

|                                  |        |             |               |
|----------------------------------|--------|-------------|---------------|
| Rudarsko-geološko-naftni zbornik | Vol.15 | str. 95-102 | Zagreb, 2003. |
|----------------------------------|--------|-------------|---------------|

UDK 624.131.7:624.131.4  
UDC 624.131.7:624.131.4

*Prethodno priopćenje*  
*Preliminary communication*

## LABORATORIJSKO MJERENJE KOEFICIJENTA PROPUSNOSTI TLA – USPOREDBA KONVENCIONALNIH I NOVIH METODA

ŽELIMIR VEINOVIĆ, BILJANA KOVAČEVIĆ ZELIĆ, PREDRAG KVASNIČKA

*Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pierottijeva 6, Zagreb*

**Glavne riječi:** koeficijent propusnosti, metoda zadanog protoka, hidraulički edometar, troosni uređaj.

**Key words:** coefficient of permeability, flow-pump test, hydraulic oedometer, triaxial cell.

### Sažetak

Određivanje koeficijenta propusnosti jedno je od najčešćih laboratorijskih ispitivanja u geotehnici. Konvencionalne metode koje uključuju mjerenja uz pomoć edometra i troosnog uređaja imaju brojne nedostatke od kojih je najznačajniji dugo vrijeme trajanja pokusa iz kojeg može proizići i pitanje točnosti podataka. Modernija metoda mjerenja zadanim protokom znatno ubrzava izvođenje pokusa, a uz primjenu odgovarajućih uređaja može se dobiti funkcijska veza između koeficijenta pora i propusnosti. Ovo je naročito interesantno kod jako stišljivih materijala obzirom da promjene koeficijenta propusnosti mogu iznositi i nekoliko redova veličina. U članku su predstavljene prednosti i nedostaci mjerenja metodom zadanog protoka u modificiranoj troosnoj ćeliji i hidrauličkom edometru u usporedbi s konvencionalnim načinima mjerenja koeficijenta propusnosti. Ispitivanja su obavljena na uzorcima otpadne kamene prašine dobivene završnom obradom arhitektonsko-građevnog kamena.

### Abstract

Permeability tests are one of the most often performed experiments in geotechnics. Conventional methods conducted by oedometer and triaxial apparatus have many disadvantages, the most significant being the test duration. As a consequence, errors in permeability measurements could occur. On the contrary, by applying modern flow-pump method, permeability measurements can be obtained much more rapidly. Moreover, the permeability/void ratio relation can be obtained by using adequate laboratory devices. This is particularly important for soft materials, since their permeability could vary within several orders of magnitude depending on the variation of void ratio. The article presents advantages and disadvantages of the flow-pump method performed in a modified triaxial cell and hydraulic oedometer, in comparison with conventional constant head and falling head methods. The specimens were prepared from the waste stone dust, which is the product of final dimension stone processing.

### Uvod

Mjerenje koeficijenta propusnosti obavlja se u geotehničkim laboratorijima gotovo redovito pri svakom ozbiljnijem inženjerskom zahvatu. Zahtijevana točnost dobivenih podataka jako je međutim zavisna o namjeni objekta. Tako je za rješavanje konvencionalnih geotehničkih problema (npr. stabilnost pokosa, procjeđivanje) dovoljno poznavati propusnost unutar jednog reda veličina ili dokazati da se ona nalazi u nekim granicama. Potreba za vrlo preciznim poznavanjem propusnosti javila se u posljednje vrijeme prilikom rješavanja problema zbrinjavanja otpada, naročito opasnog (Aiban i Znidarčić, 1989). Obzirom na značaj tog pokusa i dobivenih podataka, s vremenom su razvijeni posebni uređaji i metode za pripremu i ispitivanje uzoraka tla. Razvoj metoda uključio je definiranje zahtjeva glede ispitivanja materijala (Kvasnička i Matešić, 1994; Mulabdić, 1995; GLR, 1993; ASTM D 5084/90), koji se najčešće odnose na *tip uređaja za ispitivanje, vrstu eksperimentalnog fluida i veličinu hidrauličkog gradijenta*. Tako se obično traži sljedeće:

- provođenje ispitivanja u troosnom uređaju (ASTM D 5084/90; Bagchi i Sopcich, 1989; GLR, 1993)

- uporaba vodovodne vode kao eksperimentalnog fluida, a u slučaju specifičnih potreba, npr. ispitivanja materijala za brtvene slojeve odlagališta otpada - uporaba filtrata iz odlagališta ili tekućine niskog *pH* (ASTM D 5084/90; GLR, 1993)
- održavanje konstantnog hidrauličkog gradijenta tijekom pokusa, čija veličina načelno ovisi o propusnosti materijala.

Prema Tavenas et al. (1983) dobrim izborom gradijenta pokazao se raspon  $i = 1-50$ . U standardu ASTM D5084/90 propisuju se različiti gradijenti za pojedine vrste materijala, dok prema GLR-u (1993) gradijent treba biti 30.

Određivanje koeficijenta propusnosti provodi se najčešće sljedećim metodama:

- s promjenjivom razlikom tlakova – za slabo propusna tla, npr. prah i glina
- s konstantnom razlikom tlakova – za jače propusna tla, npr. pijesak
- sa zadanim protokom (*eng. flow pump test*) – za sve vrste tla.

Prve dvije metode pripadaju konvencionalnim metodama mjerenja propusnosti, dok je treća metoda novija i predstavlja modificiranu/inverznu metodu konstantne

razlike tlakova. Određivanje propusnosti svodi se kod konvencionalnih metoda na mjerenje protoka vode kroz uzorak određenog presjeka uz određene uvjete tlaka. Kod treće metode, upravo suprotno, nameće se protok fluida kroz uzorak, a mjeri se odgovarajuća razlika tlakova.

U članku su pokazani rezultati mjerenja koeficijenta propusnosti metodom sa zadanim protokom u modificiranoj troosnoj ćeliji i edometru. Ispitivanja su provedena na uzorcima otpadne kamene prašine kako bi se utvrdila potencijalna mogućnost njezine primjene pri izradi brtvenih barijera na različitim geotehničkim objektima.

