

## METODY POLOWE OZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI UTWORÓW PRZYPOWIERZCHNIOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM POPRAWEK METODYCZNYCH NA TLE WSTĘPNYCH WYNIKÓW POMIARÓW STACJONARNYCH WE WROCŁAWIU

### FIELD METHODS OF EVALUATION OF SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF NEAR-SURFACE SOILS, INCLUDING CORRECTION FORMULAS, ON THE BACKGROUND OF PRELIMINARY RESULTS OF STATIONARY MEASUREMENTS IN WROCŁAW

MAREK BŁACHOWICZ<sup>1</sup>, MARTA TRĄŁKA<sup>2</sup>

**Abstrakt.** Głównym celem przedstawionej pracy jest porównanie metod polowych oznaczania współczynnika filtracji w świetle potencjalnych błędów związanych z przeszacowaniem wartości współczynnika filtracji utworów przypowierzchniowych w strefie saturacji. Są one głównie wynikiem błędnych założeń o przeprowadzeniu pomiarów w warunkach pełnego nasycenia (strefie saturacji). Przedstawiono wyniki oznaczeń zrealizowanych w serii stacjonarnych oznaczeń współczynnika filtracji metodą Porcheta oraz infiltrometru dwupierścieniowego w dłuższym horyzoncie czasowym w wybranych miejscach na obszarze Wrocławia, uwzględniających zmienność sumy opadów, ale i wykształcenie litologiczne gruntów. Wykorzystując powszechnie stosowane metody oraz narzędzia analizy i interpretacji danych, przetestowano schematy postępowania pozwalające ograniczyć błędy estymacji współczynnika filtracji.

**Słowa kluczowe:** współczynnik filtracji, metoda Porcheta, infiltrometr dwupierścieniowy, model infiltracji, infiltracja inicjalna.

**Abstract.** The main purpose of the article is to compare the field method of the estimation of hydraulic conductivity of near-surface soils on the background of potential errors related to the determination of field-saturated hydraulic conductivity (Kfs). The overestimation of Kfs value is mainly a result of wrong assumptions about measurements under full-saturation conditions (saturation zone). The article presents results of experiment carried out in a series of stationary measurements of hydraulic conductivity using selected field methods in a longer time period in selected places in the city of Wrocław, taking into account variability of precipitation and lithology of soils. Using commonly applied methods and tools of data analysis and interpretation, the schemes of procedure were tested to reduce errors of field-saturated hydraulic conductivity estimation.

**Key words:** field hydraulic conductivity, Porchet method, inversed auger-hole method, double-ring infiltrometer, infiltration model, initial infiltration.

### WSTĘP

Zagadnienie określenia wielkości współczynnika filtracji utworów przypowierzchniowych szczególnie w obszarach miejskich jest istotne w świetle m.in. gospodarowania wodami opadowymi czy oceny migracji zanieczyszczeń z powierzchni do użytkowych poziomów wodonośnych. Spośród szeregu dostępnych metod polowych i laboratoryj-

nych, metody polowe uznaje się za najbardziej miarodajne (np. Wąsik, 2003; Liszkowska, 2017). Służą one określeniu tzw. polowego współczynnika filtracji strefy saturacji  $k_{p\_sat}$  będącego przybliżeniem współczynnika  $k_{sat}$ . Spowodowane jest to niemożnością osiągnięcia w warunkach terenowych stanu pełnego nasycenia badanych utworów, głównie przez pewną ilość niewypartego z porów gruntu powietrza przez propagujący front wody, zatem  $k_{p\_sat} < k_{sat}$ . Ponadto rozwa-

<sup>1</sup> Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: marek.blachowicz@uwr.edu.pl.

<sup>2</sup> Studentka kierunku Inżynieria Geologiczna, Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: martatralka@gmail.com.

żając warunki filtracji w strefie nienasyconej, można zauważyć, że współczynnik filtracji rośnie (nieliniowo) wraz ze wzrostem wilgotności gruntu (Phillip, 1969). Mimo, że początkowa wilgotność gruntu nie ma wpływu na wielkość wyznaczonego współczynnika  $k_{p\_sat}$  (zakładając metodycznie poprawnie przeprowadzone oznaczenie tego parametru), ma ona bezpośredni wpływ na początkowe natężenie infiltracji. W gruncie suchym obserwuje się początkowo większe gradienty ciśnień i ssania (Szymkiewicz i in., 2014), a zintensyfikowanie infiltracji może być większe, również ze względu na istnienie uprzywilejowanych dróg przepływu powstałych np. wskutek zmniejszającej się objętości gruntu podczas jego wysychania. Powyższy efekt jest wyraźniejszy z uwagi na pionową anizotropię przepuszczalności osadów. Jak zauważają Bury (1994) i Liszkowska (2017) w strefie przypowierzchniowej maleje ona wraz ze wzrostem głębokości, chociażby wskutek zamykania się porów i szczelin pod wpływem ciężaru warstw wyżej ległych czy obecności korzeni roślin ułatwiających przepływ wody w głąb profilu. Zatem początkowe natężenie infiltracji będzie tym większe, im mniejsza będzie początkowa wilgotność gruntu – na co ma wpływ wielkość i intensywność obserwowanych opadów atmosferycznych przed wykonywanym oznaczeniem. Uzyskanie stanu quasi-pełnego nasycenia badanych gruntów, wymaganego przez założenia teoretyczne opisanych dalej metod, pociąga za sobą często konieczność wielogodzinnych obserwacji w pojedynczym punkcie oraz wymóg dostarczenia znacznych ilości wody (np. Sepaskhah, Rezaee, 1998). Niespełnienie powyższych warunków może przełożyć się na błędną interpretację wyników pomiarów, prowadząc do nieprawidłowego oszacowania wielkości współczynnika filtracji  $k_{p\_sat}$ . Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań współczynnika filtracji przeprowadzono we względnie stałym rygorze metodycznym, próbując uwypuklić pośrednio wpływ wielkości opadów poprzedzających pomiar. W pracy zaprezentowano również różne metody pomiaru połowego współczynnika filtracji, analizy danych oraz poprawki empiryczne na pomiar  $k_{p\_sat}$  w warunkach niepełnego nasycenia.

