

Kazimierz GARBULEWSKI  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

## PRZEPUSZCZALNOŚĆ HYDRAULICZNA MODELOWEGO USZCZELNIENIA SKŁADOWISKA ODPADÓW

**Streszczenie.** W celu sprawdzenia zmian właściwości gruntów w uszczelnieniach składowisk odpadów wykonano w 1985 r. w Illinois State Geological Survey (USA) model uszczelnienia (7,3 x 14,6 x 0,9 m), w którym zainstalowano aparaturę do badań przepuszczalności hydraulicznej. Po 12 latach przeprowadzono w laboratorium Katedry Geotechniki SGGW badania przepuszczalności próbek gruntu o nienaruszonej strukturze pobranych z uszczelnienia. Metodyka i wyniki badań oraz porównanie ich z badaniami wykonanymi w USA zostały przedstawione w niniejszym artykule. Przeprowadzone badania metodami terenowymi i laboratoryjnymi wykazały, że grunt w uszczelnieniu charakteryzuje się przepuszczalnością wyraźnie mniejszą niż wymagana przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (EPA) wartość  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s.

## HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF EXPERIMENTAL LANDFILL LINER

**Summary.** In order to check behaviour of soils in landfill liners a large-scale (7.3 x 14.6 x 0.9 m) soil liners were constructed in the Illinois State Geological Survey in 1985. Various instruments, including infiltrometers and tensiometers, are used to monitor the hydraulic conductivity and soil-water tension in the liner soil. In 1997-98 the hydraulic conductivity tests on undisturbed soil samples from the experimental liner were conducted in the laboratory of Department of Geotechnics of the Warsaw Agricultural University. This paper includes information about the method used and test results obtained, and the comparison of laboratory and field-scale test results. Results indicated that the compacted soil liner meets the standard set by the US EPA for saturated hydraulic conductivity ( $\leq 1 \times 10^{-9}$  m/s).

### 1. Wstęp

Każde składowisko odpadów stanowi zagrożenie dla środowiska naturalnego i w związku z tym w jego konstrukcji musi znaleźć się uszczelnienie, które skutecznie wyeliminuje lub ograniczy negatywne oddziaływanie składowiska na hydrosferę i biosferę [4]. W celu sprawdzenia efektywności uszczelnienia mineralnego w długim okresie, zwłaszcza wpływu odcieków na przepuszczalność hydrauliczną, wykonano w 1985 r. w Illinois State Geological Survey (ISGS)

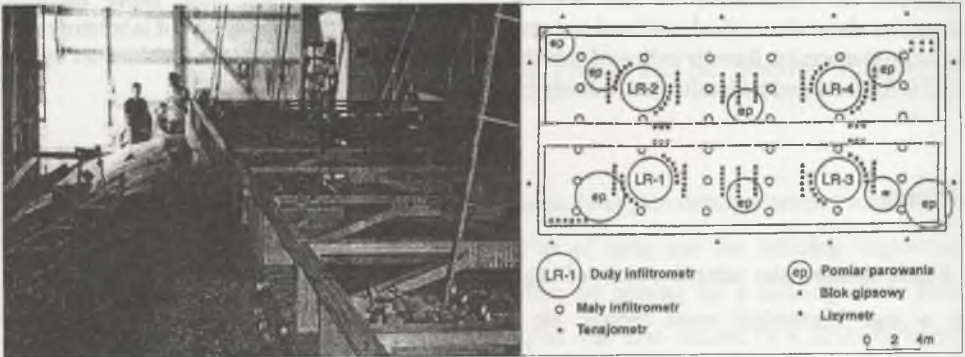
model uszczelnienia o wymiarach 7,3 x 14,6 x 0,9 m (rys.1) z szarej gliny (wg USCS – CL) o nazwie Batestown Till (tabela 1). W okresie budowy i po zalaniu wodą prowadzono obszerne badania uszczelnienia [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. W latach 1997-1998 w ramach grantu im. M. Curie-Skłodowskiej (MR/EPA-96-282) Katedra Geotechniki SGGW wykonała kontrolne badania przepuszczalności hydraulicznej modelowego uszczelnienia wykonanego w ISGS, których metodykę i wyniki przedstawiono w niniejszym artykule.

