



## Zmiany współczynnika filtracji gytii i kredy jeziornej na skutek ich etapowej konsolidacji – metodyka szacowania

Jan Damicz<sup>1</sup>



**The changes of permeability coefficient in the stage consolidation process of gyttja and lacustrine chalk – the methodology of valuation.** Prz. Geol., 63: 155–163.

*Abstract.* Lacustrine deposits, e.g. gyttja and lacustrine chalk, in natural conditions are weak soils from the engineering point of view. These soils under loading have large and long-lasting consolidation settlement. In the last years, these soils have been more often used as a subsoil, mainly for road and hydraulic engineering embankments. To predict the settlement, we have to know the strain and filtration parameters of the subsoil. The paper presents the results of coefficient permeability tests of gyttja and lacustrine chalk, performed in oedometer tests after following loading steps. The results have allowed obtaining downward but various trends of coefficient permeability changes in the consolidation process due to a decrease of void ratio. In general, the differences of trends are related to different types of gyttja. In the case of mineral-organic high-carbonate gyttja, three different decreasing trends were obtained. For these different trends, the causal relation was determined to the lithological impact factor. The lithological impact factor in the paper is proposed as the combination of main lithological characteristics.

**Keywords:** gyttja, lacustrine deposits, oedometer test, coefficient of permeability, consolidation, compressibility, void ratio, lithological characteristics, lithological impact factor

Występujące w Polsce gytie i kredy jeziorne są przede wszystkim holocenijskimi osadami jeziornymi, najczęściej powiązаныmi ze sobą genetycznie cyklem sedymentacyjnym, rozpoczynającym się kredą jeziorną przechodzącą następnie w gytie. Nierzadko osady te występują obok siebie lub jako sekwencja, gdzie kreda jeziorna podściela gytie, z kolei one są najczęściej przykryte warstwą torfu (Myślińska, 1996). W Polsce szczególnie często tego typu osady występują na pojezierzach w postaci tzw. gytio-wisk, powstających w wyniku naturalnego procesu zarastania jezior, gdzie gytia zalega pod niewielkiej miąższości nadkładem torfu, wg Kociszewskiej-Musiał (1988) do ok. 0,5 m. W przypadku przerwania naturalnego procesu zarastania jezior – ich osuszenia – powstają tzw. gytio-wiska otwarte, gytie występują tam na powierzchni (Myślińska, 2001). Typ osadów jeziornych jest zdeterminowany warunkami, które panują w danym okresie w środowisku sedymentacyjnym. Tendencje zmian zawartości poszczególnych składników w profilu osadów zależą głównie od zmian klimatycznych podczas sedymentacji (Damicz, 1995).

Warunki sedymentacji i diagenety w jakich formują się gytie i kredy jeziorne, wpływają w istotny sposób na ich skład i właściwości fizyczno-mechaniczne.

Klasyfikacja gytii do celów geologiczno-inżynierskich (Długaszek, 1990), obejmująca także kredę jeziorną, określa gytie jako organiczny osad jeziorny złożony głównie z trzech składników: substancji organicznej (o zawartości powyżej 2%), węgla wapnia i bezwęglanowej substancji mineralnej. Kreda jeziorna jest określona jako jeziorny osad wapienny o zawartości węgla wapnia powyżej 80% i możliwym udziale substancji organicznej i bezwęglanowej substancji mineralnej. Kwalifikacja osadu do danego typu gytii zależy od zawartości procentowej substancji

organicznej, określonej metodą Tiurina, oraz zawartości procentowej węgla wapnia, określonej metodą Scheiblera (Myślińska, 2001).

Z geologiczno-inżynierskiego punktu widzenia, występujące w warunkach zbliżonych do naturalnych (poniżej strefy wahań zwierciadła wody gruntowej) gytie i kredy jeziorne stanowią tzw. grunty słabe, charakteryzujące się małą wytrzymałością na ścinanie, dużą ściśliwością oraz zmiennością parametrów geologiczno-inżynierskich (Wolski, 1984).

Znajomość właściwości fizyczno-mechanicznych tzw. gruntów słabych, w tym gytii i kredy jeziornej, nabiera znaczenia wraz z coraz powszechniejszym lokalizowaniem obiektów inżynierskich w obrębie ich występowania. Dotyczy to najczęściej obiektów liniowych, takich jak nasypy komunikacyjne czy obwałowania przeciwpowodziowe. Podjęcie racjonalnej decyzji, co do sposobu posadowienia obiektu inżynierskiego, wymaga w takich przypadkach m.in. znajomości parametrów odkształcalności i filtracji oraz ich zmian w procesie konsolidacji, co pozwala na prognozowanie odkształceń konsolidacyjnych podłoża nasypu budowlanego (Molisz i in., 1986; Hartley & Wolski, 1996).

Większość empirycznych prognoz osiadania konsolidacyjnego podłoża organicznego, prezentowanych w literaturze, dotyczy torfów. Znane są propozycje Ostrołęckiego, Flaate'a, Nieschego (Szymański, 1991), Molisza i in. (1986), Carlstena (1988). Propozycję obliczania osiadania końcowego dla gruntów organicznych typu gytii, podali Drozd & Zajac (1968), a dla torfów i gytii wapiennej Szymański (1991).