### Konvencionalne metode i uređaji

Mjerenje koeficijenta propusnosti *metodom s promjenjivom razlikom tlakova u edometru* predstavlja ranije najčešće korištenu metodu koja se danas sve više izbjegava. Osnovna manjkavost ovog mjerenja je da se pri dugotrajnim pokusima (kod slabopropusnih materijala) ne može točno odrediti kolika je količina tekućine isparila, a kolika je stvarno prošla kroz uzorak. Uz to, uzorci su ugrađeni u metalni cilindar u kojem je tijekom ispitivanja teško osigurati nepropusni kontakt između uzorka i stjenke cilindra. Tako se dio tekućine može procijediti kraj uzorka pa se radi prividno većeg protoka dobiva veći koeficijent propusnosti. U cilindrima se ne mogu kontrolirati naprezanja koja djeluju na uzorak, što je dodatna komponenta koja ima utjecaj na propusnost (Kovačić et al., 1994). Postavlja se i pitanje saturacije uzorka obzirom da na mjerenje koeficijenta propusnosti (definirano za uvjete potpune saturacije,  $S_r = 1$ ) zrak u porama može jako utjecati (Sarsby i Finch, 1995). Mjehurići zraka ponašaju se kao čestice, što smanjuje površinu slobodnu za pronos eksperimentalnog fluida, a time i mjerenjem dobivenu vrijednost koeficijenta propusnosti.

Unatoč tomu, koeficijent propusnosti još uvijek se mjeri edometrom zbog jednostavnosti pokusa i niske cijene uređaja, odnosno ispitivanja provedenog na njemu. Obzirom da je za dobivanje "realnih" vrijednosti potrebno provesti mnogo ispitivanja na više uzoraka, ovaj čimbenik ima važnu ulogu.

Ispitivanje propusnosti *metodom sa stalnom razlikom tlakova u troosnom uređaju*, dugo vremena se preporučivalo kao najbolji način za mjerenje koeficijenta propusnosti kod koherentnih materijala. U ovoj metodi tlakovi se održavaju na početnoj razini, odnosno prisutna je konstantna razlika tlaka 'h'. Voda se pod stalnim tlakom utiskuje u uzorak, a rezultirajući protok se mjeri, po mogućnosti i na ulazu i na izlazu iz uzorka (Sarsby i Finch, 1995).

Prednosti ovakvog načina mjerenja koeficijenta propusnosti u odnosu na metodu s promjenjivom razlikom tlakova su brojne. Uzorak je okružen fleksibilnom membranom, koja tijesno prijanja uz stjenke uzorka uslijed djelovanja ćelijskog tlaka, čime se sprječava stvaranje kanala za prolazak vode. Zasićenost

uzorka osigurava se primjenom povratnog tlaka (*eng. back pressure*).

Kod konvencionalnih metoda, mjerenje količine procijeđene vode redovito predstavlja problem jer je za procjeđivanje mjerljivih količina često potrebno dosta vremena, a preciznost mjernog instrumenta ovisi o kvaliteti njegove izvedbe, što utječe i na cijenu ispitivanja. Osim toga, promjena temperature ili rast bakterija mogu značajno utjecati na izmjerenu propusnost (Aiban i Znidarčić, 1989).

### Metoda zadanog protoka

Metoda zadanog protoka, poznata i kao *flow pump test*, je modificirana metoda mjerenja koeficijenta s konstantnom razlikom tlaka utoliko što se tekućina utiskuje u ili izvlači iz uzorka konstantnom brzinom, odnosno zadanim protokom, tijekom čega se prati promjena razlike tlaka na kapi i bazi uzorka.

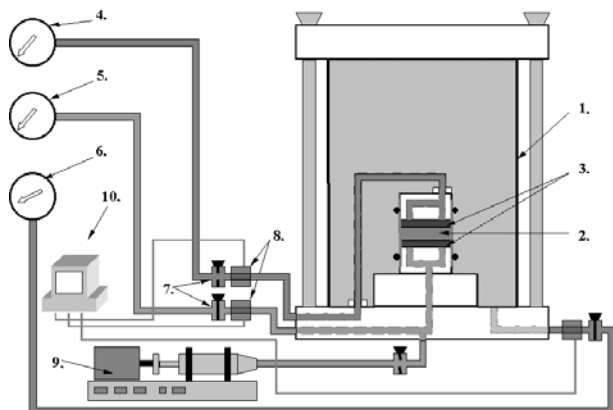
Prednosti ove metode pred konvencionalnim su višestruke. Izbjegava se uporaba visokih gradijenata, koji su kod konvencionalnih metoda korišteni radi ubrzanja procesa mjerenja, ali su uzrokovali i odstupanje od uvjeta tečenja po *Darcy*-jevom zakonu, te pojavu dodatne konsolidacije uzorka (Mitchell i Younger, 1967). Izbjegava se također i uporaba niskih gradijenata, koja kod konvencionalnih metoda nije praktična niti pouzdana jer je vrijeme mjerenja pri niskim gradijentima obično jako dugo, a količine procijeđene vode su male. Ubrzanim procesom mjerenja onemogućen je rast bakterija pa i eventualna promjena kemizma eksperimentalnog fluida (Gupta i Swartzendruber, 1962). Osim toga, ne dolazi do širenja opreme (birete) uslijed temperaturnih promjena što uzrokuje greške pri očitavanju (Olsen, 1965) i sl.

Najistaknutija prednost metode zadanog protoka u odnosu na konvencionalne očituje se u činjenici da se *protok može preciznije nametnuti nego mjeriti kao posljedica nametnute razlike tlaka na krajevima uzorka* (Aiban i Znidarčić, 1989; Kvasnička i Matešić, 1994). Kako se stacionarno tečenje i kroz slabopropusni uzorak uspostavlja u relativno kratkom roku, za vrijeme trajanja jednog konvencionalnog ispitivanja moguće je obaviti i desetak ispitivanja sa zadanim protokom. Time se, ovisno o broju potrebnih ispitivanja, može isplatiti i nešto skuplja oprema potrebna za zadavanje protoka.

