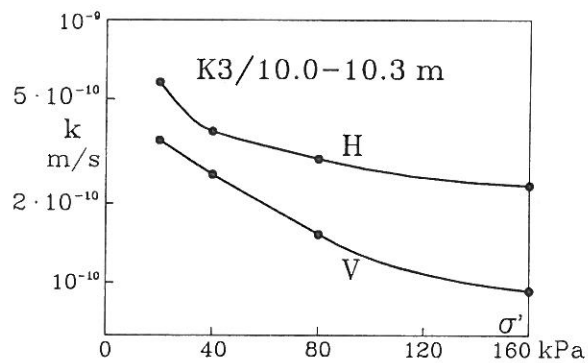
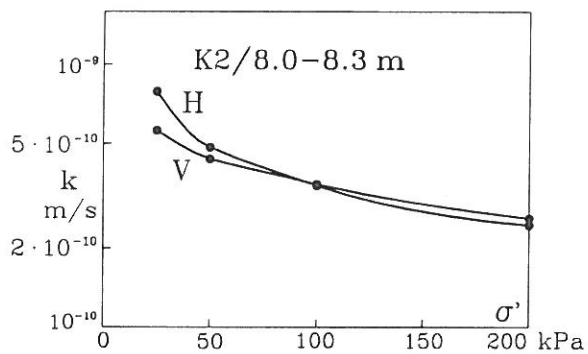
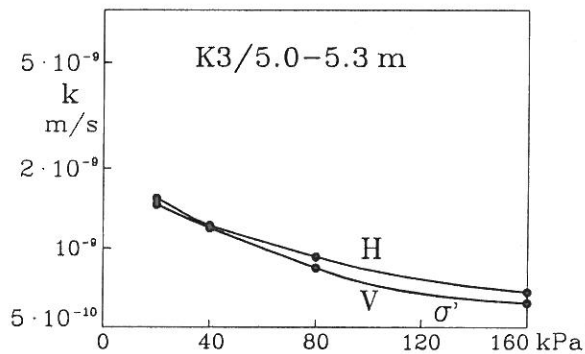
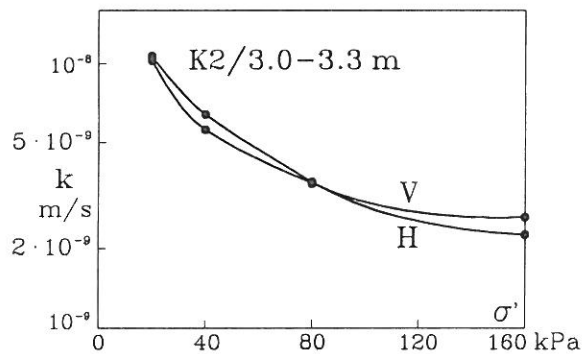
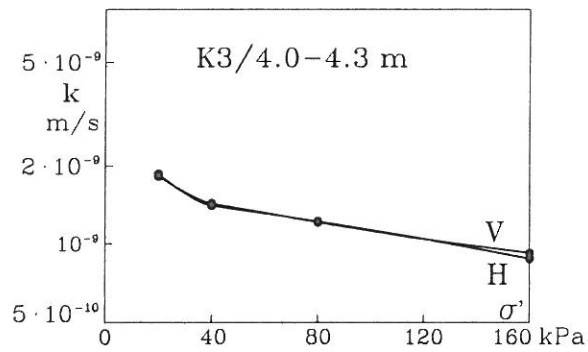
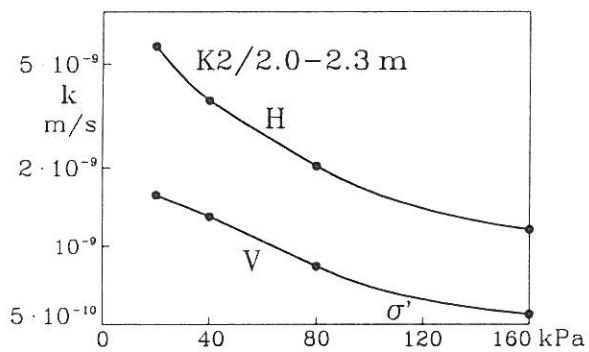
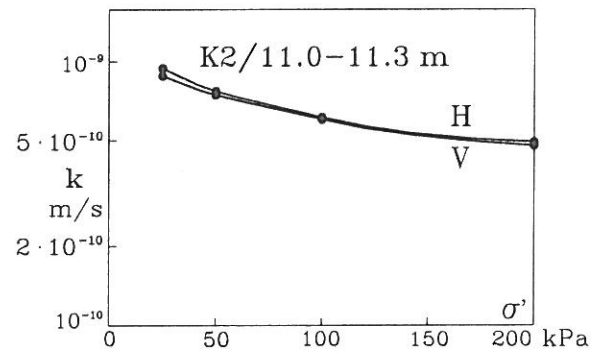
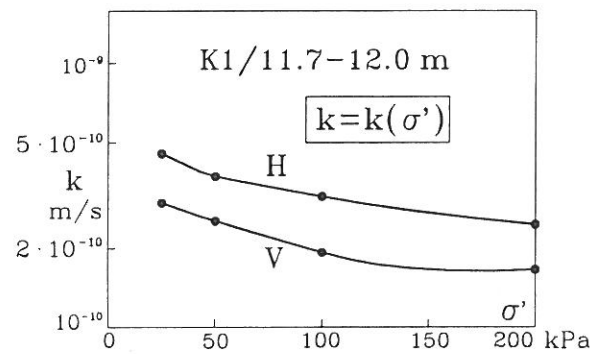
Rezultati preiskav kot sovisnice med količniki por  $e$  in efektivnimi napetostmi  $\sigma'$  ter sovisnice med koeficienti vodopropustnosti  $k$  in količniki por  $e$  so za vse pare vzorcev podani na sliki 1.

