

**BADANIE WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI GLEB
METODĄ POŁOWĄ I W LABORATORIUM***

Małgorzata Iwanek

Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin
e-mail: KZWUS@fenix.pol.lublin.pl

Streszczenie. Współczynnik filtracji k_s jest parametrem szczególnie ważnym w modelowaniu matematycznym i symulacjach procesów wodno-glebowych. Równocześnie jest to parametr metodycznie trudny do pomiaru, charakteryzujący się dużą zmiennością zarówno w przestrzeni, jak i w czasie, przez co wymaga poboru dużej liczby prób oraz wyboru odpowiedniej metody badań. Najbardziej wiarygodne są badania polowe, ale zajmują one dużo czasu i wymagają specjalnego, często kosztownego sprzętu. Zastosowanie cylindra z piezometrem bezpośrednio w terenie eliminuje błędy związane ze zmianą warunków naturalnych, a jednocześnie jest to sposób stosunkowo prosty metodycznie i tani. Jednak wykorzystanie go w odniesieniu do gleb słabo przepuszczalnych bywa ograniczone przez długi czas trwania pomiaru. W takich przypadkach można zastąpić badania terenowe laboratoryjną metodą Wita, ale pod warunkiem poboru z danego stanowiska co najmniej 10 prób gleby do badań oraz kilkunastokrotnego powtórzenia pomiarów, na co wskazują przeprowadzone doświadczenia oraz obliczenia statystyczne.

Słowa kluczowe: współczynnik filtracji, cylinder z piezometrem, zmodyfikowany aparat Wita, gleby słabo przepuszczalne

WSTĘP

Współczynnik przewodnictwa hydraulicznego przy pełnym nasyceniu k_s , zwany powszechnie współczynnikiem filtracji, jest jedną z podstawowych wielkości związanych z przepływem wody w gruncie. W ciągu ostatnich lat, w związku z upowszechnieniem stosowania metod numerycznych do symulacji i opisu procesów glebowo-wodnych, związanych również z walką z erozją, zyskał on szczególne znaczenie. Modelowanie matematyczne wymaga bowiem, by na wstępie sparametryzować właściwości fizyko-wodne badanego ośrodka. Użyteczność

* Praca wykonana w ramach grantu KBN 1564/T09/2001/21.

metod numerycznych zależy więc od istnienia metodycznie prostych, a zarazem dających wiarygodne rezultaty, sposobów określania wielkości stanowiących dane wejściowe do modelu. Podstawowym wejściowym parametrem w najczęściej stosowanych modelach przepływu wody glebowej jest właśnie współczynnik filtracji [14,15].

W zależności od wymaganej dokładności współczynnik filtracji może być uzyskiwany na podstawie obliczeń, badań laboratoryjnych oraz polowych. Większość metod odnosi się do określonych warunków oraz typu gleby i nie ma uniwersalnego zastosowania [2].

Wzory empiryczne oparte są na szybszych, tańszych i metodycznie łatwiejszych do pomiaru parametrach charakteryzujących glebę – zazwyczaj składzie granulometrycznym lub porowatości ogólnej. Wykorzystuje się także inne wielkości, takie jak porowatość efektywna [11,13], makroporowatość [4,10] czy przepuszczalność powietrzna przy wysokości ciśnienia ssącego wody 100 cm [9]. Metody obliczeniowe są uważane za najmniej precyzyjne, ale do ich zalet należy szybkość, niski koszt oraz mała pracochłonność.

W warunkach laboratoryjnych współczynnik filtracji można określić za pomocą przepuszczalnościomierzy – specjalnych przyrządów, których zasada działania oparta jest na prototypie, którym posługiwał się w swoich doświadczeniach H. Darcy [3]. Podobnie jak w przypadku wzorów, również metody laboratoryjne ulegają modyfikacjom lub powstają nowe przyrządy [6].

Metody polowe zazwyczaj dają najlepsze wyniki, ale ich wadą są często znaczne koszty, pracochłonność i długi czas niezbędny do prawidłowego przeprowadzenia badania. Wciąż trwają prace mające na celu udoskonalenie istniejących technik polowych określania współczynnika filtracji [1,5,12]. Efektem takich prac jest zastosowanie w terenie cylindra z piezometrem [16].

Celem niniejszej pracy jest porównanie wyników pomiarów współczynnika filtracji w warunkach obiektu „Olszanka”, przeprowadzonych za pomocą cylindra z piezometrem (metoda polowa) oraz z zastosowaniem zmodyfikowanego aparatu Wita (metoda laboratoryjna), a także ocena przydatności tych metod w odniesieniu do gleb słabo przepuszczalnych.

