

## Zachowania konsolidacyjne past gruntowych jako potencjalnego materiału izolacyjnego

Paweł Dobak<sup>1</sup>, Sebastian Kowalczyk<sup>2</sup>



P. Dobak

S. Kowalczyk

**Consolidation behavior of soil paste applied as an potential insulating material.** *Prz. Geol.*, 58: 903–911.

*Abstract.* The paper presents the application of consolidation tests for coefficient permeability evaluation in cohesive soils. The insulating property of Neogene green clays from overburden of Belchatów lignite mine are subject to study. These soils are potentially fine material to construct barriers for insulating of contaminations. The results of paste samples tests are compared with behavior of non disturbed structure. The difference of natural and artificial formed structure affect on physical properties and permeability behavior too. The continuous loading consolidation tests let to obtain effective seepage of pore water in short time but head gradient is higher than in natural conditions. It caused contraction effects and may decrease the permeability, when pore water pressure is not dissipate. The consolidation stress and pore water pressure is mainly factor of tests results variability. Differences between permeability of samples formed from paste and natural structure samples may depend on mineral composition and compaction

of paste. Consolidation tests let quickly evaluate permeability of cohesive soil with respect for the different factors considered in optional barriers designs.

**Keywords:** *The Neogene green clay, Belchatów, permeability of cohesive soil, insulating soil barriers*

Rozwój geoinżynierii środowiska wiąże się z potrzebą szczególnego rozpoznania i oceną barier geologicznych, jakimi w zanieczyszczonym ośrodku gruntowo-wodnym są kompleksy utworów słabo przepuszczalnych. Początkowo zainteresowanie tymi problemami wynikało z analiz funkcjonowania składowisk odpadów w środowisku przyrodniczym (m.in. Drągowski & Glazer, 1981). Podstawą wykorzystywania gruntów ilastych w rekultywacji terenów było kompleksowe ich przebadanie i wybór pod kątem odpowiednich właściwości geotechnicznych (Drągowski i in., 1991). W ostatnich latach prowadzono badania nad właściwościami izolacyjnymi poszczególnych formacji gruntowych (m.in. Drągowski & Łuczak-Wilamowska, 2005, 2007; Majer, 2005; Drągowski & Ptaszkiewicz, 2006). Zapoczątkowany został także nowy etap waloryzacji przestrzennej – obecnie jego podstawą jest wyróżnianie jednostek geomorfologicznych i krajobrazowych, którym przypisuje się odpowiednie właściwości izolacyjne oraz sorpcyjne osadów (Falkowska, 2009).

### Uwarunkowania badań izolacyjności

Jednym z kluczowych zagadnień dotyczących zastosowania gruntów jako barier zabezpieczających przed migracją zanieczyszczeń jest ocena ich izolacyjności. Cecha ta stanowi główne kryterium we wszystkich normatywach projektowania składowisk. Z reguły przyjmuje się, że gruntowa bariera izolacyjna powinna być utworzona z kilku warstw o miąższości minimum 0,25 m każda i współczynnika filtracji  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s (Report..., 1999; Garbulewski, 2000). Według przepisów obowiązujących w Polsce (Roz-

porządzenie..., 2003) wymagana wartość współczynnika filtracji  $k$  powinna zależeć od rodzaju odpadów. W podłożu odpadów obojętnych dopuszcza się  $k \leq 1 \times 10^{-7}$  m/s. Właściwe izolowanie podłoża pod składowiskami odpadów niebezpiecznych oraz odpadów tzw. innych niż niebezpieczne i obojętne wymaga z kolei zastosowania warstwy izolacyjnej o przepuszczalności 100 razy mniejszej, a więc takiej, której  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s. Jednocześnie, w celu uzyskania miarodajnej oceny tego parametru należy przeprowadzić badania co najmniej dwiema metodami, w tym minimum jedną polową.

Przedstawiona w niniejszym artykule metoda badań konsolidometrycznych należy do grupy badań laboratoryjnych, przy czym sam sposób wyznaczania wartości współczynnika filtracji stanowi tzw. „metodę pośrednią” (Glazer, 1985). Zaletą jej zastosowania w ocenie warunków geologiczno-inżynierskich składowisk jest zarówno możliwość jednoczesnego uzyskiwania charakterystyk ściśliwości, konsolidacji oraz warunków filtracyjnych gruntów, jak i szybka realizacja procedury laboratoryjnej w warunkach ciągłego wzrostu obciążenia.

Ocena wartości współczynnika filtracji  $k$  gruntów zaliczanych do bardzo słabo przepuszczalnych lub wręcz nieprzepuszczalnych jest złożonym zagadnieniem – zarówno ze względu na nieadekwatność tradycyjnego opisu teoretycznego filtracji w ośrodkach słaboprzepuszczalnych, jak i trudności eksperymentalne. Opis teoretyczny procesu stanowi bowiem ekstrapolację zależności zaproponowanych po raz pierwszy przez Darcy’ego w połowie XIX w. Stała wartość współczynnika proporcjonalności między prędko-

<sup>1</sup>Katedra Ochrony Środowiska i Zasobów Naturalnych, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; p.dobak@uw.edu.pl

<sup>2</sup>Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; s.kowalczyk@uw.edu.pl

ścią  $v$  przepływu wody przez grunt a wymuszeniem wyrażonym poprzez spadek hydrauliczny  $I$  jest charakterystyczna dla ośrodków o nadkapilarnej wielkości porów (piaski i żwiry) oraz w warunkach przepływu określanych na podstawie wartości liczby Reynoldsa i charakterystyki reżimu przepływu (Macioszczyk, 1973). W przypadku gruntów słabo przepuszczalnych stanowiących potencjalne bariery izolacyjne wchodzimy w obszar nieproporcjonalnych zależności  $v=f(I)$ , zwany prelinearną fazą filtracji. Początek oraz kształt wykresu tej funkcji otrzymywany z badań laboratoryjnych wskazuje na konieczność pokonania początkowego oporu w celu zainicjowania przepływu. Ten warunek wyraża się poprzez wprowadzenie pojęcia granicznej wartości gradientu hydraulicznego  $I_0$ , od której zaczyna się proces filtracji. Poglądy na temat tej wartości są bardzo zróżnicowane. Obserwacje przesączania w gruntach twaroplastycznych i półzwardych wskazywały, że filtracja uruchamiana może być dopiero przy wartości  $I_0$  wynoszącej ok. 10 (Roza, 1950). Wiłun (1987) podaje, że w skonsolidowanych glinach pylastych zwięzłych wartości  $I_0$  są mniejsze od 5. Zastosowanie wzorów podanych przez Bondarenkę (1973) i Kovacs'a (1981) wskazuje, że w gruntach o współczynniku filtracji rzędu  $10^{-7}$  m/s można się spodziewać uruchomienia procesu filtracji gdy wartość  $I_0$  wynosi 0,5–1. Dla ilów, gdzie przyjmujemy wartość  $k$  rzędu  $10^{-9}$  m/s, początkowy gradient hydrauliczny  $I_0$  wzrastać powinien do poprzednio cytowanych wartości rzędu 5–10. Takie oszacowania wydają się być jednak nieadekwatne w odniesieniu do gruntów o przemodelowanej strukturze i w pełni nasyconych wodą. Ossowski (1985) badając pasty kaolinowe stwierdził, że dla ośrodka spójnego dwufazowego, w którym powietrze nie ma wpływu na warunki filtracji, zależność pomiędzy prędkością a spadkiem hydraulicznym ma charakter liniowy, nawet przy niskich wartościach  $I_0$  w przedziale 0–0,1.

