

OSZACOWANIE ZDOLNOŚCI FILTRACYJNYCH ODPADÓW POFLOTACYJNYCH WBUDOWANYCH W ZAPORY SKŁADOWISK NAMYWANYCH

Wojciech Tschuschke¹, Dagmara Skowrońska¹

¹ Instytut Budownictwa i Geoinżynierii, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska. Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94E, 60-649 Poznań, e-mail: ibig@up.poznan.pl

STRESZCZENIE

Budowa bardzo dużych obiektów unieszkodliwiania odpadów wydobywczych, do których niewątpliwie kwalifikują się mokre składowiska odpadów poflotacyjnych, jest skomplikowanym zadaniem inżynierskim, wymagającym rozwiązania szeregu zagadnień technicznych i środowiskowych. Projektowanie, budowa i eksploatacja takiego obiektu metodą obserwacyjną sprowadza się do weryfikacji założeń projektowych na podstawie prowadzonego na bieżąco monitoringu. Jednym z podstawowych zadań monitoringu jest, w miarę wypełniania składowiska odpadami, kontrola jakości formowanych nadbudów zapór, elementu konstrukcyjnego obiektu, odpowiedzialnego za jego stateczność. Wykorzystywanie do nadbudowy zapór wyselekcjonowanego z deponowanych odpadów materiału, wymaga zdefiniowania kryteriów uziarnienia i zagęszczenia, które przekładają się wprost na nośność i odkształcalność konstrukcji. Podstawowe badania kontrolne obejmują zatem analizy uziarnienia i właściwości fizycznych wbudowanego w zapory materiału. Dane te mogą być również wykorzystane do oszacowania zdolności filtracyjnych nasypu budowlanego. Brak możliwości odpływu, powodującego akumulację wody w obrębie nasypu, potencjalnie pogarsza warunki stateczności. W pracy zbadano przydatność wzorów empirycznych do oceny współczynnika filtracji odpadów, wzorów które powszechnie stosuje się do gruntów naturalnych. Zaproponowano również prostą formułę empiryczną pozwalającą oszacować współczynnik filtracji odpadów na bazie parametrów uziarnienia i zagęszczenia, określanych w rutynowych badaniach kontroli jakości formowanych nadbudów zapory.

Słowa kluczowe: współczynnik wodoprzepuszczalności, odpady poflotacyjne.

ESTIMATION OF FILTRATION CAPACITY OF POSTFLOTATION TAILINGS EMBEDDED IN DAMS OF TAILINGS DEPOSITION SITES

ABSTRACT

Construction of very big mine tailings deposition sites, such as postflotation tailings ponds, is a complicated engineering task, in which several technical and environmental problems need to be solved. Designing, construction and operation of such an object applying the monitoring method consists in the verification of design assumptions based on continuous observations. One of the primary tasks of monitoring while the deposition site is being filled with tailings is to control quality of the formed dam embankments, as the structural element of the object responsible for its stability. In order to use material selected from deposited tailings in the construction of dams it is necessary to define grain size and compaction criteria, which directly affect load bearing capacity and deformation of the structure. For this reason main control tests include the analyses of grain size distribution and physical properties of the material embedded in the dams. These data may also be used to estimate filtration capacity of the embankment. A lack of drainage, causing accumulation of water within the embankment, may potentially deteriorate stability conditions. This paper presents the use of empirical formulas, i.e. formulas typically applied to natural soils, to assess permeability coefficient of tailings. A simple empirical formula was also proposed for the estimation of permeability coefficient of tailings based on grain size and compaction parameters determined in routine quality tests of constructed dam embankments.

Keywords: permeability coefficient, postflotation tailings.

WSTĘP

Możliwie szerokie, wtórne wykorzystywanie odpadów w różnych gałęziach przemysłu jest niewątpliwie wyzwaniem obecnych czasów. Wiele rodzajów odpadów stanowi źródło cennych surowców wtórnych, które z powodzeniem nadają się do ponownego wykorzystania. Do grupy tego rodzaju odpadów należą odpady górnicze, zazwyczaj obojętne dla środowiska naturalnego. To co wyróżnia tę grupę odpadów to niewątpliwie znaczne ich ilości wytwarzane corocznie w procesie eksploatacji kopalni.