Opaziti je manjša odstopanja v začetnih količnikih por  $e_0$  med vzorcema v eni in drugi smeri, medtem ko je nadaljni potek krivulj stisljivosti v glavnem paralelen. Razlike v  $e_0$  je pripisati nehomogenosti zemljin, delno pa tudi natančnosti meritev. Ugotovljena je bila torej enaka stisljivost v obeh smereh, vodopropustnost v horizontalni smeri pa je pri večini preiskav nekoliko večja od vertikalne. Sovisnice  $k = k(e)$  za horizontalno smer so razen v dveh primerih pomaknjene v desno stran od sovisnic za vertikalno smer, kar pomeni pri določenem količniku por  $e$  večjo propustnost v horizontalni smeri. Povprečne razlike znašajo pri 5 vzorcih od cca 20% do cca 50%, pri enem vzorcu pa med 200% in 360%.

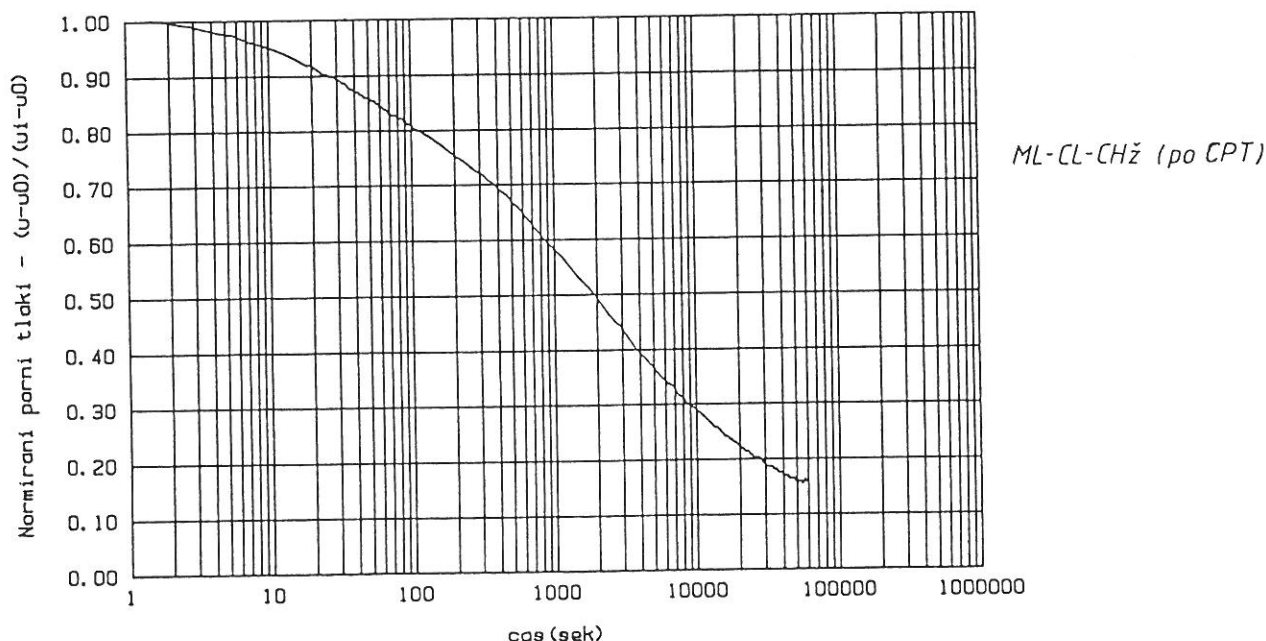
Da bi se v prikazu količnikov vodopropustnosti izognili vplivom eventualnih napak pri določanju  $e_0$ , kar "povleče" za seboj vse vrednosti količnikov por neke preiskave, smo količnike vodopropustnosti prikazali tudi v odvisnosti od efektivnih napetosti  $k = k(\sigma')$ . Te sovisnice so prikazane na sliki 2. V tem prikazu so se



