

## Krótki przegląd badań współczynnika filtracji gruntów

Łukasz Kaczmarek<sup>1</sup>, Agnieszka Dąbska<sup>1</sup>, Paweł Popielski<sup>1</sup>



Ł. Kaczmarek



A. Dąbska



P. Popielski

**Brief overview of soil hydraulic conductivity testing methods.** Prz. Geol., 70: 410–416.

*Abstract.* Many research methods enable the determination of the permeability properties of the soil. These methods differ, inter alia, in accuracy, complexity, application ranges, and technical conditions. The choice of a particular method is often dictated by the purpose of determining the hydraulic conductivity. The review of the most popular methods facilitates the optimization of the selection, as well as the application of mutually verifying methods or using them at different stages of the research. The article summarizes selected methods of determining the soil hydraulic conductivity from common research groups, including correlation, laboratory, and field methods, as well as less frequently used geophysical methods.

**Keywords:** hydraulic conductivity, classification of test methods, hydraulic gradient, soil type

Właściwości filtracyjne są istotną cechą ośrodków gruntowo-skalnych. W słowniku hydrogeologicznym (Dowgiałło i in., 2002) zostały one określone jako: *zdolność do przewodzenia cieczy lub gazu*. Przepływ wody przez grunt jest nazywany wodoprzepuszczalnością. Jest też stosowany termin przepuszczalność hydrauliczna ( $K$ ), czyli zdolność materiału do przepuszczania cieczy systemem połączonych porów i szczelin w nim występujących. Warunkiem uruchomienia przepływu jest różnica ciśnienia cieczy i łączność między wolnymi przestrzeniami w materiale. Współczynnik filtracji ( $k$ ) jest jedną z najpopularniejszych, ilościowych miar przepuszczalności hydraulicznej, to jest właśnie wodoprzepuszczalności gruntu w trakcie ruchu laminarnego wody. Jest on kształtowany przez liczne czynniki, często współzależne, co powoduje, że trudno jest jednoznacznie określić udział każdego z nich w determinowaniu właściwości filtracyjnych (ryc. 1), dlatego przepuszczalność hydrauliczna jest indywidualną cechą badanego gruntu (Dąbska, 2021).

Różnym rodzajom gruntów są dedykowane odmienne metody wyznaczania współczynnika filtracji (ryc. 2). Grupy tych metod są wyróżniane ze względu na zastosowane podejście, skalę badań oraz warunki brzegowe (parametry wymuszane i mierzone). Niektóre metody mają szersze zastosowanie, inne są dostosowane wyłącznie do specyfiki danego materiału. Zróżnicowanie gruntów spoistych i niespoistych odzwierciedla się w znacznej zmienności współczynnika filtracji. W doborze metody oraz aparatury odpowiedniej do określenia współczynnika filtracji gruntu, oprócz jego rodzaju, powinno się uwzględnić także kierunki przepływu wody (horyzontalny, ukośny lub pionowy) dominujące w warunkach naturalnych (Szymkiewicz, Kryczka, 2011).

Znaczenie właściwości filtracyjnych gruntów manifestuje się w różnorodności wypracowanych metod badania przepływu przez nie wody, związanych z licznymi zastosowaniami w hydrogeologii i hydrotechnice czy też szerzej w naukach przyrodniczych i inżynierskich. Kompleksowy przegląd możliwych do zastosowania metod pozwala wybrać optymalne rozwiązania, spełniające zakładane wymagania pod względem dokładności i czasu badania, stopnia zaawansowania technicznego, jak również ekonomiczności. W artykule opisano najważniejsze grupy badań współczynnika filtracji gruntów.