## METODY BADAŃ

W niniejszej pracy wykorzystano powszechnie stosowane metody polowe oznaczania współczynnika filtracji  $k_{p\_sat}$ : metodę infiltrometru dwupierścieniowego oraz metodę Porcheta. Testując tym samym różne procedury obliczeniowe i poprawki na pomiar w strefie nienasyconej. Badania przeprowadzono w 5 wybranych punktach we Wrocławiu (fig. 1) wykonując łącznie 11 oznaczeń współczynnika filtracji ( $k$ ). Realizując badania w okresie zimowym, szczególną wagę przywiązano do tego, aby wykonane pomiary nie odbywały się bezpośrednio przed, czy w trakcie okresu ujemnych temperatur powietrza, a wobec tego w gruntach, które mogłyby być przemarznięte. Średnia roczna temperatura w roku 2018 dla Wrocławia wynosi 11,31°C przy opadzie 404 mm [dane IMGW]. Przy czym warunki atmosferyczne podczas okresu pomiarowego – od

października 2018 r. do stycznia 2019 r. były bardzo zmienne. Listopadowe pomiary wykonywane były w okresie kiedy opad był bardzo niski lub nie występował wcale, natomiast kolejne dwie sesje pomiarowe (grudzień, styczeń) poprzedzały dni z wysoką wartością opadów, występujących również podczas dnia pomiarowego. Charakter i rozkład opadów dla całości okresu pomiarowego względem poszczególnych stacji opadowych przedstawiono na figurze 1. Testowane lokalizacje charakteryzowały się odmiennym wykształceniem profilu litologicznego (rozpoznanego makroskopowo w miejscach pomiaru do głębokości ~40 cm) oraz obecnością 10–15 centymetrowej warstwy gleby. W punktach PK3 i P3 stwierdzono występowanie odpowiednio piasków pylastych i glin, podczas gdy w Parku Szczytnickim (P2) podglebie tworzą ropy i gliny piaszczyste, a na stanowisku P7 tylko ropy. Stanowisko pomiarowe ING charakteryzuje natomiast obecność w miarę jednorodnych nasypów antropogenicznych z elementami gruzu ceglano i ceramiki. Tam też zwierciadło wód podziemnych położone jest najgłębiej – ok. 6 m p.p.t. Najpłycej pierwsze zwierciadło wód podziemnych kształtuje się na terenie Parku Szczytnickiego w punkcie P2 – średnio 1,76 m p.p.t. przy amplitudzie wahań 0,11 m w okresie badań (na podstawie pomiarów własnych).

## METODA PORCHETA

Oryginalna metoda Porcheta (również: ang. *Reverse Auger Hole Method*) (Porchet, Laferre, 1935) opisana także przez van Hoorna (1979) – polega na konsekwentnym zalewaniu wywierconego otworu o średnicy do kilkunastu cm i głębokości do kilkudziesięciu cm i pomiarze prędkości opadającego słupa wody. Przepływ wody z otworu do gruntu odbywa się wówczas przez jego dno oraz ścianki. Metoda zakłada wykonanie pomiaru po ustaleniu się strefy quasi-nasyconej wokół otworu (kolejne pomiary powinny różnić się o mniej niż 5% – Noshadi i in., 2012, bądź 10–15% – van Hoorn, 1979). Pozwala to zminimalizować potencjalny błąd polegający na nieuwzględnieniu zmiennej wysokości opadającego słupa wody oraz charakterystycznych dla strefy aeracji ciśnień wywołanych istnieniem przestrzeni tylko częściowo wypełnionych wodą (Messing, Jarvis, 1990). Wzór przedstawia się następująco:

$$k = 1,15 \cdot \frac{r}{2} \frac{\log(h_0 + \frac{r}{4}) - \log(h_t + \frac{r}{4})}{t} = 1,15 \cdot \frac{r}{2} \tan \alpha \quad [1]$$

gdzie:

$k$  – współczynnik filtracji gruntu [L T<sup>-1</sup>],

$r$  – średnica otworu [L],

$t$  – czas [T],

$h_0$  – inicjalna wysokość wody w otworze (w czasie  $t_0$ ) [L],

$h_t$  – wysokość słupa wody w czasie  $t$  [T].