Bariery izolacyjne sztucznie uformowane z materiału gruntowego wykazują, przynajmniej na etapie ich formowania, cechy past i wobec tego trzeba się liczyć z niemal natychmiastowym uruchomieniem filtracji. W procesie przygotowywania sztucznie formowanej gruntowej warstwy izolacyjnej następuje bowiem zniszczenie nabytych w toku długiej historii geologicznej więzi strukturalnych, wynikających z tzw. „starzenia”, a także prekonsolidacji osadu. Skutkuje to zmianą warunków przesączania się wody i płynnych zanieczyszczeń w przestrzeni porowej. Ośrodek taki z uwagi na jego celowo kierunkowane przekształcenia strukturalne traktowany jest jako antropogeniczny.

### Badania konsolidacyjne

W określaniu współczynnika filtracji gruntów słabo przepuszczalnych badania konsolidacyjne stanowią jedną z metod pośrednich opartych o założenia teorii Terzagiego. Prawidłowa interpretacja wyników wymaga uwzględnienia ograniczeń teoretyczno-modelowych oraz oszacowania warunków wymuszających proces filtracji. Liczne analizy reologiczno-filtracyjnych czynników procesu konsolidacji wskazują, że miarodajne wyniki można uzyskiwać wyłącznie w badaniach, w których monitorowane są zmiany ciśnienia porowego podczas konsolidacji. Wcześniej zakładano, że istnieje podobieństwo przebiegu od-

kształcenia osiowego próbki gruntu i rozpraszania ciśnienia porowego, jednak w świetle przeprowadzonych badań porównawczych (Pająk & Dobak, 2008) nie znajduje to potwierdzenia. Interpretacja parametrów filtracyjnych dokonywana wyłącznie na podstawie krzywej odkształcenia prowadzi do bardzo dużych błędów, leżących z reguły po stronie niebezpiecznej. Efekty reologiczne zaznaczające się silnie, szczególnie w zaawansowanej fazie procesu, skutkują wyznaczeniem bardzo małych, błędnych wartości współczynnika konsolidacji, a w konsekwencji także zaniżonego o kilka rzędów wartości współczynnika filtracji. Rekomendowanymi metodami powinny być wyłącznie badania konsolidometryczne z pomiarem ciśnienia porowego, prowadzone w warunkach obciążeń skokowych (IL – *incremental loading*) oraz ciągle wzrastających (CL – *continuous loading*).

W przypadku badań CL uzyskuje się z reguły dość wysokie wartości ciśnienia porowego, co jest korzystne, gdyż intensyfikuje tok badania procesu filtracji; z drugiej strony otrzymane wartości znacznie przekraczają warunki brzegowe wymuszeń (spadków hydraulicznych), jakie występują na składowiskach odpadów. Niemniej jednak, poznanie zależności konsolidacyjno-filtracyjnych w szerokim przedziale naprężeń i spadków hydraulicznych pozwala lepiej określić charakter procesu filtracji.

Przedmiotem analiz i porównań przedstawionych w niniejszym artykule są badania neogeńskich ilów zielonych występujących w nadkładzie KWB *Belchatów* (Kowalczyk, 2007). Stanowią one mogą potencjalny materiał do formowania barier izolacyjnych, możliwy do pozyskania przy selektywnym zbieraniu nadkładu złoża. Grunty poddane analizom pochodziły z 2 miejsc opróbowania (oznaczonych odpowiednio jako IZ-II oraz IZ-III), zlokalizowanych w odległości ok. 1000 m od siebie w obrębie rowu Kleszczowa. Zmienność badanych ilów wyraża się przede wszystkim w składzie granulometrycznym, co rzutuje na granice stanu oraz parametry fizyczne (tab. 1).

Na podstawie wyników badań składu mineralnego stwierdzono, że we frakcji ilastej dominują minerały z grupy smektytów dioktaedrycznych oraz kaolinit. W próbkach z rejonu IZ-II występował ponadto illit. Jak wynika z parametrów przytoczonych w tabeli 1, grunty pobrane z rejonu IZ-III wyróżniały się znacznie większą zawartością frakcji ilastej. Znajduje to odzwierciedlenie w wyższych wartościach granic Atterberga oraz wysokiej wilgotności i odpowiednio większej porowatości sporządzonych past gruntowych.

Uformowanie past gruntowych w warunkach swobodnego dostępu fazy ciekłej do rozdrobnionego materiału, pozbawionego sedymentacyjno-diagenetycznych makroskopowych więzi strukturalnych, spowodowało znaczące zwiększenie porowatości oraz obniżenie gęstości objętościowej, a jednocześnie utworzenie quasi-dwufazowego ośrodka szkielet – woda lepiej odpowiadającego teoretycznemu opisowi procesu konsolidacji filtracyjnej.