Pored brojnih prednosti uz metodu sa zadanim protokom su vezani i određeni problemi. Njezina komercijalna primjena ograničena je zbog visokih inicijalnih troškova sustava (posebno pumpe za nanošenje protoka), slabog poznavanja ovog tipa ispitivanja i nedostatka standardizirane opreme (Redmond i Shackelford, 1994).

### Mjerenja u modificiranoj troosnoj ćeliji

Na slici 1. shematski je prikazan uređaj za mjerenje koeficijenta propusnosti metodom zadanog protoka u modificiranoj troosnoj ćeliji.



**LEGENDA:**

1 troosna ćelija; 2 uzorak; 3 porozne pločice; 4 regulacija/održavanje pornog tlaka na kapi uzorka; 5 regulacija/održavanje pornog tlaka na bazi uzorka; 6 regulacija/održavanje ćelijskog tlaka; 7 ventili; 8 osjetila za tlak; 9 pumpa za zadavanje protoka; 10 bilježenje i obrada podataka.

**LEGEND:**

1 triaxial cell; 2 sample; 3 porous plates; 4 pore pressure regulation on the top of the sample; 5 pore pressure regulation on the bottom of the sample; 6 cell pressure regulation; 7 valves; 8 pressure transducers; 9 flow pump; 10 data logging.

Slika 1. Shema uređaja za određivanje koeficijenta propusnosti metodom zadanog protoka u troosnom uređaju

Figure 1. Scheme of flow-pump test equipment with triaxial cell

Postupak je inverzan postupku mjerenja koeficijenta propusnosti sa stalnom razlikom tlaka u troosnom uređaju. Uzorak se ugradi u troosnu ćeliju i konsolidira, a njegova zasićenost se osigurava povratnim tlakom (*eng. back pressure*). Kroz konsolidirani uzorak nameće se zadani protok - s donje strane uzorka, a na drugom kraju - gornjoj strani, početni porni tlak održava se stalnim. Kao reakcija na zadani protok, na donjoj strani uzorka dolazi do postupnog porasta pornog tlaka. Kada se tlak ustali, uspostavljeno je stacionarno tečenje kroz uzorak, pa se može pristupiti određivanju hidrauličkog gradijenta, *i*. Uz poznati protok koeficijent propusnosti određuje se prema *Darcy*-jevom zakonu kao odnos protoka i gradijenta (izraz 1.):

$$k = \frac{v}{i} = \frac{\frac{V}{At}}{\frac{\Delta u}{\gamma_w} - \Delta l} \quad (1)$$

gdje su:

*k* - koeficijent propusnosti [cm/s]

*i* - hidraulički gradijent [-]

*v* - brzina tečenja kroz jediničnu površinu uzorka [cm/s]

*V* - volumen vode [cm<sup>3</sup>]

*A* - površina uzorka [cm<sup>2</sup>].

*t* - vrijeme [s]

$\Delta u$  - promjena pornog tlaka [N/cm<sup>2</sup>]

$\Delta l$  - put na kojemu se mijenja tlak [cm]

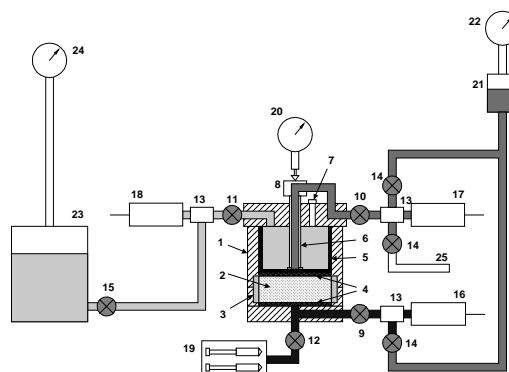
$\gamma_w$  - zapreminska težina vode [N/cm<sup>3</sup>]

### Mjerenja u hidrauličkom edometru

Potreba da se uz mjerenje koeficijenta propusnosti prati i promjena volumena uzorka tijekom mjerenja izvediva je uporabom hidrauličkog edometra. Preko pomičnog klipa edometra moguće je kontinuirano pratiti pomake, odnosno slijeganje uzorka tijekom trajanja pokusa.

Hidraulički edometar razlikuje se od konvencionalnih edometara po tome što se konsolidacijski tlak primjenjuje hidraulički i do gornje površine uzorka prenosi preko savitljive gumene membrane, što je iskorišteno za mjerenje promjene volumena uzorka.

Na slici 2. prikazan je izgled uređaja za mjerenje koeficijenta propusnosti metodom zadanog protoka sa uzorkom ugrađenim u hidraulički edometar. Jedina značajna razlika između dva uređaja (troosna ćelija, edometar) za mjerenje propusnosti metodom zadanog protoka prisutna je u ugradnji uzorka - sa slobodnim stijenkama u fleksibilnoj membrani, odnosno u čelični prsten sa spriječenim bočnim širenjem.



**LEGENDA:**

1 kućište hidrauličkog edometra; 2 uzorak; 3 čelični prsten; 4 porozne pločice; 5 gumena membrana; 6 pomični klip; 7 ventil ćelije edometra; 8 metalna kapica; 9-12 Klingerovi tlačni ventili; 13 sustav za odzračivanje; 14 obični ventili; 15 ventil rezervoara za ćelijski tlak; 16-18 osjetila za tlak; 19 pumpa za zadavanje protoka; 20 mikroura za mjerenje pomaka; 21 rezervoar s vodom za porni tlak; 22 manometar za porni tlak; 23 rezervoar s vodom za ćelijski tlak; 24 manometar za ćelijski tlak; 25 cijev za isisavanje zraka