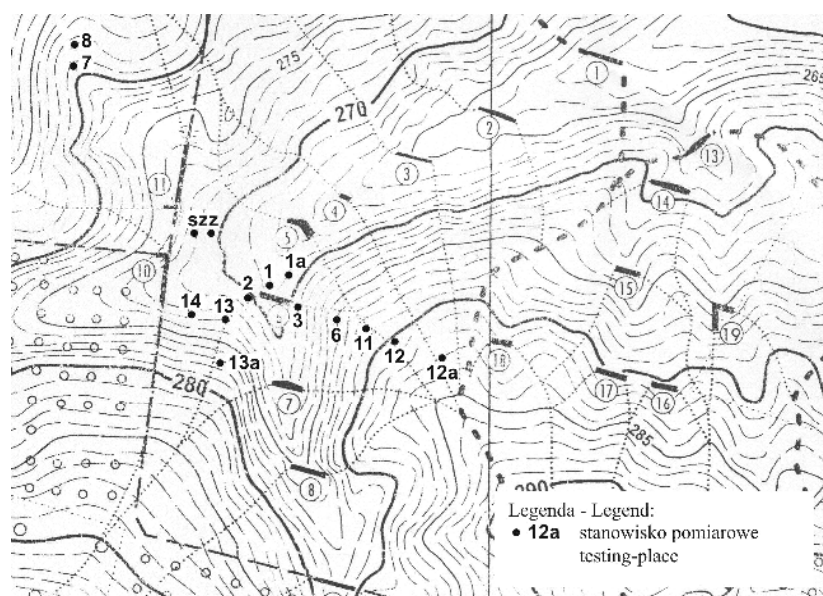
OBIEKT BADAŃ I METODY

Badania przeprowadzone zostały na glebach gospodarstwa firmy „EURO-EAST” w Olszance – miejscowości położonej 25 km od Krasnegostawu w województwie lubelskim.

Gleby obiektu „Olszanka” powstały z lessów i utworów lessowatych. Przeważają gleby brunatne, lecz o zróżnicowanej przez erozję budowie morfologicznej. Na wierzchołkach występują gleby w niewielkim stopniu erodowane, o profilu

glebowym w pełni wykształconym. Na zboczach występują gleby w różnym stopniu zerodowane, o niewykształconym profilu i gorszych właściwościach fizycznych i chemicznych [7].

Większość stanowisk do badania współczynnika filtracji umiejscowiono na zboczu o spadku w kierunku zachodnim, zabezpieczonym przed erozją tarasami. Lokalizację wszystkich stanowisk do badań i poboru prób przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Lokalizacja stanowisk do badań współczynnika filtracji [8]

Fig. 1. Location of test sites [8]

Oznaczanie współczynnika k_s stanowiło element badań przeprowadzanych w ramach programu badawczego 1564/T09/2001/21. Rozmieszczenie stanowisk i głębokość poboru prób w poszczególnych latach wynikają z konieczności parametryzacji obiektu na potrzeby całości realizowanego zadania.

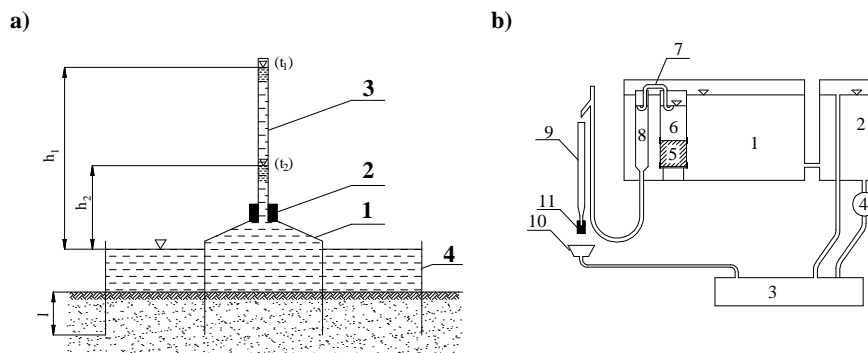
Pomiaru współczynnika filtracji dokonano dwiema metodami – za pomocą cylindra z piezometrem bezpośrednio w terenie oraz zmodyfikowanym aparatem Wita w laboratorium.