Powyższa metoda zakłada istnienie liniowego charakteru tempa zmiany prędkości infiltracji w czasie, wyrażonego jako  $\log(h_t + r/4)$  do czasu ( $t$ ). Umieszczając zatem na wykresie półlogarytmicznym poszczególne wartości  $(h_t + r/4)$  na osi y [log], w odniesieniu do czasu pomiaru [s] otrzymamy linię prostą ilustrowaną przez  $\tan \alpha$ . Odchylenie wyników

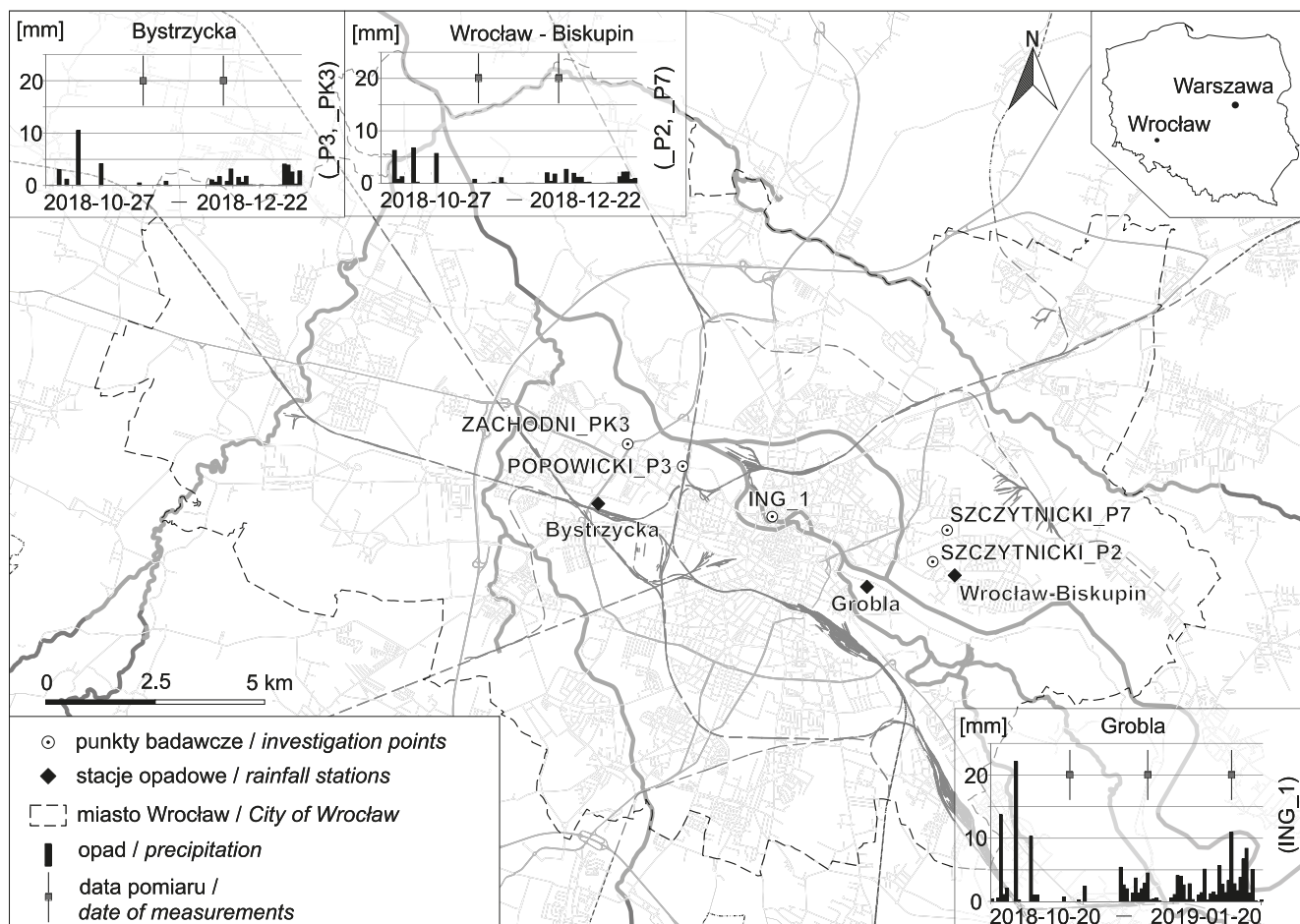


Fig. 1. Lokalizacja punktów badawczych na tle Wrocławia oraz danych opadowych

Location of the investigation points against the background of the City of Wrocław and precipitation data

pierwszych pomiarów można rozumieć jako pomiar w strefie nienasyconej.

W kontekście prezentowanej metody w literaturze krajowej można spotkać się ze wzorem i metodyką zaproponowaną przez Pleczyńskiego (1981), mylnie nazwaną tam „metodą Porscheta”. W niniejszym artykule, będzie nazywana dalej metodą Pleczyńskiego:

$$k = \frac{\varphi(h_1) - \varphi(h_2)}{\Delta t}; \Delta t = t_1 - t_2 \quad [2]$$

$$\varphi(h_1) = \frac{r}{2} \lg\left(h_1 + \frac{r}{2}\right); \varphi(h_2) = \frac{r}{2} \lg\left(h_2 + \frac{r}{2}\right) \quad [3]$$

gdzie:

$k$  – współczynnik filtracji gruntu [ $L T^{-1}$ ],

$r$  – średnica otworu [L],

$t$  – czas [T],

$h_1, h_2$  – wysokości zwierciadła wody w otworze w czasie  $t_1$  i  $t_2$  [L].