Badania właściwości konsolidacyjno-filtracyjnych prowadzone były w konsolidometrze wysokociśnieniowym – do wartości naprężenia 2 MPa – na 24 próbkach ilów zielonych o nienaruszonej strukturze (NNS) oraz na 8 próbkach past gruntowych. Zastosowanie prasy MTS w celu przekazywania obciążeń umożliwiło prowadzenie badań typu CRL

**Tab. 1. Podstawowe cechy fizyczne gruntów z lokalizacji IZ-II i IZ-III**  
 Table 1. Basic physical properties of soil from localization IZ-II and IZ-III

Parametr <i>Parameter</i>	Symbol <i>Symbol</i>	Jednostka <i>Unit</i>	Lokalizacja próbek w polu <i>Bełchatów</i> <i>Localization of samples in open pit Bełchatów</i>	
			IZ-II	IZ-III
gęstość właściwa <i>density of solid particles</i>	$\rho_s$	Mg/m <sup>3</sup>	2,61–2,68	2,80–2,82
granica plastyczności <i>plastic limit</i>	w <sub>p</sub>	[%]	18,7–20,9	36,4–38,0
granica płynności <i>liquid limit</i>	w <sub>L</sub>	[%]	*55,1–62,5 **46,5	*106,6–110,6 **105,4
wskaźnik plastyczności <i>plasticity index</i>	I <sub>p</sub>	[%]	34,2–43,8	70,2–72,6
zawartość frakcji <i>grain-size fraction</i>	frakcja piaskowa <i>sand fraction</i>	f <sub>p</sub>	1–7	0
	frakcja pyłowa <i>silt fraction</i>	f <sub>π</sub>	15–21	7–10
	frakcja ilowa <i>clay fraction</i>	f <sub>i</sub>	78–78	90–93

\*aparatus Casagrande'a, \*\*penetrometr ELE  
 \*Casagrande apparatus, \*\*ELE penetrometer

Parametr <i>Parameter</i>	Symbol <i>Symbol</i>	Jednostka <i>Unit</i>	Próbki NNS <i>Undisturbed sample (NNS)</i>	
			IZ-II	IZ-III
gęstość objętościowa <i>bulk density of soil</i>	$\rho$	Mg/m <sup>3</sup>	1,83–2,19	1,84–1,93
gęstość objętościowa szkieletu gruntowego <i>density of dry soil</i>	$\rho_d$	Mg/m <sup>3</sup>	1,34–1,92	1,41–1,47
wilgotność naturalna <i>natural moisture content</i>	w <sub>n</sub>	[%]	13,3–36,6	28,9–35,0
porowatość <i>porosity</i>	n	[–]	0,35–0,43	0,48–0,50
wskaźnik porowatości <i>void ratio</i>	e	[–]	0,53–0,76	0,92–1,00

Parametr <i>Parameter</i>	Symbol <i>Symbol</i>	Jednostka <i>Unit</i>	Pasta gruntowa <i>Soil paste</i>	
			IZ-II	IZ-III
gęstość objętościowa <i>bulk density of soil</i>	$\rho$	Mg/m <sup>3</sup>	1,65–1,89	1,46–1,48
gęstość objętościowa szkieletu gruntowego <i>density of dry soil</i>	$\rho_d$	Mg/m <sup>3</sup>	1,10–1,26	0,75–0,76
wilgotność <i>moisture content</i>	w	[%]	49,3–50,9	90,8–97,6
porowatość <i>porosity</i>	n	[–]	0,52–0,58	0,73–0,73
wskaźnik porowatości <i>void ratio</i>	e	[–]	1,10–1,41	2,70–2,75

(*constat rate of loading*), ze zróżnicowanymi dla kolejnych badań prędkościami (od 0,05 do 0,20 kN/min).

### Określanie parametrów konsolidacyjno-filtracyjnych

Podstawowym wskaźnikiem przebiegu procesu filtracji w konsolidowanym gruncie jest dystrybucja ciśnienia porowego (tab. 2). Porównanie ciśnień generowanych na skutek obciążeń konsolidacyjnych rzędu 250–500 kPa – a więc odpowiadającego warunkom, jakie mogą występować pod wysokimi składowiskami – wskazuje, że w gruntach o nie-naruszonej strukturze ciśnienia porowe są bardziej zmienne i reprezentują szersze przedziały. Maksymalne wartości tych ciśnień (w omawianych warunkach) są natomiast zbli-

żone do siebie – główną rolę odgrywa więc stopień wilgotności ośrodka, a czynniki strukturalne mają znaczenie drugorzędne.

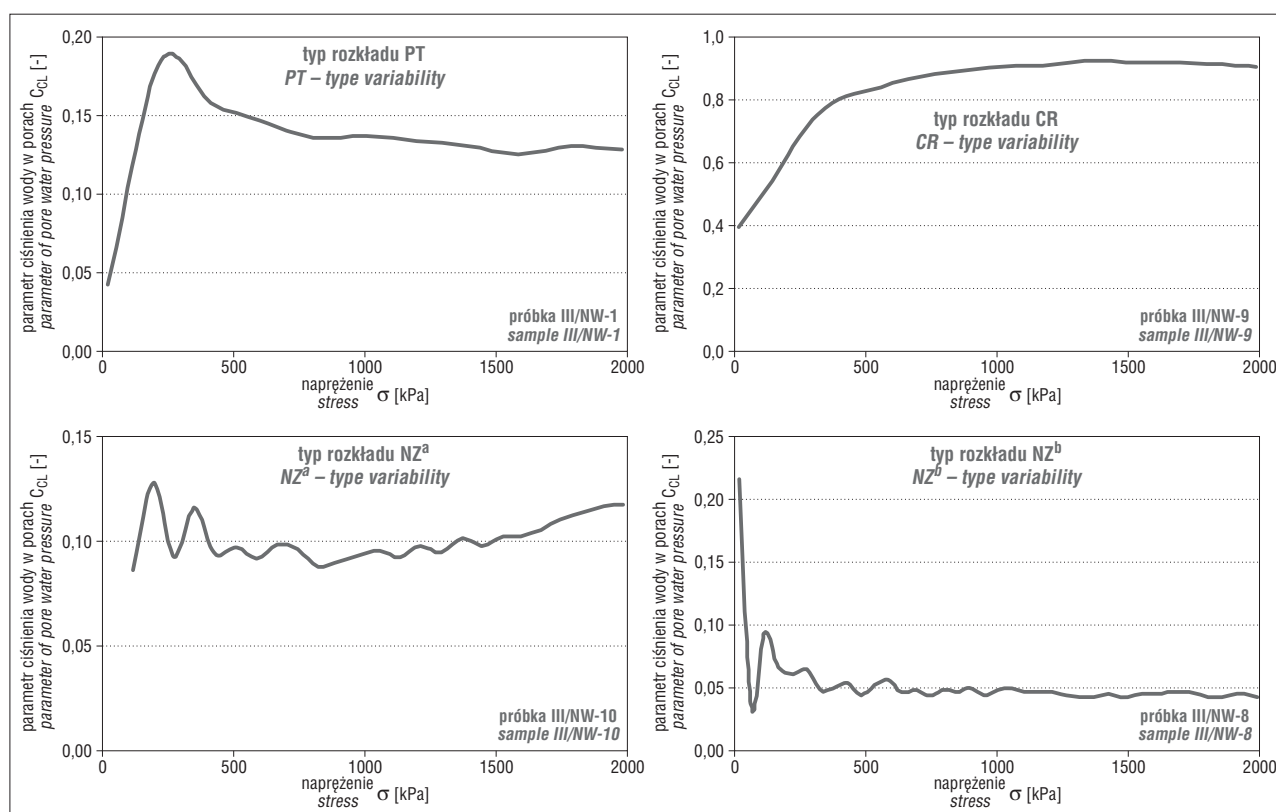
Warto także zwrócić uwagę na bardzo wysokie wartości spadków hydraulicznych. To dzięki nim możliwe jest przeprowadzenie badań i uzyskiwanie wyników w dość szybkim czasie. Spadki hydrauliczne mierzone w warunkach polowych są mniejsze w warstwach o znacznej miąższości. Implikacje teoretyczne wskazują na wzajemne związki między prędkością obciążenia a długością drogi drenażu, które powinny być uwzględniane w doborze programu badań laboratoryjnych (Dobak, 2003).