**LEGEND:**

1 hydraulic oedometer cell; 2 sample; 3 steel ring; 4 porous plates; 5 rubber membrane; 6 sliding piston; 7 oedometer cell valve; 8 metal cap; 9-12 Klinger's pressure valves; 13 deaerisation vent; 14 valves; 15 cell pressure reservoir valve; 16-18 pressure transducers; 19 flow pump; 20 dial gauge; 21 pore water chamber; 22 pore water manometer; 23 cell water chamber; 24 cell water manometer; 25 deaerisation pipe

Slika 2. Shema sustava za mjerenje koeficijenta propusnosti metodom zadanog protoka hidrauličkim edometrom

Figure 2. Scheme of flow-pump test equipment with hydraulic oedometer

## Provedena ispitivanja

Ispitivanja su provedena u "Institutu građevinarstva Hrvatske" u Zagrebu, na otpadnoj kamenoj prašini dobivenoj obradom u pilani arhitektonsko-građevnog kamena firme "Kamen Pazin". Svrha ispitivanja bila je određivanje mogućnosti uporabe kamene prašine kao materijala za izradu brtvenih slojeva na odlagalištima komunalnog otpada (Veinović, 2001).

Granulometrijska analiza kamene prašine pokazala je da se radi o prahu s primjesama čestica veličine čestica gline ( $\approx 20\%$ ). Gustoća čvrstih čestica i Atterberg-ove granice prikazane su u tablici 1. Prema jedinstvenoj klasifikaciji tla (USCS) kamena prašina je određena kao prah niske plastičnosti (ML).

Tablica 1. Svojstva kamene prašine  
Table 1. Characteristics of waste stone dust

|   |      |
|---|------|
| GUSTOĆA ČVRSTIH<br>ČESTICA<br>(Bulk density)<br>$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 2,7  |
| PRIRODNA VLAŽNOST<br>(Natural water content)                                  | 29,3 |
| GRANICA TEČENJA<br>(Liquid limit)   | 46,2 |
| GRANICA PLASTIČNOSTI<br>(Plastic limit)                                       | 29,0 |
| INDEKS PLASTIČNOSTI<br>(Plasticity index)                                     | 17,2 |

Pokusom zbijanja (standardni Proctor-ov pokus) dobivena je optimalna vlažnost  $w=33\%$ , pri suhoj jediničnoj težini  $\gamma_d = 13,7$  kN/m<sup>3</sup>. Ranija istraživanja (Jessberger, 1995; Daniel i Benson, 1990) pokazala su da se minimalni koeficijent propusnosti dobiva kod materijala pripremljenog s vlažnošću tek nešto većom od optimalne po Proctor-u. Stoga se u glineni brtveni sloj odlagališta otpada glina obično ugrađuje s vlažnošću većom od optimalne. Iz navedenih razloga prišlo se i u našem slučaju mjerenju propusnosti uzoraka kamene prašine pripremljenih pri optimalnoj ( $w = 33\%$ ) i povišenoj vlažnosti ( $w = 40\%$ ).

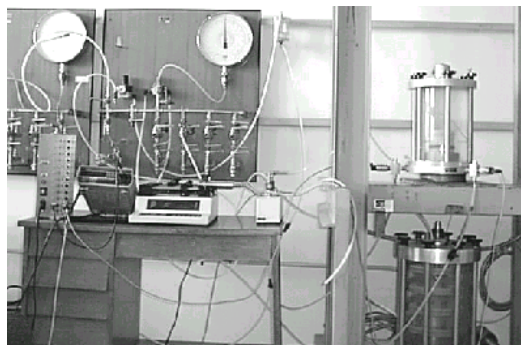
Mjerenja predstavljena u ovom članku obavljena su uz korištenje destilirane, deaerirane vode. Premda se planiralo provesti i seriju ispitivanja s drugim eksperimentalnim fluidima, to nije učinjeno zbog pretpostavke da bi njihova agresivnost uzrokovala koroziju skupe opreme za nametanje protoka.

## Mjerenja u modificiranoj troosnoj ćeliji

Prva serija eksperimenata provedena je u modificiranoj troosnoj ćeliji (slika 3.). Za nametanje zadanog protoka korištena je medicinska pumpa *Harvard Apparatus Syringe Pump Model '33'* (slika 4.).

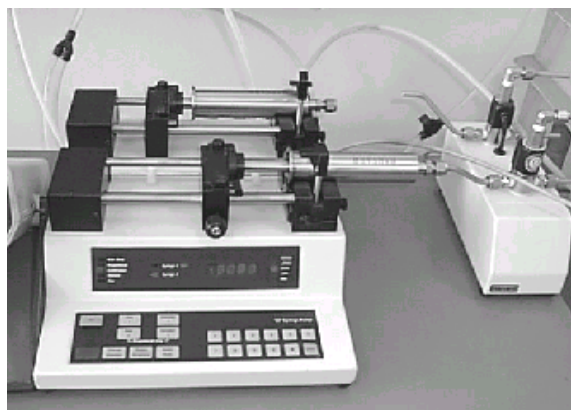
Ona nije posebno namijenjena ovoj vrsti ispitivanja, ali se, uz neka ograničenja, mogla uporabiti. Pumpa ima injekcije za ubrizgavanje tekućine različitih volumena. O veličini injekcije ovisi mogućnost nametanja protoka, koja se u ovom slučaju nalazi u rasponu od 0,0001 ml/s do 0,9 ml/s. Nedostatak ove pumpe je da su tlakovi koji se njome mogu nametnuti ograničeni i iznose maksimalno 280 kPa, na što treba paziti prilikom zadavanja povratnog tlaka. Pri većim povratnim tlakovima pumpa može stati, odnosno blokirati se.

Uzorak za ispitivanje dobiven je zbijanjem u *Proctor*-ovom uređaju. Prva ispitivanja provedena su na cilindričnim uzorcima kamene prašine promjera  $\varnothing 70$  mm i visine  $h=19$  mm (slika 5.a). Cilindrični oblik uzorka dobivan je utiskivanjem metalnog prstena (noža za formiranje uzorka za klasični edometar) u pripremljeni materijal. Kasnije je visina uzorka povećana na 50 mm, obzirom da su u prvom slučaju mjerenja razlika tlakova bila otežana zbog male osjetljivosti uređaja.