Propozycje szacowania odkształceń dla etapowego lub wstępnego obciążenia słabego podłoża podała Asaoka (1978), a udoskonalili ją Szymański & Lechowicz (1986). Ponadto do prognozy przebiegu odkształceń podłoża organicznego w czasie są adaptowane metody opracowane dla

<sup>1</sup> Katedra Geotechniki i Budownictwa Drogowego, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. Heweliusza 4, 10-720 Olsztyn; jandam@uwm.edu.pl.

gruntów mineralnych, oparte na teoriach konsolidacji, przyjmujące jednoosiowy stan odkształcenia. Najczęściej jest wykorzystywana teoria Terzagiego. Dla gruntów słabych, wykazujących znaczne i długotrwałe odkształcenia, stosowanie tej teorii jest obciążone jednak znacznym błędem wynikającym z nieuwzględniania zmienności parametrów podłoża w procesie konsolidacji pierwotnej (filtracyjnej) i nieuwzględnianie konsolidacji wtórnej. Bardziej poprawne wyniki uzyskuje się, stosując teorię Gibsona i Lo (1961), która uwzględnia wtórną konsolidację. Teoria ta była adaptowana dla gruntów organicznych przez Przysiańskiego (1973) oraz Lechowicza & Szymańskiego (1984). Proces konsolidacji, z uwzględnieniem zmienności parametrów podłoża dla torfów, opisali Barden (1970), Barry & Poskitt (1972), Szymański (1991). Zaproponowano także wykorzystanie modelu lepko-sprężystego (Ranjan & Shrama 1994) i modelu sprężysto-lepkiego (Yoshikuni i in., 1994).

Parametry odkształcalności i filtracji, wykorzystywane w prognozie konsolidacji podłoża, są uzyskiwane w badaniach *in situ* albo w badaniach laboratoryjnych, na podstawie próbek gruntu o nienaruszonej strukturze – typu NNS. Laboratoryjne badania procesu konsolidacji gruntów słabych, są prowadzone najczęściej tradycyjną metodą IL (*incremental loading*) w klasycznych edometrach. Trwają one bardzo długo i są pracochłonne. Zdecydowanie szybciej przebiega badanie w konsolidometrach, metodą CL (*continous loading*), która może być z powodzeniem stosowana w badaniach konsolidacji gruntów słabo przepuszczalnych (Szymański, 1991; Dobak, 2007; Dobak & Kowalczyk, 2010). Przeszkodą w szerokim, praktycznym stosowaniu badań konsolidometrycznych jest brak wyposażenia w odpowiednią aparaturę większości laboratoriów w małych i średnich firmach geologicznych i geotechnicznych. W praktyce inżynierskiej coraz częściej zachodzi potrzeba szybkiego, wstępnego oszacowania parametrów odkształcalności i filtracji, co zwykle wyklucza standardowe, długotrwałe badania. Tak określone potrzeby skłaniają do poszukiwania powiązań pomiędzy relatywnie szybko i łatwo oznaczanymi cechami tych gruntów a parametrami odkształcalności i filtracji. W przypadku charakterystyki odkształcenia znane są propozycje korelacyjnego szacowania edometrycznego modułu ściśliwości pierwotnej –  $M_0$ , w powiązaniu z właściwościami fizycznymi i litologicznymi, dla różnych zakresów przyrostu naprężenia (np.: Swatowski & Wojnicki, 1979; Szymański, 1991; Zadroga & Damicz, 2002; Damicz, 2003). W przypadku współczynnika filtracji, jego wartość bywa zazwyczaj korelowana ze wskaźnikiem porowatości. Wykładnicze zmiany współczynnika filtracji wraz ze zmniejszaniem się wskaźnika porowatości stwierdzili Poskitt (1969) i Al-Tabbe & Wood (1987). Prognoza zmian wartości współczynnika filtracji w procesie konsolidacji, może być oparta także na zależności odkształcenia i początkowej wartości współczynnika filtracji (Berry & Vickers, 1975; Larson, 1981; Tavenas i in., 1983; Szymański, 1991).

### ZAKRES I METODYKA BADAŃ

W artykule przedstawiono opis zmian współczynnika filtracji gytii i kredy jeziornej w ich etapowej konsolidacji oraz zaproponowano metodę prognozowania tych zmian. Zmiany współczynnika filtracji określono w zależności od

charakterystyk litologicznych, od wartości wskaźnika porowatości gruntu i od odpowiadających im wartości współczynnika filtracji. Podstawą prac analitycznych są wyniki badań laboratoryjnych. Przeprowadzono je na próbkach gytii i kredy jeziornej, pobranych z czterech gytiiwisk zlokalizowanych na Pojezierzu Olsztyńskim: Różnowo, Umląg, Guzowy Młyn, Unieszewo II (ryc. 1).

