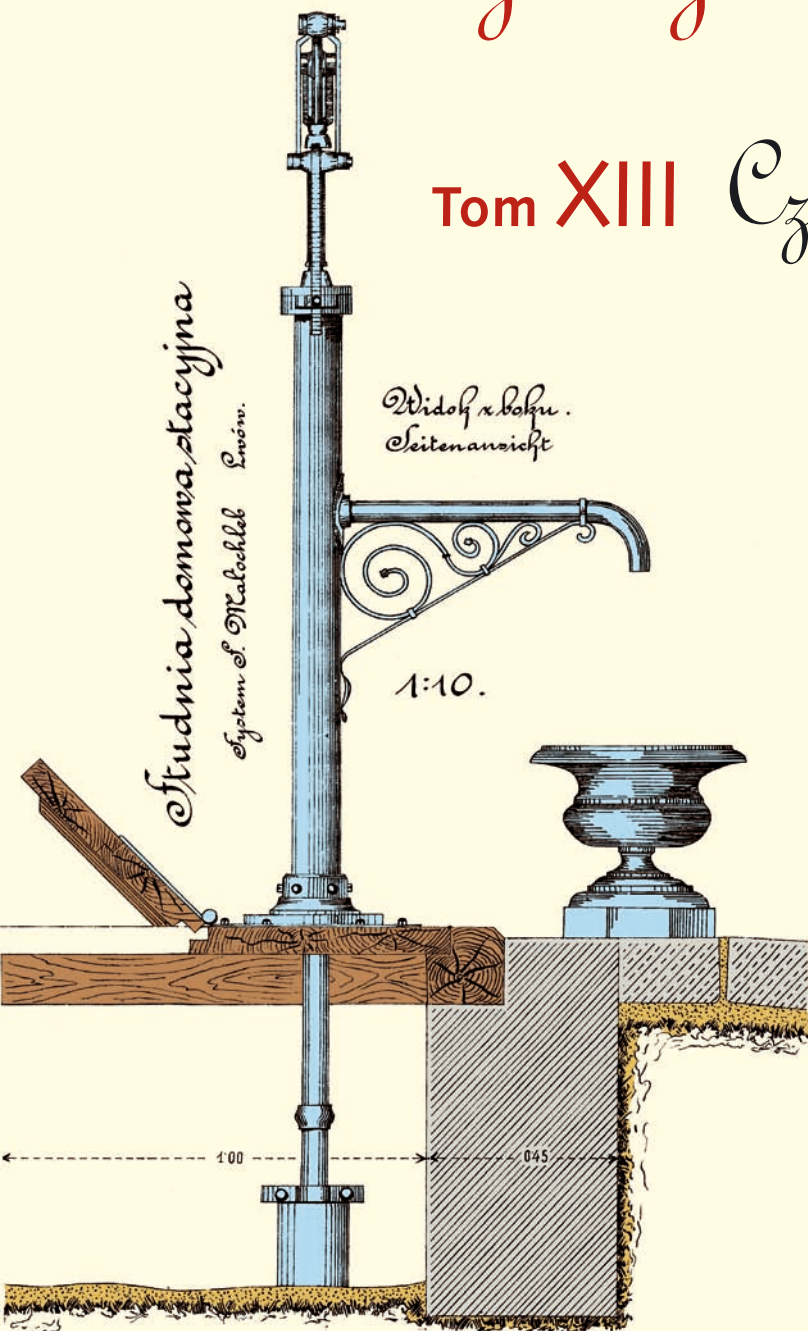


# Współczesne problemy hydrogeologii

Tom XIII Część 2.





