

## ZMIENNOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI W ZALEŻNOŚCI OD SPADKU HYDRAULICZNEGO NA PRZYKŁADZIE BADAŃ GLIN Z MIEJSCOWOŚCI RÓŻANKA

### VARIABILITY OF THE PERMEABILITY COEFFICIENT DEPENDING ON HYDRAULIC GRADIENT EXEMPLIFIED BY GLACIAL TILLS FROM RÓŻANKA

TOMASZ SZCZEPAŃSKI<sup>1</sup>, EMILIA WÓJCIK<sup>1</sup>, IRENEUSZ GAWRIUCZENKOW<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Artykuł poświęcony jest problematyce wyznaczania w laboratorium współczynnika filtracji, jednego z istotnych kryteriów doboru gruntu jako materiału izolacyjnego. Program badań obejmował 3 serie pomiarów współczynnika filtracji na próbkach gliny lodowcowej kompleksu północnopolskiego, założono w nim różne warunki gradientu hydraulicznego i naprężenia. Wyniki świadczą o znacznej zmienności współczynnika filtracji w zależności od warunków badania, co sygnalizuje potrzebę doprecyzowania istniejących wytycznych badań przepuszczalności.

**Słowa kluczowe:** glina lodowcowa, współczynnik filtracji, spadek hydrauliczny, kontrakcja.

**Abstract.** The paper focuses on the problems of determining the permeability coefficient, one of the important criteria for selecting the ground as a sealing material. The research program included three series of measurements of the permeability coefficient on samples from North-Polish complex till, using different conditions of stress and hydraulic gradient. The results show a considerable variability of the coefficient depending on the studied conditions, which indicates the need for research to clarify the existing guidelines for permeability studies.

**Key words:** glacial till, permeability coefficient, hydraulic gradient, hydraulic contraction.

## WSTĘP

Doświadczalne wyznaczanie parametrów filtracyjnych utworów spoistych zyskuje coraz większe znaczenie praktyczne. Zarówno w obliczeniach inżynierskich, modelowaniu procesów zachodzących w podłożu budowli, jak i w ochronie środowiska znajomość przepuszczalności jest rzeczą kluczową. W obecnej sytuacji, gdy wzrasta tempo budowy składowisk odpadów, istnieje potrzeba wiarygodnego (najbliższego rzeczywistości) określenia wartości przepuszczalności gruntów, które mogą stanowić naturalne bariery geologiczne

lub materiał do formowania przesłon izolacyjnych. Aktem prawnym dotyczącym budowy składowisk jest Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 roku. Zawiera ono wymagania minimalne, które powinny być spełnione odnośnie do współczynnika filtracji i miąższości przesłon. Wielu autorów podaje dodatkowe kryteria przydatności gruntów do formowania warstw mineralnego uszczelnienia (Majer i in., 2007). W tabeli 1 przedstawiono niektóre parametry określające kryteria przydatności wraz z wymaga-

<sup>1</sup> Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; tom@uw.edu.pl, wojcike@uw.edu.pl, i.gawriuczenkow@uw.edu.pl

nymi ich wartościami i wynikami uzyskanymi dla badanej gliny lodowcowej kompleksu północnopolskiego pobranej z 10 otworów z przedziału głębokościowego od 8,0 m do 11,0 m w okolicy miejscowości Różanka (powiat Iławski, województwo warmińsko-mazurskie), gdzie planowana jest budowa zakładu gospodarowania odpadami, w tym składowiska odpadów komunalnych.

Zbadane grunty reprezentowane są przez gliny piaszczyste zwięzłe barwy ciemnoszarej, będące w stanie plastycznym i twaroplastycznym, wilgotne i mało wilgotne o zróżnicowanej zawartości węgla wapnia. W tabeli 1 zamieszczono parametry statystyczne, takie jak minimum, maksimum, średnia, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności, który jest najwyższy w przypadku stopnia plastyczności. Dla pozostałych kryteriów przydatności współczynnik ten nie przekracza 10%. Skład mineralny badanych glin ustalono na podstawie analizy teromogrametrycznej (Kościówko, Wyrwicki, 1996). Wykazała ona, że głównymi składnikami mineralnymi badanych glin są kwarc i minerały nieaktywne termicznie, których zawartość waha się w granicach od 72 do 80%, węglany, w skład których wchodzi kalcyt, dominujący we frakcjach grubszych (12–18%), oraz niewielkie domieszki dolomitu skupionego we frakcji iłowej. Zawartość minerałów ilastych waha się w granicach od 8 do 12%, przeważającym minerałem jest tu illit (od 6 do 11%), pobocznie występuje także kaolinit (od 1

do niecałych 2%). Składnikami akcesorycznymi są substancja organiczna skupiona przede wszystkim we frakcji iłowej (ok. 0,1%) oraz syderyt (ok. 0,3%), również skupiony głównie we frakcji iłowej (tab. 2).