Próbki typu NNS pobrano do stalowych cylindrów, które były wciskane w dno wykonanego otworu wiertniczego. Badaniami objęto 13 próbek gruntu, pobranych z różnych głębokości (1,0–5,0 m p.p.t.), poniżej zwierciadła wody gruntowej. Przeprowadzono oznaczenia zawartości substancji organicznej, węgla wapnia i uziarnienia (tab. 1), badania konsolidacji i współczynnika filtracji (tab. 2) oraz podstawowe charakterystyki fizyczne, pozwalające na obliczenie wartości wskaźnika porowatości (tab. 3a i b). Na podstawie oznaczeń zawartości substancji organicznej (wg Tiurina) i węgla wapnia (wg Scheiblera) (Myślińska, 2001) określono typ gytii i kredę jeziorną według zaproponowanej przez Długaszka (1990) geologiczno-inżynierskiej klasyfikacji gruntów typu gytii. Na podstawie oznaczeń uziarnienia, wykonanego za pomocą laserowego miernika cząstek (aparatus Analysette 22), określono symbol gruntu wg PN-86/B-02480. Badania te przeprowadzono na próbkach gruntu w postaci pasty gruntowej, poddanej dezintegracji ultradźwiękami. Wyniki badań uziarnienia nie były weryfikowane inną metodą.

Badania konsolidacji jednoosiowej przeprowadzono metodą IL (*incremental loading*) w klasycznych edometrach, przystosowanych także do badania współczynnika filtracji metodą o zmiennym naporze FH (*falling head*). Badaniom filtracji poddano konsolidowane próbki przed pierwszym etapem konsolidacji i po zakończeniu każdego etapu. Pomimo spodziewanych bardzo niskich wartości współczynnika filtracji, zrezygnowano z pośredniego sposobu ich wyznaczenia na podstawie krzywej konsolidacji, ze względu na brak możliwości rejestracji ciśnienia porowego. Przy analizie przebiegu odkształcenia, prowadziłoby to do wyników obciążonych dużymi błędami (Pająk & Dobak, 2008).



Ryc. 1. Lokalizacja badanych gytiiwisk na tle sieci hydrograficznej rejonu Olsztyna

Fig. 1. Location of the gytia areas against the hydrographic network in the Olsztyn region

**Tab. 1.** Wybrane charakterystyki litologiczne badanych gruntów  
**Table 1.** Selected lithological characteristics of investigated soils

| Gytowisko<br>Gyttja area | Nr próbki /<br>głębokość [m]<br>Sample<br>number<br>/depth [m] | Zawartość składników<br>Component content |                       | Uziarnienie<br>Granulation |                    |                    | Symbol<br>gruntu<br>Symbol of soil<br>PN-86<br>B-02480 | Typ gytii<br>Type of gyttja<br>(Długaszek, 1990) |
|--------------------------|--|---|-----------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|--|--|
|                          |  | Tiurin                                    | Scheibler             | Analyssette-22             |                    |                    |  |  |
|                          |  | I <sub>om</sub> [%]                       | CaCO <sub>3</sub> [%] | f <sub>p</sub> [%]         | f <sub>π</sub> [%] | f <sub>i</sub> [%] |  |  |
| Różnowo                  | 1 / 1,0  | 24,0                                      | 1,07                  | 9,89                       | 83,71              | 6,4                | Π  | MONw   |
|                          | 2 / 1,5  | 27,1                                      | 0,85                  | 15,79                      | 78,86              | 5,35               | Π  | MONw   |
|                          | 3 / 2,1  | 26,89                                     | 0,64                  | 12,93                      | 81,42              | 5,65               | Π  | MONw   |
|                          | 4 / 2,6  | 30,41                                     | 1,07                  | 16,31                      | 78,74              | 4,95               | Π  | MONw   |
| Umląg                    | 5 / 1,8  | 1,76                                      | 93,04                 | 22,05                      | 67,56              | 10,39              | Gπ/Π   | KrJ  |
|                          | 6 / 2,7  | 0,72                                      | 95,15                 | 23,70                      | 68,28              | 8,02               | Π  | KrJ  |
|                          | 7 / 3,3  | 1,14                                      | 95,58                 | 16,77                      | 72,37              | 10,86              | Gπ/Π   | KrJ  |
|                          | 8 / 3,8  | 1,66                                      | 91,29                 | 19,00                      | 71,19              | 9,81               | Π/Gπ   | KrJ  |
| Guzowy<br>Młyn           | 9 / 3,0  | 13,24                                     | 43,72                 | 13,65                      | 77,01              | 9,34               | Π/Gπ   | MOww   |
|                          | 10 / 4,0   | 12,00                                     | 60,86                 | 9,54                       | 81,94              | 8,52               | Π  | MOww   |
|                          | 11 / 5,0   | 15,93                                     | 39,00                 | 3,01                       | 84,73              | 12,26              | Gπ   | MOw*   |
| Unieszewo II             | 12 / 2,0   | 8,07                                      | 67,72                 | 6,02                       | 84,04              | 9,94               | Π/Gπ   | Mww  |
|                          | 13 / 3,0   | 16,96                                     | 47,15                 | 9,21                       | 83,02              | 7,77               | Π  | MOww   |

MO – gytia mineralno-organiczna: nw – nisko węglanowa, ww – wysoko węglanowa, w\* – oznaczenie dodane w artykule dla gytii węglanowej o zawartości CaCO<sub>3</sub> bliskiej granicznej (40%) między ww i nw; M – gytia mineralna; KrJ – kreda jeziorna