Wydanie publikacji zostało sfinansowane przez  
Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej

Recenzenci:

Jadwiga Szczepańska  
Wojciech Ciężkowski  
Józef Górski  
Andrzej Kowalczyk  
Ewa Krogulec  
Grzegorz Malina  
Jerzy Małecki  
Marek Marciniak  
Jacek Motyka  
Marek Nawalany  
Jan Przybyłek  
Andrzej Rózkowski  
Andrzej Sadurski  
Andrzej Szczepański  
Stanisław Staško  
Stanisław Witczak  
Andrzej Zuber

Redakcja: Andrzej Szczepański, Ewa Kmiecik, Anna Żurek

Teksty artykułów w częściach 2. i 3. zostały wydrukowane z wersji elektronicznej dostarczonej przez Autorów, metodą bezpośredniej reprodukcji (*camera ready*)

Projekt okładki i stron tytułowych: Andrzej Tomaszewski

Na okładce: fragment projektu studni miejskiej we Lwowie z 1906 roku  
— ze zbiorów prof. **Antoniego S. Kleczkowskiego** (1922–2006)

Korekta: Zespół

Skład komputerowy systemem  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ : pre $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ t, [www.pretext.com.pl](http://www.pretext.com.pl)

Druk: ROMA-POL, [www.romapol.pl](http://www.romapol.pl)

ISBN-13 978-83-88927-16-4

Adam Postawa, Ewa Kmiecik

## **Porównanie laboratoryjnych metod oznaczeń współczynnika filtracji piasków**

### **Comparison of Laboratory Methods of Hydraulic Conductivity of Sands Determination**

**Słowa kluczowe** współczynnik filtracji, jednoczynnikowa analiza wariancji

**Key words** hydraulic conductivity, one-way ANOVA

**Abstract** Hydraulic conductivity is the most commonly used hydrogeologic parameter. It can be determined with different laboratory methods but there is no “reference method” allowing proper validation of obtained results especially for sand samples. Authors tried to implement one-way ANOVA procedure for validation of results of hydraulic conductivity determinations performed in laboratory using three different methods – Kamiński’s pipe, KF-00M and UKP-99.

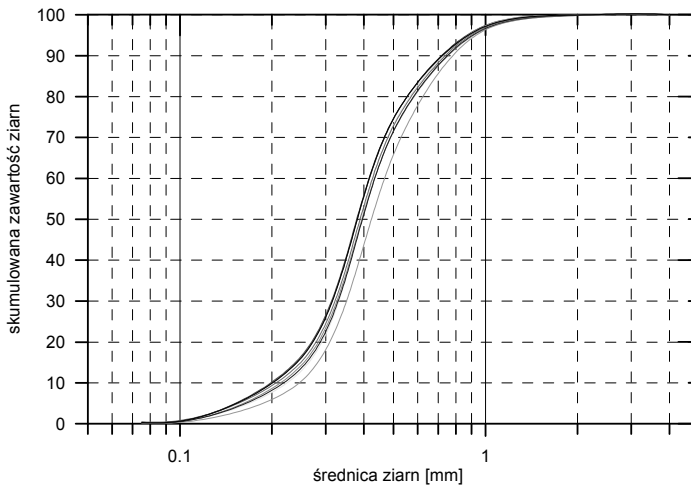
## Wstęp

Współczynnik filtracji jest najczęściej stosowanym w codziennej praktyce parametrem hydrogeologicznym. Przyjęcie prawidłowej, reprezentatywnej dla danej warstwy wodonośnej, wartości jest więc sprawą niezwykle ważną. Wyniki uzyskane przy badaniu różnymi metodami są bardzo zróżnicowane. Wynika to z jednej strony z właściwości samego ośrodka (niejednorodność, anizotropia), z drugiej zaś sam dobór metody badań (metody *in situ* czy laboratoryjne) w znaczący sposób wpływa na uzyskane wyniki. W przypadku oznaczeń laboratoryjnych, w trakcie całego procesu badawczego, od momentu pobrania próbki, wykonania pomiaru i opracowania wyników możliwe jest popełnienie całego szeregu błędów, które w ostatecznym efekcie sprawiają, że wyniki uzyskane przez różnych badaczy, nawet stosujących tę samą metodę do zbadania tego samego gruntu nie są jednakowe.