Tabela 1

## Właściwości fizyczne i chemiczne gruntu, z którego wykonano modelowe uszczelnienie

Parametr	Srednia wartość	Odchylenie standardowe
Uziarnienie - zawartość frakcji*		
iłowa	28,9 %	2,8 %
pyłowa	33,4 %	2,5 %
piaskowa	32,0 %	1,2 %
żwirowa	5,8 %	2,1 %
Granice Atterberga		
granica płynności	23,3 %	0,5 %
granica plastyczności	13,1 %	1,1 %
wskaźnik plastyczności	10,1 %	1,2 %
Ciężar właściwy względny	2,74	0,01
CEC	9,91 meq/100 g gruntu	3,57 meq/100 g gruntu
Skład mineralny		
illit	63,7 %	0,6 %
chloryt	9,7 %	0,6 %
pęczniące	26,6 %	0,6 %
Zagęszczalność w aparacie Proctora (energia standardowa)		
$\rho_{ds}$	1,98 g/cm <sup>3</sup>	0,01 g/cm <sup>3</sup>
$W_{opt}$	9,9 %	0,4 %

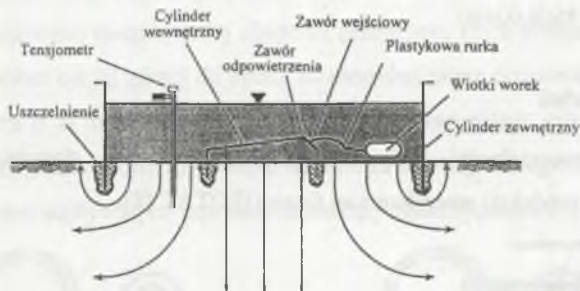
\* iłowa < 4  $\mu$ m, pyłowa < 63  $\mu$ m - > 4  $\mu$ m, piaskowa < 2mm - > 63  $\mu$ m, żwirowa - > 2 mm



Rys. 1. Widok i lokalizacja aparatury do badań eksperymentalnego uszczelnienia  
Fig. 1. View and instrumentation design of experimental soil liner

## 2. Badania przepuszczalności hydraulicznej w ISGS

Przepuszczalność hydrauliczna modelowego uszczelnienia była badana za pomocą dużych (średnica 1,5 m) i małych (średnica 0,3 m) infiltrometrów (rys. 2) oraz określana przy wykorzystaniu analizy bilansu wodnego. W infiltrimetrach określano strumień infiltracji, czyli objętość wody infiltrującej w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię gruntu. Do pomiaru objętości wody zastosowano plastikowe wiotkie „worki medyczne” wypełnione wodą o znanej masie i objętości. Dla każdego infiltrometru wykreślano krzywą sumową wody i obliczano strumień infiltracji ustalonej. Przepuszczalność hydrauliczną określano dzieląc strumień infiltracji przez gradient hydrauliczny. Po 1 roku od zalania uszczelnienia uzyskano średnie wartości przepuszczalności hydraulicznej wynoszące  $3,3 \times 10^{-11}$  m/s i  $5,3 \times 10^{-10}$  m/s odpowiednio dla dużych i małych infiltrometrów.



Rys. 2. Uszczelniony podwójny cylindryczny infiltrometr  
Fig. 2. Double sealing ring infiltrimeter

Przepuszczalność hydrauliczną uszczelnienia po roku i 2 latach od zalania wodą określono również na podstawie bilansu wodnego. Objętości wody infiltrującej wynosiły dla okresu 1 roku 3260 l, natomiast dla 2 lat 5480 l, co pozwoliło obliczyć wartości strumienia infiltracji odpowiednio  $1,0 \times 10^{-9}$  m/s i  $8,4 \times 10^{-10}$  m/s.