MO – mineral-organic gyttja: nw – low carbonate; ww – high carbonate; w\* – notation added in the paper for carbonate gyttja of CaCO<sub>3</sub> content close to limiting value (40%) between ww and nw; M – mineral gyttja; KrJ – lacustrine chalk

W badaniu konsolidacji zastosowano klasyczny schemat podwajanego obciążenia – pięć stopni w zakresie 0–200 kPa. Każdy przyrost obciążenia był utrzymywany do momentu osiągnięcia umownej stabilizacji osiadań próbki, który przyjęto wg Instrukcji ITB nr 289 (Piaskowski, 1989). Stabilizację osiągnano wtedy, gdy osiadania w ciągu kolejnych trzech okresów dobowych nie były większe od 3 μm. Tak przyjęte kryterium stabilizacji osiadań powodowało wydłużenie czasu badania przy jednym stopniu obciążenia nawet do 3–4 miesięcy. Badania obejmowały zatem zarówno konsolidację pierwotną – filtracyjną (w której prędkość odkształcenia objętościowego próbki gruntu zależy głównie od jej możliwości filtracyjnych), jak

i wtórną, związaną z właściwościami reologicznymi gruntu – pełzaniem szkieletu gruntowego (w której prędkość odkształcenia objętościowego zależy od oporów związanych z przebudową struktury gruntu).

Badania współczynnika filtracji przeprowadzono przed pierwszym stopniem obciążenia (dla próbek w stanie o nienaruszonej strukturze) i po zakończeniu konsolidacji, przy danym stopniu obciążenia. Wykonywano je przy zablokowanym odkształceniu próbek, po upływie pięciu dób od momentu zakończenia konsolidacji. Powodowało to duże prawdopodobieństwo całkowitego rozproszenia ewentualnego nadciśnienia wód porowych, a tym samym uzyskanie współczynnika filtracji zależnego od cech litolo-

**Tab. 2.** Wartości wskaźnika porowatości i odpowiadające im wartości współczynnika filtracji po zakończeniu kolejnych stopni obciążenia

**Table 2.** The corresponding values of void ratio (e) and permeability coefficient (k) after completing of following loading steps

| Nr<br>próbki<br>Sample<br>number | Typ gytii<br>Type of<br>gyttja | Wartości<br>początkowe<br>Initial values |                          | Wartości po zakończeniu kolejnego stopnia obciążenia<br>The values after following step of loading |                          |          |                          |          |                          |           |                          |           |                          |
|----------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|
|                                  |                                | 0 [kPa]                                  |                          | 12,5 [kPa]   |                          | 25 [kPa] |                          | 50 [kPa] |                          | 100 [kPa] |                          | 200 [kPa] |                          |
|                                  |                                | e [–]                                    | k <sub>(10)</sub> [cm/s] | e [–]  | k <sub>(10)</sub> [cm/s] | e [–]    | k <sub>(10)</sub> [cm/s] | e [–]    | k <sub>(10)</sub> [cm/s] | e [–]     | k <sub>(10)</sub> [cm/s] | e [–]     | k <sub>(10)</sub> [cm/s] |
| 1                                | MONw                           | 8,09                                     | 1,37E–04                 | 5,64   | 1,00E–05                 | 5,15     | 5,30E–06                 | 3,78     | 4,16E–06                 | 2,88      | 3,07E–06                 | 2,02      | 1,82E–06                 |
| 2                                | MONw                           | 9,47                                     | 2,43E–06                 | 6,71   | 3,05E–08                 | 5,89     | 6,09E–09                 | 4,38     | 7,91E–10                 | 3,44      | 1,93E–10                 | 2,82      | 2,62E–11                 |
| 3                                | MONw                           | 11,87                                    | 6,94E–06                 | 6,55   | 1,60E–08                 | 5,39     | 1,28E–09                 | 4,28     | 6,19E–10                 | 3,40      | 1,01E–11                 | 2,56      | 7,81E–12                 |
| 4                                | MONw                           | 10,61                                    | 7,73E–06                 | 7,16   | 4,08E–08                 | 4,85     | 1,74E–09                 | 4,28     | 1,32E–09                 | 3,84      | 6,19E–11                 | 3,01      | 9,75E–12                 |
| 5                                | KrJ                            | 4,44                                     | 4,90E–05                 | 4,09   | 4,04E–07                 | 3,93     | 4,89E–08                 | 3,12     | 1,61E–08                 | 2,63      | 8,28E–09                 | 2,18      | 5,68E–09                 |
| 6                                | KrJ                            | 4,65                                     | 6,30E–05                 | 4,19   | 8,20E–08                 | 3,94     | 1,51E–08                 | 3,36     | 6,71E–09                 | 2,88      | 5,52E–09                 | 2,38      | 5,17E–09                 |
| 7                                | KrJ                            | 4,04                                     | 2,09E–06                 | 3,75   | 9,37E–08                 | 3,69     | 2,15E–08                 | 3,17     | 1,00E–08                 | 2,65      | 1,09E–08                 | 2,18      | 5,59E–09                 |
| 8                                | KrJ                            | 4,02                                     | 1,81E–06                 | 3,72   | 5,13E–08                 | 3,51     | 1,78E–08                 | 3,04     | 9,97E–09                 | 2,58      | 8,32E–09                 | 1,91      | 3,48E–09                 |
| 9                                | MOww                           | 5,61                                     | 1,32E–06                 | 4,61   | 9,49E–08                 | 3,51     | 1,91E–08                 | 3,49     | 1,40E–08                 | 2,86      | 8,54E–09                 | 2,26      | 3,42E–09                 |
| 10                               | MOww                           | 5,10                                     | 3,07E–06                 | 4,42   | 1,59E–07                 | 4,17     | 3,70E–08                 | 3,49     | 1,15E–08                 | 2,89      | 5,06E–09                 | 2,42      | 1,43E–09                 |
| 11                               | MOw*                           | 6,97                                     | 6,16E–07                 | 5,97   | 1,11E–07                 | 5,43     | 1,13E–08                 | 4,59     | 2,24E–09                 | 3,82      | 1,00E–09                 | 3,10      | 7,36E–11                 |
| 12                               | Mww                            | 6,03                                     | 7,64E–06                 | 5,35   | 8,51E–08                 | –        | –                        | 4,42     | 3,39E–08                 | 3,81      | 2,41E–08                 | 3,21      | 1,75E–08                 |
| 13                               | MOww                           | 7,32                                     | 1,28E–06                 | 6,19   | 8,97E–07                 | 5,51     | 5,87E–08                 | 4,73     | 3,20E–08                 | 3,99      | 1,53E–08                 | 3,25      | 1,20E–08                 |