Ze względu na wyróżnione w tabeli 1 kryteria badany grunt nie spełnia wymogów przydatności stawianych materiałom na budowę mineralnych przesłon izolacyjnych.

Niezależnie od innych kryteriów, jednym z głównych wyznaczników określania przydatności gruntów jako naturalnych lub formowanych barier izolacyjnych jest wartość współczynnika filtracji. Kwestią do rozwiązania w projektowaniu badań przepuszczalności utworów słaboprzepuszczalnych jest brak precyzyjnych wytycznych co do metodyki jego wyznaczania. Opisy poszczególnych metod często nie zawierają informacji o tym, jakie wartości spadków hydraulicznych (w przypadku metod ze stałym spadkiem) i przepływów (w metodach o wymuszonym przepływie) powinno się przyjmować ani w jakim stanie naprężeń działającym na próbkę należy je stosować. Poniżej opisano wyniki trzech serii testów, pokazujące wpływ czynników metodyki badania, takich jak obciążenie i spadek hydrauliczny. Wyniki oznaczeń podstawowych właściwości fizycznych próbki nr 12, która została wytypowana do szczegółowych badań współczynnika filtracji, znajdują się w tabeli 1 (ostatnia kolumna).

Tabela 1

## Wybrane kryteria przydatności z uwzględnieniem parametrów fizycznych badanych gruntów

Selected utility criteria taking physical parameters of investigated soils into consideration

Parametr określający kryterium przydatności	Jednostka	Wymagana wartość (Majer i in., 2007)	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Próbka nr 12 (głębokość 9,5–10 m)
Zawartość frakcji iłowej	[%]	≥ 20	19,8	23,3	21,5	1,3	5,9	20,4
Zawartość frakcji drobnych (suma frakcji pyłowej i iłowej)	[%]	≥ 60	<b>39,4</b>	<b>48,1</b>	<b>43,2</b>	<b>2,3</b>	<b>5,4</b>	<b>41,3</b>
Zawartość frakcji żwirowej	[%]	≤ 10	1,2	8,5	3,3	2,4	72,6	1,4
Zawartość minerałów ilastych	[%wag]	≥ 20	<b>7,8</b>	<b>12</b>	<b>9,4</b>	<b>1,9</b>	<b>20,5</b>	<b>8,1</b>
Zawartość węgla wapnia	[%]	≤ 15	<b>12,1</b>	<b>17,7</b>	<b>13,9</b>	<b>2,6</b>	<b>18,6</b>	<b>12,1</b>
Zawartość części organicznych	[%]	≤ 5	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,05</b>	<b>28,6</b>	<b>0,1</b>
Granica plastyczności	[%]	<b>25–45</b>	<b>9,8</b>	<b>10,9</b>	<b>10,4</b>	<b>0,36</b>	<b>3,4</b>	<b>10,6</b>
Granica płynności	[%]	<b>40–115</b>	<b>18,3</b>	<b>21,8</b>	<b>20,6</b>	<b>1,00</b>	<b>4,9</b>	<b>20,3</b>
Wskaźnik plastyczności	[%]	<b>15–70</b>	<b>8,2</b>	<b>11,3</b>	<b>10,2</b>	<b>0,95</b>	<b>9,3</b>	<b>9,7</b>
Aktywność według Skemptona	[–]	≥ 0,4	0,41	0,52	0,47	0,04	8,4	0,48
Współczynnik filtracji	[m/s]	≤ 10 <sup>-9</sup>	patrz fig. 1 i fig. 2					

Pogrubieniem oznaczono wartości parametrów, które nie spełniają wymogów przydatności barier mineralnych  
The values of those parameters which do not meet the requirements of utility of mineral barriers are given in bold

