

## Zmiany właściwości filtracyjnych mieszanki gruntowej ił-piasek na skutek zanieczyszczenia produktami ropopochodnymi w aspekcie mineralnych barier izolacyjnych

Piotr Stajszczyk<sup>1</sup>



**Changes in the filtration properties of the sand and clay mixture as a result of contamination with petroleum products in the aspect of mineral insulation barriers.** Prz. Geol., 69: 33–42; doi: 10.7306/2021.3

*A b s t r a c t.* The paper presents the results of research on the filtration coefficient of soil mixtures prepared from ice-dammed lake clays and aeolian sand. The determination of permeability coefficient made by the indirect and direct methods confirmed the influence of hydrocarbon contamination on changes in the permeability coefficient value. The implemented program of laboratory tests made it possible to propose a criterion that can be used to compare the filtration coefficient values determined by the applied research methods.

**Keywords:** soil mixtures, permeability, hydrocarbons, CRL test, permeameter test

Filtracja w ośrodku gruntowym jest rozumiana jako ruch wody w przestrzeni porowej gruntu, który polega na bardzo powolnym przesączaniu fazy ciekłej (wody) przez złożony system porów oraz szczelin (Pazdro, 1983). Aby w gruntach spoistych został uruchomiony proces filtracji niezbędne jest wygenerowanie odpowiednich wartości spadku hydraulicznego  $I_0$ , dzięki którym będzie możliwe pokonanie początkowych oporów ośrodka gruntowego. Opory te wynikają w znacznej mierze ze zwilżania powierzchni kanałów przepływu oraz wyparcia gazów zawartych w przestrzeniach porowych, ich niewielkich przekrojów oraz znacznej krętości – tarcie pasywne (Pazdro, 1983; Dowgiałło i in., 2002; Macioszczyk, 2006).

Zdolność gruntu do przepuszczania wody systemem połączonych porów opisuje współczynnik filtracji oznaczony symbolem  $k$ . Parametr ten wyraża prędkość filtracji przy spadku hydraulicznym równym jedności. Wartości współczynnika filtracji zależą zarówno od cech ośrodka gruntowego (porowatość, skład granulometryczny, skład minerałów ilastych, zagęszczenie, przekonsolidowanie), jak również właściwości przepływającej cieczy (lepkość, gęstość) i są najczęściej podawane w m/d, m/h lub m/s (Pazdro, 1983; Macioszczyk, 2006).

Ruch wody podziemnej w obrębie ośrodka gruntowego opisuje liniowe prawo Darcy'ego. Odstępstwa od wspomnianego prawa są obserwowane w strefie małych oraz dużych prędkości filtracji. Wynikają one głównie z tarcia wewnętrznego, adhezji, inercji oraz turbulentnego charakteru przepływu fazy ciekłej przy dużych prędkościach filtracji (Macioszczyk, 2006). Z tego względu w gruntach mineralnych wyróżnia się trzy fazy procesu filtracji, są to (Wiłun, 1987; Macioszczyk, 1974, 2006):

- faza prelinearna – występuje przy bardzo małych prędkościach filtracji  $v$ ,
- faza liniowa – odpowiada liniowemu prawu filtracji Darcy'ego,
- faza postlinearna – jest związana z bardzo dużymi prędkościami filtracji  $v$ .

W fazie prelinearnej zależność pomiędzy spadkiem hydraulicznym i prędkością filtracji  $v$  jest krzywoliniowa. Przyjmuje się, że faza prelinearna kończy się w momencie osiągnięcia spadku hydraulicznego  $12I_0$  (Macioszczyk, 2006). Proces filtracji po przekroczeniu wartości  $12I_0$  zachodzi w fazie linearnej (liniowej) i jest opisywany liniowym prawem Darcy'ego (zależność pomiędzy  $i$  oraz  $v$  można opisać funkcją liniową). Przy dużych prędkościach przepływu rozpoczyna się faza postlinearna, w trakcie której przepływ fazy ciekłej przez przestrzeń porową gruntu wykazuje charakter inercyjny lub turbulentny (Kaczyński, 1969; Lambe, Whitmann, 1977; Pazdro, 1983; Wiłun, 1987; Dowgiałło i in., 2002; Macioszczyk, 1974, 2006).

Zmiany właściwości filtracyjnych gruntów spoistych spowodowane zanieczyszczeniem paliwami ropopochodnymi stanowią istotny element rozważań zarówno naukowych, jak i praktycznych. Grunty spoiste ze względu na niską przepuszczalność w praktyce inżynierskiej często stanowią bariery izolacyjne dla wszelkiego rodzaju składowisk odpadów (Łuczak-Wilamowska, 1997; Choma-Moryl, 2001). Uszczelnienia składowisk odpadów uformowane z gruntów naturalnych muszą spełniać odpowiednie kryteria, które obecnie szczegółowo reguluje Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów (Rozporządzenie, 2013). Według tego aktu prawnego minimalna miąższość i wartość współczynnika filtracji naturalnej bariery geologicznej dla składowisk odpadów powinna wynosić:

- odpady niebezpieczne: miąższość warstwy uszczelniającej nie mniejsza niż 5 m, współczynnik filtracji  $k < 1,0 \times 10^{-9}$  m/s;
- odpady inne niż niebezpieczne i obojętne: miąższość warstwy uszczelniającej nie mniejsza niż 1m, współczynnik filtracji  $k < 1,0 \times 10^{-9}$  m/s;
- odpady obojętne: miąższość warstwy uszczelniającej nie mniejsza niż 1m, współczynnik filtracji  $k < 1,0 \times 10^{-7}$  m/s.

W miejscach, w których budowa geologiczna nie spełnia wymogów stawianych naturalnym barierom geolo-

<sup>1</sup> Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., ul. Wałbrzyska 14/16, 02-739 Warszawa; piotrek25104@wp.pl

gicznym, Rozporządzenie (2013) zaleca wybudowanie sztucznej bariery geologicznej o minimalnej miąższości 0,5 m. Sztuczna bariera geologiczna powinna odznaczać się przepuszczalnością nie większą niż zalecana dla barier naturalnych i być zbudowana w taki sposób, aby osiadanie składowiska nie spowodowało jej uszkodzenia.

Wymagania stawiane barierom geologicznym w zakresie wartości współczynnika filtracji wskazują, że gruntami predysponowanymi do uszczelnienia składowisk odpadów, w ujęciu normy PN-88/B-04481, mogą być grunty związane oraz bardzo spoiste, które zawierają co najmniej 20–30% frakcji ilowej.

Prowadzone dotychczas prace badawcze nad izolacyjnymi właściwościami mieszanek gruntowych wykazały, że odpowiednie przygotowanie mieszanki łu z piaskiem w wielu przypadkach może stanowić przydatny, a zarazem alternatywny względem naturalnych gruntów spoistych, materiał do formowania warstw izolacyjnych, szczególnie na zboczach składowisk odpadów (Łuczak-Wilamowska 1997, 2013; Drągowski, Łuczak-Wilamowska, 2005). Badania prowadzone przez Drągowskiego i Łuczak-Wilamowską (2005) wskazują, że odpowiednio przygotowane mieszanki łu z piaskiem, w porównaniu z typowym materiałem ilastym, będą wykazywać niższą ekspansywność oraz korzystniejsze wartości parametrów wytrzymałościowych, zachowując przy tym dobre właściwości izolacyjne. Stwierdzenie to jest szczególnie istotne przy rozpatrywaniu zmian właściwości geologiczno-inżynierskich mineralnych barier izolacyjnych, które mają bezpośredni kontakt ze związkami migrującymi w obrębie składowiska odpadów, w tym ze związkami pochodzenia organicznego – węglowodorami. Według badań prowadzonych przez różnych autorów (Srivastawa, Pandey, 1997; Barański, 2000; Korzeniowska-Rejner, 2001; Czado i in., 2010; Karkush i in., 2013) obecność produktów ropopochodnych w przestrzeni porowej gruntów mineralnych pogarsza ich wytrzymałość oraz zwiększa ściśliwość, co w skrajnych przypadkach może prowadzić do nierównomiernych osiadań w obrębie podłoża składowiska, powodując tym samym jego uszkodzenie oraz rozszczelnienie. Fakt ten może stanowić realne zagrożenie dla poprawnego funkcjonowania składowisk odpadów oraz wszelkiego rodzaju miejsc magazynowania oraz wykorzystywania produktów ropopochodnych.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych, które autor prowadził na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Zrealizowany program badań laboratoryjnych miał na celu:

- ocenę wpływu wybranych produktów ropopochodnych na zmianę zdolności filtracyjnych mieszanki gruntowej przygotowanej z czwartorzędowego łu zastoiskowego oraz piasku eolicznego – potencjalnego budulca mineralnej bariery izolacyjnej;
- ocenę wpływu wybranych właściwości fizycznych produktu ropopochodnego (gęstości, lepkości) na uzyskiwane wartości współczynnika filtracji mieszanki gruntowej;
- ocenę przydatności wybranych laboratoryjnych metod oznaczania współczynnika filtracji w badaniach gruntów spoistych zanieczyszczonych w różnym stopniu produktami ropopochodnymi.