**Tab. 3a.** Wartości początkowe wybranych właściwości fizycznych i charakterystyk próbek gytii i kredy jeziornej użytych w badaniu enometrycznym

**Table 3a.** Initial values of selected physical properties and characteristics of gytija and lacustrine chalk samples used in the oedometer tests

| Nr próbki<br>Sample number | Wartości początkowe / Initial values        |                                  |          |   |                             |              |
|----------------------------|---|----------------------------------|----------|---|-----------------------------|--------------|
|                            | Właściwości fizyczne<br>Physical properties |                                  |          | Charakterystyki próbki<br>Characteristics of sample |                             |              |
|                            | $\rho_s$<br>[g/cm <sup>3</sup> ]            | $\rho_d$<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | e<br>[-] | $h_m$<br>[mm]                                       | $V_m$<br>[cm <sup>3</sup> ] | $m_s$<br>[g] |
| 1                          | 2,09  | 0,23                             | 8,09     | 20,06   | 67,18                       | 15,51        |
| 2                          | 1,99  | 0,19                             | 9,47     | 20,17   | 67,96                       | 12,99        |
| 3                          | 2,06  | 0,16                             | 11,87    | 19,93   | 66,75                       | 10,67        |
| 4                          | 2,09  | 0,18                             | 10,61    | 19,81   | 66,75                       | 12,12        |
| 5                          | 2,34  | 0,43                             | 4,44     | 19,43   | 65,54                       | 28,33        |
| 6                          | 2,43  | 0,43                             | 4,65     | 20,36   | 68,60                       | 29,47        |
| 7                          | 2,42  | 0,46                             | 4,04     | 20,26   | 68,27                       | 31,58        |
| 8                          | 2,41  | 0,46                             | 4,02     | 20,01   | 67,22                       | 31,18        |
| 9                          | 2,38  | 0,36                             | 5,61     | 19,82   | 66,17                       | 24,06        |
| 10                         | 2,38  | 0,39                             | 5,10     | 19,83   | 65,80                       | 25,98        |
| 11                         | 2,39  | 0,30                             | 6,97     | 19,95   | 66,81                       | 20,33        |
| 12                         | 2,46  | 0,35                             | 6,03     | 19,90   | 66,85                       | 23,71        |
| 13                         | 2,33  | 0,28                             | 7,32     | 20,05   | 67,35                       | 18,94        |

gicznych (tab. 1) i wskaźnika porowatości próbki (tab. 2). Ze względu na bardzo słabą przepuszczalność badanych gruntów, odczyty wysokości słupa wody podczas badania współczynnika filtracji były wykonywane w okresie nawet do dziesięciu dni. Pozwalało to na identyfikację opadania wysokości słupa wody w czasie, ale wymagało upewnienia się, że na odczyty wysokości słupa wody w biurecie nie ma wpływu parowanie. W tym celu instalowano biuretę do porównawczych odczytów. Wypełniano ją wodą (bez możliwości odpływu) do wysokości równej początkowemu poziomowi wody w biurecie pomiarowej. Wyloty biurety pomiarowej i porównawczej, przy zachowaniu swobodnego dostępu powietrza, osłonięto ażurową, batystową koszulką nasączoną wodą destylowaną, co miało niwelować możliwe wahania wilgotności powietrza przy powierzchni wody w biuretach. Obniżenie zwierciadła wody w biurecie porównawczej oznaczałoby istotny wpływ parowania na wartości odczytów, także w biurecie pomiarowej. Nie stwierdzono jednak zmian wysokości słupa wody w biurecie porównawczej. W czasie badania drenaż odbywał się górną powierzchnią próbki – kierunek przepływu wody był wymuszony od dołu do góry. Badania przeprowadzono przy użyciu wody destylowanej. Początkowy spadek hydrauliczny był zawsze większy od 30, dla badania przed przyłożeniem pierwszego obciążenia, po zakończeniu kolejnych stopni obciążenia był zawsze większy od 50. Po zakończeniu ostatniego stopnia obciążenia dochodził do 120. Zmieniał się więc w zależności