Dla oceny warunków konsolidacji kluczowym zagadnieniem jest charakterystyka parametru  $C_{CL} = u_b/\sigma$  w prze-

**Tab. 2. Dystrybucja ciśnienia porowego w toku badań**

Table 2. Distribution of pore water pressure in tests

Parametr Parameter	Symbol Symbol	Jednostka Unit	IZ-II		IZ-III	
			próbki NNS undisturbed sample	pasta gruntowa soil paste	próbki NNS undisturbed sample	pasta gruntowa soil paste
ciśnienie porowe przy naprężeniu 250 kPa pore water pressure at a stress of 250 kPa	$u_b$	kPa	2,1–215	195–215	11–210	164–225
ciśnienie porowe przy naprężeniu 500 kPa pore water pressure at a stress of 500 kPa			5,2–470	370–445	23–435	374–415
spadki hydrauliczne przy naprężeniu 250 kPa hydraulic gradient at a stress of 250 kPa	I	[-]	16–1600	1075–1740	85–1550	1325–1800
spadki hydrauliczne przy naprężeniu 500 kPa hydraulic gradient at a stress of 500 kPa			40–3650	2295–3530	180–3400	3250–3580
maksymalna wartość parametru ciśnienia wody w porach maximum value of pore water pressure parameter	$C_{CL\ max}$	[-]	0,01–0,96	0,83–0,94	0,08–0,95	0,88–0,94



**Ryc. 1.** Eksperymentalne rozkłady parametru ciśnienia wody w porach obserwowane w badaniach

**Fig. 1.** Experimental types of pore water pressure variability obtained in tests

biegu przeprowadzonych badań (ryc.1). Zastosowane prędkości obciążeń oraz wysoki stopień wilgotności gruntów powodują, że najczęściej uzyskuje się rozkłady typu NZ (nieregularny, zmienny) lub CR (rosnący w sposób ciągły), w których parametr  $C_{CL}$  był zazwyczaj większy od wartości 0,24, a więc dystrybucja ciśnienia porowego odbywała się w fazie nieustalonej. Jedynie w 3 przypadkach badań próbek NNS uzyskano rozkłady typu PT (quasi-teoretyczny z przesunięciem maksimum) i niskie wartości  $C_{CL}$  odpowiadające fazie ustalonej.

Parametry konsolidacyjno-filtracyjne określano na podstawie wzorów przedstawionych w tabeli 3, przy czym jako referencyjne przyjęto współczynniki filtracji obliczane z podstawowych zależności stosowanych w interpretacjach badań CL. Jednoosiowy drenaż wód porowych ukierunko-

wany jest od dolnej nieprzepuszczalnej podstawy próbki ku jej górnej powierzchni. W tych warunkach ciśnienie porowe jest najwyższe przy podstawie ( $u_b$ ). Uwzględnienie modelu przestrzennego opisu rozpraszania ciśnienia porowego w osi pionowej następuje poprzez przyjmowanie współczynnika o wartości 2/3 przy wyznaczaniu naprężeń efektywnych ( $\sigma'$ ).

Z uwagi na fakt, że w większości przypadków konsolidacja przebiegała w fazie nieustalonej, porównano wyniki wybranych badań, zinterpretowanych także z zastosowaniem współczynników korekcyjnych według Janbu (1981) Wartości współczynników filtracji z uwzględnieniem tych poprawek były średnio 1,7–1,9 razy mniejsze od otrzymanych podczas stosowania zależności podstawowych.

**Tab. 3. Wyznaczanie współczynnika filtracji z badań konsolidacyjnych**

Table 3. Estimation of permeability coefficient from consolidation tests

	<b>Parametr</b> <i>Parameter</i>	<b>Jednostka</b> <i>Unit</i>	<b>Wzór</b> <i>Formula</i>
zależności podstawowe <i>basic formulas</i>	$\sigma'$ – naprężenie efektywne <i>effective stress</i>	[kPa]	$\sigma' = \sigma - \frac{2}{3}u_b$
	$M_0$ – moduł ściśliwości <i>modulus of one-dimensional compressibility</i>	[kPa]	$M_0 = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon}$
	$c_v$ – współczynnik konsolidacji <i>coefficient of consolidation</i>	[m <sup>2</sup> /s]	$c_v = \frac{\Delta\sigma \cdot H_i}{2 \cdot \Delta t \cdot u_b}$
	$k$ – współczynnik filtracji <i>permeability coefficient</i>	[m/s]	$k = \frac{c_v \cdot \gamma_w}{M_0}$
zależności poprawkowe wg propozycji Janbu i in. (1981) <i>corrections proposed by Janbu et al. (1981)</i>	$\lambda$ – stosunek przyrostu ciśnienia porowego do przyrostu naprężenia <i>relation between increase of pore water pressure and stress</i>	[-]	$\lambda = \frac{\Delta u_b}{\Delta\sigma}$
	$\alpha_k$ – bezwymiarowy współczynnik poprawkowy dla współczynnika filtracji <i>dimensionless correction coefficient of permeability coefficient</i>	[-]	gdzie: <i>where:</i> $\alpha_k = \frac{2(\cosh a - 1)}{a \cdot \sinh a}$ $a = \operatorname{arcosh}\left(\frac{1}{1-\lambda}\right)$
	$k_J$ – współczynnik filtracji według formuły Janbu <i>coefficient of permeability estimated from Janbu formula</i>	[m <sup>2</sup> /s]	$k_J = \alpha_k \cdot k$
korekta wartości $c_v$ (Dobak, 2008) <i>correction of <math>c_v</math> values (Dobak, 2008)</i>	$C_{CL}$ – parametr ciśnienia wody w porach <i>parameter of pore water pressure</i>	[-]	$C_{CL} = \frac{u_b}{\sigma}$
	$t_{(T=1)MD}$ – umowny czas konsolidacji wyznaczany z metody MD <i>specific consolidation time estimated from MD method</i>	[s]	$t_{(T=1)MD} = \frac{t}{T_{CLtheor}}$
	$c_{vMD}$ – współczynnik konsolidacji określany na podstawie metody MR <i>coefficient of consolidation estimated from MD method</i>	[m <sup>2</sup> /s]	$c_{vMD} = \frac{H^2}{t_{(T=1)MD}}$
	$k_{MD}$ – współczynnik filtracji określany z uwzględnieniem metody MR <i>permeability coefficient estimated with respect of MD method</i>	[m/s]	$k_{MD} = \frac{\gamma_w \cdot c_{vMD}}{M_0}$