Slika 1. Krivulje stisljivosti  $e = e(\sigma')$  in vodopropustnosti  $k = k(e)$  v horizontalni in vertikalni smeri



Slika 2. Spreminjanje vodopropustnosti v horizontalni in vertikalni smeri v odvisnosti od efektivnih napetosti  $k = k(\sigma')$



Slika 3. Primer disipacijskega testa vzdolž lžanske ceste (Ajdič, 1991)

ponekod razlike med vodopropustnostjo v eni in drugi smeri nekoliko spremenile. Pri 5 vzorcih je vodopropustnost v obeh smereh enaka - razlike so manjše od 10% - pri 3 vzorcih pa je horizontalna propustnost opazno večja od vertikalne in sicer za približno 50%, 110% in največ 370%. Večja horizontalna vodopropustnost je pri tem prikazu pri dodatnih 3 vzorcih izginila, kar lahko kaže na neko netočnost pri določanju količnikov por  $e$ .

### TERENSKE PREISKAVE VODOPROPUSTNOSTI S STATIČNIM PENETROMETROM

Pri preiskavah tal s statičnim penetrometrom se z uporabo piezokonusa lahko meri velikost pornega tlaka med penetriranjem v zemljinu. Velikost induciranih pornih tlakov je pokazatelj propustnosti zemljin. Tako v posnetem profilu vrtine ločimo propustnejše peščene sloje od slabo propustnih glinastih in meljastih slojev. Če pa konus na določeni globini ustavimo in zasledujemo upadanje inducirane pornega tlaka, lahko iz časovnega poteka upadanja sklepamo na koeficient konsolidacije in dalje na koeficient vodopropustnosti. Primer časovne krivulje upadanja pornega tlaka pri disipacijskem testu je prikazan na sliki 3. Normirani porni tlak je

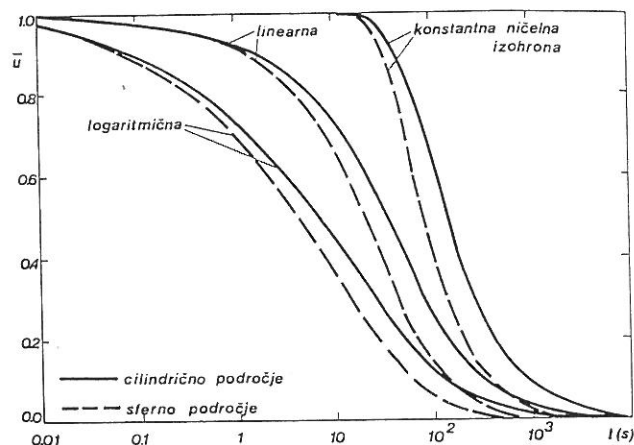
$$\bar{u} = \frac{u - u_0}{u_1 - u_0} \quad (1)$$

kjer pomeni  $u$  trenutni porni tlak (v času  $t$ ),  $u_0$  končni porni tlak po uplaknitvi, ki je enak hidrostatskemu pornemu tlaku ter  $u_1$  začetni porni tlak (v času  $t = 0$ ). Normirani porni tlak je enostaven pokazatelj dosežene stopnje konsolidacije  $U$ , ki jo povzroči vtisnjenje penetrometra in je enaka

$$U = 1 - \bar{u} \quad (2)$$

Tako velikost izmerjenega pornega tlaka  $u$ , kot tudi časovni razvoj disipacije sta odvisna od položaja merilca pornih tlakov v konusu. Piezokonus z merilcem na konici izmeri največje porne tlake, pre-