Współczynnik filtracji jest tutaj uśrednioną wartością otrzymaną na podstawie wszystkich pomiarów cząstkowych. Wywiercone otwory o średnicy 8 cm i głębokości ok. 40 cm zalewano do 3 razy wodą. W otworach utrzymywano

infiltrację uzupełniając wodę po każdorazowym pomiarze jej spadku do ok. 20 cm p.p.t.

#### METODA INFILTROMETRU DWUPIERŚCIENIOWEGO (MID)

W niniejszych badaniach wykorzystano urządzenie firmy Ejkelkamp o średnicy pierścieni 30 i 55 cm, wbijanych w badany grunt na głębokość ok. 10–15 cm (jeden wewnątrz drugiego), które następnie zalewa się wodą (np. Verbist i in., 2010). Pomiarów dokonano przy zastosowaniu techniki utrzymywania stałego zwierciadła wody. Mierzono wówczas ubytek 1 cm słupa wody ( $\sim 0,7$  l) w wewnętrznym pierścieniu podczas ok. 25 sesji pomiarowych w ciągu jednego oznaczenia. Pierścienie zalewano do maksymalnej wysokości 6 cm (licząc od poziomu gruntu). Niezbędne obliczenia oparto na semiempirycznym modelu infiltracji Philipa (Philip, 1957)

$$I(t) = St^{1/2} + At \quad [5]$$

$$v(t) = 1/2 St^{1/2} + A \quad [6]$$

$$k = \frac{A}{m} \quad [7]$$

gdzie:

$I(t)$  – skumulowana wielkość infiltracji [L] w czasie  $t$  [T];  
 $S$  – sorpcyjność [ $LT^{-1/2}$ ],  
 $t$  – czas infiltracji,  
 $A$  – parametr o wymiarze współczynnika filtracji [ $LT^{-1}$ ],  
 $v(t)$  – prędkość infiltracji [ $LT^{-1}$ ],  
 $k$  – współczynnik filtracji ośrodka w stanie nasycenia [ $LT^{-1}$ ],  
 $m$  – współczynnik korygujący

oraz na empirycznych równaniach modelu Hortona (Horton, 1940);

$$i(t) = i_c + (i_0 - i_c)e^{-kt} \quad [8]$$

$$I(t) = i_c t + \frac{(i_0 - i_c)}{k} [1 - e^{-kt}] \quad [9]$$

gdzie:

$i(t)$  – prędkość infiltracji [L] w czasie  $t$  [T];  
 $I(t)$  – skumulowana wielkość infiltracji [L] w czasie  $t$  [T],  
 $i_0$  – inicjalna prędkość infiltracji w czasie ( $t_0$ ) [ $LT^{-1}$ ],  
 $i_c$  – prędkość infiltracji w czasie ( $t$ ) [ $LT^{-1}$ ] będąca przybliżeniem współczynnika  $k$  w strefie saturacji (Duan i in., 2011),  
 $k$  – stała empiryczna.

W modelu infiltracji Phillipa relacja jaka zachodzi między  $k_{p\_sat}$  i parametrem  $A$  jest niejasna (Kutílek, Nielsen, 1994) dlatego stosuje się następujące poprawki:  $m = 2/3$  (Youngs, 1968) i  $0,3 > m > 0,4$  (Phillip, 1990).

By móc na podstawie prezentowanych modeli wyznaczyć wiwe elkość szukanego współczynnika  $k_{p\_sat}$  powszechnie stosuje się metody oparte na dopasowaniu parametrycznym metodą sumy najmniejszych kwadratów (SSE – ang. *sum of square error*). Można wykorzystać do tego celu algorytm do rozwiązywania nieliniowych problemów zawartych w pakiecie Solver – dodatku do oprogramowania pakietu Microsoft Office (np. Shiraki i in., 2019). Metody optymalizacji parametrycznej szerzej przedstawiono m.in. w pracy Duana i innych (2011).

#### POPRAWKI METODYCZNE NA POMIAR W STREFIE NIEPEŁNEGO NASYCENIA

Dla metody Porcheta – Sepashkai i Rezaee (1998) opracowali poprawkę empiryczną stosowaną dla gruntów słaboprzepuszczalnych od piasków ilastych i gliniastych do piaszczystych ilów i glin:

$$k_{p\_sat} = 0,46 + 0,39 k \quad (k \text{ w m/d}) \quad [10]$$

Shiraki wraz z zespołem (2019) testowali różne modele infiltracji dla skrajnie suchego okresu w kontekście opracowania metody estymacji współczynnika filtracji na podstawie relatywnie krótkich sesji pomiarowych infiltratorem dwupięściowym. Poddając analizie statystycznej zachowanie poszczególnych modeli względem obserwowanych wielkości infiltracji skumulowanej, doszli do wniosku, że model Hortona pozwala na najlepsze dopasowanie parametryczne, co potwierdzają inne prace (np. Duan i in., 2011). Bazując na

wynikach pomiarów doświadczalnych, na jego podstawie wyznaczyli odpowiednie poprawki pozwalające oszacować wielkość  $k_{p\_sat}$  na podstawie krótszych sesji pomiarowych.