## 3. Badania kontrolne w laboratorium KG

### 3.1. Właściwości badanego gruntu

Badania w laboratorium Katedry Geotechniki SGGW przeprowadzono dla próbek gruntu pobranych w 1997 r. z uszczelnienia eksperymentalnego w ISGS (tabela 2). Z uziarnienia badanego gruntu wynika, że jest to glina o właściwościach zbliżonych do określonych w laboratorium ISGS. Parametry zagęszczalności uzyskane z badań w aparacie Proctora są nieco większe od określonych w ISGS.

Tabela 2

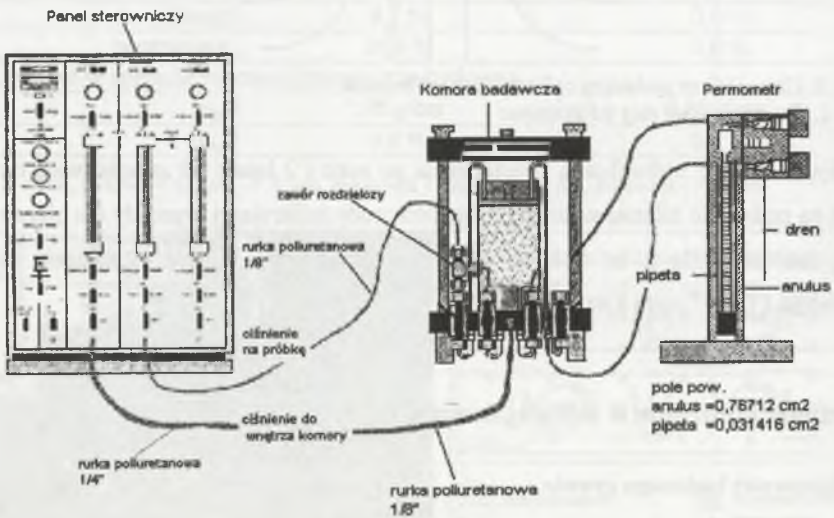
## Właściwości gruntu badanego w laboratorium KG

Parametr	Jednostka	Wartość
Uziarnienie – zawartość frakcji		
iłowa	%	27
pyłowa	%	29
piaskowa	%	35
żwirowa	%	9
Granice Atterberga		
granica płynności	%	23,0
granica plastyczności	%	11,4
granica skurczalności	%	10,5
Ciężar właściwy względny	-	2,73
Zawartość CaCO <sub>3</sub>	%	> 5
Parametry zagęszczalności (energia standardowa)		
W <sub>opt</sub>	%	11,2
ρ <sub>ds</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2,02

\* - według PN – 86/B-02480

### 3.2. Metodyka badań

Badania przepuszczalności hydraulicznej przeprowadzono stosując system pomiarowy Trautwein (rys. 3) produkcji amerykańskiej firmy GEOTAC [8].

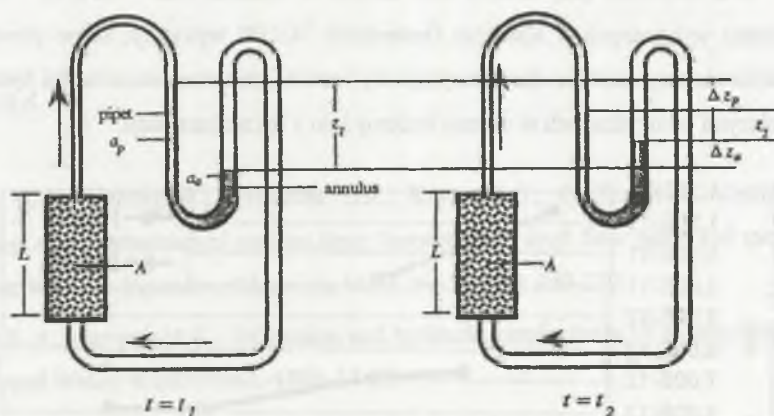


Rys. 3. Schemat systemu Trautwein do badań przepuszczalności hydraulicznej gruntów  
Fig. 3. Trautwein system used in tests of soil hydraulic conductivity