**Tab. 3b.** Wartości końcowe wybranych właściwości fizycznych i charakterystyk próbek gruntu użytych w badaniu enometrycznym po zakończeniu kolejnych stopni obciążenia

**Table 3b.** Final values of selected physical properties and characteristics of samples used in the oedometer tests after completing of following loading steps

| Nr próbki / Sample number |                                  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|---------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0–12,5 kPa                | $h_K$ [mm]                       | 14,71 | 14,94 | 11,65 | 14,05 | 18,31 | 18,70 | 18,38 | 18,17 | 16,98 | 18,04 | 17,68 | 18,26 | 17,38 |
|                           | $V_K$ [cm <sup>3</sup> ]         | 49,27 | 50,33 | 39,03 | 47,34 | 61,71 | 62,99 | 61,56 | 61,04 | 56,71 | 59,86 | 59,20 | 61,34 | 58,39 |
|                           | $\rho_{dK}$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 0,32  | 0,26  | 0,27  | 0,26  | 0,46  | 0,47  | 0,51  | 0,51  | 0,42  | 0,44  | 0,34  | 0,39  | 0,32  |
|                           | $e_K$ [-]                        | 5,64  | 6,71  | 6,55  | 7,16  | 4,10  | 4,19  | 3,75  | 3,72  | 4,61  | 4,42  | 5,97  | 5,35  | 6,19  |
| 12,5–25 kPa               | $h_K$ [mm]                       | 12,88 | 13,32 | 9,90  | 12,22 | 17,70 | 17,79 | 18,15 | 17,40 | 15,66 | 17,05 | 16,30 | –     | 15,80 |
|                           | $V_K$ [cm <sup>3</sup> ]         | 43,15 | 44,88 | 33,14 | 41,16 | 59,64 | 59,95 | 61,14 | 58,44 | 52,29 | 56,56 | 54,59 | –     | 53,09 |
|                           | $\rho_{dK}$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 0,34  | 0,29  | 0,32  | 0,29  | 0,48  | 0,49  | 0,52  | 0,53  | 0,46  | 0,50  | 0,37  | –     | 0,36  |
|                           | $e_K$ [-]                        | 5,15  | 5,89  | 5,40  | 4,28  | 3,93  | 3,94  | 3,69  | 3,51  | 4,17  | 4,19  | 4,53  | –     | 5,51  |
| 25–50 kPa                 | $h_K$ [mm]                       | 10,60 | 10,43 | 8,18  | 10,07 | 14,79 | 15,70 | 16,12 | 15,56 | 13,59 | 14,45 | 14,16 | 15,53 | 13,86 |
|                           | $V_K$ [cm <sup>3</sup> ]         | 35,49 | 35,13 | 27,38 | 33,94 | 49,85 | 52,91 | 54,32 | 52,28 | 45,37 | 47,96 | 47,44 | 52,17 | 46,57 |
|                           | $\rho_{dK}$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 0,44  | 0,37  | 0,39  | 0,36  | 0,57  | 0,56  | 0,58  | 0,60  | 0,53  | 0,54  | 0,43  | 0,45  | 0,41  |
|                           | $e_K$ [-]                        | 3,78  | 4,38  | 4,28  | 4,85  | 3,12  | 3,36  | 3,17  | 3,04  | 3,49  | 3,39  | 4,59  | 4,42  | 4,73  |
| 50–100 kPa                | $h_K$ [mm]                       | 8,59  | 8,61  | 6,81  | 8,32  | 13,06 | 13,97 | 14,11 | 13,78 | 11,68 | 12,79 | 12,24 | 13,79 | 12,06 |
|                           | $V_K$ [cm <sup>3</sup> ]         | 28,76 | 29,00 | 22,81 | 28,03 | 44,02 | 47,07 | 47,53 | 46,29 | 39,00 | 42,45 | 40,99 | 46,34 | 40,51 |
|                           | $\rho_{dK}$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 0,54  | 0,45  | 0,47  | 0,43  | 0,64  | 0,63  | 0,66  | 0,67  | 0,62  | 0,61  | 0,50  | 0,51  | 0,47  |
|                           | $e_K$ [-]                        | 2,88  | 3,44  | 3,40  | 3,84  | 2,63  | 2,88  | 2,65  | 2,58  | 2,86  | 2,89  | 3,82  | 3,81  | 3,99  |
| 100–200 kPa               | $h_K$ [mm]                       | 6,69  | 7,40  | 5,52  | 6,90  | 11,44 | 12,15 | 12,32 | 11,97 | 9,86  | 11,22 | 10,41 | 12,07 | 10,29 |
|                           | $V_K$ [cm <sup>3</sup> ]         | 22,40 | 24,94 | 18,47 | 23,24 | 38,55 | 40,92 | 41,52 | 37,70 | 32,92 | 37,24 | 34,86 | 40,55 | 34,58 |
|                           | $\rho_{dK}$ [g/cm <sup>3</sup> ] | 0,69  | 0,52  | 0,58  | 0,52  | 0,74  | 0,72  | 0,76  | 0,83  | 0,73  | 0,70  | 0,58  | 0,59  | 0,55  |
|                           | $e_K$ [-]                        | 2,02  | 2,82  | 2,56  | 3,01  | 2,18  | 2,38  | 2,18  | 1,91  | 2,26  | 2,42  | 3,10  | 3,21  | 3,25  |