## METODY BADAWCZE

Materiał gruntowy wykorzystany do przygotowania mieszanek gruntowych stanowią czwartorzędowe ły zastoiskowe z rejonu Plecewic oraz piasek eoliczny pobrany w miejscowości Międzyborów k. Żyrardowa (woj. mazowieckie). Wybór piasku wydmowego jako materiału badawczego był podyktowany przede wszystkim jego jednorodnością granulometryczną oraz mineralną. Wytypowane do badań laboratoryjnych piaski eoliczne zostały osadzone na przełomie plejstocenu oraz holocenu w wyniku intensywnych procesów eolicznych, które we wspomnianym okresie czasu uformowały pola wydmowe spotykane dziś w rejonie Żyrardowa (Szalewicz, Włodek, 2009). ły zastoiskowe zastosowane w badaniach pobrano z kopalni odkrywkowej w Plecewicach koło Sochaczewa (woj. mazowieckie). Opisujące grunty spoiste w warunkach *in situ* są wykształcone w postaci łów warwowych, dla których charakterystyczne jest występowanie naprzemianległych warstw jasnych oraz ciemnych. Wybrane do badań grunty zastoiskowe występują na powierzchni terenu wzdłuż krawędzi tarasu błońskiego i stanowią nieprzerwany kompleks, który od Plecewic do miejscowości Kampinos (woj. mazowieckie) tworzy jedną całość (Haisiga, Wilanowski, 2008). Próbkę łów zastoiskowych pobrane w trakcie prac terenowych reprezentowały pełny cykl sedimentacyjny, tj. składały się zarówno z warstw jasnych, jak i ciemnych. W warunkach laboratoryjnych pobrane grunty spoiste homogenizowano poprzez rozdrobnienie oraz mieszanie. Dzięki temu ich skład granulometryczny i mineralny został ujednoczony, co było niezbędne do poprawnego zrealizowania przyjętego programu prac laboratoryjnych.

Mieszanki gruntowe na potrzeby prowadzonych badań przygotowywano w szklanych pojemnikach, w których mieszano wysuszony piasek drobny ze sproszkowanym łem zastoiskowym o wilgotności powietrzno-suchej. Przygotowane grunty mieszano w takich ilościach wagowych, aby udział łu zastoiskowego nie przekraczał 27–28% masy gotowej mieszanki gruntovej. Przy założeniu, że w dodawanej ilości łu frakcja ilowa stanowiła 78–80% obliczono, iż przygotowywane w ten sposób próbki charakteryzowały się zawartością cząstek mniejszych od 0,002 mm w przedziale od 17 do 23%. Tak przygotowany materiał gruntowy w celu odpowiedniej homogenizacji był następnie wielokrotnie mieszany ręcznie przez kilka dni. Po etapie homogenizacji przygotowane próbki zalewano wodą dejonizowaną tak, aby uzyskiwana wilgotność mieszanek gruntowych odpowiadała wartości równej 1,0–1,1 $w_L$ . Po dokładnym wymieszaniu przygotowanych próbek umieszczano je w teflonowych cylindrach i konsolidowano przez 4–5 tygodni pod stałym obciążeniem wynoszącym 20 kPa. Równoległe do próbek nie zawierających węglowodorów w przestrzeni porowej przygotowano mieszanki gruntovej z dodatkiem paliwa lotniczego Jet A1 oraz oleju mineralnego 15W40. Produkty ropopochodne dodawano do przygotowanych mieszanek łu z piaskiem po zakończeniu ręcznej homogenizacji, następnie pozostawiano je w szczelnie zamkniętych pojemnikach na 4–5 tygodni, po czym zalewano wodą dejonizowaną. Zawartość paliwa lotniczego Jet A1 oraz oleju mineralnego 15W40 w badanych próbkach wynosiła odpowiednio 2 oraz 10% wagowych.

**Tab. 1.** Wybrane parametry fizyczne produktów ropopochodnych  
**Table 1.** Selected physical parameters of petroleum products

Cecha <i>Characteristic</i>	Paliwo lotnicze Jet A1 <i>Aviation fuel JET A1</i>	Olej mineralny 15W40 <i>Mineral oil 15W40</i>	Woda <i>Water</i>
Barwa <i>Colour</i>	jasny żółty <i>light yellow</i>	brązowo-żółty <i>brown-yellow</i>	bezbarny <i>colourless</i>
Stan skupienia w temperaturze pokojowej <i>Physical state at room temperature</i>	ciecz <i>liquid</i>		
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ] <i>Density [g/cm<sup>3</sup>]</i>	0,77–0,84	0,882	1,00
Lepkość kinematyczna [mm <sup>2</sup> /s] <i>Kinematic viscosity [mm<sup>2</sup>/s]</i>	1,2–1,7 temperatura 20–40°C <i>temperature 20–40°C</i>	13,5–16,3 temperatura 100°C <i>temperature 100°C</i>	1,0 temperatura 20°C <i>temperature 20°C</i>
Temperatura zapłonu [°C] <i>Flash-point [°C]</i>	>38	>315	–
Rozpuszczalność w wodzie <i>Water solubility</i>	nierozpuszczalny i niemieszalny <i>insoluble and not miscible</i>		–
Stała dielektryczna <i>Dielectric constant</i>	~2		~80

Zastosowane w badaniach produkty ropopochodne wykazują względem siebie odmienne właściwości fizykochemiczne (lepkość, gęstość), dzięki czemu możliwe było uwzględnienie tej zmienności w analizie zachodzących zmian właściwości filtracyjnych gruntów zanieczyszczonych (tab. 1).

Współczynnik filtracji mieszanek gruntowych wyznaczono w sposób pośredni oraz bezpośredni.

W sposób pośredni wartości współczynnika filtracji wyznaczono na podstawie badań ściśliwości, które wykonano w konsolidometrze. Wszystkie badania konsolidometryczne opisane w niniejszej pracy zostały przeprowadzone w komorze Bardena-Rowe'a, przy schemacie zakładającym stałą prędkość przyrostu obciążenia (badania CRL – *Constant Rate of Loading*) (Head, 1986). W trakcie badań konsolidacji CL mieszanki gruntowe obciążano z prędkością wynoszącą 100 oraz 200 kPa/h. Badanie CRL kończono w chwili osiągnięcia naprężenia całkowitego o wartości 2000 kPa. Przyjęcie różnych prędkości obciążenia przy niejednakowym dodatku płynnych węglowodorów umożliwiło zbadanie zgodności uzyskiwanych rozkładów ciśnień porowych w środowisku cieczy ropopochodnych z istniejącymi rozwiązaniami teoretycznymi oraz doświadczeniami praktycznymi zawartymi w literaturze przedmiotu (Lowe i in., 1969; Smith, Wahls, 1969; Aboshi i in., 1970; Wisa i in., 1971; Vu Cao Minh, 1976; Dobak, 1999, 2008; Barański, 2000; Kowalczyk, 2007; Dobak i in., 2015; Stajszcak, 2018). Na podstawie założenia teorii konsolidacji (Terzaghi, 1925) współczynnik filtracji mieszanek gruntowych badanych w konsolidometrze obliczono w sposób pośredni, stosując wzór z tabeli 2. Współczynnik konsolidacji mieszanek gruntowych obliczono według wzorów podanych m.in. w pracach Dobaka (1999) i Stajszcaka (2018).

Poprawne wyznaczenie wartości współczynnika filtracji na podstawie wyników badań CRL wymaga dokonania analizy zaawansowania procesu konsolidacji CL. Ocena ta na potrzeby niniejszej pracy została przeprowadzona z uwzględnieniem uzyskanych wartości względnego czasu konsolidacji  $T_{CL} = t c_v / H^2$ . W obliczeniach  $T_{CL}$  wzięto pod uwagę czas badania  $t$ , współczynnik konsolidacji gruntu  $c_v$  oraz aktualną drogę drenażu  $H$  (Dobak, 1999). Znajomość

wartości względnego czasu konsolidacji umożliwia wydzielenie fazy nieustalonej oraz ustalonej badania konsolidometrycznego, a więc etapów procesu konsolidacji CL niezwykle istotnych przy ocenie miarodajności otrzymywanych wartości współczynnika filtracji  $k$ . W niniejszej pracy, dokonując oceny zaawansowania procesu konsolidacji CL, za każdym razem przyjmowano, że faza ustalona badania CL występuje, gdy parametr  $T_{CL} > 2$ . Po spełnieniu tego warunku w badaniu CL obserwuje się zazwyczaj stabilizację odczytów ciśnienia porowego  $u_b$ , a otrzymywane na tym etapie wartości współczynnika filtracji są najbardziej zbliżone do wartości rzeczywistych (Dobak, 1999, 2008; Kowalczyk, 2007; Stajszcak, 2018).