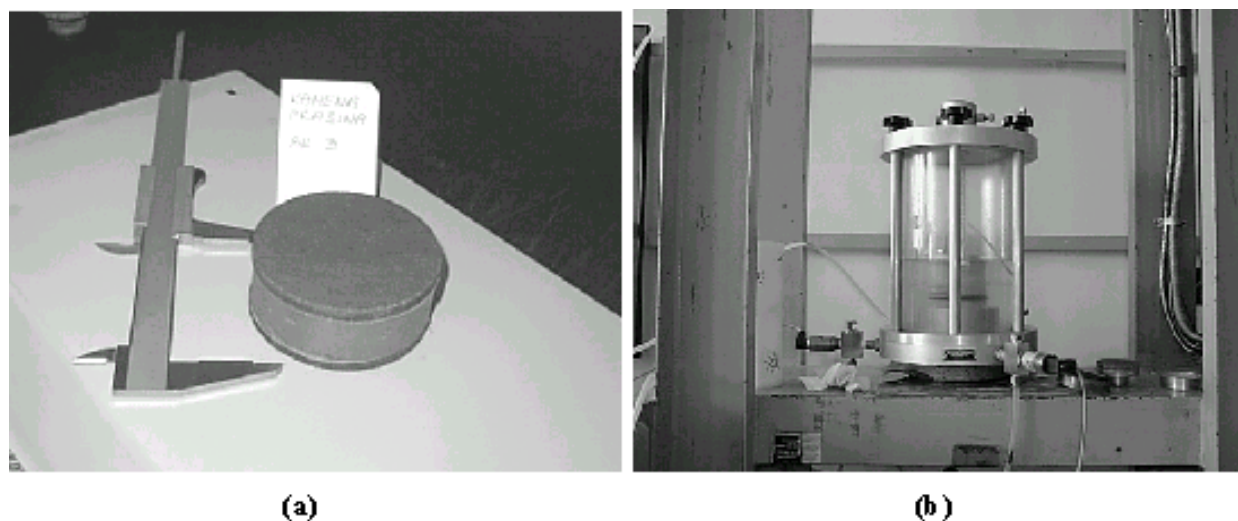
Slika 3. Uređaj za mjerenje koeficijenta propusnosti metodom sa zadanim protokom (IGH Zagreb)

Figure 3. Flow-pump test apparatus (Institute of Civil Engineering – ICE, Zagreb)



Slika 4. Pumpa za nametanje protoka (IGH Zagreb)

Figure 4. Dual Syringe Pump (ICE Zagreb)



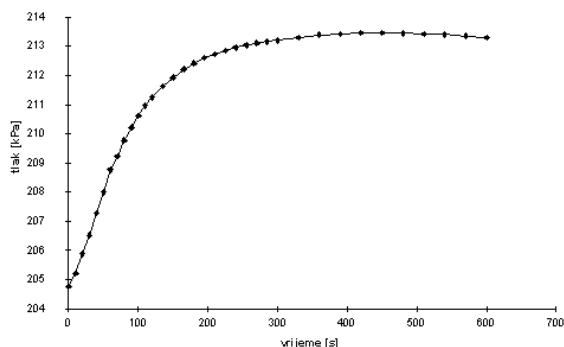
Slika 5. (a) Uzorak, (b) punjenje ćelije vodom

Figure 5. (a) Sample, (b) cell flooding

Ispitivanja su obavljena u troosnoj ćeliji proizvođača Wykeham-Farrance (slika 5.b). Podaci promjene tlaka automatski su očitavani i bilježeni analognom/digitalnim osjetilima (eng. *transducer*) firme "LIK elektronika" d.o.o., tip AMT 10. Područje osjetljivosti je 0 do 10 bara, a razred točnosti 0,2 %.

Uzorak je nakon ugradnje konsolidiran pri zadanom ćelijskom i povratnom tlaku, uz obostrano dreniranje. Potom je izmjeren stupanj zasićenosti uzorka posredno preko Skempton-ovog B-parametra koji predstavlja odnos inkrementa pornog i ćelijskog tlaka u nedreniranom stanju. Za potpuno saturirani uzorak B-parametar bi trebao biti jednak ili barem približno jednak jedan. U praksi, smatra se dovoljnim ukoliko se postigne vrijednost parametra B veća od 0,95. Kada se uspostavi tražena vrijednost B-parametra, započinje mjerenje vodopropusnosti.

U našim ispitivanjima odabrane su vrijednosti protoka tako da su se dobiveni hidraulički gradijenti trebali kretati u rasponu  $10 < i < 40$ . Primjer dijagrama promjene pornog tlaka na bazi uzorka tijekom vremena prikazan je na slici 6.



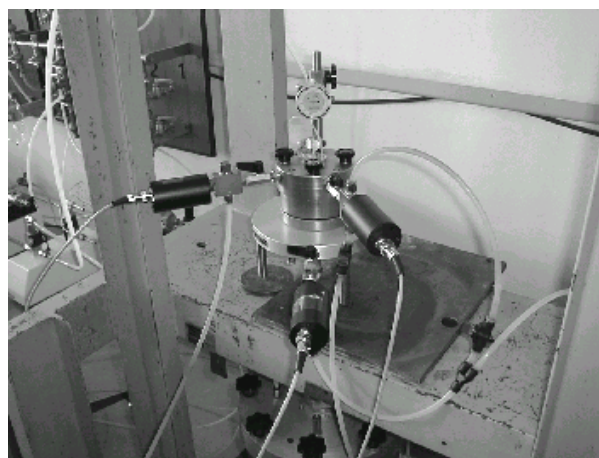
Slika 6. Promjena pornog tlaka na bazi uzorka. (efektivni tlak 200 kPa, protok 0,0138 ml/s)

Figure 6. Pore pressure variation at the bottom side of the sample (effective stress 200 kPa, flow rate 0,0138 ml/s)