Podstawową częścią przyrządu do pomiarów polowych (rys. 2a) jest metalowy cylinder pomiarowy 1, zamknięty od góry stożkowym daszkiem z piezometrem 3. Umieszcza się go centralnie w otwartym metalowym cylindrze ochronnym 4 o 4-krotnie większej średnicy. Aby przystąpić do badań należy wcisnąć w grunt oba cylindry i zalać je wodą, przy czym w cylindrze ochronnym utrzy-

muje się stały jej poziom, a pomiarowy wypełnia się całkowicie. Pomiar polega na określeniu czasu opadania słupa wody w rurce piezometru 3 od określonego poziomu h_1 do poziomu h_2 po ustaleniu się szybkości opadania tego poziomu. Na tej podstawie określa się współczynnik k_{sC} za pomocą wzoru [15]:

$$k_{sC} = \frac{l}{t_2 - t_1} \cdot \frac{f}{F} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

gdzie: k_{sC} – współczynnik filtracji ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$), l – głębokość wbicia cylindra w glebę (cm), f – powierzchnia przekroju rurki piezometru (cm^2), F – powierzchnia przekroju cylindra pomiarowego (cm^2), h_1, h_2 – odpowiednio początkowa i końcowa wysokość słupa wody w piezometrze (cm), t_1, t_2 – czas rozpoczęcia i zakończenia pomiaru odpowiadający wysokościami h_1 i h_2 (s).



Rys. 2. Schematy urządzeń do pomiaru współczynnika filtracji: a) cylinder z piezometrem [16]: 1 – cylinder pomiarowy, 2 – korek gumowy, 3 – rurka piezometryczna z podziałką, 4 – cylinder ochronny, b) zmodyfikowany aparat Wita [17]: 1 – zbiornik główny, 2 – naczynie przelewowe, 3 – zamknięty zbiornik z wodą, 4 – pompa elektryczna, 5 – próbka gleby w stalowym cylindrze, 6 – cylinder pomiarowy, 7 – lewar przelewowy, 8 – syfon odpływowy, 9 – biureta, 10 – rynienka odpływowa, 11 – gumowy korek

Fig. 2. Schematic of the devices for measurement of saturated hydraulic conductivity coefficient: a) cylinder with piezometer [16]: 1 – measurement cylinder, 2 – rubber heel, 3 – piezometer pipe, 4 – protective cylinder, b) modified Wit apparatus [17]: 1 – main container, 2 – overflow vessel, 3 – closed water container, 4 – electric pump, 5 – soil sample in steel cylinder, 6 – measurement cylinder, 7 – overflow siphon, 8 – outflow siphon, 9 – burette, 10 – outflow trough, 11 – rubber heel

Szczegóły dotyczące budowy aparatu i przeprowadzanych w trakcie badań czynności opisano w pracy [16].

Aby określić współczynnik filtracji w przypadku braku stabilizacji tempa opadania zwierciadła wody w piezometrze, tworzony był wykres wartości współczynnika przewodnictwa hydraulicznego w funkcji czasu nasycania profilu glebowego wodą. Jako k_s przyjmowana była lewostronna granica tej funkcji.

Drugim zastosowanym do określania współczynnika filtracji przyrządem był zmodyfikowany aparat Wita (rys. 2b). Zastosowana metoda pomiaru ze stałym spadkiem ciśnienia hydraulicznego polega na pomiarze przepływu wody Q przez nasyconą próbkę gleby 5 oraz określeniu różnicy wysokości ciśnienia ΔH między utrzymywanym przez pompę 4 stałym poziomem wody w zbiorniku 1 a zwierciadłem w umieszczonych w nim cylindrach pomiarowych 6. Na tej podstawie, przy znanym przekroju cylindra F i grubości próbki Δl , oblicza się wartość współczynnika filtracji korzystając z wzoru (2) [17]:

$$k_{sW} = \frac{Q\Delta l}{F\Delta H} \quad (2)$$

gdzie: Q – ilość wody przesączającej się przez próbkę w jednostce czasu ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), Δl – długość próbki mierzona w kierunku przepływu wody (cm), F – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki, prostopadła do kierunku przepływu wody (cm^2), ΔH – strata wysokości hydraulicznej na długości Δl (cm), k_{sW} – współczynnik filtracji ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$).

Sposób przygotowania próbek gleby, budowa aparatu oraz metodyka badania metodą Wita szczegółowo zostały opisane w pracy [17].

