

Vaidotas Piličiauskas, UAB „INGEO“

## INFILTROMETRAI – PRIETAISAI AERACIJOS ZONOS NUOGULOMS TIRTI

Pastaraisiais metais, atliekant aplinkos hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos tyrimus, dažnai būtina informacija apie aeracijos zonos nuogulų filtracines savybes. Tam tikslui dažniausiai naudojami infiltrometrai, kurie, siekiant paspartinti eksperimentinius lauko tyrimus, pastoviai tobulinami. Tad, greita jau seniai naudojamų, atsirado nemažai naujų šio prietaiso modifikacijų. Pagrindinis tokių tyrimų tikslas – nustatyti aeracijos zonos filtracines savybes, t.y. filtracijos koeficientą.

Šiame straipsnyje apžvelgiami infiltrometrai, skirti prisotintos poringos terpės filtracijos koeficientui nustatyti. Vieni prietaisai skirti bandymams žemės paviršiuje, kiti – gilesniuose pjūvio intervaluose. Paprastai infiltrometrai skirstomi į dvi grupes: \* vandens arba paviršiniai (vieno arba dviejų žiedų, slėginiai, oro) ir \* gręžinių.

### Paviršiniai infiltrometrai

Paviršiniais infiltrometrais nustatomos viršutinės aeracijos zonos dalies filtracinės savybės. Dažniausiai apsiribojama 1-1,5 m gyliu, kuris praktiniu požiūriu yra svarbiausias.

**Vieno ir dviejų žiedų infiltrometrai.** Tai paprastos konstrukcijos prietaisai, sudaryti iš vieno ar dviejų metalinių žiedų. Kai naudojamas vienas žiedas, jo skersmuo turi būti ne mažesnis kaip 0,3 m, aukštis – nuo 0,2 m iki 1 m ir daugiau. Žiedas įgilinamas į gruntą ir pripildomas vandens. Infiltracija vyksta esant stacionariam spūdžiui ir bandymas baigiamas apytiksliai nusistovėjus srautui. Po bandymo būtina nustatyti drėgmės fronto įsiskverbimo į gruntą gylį. Pagrindinė šio metodo problema – drėgmės srauto išsiskaidymas erdvėje visomis kryptimis, t.y. vanduo juda tiek horizontaliai, tiek vertikalai ir dėl to rezultatas būna mažiau tikslus. Siekiant didesnio tikslumo, rekomenduojama naudoti dviejų žiedų prietaisą.

Dviejų žiedų infiltrometrą sudaro du skirtingo skersmens žiedai, kurių kiekvienas sujungiamas su Marijoto indu pastoviam hidrauliniam gradientui sudaryti. Žiedai į gruntą įspaudžiami kelis cm ir pripildomi vandens. Išorinis žiedas

dedamas tam, kad būtų panaikinta infiltracijos į šonus (3D srauto) problema. Bandymai atliekami tiek pagal stacionarios, tiek pagal nestacionarios geofiltracijos schemas. Pirmuoju atveju naudojami Marijoto indai užtikrina pastovų bei abiejuose žieduose vienodą spūdį. Antroju atveju indai atjungiami ir vandens infiltracijos greitis matuojamas vidiniame žiede. Išoriniame žiede tuo metu palaikomas toks pat vandens lygis kaip ir vidiniame (1 pav.).



1 pav. Dviejų žiedų infiltrometras su Marijoto indais ([www.turf-tec.com](http://www.turf-tec.com)).

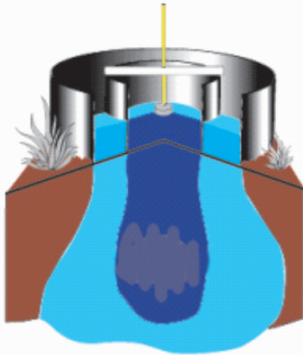
Fig. 1. Double-ring infiltrometer with Marijote tubes ([www.turf-tec.com](http://www.turf-tec.com)).

Šį metodą sudėtinga taikyti labai laidžiose ( $k > 100$  m/d ir mažai laidžiose uolienose ( $k < 0,0005$  m/d) bei perdžiūvusiose ir kietose uolienose, kurios, įspaudžiant žiedus, trupa.