cejno območje je prostorsko, pri merilcu na plašču, ki je odmaknjen od pričetka valjastega dela, pa so razmere bližje ravninskim. Na hitrost upadanja pornih tlakov ob filtru vpliva tudi oblika ničelne izohrone in obseg vplivnega področja penetracije oz. inducirane pornega tlaka. Slika 4 prikazuje potek disipacij za različne oblike ničelnih izohron in za mejna primera precejanja porne vode t.j. za prostorsko ali sferno področje ter za ravninsko ali cilindrično področje, slika 5 pa primerjavo med računskimi in dejanskimi ničelnimi izohronami kot jih je z meritvami dobil Roy (Roy in drugi, 1982).

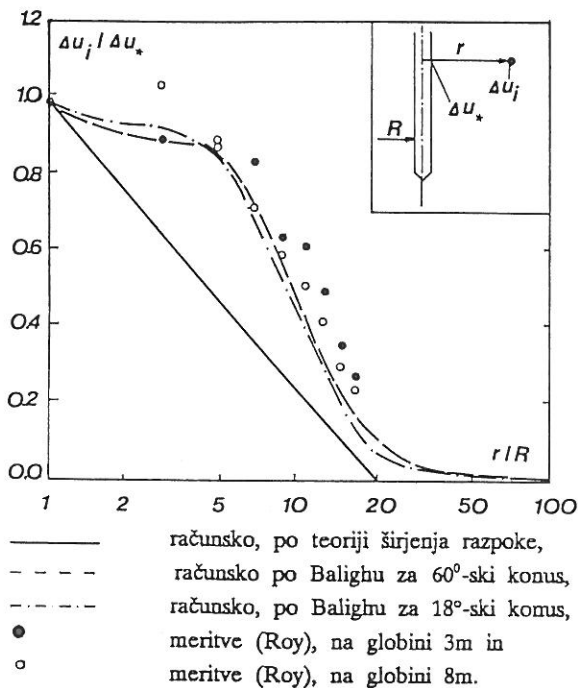


Slika 4. Računske disipacijske krivulje za različne oblike ničelnih izohron in precejnega področja (Baligh, Levadoux, 1986)

Pri cilindričnem precejnem področju je precejanje vode v radialni smeri okoli penetrometra, zato se smatra, da igra glavno vlogo vodopropustnost v horizontalni smeri. Tako je faktor časa  $T$ ,

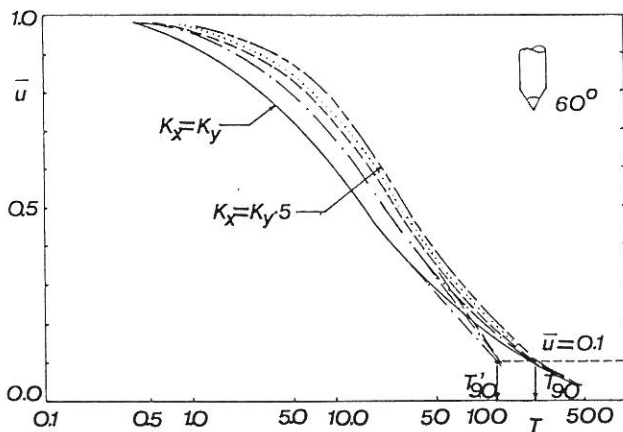
izražen s koeficientom horizontalne konsolidacije  $c_h$ , časom  $t$  in polmerom konusa  $R$ :

$$T = \frac{c_h t}{R^2} \quad (3)$$



Slika 5. Primerjava računskih in izmerjenih ničelnih izohron (Roy et al., 1982)

Različni raziskovalci so podali računsko sovisnice  $\bar{u} - T$ , med njimi Torstensson, Baligh in Levadoux, Tumay itd. Nekateri med njimi so upoštevali tudi anizotropno vodopropustnost, kot n.pr. Tumay, kar je prikazano na sliki 6.