#### Mjerenja u hidrauličkom edometru

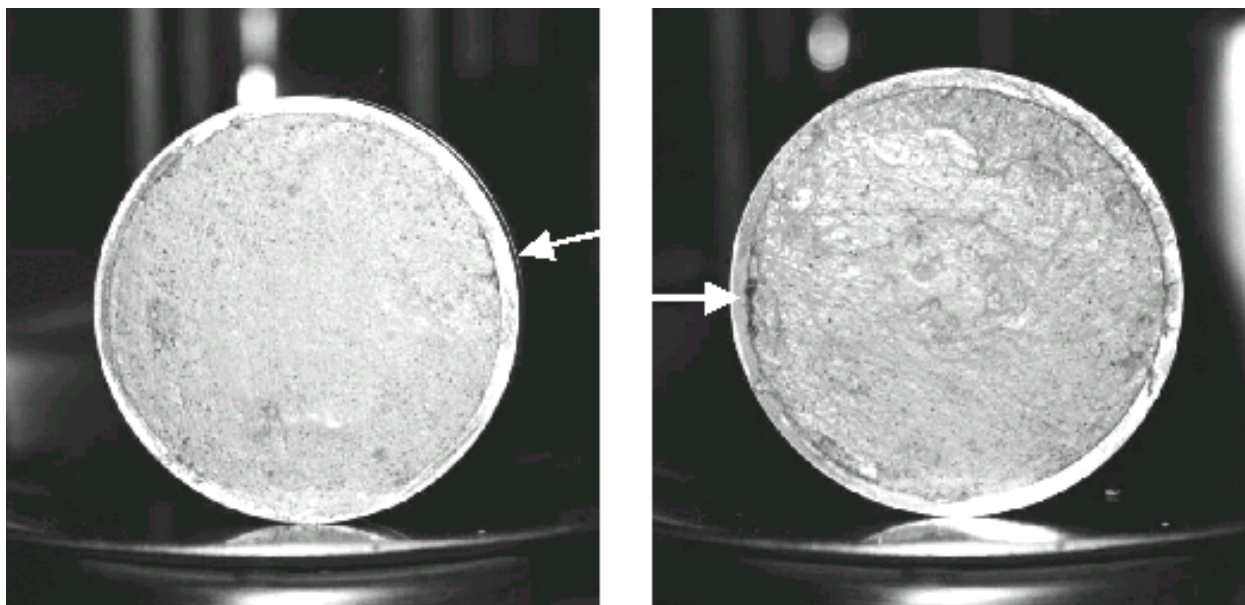
Za ispitivanja opisana u ovom radu uporabljen je hidraulički edometar firme Wykeham Farrance (*Engineering Ltd., Slough, England*) (slika 7.). Postupak ispitivanja obzirom na pripremu uzorka i nametanje protoka nije se bitno razlikovao od onog u troosnoj ćeliji, osim što uzorak nakon utiskivanja edometarskog prstena/noža nije vađen iz njega, već je ugrađen zajedno s njim, a tijekom pokusa mikrourom su praćeni vertikalni pomaci, odnosno promjena njegova volumena i koeficijenta pora.

Velik problem pri mjerenju predstavljalo je slabo brtvljenje na rubovima tj. na kontaktu uzorka i prstena, što uzrokuje i nepravilnosti u tečenju. Na slici 8 strelica pokazuje oštećenja uzorka na kontaktu. U troosnom uređaju zbog primjene fleksibilne membrane na ovakve probleme ne nailazimo.



Slika 7. Hidraulički edometar (IGH Zagreb)

Figure 7. Hydraulic oedometer (ICE Zagreb)



Slika 8. Oštećenja uzorka nastala pri ugradnji u čelični prsten

Figure 8. Sample damage during installation

### Rezultati mjerenja

Rezultati mjerenja koeficijenta propusnosti kamene prašine provedenog u modificiranoj troosnoj ćeliji metodom sa zadanim protokom, prikazani su u tablici 2. Kao što se iz tablice vidi, koeficijent propusnosti smanjivao se s porastom konsolidacijskog tlaka, što je očekivano. Mjerenja s protokom od 0,0028 ml/s nisu provedena na uzorku s povećanom vlažnošću jer su se javljali preveliki gradijenti koji su otežavali mjerenje.

Sva navedena ispitivanja provedena su pri hidrauličkim gradijentima u rasponu od  $i=10-100$ .

Iako je u pretpostavljeno da će se dobiti manji koeficijenti propusnosti za uzorke čija je vlažnosti veća od optimalne, to se u našem slučaju nije dogodilo, pretpostavlja se zbog toga što kamena prašina prema USCS klasifikaciji nije tzv. «čista glina» nego prah niske plastičnosti, pa se i čestice kamene prašine pri protjecanju vode ponašaju drugačije od minerala glina.

Tablica 2. Rezultati mjerenja koeficijenta propusnosti u troosnoj ćeliji  
Table 2. Permeability test results obtained with triaxial cell