Šio metodo sprendinius pagal vandens įsiskverbimo po infiltrometru gylį pateikė Bindemanas ir Veriginas (1962). Tačiau taikant šių autorių pasiūlytą metodą, vandens įsiskverbimo gyliui išmatuoti reikia iškasti šurfa, iš kurio imami mėginiai drėgmei nustatyti. Tai reikalauja papildomų darbo ir laiko sąnaudų. Siekiant išvengti kasimo darbų, Badovas ir Šestakovas (1971) įsiskverbimo gylį pakeitė įsiskverbimo į gruntą vandens tūriu  $W$ . Šiuo atveju skaičiuojama pagal formulę:

$$v_s = K_f \left[ 1 + \frac{\mu \omega (h_0 - h_k)}{W} \right],$$

čia  $v_s$  – vandens sunkimosi greitis;  $K_f$  – filtracijos koeficientas;  $h_0$  – vandens stulpo aukštis infiltrometre;  $h_k$  – kapiliarinio slėgio aukštis;  $\omega$  – infil-



2 pav. Dviejų žiedų infiltrometro principinė schema ir nuo įsisunkusio vandens sudrėkusios poringos terpės forma bei įsisunkimo gylis (tamsiai mėlyna spalva) ([www.sdec-france.com](http://www.sdec-france.com)).

Fig. 2. A principal scheme of a double ring permeameter, a shape of moistened porous medium and water percolation depth (blue) ([www.sdec-france.com](http://www.sdec-france.com)).

trometro dugno plotas;  $\mu$  – vandenvarža.

Kadangi bandymo metu spūdis yra pastovus (vandens aukštis infiltrometro žiede  $h_0 = \text{const.}$ ), pagal gautus duomenis sudarius grafiką  $v_s = f/W$ , jo taškai išsidėstys vienoje tiesėje, kuri  $v_s$  ašyje atkirs atkarpą  $A$ , skaitinė reikšmė lygia prisotintos uolienos filtracijos koeficientui. Dar galima pasinaudoti lygtimi  $nW = A + K_f W$ , kur krypties koeficiento  $C$  skaitinė vertė lygi filtracijos koeficientui  $K_f$  (3 pav.).

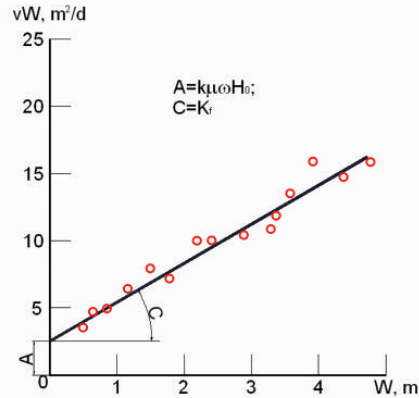
Tiriant mažai laidžių nuogulų filtracines savybes, vidinį žiedą rekomenduojama uždengti. Taip išvengiama garavimo nuostolių, kai bandymai trunka ilgai.

Dviejų žiedų infiltrometrai naudojami jau daug metų. Žemiau pateikiami kelių naujų modifikacijų infiltrometrų aprašymai.

**Slėginis infiltrometras (tension infiltrometer)** dažniausiai naudojamas neįsotintų drėgme uolienų filtracijos koeficientui ( $K_f$ ) nustatyti. Šiuo infiltrometru matuojamas infiltracijos dydis į gruntą, vandeniui filtruojantis per porėtą plokštę, ties kuria palaikomas pastovus neigiamas slėgis.

Dirbant su šiuo prietaisu, išvengiama makroporų ir infiltracinių kelių įtakos bandymų rezultatams (dėl pastovaus neigiamo slėgio vanduo nenubėga pro plyšius ir pan.). 1991 m. buvo sukurta nauja metodika, kai infiltracija atliekama esant keliems skirtingiems slėgiams tame pačiame plote vieno eksperimento metu.

Pagrindinė prietaiso dalis – cilindras, kuriame yra oro tiekimo (padavimo) vamzdeliai ir kuriuo kontroliuojamas slėgis tiriamo grunto paviršiuje.