$$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot ic_{60} \text{ – dla modelu Hortona (t-60 min)} \quad [11]$$

$$k_{p\_sat} = 0,5 \cdot A \text{ – dla modelu Philipa} \quad [12]$$

Ci sami autorzy (Shiraki i in., 2019) opracowali również procedurę wyznaczenia okresu infiltracji inicjalnej, po odcięciu której procedura parametryzacji modelu Philipa pozwala uzyskać lepsze wyniki. Przesłanką do przeprowadzenia tej poprawki jest fakt, że wysuszenie gruntów, jakie następuje w dłuższych okresach bezopadowych, powoduje wysokie wartości zmian tempa infiltracji na początku pomiaru i tym samym trudności parametryzacji przyjętego modelu. Wyznaczenie czasu infiltracji inicjalnej odbywa się na podstawie wzoru (13), wykorzystując pierwiastek błędu średniokwadratowego (RMSE – ang. *Root Mean Squared Error*) w dalszej analizie;

$$\frac{I_a/t_a^{1/2} - I_1/t_1^{1/2}}{I_n/t_n^{1/2} - I_1/t_1^{1/2}} = \frac{t_a^{1/2} - t_1^{1/2}}{t_n^{1/2} - t_1^{1/2}} \quad [13]$$

gdzie:

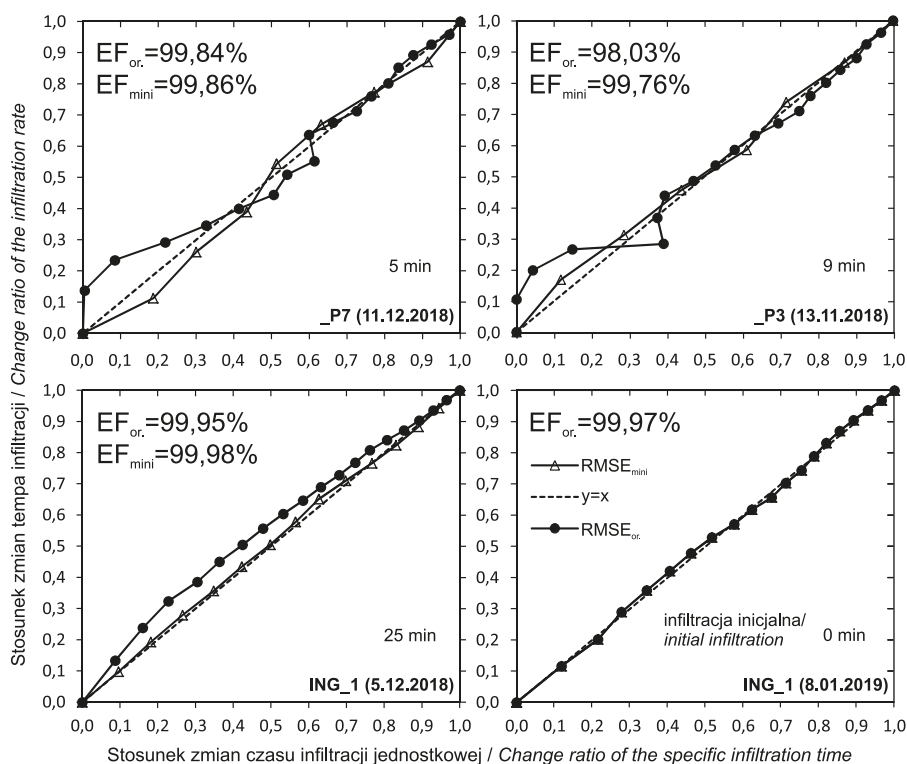
$I_a$  – skumulowana wielkość infiltracji [L] w czasie  $t_a$  [T] w wybranym odczycie pomiarowym ( $1 \leq a \leq n$ );  
 $t_1$  – czas pierwszego odczytu pomiarowego,  
 $t_n$  – czas ostatniego odczytu w sesji pomiarowej.

Stosunek lewej strony do prawej powyższego równania zmienia się w zakresie od 0 do 1 w ciągu całego cyklu pomiarowego. W sytuacji modelowej pierwiastek błędu średniokwadratowego jest praktycznie równy 0 ( $y = x$ ) – tzn. tempo zmian prędkości infiltracji (lewa strona równania) jest tożsame z odpowiadającym jej tempem zmian czasu (prawa strona równania). Pod tym względem wyniki pomiarów empirycznych (zmierzonych) zwykle się różnią ( $RMSE > 0$ ). Celem procedury jest wyznaczenie takiego czasu infiltracji inicjalnej, po odcięciu której wartość RMSE dla pozostałej populacji pomiarów empirycznych będzie możliwie najmniejsza. By móc to zrobić wystarczy porównać wartość  $RMSE_{min}$  (po odcięciu czasu infiltracji inicjalnej) do wartości  $RMSE_{org}$  – charakteryzującej całe spektrum pomiarów danego oznaczenia (por. fig. 2). Jakość dopasowania poszczególnych modeli wyznaczono za pomocą wskaźnika efektywności (EF – ang. *model efficiency*) wyrażonego w procentach (np. Duan i in., 2011). Wartość  $EF = 100\%$  oznacza idealne dopasowanie modelowej wartości infiltracji skumulowanej do tej obserwowanej podczas oznaczenia.