W odpady górnicze wpisują się odpady poflotacyjne, będące produktem ubocznym w procesie przeróbki rud metali nieżelaznych. Odpady poflotacyjne deponowane są w obiektach służących ich unieszkodliwianiu – składowiskach odpadów. Często, ze względu na znaczne ilości wytwarzanych odpadów, składowiska należą do mega budowli hydrotechnicznych, których konstrukcja jest dużej klasy zadaniem inżynierskim szczególnie wtedy, jeśli do budowy zapór składowiska wykorzystywany jest materiał tam deponowany. Ażeby urobek poflotacyjny spełnił wymogi materiału budowlanego, przydatnego do formowania zapór, konieczne jest zdefiniowanie właściwości geotechnicznych tego materiału. Na bazie tych właściwości konstruowane są kryteria jakości formowania obwałowań, które podlegają kontroli geotechnicznej. W praktyce inżynierskiej zazwyczaj są to kryteria uziarnienia i zagęszczenia wbudowanego w zapory materiału. Elementem istotnym z punktu widzenia eksploatacji i bezpieczeństwa obiektu jest również ocena zdolności filtracyjnych korpusu zapór. Ze względu na okoliczności, że odpady poflotacyjne stanowią

materiał różny od gruntów podłoża budowlanego, przydatność prostych formuł empirycznych do oszacowania współczynnika wodoprzepuszczalności musi być zweryfikowana.

W pracy podjęto próbę adaptacji tych związków do inżynierskiej oceny współczynnika wodoprzepuszczalności odpadów poflotacyjnych wbudowanych w zapory składowiska.

OBIEKT BADAŃ I MATERIAŁ BADAWCZY

Badania wykonano na największym w Europie obiekcie unieszkodliwiania odpadów wydobywczych Żelazny Most, który przyjmuje od ponad 38 lat wszystkie odpady górnicze pochodzące z przeróbki rud miedzi w Polsce. O skali tego obiektu świadczyć mogą jego parametry, które przedstawiają się następująco: maksymalna wysokość zapór – 63 m, całkowita ilość zdeponowanych odpadów – 530 mln m³, roczna produkcja odpadów – 18 mln m³, powierzchnia składowiska – 12,4 km², całkowita długość zapór otaczających składowisko – 14,3 km. [Jamiołkowski 2014, Świdziński i in. 2015].

Przyjęta technologia składowania odpadów metodą hydrotransportu i namywania odpadów z korony zapór, powoduje ich naturalną segregację sedymentacyjną, w wyniku której odpady o najgrubszym uziarnieniu osadzają się na tzw. plażach, w sąsiedztwie miejsc ich zrzutu, natomiast odpady drobniejsze spływają do centralnej części obiektu, gdzie swobodnie sedymentują w czaszy stawu wody nadosadowej (rys. 2, 3). W wyniku procesu formowania plaż, pozyskuje się z nich materiał, który wykorzystuje się do nadbudowy zapór.



Rys. 1. Ogólny widok na OUOW Żelazny Most [Jamiołkowski 2014]
Fig. 1. The general view of the OUOW Żelazny Most [Jamiołkowski 2014]



Rys. 2. Obserwowana strefa rozmycia w miejscu zrzutu odpadów [Tschuschke 2006]

Fig. 2. Observed plunnie pool at discharge point [Tschuschke 2006]

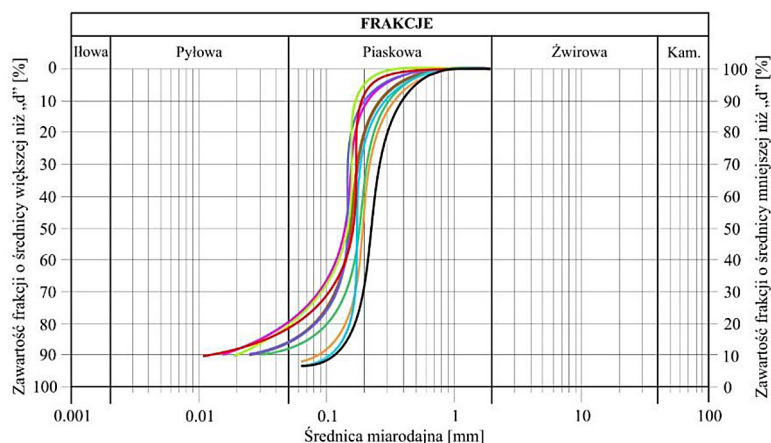
Pierwotnie silnie anizotropowy i warstwowy materiał zdeponowany na plaży ztraca tą charakterystykę w momencie zbierania, transportu i wbudowania osadów plaży w korpusy zapór. Zasięg strefy, z której pozyskiwane się odpady nadające się do konstrukcji zapór determinuje ich rzeczywiste, uśrednione uziarnienie, które stanowi jedno z kryteriów przydatności wbudowywanego w zapory materiału. Kryterium to ogranicza zawartość frakcji pyłowej i drobniejszej łącznie do 30%. Drugie kryterium zagęszczenia, dotyczy materiału wbudowanego już w zapory, zgodnie z którym wymagany wskaźnik zagęszczenia powinien uzyskać wartość większą od 0,92. [Tschuschke i in. 2015] Kryteria te nie odnoszą się bezpośrednio do wymagań materiału pod kątem jego zdolności filtracyjnych. W ocenie inżynierskiej natomiast, korzystne warunki odpływu zapewnia współczynnik wodoprzepuszczalności odpadów o wartości większej od 10^{-5} m/s.