Drugą metodą badawczą, którą zastosowano w niniejszej pracy do wyznaczenia współczynnika filtracji mieszanek gruntowych, były pomiary w permeametrze. W przeciwieństwie do badań konsolidometrycznych pomiar w permeametrze jest metodą bezpośrednią, która umożliwia wyznaczenie wartości współczynnika filtracji gruntu spoistego poprzez pomiar objętości wody przepływającej przez badaną próbkę gruntu w określonym interwale czasu. W badaniach laboratoryjnych pomiary wykonywano przy naprężeniu efektywnym wynoszącym 300 kPa. Komora, w której przeprowadzano pomiary, oraz połączone z nią interfejsy zostały wykonane ze stali nierdzewnej, dzięki czemu obecność paliwa lotniczego Jet A1 oraz oleju mineralnego 15W40 nie wpływała negatywnie na zastosowane w badaniach elementy konstrukcyjne permeametry. W trakcie badań filtracji korzystano z trzech kontrolerów ciśnienia i objętości wyprodukowanych przez firmę *GDS Instruments*. Urządzenia te w trakcie prowadzenia pomiarów umożliwiały wygenerowanie spadku hydraulicznego  $i = 30$  (2 kontrolery) oraz utrzymywały stałą wartość ciśnienia w komorze permeametry (1 kontroler). Wartość współczynnika filtracji obliczano na podstawie znajomości spadku hydraulicznego  $i$ , powierzchni próbki  $A$  oraz pomierzonego wydatku  $Q$  – tab. 2.

## WYNIKI BADAŃ

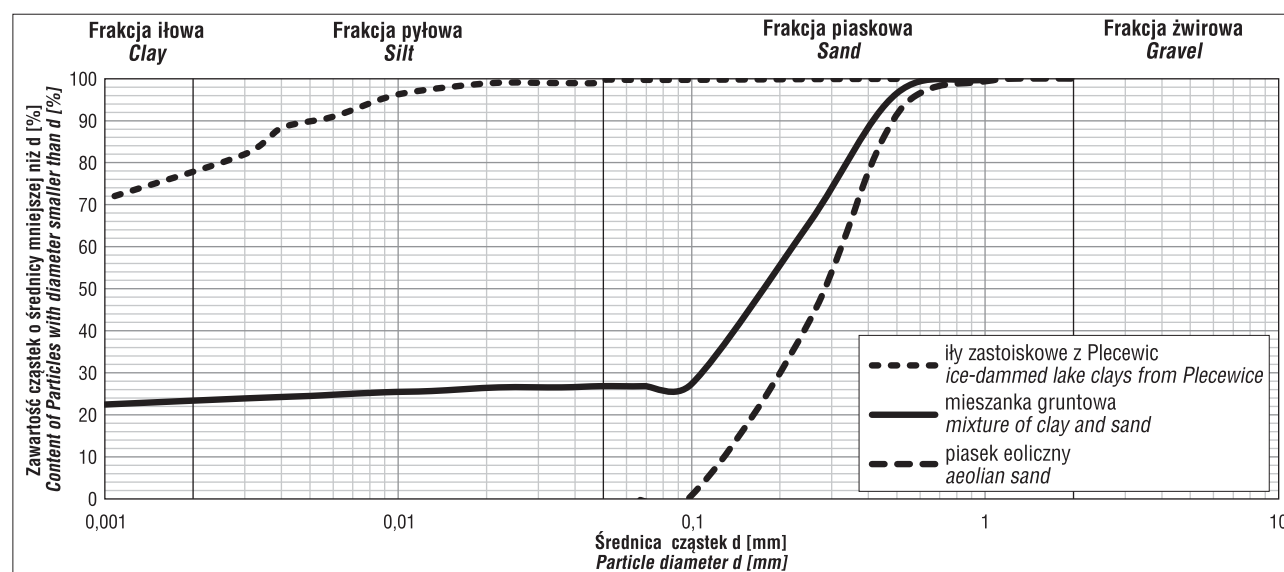
Przeprowadzone badania laboratoryjne wskazują, że przygotowane mieszanki gruntowe pod względem geolo-



**Tab. 2.** Wzory zastosowane do obliczeń współczynnika filtracji  
**Table 2.** Formulas used for the calculation of the permeability coefficient

Metoda badawcza Test method	Parametr Parameter	Wzór Formula	Jednostka Unit
Badanie konsolidometryczne Consolidometer test	współczynnik filtracji obliczony na podstawie teorii konsolidacji permeability coefficient calculated from the consolidation theory	$k = (c_v \cdot \gamma_w) / M_0$	m/s
Badanie w permeametrze Permeameter test	wydatek flow rate	$Q = \Delta V / \Delta t$	m <sup>3</sup> /s
	współczynnik filtracji oznaczony w permeametrze permeability coefficient determined during permeameter test	$k = (Q \cdot l) / (A \cdot h)$	m/s

Objaśnienia:  $c_v$  – współczynnik konsolidacji [m<sup>2</sup>/s],  $\gamma_w$  – ciężar objętościowy wody [kN/m<sup>3</sup>],  $M_0$  – moduł ścisłości [kPa],  $V$  – objętość wody przepływającej przez próbkę [m<sup>3</sup>],  $t$  – czas [s],  $A$  – powierzchnia próbki [m<sup>2</sup>],  $l$  – wysokość próbki [m],  $h$  – gradient hydrauliczny [m].  
 Explanations:  $c_v$  – consolidation coefficient [m<sup>2</sup>/s],  $\gamma_w$  – unit weight of water [kN/m<sup>3</sup>],  $M_0$  – compressibility modulus [kPa],  $V$  – volume of water flowing through the sample [m<sup>3</sup>],  $t$  – time [s],  $A$  – sample area [m<sup>2</sup>],  $l$  – sample height [m],  $h$  – hydraulic gradient [m].



**Ryc. 1.** Przykładowe krzywe uziarnienia mieszanki gruntowej, łu zastoiskowego oraz piasku eolicznego  
**Fig. 1.** Examples of particle size distribution curves of the soil mixture, ice-dammed lake clay and aeolian sand

giczno-inżynierskim są wykształcone jako grunty zwięzłe spoiste – Gpz (Cl) (wg PN-88/B-04481; PN-EN ISO 14688-1; PN-EN ISO 14688-2). Makroskopowo przygotowane próbki gruntów uznano za jednorodne, ciemnobrązowe, wilgotne o stanie miękkoplastycznym. Ich struktura została oceniona jako matrycowa, bez wyraźnych smug oraz przewarstwień.

Zawartość frakcji iłowej w badanych mieszankach gruntowych wynosi od 22,0 do 23,0%. Frakcja pyłowa stanowi od 3,0 do 4,0%, natomiast zawartość frakcji piaskowej mieści się w przedziale 73,0–74,0% (ryc. 1). Przy wilgotności 21,2–22,7% sporządzone mieszanki charakteryzują się gęstością objętościową w przedziale 2,03–2,05 Mg/m<sup>3</sup>. Porowatość przygotowanych próbek gruntu kształtuje się na poziomie 36,0–38,0%, natomiast wskaźnik porowatości wynosi od 0,56 do 0,60 (tab. 3).

Wilgotność badanych mieszanek gruntowych jest o ok. 6–10% niższa niż wilgotność naturalna łu zastoiskowych z rejonu Plecewicz. Na podstawie wartości aktywności ( $A$ : 0,63–0,89) sporządzone mieszanki gruntowe zostały uznane jako mało aktywne (Myślińska, 2001). Stopień wilgotności  $S_r$  sporządzonych mieszanek łu z piaskiem mie-

ści się w zakresie od 0,9 do 1,0, co wskazuje na prawie dwufazowość ośrodka gruntowego.