$h_K$  – końcowa wartość wysokości próbki,  $V_K$  – końcowa wartość objętości próbki,  $\rho_K$  – końcowa wartość gęstości objętościowej szkieletu gruntowego,  $e_K$  – końcowa wartość wskaźnika porowatości

$h_K$  – final value of height of the specimen,  $V_K$  – final value of volume of the specimen,  $\rho_K$  – final value of density of dry soil of the specimen,  $e_K$  – final value of void ratio of the specimen

od wysokości próbki. Wszystkie oznaczenia współczynnika filtracji przeprowadzono dla naporów hydraulicznych mieszczących się w granicach 0,65–0,75 m. Zastosowane wysokie spadki hydrauliczne znacznie przewyższają prawdopodobną graniczną wartość gradientu hydraulicznego  $I_0$ , którą można przyjąć w granicach 5–10 (Roza, 1950; Wiłun, 1987).

Zmieniające się wartości współczynnika filtracji, powodowane etapową konsolidacją, zostały odniesione do odpowiadających im wskaźników porowatości, właściwych dla danego naprężenia. Zmiany tego wskaźnika obliczono na podstawie zmniejszającej się objętości próbki w procesie konsolidacji, wynikającej wyłącznie ze zmniejszenia się objętości porów w próbce gruntu. Nie uwzględniano, możliwej w przypadku gruntów organicznych, ściśliwości stałych cząstek organicznych szkieletu gruntowego. Przeprowadzone obliczenia zmian wartości wskaźnika porowatości ( $e$ ) oparto na właściwościach fizycznych próbek gruntów w stanie naturalnym (początkowym dla badania) i na początkowej wysokości, objętości i masie próbki (tab. 3a) oraz na ich wartościach końcowych, dla danego etapu konsolidacji. Po zakończeniu każdego etapu konsolidacji obliczono gęstość objętościową szkieletu gruntowego ( $\rho_{sk}$ ) i wskaźnik porowatości ( $e_K$ ) wynikające ze zmian wysokości – objętości próbki gruntu (tab. 3b). Jako niezmiennie w badaniu, przyjęto masę szkieletu gruntowego –  $m_s$  i gęstość właściwą szkieletu gruntowego –  $\rho_s$  (tab. 3a).

Przed przystąpieniem do badań edometrycznych oszacowano wartości naprężenia  $\sigma'_v$  w warunkach naturalnych dla wszystkich lokalizacji próbek, na podstawie znanego profilu geologicznego: miąższości warstw gruntowych zalegających powyżej miejsca pobrania próbki, ich ciężaru objętościowego oraz głębokości zwierciadła wody podziemnej. W każdym przypadku oszacowana w ten sposób wartość  $\sigma'_v$  była mniejsza od 12,5 kPa (tab. 4).

Właściwe badania konsolidacji nie byłym poprzedzone rekonsolidacją próbek gruntu. Osiągnięcie warunków pierwotnych – naprężenia  $\sigma'_v$ , następowało w czasie pierwszego stopnia obciążenia.

#### ZMIANY WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI W PROCESIE ETAPOWEJ KONSOLIDACJI

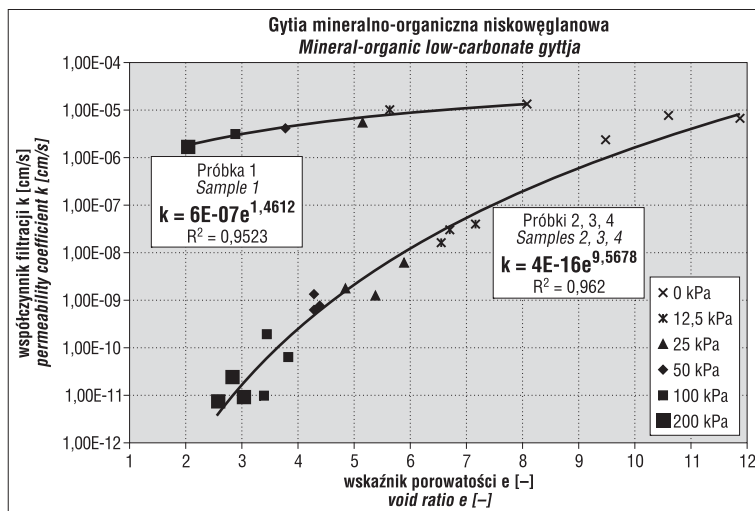
W wyniku przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, że zmiana wartości współczynnika filtracji gytii i kredy jeziornej przebiega w różny sposób, w zależności od podstawowych cech litologicznych – zawartości substancji organicznej i węglanu wapnia, które określają przynależność do danego typu gytii, oraz od uziarnienia (tab. 1).