Materiał do badań w ilości 9 prób pobrany został z korpusu uformowanych już zapór (4 próby) oraz z fragmentów plaży, miejsc potencjalnie przewidzianych do poboru osadów przeznaczonych do wbudowania w zapory (5 prób). Charakterystyki uziarnienia analizowanych prób osadów, określone na podstawie analizy sitowej na mokro, przedstawiono na krzywych uziarnienia (rys. 4), natomiast zagęszczalność odpadów charakteryzują krzywe zagęszczalności określone w próbie Proctora (rys. 5). Pod względem uziarnienia analizowany materiał, przez analogię do gruntów rodzimych, wpisuje się w piaski pylaste i drobne, a więc osady kwalifikujące się do nadbudowy zapór. W celu identyfikacji próbek osadów pod względem uziarnienia, wprowadzono wskaźnik uziarnienia *SFR*, który odnosi procentową zawartość cząstek zatrzymanych na sicie nr 200 (74 mm) – *S*, do procentowej zawartości cząstek,

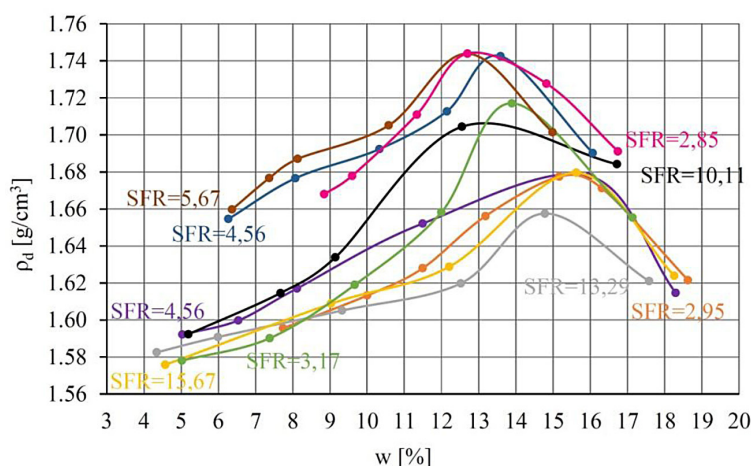


Rys. 3. Widok na obwałowania zapory wschodniej OUOW Żelazny Most [Tschuschke 2006]

Fig. 3. A view on the east dam of the Żelazny Most dump [Tschuschke 2006]



Rys. 4. Krzywe uziarnienia próbek osadów poflotacyjnych
 Fig. 4. The grain size distribution of postflotation sediments



Rys. 5. Wyniki badania zagęszczalności odpadów poflotacyjnych metodą Proctora
 Fig. 5. Standard Proctor test results for postflotation sediments

które w wyniku przemywania przenikną przez to sito – F [Tschuschke, Wierzbicki 2012].

$$SFR = \frac{S}{F} \quad (1)$$

W analizowanych próbkach osadów wartość wskaźnika SFR mieściła się w zakresie od 2,85 do 15,67. Parametry krzywej zagęszczenia osadów wykazywały zmienność w następującym zakresie: wilgotność optymalna – $w_{opt} = 12,54\text{--}15,58\%$ oraz maksymalna gęstość objętościowa szkieletu osadów – $r_{ds} = 1,658\text{--}1,743 \text{ g/cm}^3$.

METODY I WYNIKI BADAŃ

Współczynnik wodoprzepuszczalności zakwalifikowanych do analizy próbek osadów określono w dwojaki sposób. Pierwszy, na podstawie badań laboratoryjnych i drugi, wykorzystujący proste formuły empiryczne bazujące na

wskaźnikach uziarnienia i zagęszczenia osadów [Kozerski 1977].