#### WYNIKI I DYSKUSJA

Wyniki pomiarów i zastosowanych poprawek przedstawiono w tabeli 1 oraz w formie wykresów na figurze 2. Czas pomiaru infiltratorem dwupięściowym oraz metodą Porcheta (pomiaru objema metodami w danej sesji odbywa-





**Fig. 2. Procedura wyznaczenia czasu infiltracji inicjalnej na podstawie równania [11] na przykładzie czterech pomiarów oraz wskaźnik efektywności modelu (EF) (przy użyciu modelu Philipa)**

Rejection of initial infiltration time procedure analyzed by equation [11] for 4 examples with model efficiency (EF) (using the Philip model)

ły się jednocześnie) ograniczony był ilością dostępnej wody, oznaczało to dostarczenie jednorazowo przeszło kilkudziesięciu litrów wody. Prezentowane wyniki charakteryzują się znaczną zmiennością uzyskanych wartości współczynnika  $k_{p\_sat}$ . Ogólnie rzecz ujmując wyniki otrzymane metodą zalewania otworu cechują się znacznie niższymi wartościami zmierzonego współczynnika filtracji w porównaniu do wyników oznaczeń metodą infiltrometru dwupięścieniowego. Obserwowaną prawidłowość potwierdzają badania innych autorów (np. Verbist i in., 2013). Może mieć to związek z metodą przeprowadzenia oznaczenia oraz pomiarem w strefie nienasyconej. Warto zwrócić uwagę na anizotropię przepuszczalności osadów, która, ogólnie przyjmując, maleje wraz ze wzrostem głębokości. W metodzie zalewania otworu sumaryczny czas infiltracji wody przez pierwsze centymetry profilu jest ograniczony przez malejący gradient hydrauliczny oraz infiltrację z maksymalnej dostępnej powierzchni bocznej i z dna otworu. Zgodnie z przyjętą metodyką utrzymywano stałą infiltrację wody w zakresie (~0,2–0,4 m p.p.t) podczas całego pomiaru (od 2 do 3 zalewań), wobec czego można przypuszczać, że otrzymywany jest uśredniony współczynnik filtracji z głębszej (i lepiej nasyconej) części profilu.

Porównując poszczególne pomiary metodą Porcheta i jej alternatywnej wersji opisanej przez Pleczyńskiego wyniki otrzymane tą drugą metodą analizy są przeważnie (nieznacznie) niższe, pomimo że zakłada ona uśrednianie jed-

nostkowych wyników z całości profilu. Porównując wzory przeliczeniowe (1) i (2), należy zauważyć, że w metodzie Porcheta każdorazowo wyniki oznaczenia mnożymy przez 1,15, otrzymując tym samym wyższe wartości, jednocześnie odrzucając pierwsze pomiary rozumiane jako pochodzące ze strefy nienasyconej (zgodnie z opisaną wcześniej metodyką). Powyższe efekty sterujące wynikiem pomiarów w obydwu formułach obliczeniowych zdają się wzajemnie znosić, gdy tempo zmian infiltracji spada (tab. 1). W punkcie ING\_1 oraz PK3, gdzie omawianą metodą otrzymano najniższe wartości stosując poprawkę na  $k_{p\_sat}$  otrzymano wyższe wyniki, co jest jednak zgodne z naturą zastosowanego wzoru (10) i jego ograniczeniami.

Porównując otrzymane wartości współczynnika filtracji w poszczególnych seriach pomiarowych, można przypuszczać, że wpływ zmiennej wielkości opadów powinien być brany pod uwagę jako jedna z determinant uzyskanych wyników, co widać wyraźnie na przykładzie punktu ING\_1 (fig. 1). Jednak w obliczu ilości wykonanych oznaczeń i zakresu wykonanych badań, autorzy sądzą, że należy pochylić się bardziej nad tym zagadnieniem. Maksymalne różnice otrzymanych wartości przekraczają 80% (w punkcie PK3) niezależnie od metody. Wyniki otrzymane infiltrometrem dwupięścieniowym różnią się w zależności od przyjętej metodyki obliczeń modelu infiltracji i zastosowanych poprawek. Analiza danych wykazała, że model Hortona pozwala na porównywalnie wysokie dopasowanie paramet-

Tabela 1

**Porównanie wyników oznaczeń polowego współczynnika przepuszczalności strefy saturacji  $k_{p\_sat}$**   
Comparison of results of Field-Saturated Hydraulic Conductivity (Kfs) investigation