## Materiał badawczy

Jako materiał do badań posłużył piasek pochodzenia aluwialnego z doliny Wisły w rejonie Krakowa. Pobrana została próbka o masie około 15 kg. Jest to próbka o naruszonej strukturze (NS). Taki sposób poboru próbki z góry przesądza o utracie informacji dotyczącej anizotropii oraz stopnia zagęszczenia gruntu.

W celu dokonania charakterystyki granulometrycznej badanego gruntu z próbki pierwotnej, po wymieszaniu pobrano naważki poddane analizie sitowej. Wykonano 8 analiz uziarnienia, postępując zgodnie z PN-88/B-04481. Uzyskane krzywe granulometryczne przedstawia rysunek 1.



**Rysunek 1.** Krzywe uziarnienia  
**Figure 1.** Granulometric curves

Zgodnie z PN-86/B-02480 badany grunt zaklasyfikowano jako piasek średni.

Jak można zaobserwować na wykresie uziarnienia, mimo teoretycznie identycznych warunków przeprowadzenia eksperymentu, używania tego samego zestawu sit, zbliżonych mas

naważek i wytrząsania przez taki sam czas, poszczególne wyniki są zróżnicowane. Szczególnie widoczne, a z punktu widzenia hydrogeologa oceniającego współczynnik filtracji istotne, jest zróżnicowanie w przedziale średnic  $d_{10}$ – $d_{20}$ . Należy przypomnieć, że właśnie udział ziarn o najmniejszych średnicach decyduje o wartości współczynnika filtracji skał sypkich (Hazen, 1892). Odczytana z powyższego wykresu średnica  $d_{10}$  przyjmuje wartości 0.20–0.25 mm. Wyliczony dla tego gruntu zgodnie ze wzorem Hazena współczynnik filtracji wynosi zatem 22.4–35.0 m/d.

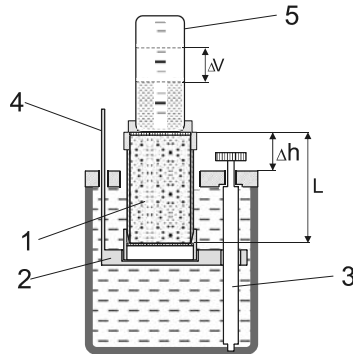
## Metodyka badań

W celu wyznaczenia współczynnika filtracji pobranej próbki piasku posłużono się trzema metodami laboratoryjnymi:

- rurką Kamińskiego (RK),
- aparatem KF-00M,
- uniwersalnym permeametrem kolumnowym UPK-99.

Metodą rurki Kamińskiego badania wykonano klasycznie — w warunkach zmiennego gradientu.

Aparat KF-00M jest to przyrząd służący do wyznaczenia współczynnika filtracji w warunkach stałego gradientu. Schemat aparatu przedstawiono na rysunku 2.



**Rysunek 2.** Aparat KF00-M. Objaśnienia w tekście  
**Figure 2.** Apparatus KF00-M. Explanation in the text

Próbka badanego piasku (1) umieszczona została w metalowym cylindrze zaopatrzonym od góry i od dołu w siatki filtracyjne przytrzymywane przez plastikowe pierścienie. Cylinder spoczywa na ruchomym stoliku (2), który za pomocą śruby (3) może być przemieszczany w pionie, co umożliwi nasączenie próbki wodą wypełniającą zewnętrzną obudowę a następnie ustawienie próbki w pozycji umożliwiającej wykonanie badania przy założonej wartości gradientu. Gradient można odczytać z podziałki (4). Konstrukcja aparatu pozwala na wykonanie oznaczenia przy wartościach gradientu od bliskich zera do wartości  $I = 1$ . Badanie polega na pomiarze czasu, w którym z wyskalowanego naczynia (5 — butla Mariote'a) przez próbkę przesączy się określona objętość wody.