Badania laboratoryjne współczynnika wodoprzepuszczalności osadów wykonano w standardowy aparacie o stałym spadku hydraulicznym ITBZW-k2. Próbkę o ustalonym uziarnieniu modelowano pod względem zagęszczenia w aparacie Proctora, odnosząc uzyskane zagęszczenie do wskaźnika zagęszczenia – I_s . Zagęszczenie osadów, wyrażające się wskaźnikiem zagęszczenia, mieściło się w zakresie od 0,806 do 1,039 wartości tego parametru. Badanie współczynnika wodoprzepuszczalności prowadzono przy stałym spadku hydraulicznym, wynoszącym 0,8 i ustalonym, stałym wydatku filtracji 100 cm^3 . Uzyskanie założonego wydatku wymagało w zależności od składu granulometrycznego i zagęszczenia osadów czasu pomiaru od około 2 min. do 55 min. Temperatura wody mieściła się w zakresie od $18 \text{ }^\circ\text{C}$ do $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Wszystkie wyznaczone doświadczalnie wyniki pomiarów współczynnika

wodoprzepuszczalności odniesiono do temperatury 10 °C, wykorzystując w tym celu zależność empiryczną zapisaną równaniem (2).

$$k_{10} = \frac{k_t}{0,7 + 0,03t} \quad (2)$$

gdzie: k_{10} – współczynnik wodoprzepuszczalności przy temperaturze wody 10 °C [m/s],
 k_t – współczynnik wodoprzepuszczalności przy temperaturze t , w której dokonano pomiaru [m/s],
 t – temperatura wody podczas badania [°C].

W celu oszacowania wartości współczynnika wodoprzepuszczalności na podstawie badań laboratoryjnych wykorzystano równanie (3).

$$k_t = \frac{Q}{A \cdot T \cdot i} \quad (3)$$

gdzie: Q – zmierzony wydatek przepływającej przez próbkę wody – 100 cm³,
 A – powierzchnia przekroju próbki osadów – 98,5 cm²,
 i – spadek hydrauliczny – 0,8,
 T – czas pomiaru przepływu [s].

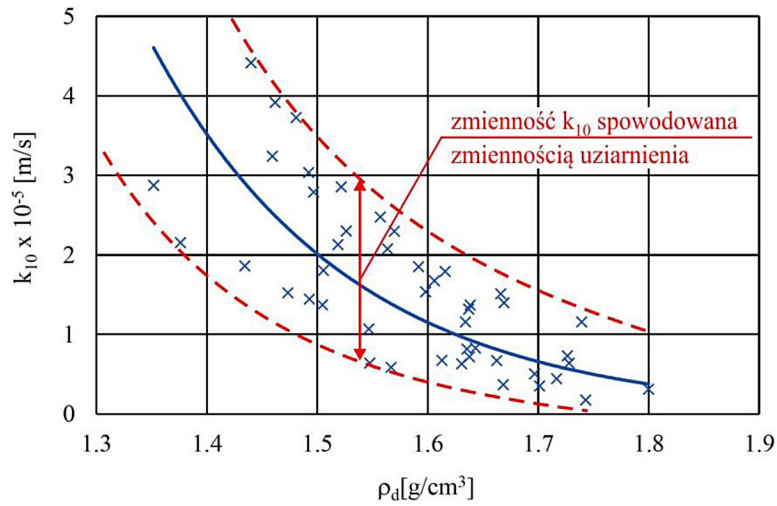
Dla analizowanych próbek osadów, które kwalifikują się do budowy zapór, uzyskano w badaniu

laboratoryjnym wartości współczynnika wodoprzepuszczalności mieszczące się w zakresie od $1,77 \cdot 10^{-6}$ m/s do $4,42 \cdot 10^{-5}$ m/s. Wyniki oznaczenia współczynnika wodoprzepuszczalności, w pierwszym przypadku – w zależności od zagęszczenia próbki wyrażonego gęstością objętościową szkieletu osadów przedstawiono na rysunku 6 oraz w drugim przypadku – w zależności od uziarnienia próbki, które reprezentuje wskaźnik SFR przedstawiono na rysunku 7. W obydwu przypadkach, za szeroki przedział zmienności współczynnika wodoprzepuszczalności odpowiedzialny jest czynnik, nie uwzględniany w analizowanym związku.