Tabela 2

**Skład mineralny badanych glin**  
Mineral composition of investigated glacial till

Numer próbki	Procentowa zawartość minerałów						
	minerały ilaste			kwarc i i minerały nieaktywne termicznie	kalcyt	syderyt	części organiczne
	łącznie	illit	kaolinit				
4	12,0	11,4	0,6	74,5	13	0,3	0,2
12	8,1	6,7	1,4	79,5	12,1	0,3	0,1
39	7,8	6,2	1,6	78,9	12,7	0,3	0,2
93	9,5	8,4	1,1	72,4	17,7	0,2	0,2

## METODYKA I WYNIKI BADAŃ

Opisane poniżej badania wykonywane były na sprzęcie produkcji GDS Instruments (sterowniki ciśnienia i objętości, oprogramowanie sterujące i akwizycja danych) i Controls (komora). Przeprowadzono je w dedykowanej komorze do badań filtracji, o konstrukcji podobnej do komór do badań trójosiowych. W trakcie analizy próbki o kształcie walca umieszczone są na podstawie, od góry przykryte kopułką, powierzchnia boczna znajduje się w osłonce gumowej. Osłonka jest dociskana do kopułki i podstawy przez o-ringi. Po wypełnieniu komory wodą możliwe jest zadanie izotropowego naprężenia na próbkę, a poprzez podstawę i kopułkę – zadawanie ciśnień hydraulicznych, z różnicy których wynika gradient hydrauliczny. Aparatura sterująca umożliwia zupełną dowolność w programowaniu badań – zarówno jeśli chodzi o stan naprężeń, jak i rodzaj wymuszeń (gradient hydrauliczny, objętość przepływu) – z dokładnością pomiaru i sterowania na poziomie 1 kPa (ciśnienie), i 1 mm<sup>3</sup> (objętość wody wpływającej do próbki i wypływającej z niej). Sterowanie i rejestracja odbywają się za pomocą komputera.

Obliczenia wykonano według podanych niżej wzorów.

Po stabilizacji ilości wody wpływającej do próbki i wypływającej z niej wydatek obliczono z wzoru [1]:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad [1]$$

gdzie:

$Q$  – wydatek [m<sup>3</sup>/s],

$\Delta V$  – ilość wody zmierzonej w wybranym przedziale czasu [m<sup>3</sup>],

$\Delta t$  – odpowiadający przedział czasu [s].

Współczynnik filtracji obliczano z równania [2]:

$$k = \frac{Q \times l}{A \times h} \quad [2]$$

gdzie:

$k$  – współczynnik filtracji [m/s],

$Q$  – wydatek [m<sup>3</sup>/s],

$l$  – wysokość próbki [m],

$A$  – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki [m<sup>2</sup>],

$h$  – różnica ciśnień na górze i na dole próbki (gradient hydrauliczny).

Badania wykonywane były w stałej temperaturze 20°C. Zgodnie z zaleceniami normy PKN-CEN ISO/TS 17892-11:2009, aby uzyskać pełniejszą porównywalność wyników, uzyskane wartości  $k$  oznaczone w trakcie badania należy przeliczyć dla temperatury 10°C (średnia temperatura wody gruntowej), używając poniższego wzoru Poiseuille'a [3]:

$$k_{10} = \alpha \times k_T \quad [3]$$

gdzie:

$k_{10}$  – [m/s],

$k_T$  – współczynnik filtracji w temperaturze otoczenia [m/s],

$\alpha$  – współczynnik poprawkowy (dla badań przeprowadzonych w temperaturze 20°C  $\alpha = 0,771$ ).

Aby ukazać zmienność pomierzonego współczynnika filtracji w zależności od przyjętej metodyki badania, w artykule przedstawiono wyniki trzech serii pomiarowych wykonanych na próbkach z jednego próbnika (tab. 1 – próbka nr 12).