Slika 6. Računske disipacijske krivulje po Tumay-u

Koeficient horizontalne konsolidacije  $c_h$  izvedene meritve je tisti, ki bo dal pri določenem času  $t$  enako stopnjo konsolidacije kot računsko sovisnica  $\bar{u} - T$ . Tako z meritvami disipacij ni potrebno

čakati na polni upad pornih tlakov, vendar je račun zanesljivejši, če dosežemo čim večjo stopnjo konsolidacije. Iz  $c_h$  izračunamo koeficient vodopropustnosti zemljine v horizontalni smeri  $k_h$  po znanem obrazcu:

$$k_h = \frac{c_h \gamma_w}{E_{oed}} \quad (4)$$

pri čemer je  $E_{oed}$  edometriški modul iz preiskav stisljivosti pri geološki obtežbi ali pa modul stisljivosti iz preiskave s statičnim penetrometrom.

V preglednici 2 so navedeni rezultati izračuna  $k_h$  z upoštevanjem diagramov  $\bar{u} - T$  po Tumayu in Balighu za disipacijske teste, izvedene v neposredni bližini vrtin, iz katerih so bili odvzeti intaktni vzorci za laboratorijske preiskave horizontalne in vertikalne vodopropustnosti. Podanih pa je še nekaj primerov, izvedenih na značilnem sloju barjanske poljarice iz raziskav ob lžanski cesti (Ajdič, 1991).

Preglednica 2.  $k_h$  iz meritev CUPT in laboratorija

Sonda/ globina	Zemljina	$k_h$ (m/s)			
		Tumay	Baligh		Labora- torij
			50%	90%	
K1/12,0	MI-ClIlg	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$9,4 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^{-10}$
K1/17,0	ML-SMIlg	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	*
K2/3,5**	MHž	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$7,6 \cdot 10^{-9}$
K2/8,0	MHIlg	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$9,9 \cdot 10^{-9}$	$6,3 \cdot 10^{-9}$	$5,6 \cdot 10^{-10}$
K3/3,0	MHž	$8,9 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$
K3/8,0	MHIlg	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$7,1 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
BL1/2,5	MHž	$4,4 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-8}$		
BL3/4,5	MHž	$2,9 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$		
IC3/5,8	MHž	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$		
IC4/5,0	MHž	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-9}$		

\* vzorca iz te globine nismo mogli vgraditi v edometer zaradi grobih zrn

\*\*rezultat je zaradi neobičajne disipacijske krivulje težko primerljiv z laboratorijskim rezultatom

Hkrati so v preglednici 2 podani koeficienti  $k_h$  iz laboratorijskih preiskav najbližjih vzorcev pri geoloških obtežbah. Laboratorijske meritve se najbolj ujemajo z vrednostmi po Balighu iz 90%-nega upada pornih tlakov. Največja razlika se pojavi pri vzorcu K1/12,0 m. Razlike v  $k_h$  po Tumayu in laboratorijskimi so 14 do približno 65-kratne, razlike v rezultatu, izračunanem po Balighu pri 90%-ni stopnji konsolidacije in laboratorijskimi pa 6 do 30-kratne. Raztros je zelo velik. Treba bi bilo izvesti še veliko disipacijskih testov v barjanskih zemljinah, da bi lahko horizontalno vodopropustnost obdelali statistično.

#### PRESOJA HORIZONTALNE VODOPROPUSTNOSTI IZ REZULTATOV MERITEV PORNH TLAKOV NA TERENU

V istih merskih profilih kot sta bili izvedeni sonde K1 in K2 ter sonda K3 smo med gradnjo Južne obvoznice spremljali hitrost konsolidacije z meritvami pornih tlakov (Gaberc, Vidmar, 1988). V nadaljni analizi se bomo omejili na sloj poljarice MH ž-Ig, ker je iz tega sloja največ laboratorijskih preiskav horizontalne vodopropustnosti in disipacijskih testov. Meritve pornih tlakov so na vseh lokacijah v sloju poljarice pokazale med nasipavanjem cestnega

nasipa zelo majhne vrednosti, kar kaže na hitro sprotno konsolidacijo, ki so jo omogočale v trikotnih mrežah razporejene vertikalne drenaže.

Račun horizontalne konsolidacije oz. količnika horizontalne vodopropustnosti  $k_h$  je bil za zgodnje meritve pornih tlakov po prvih obremenitvah izveden po Barronu (Verdeyen, 1968). Upoštevan je bil parabolichen potek izohron med drenažami, piezometri v težišču trikotnikov pa so izmerili max. vrednost. Z upoštevanjem zgolj horizontalnega precejjanja porne vode je bil v polžarici dobljen  $k_h = 2,5 \cdot 10^{-8}$  m/s, z upoštevanjem precejjanja tudi v vertikalni smeri pa  $k_h = 2,0 \cdot 10^{-8}$  m/s.