Data		Porcheta										Metoda																						
		Pleczyński					Originalny Porchet					Porchet					Czas pomiaru					Infiltratoru dw upiersieniowego (MID)												
		n		n-1		n		n		n-1		n		n		n-1		n		n		n		n		n		n		n				
		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]		$k_{p\_sat}$ [m/d]				
ING_1		14.11.2018, n = 3		0,82	0,74	0,95	0,85	0,83	0,79	00:46:41	6,08	2,03	21	4,03	4,05	1,45	1,46	01:26:11	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]	
ING_1		05.12.2018, n = 2		0,81	0,31	0,46	0,31	0,64 (1)	0,58 (1)	00:52:01	4,07	1,36	25	2,73	2,73	0,98	0,98	01:45:40	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]	
ING_1		08.01.2018, n = 2		0,33	0,32	0,38	0,31	0,61 (1)	0,58 (1)	00:52:09	2,78	0,93	0	2,18	-	0,78	-	02:14:49	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]	
ING_1		Δ max (%)		-59,76	-56,76	-60,00	-63,53	-	-	-54,28	-54,19	-	-45,91	-32,59	-46,21	-32,88	-	-	-	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]
Szczytnicki_P2		15.11.2018, n = 3		1,75	1,51	2,21	2,03	1,32	1,25	00:21:36	17,57	5,86	7	13,77	12,91	-	-	00:31:39	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]	
Szczytnicki_P2		11.12.2018, n = 3		4,54	3,48	5,44	4,06	2,58	2,04	00:08:46	6,06	2,02	9	5,52	5,09	-	-	00:50:30	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]	
Szczytnicki_P7		Δ (%)		159,43	130,46	146,15	100,00	95,45	63,20	-	-65,51	-65,53	-	-59,91	-60,57	-	-	-	-	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]
Szczytnicki_P7		15.11.2018, n = 3		8,48	3,73	9,98	3,98	4,35	2,01	00:10:10	23,41	7,80	5	22,70	20,56	-	-	00:11:20	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]	
Szczytnicki_P7		11.12.2018, n = 3		1,80	1,73	2,09	2,25	1,28	1,34	00:19:29	3,47	1,16	11	2,99	2,99	1,08	1,08	01:38:33	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]	
Szczytnicki_P7		Δ (%)		-78,77	-53,62	-79,06	-43,47	-70,57	-33,33	-	-85,18	-85,13	-	-86,83	-85,46	-	-	-	-	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]
POPOWICKI_P3		13.11.2018, n = 3		1,43	1,09	1,82	1,27	1,17	0,95	00:21:35	12,05	4,02	8	14,30	12,12	-	-	00:16:34	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]	
POPOWICKI_P3		04.12.2018, n = 3		1,96	1,18	1,44	1,19	1,02	0,93	00:38:30	19,58	6,53	18	14,02	13,84	-	-	00:35:25	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]	
POPOWICKI_P3		Δ (%)		37,06	8,26	-20,88	-6,30	-12,82	-2,11	-	62,49	62,44	-	-1,96	14,19	-	-	-	-	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]
ZACHODNI_PK3		13.11.2018, n = 3		2,49	1,85	3,05	2,23	1,65	1,33	00:12:41	16,67	5,56	1	10,77	10,77	-	-	00:31:44	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]	
ZACHODNI_PK3		04.12.2018, n = 2		0,63	0,27	0,37	0,24	0,60 (1)	0,55 (1)	01:41:10	2,19	0,73	65	1,82	1,96	0,66	0,71	01:48:58	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]	
ZACHODNI_PK3		Δ (%)		-74,70	-85,41	-87,87	-89,24	-	-	-86,86	-86,87	-	-83,10	81,80	-	-	-	-	-	Philip $k_{p\_sat} = 1,5A$ (m=2/3)		Philip $k_{p\_sat} = 0,5A*$		Odrzucony czas infiltracji inicjalnej		Horton*		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$		$k_{p\_sat} = 0,36 \cdot t^{0,60}$ *		Czas pomiaru		[gg:mm:ss]

n – ilość zalewań otworu / number of fillings of the hole with water

\* – po odjęciu okresu infiltracji inicjalnej / after rejecting initial infiltration time

l – ograniczenia stosowności poprawki / restrictions of the use of the correction formula

Objętość wody użyta podczas oznaczeń metodą MDI w okresie pomiarowym [dm<sup>3</sup>] w pierścieniu wewnętrznym / Capacity of water used for DRI method during measurement period at inner ring [dm<sup>3</sup>]:

ING\_1 14,14–17,67; \_P2 14,14–21,21; \_P7 13,43–14,14; \_P3 14,14–24,03; \_PK3 12,72–16,96

tryczne, tak samo jak model Phillipa (przeważnie >99,5%). Pomimo tego, że Phillip (1957) zwraca uwagę na jego ograniczenia w krótkich okresach pomiarowych przy znacznych zmianach tempa infiltracji. Wyniki badań potwierdziły zasadność przeprowadzenia procedury odcięcia czasu infiltracji inicjalnej, którą poświadcza wyższy wskaźnik zgodności modelu otrzymywany po jej zastosowaniu (fig. 2). Jest to jeszcze wyraźniej widoczne w punkcie P3, gdzie podczas drugiej sesji pomiarowej, parametryzacja modelu Phillipa wykazała większą zgodność po uwzględnieniu infiltracji początkowej niż bez jej uwzględnienia (98,81% vs 94,37%). Tylko podczas styczniowych pomiarów, po okresie wzmożonych opadów (fig. 1) nie wykazano potrzeby odcięcia czasu infiltracji inicjalnej (fig. 2). Empirycznie wyznaczona poprawka dla modelu Hortona dała najniższe wyniki  $k_{p, sat}$  (i być może najbliższe rzeczywistości), lecz dalej wyższe niż metodą Porcheta (tab. 1). Przedstawione wyniki stanowią solidny argument za kontynuacją przedstawionych badań w przyszłości, rozszerzając zarówno zakres badanych parametrów (np. wilgotność objętościową badanych gruntów przed i po pomiarze), jak i zwiększając ilość punktów pomiarowych.