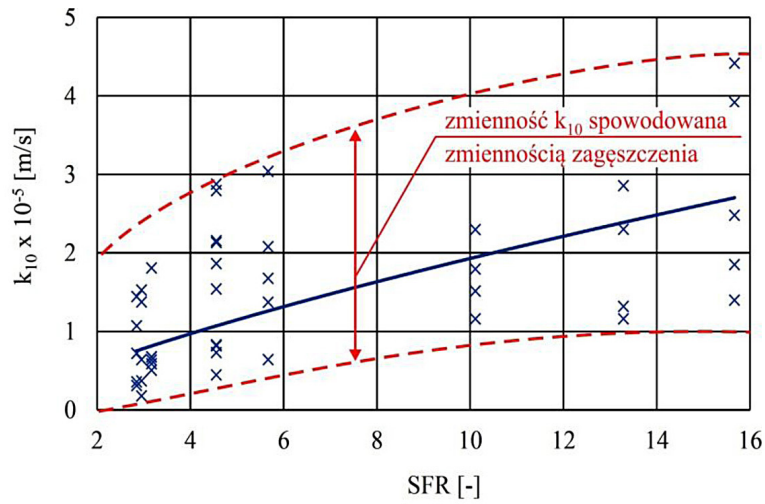
W metodzie drugiej, wskaźnik wodoprzepuszczalności analizowanych próbek osadów szacowano na podstawie wzorów empirycznych stosowanych powszechnie do oceny zdolności filtracyjnych gruntów rodzimych. W praktyce inżynierskiej stosowanych jest wiele bardzo prostych i nieco bardziej skomplikowanych formuł, w których oszacowanie wskaźnika wodoprzepuszczalności dokonuje się na bazie wyłącznie miar uziarnienia lub dodatkowo uwzględnia się w tej ocenie miary zagęszczenia i właściwości fizyczne filtrującej wody [Jabro 1992, Pyrlak i in. 2013, Twardowski, Drożdżak 2006].

Tabela 1. Zestawienie związków empirycznych stosowanych do oceny współczynnika wodoprzepuszczalności
Table 1. Selection of the empirical relationships used to assess the permeability coefficient

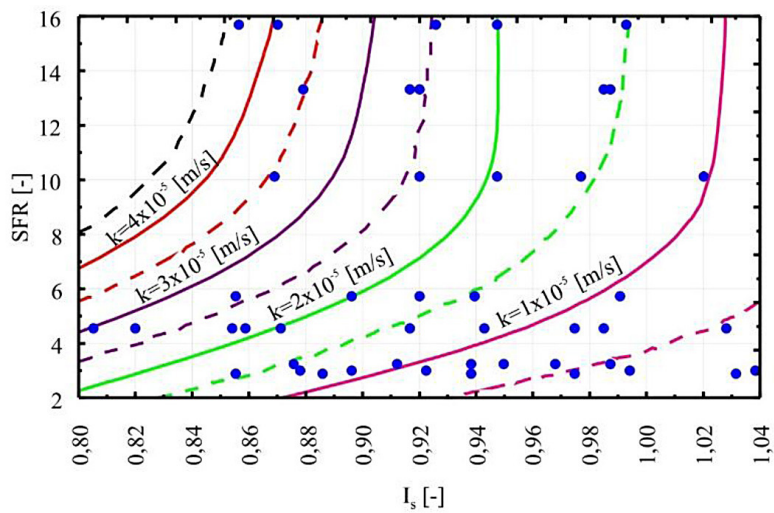
	Wzór	Oznaczenia
Hazena	$k_{10} = c \cdot d_{10}^2$	k_t – współczynnik filtracji przy temperaturze wody t °C, d_x – średnica cząstek, które stanowią wraz z mniejszymi $x\%$ [mm], c – współczynnik zależny od stopnia różnoziarnistości gruntu,
Hazena uproszczony	$k_{10} = 0,0116 \cdot d_{10}^2$	
Alyamaniego i Sena	$k_t = 1300 [I_0 + 0,025 (d_{50} - d_{10})]^2$	l_0 – minimalna średnica materiału gruntowego na sicie [mm], n – porowatość [-], β – współczynnik empiryczny zależny od uziarnienia,
USBSC	$k_{10} = 0,0036 d_{20}^{2,3}$	
Seelheima	$k_{10} = 0,357 d_{50}^2$	ρ – współczynnik liczbowy zależny od uziarnienia, u – współczynnik zależny od składu granulometrycznego, ρ – gęstość wody [kg/m ³], g – przyspieszenie ziemskie [m/s ²], μ – lepkość dynamiczna cieczy [Pa×s], β_F – współczynnik zależny od wykształcenia przestrzeni porowej,
Zauerbreja	$k_{10} = \beta \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{17}^2$	
Zunckera	$k_t = c \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \frac{1}{u^2} (1 + 0,034t)$	α – współczynnik kształtu ziarn, P_m – procentowa różnica zawartości między frakcjami w analizie sitowej, d_m – średnia geometryczna średnic pomiędzy przedziałami klasowymi [m], m – liczba przedziałów klasowych, v – lepkość kinematyczna cieczy [m ² ×s], c_k – współczynnik zależny od kształtu ziarn, U_d – wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia [-].
Kozeny-Carmana	$k_t = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \cdot \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \cdot \left(\frac{d_m^2}{180} \right)$	
Faira i Hatcha	$k_t = \left(\frac{\rho g}{\mu} \right) \cdot \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \cdot \frac{1}{\beta_F \left(\frac{\alpha}{100} \sum_{m=0}^N \frac{P_m}{d_m} \right)^2}$	
Slichtera	$k_t = \frac{g}{v} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot n^{3,287} \cdot d_{10}^2$	
Terzagiego	$k_t = \frac{c_k}{\mu_t} \left(\frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_{10}^2$	
Breyera	$k_t = \frac{g}{v} \times 6 \times 10^{-4} \log \frac{500}{U_d} d_{10}^2$	