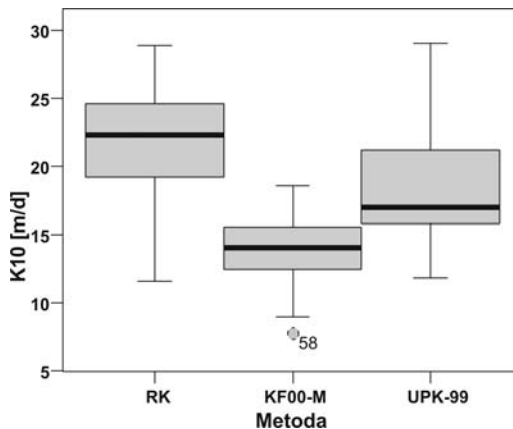
Woda ze zbiornika (5) wycieka i zatrzymuje się na poziomie 1–2 mm powyżej górnej siatki. Poziom wody nie może podnieść się wyżej, ponieważ otwór zbiornika zamknięty jest wodą i powietrze nie może przedostać się do zbiornika, a tym samym nie pozwala na ucieczkę wody ze zbiornika. W przypadku obniżenia się poziomu wskutek przesączania się wody przez próbkę, woda będzie wyciekać z naczynia i utrzymywać się na stałym poziomie. W czasie filtracji wody przez grunt spadek jest stały podczas całego doświadczenia.

Opis działania uniwersalnego *permeometru kolumnowego* UPK-99 można znaleźć w publikacjach jego konstruktora M. Marciniaka (i in., 1999). Zastosowano metody badania w warunkach stałego oraz zmiennego gradientu, przy dwóch kierunkach filtracji: z dołu do góry próbki i z góry w dół.

## Analiza uzyskanych wyników

W ramach przeprowadzonych badań wykonano 37 oznaczeń za pomocą rurki Kamieńskiego (RK), 24 oznaczenia aparatem KF00-M (8 serii oznaczeń przy trzech różnych gradientach) oraz 32 oznaczenia uniwersalnym permeometrem kolumnowym UPK-99 (8 serii oznaczeń w warunkach stałego i zmiennego gradientu, przy kierunkach filtracji z dołu do góry i z góry w dół). Oznaczenia zostały wykonane przez różnych operatorów. Miało to ujawnić skalę wpływu osoby wykonującej dane oznaczenie na jego wynik i zasymulować sytuację wykonywania poszczególnych oznaczeń w różnych laboratoriach.

Uzyskane wyniki, wszystkie sprowadzone do temperatury 10°C, poddano analizie statystycznej. Pierwszym etapem była weryfikacja danych za pomocą procedury eksploracji (opracowanie statystyczne danych wykonano za pomocą programu SPSS v. 14.0 PL).