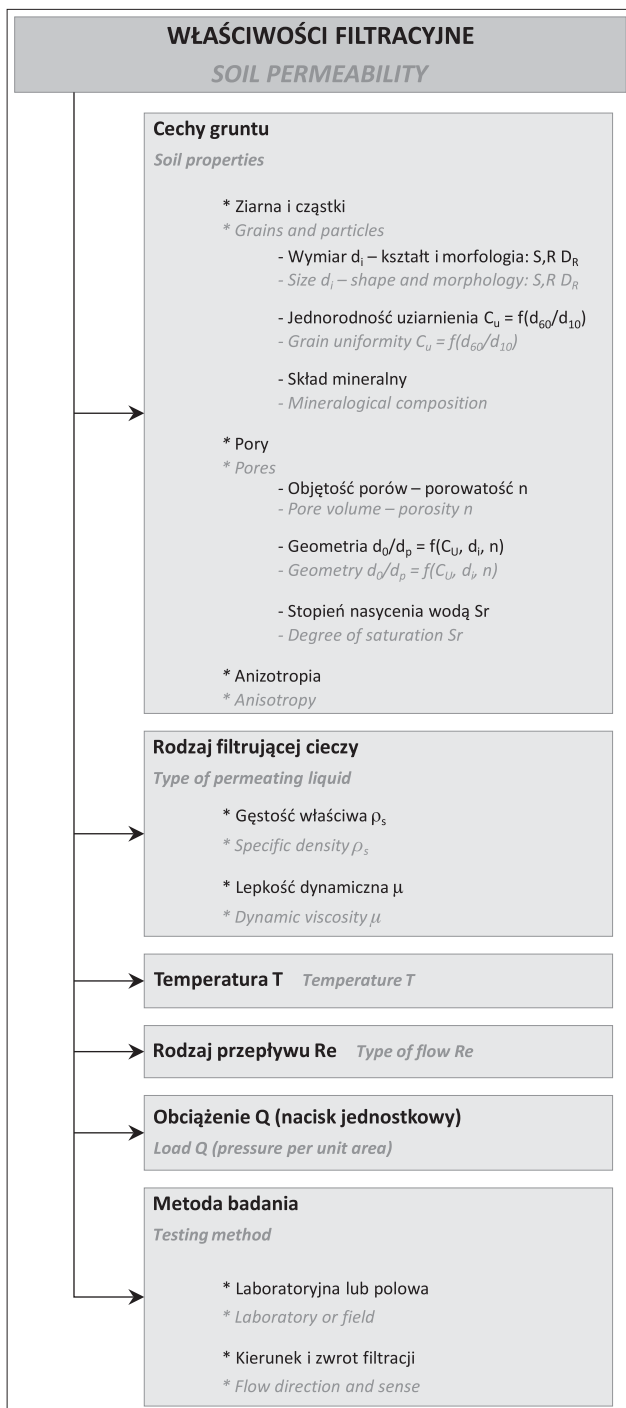
### METODY WYZNACZANIA WSPÓLCZYNNIKA FILTRACJI GRUNTÓW

#### Korelacyjne

W praktyce wyznaczania współczynnika filtracji gruntów dużą popularnością cieszą się metody korelacyjne, tzw. pośrednie, wyrażane wzorami empirycznymi i półempirycznymi. Wzory korelacyjne są ustalane na podstawie wyników badań laboratoryjnych przepływu wody przez grunt oraz charakterystyki analizowanego materiału. Mogą one posłużyć do wstępnej, taniej i szybkiej oceny współczynnika filtracji. Należy jednak mieć świadomość, że zastosowanie tej metody nie jest uniwersalne, ponieważ ogranicza je mniejsza dokładność wyznaczania wartości współczynnika  $k$  od uzyskiwanej w toku bezpośrednich badań laboratoryjnych czy polowych (Szymkiewicz, Kryczka, 2011).

Historyczny rozwój metod korelacyjnych przedstawili Huang i in. (1994), którzy jako ważne cechy ośrodka gruntowego, wpływające na właściwości filtracyjne, wskazali

<sup>1</sup> Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa; lukasz.kaczmarek@pw.edu.pl



**Ryc. 1.** Czynniki kształtujące właściwości filtracyjne gruntów (Dąbska, 2021)

**Fig. 1.** Factors shaping the filtration properties of soils (Dąbska, 2021)

wskaźnik porowatości oraz stopień nasycenia wodą. Zakres zastosowania poszczególnych wzorów empirycznych jest uzależniony od:

- uziarnienia (wymiarów oraz kształtów ziaren i cząstek, jednorodności uziarnienia);
- cech porów (ich objętości i geometrii);
- anizotropii ośrodka gruntowego.

Taka kolejność czynników wynika z istotności ich wpływu na determinowanie właściwości filtracyjnych gruntów (Dąbska, 2021), dlatego formuły empiryczne najczęściej są uzależnione od wymiarów ziaren i porowatości

materiału. Zależności te Szymkiewicz i Kryczka (2011) przedstawili w zgeneralizowanej postaci:

$$k [m/d] = k_f \cdot k_p; k_f = \frac{\gamma_f}{\mu}; k_p = \xi \cdot f(n) \cdot d_c^B \quad [1]$$

gdzie:

$k_f$  – składowa współczynnika filtracji związana z fizycznymi właściwościami filtrującego płynu [m/s];

$k_p$  – składowa współczynnika filtracji związana z ośrodkiem porowym [m/s];

$\gamma_f$  – ciężar właściwy cieczy [kN/m<sup>3</sup>];

$\mu$  – lepkość dynamiczna cieczy [Pa·s];

$\xi$  – współczynnik geometryczny związany z kształtem porów [-];

$f(n)$  – funkcja porowatości [-];

$d_c$  – charakterystyczny wymiar ziaren [m];

$B$  – parametr dopasowania [-].

Szymkiewicz i Kryczka (2011) uznali, że w odniesieniu do piasków i żwirów, najlepiej sprawdza się formuła Kozenego i Carmana:

$$f(n) = n^3 / (1-n)^2 \quad [2]$$

Wzór ten umożliwia uwzględnienie porowatości i krętości porów, kształtu i wymiaru ziaren oraz właściwości filtracyjnych płynów.

Wartość parametru opisującego krętość porów często jest zakładana *a priori*, nie mniej współcześnie wypracowano nowoczesne techniki relatywnie szybkiej i dokładnej oceny tego parametru, w tym geometrii porów, jak również analizy kształtu ziaren (parametr współczynnika kształtu). Techniki te mogą polegać na komputerowej interpretacji danych pochodzących z naswietleń mikrotomograficznych. Przykłady zastosowania tego typu technik do badania materiałów modelowych oraz piaskowców opisali m.in. Kaczmarek i in. (2017a, b), którzy posługując się wynikami naswietleń przeprowadzili numeryczne testy przepływu cieczy przez badane próbki, uzyskując także rozkład ciśnienia.

Riha i in. (2018) analizowali 20 najpopularniejszych empirycznych wzorów służących do wyliczania wartości współczynnika filtracji gruntów (m.in. Hazena, Slichtera czy Seelheima), które zweryfikowali w toku badań laboratoryjnych (177) z zastosowaniem modelowego materiału w postaci szklanych ziaren o trzech różnych średnicach i próbek tego materiału o zróżnicowanej porowatości. Rezultatem badań było wskazanie wzorów cechujących się najlepszą korelacją statystyczną, do których zaliczono m.in. wzór Terzagiego (1925):

$$K [m^2] = \frac{g}{v} C \left( \frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_{10}^2 \quad [3]$$

gdzie:

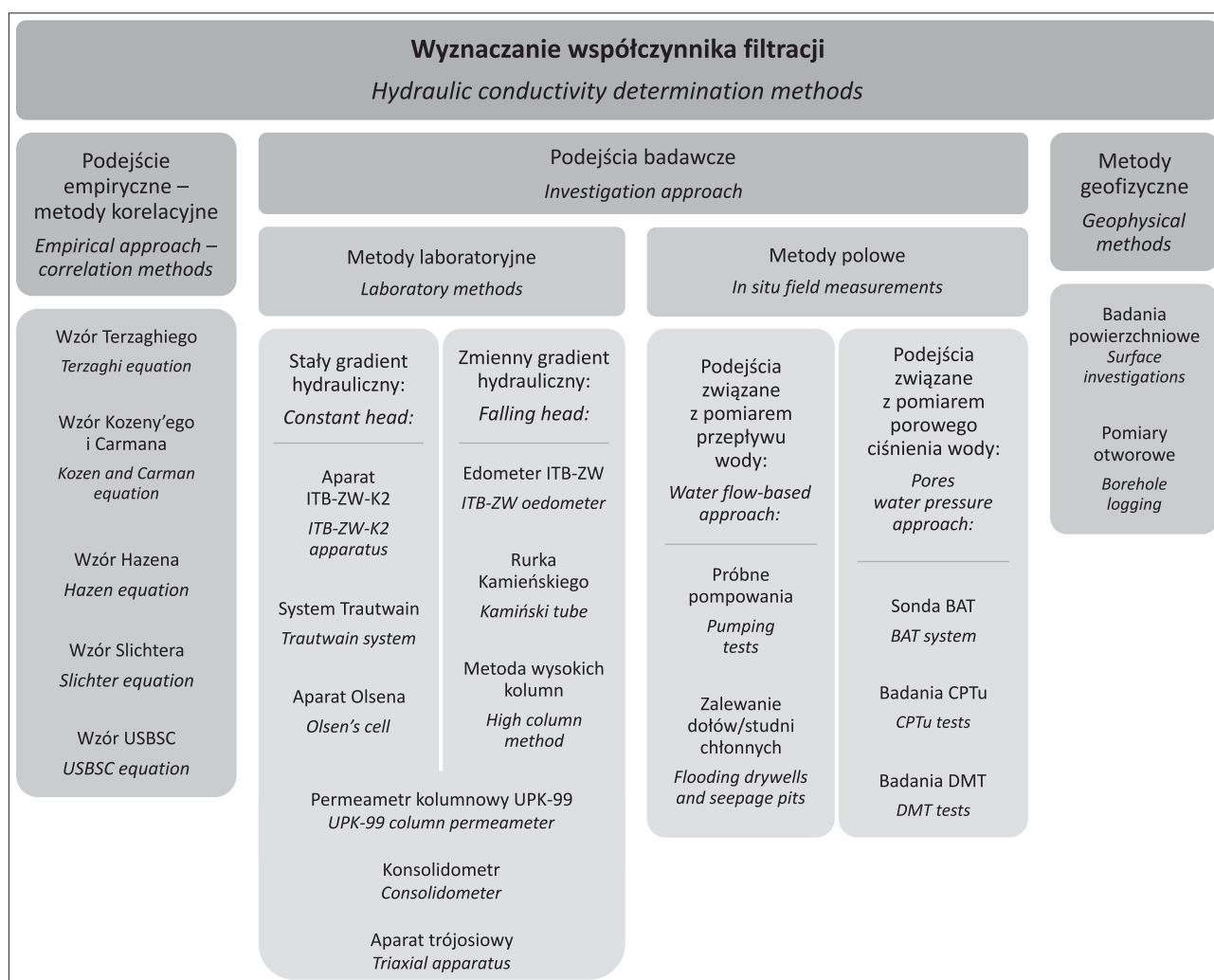
$g$  – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>];

$v$  – współczynnik lepkości kinematycznej filtrującej cieczy [m<sup>2</sup>/s];

$n$  – porowatość [-];

$C$  – stała zależna od kształtu ziaren (określona np. wg wzoru Langego) [-];

$d_{10}$  – miarodajna średnica ziaren [m].



**Ryc. 2.** Wybrane metody określania współczynnika filtracji gruntów  
**Fig. 2.** Selected methods for determination of soil hydraulic conductivity

Przykładowe studium korelacji charakterystyk uziarnienia czterech różnych typów piasku z wynikami obliczeń współczynnika filtracji  $k$  (z zastosowaniem wzorów empirycznych) opublikowali Hala i in. (2020), również wskazując na bardzo dobre rezultaty zastosowania wzoru Terzagiego.

### Laboratoryjne

Badania laboratoryjne umożliwiają dokładniejszą charakterystykę właściwości filtracyjnych analizowanego materiału gruntowego niż metody korelacyjne. Co więcej, istotnymi atutami badań laboratoryjnych są niskie koszty (o wiele niższe od kosztów badań terenowych, w tym geofizycznych), oraz możliwość przeprowadzenia kilku serii badań weryfikacyjnych. Należy jednak zauważyć, że istotny wpływ na wyniki badań laboratoryjnych mają: sposób poboru próbek badanych materiałów (w szczególności gruntów spoistych) oraz ich klasa jakości, na którą wpływają warunki transportu i przechowywania. Ponadto trudności w badaniach laboratoryjnych często sprawia odtwarzanie rzeczywistych warunków gruntowo-wodnych, takich jak np. uwarstwienie ośrodka gruntowego, duże wartości geostatycznego naprężenia *in situ*, trójosiowy stan odkształcenia i różne kierunki przepływu wody.

Wartości współczynnika filtracji  $k$  wyznaczone za pomocą metod laboratoryjnych są zazwyczaj mniejsze od otrzymywanych w wyniku obliczeń z wykorzystaniem formuł empirycznych (Kleczkowski, Szczepański, 1973; Wieczorek, 2003). Również wartości współczynnika  $k$  uzyskiwane w warunkach polowych są przeważnie większe od otrzymywanych w toku badań laboratoryjnych. Taka korelacja najczęściej wynika z występowania w warunkach naturalnych przewarstwień gruntów o lepszych właściwościach filtracyjnych lub uprzywilejowanych dróg przepływu w postaci nieciągłości (np. spękań), na co zwracają uwagę m.in. Wdowska i in. (2017). W związku z tym można przyjąć, że wyniki badań laboratoryjnych będą się sytuować bliżej dolnego oszacowania parametru współczynnika filtracji, natomiast wyniki badań polowych będą bliżej górnego oszacowania.

W wyliczeniach wartości współczynnika filtracji  $k$  wg prawa Darcy'ego fundamentalnym założeniem jest liniowa zależność prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego w warunkach laminarnego przepływu cieczy newtonowskich (wartość liczby Reynoldsa poniżej wartości krytycznej). Prowadzone są także próby wyznaczania współczynnika filtracji w warunkach nieliniowego przepływu wód (np. Malinowska, Hyb, 2004). Ciecz wykorzystywana do badań filtracyjnych, niezależnie od sposobu przepływu,

powinna być konserwatywna (tzn. nie może ona wchodzić w interakcje z badanym gruntem), warunek ten w większości przypadków spełnia czysta woda (Rogoż, 2007).