*Praca powstała w ramach badań statutowych Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Wrocławskiego – projekt badawczy nr 04200/2679/18.*

**Podziękowania.** Autorzy pragną podziękować MPWiK Wrocław S.A. za udostępnienie danych z sieci stacji opadowych. Serdeczne podziękowania należą się również Recenzentom, którzy w znacznym stopniu przyczynili się do ostatecznego wyglądu pracy.

## LITERATURA

- BURY W., 1994 – Metodyka wykorzystania znaczników naturalnych i sztucznych do prognozowania migracji zanieczyszczeń przez naturalne bariery strefy aeracji [pr. doktor.]. AGH, Kraków.
- DUAN R., FEDLER C.B., BORRELLI J., 2011 – Field evaluation of infiltration models in lawn soils. *Irrigation Science*, **29**, 5: 379–389.
- HORTON R.E., 1940 – An approach towards a physical infiltration capacity. *Soil Soc. Am. Proc.*, **5**: 399–417.
- KUTÍLEK M., NIELSEN DR., 1994 – Soil hydrology. Catena, Cremlingen.
- LISZKOWSKA E., 2017 – Nieprawidłowości przy ocenie czasu przesączania zanieczyszczeń przez strefę aeracji na podstawie formuł obliczeniowych stosowanych w praktyce hydrogeologicznej. *Prz. Geol.*, **65**, 11/1: 1109–1014.
- MESSING I., JARVIS N.J., 1990 – Seasonal variation in field-saturated hydraulic conductivity in two swelling clay soils in Sweden. *J. Soil Sci.*, **41**: 229–237.
- NOSHADI M., PARVIZI H., SEPASKHAH A.R., 2012 – Evaluation of different methods for measuring field saturated hydraulic conductivity under high and low water table. *Vadose Zone J.*, **11**: 1–9.
- PHILIP J.R., 1957 – The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.*, **84**: 257–264.
- PHILIP J.R., 1969 – Theory of infiltration. *Advances in hydroscience*, **5**: 215–296.
- PHILIP J.R., 1990 – Inverse solution for one-dimensional infiltration, and the ratio A/K1. *Water Resour. Res.*, **26**, 9: 2023–2027.
- PLECZYŃSKI J., 1981 – Odnowalność zasobów wód podziemnych. Wydaw. Geol., Warszawa.
- PORCHET M., LAFERRE H., 1935 – Etude du debit des canaux a fond horizontal ou tres legerement incline. *Ann. Ministere Agric., Dir. Eaux Genie Rural Fascicule*, **64**: 111–188.
- SEPASKHAH A.R., REZAEI A., 1998 – Hydraulic conductivity measurement for subsurface drainage system. *Iran Agricultural Res.*, **17**: 139–150.
- SHIRAKI S., THU A.K., MATSUNO Y., SHINOGI Y., 2019 – Evaluation of infiltration models and field-saturated hydraulic conductivity in situ infiltration tests during the dry season. *Paddy and Water Environment*, **17**, 4: 619–632.
- SZYMKIEWICZ A., SIKORA Z., OSSOWSKI R., TISLER W., 2014 – Właściwości retencyjne, przewodność hydrauliczna i naprężenia efektywne w gruntach nienasyconych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, **5**: 445–452.
- VAN HOORN J.W., 1979 – Determining hydraulic conductivity with the inversed auger hole and infiltrometer methods. *W: Proc. Int. Drainage Worksh. (red. J. Wesseling): 150–154. Wageningen. May 1978. ILRI Publ. 25. Inst. Land Reclam. Improve, Wageningen.*
- VERBIST K., TORFS S., CORNELIS W.M., SOTO G., GABRIELS D., 2010 – Comparison of single- and double-ring infiltrometer methods on stony soils. *Vadose Zone J.*, **8**: 462–475.
- VERBIST K., CORNELIS W.M., TORFS S., GABRIELS D., 2013 – Comparing methods to determine hydraulic conductivities on stony soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **77**: 25–42.
- WĄSIK M., 2003 – Zdolność infiltracyjna utworów przypowierzchniowych a zasilanie wód podziemnych. *Acta Univ. Wratisl., Hydrogeol.*, **2591**, 7: 33–41
- YOUNGS E.G., 1968 – An estimation of sorptivity of infiltration studies from moisture moment considerations. *Soil Sci.*, **106**: 157–163.

## SUMMARY

The aim of the study is to compare the field method of estimation of hydraulic conductivity of near-surface soils on the background of potential errors related to the determination of field-saturated hydraulic conductivity (Kfs). For this purpose, stationary infiltration measurements to determine Kfs were designed using the Porchet (also known as inversed auger hole) and double-ring infiltrometer methods at 5 research

points using various analytical techniques and infiltration models. Using these methods, it has been shown that there were significant discrepancies in the whole study period. The use of rejecting initial infiltration time (Shiraki *et al.*, 2019) was confirmed in relation to the Philip model; there were also other methods used to reduce errors of estimation of field-saturated hydraulic conductivity presented in the article.