Pozostałe oznaczenia:  $\varepsilon$  – odkształcenie osiowe [-];  $\gamma_w$  – ciężar objętościowy wody [kN/m<sup>3</sup>];  $H$  – długość drogi drenażu [m];  $\sigma$  – naprężenie [kPa];  $t$  – czas od początku badania CL [s];  $u_b$  – ciśnienie wody w porach [kPa]

Other symbols:  $\varepsilon$  – axial strain [-];  $\gamma_w$  – unit weight of water [kN/m<sup>3</sup>];  $H$  – length of the drainage path [m];  $\sigma$  – stress [kPa];  $t$  – time from initial point of CL test [s];  $u_b$  – pore water pressure [kPa]

Podstawą wykorzystania kolejnej metody opartej o analizę rozkładów dystrybucji ciśnienia porowego jest uwzględnienie teoretycznie wyprowadzonego związku istniejącego pomiędzy wartościami parametru  $C_{CL}$  a bezwymiarowym względnym czasem konsolidacji  $T_{CL}$ . Związek ten zależy wyłącznie od programu obciążenia i na przykład dla badań typu CRL przy różnych prędkościach opisany jest jedną krzywą (Dobak, 1999, 2008). Stosując tą metodę interpretacji badań konsolidometrycznych otrzymywano wartości współczynnika filtracji nawet około 2,5 razy mniejsze w stosunku do wyliczanych na podstawie wzorów podstawowych. Redukcja wartości współczynnika filtracji w fazie nieustalonej zmniejsza zmienność parametrów otrzymywanych w badaniach CL i wydaje się być teoretycznie uzasadniona. Z drugiej strony trzeba pamiętać, że przyjmowanie mniejszych wartości współczynnika filtracji prowadzi do zawyżenia oceny izolacyjności badanego gruntu i może się wiązać z błędami w projektowaniu.

### Czynniki zmienności współczynnika filtracji

Zmiany przepuszczalności gruntu określane na podstawie badań konsolidacyjnych przejawiają się przede wszystkim jako zmniejszanie się wartości współczynnika filtracji  $k$  wraz ze wzrostem naprężenia (ryc. 2). Tylko przy wzroście naprężeń od 250 do 500 kPa, charakterystycznym dla obciążeń jakie mogą występować pod typowymi składowiskami, uzyskuje się średnio 3–3,5 razy mniejsze wartości  $k$ . W całym badanym zakresie naprężeń (do 2 MPa) otrzymujemy zmniejszenie współczynnika filtracji o 3–4 rzędy wielkości – od  $10^{-7}$  do  $10^{-12}$  a nawet  $10^{-13}$  m/s. Zakresy te obejmują praktycznie wszystkie granice wspomnianych wcześniej kryteriów izolacyjności, a także zmienność będącą efektem zastosowania różnych metod w badaniach tych samych gruntów (Kaczyński, 2000). Dlatego ogromne znaczenie ma określenie warunków brzegowych występujących w podłożu projektowanych obiektów. Przyczynę znacznej zmienności  $k = f(\sigma) = f(e)$  wiązać można zarówno z czynnikami fizyczno-mechanicznymi, jak i ze specyfiką badań konsolidometrycznych. Na wykładnicze zmniejszanie się przepuszczalności uwarunkowane zmianami wskaźnika porowatości  $e$  zwracali uwagę m.in. Poskitt (1969), Al-Tabbae i Wood (1987). Potęgowe opisy zmienności współczynnika filtracji uzyskiwane z analizowanych w niniejszym artykule badań wskazują na podobne charakterystyki. W badaniach konsolidacji CL uwzględnić trzeba co najmniej dwa dodatkowe specyficzne uwarunkowania. Jednym z nich są zawyżone wartości parametrów konsolidacyjno-filtracyjnych w fazie nieustalonej. Świadoma rezygnacja z ich korekty może być podyktowana wybieraniem (ze względów bezpieczeństwa) raczej wyższych niż niższych wartości współczynnika filtracji spośród dostępnych opcji interpretacyjnych. Drugi aspekt to zmniejszanie się uzyskiwanych wartości współczynnika filtracji, które jest związane z generowaniem w toku badań coraz większego ciśnienia wody w porach (Nash i in., 1992). Mechanizm zjawiska można wyjaśnić poprzez analogię hydrodynamiczną z dławieniem (kontrakcją) przepływu (Dobak, 1999). Efekty doświadczeń, przeanalizowane m.in. przez Kowalczyka (2007), wskazują na możliwość przejściowego zmniejsza-