Laboratoryjne metody wyznaczania współczynnika filtracji polegają na pomiarze prędkości przepływu cieczy przez próbkę o określonym przekroju i znanym gradiencie hydraulicznym, stałym lub zmiennym. W warunkach stałego gradientu ciśnienia wody współczynnik filtracji oblicza się na podstawie wzoru:

$$k [m/s] = \frac{Ql}{A\Delta h} \quad [4]$$

gdzie:

$Q$  – mierzony wydatek przepływu przez próbkę w określonym przedziale czasowym  $t$  [ $m^3/s$ ];

$l$  – długość drogi filtracji [m];

$A$  – pole powierzchni próbki gruntu [ $m^2$ ];

$\Delta h$  – różnica wysokości hydraulicznej przed i za próbką [m].

W przypadku zmiennej różnicy wysokości hydraulicznych (tj. zmiennego gradientu hydraulicznego) wzór przyjmuje postać:

$$k [m/s] = \frac{al}{At} \ln \frac{h_0}{h_t} \quad [5]$$

gdzie

$a$  – powierzchnia przekroju poprzecznego biurety pomiarowej [ $m^2$ ];

$t$  – czas badania [s];

$h_0$  – wysokość zwierciadła wody w biurecie w chwili rozpoczęcia badania [m];

$h_t$  – wysokość zwierciadła wody w biurecie po czasie  $t$  [m];

$l$  – długość drogi filtracji [m].

Do laboratoryjnych badań filtracji stosuje się permeametry. Aparaty te zazwyczaj są oddzielnie dedykowane metodzie stałogradientowej lub zmiennogradientowej, lecz istnieją także takie urządzenia, za pomocą których można prowadzić badania zarówno pierwszą, jak i drugą metodą. Wykonanie badań w warunkach stałego gradientu hydraulicznego umożliwiają np.: aparat ITB-ZW-K2, komora Rowe'a, System Trautwain lub aparat Olsena. Komora Rowe'a służy również do wyznaczania wartości współczynnika  $k$  w przebiegu przepływu osiowego i horyzontalnego. Natomiast do oceny współczynnika filtracji gruntu w warunkach zmiennego gradientu hydraulicznego można wykorzystać specjalnie przystosowany edometr ITB-ZW, kolumnę filtracyjną (ryc. 3) lub aparat Kamieńskiego (tzw. rurka). Do stosowania obu metod (o stałym i zmiennym gradiencie ciśnienia wody) nadają się: uniwersalny permeametr kolumnowy UPK-99, konsolidometr oraz aparat trójosiowy ściskania. Konsolidometr oraz aparat trójosiowy można również wykorzystać do wskaźnikowego określania współczynnika  $k$  pośrednio za pomocą współczynnika konsolidacji  $c_v$  (Kaczyński i in., 1997; Dobak, 1999). Oba te aparaty mają wbudowane elektromechaniczne pompy hydrauliczne ze zintegrowanymi czujnikami ciśnienia wody, umożliwiającymi zastosowanie, oprócz standardowych metod stało- i zmiennogradientowych, także specyficzną metodę stabilizującego się gradientu w warunkach ustalonego przepływu (*flow-pump*; Olsen i in., 1991). Jedną z głównych zalet tej metody jest uwzględnienie małych przepływów, w szczególności w



Ryc. 3. Kolumna filtracyjna.

Fot. Ł. Kaczmarek

Fig. 3. Filter column. Photo by Ł. Kaczmarek

gruntach słabo przepuszczalnych, co ułatwia kontrolę stałości zadawanych parametrów badania (Wdowska i in., 2017). W celu przeprowadzenia badań gruntów słabo przepuszczalnych często wytwarza się w nich za pomocą pomp elektromechanicznych bardzo duże gradienty hydrauliczne. Ponadto aparat trójosiowego ściskania umożliwia horyzontalne odształcenia próbki gruntu, jak również ich kontrolowanie i rejestrowanie. Jest to istotne, ponieważ właściwości filtracyjne mogą się zmieniać wraz z modyfikacją struktury gruntów. Tak na przykład współczynnik filtracji gruntu, głównie różnoziarnistego, pobranego ze złoża, a następnie wbudowanego w nasyp, może być nawet do 62 razy większy niż w warunkach *in situ* (Zhilenkov, 1986). Schematy różnych badań laboratoryjnych opisali m.in. Marciniak (1999), Malinowska i Hyb (2004), Twardowski i Drożdżak (2007) oraz Wdowska i in. (2017).

### Polowe

W praktyce inżynierskiej do wyznaczania współczynnika filtracji najczęściej są stosowane różne metody interpretacji wyników próbnych pompowań, polegające na pomiarze wydajności przepływu wody, szczegółowo opisane m.in. przez Dąbrowskiego i Przybyłką (2005). Metody wyznaczania współczynnika filtracji  $k$  na podstawie wyników pompowań są najdokładniejsze i miarodajne, lecz kosztowne i długotrwałe (Turek i in., 1971). Koszty te są powodowane przez konieczność zbadania otocznego środowiska wód podziemnych, co jest szczególnie istotne w przypadku wodonośca o różnorodnym i zmiennym wykształceniu. Anizotropia warstw wodonośnych determinuje także dokładność zastosowanych schematów i związanych z nimi wzorów obliczeniowych na wartość współczynnika  $k$ . Schematy te sklasyfikowali Turek i in.

(1971), uwzględniając napięcie zwierciadła wody, lokalizację studni w relacji do wód powierzchniowych, charakter ruchu wody oraz posadowienie części roboczej filtra w odniesieniu do warstwy wodonośnej.