System ten składa się z trzech zasadniczych elementów: tablicy pomiarowej, komory i permometru. Tablica pomiarowa służy do zadawania i kontrolowania ciśnień oraz pomiaru zmian

objętości próbki gruntu i przepływu wody. Tablica zawiera sekcję kontrolną i trzy niezależne sekcje ciśnieniowe. Sekcja kontrolna wyposażona w cyfrowy rejestrator umożliwia precyzyjne ustawienie wymaganego ciśnienia, kontrolę podciśnienia i wykonywanie operacji, aby wymusić przepływ wody w celu napełnienia lub opróżnienia komory badawczej. Sekcje ciśnieniowe pozwalają wytworzyć wymagane ciśnienie wewnątrz komory, w badanej próbce (ciśnienie wyrównawcze) i różnicę ciśnień na górnej i dolnej powierzchni próbki gruntu. Zmiany objętości kontrolowane są z dokładnością 0,05 ml. Komora systemu, wykonana z akrylu, pozwala wymuszać ciśnienia do wartości 0,85 MPa. Komora połączona jest z tablicą pomiarową i permometrem, który umożliwia znaczne przyspieszenie badań. Zastosowanie permometru eliminuje najdłuższy etap standardowej procedury – doprowadzenie do równowagi dopływu i odpływu wody. Permometr wymusza bowiem jednokierunkowy dopływ i odpływ wody, a poza tym pozwala mierzyć objętość wody z dokładnością 0,003 ml.

W badaniach zastosowano metodę stałej objętości przepływu, która polegała na wymuszeniu przepływu wody w próbce od jej górnej do dolnej powierzchni przez przesunięcie położenia rtęci w pipecie permometru o  $z_1$  w czasie  $t_1$  (rys. 4) i wytworzeniu różnic ciśnień (gradientu) na powierzchniach próbki gruntu. Podczas powrotu rtęci do równowagi następował przepływ wody, identyczny na dopływie i odpływie, co zapewnia zamknięty układ hydrauliczny w permometrze i



Rys. 4. Schemat badań przepuszczalności hydraulicznej modelowego uszczelnienia  
Fig. 4. Schematic of hydraulic conductivity test for experimental liner

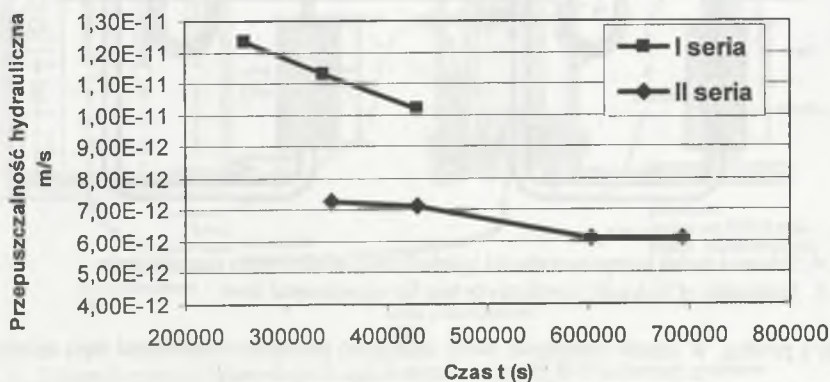
komorze z próbka. W czasie przepływu wody odległość pomiędzy meniskami rtęci zmniejsza się stopniowo i w czasie  $t_2$  wynosi  $z_2$ . Zgodnie z prawem Darcy'ego wykorzystując warunek ciągłości przepływu od próbki do manometru możemy zapisać wzór na obliczenie przepuszczalności hydraulicznej  $k$  w postaci:

$$k = \{ (a_a a_p) L \} / \{ (a_a + a_p) A t (\delta_{Hg} - \delta_w) \} \ln h_1 / h_2$$

gdzie:  $a_a$  - powierzchnia przekroju anulusu ( $a_a = 0,76712 \text{ cm}^2$ ),  
 $a_p$  - powierzchnia przekroju pipety ( $a_p = 0,031414 \text{ cm}^2$ ),  
 $L$  - wysokość próbki (cm),  
 $A$  - powierzchnia przekroju próbki ( $\text{cm}^2$ ),  
 $t = t_2 - t_1$  (s),  
 $h_1 = z_1 (\delta_{\text{Hg}} - \delta_w)$ ,  
 $h_2 = z_2 (\delta_{\text{Hg}} - \delta_w)$ ,  
 $\delta_{\text{Hg}}$  - ciężar właściwy rtęci ( $\delta_{\text{Hg}} = 12,51 \text{ g/cm}^3$ ),  
 $\delta_w$  - ciężar właściwy wody ( $\text{g/cm}^3$ ).

### 3.3. Analiza wyników badań

Pierwszym etapem badań było nasycenie całkowite próbek wodą, które przeprowadzono przez okres ok. 2 tygodni stosując technikę ciśnienia wyrównawczego; końcowe ciśnienie wody w komorze wynosiło 96,7 kPa, natomiast w porach próbek 69,0 kPa. Drugim etapem była konsolidacja gruntu przy ciśnieniach 144,9 kPa i 96,6 kPa oraz 193,2 kPa i 138,0 kPa odpowiednio w komorze i w próbkach gruntu. Po nasyceniu i konsolidacji próbek przeprowadzano wielokrotne pomiary przepływu wody za pomocą permometru. Próbkki badane po nasyceniu wodą charakteryzowały się wartościami przepuszczalności hydraulicznej  $k$  w zakresie  $2,4 \times 10^{-11} - 8,9 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ . Po konsolidacji, przy pierwszej serii ciśnień wartości  $k$ , wynosiły  $(1,0 - 1,2) \times 10^{-11} \text{ m/s}$ , natomiast przy drugiej serii ciśnień w zakresie  $(6,2 - 7,3) \times 10^{-12} \text{ m/s}$  (rys. 5). Wyniki badań wykonanych w Katedrze Geotechniki SGGW wykazały, że po ponad 10 latach uszczelnienie eksperymentalne charakteryzuje się wartościami przepuszczalności hydraulicznej o rząd mniejszymi od uzyskanych w okresie budowy i po 1 roku obserwacji.



Rys. 5. Wyniki badań przepuszczalności hydraulicznej uszczelnienia w KG  
 Fig. 5. Test results obtained in KG for experimental liner

#### 4. Wnioski

Badania przepuszczalności hydraulicznej eksperymentalnego uszczelnienia wykonane w ISGS w 1988 r., ok. 1 miesiąc po zalaniu uszczelnienia wodą wykazały wartości  $k$  wynoszące  $5,3 \times 10^{-10}$  i  $3,3 \times 10^{-11}$  m/s, odpowiednio dla małych i dużych infiltrometrów oraz  $6,7 \times 10^{-10}$  m/s określone na podstawie bilansu wodnego. Niewielki rozrzut uzyskanych wartości  $k$  świadczył o równomiernym rozkładzie strumieni infiltracji w uszczelnieniu. Z badań laboratoryjnych próbek gruntu przeprowadzonych w Katedrze Geotechniki SGGW po 10 latach od zalania uszczelnienia wodą uzyskano wartości  $k$  w zakresie  $1 \times 10^{-11} - 9 \times 10^{-12}$  m/s, czyli mniejsze od określonych na początku działania uszczelnienia.