W przeprowadzonych badaniach konsolidometrycznych ze stałe wzrastającym obciążeniem (badanie typu CRL) oznaczone wartości współczynnika filtracji mieszanek gruntowych zarówno w badaniach próbek zawierających, jak i niezawierających w przestrzeni porowej produktów ropopochodnych, wykazują szeroki zakres zmienności. Współczynnik filtracji mieszanek gruntowych bez dodatku węglowodorów dla przyjętych prędkości obciążenia przyjmuje wartości w przedziale od 4,2E-11 do 9,0E-09 m/s. Po dodaniu paliwa lotniczego JET A1 wartości  $k$  badanych gruntów są tym niższe im wyższa jest zawartość produktu ropopochodnego w przestrzeni porowej gruntu i mieszczą się w przedziale od 1,6E-11 do 2,1E-08 m/s (ryc. 2A). Po dodaniu oleju mineralnego 15W40 w ilości 2% masowych współczynnik filtracji mieszanki gruntowej wynosi od 2,8E-11 do 9,9E-09 m/s (ryc. 2B). We wszystkich przeprowadzonych badaniach CRL najwyższe wartości współczynnika filtracji obserwowano na początku badania konsolidometrycznego. Wraz ze wzrastającym obciążeniem początkowo obserwowany jest intensywny spadek wartości  $k$  (nawet o dwa rzędy wielkości) oraz następująca po

**Tab. 3.** Parametry fizyczne badanych gruntów  
**Table 3.** Physical parameters of tested soils

Parametr Parameter	Iły zastoiskowe z Plecewice Ice-dammed lake clays from Plecewice	Piasek eoliczny z Międzyborowa Aeolian sand from Międzyborów	Mieszanka gruntowa Mixture of clay and sand
$w$ [%]	27,7–32,4	2,7–2,9	21,2–22,7
$w_p$ [%]	25,7–28,5	–	9,1–9,7
$w_L$ [%]	70,2–79,6	–	23,1–24,5
$I_L$ [-]	0,01–0,13	–	0,86–0,88
$\rho_s$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,67–2,72	2,65	2,65
$\rho$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	1,88–1,92	–	2,03–2,05
$n$ [-]	0,44–0,48	–	36,0–38,0
$e$ [-]	0,78–0,91	–	0,56–0,60
$f_i$ [%]	72,0–84,0	0	22,0–23,0
$f_\pi$ [%]	15,0–27,0	0	4,0
$f_p$ [%]	0,0–1,0	100	73,0–74,0
$A$ [-]	0,60–0,70	–	0,61–0,67
$U$ [-]	–	2,3–2,4	–

Objaśnienia:  $w$  – wilgotność,  $w_p$  – granica plastyczności,  $w_L$  – granica płynności,  $I_L$  – stopień plastyczności,  $\rho_s$  – gęstość właściwa,  $\rho$  – gęstość objętościowa,  $n$  – porowatość,  $e$  – wskaźnik porowatości,  $f_i$  – frakcja ilowa,  $f_\pi$  – frakcja pyłowa,  $f_p$  – frakcja piaszkowa,  $A$  – aktywność,  $U$  – wskaźnik jednorodności uziarnienia.

Explanations:  $w$  – moisture content,  $w_p$  – plastic limit,  $w_L$  – liquid limit,  $I_L$  – liquidity index,  $\rho_s$  – density,  $\rho$  – bulk density,  $n$  – porosity,  $e$  – void ratio,  $f_i$  – clay fraction,  $f_\pi$  – silt fraction,  $f_p$  – sand fraction,  $A$  – activity,  $U$  – uniformity coefficient.

nim umowna stabilizacja w zaawansowanym etapie badania CRL (ryc. 2A–C).

Ocena wpływu zastosowanych paliw ropopochodnych na właściwości filtracyjne przygotowanych mieszanek gruntowych, którą przeprowadzono na podstawie bezpośrednich pomiarów współczynnika filtracji, potwierdziła trendy obserwowane w badaniach konsolidometrycznych (ryc. 2A–C). W trakcie bezpośrednich pomiarów, przy stałym naprężeniu efektywnym wynoszącym 300 kPa, najwyższe wartości współczynnika filtracji mieszanek gruntowych uzyskano podczas badań próbek niezanieczyszczonych węglowodorami ( $k$ : 1,49E-09 m/s). Po dodaniu do badanych gruntów paliwa lotniczego Jet A1 oraz oleju mineralnego 15W40 następuje pogorszenie zdolności filtracyjnych ośrodka gruntowego. Pogorszenie to jest wyrażone zmniejszeniem wartości współczynnika filtracji, które jest tym wyższe, im wyższe są lepkość oraz zawartość produktu ropopochodnego w porach ośrodka gruntowego. Dodanie paliwa lotniczego oraz oleju mineralnego do przygotowanych mieszanek gruntowych w ilościach odpowiadających 2% masy ich szkieletu gruntowego względem próbek bez dodatku węglowodorów powoduje trzy-, czterokrotne zmniejszenie wartości  $k$ . Przy przyjętej maksymalnej zawartości paliwa ropopochodnego w przestrzeni porowej ośrodka gruntowego (równiej 10% masy szkieletu gruntowego) najniższe wartości współczynnika filtracji wykazywały mieszanki gruntowe zawierające olej mineralny, przyjmując względem próbek pozbawionych węglowodorów wartości  $k$  mniejsze o 1,5–2,0 rzędy wielkości (ryc. 3).

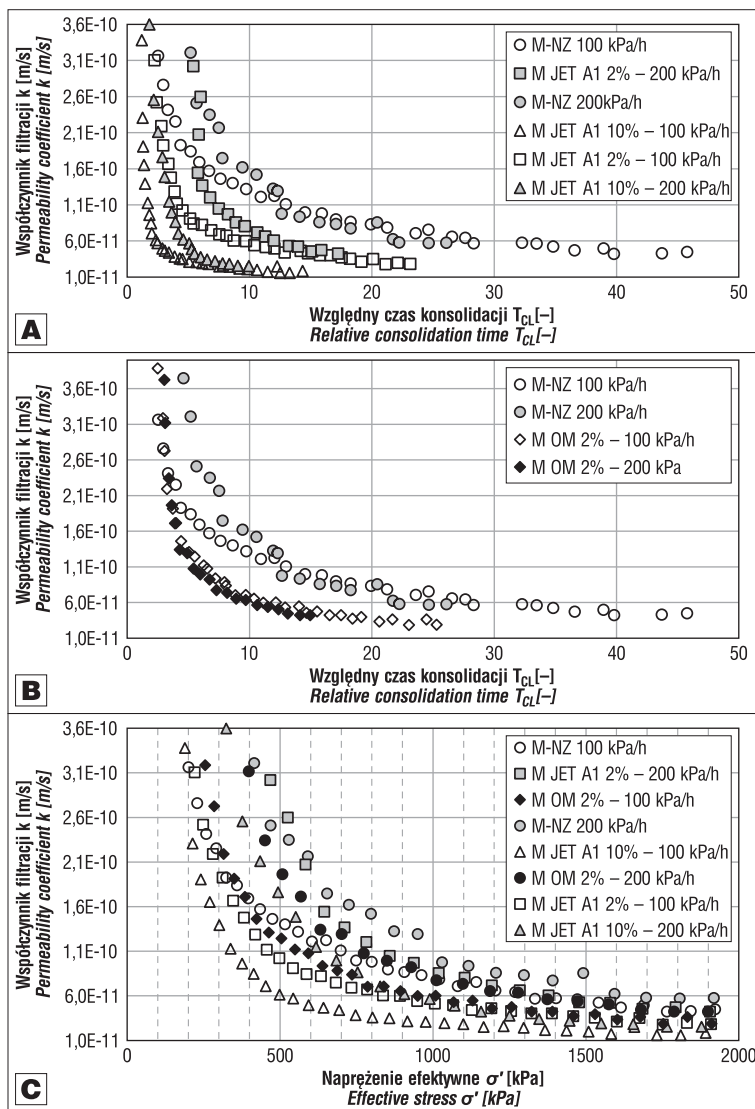
## DYSKUSJA

Na podstawie przeprowadzonych badań CRL stwierdzono, że wartości współczynnika filtracji mieszanek gruntowych w badaniach konsolidometrycznych typu CRL obok przyjętej prędkości obciążenia zależą od:

1. zawartości produktu ropopochodnego w porach gruntu spoistego,
2. właściwości fizykochemicznych produktu ropopochodnego występującego w przestrzeni porowej ośrodka gruntowego.