3 pav. Bandymo dviejų žiedų infiltrometru rezultatai ( $nW=f(W)$ ) (pagal M.Dobkevičių, 2001).

Fig. 3. Double ring infiltrometer test results ( $nW=f(W)$ ) (after M.Dobkevičius, 2001).

Kitos prietaiso dalys: \* vandens rezervuaras, iš kurio vanduo teka į gruntą; \* porėta pagrindo plokštė, užtikrinanti hidraulinį ryšį; \* papildomai pridedami duomenų kaupiklis ir slėgio daviklis (4 pav.).

Neigiamas slėgis vandens rezervuaro viršuje tiesiškai susijęs su vandens stulpo aukščiu, t.y. 1 mm sumažėjus vandens lygiui, tiek pat sumažėja oro slėgis. Tokiu būdu suminė infiltracija nustatoma pagal slėgio pokytį laike. Atliekant bandymus šiuo prietaisu, būtinas geras grunto ir porėtos membranos hidraulinis ryšys (neigiamam vandens slėgiui grunte perduoti į infiltrometrą).

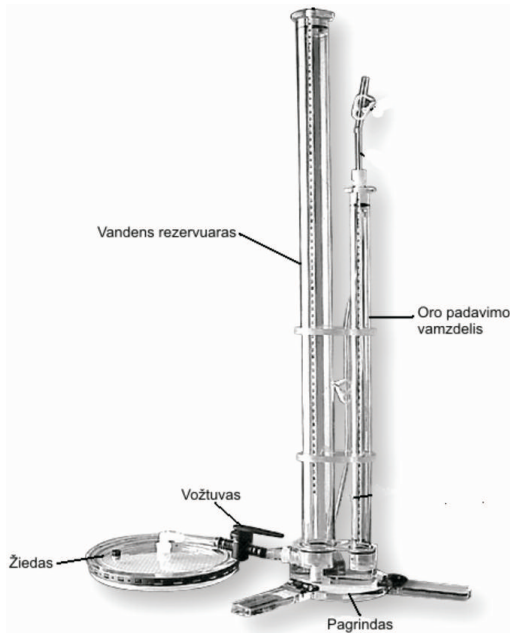
Naudojant slėginį infiltrometrą, nukasama 10-20 cm dirvožemio ir žiedas su membrana įspaudžiamas į gruntą. Jei reikia, papildomai naudojamas užpildas. Greta arba virš žiedo, kai naudojamas specialus stovas, pastatomas pats infiltrometras. Bandymų metu slėgis po truputį didinamas. Vidutiniškai rekomenduojama bandymą tęsti apie 1000 sekundžių (apie 16 min) kiekvienai slėgio vertei.

Filtraciniai skaičiavimai pagrįsti R.Woodingo (Wooding, 1968) stacionarios infiltracijos lygtimi. Filtracijos koeficientą  $K_f$  galima apskaičiuoti pagal lygtį (Meiers, 2002):

$$K_f = \frac{G_d \alpha^* Q_1}{r(1 + G_d \alpha^* \pi r) \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^{\frac{\psi_1}{(\psi_1 - \psi_2)}}},$$

$$\alpha^* = \frac{\ln(Q_1/Q_2)}{\psi_1 - \psi_2},$$

čia  $Q_1$  ir  $Q_2$  – stacionaraus srauto debitai, esant skirtingiems vandens slėgiams;  $r$  – infiltracinio



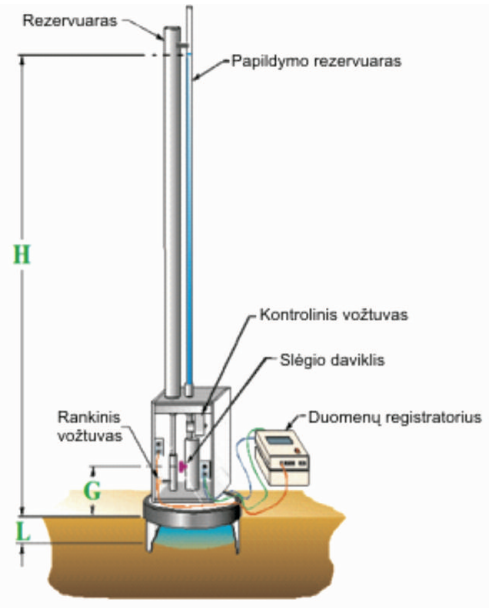
4 pav. Slėginis infiltrmetras (Jordforsk report 49/01).  
Fig. 4. Tension infiltrometer (Jordforsk report 49/01).

paviršiaus spindulys;  $G_d$  – nedimensinis veiksnys;  $\psi_1, \psi_2$  – porinis vandens slėgis esant skirtingiems pirminiams slėgiams (atitinkamai -5 cm ir -10 cm);  $\alpha^*$  – uolienos tekstūros/struktūros parametras.