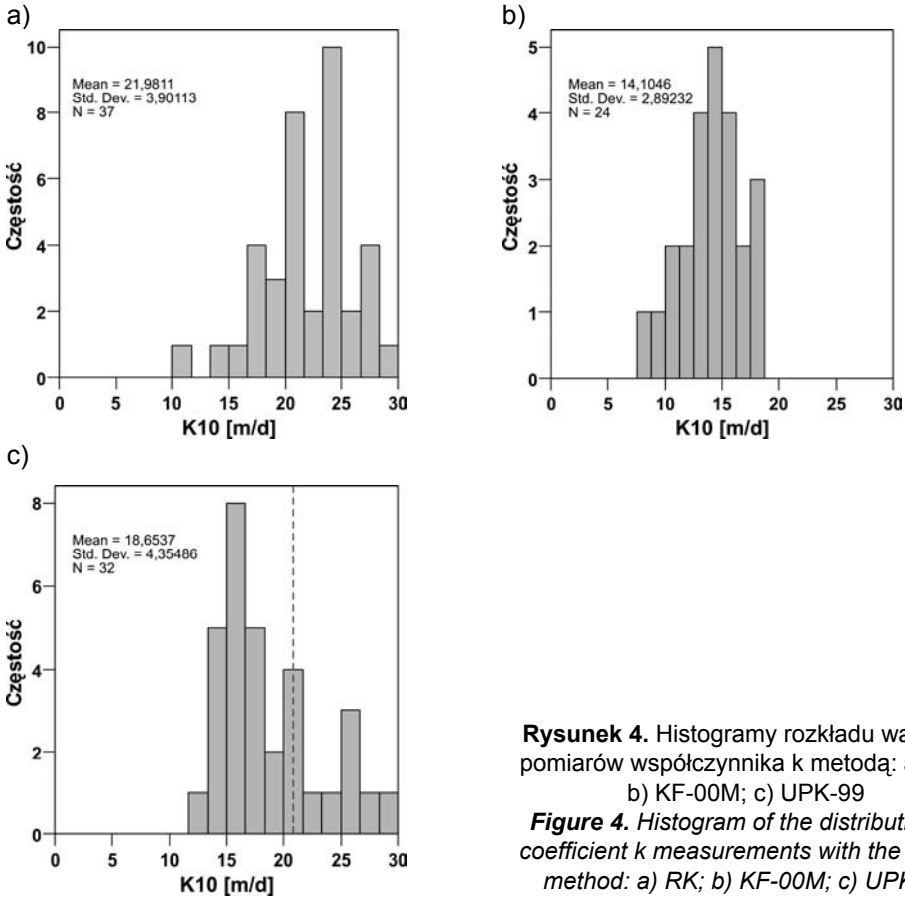


**Rysunek 3.** Wyniki oznaczeń współczynnika filtracji trzema metodami. Wykresy skrzynkowe  
**Figure 3.** Results of filtration coefficient determination with the use of three methods.  
*Box plots*

Na rysunku 3 przedstawiono wykresy typu skrzynka z wąsami dla uzyskanych różnymi metodami wyników oznaczeń współczynnika filtracji w badanej próbce. Z rysunku wynika,

że w zbiorze wyników oznaczeń wykonanych aparatem KF00-M jest jedna obserwacja odstająca. Przeprowadzony test Q-Graffa (Szczepańska, Kmieciak, 2005) wykazał, iż nie jest to błąd grubo. Wyniki uzyskane metodami RK i UPK-99 charakteryzują się podobnym zakresem. Wyniki dla metody KF00-M są niższe od pozostałych.

Analizując histogramy rozkładu wyników oznaczeń współczynnika filtracji dla analizowanych metod (rys. 4), można stwierdzić bimodalność rozkładu w przypadku oznaczeń wykonanych przyrządem UPK-99.



**Rysunek 4.** Histogramy rozkładu wartości pomiarów współczynnika  $k$  metodą: a) RK; b) KF-00M; c) UPK-99

**Figure 4.** Histogram of the distribution of coefficient  $k$  measurements with the use of method: a) RK; b) KF-00M; c) UPK-99

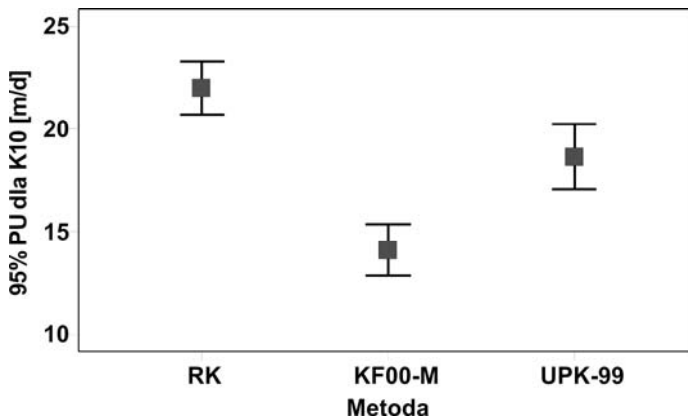
Ma to swoje uzasadnienie w wyraźnym związku uzyskanych wyników z kierunkiem filtracji. Przy kierunku filtracji z dołu do góry wyniki są zauważalnie wyższe niż przy filtracji z góry w dół. Zaznacza się to wyraźniej przy badaniu w warunkach stałego gradientu. Dla kierunku z dołu do góry średni współczynnik filtracji wynosi 20.51 [m/d], zaś dla kierunku z góry do dołu 18.58 [m/d]. Nieco mniejsza jest różnica pomiędzy średnimi w przypadku badania w warunkach zmiennego gradientu. Wynoszą one odpowiednio 18.24 [m/d] i 17.28 [m/d].