Szczegółowa interpretacja rezultatów jedno- lub wielostopniowych próbnych pompowań studni pozwala zidentyfikować więzi hydrauliczne różnych warstw wodonośnych, zasięg leja depresji lub zmienność budowy geologicznej, jak również ocenić stan techniczny studni (Dąbrowski, Przybyłek, 2005; Polak, Górecki, 2016). Próbné pompowania w reżimie nieustalonym mogą być również wykorzystywane do interpretacji współczynnika filtracji  $k$ . Kolejną grupą polowych metod określania wartości współczynnika  $k$  są metody zalewania studni chłonnych lub szurfów (np. metoda Maaga, Rosłońskiego, Bałdyriewa czy Kamińskiego), często wykorzystywane w trakcie prac budowlanych (Pisarczyk, Rymśa, 2003). Badania te polegają na wlewaniu wody do otworu o określonych wymiarach i obserwacji infiltracji w czasie, w efekcie której powstaje odwrócony lej depresji. Wymienione metody znajdują zastosowanie w badaniu gruntów o dobrej przepuszczalności.

W badaniach polowych do oceny możliwości filtracyjnych utworów o bardzo małej przepuszczalności wykorzystuje się pomiar ciśnienia wody w porach gruntu. W tym celu jest stosowana sonda pomiarowa BAT, która dostarcza danych o wartości ciśnienia wody w porach gruntu w danym profilu głębokościowym (Torstensson, 1984; Krogulec, 1992). Aspekty proceduralne wraz z przykładem zastosowania sondy BAT przedstawił m.in. Zawrzykraj (2017). Wartości współczynnika  $k$  uzyskiwane w badaniach polowych są zazwyczaj nieco większe od otrzymywanych w badaniach laboratoryjnych, co może być spowodowane efektem skali (Wójcik, 2003). Pomiar ciśnienia wody w porach gruntu jest także wykorzystywany w trakcie geotechnicznych sondowań CPTu (*Cone Penetration Test with pore pressure measurement*). Badanie CPTu jest rozszerzeniem zastosowania standardowych badań geotechnicznych CPT, a pomiar ciśnienia porowego wody najczęściej odbywa się za pomocą filtra ze spieku metalu. Wyniki badań porównawczych wskazują na możliwość wykorzystania tej metody do wstępnej oceny przybliżonej wartości współczynnika filtracji (Elhakim, 2016; Wdowska i in., 2017). Dokładniejsze oszacowanie wartości współczynnika  $k$  można uzyskać w trakcie sondowań statycznych, wykorzystując do badań ściśliwości gruntu płaski dylatometr Marchettiego – DMT (Wdowska i in., 2017). W metodzie tej, podobnie jak w badaniach CPTu, wartości współczynnika filtracji zależą od zmian ciśnienia wody oddziałującej na sondę.

### Geofizyczne

Na użytek hydrogeologii jest wykorzystywana obszerna grupa badań geofizycznych (Assaad i in., 2004). Terenowe badania geofizyczne mogą być wykonywane powierzchniowo lub w otworach wiertniczych. Ich wyniki umożliwiają jakościową i ilościową analizę budowy geologicznej oraz warunków hydrogeologicznych. Warstwy skał o różnym stopniu nasycenia wodą cechują się specyficznymi właściwościami fizycznymi. Na podstawie tych właściwości gruntów (np. oporności) można pośrednio, szacunkowo określić m.in. ich współczynnik filtracji  $k$  (Coe i in., 2018).

W ramach powierzchniowego rozpoznania geofizycznego Polski są wykonywane badania geoelektryczne, a wśród nich elektrooporowe, oraz uzupełniająco sejsmiczne, geofizyki jądrowej i geotermiczne (Stenzel, Szymanko, 1973). Określenie jednoznacznej relacji między uzyskiwanymi wartościami parametrów geofizycznych, a wartością współczynnika filtracji  $k$  jest skomplikowanym zadaniem (Kirsch, 2009), tym bardziej że dotychczasowe metody badań skupiają się na jednowymiarowym wyznaczaniu wartości współczynnika filtracji, a rzadziej umożliwiają wyznaczenie dwuwymiarowego rozkładu wartości na podstawie parametrów geofizycznych. W celu zwiększenia dokładności wyznaczania wartości współczynnika filtracji jest stosowane odniesienie do testów referencyjnych. Przykładem takich badań jest zestawienie wyników tomografii elektrooporowej skał metamorficznych w pobliżu Shanghaju, które sąsiadują z uskokiem wypełnionym granitem, z wynikami próbných pompowań, dzięki czemu uzyskano lokalną zależność między wartością  $k$  a opornością  $R$  (Lu i in., 2021):

$$R [\Omega] = 8,14e^{1,23 \cdot k} \quad [6]$$

gdzie:

$k$  – współczynnik filtracji [m/d].

W ramach karotazu otworów wiertniczych wykonuje się kilka komplementarnych badań geofizycznych. Ich wynikami mogą być wykresy profilowania oporu, potencjałów samoistnych, naturalnego promieniowania gamma czy rozproszonego promieniowania gamma. Dzięki temu fizyczne właściwości ośrodka gruntowo-skalnego w profilu otworu są rozpoznawane na podstawie całego zestawu parametrów geofizycznych. Tak na przykład wyznaczenie przewodności hydraulicznej często polega na obliczeniu jej rozkładu na podstawie porowatości  $n$  (zależność Humble'a) oraz stopnia saturacji  $S_w$ , które są określane na podstawie zarejestrowanych wyników sondowania oporności elektrycznej  $R$  (odwrotności przewodności elektrycznej). Do tego celu najczęściej stosuje się wzór empiryczny Wyliego i Rose'a (Plewa, 1972):

$$\sqrt{K} [mD] = 250 \frac{n^3}{S_w} \quad [7]$$

gdzie:

$n$  – porowatość [-];

$S_w$  – stopień saturacji [-].

Uzyskiwana dokładność wyników pozwala na orientacyjne estymacje współczynnika filtracji ( $\pm 25\%$ ; Plewa, 1972). Zastosowanie wzoru Wyliego i Rose'a w karotazu geofizycznym przedstawili m.in. Alexeyev i in. (2017). Z powodu wysokich kosztów, jak również skomplikowanych operacji matematycznych, wykorzystywanych do interpretacji zarejestrowanych pomiarów, metody te nie należą do powszechnie stosowanych. Pomimo tego są one niezastąpione w szybkim, obszarowym poszukiwaniu warstw wodonośnych, określaniu możliwych kierunków przepływu wód (Hussain i in., 2020) oraz interpretacji wyników badań głębokich otworów rozpoznawczo-badawczych (Jarzyna i in., 1999).