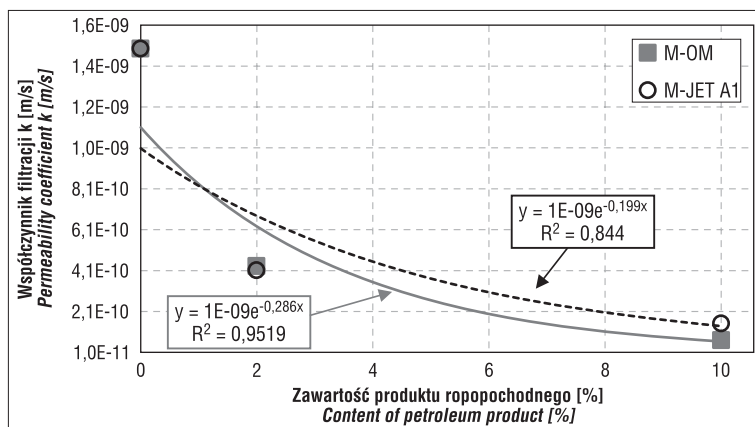
Czynnikiem zewnętrznym, który w warunkach stale wzrastającego obciążenia wpływa na uzyskiwane wartości współczynnika filtracji gruntów spoistych, jest zadana prędkość obciążenia. Wraz ze wzrostem prędkości obciążenia, na podobnych etapach zaawansowania konsolidacji CL (wyrażonych identycznymi wartościami względnego czasu konsolidacji  $T_{CL}$ ), zazwyczaj uzyskuje się coraz niższe wartości  $k$ . Pogorszenie zdolności filtracyjnych ośrodka gruntowego jest w literaturze tłumaczone generowaniem w trakcie szybkich badań CRL wysokich wartości ciśnienia porowego  $u_b$ . Zbyt wysoki przyrost wartości  $u_b$  w trakcie badania CRL może prowadzić do wzmocnienia roli *dławienia przepływu* w kształtowaniu charakterystyk filtracyjnych ośrodka gruntowego (Dobak, 1999, 2008; Dobak, Wyrwicki, 2000; Kowalczyk, 2007; Dobak i in., 2015; Stajszczak, 2018). W przeprowadzonych badaniach konsolidometrycznych z udziałem mieszanek gruntowych zarówno z dodatkiem, jak i bez dodatku płynnych węglowodorów wpływ dwukrotnego zwiększenia prędkości obciążenia na uzyskiwane wartości  $k$  jest nieznaczny (ryc. 2A–C). Wynika to z niewielkich różnic w wygenerowanych nadwyżkach ciśnienia porowego przy przyjęciu  $\Delta\sigma/\Delta t$  100 oraz 200 kPa/h (ryc. 4A–B). Wpływ przyjętej prędkości obciążenia na uzyskiwane wartości ciśnienia porowego w przeprowadzonych badaniach CRL jest zgodny z wynikami badań CL prowadzonymi dotychczas na gruntach spoistych przez innych autorów (Sinha, Bhargava, 1991; Dobak, 1999; Kowalczyk, 2007; Soumaya, Kempfert, 2010; Dobak i in., 2015; Stajszczak, 2018, 2019).

Przeprowadzone badania CRL mieszanek gruntowych, które zanieczyszczono paliwem lotniczym Jet A1, wykazały, że w warunkach stale wzrastającego obciążenia istot-



Ryc. 2. Wartości współczynnika filtracji mieszanek gruntowych przedstawione na tle względnego czasu konsolidacji (A, B) oraz naprężenia efektywnego (C). A – próbki z dodatkiem paliwa lotniczego Jet A1, B – próbki z dodatkiem oleju mineralnego 15W40. NZ – próbki bez węglowodorów, Jet A1 – paliwo lotnicze, OM – olej mineralny

Fig. 2. Permeability coefficient values obtained for soil mixtures presented in relation to the relative consolidation time (A, B) and effective stress (C). A – samples with aviation fuel Jet A1. B – samples with mineral oil 15W40. NZ – samples without hydrocarbons, Jet A1 – aviation fuel, OM – mineral oil



nym czynnikiem wpływającym na uzyskiwane wartości współczynnika filtracji będzie zawartość paliwa ropopochodnego w przestrzeni porowej ośrodka gruntowego. Na poszczególnych etapach konsolidacji CL, we wszystkich przeprowadzonych badaniach CRL, dla tych samych prędkości obciążenia, wraz ze wzrostem stopnia kontaminacji badanych próbek obserwowano sukcesywne zmniejszanie uzyskiwanych wartości współczynnika filtracji (ryc. 2A–C, ryc. 5). Pogorszenie zdolności filtracyjnych ośrodka gruntowego, które następuje wraz ze wzrostem zanieczyszczenia gruntu spoiściego paliwami ropopochodnymi w warunkach stale wzrastającego obciążenia, można wytłumaczyć:

- wyłączeniem części porów z procesu filtracji przez produkty ropopochodne,
- uzyskiwaniem wraz ze wzrostem stopnia kontaminacji badanych próbek coraz wyższych wartości ciśnienia porowego (przy zachowaniu tych samych prędkości obciążenia), co wzmacnia rolę dławienia przepływu w kształtowaniu zdolności filtracyjnych zanieczyszczonego gruntu spoiściego (ryc. 4A–B).

Mechanizm powodujący pogorszenie właściwości filtracyjnych ośrodka gruntowego zawierającego w porach paliwa ropopochodne w warunkach stale wzrastającego obciążenia zdaniem autora przyjmuje charakter sprzężenia zwrotnego. W przeprowadzonym programie badań CRL mieszanek gruntowych wzrost zawartości produktu ropopochodnego w przestrzeni porowej gruntu wyłączał częściowo lub całkowicie część porów biorących udział w procesie filtracji. Zmniejszenie porowatości efektywnej mieszanek gruntowych po dodaniu węglowodorów prowadziło do zwiększenia uzyskiwanych wartości ciśnienia porowego w badaniach CRL przeprowadzonych przy tej samej prędkości obciążenia (ryc. 4A–B). Wzrost generowanych wartości ciśnienia porowego wzmacniał z kolei rolę dławienia przepływu, które obok zmniejszenia porowatości efektywnej będzie stanowiło dodatkowy czynnik pogarszający wodoprzepuszczalność zanieczyszczonego gruntu spoiściego w trakcie trwania konsolidacji CL (ryc. 2A–C, ryc. 5).

←

Ryc. 3. Zależność pomiędzy zawartością produktu ropopochodnego a wartością współczynnika filtracji oznaczoną podczas badań w permeametrze. NZ – próbki bez węglowodorów, Jet A1 – paliwo lotnicze; OM – olej mineralny

Fig. 3. The relationship between the content of the petroleum product and the permeability coefficient value obtained during the permeameter tests. NZ – samples without hydrocarbons, Jet A1 – aviation fuel, OM – mineral oil



Wnioski te są zgodne z wynikami badań prowadzonymi m.in. przez takich badaczy jak: Lupa, Sałaciak (1975), Puri i in. (1994), Al.-Sand i in. (1995), Khomehchiyan i in. (2007), Silvestri i in. (1997), Rahman i in. (2010), Huang, Lu (2014).

Obok zadanej prędkości obciążenia oraz zawartości zanieczyszczenia ropopochodnego w porach gruntu istotnym czynnikiem wpływającym na uzyskiwane wartości współczynnika filtracji będą właściwości fizyczne produktu ropopochodnego zanieczyszczającego grunt spoisty.

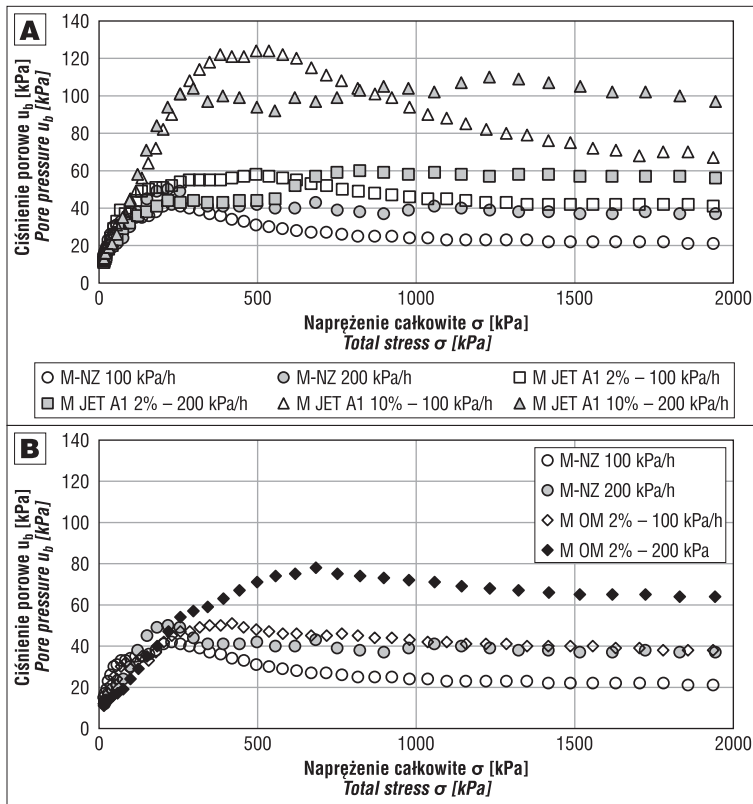
Właściwości te wyraża m.in. lepkość oraz gęstość fazy zanieczyszczającej podłoże gruntowe (produktu ropopochodnego).

Porównując wartości współczynnika filtracji otrzymane w toku przeprowadzonych badań CRL oraz pomiarów bezpośrednich, można zauważyć, że próbki takiej samej pasty gruntowej zanieczyszczone w tym samym stopniu olejem mineralnym 15W40 lub paliwem lotniczym Jet A1, przy porównywalnej prędkości obciążenia wykazują niższe wartości  $k$ , gdy substancją zanieczyszczającą jest olej mineralny. Trend ten udokumentowano zarówno w badaniach CRL oraz pomiarach bezpośrednich wykonanych w permeametrze (ryc. 2a–c, ryc. 3, tab. 4). Znaczne zmniejszenie wartości  $k$  po dodaniu do mieszanek gruntowych oleju mineralnego wytłumaczyć można wyższą, względem paliwa lotniczego Jet A1, lepkością tego produktu ropopochodnego (tab. 1). Olej mineralny bardziej niż paliwo lotnicze Jet A1 ogranicza przepływ fazy ciekłej w porach gruntu, redukując tym samym w większym stopniu jego przepuszczalność. Z tego względu w trakcie badań CRL próbek zawierających olej mineralny uzyskiwane wartości ciśnienia porowego  $u_b$  są wyższe, niż miało to miejsce przy obciążaniu z podobną prędkością mieszanek gruntowych zawierających w porach podobne ilości paliwa lotniczego Jet A1 (ryc. 4).