Serie pomiarów wykonano według następującego programu (każda seria pomiarów to badanie na jednej próbce):

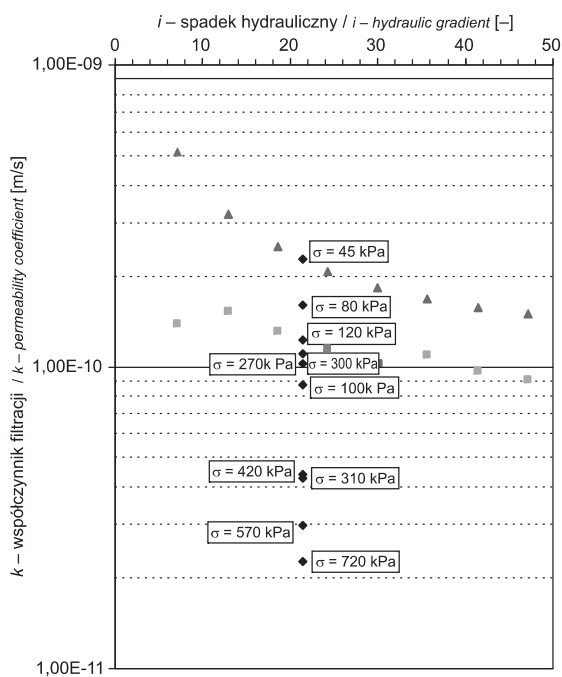
1. Jedenaście pomiarów z efektywnym obciążeniem izotropowym próbki wynoszącym 45, 80, 100, 120, 270, 300, 310, 420, 570, 720, 870 kPa, ze stałym we wszystkich badaniach spadkiem hydraulicznym równym 21,4.

2. Osiem pomiarów z efektywnym obciążeniem izotropowym próbki równym 80 kPa, ze spadkiem hydraulicznym 7,1; 12,9; 18,6; 24,3; 30; 35,7; 41,4; 47,1.

3. Osiem pomiarów z efektywnym obciążeniem izotropowym próbki równym 300 kPa, ze spadkiem hydraulicznym 7,1; 12,9; 18,6; 24,3; 30; 35,7; 41,4; 47,1.

Wyniki zestawiono na figurach 1 i 2.

Zmniejszenie współczynnika filtracji ze wzrostem obciążenia przy stałym spadku hydraulicznym jest efektem spodziewanym i oczywistym, wynika ze zmniejszenia poro-



- ◆ naprężenie izotropowe zmienne, spadek hydrauliczny stały 21,4  
*changeable isotropic stress, constant hydraulic gradient 21,4*
- ▲ naprężenie izotropowe stałe 80 kPa, spadek hydrauliczny zmienny  
*constant isotropic stress 80 kPa, changeable hydraulic gradient*
- naprężenie izotropowe stałe 300 kPa, spadek hydrauliczny zmienny  
*constant isotropic stress 300 kPa, changeable hydraulic gradient*

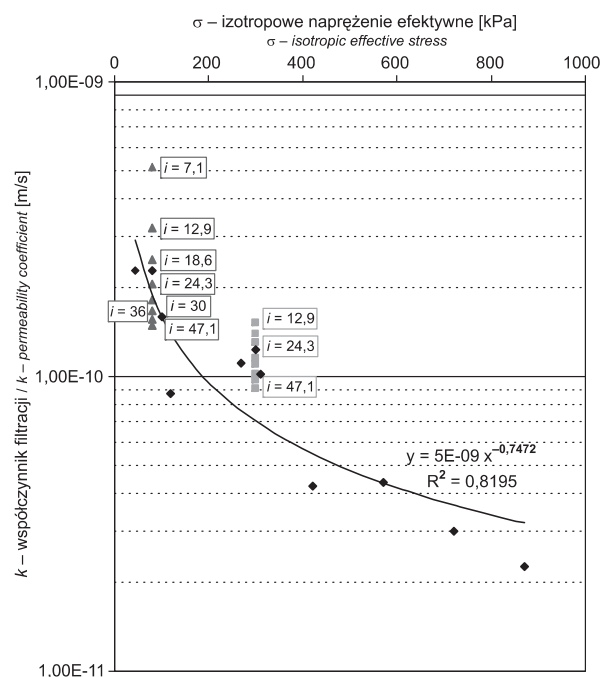
**Fig. 1.** Wykres przedstawiający zależność współczynnika filtracji od spadku hydraulicznego dla próbki nr 12 (3 serie pomiarów)

The relationship between permeability coefficient and hydraulic gradient for sample no. 12 (3 series of measurements)

watości ośrodka. W zastosowanym zakresie naprężeń (45–870 kPa) maksymalna zmiana  $k$  była 10-krotna w stosunku do początkowej. Odnosząc to do sytuacji rzeczywistej, można prognozować zmiany przepuszczalności gruntu w trakcie zapewniania się składowiska i wynikających z tego zwiększenia naprężeń w gruncie i jego konsolidacji.