## WYBÓR METODY WYZNACZANIA WSPÓLCZYNNIKA FILTRACJI $k$

Dobór odpowiedniej metody określania współczynnika filtracji  $k$  jest uzależniony od wyników wstępnej analizy warunków gruntowo-wodnych (w tym litologii badanych utworów). Właściwości filtracyjne piasków i żwirów tworzących warstwy wodonośne można badać za pomocą wielu metod (ryc. 2). Zawężenie wyboru metody badań wodoprzepuszczalności jest uzależnione od wymagań odnośnie: 1) dokładności wyników, 2) czasu badania, 3) możliwości technicznych i 4) czynników ekonomicznych.

Do badania właściwości gruntów słabo przepuszczalnych najczęściej wykorzystuje się metody laboratoryjne (ryc. 2). Jest to związane z możliwością zadawania znacznego gradientu hydraulicznego, przekraczającego jego wartość początkową, jak również w niektórych przypadkach z koniecznością prowadzenia długich obserwacji. Do szczegółowego zaplanowania metodyki badań filtracyjnych gruntów słabo przepuszczalnych lub składających się z różnych frakcji (piaskowej, pyłowej i ilowej) warto wykorzystać doświadczenia i rekomendacje określone w literaturze specjalistycznej, obejmujące niejednokrotnie wyniki badań porównawczych (np. Kaczyński i in., 1997; Nagy i in., 2013; Wdowska i in., 2017; Majer i in., 2018) oraz wytyczne zamieszczone w standardach technicznych, np. Instrukcji ITB 339/2003 (Wysokiński i in., 2003), PN-EN 1997-2 oraz PN-EN ISO 17892-11.

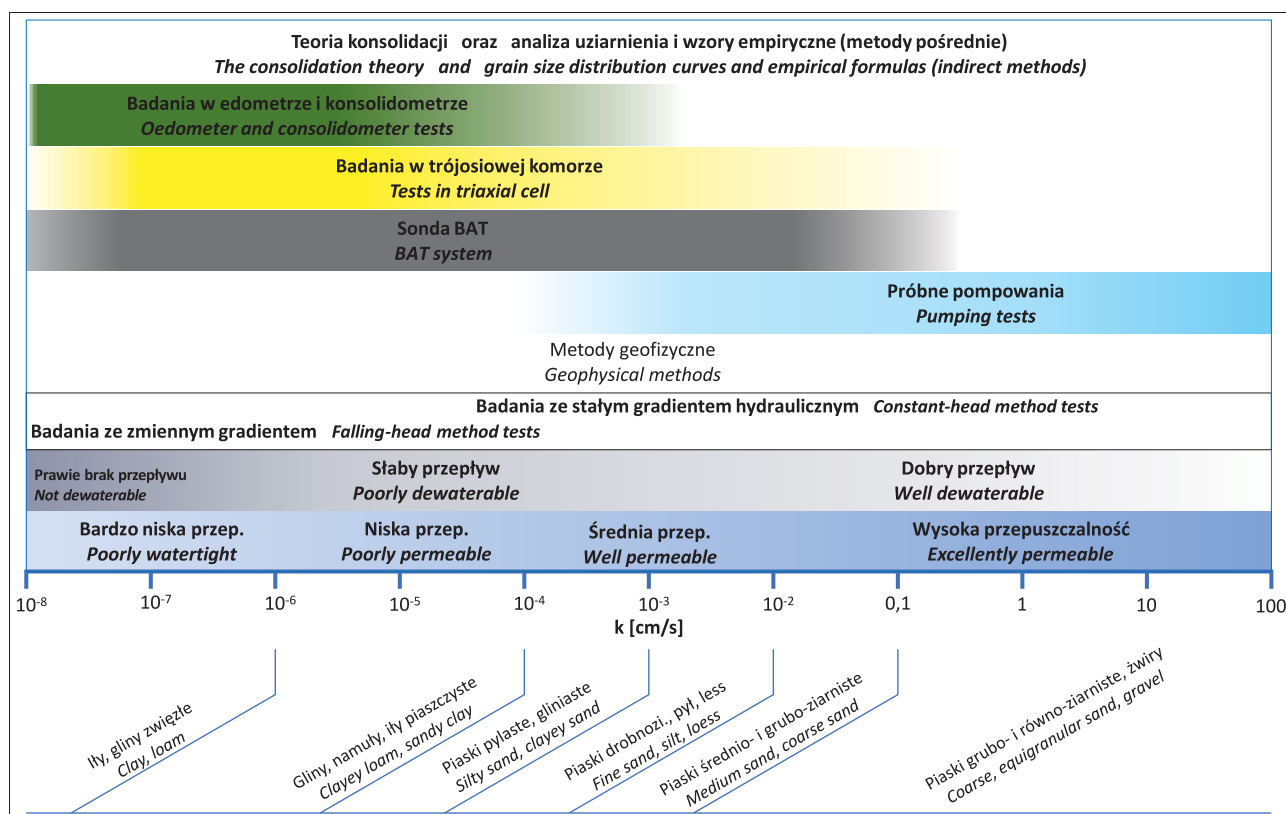
Spośród metod laboratoryjnych badania w aparacie trójosiowego ściskania są optymalnym rozwiązaniem w sytuacji: 1) konieczności określenia dokładnych param-

trów filtracyjnych słabo przepuszczalnego gruntu, 2) badań w różnych stanach naprężenia okólnego oddziałującego na grunt, 3) analizy wpływu różnych wartości gradientu hydraulicznego w kontekście gradientu początkowego i krytycznego, 4) uwzględnienia zmiennego stanu nasycenia gruntu.