| VLAŽNOST UZORKA (Moisture content) $w=33\%$ |  |                       |                       |                       |                                 |
|---|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|
|   | KONSOLIDACIJSKA NAPREZANJA (Cell pressure)<br>[kN/m <sup>2</sup> ] |                       |                       |                       | PROTOK<br>(Flow rate)<br>[ml/s] |
|   | 50   | 100                   | 200                   | 400                   |                                 |
| k [m/s]                                     | $6,80 \cdot 10^{-09}$  | $5,80 \cdot 10^{-09}$ | $6,00 \cdot 10^{-09}$ | $5,30 \cdot 10^{-09}$ | 0,00028                         |
|   | $6,70 \cdot 10^{-09}$  | $6,60 \cdot 10^{-09}$ | $5,90 \cdot 10^{-09}$ | $5,20 \cdot 10^{-09}$ | 0,00056                         |
|   | $6,60 \cdot 10^{-09}$  | $6,30 \cdot 10^{-09}$ | $5,80 \cdot 10^{-09}$ | $5,10 \cdot 10^{-09}$ | 0,00084                         |
|   | $6,50 \cdot 10^{-09}$  | $6,20 \cdot 10^{-09}$ | $5,75 \cdot 10^{-09}$ | $5,00 \cdot 10^{-09}$ | 0,0014                          |
|   | $6,70 \cdot 10^{-09}$  | $6,30 \cdot 10^{-09}$ | $5,75 \cdot 10^{-09}$ | $5,00 \cdot 10^{-09}$ | 0,0028                          |
| VLAŽNOST UZORKA (Moisture content) $w=40\%$ |  |                       |                       |                       |                                 |
|   | KONSOLIDACIJSKA NAPREZANJA (Cell pressure)<br>[kN/m <sup>2</sup> ] |                       |                       |                       | PROTOK<br>(Flow rate)<br>[ml/s] |
|   | 50   | 100                   | 200                   | 400                   |                                 |
| k [m/s]                                     | $8,30 \cdot 10^{-09}$  | $8,90 \cdot 10^{-09}$ | $8,60 \cdot 10^{-09}$ | $8,10 \cdot 10^{-09}$ | 0,00028                         |
|   | $8,60 \cdot 10^{-09}$  | $8,90 \cdot 10^{-09}$ | $8,10 \cdot 10^{-09}$ | $7,20 \cdot 10^{-09}$ | 0,00056                         |
|   | $8,80 \cdot 10^{-09}$  | $8,40 \cdot 10^{-09}$ | $8,00 \cdot 10^{-09}$ | $7,00 \cdot 10^{-09}$ | 0,00084                         |
|   | $8,50 \cdot 10^{-09}$  | $8,60 \cdot 10^{-09}$ | $8,10 \cdot 10^{-09}$ | $6,90 \cdot 10^{-09}$ | 0,00112                         |
|   | $8,60 \cdot 10^{-09}$  | $8,40 \cdot 10^{-09}$ | $8,00 \cdot 10^{-09}$ | $6,80 \cdot 10^{-09}$ | 0,0014                          |

## Diskusija i zaključak

Pri ispitivanju koeficijenta propusnosti metodom zadanog protoka jedan od većih problema svakako predstavlja izbor odgovarajućeg hidrauličkog gradijenta. Uporabom velikih hidrauličkih gradijenata smanjuje se vrijeme trajanja pokusa (Mitchell i Younger, 1967), ali to istovremeno može uzrokovati lokalna odstupanja od Darcy-jevog zakona i kretanje čestica unutar uzorka. Naime, tok vode može postati turbulentan. Začepljenje pora uzorka ili erozija (ispiranje) materijala mogu uzrokovati značajne razlike u koeficijentu propusnosti. Da bi se dobilo na brzini izvođenja pokusa, u laboratorijima se često puta upotrebljavaju gradijenti i u iznosima od 150-200 (Dunn, 1985). Obzirom na namjenu naših pokusa tj. ispitivanje materijala za izradu brtvenih barijera u odlagalištima, gradijenti u iznosu 10-20 pa i manje, zadovoljavajući su u većini slučajeva. Razlog tomu je niska razina filtrata nad brtvenim slojem ukoliko pokrov i sustav za drenažu ostvaruju svoju funkciju.

Mjerenje koeficijenta propusnosti metodom zadanog protoka bazira se na zadavanju protoke i opažanju promjene razlike tlakova. O zadanom protoku ovisi veličina gradijenta. Pri niskim vrijednostima protoka, u našem slučaju događalo se da je razlika tlakova bila nečitljiva tj. da osjetila nisu mogla izmjeriti tako niske promjene tlaka. Povećanjem protoka, s druge strane, dobivaju se gradijenti veći od preporučenih u literaturi. Dosta je teško unaprijed procijeniti prave vrijednosti protoka koje će za posljedicu dati mjerljive rezultate, a neće izazvati pojavu velikih gradijenata. Upravo su visoki gradijenti i neodgovarajući protoci vjerojatno uzrokovali odstupanja nekih mjerenih podataka, no to je teško dokazati.

Mjerenja u hidrauličkom edometru omogućila su praćenje promjene visine uzorka, ali pojavio se problem osiguranja prijanjanja uzorka uz čelični prsten uzorka. Preporuke traže uporabu troosne ćelije upravo zbog mogućnosti primjene fleksibilne membrane koja bi trebala prijanjati uz uzorak i tako onemogućiti protok vode izvan efektivnog presjeka uzorka.

Činjenica je da određivanje koeficijenta propusnosti materijala u geotehnici predstavlja jedan od najčešćih laboratorijskih pokusa te da su, kao i u drugim tehničkim poslovima, brzina i točnost dobivanja podataka od velike važnosti. Konvencionalne metode određivanja koeficijenta propusnosti - s promjenjivom razlikom tlakova u edometru i s konstantnom razlikom tlakova - u troosnom uređaju, dugotrajne su, a upravo radi vremenske komponente često i nepouzdanе.

Mjerenje koeficijenta propusnosti metodom zadanog protoka jako ubrzava proces tako da su rezultati dostupni u vremenu od nekoliko minuta do par sati čak i kod izrazito slabopropusnih materijala. Nedostaci su ove metode prvenstveno skupa oprema za zadavanje protoka te duže uhodavanje laboratorijskog postupka, no obzirom na brzinu i kvalitetu izvedenih pokusa,

opremu je moguće amortizirati u relativno kratkom vremenu.

Potreba za vrlo brzim i preciznim određivanjem koeficijenta propusnosti tla u raznim geotehničkim objektima, sigurno će uskoro pokazati nužnost uvođenja metode sa zadanim protokom u redovnu laboratorijsku praksu.

Primljeno: 08.09.2003.

Prihvaćeno: 28.10.2003.