Atliekant tyrimus slėginiu infiltrmetru, galima nustatyti ne tik nuogulų filtracijos koeficientą, bet porinį (įsiurbiamąjį) slėgį. Tai didelis prietaiso privalumas.

**Oro infiltrometro (Air-Entry permeameter AEP) konstrukcija ir darbo principas** labai panašus į vieno žiedo infiltrometro. Esminis skirtumas – didesnis bandymo gylis (Robertson, 2003). Lauko bandymų metu matuojamas oro įslėgimo į gruntą slėgis, kuris po to perskaičiuojamas į hidraulinį gradientą ir atitinkamai į filtracijos koeficientą. Prietaisą 1966 m. pasiūlė H. Bouwer (Bouwer, 1966). Tačiau tik po 20 metų (Stephens ir kt., 1988; Havlena, Stephens, 1992) buvo įrodyta, kad prietaisas tinka tyrimams ir mažai laidžiuose gruntuose.

Oro infiltrometrą (5 pav.) sudaro vienas infiltracinis žiedas (skersmuo – 30 cm, aukštis – 25 cm), uždengtas specialiu dangčiu. Jis į gruntą įgilinamas apie 15-23 cm. Vanduo į cilindrą pilamas pro vamzdelį, prie kurio viršaus prijungtas graduotas vandens rezervuaras (žr. 5 pav.). Bandymo pradžioje vandeniui leidžiama



5 pav. Oro infiltrmetras  
([www.robertsongeoconsultants.com](http://www.robertsongeoconsultants.com)).  
Fig. 5. Air-entry permeameter AEP  
([www.robertsongeoconsultants.com](http://www.robertsongeoconsultants.com)).

laisvai filtruoti į gruntą stebint jo kiekį rezervuare. Po to, kai iš anksto apibrėžtas vandens kiekis įsifiltruoja ir susiformuoja kvazistacionarus filtracijos režimas, vandens tiekimas nutraukiamas leidžiant vandeniui iš žiedo vidaus susigerti į gruntą. Po to matuojamas oro slėgis žiedo viduje. Jam pasiekus minimalią vertę, žiedas pašalinamas ir kasamas šurfas drėgmės fronto įsiskverbimo gyliui išmatuoti. Pagal įsifiltravusio vandens kiekį ir minimalų išmatuotą slėgį  $K_f$  apskaičiuojamas pagal H. Bouverio (Bouwer, 1966) pasiūlytą lygtį:

$$K_f = \frac{2 \frac{dH}{dT} L \left( \frac{R_{ws}}{R_{sr}} \right)^2}{H_f + L - (0,5P_a)}$$

čia  $dH/dT$  – hidraulinio gradiento pokytis prieš pat infiltracijos sustabdymą;  $R_{ws}/R_{sr}$  – vandens tiekimo rezervuaro spindulio ir žiedo grunte spindulio santykis;  $H_f$  – paskutinė hidrostatinio aukščio reikšmė;  $P_a = P_{\min} + G + L$ ;  $P_{\min}$  – minimalus slėgis manometre;  $G$  – manometro aukštis virš grunto paviršiaus.

Metodas, lyginant su kitais, turi nemažai privalumų: įranga sąlyginai nebrangi, mobili, lengvai instaliuojama, nereikia daug vandens; bandymas atliekamas greitai (20 min, kai  $K_f =$

1 m/d; 1 para, kai  $K_f = 10^{-5}$  m/d); prietaisą nesudėtinga automatizuoti pridėdant slėgio daviklį ir duomenų kaupiklį (padidina matavimų tikslumą).