Po przeprowadzeniu doświadczeń i obliczeń określono błąd δ pomiaru współczynnika filtracji metodą laboratoryjną względem badań polowych za pomocą zależności:

$$\delta = \frac{|k_{sC} - k_{sW}|}{k_{sC}} \cdot 100\% \quad (3)$$

(oznaczenia jak w poprzednich wzorach).

WYNIKI I DYSKUSJA

Zestawienie wyników pomiarów współczynnika filtracji, przeprowadzonych w latach 2002-2003 przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Porównując wartości z ostatniej kolumny w tabeli 1 i 2 zauważyć można, że w 2002 roku wystąpiła wyraźnie większa rozbieżność pomiędzy wynikami pomiarów przeprowadzonych za pomocą cylindra z piezometrem a rezultatami badań aparatem Wita. Wartości współczynnika filtracji uzyskane obiema wspomnianymi metodami w 2002 roku można uznać za porównywalne tylko dla połowy rozpatrywanych przypadków, dla których błąd względny wg wzoru (3) wynosi 0,84-16,72%. We wszystkich pozostałych przypadkach wyniki uzyskane z badań laboratoryjnych są 1,274-2,476 razy większe od rezultatów pomiarów przeprowadzonych w terenie.

Tabela 1. Wartości współczynnika filtracji uzyskane metodą cylindra z piezometrem (k_{sC}) oraz za pomocą aparatu Wita (k_{sW}) w 2002 roku

Table 1. Saturated hydraulic conductivity coefficient values obtained by the cylinder with piezometer (k_{sC}) method and by the Wit apparatus (k_{sW}) in the year 2002

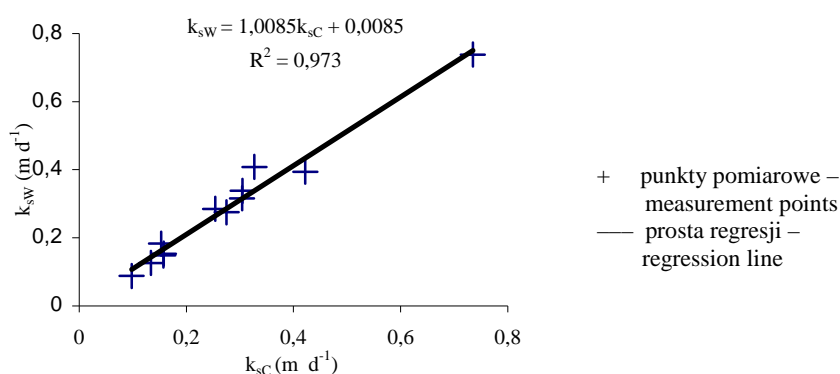
Stanowisko Site	Głębokość Depth	k_{sC}	k_{sW}	$\frac{k_{sW}}{k_{sC}}$	δ
	cm	m·d ⁻¹	m·d ⁻¹	–	%
1	135-140	0,260	0,396	1,522	52,22
2	25-30	0,142	0,154	1,083	8,32
7	0-5	0,266	0,659	2,476	147,60
7	20-25	0,094	0,173	1,844	84,36
7	50-55	0,756	0,963	1,274	27,43
7	100-105	0,133	0,122	0,914	8,60
8	0-5	0,321	0,312	0,972	2,82
8	100-105	0,956	2,115	2,213	121,29
9	60-65	0,592	0,907	1,533	53,28
10	30-35	0,471	0,431	0,916	8,44
10	70-75	0,510	0,596	1,167	16,72
11	0-5	0,302	0,333	1,103	10,27
12	0-5	0,212	0,448	2,118	111,79
13	0-5	0,904	0,896	0,992	0,84

Tabela 2. Wartości współczynnika filtracji uzyskane metodą cylindra z piezometrem (k_{sC}) oraz za pomocą aparatu Wita (k_{sW}) w 2003 roku

Table 2. Saturated hydraulic conductivity coefficient values obtained by the cylinder with piezometer method (k_{sC}) and by the Wit apparatus (k_{sW}) in the year 2003

Stanowisko Place	Głębokość Depth	k_{sC}	k_{sW}	$\frac{k_{sW}}{k_{sC}}$	δ
	cm	m·d ⁻¹	m·d ⁻¹	–	%
6	0-5	0,158	0,153	0,972	2,81
8	50-55	0,305	0,338	1,080	10,79
8	80-85	0,304	0,316	1,038	3,82
8	110-115	0,153	0,183	1,196	19,55
11	0-5	0,134	0,126	0,944	5,59
12a	0-5	0,098	0,088	0,900	9,95
13	0-5	0,327	0,408	1,248	24,79
13	30-35	0,422	0,394	0,933	6,74
13	50-55	0,157	0,148	0,939	6,15
13	80-85	0,254	0,285	1,122	12,20
13a	30-35	0,735	0,738	1,005	0,47
1a	0-5	0,275	0,275	1,000	0,01