## Literatura

1. Aiban, S.A., Znidarčić, D. (1989): Evaluation of the flow pump measurements. *Geotechnique* 39 (4), 655-666.
2. ASTM D 5084 (1990): Standard test method for and constant head techniques for permeability measurement of a hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter.
3. Bagchi, A. & Sopcich, D. (1989): Characterization of MSW incinerator ash, *Journal of Environmental Engineering Division (ASCE)*, No 115 (EE-2), 447-452.
4. Daniel, D., Benson, C. (1990): Water content-density criteria for compacted soil liners, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 12, 129-152.
5. Dunn, R. J. (1985): Laboratory measurement of fine-grained soil fluid conductivity, *Engineering Geology*, Elsevier, No. 21, 215-223, Amsterdam.
6. GLR (1993): *Geotechnics of Landfill Design and Remedial Work*, Technical Recommendations, Second edition, Ernst & Sons, pp. 158, Berlin.
7. Gupta, R. P. & Swartzendruber, D. (1962): Flow-associated reduction in the hydraulic conductivity of quartz sand., *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 26, No 1, 6-10.
8. Jessberger, H. L. (1995): Waste containment with compacted clay liners, *Geoenvironment 2000*, ed. Y. B. Acar & D. E. Daniel, Geotechnical Special Publication No 46, Vol. 1, 463-483.
9. Kovačić, D., Kvasnička, P., Znidarčić, D. (1994): Nepropusnost glinene barijere u sanitarnim odlagalištima, *Gospodarenje otpadom, Zbornik radova s III. međunarodnog simpozija*, ed. Zlatko Milanović, 296-305, Zagreb.
10. Kvasnička, P. & Matešić, L. (1994): Mjerenje vodopropusnosti pomoću zadane protoke uzoraka s odlagališta otpada u Zaprešiću, *Gospodarenje otpadom, Zbornik radova s III. međunarodnog simpozija*, ed. Zlatko Milanović, 306-313, Zagreb.
11. Mitchell, J. K. & Younger, J. S. (1967): Abnormalities in hydraulic flow through fine-grained soils, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, No 417, 106-139, Philadelphia.
12. Mulabdić, M (1995): Laboratorijsko mjerenje vodopropusnosti gline za brtveni sloj odlagališta otpada Jakuševac, *Priopćenja 2. savjetovanja HDMTT - Geotehnički problemi u urbanim sredinama - Varaždin 1995*, Knjiga 1, Ed. Ramon Mavar, 157-163, Zagreb.
13. Olsen, H. W. (1965): Deviations from Darcy's law in saturated clays, *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 29, No 2, 135-140.
14. Redmond, P. L., Shackelford, C. D. (1994): Design and evaluation of a flow pump system for column testing, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 17, No 3, 269-281.
15. Sarsby, R. W. & Finch, S. (1995): The use of industrial by-products to form landfill caps, *Waste Disposal by Landfill - GREEN'93*, Sarsby (ed.), Balkema, 267-273, Rotterdam.
16. Tavenas, F., Leblond, P., Jean, P. & Leroueil, S. (1983): The permeability of natural soft clays, *Part I: Methods of laboratory measurement*, *Canadian Geotechnical Journal*, No. 20, 629-644.
17. Veinović, Ž. (2001): Mogućnosti uporabe otpadne kamene prašine za izradu slabopropusnih slojeva odlagališta komunalnog otpada, Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 221 str., Zagreb.

### Advantages and disadvantages of modern laboratory measurement of the coefficient of permeability for soil materials

The paper presents a comparison between traditional and modern experimental techniques for evaluating the permeability of soils. Permeability tests are performed in geotechnical laboratories at solving almost every conventional geotechnical problem such as for example slope stability or seepage related analyses. However, the requested accuracy of data greatly depends on the purpose of the structure. Problems associated with the disposal of waste (especially hazardous one) require accurate knowledge about the permeability values.

Instead of standard methods for measuring the coefficient of permeability (constant- or variable-head) a *flow-pump test* has been found a more suitable method for low permeable materials and applied to carry out tests on waste stone dust samples. The flow pump system differs from traditional permeability measuring systems in that the flow pump maintains a constant volumetric flow rate regardless of changes in the hydraulic permeability of the soil and changes in the hydraulic gradient. The pressure difference, from which the hydraulic gradient is evaluated, is measured by a differential pressure transducer. This is exactly the opposite concept to that of the conventional constant head test, in which a constant gradient is imposed across the sample and the corresponding flow quantity is measured. The paper discusses the advantages and disadvantages of the flow-pump method in comparison to conventional methods, especially regarding the test duration, reliability of results and cost of equipment.

The experiments were performed on the samples of waste stone dust, which is obtained as a by-product of final dimension stone processing. Bulk density and Atterberg limits of the stone dust are shown in Table 1. According to the unified soil classification system (USCS) stone dust was determined as low plasticity silt (ML). The purpose of the research was to establish the possibility of use of the stone dust for the construction

of sealing layers on landfills. The samples were prepared using the standard Proctor laboratory compaction procedure at different water contents. They were tested in an improved triaxial cell (Figs. 1 and 3) and in a hydraulic oedometer cell (Figs. 2 and 7), and consolidated to different void ratios and cell pressures at which permeability tests were performed. In a triaxial cell, the sample is encased in a flexible membrane (Fig.5), and in an oedometer cell in a steel ring (Fig. 7). This is the essential difference between those two devices. The Harvard apparatus syringe pump (Fig. 4) was used for the flow rate application. Two types of cells were used not only to test the material, but also to find out what type of equipment/method would give better results.

The summary of the flow-pump test results is given in Table 2. Figure 6 shows the pore pressure variation with time for one of the tested specimens. Some problems occurred while performing the oedometer cell tests probably due to sample damage (Fig. 8) which was caused by poor contact sealing. Such problems are prevented in triaxial cell tests owing to a flexible membrane.

The extremely low and accurate flow rates can be produced in flow-pump test resulting in low induced hydraulic gradients across the specimen. In spite of its great advantages for low permeable materials, widespread commercial use of the flow pump test has not been accomplished yet, probably due to the lack of standardised test equipment, general unfamiliarity with the flow pump testing and relatively high initial cost for the system. In our opinion the potentials of the application of the flow pump test method are undoubtedly present in various fields of geotechnical engineering. It is therefore necessary to introduce this method into the laboratory work as a regular practice.