Podczas badań ze stałym obciążeniem i zmiennym spadkiem hydraulicznym zaobserwowano zmniejszenie współczynnika filtracji ze wzrostem spadku hydraulicznego. Przyczyną stanowi prawdopodobnie efekt kontrakcji (dławienia przy wypływie cieczy przez otwory o małych rozmiarach, co powoduje ograniczenie efektywnego przekroju przepływu). To znane w hydraulice zjawisko szczegółowo analizował Dobak (1999) jako analogię hydrodynamiczną zjawiska występującego w gruntach. Opisanie badania wydają się potwierdzać słuszność tej teorii.

Z praktycznego punktu widzenia, jeżeli założyć pracę analizowanego gruntu w podłożu składowiska odpadów w trakcie eksploatacji składowiska, naprężenia efektywne będą się generalnie zwiększały, działając korzystnie na spadek przepuszczalności podłoża. Razem ze wzrostem miąższości odpadów może się również podnosić położenie zwierciadła wody w ich obrębie (w zakresie ograniczonym przez konstrukcję i sposób drenażu odcieków). W świetle prezentowanych wyników, prawdopodobnie w efekcie zjawiska kontrakcji, takie zwiększenie naporu hydraulicznego na warstwę słaboprzepuszczalną powinno dodatkowo zmniejszać możli-



- ◆ naprężenie izotropowe zmienne, spadek hydrauliczny stały 21,4  
*changeable isotropic stress, constant hydraulic gradient 21,4*
- ▲ naprężenie izotropowe stałe 80 kPa, spadek hydrauliczny zmienny  
*constant isotropic stress 80 kPa, changeable hydraulic gradient*
- naprężenie izotropowe stałe 300 kPa, spadek hydrauliczny zmienny  
*constant isotropic stress 300 kPa, changeable hydraulic gradient*

**Fig. 2.** Wykres przedstawiający zależność współczynnika filtracji od naprężenia efektywnego dla próbki nr 12 (3 serie pomiarów)

The relationship between permeability coefficient and effective stress for sample no. 12 (3 series of measurements)

wość filtracji. Należy oczywiście zdawać sobie sprawę z możliwej niewielkiej skali tych zmian. Przykładowo, zwiększenie naprężeń w gruncie o 150 kPa (gdy gęstość odpadów wynosi  $15 \text{ kN/m}^3$ , a ich miąższość wzrasta o 10 m) może w początkowej fazie eksploatacji składowiska zmniejszyć współczynnik filtracji 1,5–2-krotnie (zgodnie z podanymi wynikami dla tego konkretnego gruntu). Podobna zmiana (1,5-krotne zmniejszenie  $k$ ) w badaniach ze zmiennym spadkiem dokonywała się podczas zwiększenia spadku hydraulicznego z wartości 7 do 12 (gdy  $\sigma' = 80 \text{ kPa}$ ) i z 7 do 47 (gdy  $\sigma' = 300 \text{ kPa}$ ). Nawet jeśli założyć skrajnie niekorzystne warunki w postaci warstwy słaboprzepuszczalnej o miąższości 1 m, oznacza to zmianę wysokości naporu wody z 7 do 12 m w pierwszym przypadku i z 7 do 47 m w drugim, a więc wartości mało prawdopodobne. W odniesieniu do rzeczywistej minimalnej miąższości warstwy gliny w Różance, która wynosi ok. 6 m (Dokumentacja..., 2011), zmiana spadku o 5 wymagałaby zmiany naporu o 30 m. Przy większej miąższości warstwy izolującej skala tych zmian wyklucza więc od strony praktycznej sens rozpatrywania kontrakcji jako zjawiska sprzyjającego zmniejszeniu przepuszczalności podłoża.