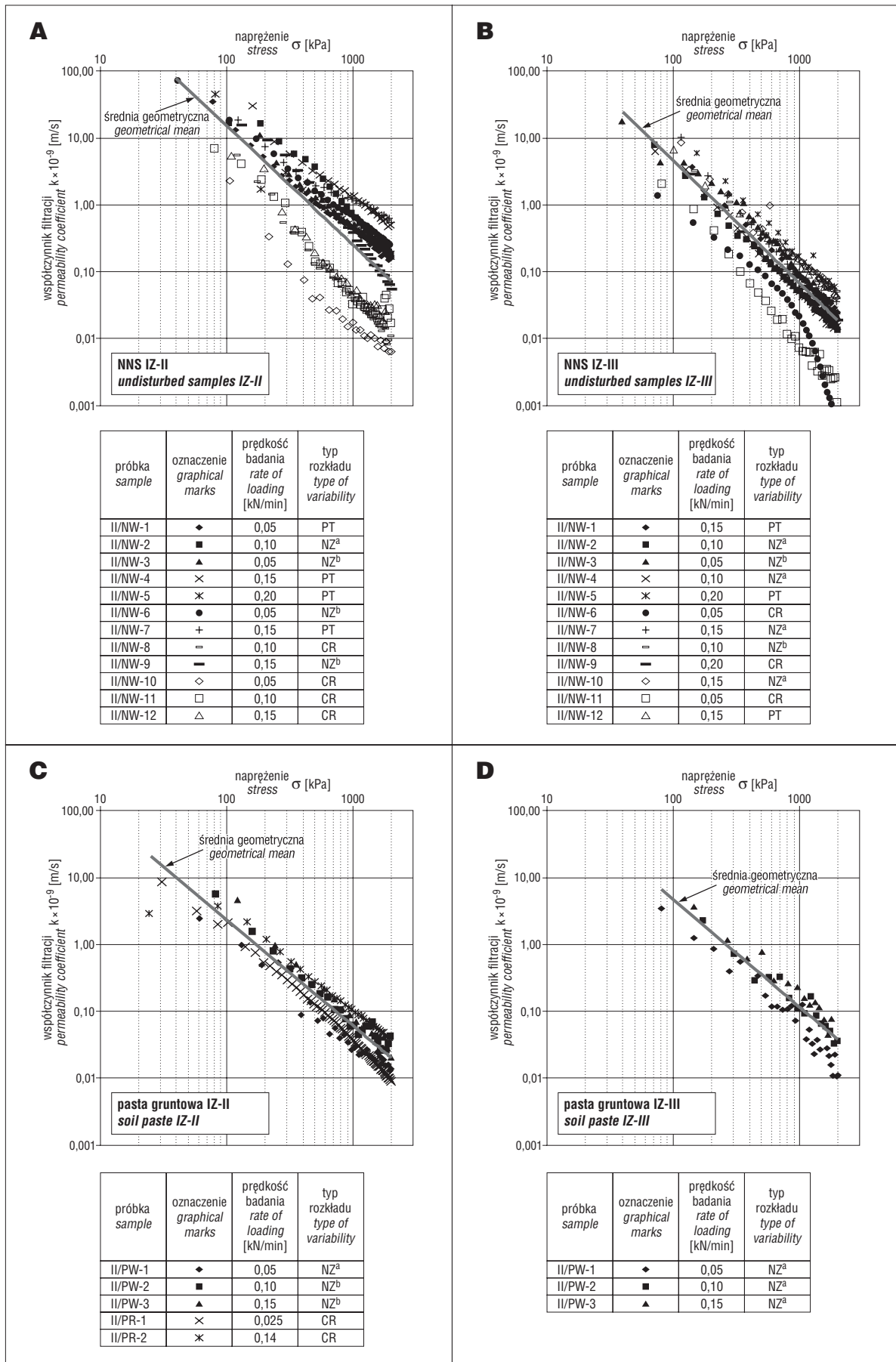
nia przepuszczalności na skutek wysokich wartości ciśnienia porowego  $u_b$ , występującego w konsolidowanym ośrodku. Otrzymuje się wówczas niższe wartości współczynnika filtracji niż w badaniach, podczas których ciśnienie porowe – przy podobnej porowatości gruntu – było mniejsze.

Zjawisko dławienia rozwija się wraz ze zmniejszaniem porowatości, czego miarą w badaniach konsolidometrycznych jest odkształcenie osiowe. W analizowanych gruntach o strukturze NNS efekty dławienia odnotowywano po przekroczeniu 3–4 % odkształcenia, zaś w badaniach past gruntowych odpowiednio przy odkształceniach rzędu kilkunastu procent, co wynika z większej początkowej porowatości past. Warunki takie występowały jednakże dopiero przy naprężeniach konsolidacyjnych przekraczających 700 kPa, a więc będących poza zakresem rozpatrywanym dla podłoża typowych składowisk. Mimo to, należy pamiętać, że efekty dławienia (kontrakcji) mogą być źródłem błędów leżących po stronie niebezpiecznej. Dlatego przy programowaniu prędkości badań konsolidacyjnych istnieje zarówno potrzeba przyjmowania odpowiednich wartości ciśnień porowych, jak i nie przekraczanie warunków, w których zaczyna ujawniać się kontrakcja. Doświadczalnie aspekty te analizuje się przez porównanie wyników badań prowadzonych przy minimum dwóch prędkościach obciążenia

Istotnym czynnikiem, który rzutuje na charakter procesu filtracji, jest stan gruntu oraz jego cechy strukturalno-teksturalne. Generalnie można stwierdzić, że zróżnicowanie struktury ośrodka – wywołane przez naturalne procesy sedymentacji i diagenety – odzwierciedla się także w szerokim przedziale zmienności współczynnika filtracji (ryc. 3). Przeciętne wartości współczynnika zmienności  $v$  wyznaczanego dla wartości  $k$  analizowanych w kolejnych przedziałach naprężeń są niemal dwukrotnie wyższe w serii IZ-II ( $v = 0,96$ ) niż w serii IZ-III ( $v = 0,58$ ). Tak więc większa zawartość frakcji ilowej z dominacją smektytów ma istotny wpływ na zmniejszenie zmienności właściwości konsolidacyjno-filtracyjnych gruntów.