Metodo trūkumai – netinkamas grunte ar dirvožemyje, kur daug šaknų ar yra urvų, makroporų. Be to, sudėtinga instaliuoti žiedą labai tankiuose ar riedulinguose gruntuose.

Patirtis tiriant aeracijos zoną Lietuvos teri-

torijoje ir naujų modifikacijų infiltrometrų paieška internete rodo, kad šiuo metu tokiems tyrimams atlikti yra pakankamai tobula instrumentinė bazė. Tai mokslines institucijas ir geologines įmones turėtų skatinti daugiau dėmesio skirti aeracijos zonos hidrodinaminių parametrorų nustatymai, kurie būtini atliekant įvairius filtracinių ir migracinių procesų prognozes skaičiavimus.

## Literatūra

- Bouwer, H. Rapid Field Measurement of Air-Entry Value and Hydraulic Conductivity of Soil as Significant Parameters in Flow system Analysis // *Water Resources Research*, Vol.2. – 1966. – P. 729-738.
- Chappell, N. A., Ternan, J.L. Ring Permeametry: design, operation and error analysis // *Earth surface processes and landforms*, Vol. 22. – 1997. – P. 1197-1205.
- Dobkevičius, M. Hidrogeodinamika. – V., 2001.
- Havlena, J.A. & Stephens, D.B. Vadose zone characterizations using field parameters and instrumentation // *Current practices in ground water and vadose zone investigations* / Nielsen, D.M. & Sara, M.N. (eds). – Philadelphia, 1992. – P. 93-110.
- Meiers, G. The Use of Field Measurements of Hydraulic Conductivity to characterize the performance of reclamation soil covers with time : University of Saskatchewan, Division of Environmental Engineering, Masters Thesis. – 2002.
- Minasn, B. Efficient methods for predicting soil hydraulic properties : A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy / Department of Agricultural Chemistry and Soil Science The University of Sydney New South Wales Australia. – 2000.
- Monitoring and assessment of non-point source pollution, Baltic Sea Regional Project, Component II. Annex „Technical description of the environmental monitoring program. – Internetė: <[www.gammel.jordforsk.no](http://www.gammel.jordforsk.no)>
- Permeability Testing in Unconsolidated Materials / Robertson GeoConsultants Inc. February 2003. – Internetė: <[www.robertsongeoconsultants.com](http://www.robertsongeoconsultants.com)>
- Soil Moisture Equipment Corp. Guelph Permeameter 2800KI. Operating Instructions. – 1986. – Internetė: <[www.soilmoisture.com](http://www.soilmoisture.com)>
- Stephens, D.B., Unruh, M., Havlena, J., Knowlton, R.G., Mattsoe, E. and Cox, W. Vadose Zone Characterization of Low-Permeability Sediments Using Fields Permeameters // *Ground Water Monitoring Res.*, Vol. 8, No. 2. – 1988. – P. 58-66.
- Wooding, R.A. Steady infiltration from a shallow circular pond // *Water Resources Research*, 4. – 1968. – P. 1259-1273.
- Бадов, В.В. Оценка водопроницаемости пород лабораторными и полевыми определениями // *Вестн. МГУ, сер. Геол.* № 5. – М., 1971.
- Веригин, Н.Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. – М., 1962.

## Summary

### **Infiltrometers – Devices for *in-situ* Investigations of Vadose Zone Deposits**

Performing environmental and engineering hydrogeology investigations, of late years, the information is often necessary about the filtration features of deposits in the vadose zone. For a rather long time, the infiltrometers of several modifications are used for this purpose. In order to accelerate the experimental field measurements, the infiltrometers are constantly perfected. Thus, beside older versions, quite a few of new modifications appeared recently.

The present paper describes infiltrometers (permeameters) used for determination of filtration rate in a saturated porous medium, since there is the largest demand for such investigations in the market. The main operation principle of the devices of this type is related to measurement of water quantity penetrated into ground per time unit. Some devices are used for measurements at the surface, others are good at deeper intervals of the section. The devices can be grouped as water infiltrometers (for surface measurements: (a) single- or double-ring infiltrometer, (b) tension infiltrometer, (c) air-entry permeameter) and borehole infiltrometers.