Badania przeprowadzone w permeametrze z udziałem paliwa lotniczego oraz oleju mineralnego, podobnie jak wyniki badań konsolidometrycznych, wskazują jednoznacznie, że głównymi czynnikami wpływającymi na charakter zmian zdolności filtracyjnych gruntu zanieczyszczonego węglowodorami, obok jego właściwości inherentnych, będzie zawartość oraz lepkość paliwa ropopochodnego w podłożu gruntowym (ryc. 3).

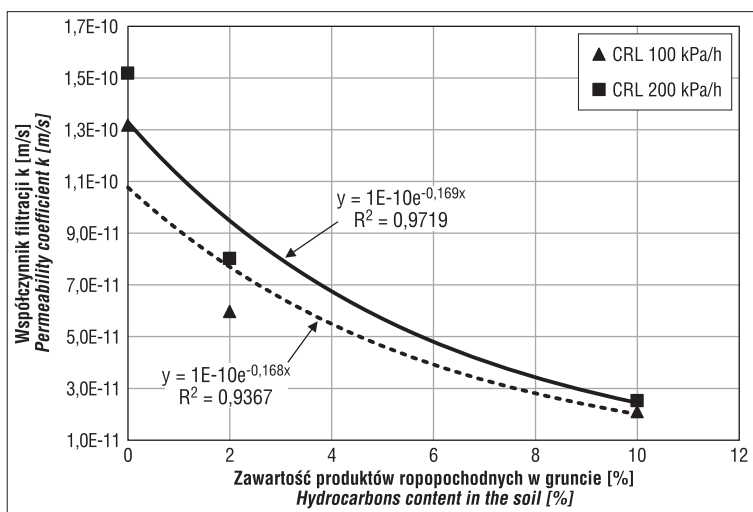
Obserwowane zmniejszenie wartości współczynnika filtracji gruntów spoistych po dodaniu węglowodorów z jednej strony będzie poprawiało ich zdolności izolacyjne, z drugiej zaś strony w dłuższej perspektywie czasu grunty te mogą stanowić wtórne źródło zanieczyszczeń ropopochodnych, przez co będą stanowić realne zagrożenie dla otaczającego je środowiska przyrodniczego.

Bezpośredni pomiar wartości współczynnika filtracji gruntu spoistego zanieczyszczonego paliwami ropopochodnymi przedstawiony w niniejszej pracy m.in. miał na celu sprawdzenie, czy prognozowane w ten sposób zmiany wodoprzepuszczalności ośrodka gruntowego po kontaminacji węglowodorami są zgodne z prognozami dokonywanymi w oparciu o przeprowa-



**Ryc. 4.** Wartości ciśnienia porowego uzyskane w trakcie badań CRL mieszanek gruntowych bez węglowodorów oraz z dodatkiem paliwa lotniczego JET A1 oraz oleju mineralnego 15W40 (OM). NZ – próbki bez węglowodorów, Jet A1 – paliwo lotnicze, OM – olej mineralny

**Fig. 4.** Pore pressure values obtained during CRL tests for soil mixtures without hydrocarbons and soil mixtures with addition of aviation fuel (Jet A1) and mineral oil 15W40 (OM). NZ – samples without hydrocarbons, Jet A1 – aviation fuel, OM – mineral oil



**Ryc. 5.** Zależność między wartością współczynnika filtracji mieszanki gruntowej oraz zawartością paliwa lotniczego wyznaczoną na etapie konsolidacji CL odpowiadającym  $T_{CL} = 10$

**Fig. 5.** The relationship between the permeability coefficient value of soil mixture and the content of aviation fuel determined at the CL consolidation stage corresponding to  $T_{CL} = 10$

**Tab. 4.** Porównanie wartości współczynnika filtracji, które oznaczono w trakcie badań w permeametrze i konsolidometrze  
**Table 4.** Comparison of values of coefficient of permeability, that were obtained during tests performed in permeameter and consolidometer

Próbka Sample	Dodatek węglowodorów [%] Hydrocarbons content [%]	Współczynnik filtracji / Permeability coefficient											
		oznaczony w trakcie pomiarów w permeametrze obtained during permeameter tests			oznaczony w trakcie badań CRL przy $i = 30^*$ obtained during consolidometer tests at $i = 30^*$					oznaczony w trakcie badań CRL przy $T_{CL} = 4^*$ obtained during consolidometer tests at $T_{CL} = 4^*$			
		$e$ [-]	$i$ [-]	$k$ [m/s]	$e$ [-]	$i$ [-]	$\sigma'$ [kPa]	$T_{CL}$ [-]	$k$ [m/s]	$e$ [-]	$i$ [-]	$\sigma'$ [kPa]	$k$ [m/s]
M-NZ	0	0,46	31	1,50E-09	0,60	28	12,9	0,24	6,60E-09	0,41	137	303,3	3,50E-10
M-Jet A1	2	0,48	30	4,10E-10	0,65	34	17,4	0,40	6,10E-09	0,40	192	409,3	2,80E-10
	10	0,55	30	1,50E-10	0,84	34	12,4	0,27	1,00E-08	0,36	509	750,6	6,20E-11
M-OM	2	0,44	32	4,30E-10	0,64	29	32,8	0,84	7,10E-09	0,43	198	385,0	1,70E-10

\*Wartości średnie otrzymane z badań CRL, które wykonano z prędkością obciążenia 100 oraz 200 kPa/h.

\*Average values obtained from CRL tests, that were performed at loading velocity 100 and 200 kPa/h.

Objaśnienia:  $e$  – wskaźnik porowatości,  $i$  – spadek hydrauliczny,  $k$  – współczynnik filtracji,  $\sigma'$  – naprężenie efektywne,  $T_{CL}$  – względny czas konsolidacji.  
 Explanations:  $e$  – void ratio,  $i$  – hydraulic gradient,  $k$  – permeability coefficient,  $\sigma'$  – effective stress,  $T_{CL}$  – relative consolidation time.

dzone badania CRL. Przy próbie aplikacji badań CL, jako szybkiej, a zarazem wiarygodnej metody badań gruntów zanieczyszczonych, takie porównanie jest szczególnie istotne i wynika przede wszystkim z faktu, że wartości współczynnika filtracji oznaczone przy zastosowaniu bezpośrednich oraz pośrednich metod pomiarowych nie wykazują wzajemnej zależności.

Kierunki zmian wartości współczynnika filtracji ośrodk gruntowego zanieczyszczonego węglowodorami, które udokumentowano w niniejszej pracy przy zastosowaniu niezależnych metod badawczych, wykazują jednakowe trendy. Dla sporządzonych mieszanek gruntowych zarówno w trakcie badań bezpośrednich (permeametr), jak i pośrednich (badania CL), wraz ze wzrostem zawartości węglowodorów w porach przygotowanych próbek jest obserwowane zmniejszanie uzyskanych wartości współczynnika filtracji. Fakt ten wskazuje na pozytywną ocenę aplikacji badań CRL w badaniach gruntów spoistych zanieczyszczonych paliwami ropopochodnymi. Porównując wartości współczynnika filtracji, które dla mieszanek gruntowych oznaczono w permeametrze oraz konsolidometrze, można dostrzec wyraźne różnice ilościowe (ryc. 2A–C, ryc. 3). Wynikają one z odmiennych warunków wymuszania przepływu fazy ciekłej przez przestrzeń porową gruntu spoistego w zastosowanych metodach badawczych.

Badania konsolidometryczne ze stale wzrastającym obciążeniem należą do zmiennie-gradientowych metod badawczych. W badaniach tego typu proces filtracji jest uruchamiany w następstwie wzrastającego ciśnienia porowego, którego wartości w sposób bezpośredni wpływają na generowany gradient hydrauliczny  $i$ . Zestawiając wartości  $k$  oznaczone przy zastosowaniu stało- oraz zmiennie-gradientowych metod badawczych, niezwykle istotnym jest, aby przyjąć odpowiednie kryterium, wg którego będą prowadzone porównania otrzymanych wyników. W niniejszej pracy podczas porównań wartości  $k$ , które oznaczono w permeametrze oraz konsolidometrze, postanowiono sprawdzić dwa kryteria: jednym z nich był spadek hydrauliczny, drugim naprężenie efektywne  $\sigma'$ .