W 2003 roku, dzięki zwiększeniu liczby prób, pobieranych do badań aparatem Wita oraz zwiększeniu liczby powtórzeń pomiarów w laboratorium, uzyskano bardziej zbieżne rezultaty dla obu rozpatrywanych metod (rys. 3). Błąd względny wg wzoru (3) nie przekracza 10% aż w ośmiu z dwunastu badanych przypadków, a w pozostałych czterech wynosi 10,79-24,79% i podobnie jak w poprzednim roku związany jest większymi wartościami wyników pomiarów metodą Wita (tab. 2). Przyczyną zawyżenia wyników badań laboratoryjnych jest najprawdopodobniej występowanie przyściennego przecieku w niektórych cylindrach pomiarowych.



Rys. 3. Zależność wyników pomiarów współczynnika filtracji uzyskanych za pomocą aparatu Wita (k_{sw}) od wartości uzyskanych metodą cylindra z piezometrem (k_{sc})

Fig. 3. Dependence of saturated hydraulic conductivity coefficient results obtained using the Wit apparatus on the values obtained using the cylinder with piezometer method

Przeprowadzone obliczenia statystyczne oraz doświadczenia wykazały, że aby uzyskać wiarygodne wyniki pomiaru współczynnika filtracji za pomocą zmodyfikowanego aparatu Wita, należy przygotować do badań jak największą liczbę prób z danego stanowiska (co najmniej 10), zwłaszcza w strefie czynnej gleby, w której występuje fauna glebowa i większość masy korzeniowej uprawianych roślin. Wynika to z faktu, że pobierane próbki są stosunkowo małe (100 cm^3), a wszelkie zmiany w glebie mają duży wpływ na wartość współczynnika filtracji. Pobór dużej liczby prób umożliwia wyeliminowanie tych, które dają wyniki zdecydowanie odbiegające od większości dla danego stanowiska. Różnice mogą być spowodowane występowaniem w glebie lokalnych zmian, np. w postaci kanalików po korzeniach, naruszeniem struktury gleby podczas poboru próbek lub wystąpieniem przyściennego przecieku w cylindrach podczas badań.

Poza poborem dużej liczby prób w zmodyfikowanej metodzie Wita należy również kilkunastokrotnie powtórzyć pomiary, co nie stanowi problemu ze względu na prostotę wykonywanych czynności, a umożliwia zaobserwowanie

skutków pęcznienia gleby. Stwierdzono, że ze względu na występowanie tego zjawiska, powodującego obniżanie wartości badanego parametru, pomiary nie powinny trwać dłużej niż 2-3 dni.

W przypadku pomiarów współczynnika filtracji gleb słabo przepuszczalnych za pomocą cylindra z piezometrem największym problemem był długi okres stabilizacji prędkości opadania zwierciadła wody. Niekiedy powodował on wydłużenie czasu badań do dziesięciu godzin lub konieczność przybliżonego określenia współczynnika filtracji na podstawie zmian wartości współczynnika przewodnictwa hydraulicznego w trakcie nasycania profilu glebowego wodą. Błędną zaletą omawianej metody jest jednak możliwość przeprowadzenia badań w warunkach w pełni naturalnych, bez naruszania struktury gleby. Ponadto, w przeciwieństwie do wielu innych metod polowych, pomiar jest metodycznie prosty i nie wymaga skomplikowanego, kosztownego sprzętu.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zastosowanie cylindra z piezometrem do pomiaru współczynnika filtracji gleb słabo przepuszczalnych jest ograniczone przez długi czas stabilizacji prędkości opadania zwierciadła wody w urządzeniu.

2. Celem uzyskania wiarygodnych wyników, metoda Wita wymaga poboru z danego stanowiska kilkunastu prób gleby do badań oraz wielokrotnego powtórzenia pomiarów.

3. Obie omawiane metody wyznaczania współczynnika filtracji okazały się wysoce porównywalne i w przypadku braku możliwości prowadzenia badań w terenie, można je zastąpić pomiarami metodą Wita w laboratorium.