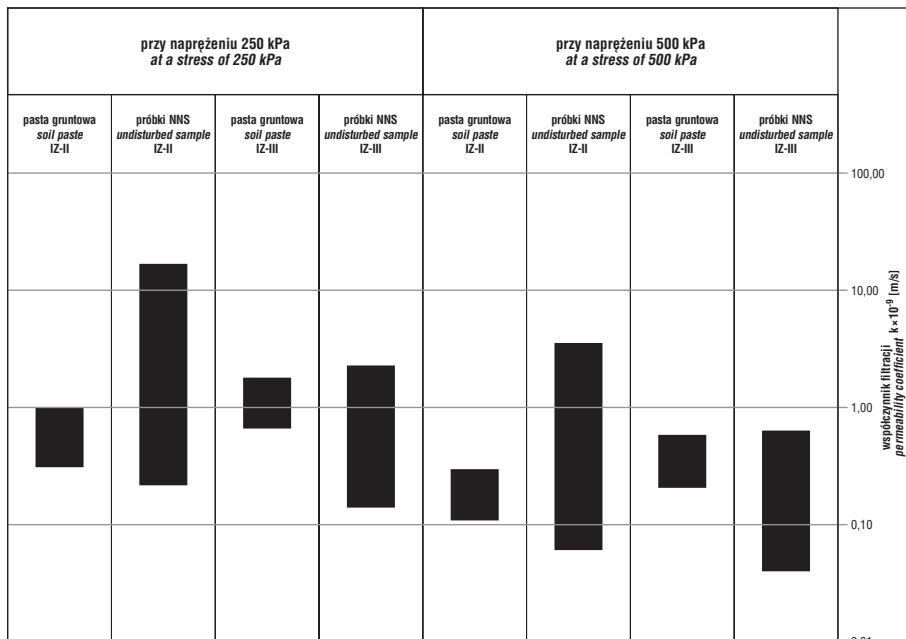
Mniej liczne badania prowadzone na pastach wskazują, że homogenizacja właściwości materiału gruntowego jest efektem zniszczenia struktury, do którego dochodzi w procesie sporządzania past gruntowych. Skutkuje to ujednoczeniem parametrów przepuszczalności (przeciętne wartości współczynnika zmienności dla past pochodzących z obu analizowanych lokalizacji są zbliżone i kształtują się na poziomie  $v = 0,4$ ). Towarzyszy temu mała, wynosząca ok. 10 %, różnica między wartościami średniej arytmetycznej i geometrycznej.

Generalnie jednak szeroki przedział zmienności zarówno wartości współczynnika konsolidacji, jak i filtracji, jest przesłanką do stworzenia charakterystyk opartych o pojęcie średniej geometrycznej, odpowiedniejszej dla zbiorów o rozkładach logarytmiczno-normalnych. Porównanie wartości średnich geometrycznych w funkcji naprężenia pokazuje różne możliwe uwarunkowania zmian przepuszczalności. Badaniach gruntów serii IZ-II charakteryzujących się nieco mniejszą spoistością wykazały znaczące zmniejszenie przepuszczalności past w stosunku do próbek o nieznaruszonej strukturze. Na rycinie 4 przedstawiono charakterystyki średniej geometrycznej uzyskane na podstawie potęgowej aproksymacji zależności doświadczalnych. War-



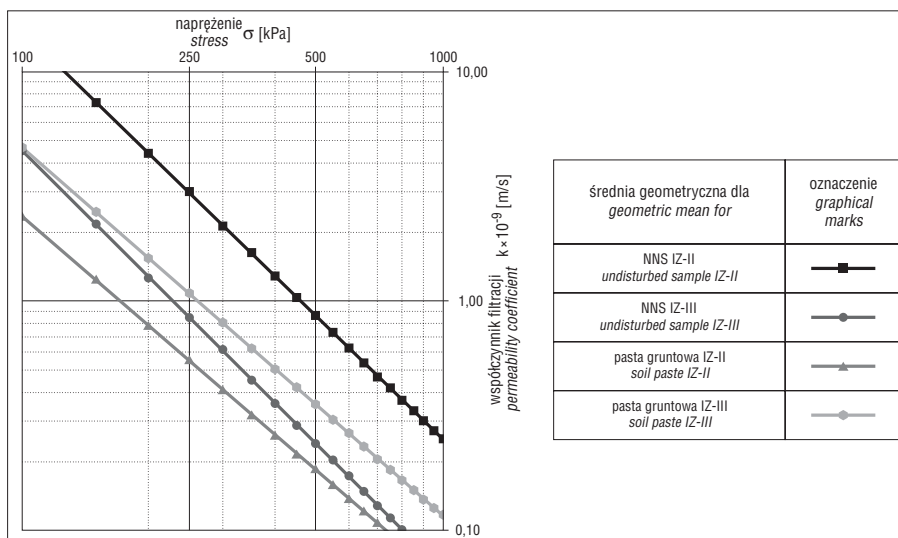
Ryc. 2. Zależność między współczynnikiem filtracji ( $k$ ) a naprężeniem ( $\sigma$ ) w badaniach konsolidacji CL dla prób NNS (a, b) i past gruntowych (c,d) z badanych lokalizacji

Fig. 2. Relation between permeability coefficient ( $k$ ) and stress ( $\sigma$ ) in consolidation tests CL (continuous loading) for undisturbed samples (a, b) and soil paste (c, d) from examined localizations



Ryc. 3. Zmienność wartości współczynnika filtracji  $k$  w badanych próbkach przy naprężeniu wynoszącym 250 i 500 kPa

Fig. 3. Variability of the value of the permeability coefficient  $k$  in examined samples at a stress of 250 and 500 kPa



Ryc. 4. Zmiany średnich geometrycznych współczynnika filtracji  $k$  w funkcji naprężenia

Fig. 4. Changes of geometric mean of permeability coefficient  $k$  in the function of stress

tości określonej w ten sposób przeciętnej przepuszczalności wynoszą ok.  $2,5 \times 10^{-9}$  m/s przy naprężeniach konsolidacyjnych równych 250 kPa, lecz zmniejszają się do ok.  $7 \times 10^{-10}$  m/s przy naprężeniach 500 kPa, co pod względem graficznym jest maskowane dzięki zastosowaniu logarymicznej skali  $k$ . Niemniej jednak zmniejszanie się wartości bezwzględnych przepuszczalności wskazuje na rolę kompaktacji iltu w kształtowaniu właściwości izolacyjnych bariery gruntowej. Efekty takie nie są powszechne. Wskaźnikowe, prowadzone w mniejszej liczbie badania gruntów serii IZ-III charakteryzujących się wyższą spoistością i zwiększoną porowatością past dały zależności odwrotne. Przepuszczalność past okazała się nieco większa niż w

przypadku próbek NNS, a bezwzględna różnica przepuszczalności wynikająca z czynników strukturalnych nie podlegała tak wyraźnej zmianie ze wzrostem naprężenia konsolidacyjnego.

Podczas projektowania istotne jest więc uwzględnienie specyfiki zmian wskaźników porowatości, wilgotności i przepuszczalności barier izolacyjnych formowanych z gruntów o antropogenicznie zmienionych właściwościach.

### Wnioski

1. Jak wynika z przedstawionych w artykule analiz, ośrodki gruntowe wykazują antropogenicznie uwarunkowaną przemienność właściwości, która dotyczy również wysoce wrażliwych wskaźników, jakimi są zachowania filtracyjno-konsolidacyjne.