Zagadnienie wyboru optymalnej metody badania właściwości filtracyjnych gruntów w zależności od ich litologii i typu przepływu wody jest bardzo złożone (ryc. 4). Granice stosowalności różnych metod nie są ostre, co jest związane m.in. z różnym stopniem niejednorodności gruntów. Przydatność poszczególnych metod wyznaczania współczynnika  $k$  (polowych, laboratoryjnych czy empirycznych) jest uzależniona od przepuszczalności gruntu. Nie można także wskazać metody badań, która w jednako-wo dokładny sposób umożliwiłaby wyznaczenie wartości współczynnika filtracji  $k$ .

## PODSUMOWANIE

Istnieje kilka grup metod wyznaczania współczynnika filtracji  $k$  (korelacyjne, laboratoryjne i polowe, w tym geofizyczne). Wybór odpowiedniej metody zależy od celu badań, prognozowanych zmian warunków gruntowo-wodnych oraz możliwości technicznych i ekonomicznych. Metody korelacyjne umożliwiają szybką, wstępną ocenę współczynnika filtracji. Metody laboratoryjne oferują szerszy zakres badań filtracji w różnych warunkach przepływu oraz możliwość szczegółowej rejestracji ich przebiegu. Metody polowe są stosowane w celu rozpoznania wypadkowej reakcji analizowanych utworów (najczęściej warstw



**Ryc. 4.** Zakresy stosowalności wybranych metod wyznaczania współczynnika filtracji  $k$  w zależności od właściwości gruntów i przepływu wody (według Freeze, Cherry, 1979; Pazdro, Kozerskiego, 1990; Wysokińskiego i in., 2003 oraz Nagya i in., 2013 – zmodyfikowane)

**Fig. 4.** Range of applicability of selected methods for determination of the hydraulic conductivity  $k$  depending on the soil properties and water flow (according to Freeze, Cherry, 1979; Pazdro, Kozerski, 1990; Wysokiński et al., 2003 and Nagy et al., 2013 – modified)

wodonośnych). Natomiast metody geofizyczne dają możliwość szybkiego zdefiniowania warunków gruntowo-wodnych i określenia szacunkowych zakresów wartości współczynnika filtracji.

Wyznaczenie współczynnika filtracji gruntu za pomocą wyłącznie jednej metody często nie daje odpowiedniej pewności wyniku. Rezultaty uzyskiwane za pomocą metod korelacyjnych i polowych warto porównywać z wynikami badań laboratoryjnych, podczas których warunki brzegowe mogą być kontrolowane w przestrzennym stanie naprężenia i odkształcenia. W innych sytuacjach badania laboratoryjne mogą stanowić wstępny etap, umożliwiający szczegółowe zaplanowanie badań polowych. Kontrolowanie warunków badań umożliwia prognozę przyszłych zmian parametrów gruntowych, na przykład postępujących w efekcie realizacji planowanych inwestycji. Wyznaczanie współczynnika filtracji jest bardzo istotnym, wieloaspektowym zagadnieniem, wykorzystywanym w różnych dziedzinach badawczo-inżynierskich – od hydrogeologii i hydrotechniki do geotechniki i geologii inżynierskiej.

Autorzy dziękują Recenzentom za czas poświęcony na sprawdzenie artykułu, cenne spostrzeżenia i uwagi. Artykuł opracowano dzięki dofinansowaniu badań z grantu dziekańskiego nr 504/04612, uzyskanego na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.