Do sprawdzenia, czy średnie wartości pomiaru współczynnika filtracji oznaczonego trzema metodami różnią się od siebie istotnie statystycznie (czy wybór metody oznaczenia ma wpływ na uzyskiwane wartości współczynnika  $k$ ), wykorzystano procedurę **jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA**. Zmienną zależną są zatem wartości współczynnika  $k$ , czynnikiem jest w tym przypadku metoda pomiaru.

W tabeli 2 zestawione są podstawowe statystyki opisowe dla poszczególnych grup danych (wydzielonych ze względu na różne metody analizy) oraz dla całego zbioru wyników.

**Tabela 2.** Wyniki oznaczeń współczynnika filtracji trzema metodami. Statystyki opisowe  
**Table 2.** Results of filtration coefficient determination with the use of 3 methods.  
*Descriptive statistics*

Statystyka		Metoda			Ogółem
		RK	KF00-M	UPK-99	
Liczba pomiarów		37	24	32	93
Średnia		21.9811	14.1046	18.6537	18.8035
Odchylenie standardowe		3.90113	2.89232	4.35486	4.92599
Błąd standardowy		.64134	.59039	.76984	.51080
95% przedział ufności dla średniej	Dolna granica	<b>20.6804</b>	<b>12.8833</b>	<b>17.0836</b>	<b>17.7890</b>
	Górna granica	<b>23.2818</b>	<b>15.3259</b>	<b>20.2238</b>	<b>19.8180</b>
Minimum		11.60	7.79	11.87	7.79
Maksimum		28.90	18.61	29.10	29.10
Współczynnik zmienności [%]		17.74	20.51	23.35	26.17



**Rysunek 5.** 95% przedziały ufności dla wartości średniej pomiarów współczynnika  $k$  metodą: a) RK; b) KF-00M; c) UPK-99. Szarym kwadratem zaznaczone są wartości średnie  
**Figure 5.** 95% confidence interval for coefficient  $k$  measurements with the use of method: a) RK; b) KF-00M; c) UPK-99. Gray square indicates mean value



Przedziały ufności dla wartości średnich podają zakresy, w których z prawdopodobieństwem 95% te średnie się znajdują. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż przedziały te dla poszczególnych metod są różne, nie nakładają się (rys. 5).

Jednoczynnikowa analiza wariancji wymaga założenia o równości wariancji w analizowanych zbiorach wyników. Założenie takie można sprawdzić za pomocą testu Levene'a (tab. 3).

**Tabela 3.** Wyniki oznaczeń współczynnika filtracji trzema metodami. Test jednorodności wariancji. Objasnienia: *df1*, *df2* — liczba stopni swobody, odpowiednio dla wariancji międzygrupowej i wewnątrzgrupowej

**Table 3.** Results of filtration coefficient determination with the use of 3 methods. Test of variance homogeneity. Explanation: *df1*, *df2* — degrees of freedom for between group and in-group variation

Test Levene'a	df1	df2	Istotność
2.837	2	90	<b>.064</b>

Wartość poziomu istotności przekraczająca 0.05 wskazuje, iż wariancje w 3 analizowanych zbiorach danych są równe. Wyniki jednoczynnikowej analizy wariancji zestawione są w tabeli 4.

**Tabela 4.** Wyniki oznaczeń współczynnika filtracji trzema metodami. Jednoczynnikowa ANOVA. Objasnienia: *df* — liczba stopni swobody; *F* — wartość statystyki *F*

**Table 4.** Results of filtration coefficient determination with the use of 3 methods. One-way ANOVA Explanation: *df* — degrees of freedom, *F* — test *F* statistics

	Suma kwadratów	df	Średni kwadrat	F	Istotność
Między grupami	904.223	2	452.111	30.636	<b>.000</b>
Wewnątrz grup	1328.194	90	14.758		
Ogółem	2232.417	92			

W jednoczynnikowej analizie wariancji zmienność całkowita dzielona jest na dwie składowe:

- zmienność *między grupami* – zmienność średnich grupowych (średnich obliczonych dla każdej z metod) w stosunku do średniej całkowitej (ogólnej);
- zmienność *wewnątrz grup* – reprezentującą zmienność pojedynczych wyników wokół średniej w danej grupie (w zbiorze wyników uzyskanych daną metodą).