### Kryterium spadku hydraulicznego

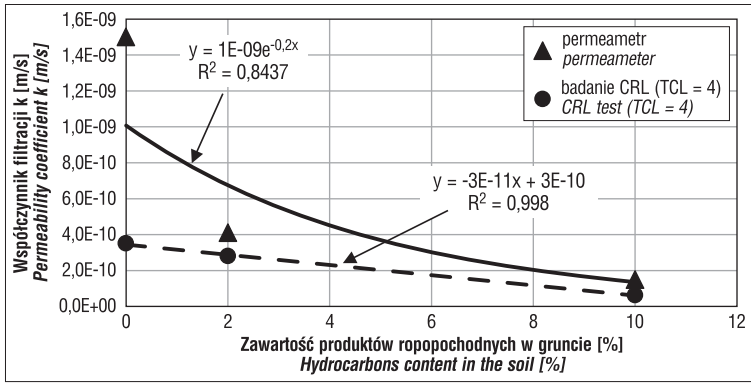
W przeprowadzonych badaniach CRL z udziałem mieszanek gruntowych zarówno w obecności węglowodorów w przestrzeni porowej, jak i przy ich braku wartość spadku hydraulicznego, przy której wykonywano bezpośrednie pomiary współczynnika filtracji ( $i = 30$ ), rejestrowano przy naprężeniu efektywnym wynoszącym 12–33 kPa, a więc w nieustalanej fazie konsolidacji CL ( $T_{CL} < 2$ ) (tab. 4). Wskaźnik porowatości  $e$  mieszanek gruntowych odpowiadający podanemu przedziałowi naprężeń efektywnych w zrealizowanym programie badawczym przyjmuje wartości między 0,60 a 0,84. Są one ok. 1,5–2,0 razy wyższe niż wartości  $e$  oznaczone dla tych samych past gruntowych po zakończeniu pomiarów w permeametrze. Z tego względu współczynnik filtracji wyznaczony w trakcie badań CRL dla spadku hydraulicznego  $i = 30$  wykazuje wartości wyższe niż miało to miejsce w trakcie pomiarów bezpośrednich (tab. 4). Czynnikiem, który dodatkowo zawiąza wartości  $k$  uzyskiwane w trakcie badań konsolidometrycznych przy  $i = 30$ , jest nieosiągnięcie na tak wczesnym etapie badania CRL fazy ustalonej konsolidacji CL (Dobak, 1999). Wpływ tego czynnika zminimalizowano, przedstawiając w tabeli 4 wartości  $k$  skorygowane o poprawki zaproponowane przez Janbu i in. (1980).

Wysokie wartości wskaźnika porowatości rejestrowane w badaniach CRL mieszanek gruntowych przy  $i = 30$  oraz występowanie nieustalanej fazy konsolidacji CL na tak wczesnym etapie badania konsolidometrycznego sprawiają, że w przeprowadzonych analizach kryterium to uznano jako mało przydatne do dokonywania porównań wartości  $k$  oznaczonych w trakcie badań permeametrycznych oraz konsolidometrycznych typu CRL (tab. 4).

### Kryterium naprężenia efektywnego oraz względnego czasu konsolidacji $T_{CL}$

Wartości współczynnika filtracji oznaczone w trakcie badań CRL można próbować porównywać z wynikami badań bezpośrednich, odczytując wartość tego parametru dla naprężenia efektywnego, które zadawano w permeametrze. W przeprowadzonych pomiarach wartość ta wynosiła





**Ryc. 6.** Porównanie wartości współczynnika filtracji mieszanek gruntowych z dodatkiem paliwa lotniczego Jet A1, które wyznaczono podczas badań w permeametrze i konsolidometrze przy zastosowaniu kryterium naprężenia efektywnego oraz względnego czasu konsolidacji  $T_{CL}$

**Fig. 6.** Comparison of the permeability coefficient values of soil mixtures with addition of aviation fuel, which were determined during tests in the permeameter and consolidometer using the effective stress criterion and the relative consolidation time  $T_{CL}$

300 kPa i w programie badań CRL mieszanek gruntowych niezawierających w porach węglowodorów odpowiadała  $T_{CL} = 4$ .

Porównując współczynnik filtracji mieszanek gruntowych oznaczony w trakcie badań permeametrycznych z wartościami tego parametru, które obliczono na podstawie wyników badań CRL (przy naprężeniu efektywnym 300 kPa oraz  $T_{CL} = 4$ ), można zauważyć dużo mniejsze zróżnicowanie wartości  $k$  niż miało to miejsce, gdy kryterium porównawczym był spadek hydrauliczny (tab. 4). Obserwowane trendy należy wiązać z zarejestrowanymi w warunkach stale wzrastającego obciążenia zmianami wskaźnika porowatości oraz osiągnięciem na rozpatrywanym etapie badania CRL fazy ustalonej konsolidacji CL. Jak przedstawiono w tabeli 4 wskaźnik porowatości mieszanek gruntowych bez dodatku węglowodorów, przy naprężeniu efektywnym wynoszącym 300 kPa (w przypadku próbek zawierających węglowodory  $T_{CL} = 4$ ), w trakcie badań konsolidacji CL oraz filtracji przyjmuje zbliżone wartości, które mieszczą się w zakresie 0,36–0,43. Obserwowane różnice dosyć wyraźnie zaznaczają się w uzyskiwanych wartościach spadku hydraulicznego, które podczas badań CRL były ok. 4–17 razy wyższe niż gradient hydrauliczny generowany w trakcie pomiarów bezpośrednich (tab. 4). Należy przypuszczać, że wysokie wartości spadku hydraulicznego zarejestrowane w trakcie badań CRL wzmacniały rolę dławienia przepływu, sprawiając tym samym, że uzyskiwane w sposób pośredni wartości  $k$  wykazują wartości 1–4 razy niższe, niż oznaczone w permeametrze (ryc. 6).

## WNIOSKI

Zrealizowany program badań właściwości filtracyjnych mieszanek gruntowych umożliwił sformułowanie kilku wniosków.

1. Mieszanki gruntowe sporządzone z iltu zastoiskowego oraz piasku eolicznego pod względem granulometrycznym odpowiadają gruntem zwięzłym spoistym. Ich współczynnik filtracji przyjmuje wartości w przedziale od 4,2E-11 do 8,6E-09 m/s, co sprawia, że w świetle obowiązującego

prawa grunty te spełniają jedynie kryteria izolacyjności stawiane sztucznym oraz naturalnym barierom geologicznym na potrzeby składowania odpadów obojętnych. Maksymalne spośród wyznaczonych wartości współczynnika filtracji dla badanych mieszanek iltu z piaskiem nie spełniają kryterium izolacyjności wymaganego dla barier uszczelniających składowiska odpadów niebezpiecznych oraz innych niż niebezpieczne i obojętne. Kryteria te mogą zostać spełnione poprzez zwiększenie udziału frakcji iltowej w składzie granulometrycznym mieszanki gruntowej tworzącej sztuczną barierę izolacyjną.

2. Wprowadzenie produktów ropopochodnych do przestrzeni porowej ośrodka gruntowego może spowodować pogorszenie jego zdolności filtracyjnych. W zrealizowanym programie badań CRL mieszanek gruntowych dodatek oleju mineralnego 15W40 oraz paliwa lotniczego Jet A1 powodował obniżenie wartości współczynnika filtracji względem wartości oznaczonych dla próbek bez dodatku węglowodorów nawet o 0,4–2,7 razy. W przypadku pomiarów wykonanych w permeametrze różnice te są wyższe niż udokumentowane w trakcie badań konsolidometrycznych i maksymalnie osiągają dwa rzędy wielkości. Pogorszenie zdolności filtracyjnych ośrodka gruntowego w zrealizowanym programie badawczym było spowodowane zmniejszeniem porowatości efektywnej gruntu poprzez całkowite lub częściowe wyłączenie części porów z procesu filtracji przez bardziej lepkie niż woda produkty ropopochodne.

3. Przeprowadzone badania laboratoryjne dowodzą, że pogorszenie zdolności filtracyjnych ośrodka gruntowego zanieczyszczonego węglowodorami będzie tym wyższe, im wyższe będą lepkość oraz zawartość fazy zanieczyszczającej w przestrzeni porowej gruntu spoistego. Zmniejszenie wartości współczynnika filtracji mineralnej bariery geologicznej może poprawić jej zdolności izolacyjne, jednak w dłuższej perspektywie czasu zanieczyszczenia ropopochodne mogą ulec wtórnej migracji w obrębie podłoża gruntowego, pogarszając przy tym parametry wytrzymałości oraz odkształcalności gruntu. Z tego względu zmniejszenie wartości współczynnika filtracji mineralnej warstwy uszczelniającej na skutek zanieczyszczenia węglowodorami nie powinno być bezkrytycznie uznawane jako bezpieczne z punktu widzenia inżynierskiego.