Wracając jednak do aspektów metodycznych, należy zauważyć, że zmiana współczynnika filtracji w trakcie badania może być istotna z uwagi na zmianę spadku hydraulicznego, szczególnie przy małych obciążeniach działających na próbkę. W seriach pomiarów ze zmiennym spadkiem, dla  $\sigma = 80 \text{ kPa}$ , różnica między  $k$  dla  $i = 47$  a  $k$  dla  $i = 7$  była

3,5-krotna (większe  $k$  dla mniejszych  $i$ ). Nie są to zmiany znaczne, natomiast razem z naturalną zmiennością gruntu, z niepewnościami pomiarowymi czy ze zjawiskiem nielinio-

wości przepływu w gruncie przy bardzo małych i bardzo dużych spadkach stanowią one kolejny czynnik wpływający na końcowy wynik, czego badacz powinien być świadomy.

## WNIOSKI

1. Biorąc pod uwagę jak ważny jest współczynnik filtracji w ocenie przydatności gruntów słaboprzepuszczalnych jako barier izolacyjnych, należy zauważyć, że niedoprecyzowana jest metodyka jego oznaczania.

2. Jak pokazują dane literaturowe i opisane wyniki, dobór spadku hydraulicznego ma wpływ na wartość otrzymanego  $k$ . Wytyczne do badań (np. Wysokiński, Łukasik, 1996) mówią o przyjmowaniu spadku równego 30 lub zakładanego w projekcie, pojawiają się też sformułowania „stosować gradient taki, jak w terenie” (PKN-CEN ISO/TS 17892-11:2009). W odniesieniu do konkretnego badania przedstawionego w artykule różnica między  $k$  dla  $i = 30$  a  $i = 7$  (przykładowa możliwa wartość występująca w rzeczywistości, choć i tak bardzo wysoka) może być prawie 3-krotna, przy czym warto

podkreślić, że ta bardziej niekorzystna z punktu widzenia izolacyjności gruntu wartość jest zmierzona przy niskim spadku.

3. Jeśli weźmiemy pod uwagę nieliniową charakterystykę przepływu w gruntach przy bardzo małych i bardzo dużych spadkach, zjawisko kontrakcji, możliwości aparaturowe (dokładność pomiarów przepływu), to otrzymujemy kilka czynników, które powodują, że dobranie jakiegoś uniwersalnego spadku hydraulicznego do badań różnych gruntów różnymi metodami może być problematyczne. Dlatego dobrą praktyką wydaje się prowadzenie badań przy kilku różnych spadkach, aby możliwie zbliżyć się do warunków rzeczywistych, a jednocześnie wychwycić trendy zmienności i najbardziej niekorzystne warunki pracy gruntu (przejawiające się największą przepuszczalnością).

## LITERATURA

- DOBAK P., 1999 — Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. *Studia, Rozprawy, Monografie*, 65.
- DOKUMENTACJA hydrogeologiczna dla rozpoznania warunków hydrogeologicznych w związku z planowaną budową składowiska odpadów komunalnych w miejscowości Różanka, 2011. Zakład Geologiczny GEOL, Olsztyn.
- KOŚCÍÓWKO H., WYRWICKI R. (red.), 1996 — Metodyka badań kopalni ilastych. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MAJER E., ŁUCZAK-WILAMOWSKA B., WYSOKIŃSKI L., DRAĞOWSKI A., 2007 — Zasady oceny przydatności gruntów spoistych Polski do budowy mineralnych barier izolacyjnych. ITB, Warszawa.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-11:2009 — Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 11. Badanie filtracji przy stałym i zmiennym gradiencie hydraulicznym.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów. Dz. U. Nr 61, poz. 549.
- WYSOKIŃSKI L., ŁUKASIK S., 1996 — Badania szczelności izolacji mineralnych składowiska odpadów. Instrukcja ITB 339/96. ITB, Warszawa.

## SUMMARY

Determining permeability parameters of clayey soils is of great practical importance, for example due to landfill construction. One of the main utility criterion for using soil as a natural sealing layer or CCLs under a landfill is the coefficient of permeability. Unfortunately, although there are many test methods to determine this parameter and procedure details differ, thus the results can be quite different as well. In the article, the test output of three cycles of measurements is presented. Material tested is glacial till from

Różanka (near Iława, Warmińsko-Mazurskie Province), where a new landfill location is planned. Three test series were conducted with use of a triaxial-like chamber, with different stress and hydraulic gradient initial conditions. The results show decreasing values of the permeability coefficient due to increasing isotropic stress (as a result of decreasing porosity), but also show decreasing values of  $k$  due to increasing hydraulic gradient. A probable reason of this seems to be a phenomenon known as contraction in the hydraulics.