Wartość w kolumnie *Istotność* w tabeli 4, jest poziomem istotności testu *F*, różnic pomiędzy średnimi grupowymi. Niska wartość tego współczynnika (<0.05) wskazuje w omawianym przypadku, iż przynajmniej jedna ze średnich grupowych różni się istotnie od pozostałych. W celu określenia, które średnie są różne, wykorzystano testy *post hoc* (tab. 5).

**Tabela 5.** Wyniki oznaczeń współczynnika filtracji trzema metodami. Test Tukey'a HSD  
**Table 5.** Results of filtration coefficient determination with the use of 3 methods. Tukey's test

(I) Metoda	(J) Metoda	Różnica średnich (I-J)	Błąd standardowy	Istotność	95% przedział ufności	
					Dolna granica	Górna granica
RK	KF00-M	7.87649(*)	1.00686	.000	5.4771	10.2759
	UKP-99	3.32742(*)	.92738	.002	1.1174	5.5375
KF00-M	RK	-7.87649(*)	1.00686	.000	-10.2759	-5.4771
	UKP-99	-4.54908(*)	1.03734	.000	-7.0212	-2.0770
UKP-99	RK	-3.32742(*)	.92738	.002	-5.5375	-1.1174
	KF00-M	4.54908(*)	1.03734	.000	2.0770	7.0212

\* Różnica średnich jest istotna na poziomie .05.

W tabeli tej zestawione są parami średnie dla poszczególnych grup, w kolumnie *Różnica średnich* — różnice między tymi średnimi a w kolumnie *Istotność* — wartości prawdopodobieństwa, że testowana średnia różnica jest równa zero. Dla każdej różnicy skonstruowany jest 95% przedział ufności. Jeśli dany przedział obejmuje wartość 0, dwie analizowane grupy wyników nie różnią się między sobą. W omawianym przykładzie żaden z przedziałów nie zawiera wartości zero, co oznacza, że wyniki oznaczeń współczynnika  $k$  uzyskane poszczególnymi metodami różnią się istotnie.

Kolejna tabela (tab. 6) zestawia grupy jednorodnie porównań *post hoc*. Każda kolumna w tabeli odpowiada jednorodnej grupie pomiarów (alfa = .05 odpowiada 95% poziomowi ufności).

**Tabela 6.** Wyniki oznaczeń współczynnika filtracji trzema metodami. Porównania *post hoc*  
**Table 6.** Results of filtration coefficient determination with the use of 3 methods.  
*Post hoc comparison*

Metoda	N	Podzbiór dla alfa = .05		
		1	2	3
KF00-M	24	14.1046		
UKP-99	32		18.6537	
RK	37			21.9811
Istotność		1.000	1.000	1.000

Analiza wariancji wykazała więc, że trzy metody wyznaczania współczynnika filtracji nie dają porównywalnych rezultatów.

Do dalszej analizy podzielono wyniki uzyskane metodą UKP-99 na dwie grupy: dane uzyskane przy kierunku filtracji z dołu do góry (UKP-99a) i z góry w dół (UKP-99b). Przeprowadzono ponownie analizę wariancji. Poniżej zestawiono statystyki opisowe dla wydzielonych tym razem czterech grup wyników (tab. 7) oraz jednorodne grupy oznaczeń (tab. 8).