2. W prognozach zachowań filtracyjnych uwzględniać należy zarówno skład mineralny i fazowy gruntów, zmiany strukturalne związane z formowaniem barier z gruntów o naruszonej strukturze, warunki pracy podłoża składowiska, jak i krytyczną analizę możliwości oferowanych przez dostępne metody badawcze.

3. Obecny stan wiedzy na temat uwarunkowań konsolidacji w warunkach ciągłego wzrostu naprężenia wskazuje, że metodyka badań CL może być rekomendowana w celu oceny właściwości filtracyjnych gruntów słabo przepuszczalnych. W programowaniu, a także w interpretacji badań, niezbędne jest uwzględnienie analizy wartości oraz prędkości zadawanych obciążeń, dystrybucji ciśnienia porowego, wydzielenie fazy nieustalonej badania, ocena

zjawiska dławienia filtracji oraz charakteru zmienności uzyskiwanych wyników.

4. Szerokie możliwości programowania badań i rejestracji zachowań konsolidacyjno-filtracyjnych ośrodka gruntowego pozwalają na przedstawianie wielowariantowych prognoz izolacyjności w nawiązaniu do opcji projektowych oraz kolejnych etapów budowy i eksploatacji składowisk.

5. Laboratoryjne modelowanie sprzężonych ze sobą procesów filtracji oraz konsolidacji stanowi rozwój kierunku badań geomateriałów w ramach metod geoinżynierii środowiska ukierunkowanych na świadome i optymalne przekształcanie środowiska geologicznego.



## Literatura

- AL-TABBAAE A. & WOOD D.M. 1987 – Some measurements of the permeability of kaolin. *Geotechnique*, 37: 499–504.
- BONDARENKO N.F. 1973 – Fizyka dźwizżenia podziemnych wód. *Gidrometeorizdat*, Leningrad.
- DOBAK P. 1999 – Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. *Wyd. IGSMiE PAN*, Kraków.
- DOBAK P. 2003 – Loading velocity in consolidation analysis. *Geol. Quart.*, 47: 13–20.
- DOBAK P. 2008 – Evaluation of consolidation parameters in CL tests. Theoretical and practical aspects. *Geol. Quart.*, 52: 397–410.
- DRĄGOWSKI A. & GLAZER Z. 1981 – Inżyniersko-geologiczne problemy środowiska przyrodniczego przy mokrym składowaniu popiołów. *Biul. Geol. Uniwersytetu Warszawskiego*, 24: 217–229.
- DRĄGOWSKI A., KACZYŃSKI R., DOBAK P. & TRZCIŃSKI J. 1991 – Geotechniczne problemy eksploatacji iłów poznańskich na przykładzie złoża Rypinek w Kaliszu. *Acta Univ. Wratisl.*, 1354 : 1–16.
- DRĄGOWSKI A. & ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 2005 – Uwarunkowania stosowalności iłów jako izolacyjnych barier geologicznych na przykładzie iłów ze złoża w Budach Mszczonowskich. *Prz. Geol.*, 53: 687–690.
- DRĄGOWSKI A. & ŁUCZAK-WILAMOWSKA B. 2007 – Grunty spoiste surowcem do formowania mineralnych barier izolacyjnych – zasady wstępnej oceny ich przydatności. *Górn. Odkryw.*, 7: 9–12.
- DRĄGOWSKI A. & PTASZKIEWICZ M. 2006 – Wstępna ocena iłów warwowych okolic Warszawy jako geologicznych barier izolacyjnych. *Zesz. Nauk. Polit. Biał.*, 28: 51–67.
- FALKOWSKA E. 2009 – Geomorfologiczne uwarunkowania występowania naturalnych geologicznych barier izolacyjnych na wybranych obszarach Polski Środkowej. *Wyd. UW*, Warszawa.
- GARBULEWSKI K. 2000 – Dobór i badania gruntowych uszczelnień składowisk odpadów komunalnych. *Rozprawy naukowe i monografie*. *Wyd. SGGW*, Warszawa.
- GLAZER Z. 1985 – *Mechanika gruntów*. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- JANBU N., TOKHEIM O. & SENNESET K. 1981 – Consolidation tests with continuous loading. *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1: 645–654.
- KACZYŃSKI R. (red.) 2000 – Współczynnik filtracji gruntów spoistych wyznaczony różnymi metodami. [W:] *Aktualne problemy geologiczno-inżynierskich badań podłoża budowlanego i zagospodarowania terenu*. *Bogucki Wyd. Naukowe. S.C.*, Poznań.
- KOVACS G. 1981 – *Seepage hydraulics*. *Akad. Kiado*, Budapest.
- KOWALCZYK S. 2007 – Zmiany właściwości filtracyjnych w procesie konsolidacji zielonych iłów beidelitowych z rowu Kleszczowa. *Rozprawa doktorska*. *Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski*.
- MACIOSZCZYK T. 1973 – Zmienność parametrów nieliniowej filtracji wód podziemnych. *Biul. Geol.*, 15: 5–78.
- MAJER E. 2005 – Ocena właściwości przesłonowych iłów do budowy składowisk odpadów. *Rozprawa doktorska*. *Instytut Techniki Budowlanej*, Warszawa.
- NASH D.F.T., SILLS G.C. & DAVISON L.R. 1992 – One-dimensional consolidation testing of soft clay from Bothkennar. *Geotechnique*, 42: 241–256.
- OSSOWSKI J. 1985 – *Wodoprzepuszczalność kaolinu*. [W:] *Aktualne Problemy Hydrogeologii*: 553–559. *Wyd. AGH*, Kraków.
- PAJĄK R. & DOBAK P. 2008 – Określanie parametrów filtracyjnych iłów krakowieckich z badań w konsolidometrze Rowe'a. *Geologia – Kwart. AGH*, 34: 677–689.
- POSKITT T.J. 1969 – The consolidation of saturated clay with variable permeability and compressibility. *Geotechnique*, 19: 234–252.
- Report of the ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics**. *Ruhr Universität*, Bochum, Germany.
- ROZA S. A. 1950 – Osadki gidrotechnicznych сооруżeń na glnach z mołoj włazności. *Gidrotechnichzeskoje stroitielstwo*, 9: 25–30.
- Rozporządzenie** ministra środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów. (Dz. U. NR 61, poz. 549).
- WILUN Z. 1987 – *Zarys geotechniki*. *Wyd. Komunikacji i Łączności*, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 25.06.2010 r.

Po recenzji akceptowano do druku 26.07.2010 r.