4. Badania konsolidometryczne typu CRL mogą być przydatnym narzędziem stosowanym w ocenie zdolności filtracyjnych gruntów spoistych zanieczyszczonych węglowodorami. W celu porównywania wyników badań CRL z bezpośrednimi pomiarami permeametrycznymi zaleca się stosowanie kryterium naprężenia efektywnego oraz względnego czasu konsolidacji  $T_{CL}$ . Kryterium to pozwala, przy porównywaniu wyników badań uzyskanych różnymi metodami pomiarowymi, na uwzględnienie naprężenia efektywnego przekazywanego na grunt podczas pomiaru współczynnika filtracji oraz zaawansowania konsolidacji CL w badaniu CRL.

Autor dziękuje Recenzentom za rzetelną ocenę niniejszej pracy oraz za cenne uwagi poprawiające jej jakość merytoryczną.

## LITERATURA

- ABOSHI H., YOSHIKUMI H., MAURYAMA S. 1970 – Constant Loading Rate Consolidation Test. *Soils Found.*, 10 (1): 43–56.
- AL-SAND H., EID W.K., ISMAEL N.F. 1995 – Effect of Oil Contamination on the Properties of Kuwaiti Sands. Assessment and Remediation of Oil Contaminated Soils. Kostecki P., Behbehani M. (red.), 158–163.
- BARAŃSKI M. 2000 – Wytrzymałość i odkształcalność glin lodowcowych zanieczyszczonych ropopochodnym benzenem na terenie Petrochemii Płock S.A. Rozprawa doktorska, Wyd. Geol. UW, Warszawa.
- CHOMA-MORYL K. 2001 – Ocena właściwości hydroizolacyjnych gruntów spoistych na podstawie ich plastyczności. Materiały z X konferencji „Współczesne problemy hydrogeologii”, tom II, Wrocław.
- CZADO B., KORZENIOWSKA-REJMER E., PIETRAS J.S. 2010 – Analiza zmian nośności podłoża budowlanego w wyniku jego zanieczyszczenia substancjami ropopochodnymi na przykładzie gruntów piaszczystych. *Gór. Geoinż.*, 34 (2): 165–171.
- DOBĄK P. 1999 – Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- DOBĄK P. 2008 – Evaluation of consolidation parameters in CL tests: theoretical and practical aspects. *Geol. Quart.*, 52 (4): 397–410.
- DOBĄK P., SZCZEPAŃSKI T., KOWALCZYK S. 2015 – Load velocity influence on changes of soil consolidation and permeability parameters in CL-type tests. *Geol. Quart.*, 59 (2): 382–390.
- DOBĄK P., WYRWICKI R. 2000 – Hydroizolacyjne właściwości kredy jeziornej. *Prz. Geol.*, 48 (5): 412–415.
- DOWGIAŁŁO J., KLECZKOWSKI A.S., MACIOSZCZYK T., RÓŻKOWSKI A. 2002 – Słownik hydrogeologiczny. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DRĄGOWSKI A., ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 2005 – Uwarunkowania stosowalności ilów jako izolacyjnych barier geologicznych na przykładzie ilów ze złoża w Budach Mszczonowskich. *Prz. Geol.*, 53: 687–690.
- HAISIGAJ, WILANOWSKI S. 2008 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Kampinos (521). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- HEAD K.H. 1986 – Manual of Soil Laboratory Testing. Pentch Press, London.
- HUANG F., LU H. 2014 – Experimental Research of the Influence Factors on the Permeability of Oil-Polluted Clay. *Electr. J. Geotech. Engineer.*, 19: 2597–2605.
- JANBU N., TOKHEIM O., SENNESET K. 1980 – Consolidation tests with continuous loading. *Norveg. Geotech. Inst., Publ. No. 9*, Oslo.
- KACZYŃSKI R. 1969 – Oznaczanie współczynników filtracji gruntów słaboprzepuszczalnych, półprzepuszczalnych i praktycznie nieprzepuszczalnych. *Prz. Geol.*, 10: 503–507.
- KARKUSH M.O., ZABOON A.T., HUSSEIN H.M. 2013 – Studying the effects of contamination on the geotechnical properties of clayey soil. *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics. Proceedings of the International Symposium, Torino, Italy*: 599–608.
- KHAMEHCHIYAN M., CHARKHABI A.H., TAJIK M. 2007 – Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineer. Geol.*, 89: 220–229.
- KORZENIOWSKA-REJMER E. 2001 – Wpływ zanieczyszczeń ropopochodnych na charakterystykę geotechniczną gruntów stanowiących podłoże budowlane. *Inż. Mor.*, 2: 83–86.
- KOWALCZYK S. 2007 – Zmiany właściwości filtracyjnych w procesie konsolidacji zielonych ilów beidelitowych z Rowu Kleszczowa. Praca doktorska, Wyd. Geol. UW, Warszawa.
- LAMBE T.W., WHITMAN R.V. 1977 – *Mechanika gruntów. T. 1, 2*. Arkady, Warszawa.
- LOWE J., JONAS E., OBRICANS V. 1969 – Controlled gradient consolidation tests. *Proc. ASCE*, 95, SM1.
- LUPA H., SAŁACIAK A. 1975 – Wpływ zanieczyszczeń olejowych na właściwości gruntów. *Pr. Nauk. PSzczec.*, 44.
- ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 1997 – Modelowe właściwości ilów neo-genijskich z Mszczonowa jako warstw izolacyjnych. Praca doktorska, Wyd. Geol. UW, Warszawa.
- ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 2013 – Uwarunkowania geologiczne składowania odpadów komunalnych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 455.
- MACIOSZCZYK A. 1974 – Zmienność parametrów nieliniowej filtracji wód podziemnych. *Biul. Geol. Wyd. Geol. UW*, t. 4, Warszawa.
- MACIOSZCZYK A. 2006 – Podstawy hydrogeologii stosowanej. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- MYŚLIŃSKAE. 2001 – Laboratoryjne badania gruntów. WUW Warszawa.
- PAZDRO Z. 1983 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol. Warszawa.
- PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania laboratoryjne.
- PN-EN ISO 14688-1-Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
- PN-EN ISO 14688-2 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
- PURI V. K., DAS B. M., COOK E.E., SHIN E.C. 1994 – Geotechnical properties of crude oil contaminated sand. *Analysis of Soils Contaminated with Petroleum Constituents*. O'Shay T.A., Hoddinott K.B. STP.1221. Philadelphia, USA.
- RAHMAN Z.A., HAMZAH U., TAHA M.R., ITHNAIN N.S., AHMAD N. 2010 – Influence of Oil Contamination on Geotechnical Properties of Basaltic Residual Soil. *Amer. J. Appl. Sci.*, 7 (7): 954–961.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie składowisk odpadów. *Dz.U. z 2013 r. poz. 21*.
- SILVESTRI V., MIKHAIL N., SOULIE M. 1997 – Permeability response of oil-contaminated compacted clays. *Testing Soil Mixed with Waste or Recycled Material*. STP. 1275. Fredericksburg, USA.
- SINHA U.N., BHARGAVA S.N. 1991 – Variation in differential pore water pressure and particle size at different constant rate of loading in an automated consolidation testing system. *Geotech. Engineer.*, 22: 247–256.
- SMITH R.E., WAHLS H.E. 1969 – Consolidation under constant rate of strain. *Proc. ASCE*, 95, SM2.
- SOUMAYA B., KEMPFERT H.G. 2010 – *Verformungsverhalten weicher Böden im spannungsgesteuerten Kompressionsversuch*. Bautechnik 87, Heft 2. Berlin.
- SRIVASTAVA R.K., PANDEY V.D. 1997 – Geotechnical evaluation of oil contaminated soil. *Proceedings of GREEN 2. The Second International Symposium on Geotechnics Related to the Environment*. Poland, Kraków. Wyd. Thomas Telford, London.
- STAJSZCZAK P. 2018 – Filtracyjno-konsolidacyjne właściwości ilów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach stale wzrastającego obciążenia. *Prz. Geol.*, 66: 558–568.
- STAJSZCZAK P. 2019 – Wpływ zanieczyszczenia paliwami ropopochodnymi na zmiany parametrów filtracyjno-konsolidacyjnych i strukturalnych w gruntach spoistych. Praca doktorska, Wyd. Geol. UW, Warszawa.
- SZALEWICZ H., WŁODEK M. 2009 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Mszczonów. *Nar. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol.*, Warszawa.
- TERZAGHI K. 1925 – *Erdbaummechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. Deuticke, Leipzig.
- VU CAO MINH 1976 – Jednoosiowa konsolidacja gruntów z uwzględnieniem pełzania. Praca doktorska, Wyd. Geol. UW, Warszawa.
- WILUN Z. 1987 – *Zarys Geotechniki*. Wydanie trzecie. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- WISSA A.E.Z., CHRISTIAN J.T., DAVIS E.H., HEIBERG S. 1971 – Consolidation at constant rate of strain. *Proc. ASCE*, 197, SM2.

Praca wpłynęła do redakcji 18.08.2020 r.  
 Akceptowano do druku 19.11.2020 r.