**Tabela 7.** Wyniki oznaczeń współczynnika filtracji czterema metodami. Statystyki opisowe  
**Table 7.** Results of filtration coefficient determination with the use of four methods.  
*Descriptive statistics*

Statystyka	Metoda				Ogółem	
	RK	KF00-M	UKP-99a	UKP-99b		
Liczba pomiarów	37	24	16	16	93	
Średnia	21.9811	14.1046	19.5455	17.7618	18.8035	
Odchylenie standardowe	3.90113	2.89232	4.13392	4.51749	4.92599	
Błąd standardowy	.64134	.59039	1.03348	1.12937	.51080	
95% przedział ufności dla średniej	Dolna granica	20.6804	12.8833	17.3427	15.3546	17.7890
	Górna granica	23.2818	15.3259	21.7484	20.1690	19.8180
Minimum	11.60	7.79	13.38	11.87	7.79	
Maksimum	28.90	18.61	29.10	26.72	29.10	

**Tabela 8.** Wyniki oznaczeń współczynnika filtracji czterema metodami. Porównania post hoc  
**Table 8.** Results of filtration coefficient determination with the use of 3 methods.  
*Post hoc comparison*

Id	N	Podzbiór dla alfa = .05		
		1	2	3
KF00-M	24	14.1046		
<b>UKP-99b</b>	16		<b>17.7618</b>	
<b>UKP-99a</b>	16		<b>19.5455</b>	<b>19.5455</b>
<b>RK</b>	37			<b>21.9811</b>
Istotność		1.000	.443	.179

W tym przypadku jako jednorodne grupy zakwalifikowane zostały wyniki uzyskane metodami UKP-99a i b (oba kierunki filtracji) oraz RK i UKP-99a (dla kierunku filtracji z dołu do góry).

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania i rozważania statystyczne wykazały, że nie jest możliwe wskazanie za pomocą analizy statystycznej, która z zastosowanych metod oznaczania współczynnika filtracji daje najbardziej wiarygodne — reprezentatywne wyniki. Każda z metod obciążona jest znacznym wpływem czynnika ludzkiego na końcowy wynik pomiaru. Brak bowiem porównywalności choćby sposobów przygotowania próbki o naruszonej strukturze do bezpośredniego badania (odmienny sposób zagęszczenia próbki, uzależniony od choćby

przyzwyczajen konkretnego badacza). Porównywalność warunków badania, choć niekoniecznie identyczność uzyskiwanych wyników, mogłoby zapewnić wykonywanie oznaczeń przy tym samym stopniu zagęszczenia ( $I_D$ ), równym stopniowi zagęszczenia gruntu w warstwie wodonośnej. Jest to ważny czynnik, często zaniedbywany w codziennej praktyce laboratoryjnej.

Nie jest tu możliwe zastosowanie procedur podobnych do tych jakie stosowane są w laboratoriach chemicznych. Nie istnieją wzorce ani możliwości kalibracji poszczególnych przyrządów pomiarowych, zaś pojęcie „ta sama próbka” jest czysto umowne.

Wyraźne są także różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi poszczególnymi metodami.

Wszystkie te problemy wskazują na potrzebę podjęcia szerszej dyskusji, wśród hydrogeologów praktyków, na temat użyteczności laboratoryjnych wyników oznaczeń współczynnika filtracji i podjęcia próby wskazania jednej z istniejących, bądź opracowania nowej metody, która będzie mogła być przyjęta do stosowania jako metoda referencyjna. Dopiero wtedy będzie możliwe przynajmniej częściowe zapewnienie porównywalności uzyskiwanych przez poszczególne laboratoria wyników.

## Literatura

- Hazen, 1892: *Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to their Use in Filtration*. Massachusetts State Board of Health. Ann. Geol. Rep. 24.
- Marciniak M., Kaniecki A., Górski J., 1999: *Uniwersalny permeometr kolumnowy UPK-99*. [W:] Współczesne problemy hydrogeologii, t. IX, s. 469–471, Wyd. Sudety, Wrocław.
- PN-86/B-02480: *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*.
- PN-88/B-04481: *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*.
- Szczepańska J., Kmiecik E., 2005: *Ocena stanu chemicznego wód podziemnych w oparciu o wyniki badań monitoringowych*. Wyd. AGH, Kraków.

*Badania finansowane w ramach umowy AGH 11.11.140.139.*