## LITERATURA

- ALEXEYEV A., OSTADHASSAN M., MOHAMMED R.A., BUBACH B., KHATIBI S., LI C., KONG L. 2017 – Well Log Based Geomechanical and Petrophysical Analysis of the Bakken Formation. [W:] 51<sup>st</sup> U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco.
- ASSAAD F., LAMOREAUX P.H.E., HUGHES T.H. 2004 – Field methods for geologists and hydrogeologists. Springer.
- COE J.T., BRANDENBERG S.J., AHDI S., KORDAJI A. 2018 – Geophysical methods for determining the geotechnical engineering properties of earth materials. Temple University.
- DĄBROWSKI S., PRZYBYŁEK J. 2005 – Metodyka próbnych pompowań w dokumentowaniu zasobów wód podziemnych. Min. Środ.
- DĄBSKA A. 2021 – Odporność filtracyjna piasków. Oficyna Wyd. PW.
- DOBĄK P. 1999 – Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. Studia, Rozprawy, Monografie, 65.
- DOWGIAŁŁO J., KLECZKOWSKI A.S., MACIOSZCZYK T., RÓZKOWSKI A. (red.) 2002 – Słownik hydrogeologiczny. Państw. Inst. Geol.
- ELHAKIM A. 2016 – Estimation of soil permeability. Alexandria Engineering J., 55 (3): 2631–2638.
- FREEZE R.A., CHERRY J.A. 1979 – Groundwater. Prentice Hall.
- HALA M., PETRULA L., ALHASAN Z. 2020 – Comparison of hydraulic conductivity values obtained from empirical formulae and laboratory experiments. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendeliana Brunensis, 68 (4): 669–678.
- HUANG S.-Y., BARBOUR S.L., FREDLUND D.G. 1994 – A History of the Coefficient of Permeability Function. Sino-Canadian Symposium on Expansive Soils/Unsaturated Soils. Wuhan, China.
- HUSSAIN Y., UAGODA R., BORGES W., NUNES J., HAMZA O., CONDORI C., ASLAM K., DOU J., CÁRDENAS-SOTO M. 2020 – The potential use of geophysical methods to identify cavities, sinkholes and pathways for water infiltration. Water, 12 (8): 2289, 1–19.
- JARZYNA J., BAŁA M., ZORSKI T. 1999 – Metody geofizyki otworowej. AGH.
- KACZMAREK Ł., WEJRZANOWSKI T., SKIBIŃSKI J., MAKSYM-CZUK M., KRZYŻAK A.T. 2017a – High-resolution computed microtomography for characterization of a diffusion tensor imaging phantom. Acta Geoph., 65 (1): 259–268.
- KACZMAREK Ł., YUFENG Z., KONIETZKY H., WEJRZANOWSKI T., MAKSYM-CZUK M. 2017b – Numerical Approach in Recognition of Selected Features of Rock Structure from Hybrid Hydrocarbon Reservoir Samples Based on Microtomography. Stud. Geotech. Mechanica, 39 (1): 13–26.
- KACZYŃSKI R., DRĄGOWSKI A., LASKOWSKI K., BARAŃSKI M., LEMIESZEK P., TRZCIŃSKI J., GRANACKI W., PORZEŻYŃSKI S., WOŹNICKI M. 1997 – Analiza porównawcza badań współczynnika filtracji gruntów spoistych wyznaczonego różnymi metodami. UW.
- KIRSCH R. 2009 – Groundwater Geophysics. 2<sup>nd</sup> Edition, Springer.
- KLECZKOWSKI A.S., SZCZPEAŃSKI A. 1973 – Przyczynki do porównań wartości współczynnika filtracji uzyskiwanych różnymi metodami. Zesz. Nauk. AGH, 361, Geologia, 17: 71–84.
- KROGULEC E. 1992 – Określenie wartości współczynnika filtracji osadów słaboprzepuszczalnych przy zastosowaniu systemu monitoringu BAT. Tech. Poszukiwań Geol., 5: 47–51.
- LU D., HUANG D., XU C. 2021 – Estimation of hydraulic conductivity by using pumping test data and electrical resistivity data in faults zone. Ecological Indicators, 129: 107861, 1–8. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107861
- MAJER E., SOKOŁOWSKA M., FRANKOWSKI Z. i in. 2018 – Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (w świetle wymagań Eurokodu 7). Państw. Inst. Geol.
- MALINOWSKA E., HYB M. 2004 – Wyznaczanie współczynnika filtracji na podstawie badań laboratoryjnych. Mat. konf. Geoinżynieria Środowiska. Transfer doświadczeń i dyrektyw Unii Europejskiej do nowo przyjeżdżających państw. Seminarium EU GEO ENV NET, Warszawa.
- MARCINIAK M. 1999 – Uniwersalny permeometr kolumnowy UPK-99. Instrukcja obsługi. Arch. UAM.
- NAGY L., TABACKS A., HUSZAK T., MAHLER A., VARGA G. 2013 – Comparison of permeability testing methods. [W:] Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris: 399–402.
- OLSEN H.W., GILL J.D., WILDEN A.T., NELSON K.R. 1991 – Innovations in hydraulic-conductivity measurements. Transportation research record, 1309: 9–17.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B. 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol.
- PISARCZYK S., RYMUSZA B. 2003 – Badania laboratoryjne i polowe gruntów. Oficyna Wyd. PW.
- PLEWA S. 1972 – Geofizyka wiertnicza. Wyd. Śląsk.
- PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 17892-11:2019-08 Rozpoznanie i badanie geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 11: Badania filtracji.
- POLAK K., GÓRECKI K. 2016 – Diagnostyka warunków pracy studni ujęciowej oraz systemu pompowo-łocznego na podstawie próbnego pompowania. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 8: 285–289.
- RIHA J., PETRULA L., HALA M., ALHASAN Z. 2018 – Assessment of empirical formulae for determining the hydraulic conductivity of glass beads. J. Hydrol. Hydromech., 66 (3): 337–347.
- ROGOŹ M. 2007 – Dynamika wód podziemnych. GIG.
- STENZEL P., SZYMANKO J. 1973 – Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich. Wyd. Geol.
- SZYMKIEWICZ A., KRYCZAŁŁO A. 2011 – Obliczanie współczynnika filtracji piasków i żwirów na podstawie krzywej uziarnienia: przegląd wzorów empirycznych. Inż. Morska i Geotech., 2: 110–121.
- TERZAGHI C. 1925 – Principles of Soil Mechanics: III – Determination of permeability of clay. Engineering News Record, 9 (21): 832–836.
- TORSTENSSON B.-A. 1984 – A new system for ground water monitoring. Groundwater Monitoring & Remediation, 4 (4): 131–138.
- TUREK S., DOWGIAŁŁO J., KOZERSKI B., KRAJEWSKI S., MACHER J., MACIOSZCZYK T., MALINOWSKI J., PACZYŃSKI B., PŁOCHNIEWSKI Z., STENZEL P., SZYMANKO J. 1971 – Poradnik hydrogeologa. Wyd. Geol.
- TWARDOWSKI K., DROŹDŹAK R. 2007 – Uwarunkowania dotyczące laboratoryjnych metod wyznaczania wodoprzepuszczalności. Wiertnictwo Nafta Gaz, 24 (1): 565–573.
- WDOWSKA M.K., LIPIŃSKI M.J., JAROŃ Ł. 2017 – Uwarunkowania doboru metody określenia współczynnika filtracji w gruntach spoistych. Acta Sci. Pol. Architectura, 16 (3): 47–57.
- WIECZOREK M. 2003 – Ocena wartości współczynnika filtracji oznaczonego za pomocą uniwersalnego permeometru kolumnowego UPK-99. [W:] Piekarek-Jankowska H., Jaworska-Szulc B. (red.), Współczesne Problemy Hydrogeologii, t. XI, cz. 1. Wyd. WBWiŚ Polit. Gd., Gdańsk: 475–480.
- WÓJCIK E. 2003 – Wpływ ciśnienia ssania na przepuszczalność wybranych gruntów spoistych. Rozpr. dokt., UW.
- WYSOKIŃSKI L., ŁUKASIK S., MAJER E. 2003 – Badania gruntów do budowy przesłon izolacyjnych na składowiskach odpadów. Instrukcja ITB nr 339/2003.
- ZAWRZYKRAJ P. 2017 – Ocena parametrów filtracyjnych ilów warwowych ze stanowiska Plecewice k. Sochaczewa w warunkach *in situ*. Prz. Geol., 65 (9): 587–596.
- ZHILENKOV V.N. 1986 – O vliyanii segregacii grunta na vodopronicamost vozvodimoy iz nego nasypyi. Izvestia VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 189: 56–61.

Praca wpłynęła do redakcji 10.08.2021 r.  
Akceptowano do druku 30.11.2021 r.