Rys. 6. Zależność pomiędzy współczynnikiem wodoprzepuszczalności a gęstością objętościową osadów
Fig. 6. Relationship between the coefficient of permeability and the bulk density of tailings



Rys. 7. Zależność pomiędzy współczynnikiem wodoprzepuszczalności a wskaźnikiem uziarnienia SFR osadów
Fig. 7. Relationship between the coefficient of permeability and the SFR coefficient of tailings



Rys. 8. Zależność pomiędzy współczynnikiem wodoprzepuszczalności, wskaźnikiem zagęszczenia i wskaźnikiem uziarnienia SFR osadów
Fig. 8. Relationship between the coefficient of permeability, the relative compaction and the SFR coefficient of tailings

Kilka z formuł, które wykorzystano w analizie przedstawiono w tabeli 1. Pięć pierwszych wzorów z tabeli należy do grupy najprostszych formuł empirycznych wymagających w celu oszacowania współczynnika wodoprzepuszczalności znajomości wyłącznie określonych średnic miarodajnych analizowanego materiału gruntowego. Co prawda część tych wzorów wprowadza dodatkowe ograniczenia co do wymaganego wskaźnika różnoziarnistości lub przedziału uziarnienia wymaganej średnicy miarodajnej. Tym niemniej ze względu na nieskomplikowaną postać formuły, te często stosowane są w prostych obliczeniach inżynierskich.

Drugą grupę formuł reprezentowaną w tabeli 1 przez dwa kolejne wzory, wyróżnia wprowadzenie do analizy oprócz określonego parametru uziarnienia drugiego czynnika związanego z porowatością gruntu. Formalnie zatem wzory te powinny bardziej realistycznie odzwierciedlać filtrację wody przez ośrodek porowaty.

Trzecia grupa wzorów prezentowana w tabeli 1 kwalifikuje się do nieco bardziej złożonych formuł empirycznych, które wymagają dodatkowo znajomości właściwości fizycznych filtrującej wody. Cechą wspólną większości analizowanych formuł, która z praktycznego punktu widzenia może być w przypadku osadów poflotacyjnych postrzegana jako ograniczenie w ich wykorzystaniu, są średnice miarodajne związane z dolnym fragmentem krzywej uziarnienia. Problem pojawia się wówczas, gdy więcej procentowo materiału przenikanie przez najdrobniejsze sito niż wynosi miara średnicy miarodajnej, którą wykorzystuje określona formuła. W takim przypadku konieczna jest interpolacja dolnego fragmentu krzywej uziarnienia w celu określenia wymaganej średnicy miarodajnej lub uzupełnienie analizy sitowej innym badaniem np. analizą areometryczną.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