W badaniach eksperymentalnego uszczelnienia zastosowano w ISGS aparaturę zalecaną przez US EPA do określania przepuszczalności hydraulicznej uszczelnień mineralnych, w tym szeroko stosowane w USA infiltrometry cylindryczne z pomiarem objętości wody za pomocą wiotkich worków medycznych. System pomiarowy Trautwein, który wykorzystano do badań przepuszczalności uszczelnienia w laboratorium Katedry Geotechniki SGGW, stanowi cenną pomoc w badaniach i umożliwia szybkie, dzięki zastosowaniu permometru, określenie wartości  $k$ , niezbędne do oceny efektywności uszczelnienia.

#### LITERATURA

1. Albrecht K.A., Herzog B.L., Follmer L.R., Krapac I.G., Griffin R.A., Cartwright K.: Excavation of an instrumented earthen liner: Inspection of dyed flow paths and morphology, *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, Vol.6, No.3, 1989, 269-279.
2. Albrecht K.A., Cartwright K.: Infiltration and hydraulic conductivity of a compacted earthen liner, *Ground Water*, Vol.27, No.1, 1989, 14-19.
3. Cartwright K., Krapac I.G., Panno S.V., Hensel B.R., Rehfeld K.R.: Field study of transit time of water and tracers through a soil liner, HWRIC Project Number HWR-88-047, 1993.
4. Garbulewski K.: Dobór i badania gruntowych uszczelnień składowisk odpadów komunalnych, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2000.
5. Krapac I.G., Panno S.V., Rehfeld K.R., Herzog B.L., Hensel B.R., Cartwright K.: Hydraulic properties of an experimental soil liner: preliminary results, *Proc. of the 12 Annual Madison Waste Conference*, 1989: 395-411.

6. Krapac I.G., Cartwright K., Hensel B.R., Herzog B.L., Larson T.H., Panno S.V., Risatti J.B., Wen-June Su, K.R. Rehfeld: Construction, monitoring, and performance of two soil liners, Environmental Geology Report 141, Illinois, Champaign.
7. Panno S.V., Herzog B.L., Cartwright K., Rehfeld K.R., Krapac I.G., Hensel B.R.: Field-scale investigation of infiltration into a compacted soil liner, Ground Water, Vol. 29, No. 6, 914-921.
8. Skutnik Z., Garbulewski K.: Badania terenowe i laboratoryjne przewodności hydraulicznej ilów plicieńskich, Materiały XII Krajowej Konferencji MG i F, Szczecin 2000, 263-278.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Zygmunt MEYER

### Abstract

Compacted soil liners are widely used at landfill for containing leachates. The liner operates as a barrier between the hydrogeologic environment and the wastes by limiting the seepage from these waste facilities. Fine-grained materials used in liner construction exhibit properties necessary for an effective waste disposal system, particularly low hydraulic conductivity. According to US EPA and EU regulations the liner material must demonstrate a saturated hydraulic conductivity of less than  $1 \times 10^{-9}$  m/s. Little research has been conducted to evaluate the performance of field-scale compacted soil liner. In order to check behaviour of soils in landfill liners a prototype and large-scale (7.3 x 14.6 x 0.9 m) soil liners were constructed in the Illinois State Geological Survey in 1985. Various instruments, including large- (4 units) and small-ring infiltrometers (32 units), tensiometers (84 transducer and gage units) and gypsum blocks (24 units) are used to monitor the hydraulic conductivity and soil-water tension in the liner soil. In 1997-98 the hydraulic conductivity tests on undisturbed soil samples from the experimental liner were conducted in the laboratory of the Department of Geotechnics of the Warsaw Agricultural University. This paper includes information about the method used and test results obtained, and the comparison of laboratory and field-scale test results. Results indicated that the compacted soil liner meets the standard set by the US EPA for saturated hydraulic conductivity ( $\leq 1 \times 10^{-9}$  m/s).