PIŚMIENNICTWO

1. **Bagarello V., Iovino M., Elrick D.:** A simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 66-73, 2004.
2. **Bouma J.:** Use of soil survey data to select measurements techniques for hydraulic conductivity. *Agric. Water Manage.*, 6, 177-190, 1983.
3. **Darcy H.:** *Les fontaines publiques de la ville de Dijon.* Paris 1856.
4. **Lipiec J.:** Możliwości oceny przewodnictwa wodnego gleb na podstawie ich niektórych właściwości. Rozprawa habilitacyjna. *Problemy Agrofizyki* 40, Wrocław 1983.
5. **Maheshwari B.L.:** Development of an automated double ring infiltrometer. *Aust. J. Soil Res.*, 34, 709-714, 1996.
6. **Marciniak M., Przybyłek J., Herzig J., Szczepańska J.:** Badania współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych. *Sorus.* Poznań – Kraków 1999.
7. **Paluch B., Szary A., Wojdała L.:** Orzeczenie techniczne Nr 1/Z/VIII/80 pt. Ekspertyza zabezpieczeń przeciwozryjnych obiektu Olszanka łącznie z technologią zabezpieczenia przeciwozryjnego i dokumentacją kosztową. Lublin 1980.

8. **Patro M.:** Tachimetryczna mapa inwentaryzacyjna. Niepublikowany materiał źródłowy. 2002.
9. **Poulsen T.G., Moldrup P., Wendroth O., Nielsen D.R.:** Estimating saturated hydraulic conductivity and air permeability from soil physical properties using state – space analysis. *Soil Sci.*, 168, 311-320, 2003.
10. **Poulsen T.G., Moldrup P., Yamaguchi T., Jacobsen O.H.:** Predicting saturated and unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils from soil water characteristics. *Soil Sci.*, 164, 877-887, 1999.
11. **Rawls W.J., Gimenez D., Grossman R.:** Use of soil texture, bulk density, and slope of the water retention curve to predict saturated hydraulic conductivity. *Transaction of ASAE*, 41, 983-988, 1998.
12. **Reynolds W.D., Zebchuk W.D.:** Use of contact material in tension infiltrometer measurements. *Soil Tech.*, 9, 141-159, 1996.
13. **Timlin D.J., Ahuja L.R., Pachepsky Ya.A., Williams R.D., Gimenez D., Rawls W.:** Use of Brooks – Corey parameters to improve estimates of saturated conductivity from effective porosity. *Soil Sci. Am. J.*, 63, 1086-1092, 1999.
14. **Yates S.R., van Genuchten M.Th., Warrick A.W., Leij F.J.:** Analysis of measured, predicted, and estimated hydraulic conductivity using RETC computer program. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 347-354, 1992.
15. **Zaradny H.:** Matematyczne metody opisu i rozwiązań przepływu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach. *Prace IBW PAN*, 23, 1990.
16. **Zawadzki S., Olszta W.:** Uproszczony sposób pomiaru współczynnika filtracji gleb za pomocą cylindra z piezometrem. *Wiadomości IMUZ*, t. XIV z. 2, 195-202, 1981.
17. **Zawadzki S., Olszta W.:** Zmodyfikowany aparat Wita do laboratoryjnego oznaczania przepuszczalności wodnej gleb. *Wiadomości IMUZ*, t. XIV z. 2, 187-194, 1981.

TESTING OF SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY COEFFICIENT USING FIELD AND LABORATORY METHODS

Małgorzata Iwanek

Institute of Environmental Protection Engineering, Technical University of Lublin
ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin
e-mail: KZWUS@fenix.pol.lublin.pl

Abstract. Saturated hydraulic coefficient k_s is an especially important parameter in mathematical modelling and simulation of soil-water processes. The above parameter is difficult to measure, being variable both in space and time and so requiring numerous samples and selecting a proper testing method. Field methods are the most credible, but they are time-consuming and usually need special expensive equipment. Application of a cylinder with a piezometer directly in the field eliminates errors connected with the change of natural conditions. At the same time, the method is simple and cheap. But applying it in low permeable soils can be limited by long time of measurement. In these cases, it is possible to replace testing in the field by the Wit laboratory method, but on the condition that at least 10 samples will be taken from one place and the measurement will be repeated several times. This was confirmed by statistical calculations.

Keywords: saturated hydraulic conductivity coefficient, cylinder with piezometer, modified Wit apparatus, low permeable soils