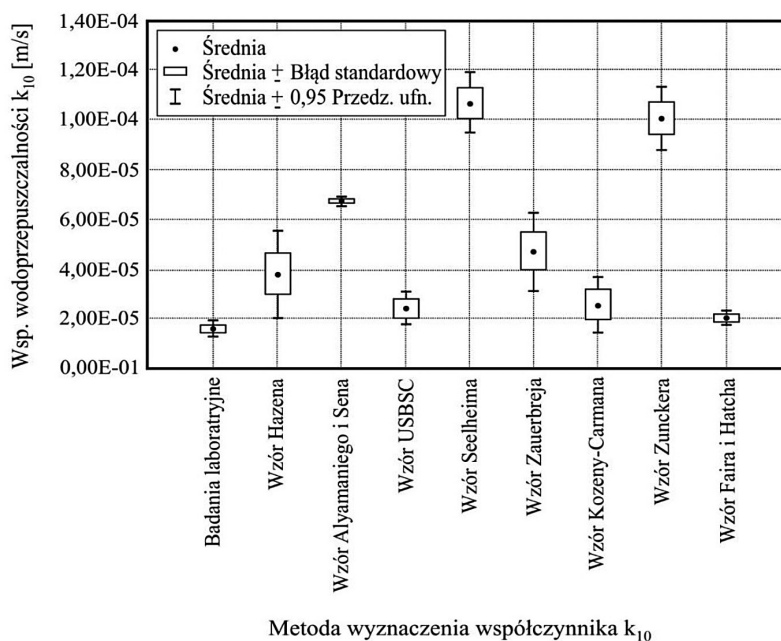
Wyniki badań laboratoryjnych współczynnika wodoprzepuszczalności osadów poflotacyjnych wykorzystywanych do formowania nadbudowy zapór wykazały, że dwoma, bardzo istotnymi czynnikami, które determinują zdolności filtracyjne tego materiału są niewątpliwie uziarnienie (rys. 4) i zagęszczenie osadów (rys. 5). Każdy z tych czynników jest niezwykle istotny i powinien zostać w analizie uwzględniony. W tym

calu zastosowano metodą regresji wielokrotnej, w wyniku której otrzymano formułę umożliwiającą określenie współczynnika wodoprzepuszczalności osadów, na podstawie zidentyfikowanych wcześniej miar zagęszczenia i uziarnienia analizowanego materiału. Statystyczną postać tego związku, charakteryzującego się bardzo korzystną wartością współczynnika determinacji ($R^2 = 0,94$), prezentuje wzór (4), natomiast jego interpretację geometryczną przedstawia rysunek 8.

$$k_{10} = [29,15 + 1,43 \cdot SFR - 57,55 \cdot I_s - 1,16 \cdot SFR \cdot I_s + 28,07 \cdot (I_s)^2] \cdot 10^{-5} \text{ [m/s]} \quad (4)$$

Analiza przydatności wzorów empirycznych, które powszechnie wykorzystuje się w praktyce inżynierskiej do oceny filtracji gruntów podłoża, wykazała zróżnicowaną przydatność tych wzorów w ocenie współczynnika wodoprzepuszczalności osadów poflotacyjnych. Specyfika materiału wytworzonego w procesie kruszenia i mielenia skały macierzystej oraz podczas procesu flotacji i hydrotransportu powoduje, że odpady poflotacyjne w zależności od pierwotnej morfologii urobku górniczego charakteryzuje określona ostrokrawędzistość ziaren, ich kruchość oraz skład chemiczny osadów. Czynniki te w istotny sposób determinują właściwości filtracyjne odpadów poflotacyjnych kwalifikujących się do budowy zapór. Znajduje to wyraźne odzwierciedlenie w wynikach analizy porównawczej przydatności formuł empirycznych na potrzeby oceny współczynnika wodoprzepuszczalności osadów poflotacyjnych (rys. 9).

Zdecydowanie najbardziej zbliżoną do wyników oznaczeń laboratoryjnych ocenę współczynnika wodoprzepuszczalności osadów uzyskuje się na bazie formuły Faira Hatcha. Zbieżność oceny widoczna jest w zakresie przedziału zmienności oszacowania, wartości oczekiwanej oraz współczynnika determinacji dla korelacji pomiędzy wartościami mierzonymi i określonymi empirycznie ($R^2 = 0,83$). Niedogodnością powyższej formuły jest konieczność określenia współczynników empirycznych związanych z kształtem ziaren oraz porowatością ośrodka. Znacznie prostszą zależnością empiryczną, która może być warunkowo rekomendowana do oceny współczynnika wodoprzepuszczalności osadów poflotacyjnych jest formuła USBSC ($R^2 = 0,64$). Stosowanie tej formuły wymaga jednak wprowadzenia do równania współczynnika redukcyjnego. Stosowanie pozostałych zależności empirycznych w przypadku osadów poflotacyjnych prowadzi zazwy-



Rys. 9. Statystyczne porównanie wyników badań laboratoryjnych i oszacowania metodami empirycznymi współczynnika wodoprzepuszczalności osadów poflotacyjnych.