S to vodopropustnostjo se najbolj ujema povprečje iz disipacijskih testov iz vrtin K2 in K3, dobljeno po Baligh-jevi metodi za 90%-no konsolidacijo, ki znaša  $k_h = 2,5 \cdot 10^{-8}$  m/s. Iz podanih laboratorijskih preiskav horizontalne vodopropustnosti dobimo za srednjo globino polžarice pri geoloških tlakih povprečno vrednost  $k_h = 3,5 \cdot 10^{-9}$  m/s, kar je približno 1/6 horizontalne vodopropustnosti  $-k_h = 2,0 \cdot 10^{-8}$  m/s - iz preračuna meritev pornih tlakov na terenu.

## ZAKLJUČKI

Izvedene laboratorijske preiskave na tipičnih barjanskih zemljinah niso pokazale toliko večje horizontalne vodopropustnosti od vertikalne kot je bila pričakovana iz analiz meritev pornih tlakov "in situ". Seveda pa so z relativno majhnimi in maloštevilnimi laboratorijskimi vzorci možnosti spoznanj določenih lastnosti omejene. V naravi je lahko v procesu konsolidacije odločilna makropropustnost, če zemljine vsebujejo bistveno bolj propustne vložke in prosloje. Glede mikropropustnosti pa tudi glede stisljivosti podane preiskave izkazujejo precejšnje izotropnost.

Preiskave s statičnim penetrometrom s piezokonusom heterogenost geološkega sestava tal dobro zajamejo. Do sedaj izvedene disipacije in preračuni po raznih metodah so za sloj polžarice MH izkazale povprečni koeficient horizontalne vodopropustnosti  $k_h = 3,0 \cdot 10^{-8}$  m/s kar je zelo blizu vodopropustnosti, izračunani iz meritev pornih tlakov na terenu. Povprečni koeficient vodopropustnosti, dobljen pri številnih standardnih laboratorijskih preiskavah v vertikalni smeri pri geoloških obtežbah pa znaša okrog

$3,0 \cdot 10^{-9}$  m/s, torej v povprečju 10-krat manj kot po rezultatih terenskih disipacij in 7-krat manj kot iz terenskih meritev pornih tlakov. Vplivno področje disipacijskih testov je že večje od preiskanih edometrijskih vzorcev in je zato morda bližje realnosti, vendar je potrebno izvesti še nadaljne meritve in preveriti ustreznost računskih metod.

Primerjava rezultatov v laboratoriju in na terenu kaže na to, da je vodopropustnost, izmerjena v edometru manjša od dejanske zaradi vplivov neintaktnosti in ponovne obtežbe. Neustreznost geotehničnih parametrov, dobljenih v laboratoriju pri začetnih bremenskih stopnjah do naravne geološke obremenitve je že bila obravnavana v naših raziskavah (Vidmar in drugi, 1989) in se s temi rezultati smiselno ujema. Zaradi rahle strukture barjanskih zemljin, zlasti polžarice, je občutljivost največja v začetku obremenjevanja in takrat se tudi koeficient vodopropustnosti veliko spremeni. Pri višjih bremenskih stopnjah bo razlika med terenskimi oz. dejanskimi in laboratorijskimi vodopropustnostmi manjša. Primerjalnih preiskav s CUPT v takih pogojih zaenkrat še nimamo, bile bi pa zanimive in koristne.

## SLOVSTVO

- Ajdič, I. (1991). Uporaba raziskav s statičnim penetrometrom za načrtovanje rekonstrukcij cest in kontrolo kakovosti izvedbe cestnih nasipov. Raziskovalna naloga, Ljubljana.
- 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.
- Gaberc, A., Vidmar, S. (1988). Meritve in analiza pornih tlakov na Južni obvoznici Ljubljana, Poročilo KMTL št. 88-1-25, Ljubljana.
- Roy, M. et al. (1982). Development of pore pressure in quasi-static penetration tests in sensitive clay, Canadian Geotechnical Journal, 19(2), pp. 124-138.
- Verdeyen, J., Roisin, V., Nuyens, J. (1968). Mécanique des Sols. Dunod, Paris.
- Vidmar, S., Gaberc, A., Pušlar, G. (1989). Napake pri izvajanju laboratorijskih raziskav malo nosilnih tal. Saopćenja I. Savjetovanja Društva za mehaniku tla i temeljenje Hrvatske - Praktična iskustva u geotehnici, Opatija, 73-79.