Fig. 9. Statistical comparison of laboratory test results and empirical estimation of the tailings coefficient of permeability

czaj do przeszacowania wartości współczynnika wodoprzepuszczalności. Na ograniczoną przydatność tych związków wskazują również niskie wartości współczynników determinacji ($R^2 < 0,6$) w odniesieniu do wyników badań laboratoryjnych. Na rysunku 9 nie przedstawiono wyników oszacowania współczynnika wodoprzepuszczalności na podstawie trzech formuł empirycznych z tabeli 1, które dawały nierealistyczną ocenę tego parametru, charakteryzując się zarazem niską wartością współczynnika determinacji ($R^2 < 0,5$).

ograniczeniem zawartości frakcji mniejszej od 0,05 mm do 20%. W celu oszacowania współczynnika wodoprzepuszczalności osadów poflotacyjnych wykorzystywanych do formowania nadbudowy zapór, na podstawie wyznaczonych w rutynowych badaniach kontrolnych miar uziarnienia i zagęszczenia osadów, rekomenduje się zależność empiryczną wyrażoną równaniem (4). Na potrzeby szybkiej oceny inżynierskiej tego parametru wykorzystać można również diagram interpretacyjny przedstawiony na rysunku 8.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania oraz wyniki analiz dokumentują osady poflotacyjne jako materiał na tyle specyficzny i odmienny od gruntów rodzimych, że stosowane powszechnie w geotechnice związki empiryczne do oceny współczynnika wodoprzepuszczalności prowadzą zazwyczaj do zawyżonej oceny tego parametru. W rzeczywistości odpady poflotacyjne wykazują gorsze zdolności filtracyjne od gruntów naturalnych. Fakt ten powinien być uwzględniany przy formułowaniu kryteriów jakości budowy zapór formowanych z odpadów poflotacyjnych. Zapewnienie gwarantowanej filtracji korpusu zapory przy jego wymaganym zagęszczeniu, prowadzi do weryfikacji kryterium uziarnienia osadów wyrażającego się

LITERATURA

1. Jabro J. 1992. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soil from particle size distribution and bulk density data. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 35, 557–560.
2. Jamiolkowski M. 2014. Soil mechanics and the observational method: challenges at the Żelazny Most copper tailings disposal facility. Géotechnique, 64(8), 590–619.
3. Kozerski B. 1977. Zasady obliczeń hydrogeologicznych ujęć wód podziemnych. Wytyczne określania współczynnika filtracji metodami pośrednimi i laboratoryjnymi. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.
4. Pyrlak K., Zięba Z., Bułdys A., Witek K. 2013. Weryfikacja wyznaczania współczynnika filtracji gruntów niespoistych za pomocą wzorów em-

- pirycznych w ujęciu ich mikrostruktury. *ACTA Scientiarum Polonorum, Architectura, Budownictwo*, 12(2), 43–51.
5. Świdziński W., Tschuschke W., Świerczyński W., Wolski W. 2015. Obiekt unieszkodliwiania odpadów wydobywczych Żelazny Most – olbrzymie wyzwanie geotechniczne. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 186–193.
 6. Tschuschke W. 2006. Sondowania statyczne w odpadach poflotacyjnych. *Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej nr 1738, seria Budownictwo*, z. 110, ss. 266.
 7. Tschuschke W., Gogolik S., Kroll M., Walczak M. 2015. Miary zagęszczenia odpadów poflotacyjnych w kontekście kryteriów odbiorów robót ziemnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 200–203.
 8. Tschuschke W., Wierzbicki J. 2012. Use of post-fotation copper tailings in the construction of dump dams. *Second International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment "GEOMATE" Kuala Lumpur, Malaysia*, 190–195.
 9. Twardowski K., Drożdżak R. 2006. Pośrednie metody oceny właściwości filtracyjnych gruntów. *Wiertnictwo Nafta Gaz*, 23(1), 477–486.