W obrębie gytii mineralno-organicznej niskowęglanowej badaniu poddano cztery próbki z gytiiowiska Różnowo (nr 1, 2, 3, 4), pobrane z różnych głębokości (1,0–2,6 m p.p.t.; tab. 1 i 4). Charakterystyczny jest wysoki udział substancji organicznej od 24,0 do 30,41% i bardzo mały udział węglanu wapnia od 0,64 do 1,07%. Wszystkie próbki pod względem uziarnienia wg PN-86/B-02480 stanowią pyły o średnim udziale frakcji piaskowej od 9,89 do 16,31% i relatywnie małym udziale frakcji iłowej od 4,95 do 6,40% (tab. 1). Początkowe wartości wskaźnika porowatości ( $e$ ) zawierają się w przedziale 8–12, a współczynnika filtracji ( $k$ ) w granicach od 2,4E-06 do 1,4E-04 cm/s (tab. 2).

**Tab. 4.** Głębokości i efektywne wartości składowej pionowej naprężenia pierwotnego w miejscach pobrania próbek

**Table 4.** Depth and the effective values of vertical component of stress at sampling sites

| Nr próbki<br>Sample number | Głębokość<br>Depth [m] | Warstwy nadległe<br>Overlying layer |  | Naprężenie<br>Stress $\sigma'_v$ [kPa] |
|----------------------------|------------------------|-------------------------------------|--|--|
|                            |                        | [m]                                 | $\gamma, \gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ] |  |
| 1                          | 1,0                    | 1,00                                | $\gamma'=1,18$                         | 1,18                                   |
| 2                          | 1,5                    | 1,25                                | $\gamma'=1,18$                         | 1,72                                   |
|                            |                        | 0,25                                | $\gamma'=0,97$                         |  |
| 3                          | 2,1                    | 1,25                                | $\gamma'=1,18$                         | 2,27                                   |
|                            |                        | 0,65                                | $\gamma'=0,97$                         |  |
|                            |                        | 0,20                                | $\gamma'=0,83$                         |  |
| 4                          | 2,6                    | 1,25                                | $\gamma'=1,18$                         | 2,76                                   |
|                            |                        | 0,65                                | $\gamma'=0,97$                         |  |
|                            |                        | 0,20                                | $\gamma'=0,83$                         |  |
|                            |                        | 0,40                                | $\gamma'=0,96$                         |  |
| 5                          | 1,8                    | 0,50                                | $\gamma=10,50$                         | 7,28                                   |
|                            |                        | 0,90                                | $\gamma'=1,20$                         |  |
|                            |                        | 0,40                                | $\gamma'=2,38$                         |  |
| 6                          | 2,7                    | 0,50                                | $\gamma=10,50$                         | 9,48                                   |
|                            |                        | 0,90                                | $\gamma'=1,20$                         |  |
|                            |                        | 0,95                                | $\gamma'=2,38$                         |  |
| 7                          | 3,3                    | 0,35                                | $\gamma'=2,53$                         | 11,07                                  |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma=10,50$                         |  |
|                            |                        | 0,90                                | $\gamma'=1,20$                         |  |
|                            |                        | 0,95                                | $\gamma'=2,38$                         |  |
|                            |                        | 0,65                                | $\gamma'=2,53$                         |  |
| 8                          | 3,8                    | 0,30                                | $\gamma'=2,79$                         | 12,47                                  |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma=10,50$                         |  |
|                            |                        | 0,90                                | $\gamma'=1,20$                         |  |
|                            |                        | 0,95                                | $\gamma'=2,38$                         |  |
|                            |                        | 0,65                                | $\gamma'=2,53$                         |  |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma'=2,79$                         |  |
| 9                          | 3,0                    | 0,30                                | $\gamma'=2,78$                         | 7,79                                   |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma=2,56$                          |  |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma=8,50$                          |  |
|                            |                        | 1,70                                | $\gamma'=0,97$                         |  |
| 10                         | 4,0                    | 0,30                                | $\gamma'=2,03$                         | 9,89                                   |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma=2,56$                          |  |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma=8,50$                          |  |
|                            |                        | 1,70                                | $\gamma'=0,97$                         |  |
|                            |                        | 0,80                                | $\gamma'=2,03$                         |  |
| 11                         | 5,0                    | 0,50                                | $\gamma'=2,17$                         | 11,86                                  |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma=2,56$                          |  |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma=8,50$                          |  |
|                            |                        | 1,70                                | $\gamma'=0,97$                         |  |
|                            |                        | 0,80                                | $\gamma'=2,03$                         |  |
| 12                         | 2,0                    | 1,00                                | $\gamma'=2,17$                         | 3,11                                   |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma'=1,77$                         |  |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma'=1,43$                         |  |
| 13                         | 3,0                    | 0,75                                | $\gamma'=1,19$                         | 4,89                                   |
|                            |                        | 0,75                                | $\gamma'=2,00$                         |  |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma'=1,43$                         |  |
|                            |                        | 0,75                                | $\gamma'=1,19$                         |  |
|                            |                        | 1,25                                | $\gamma'=2,00$                         |  |
|                            |                        | 0,50                                | $\gamma'=1,57$                         |  |



**Ryc. 2.** Zmiany wartości współczynnika filtracji w zależności od zmniejszania się wartości wskaźnika porowatości w procesie konsolidacji gytii mineralnej niskowęglanowej

**Fig. 2.** Permeability coefficient changes corresponding to void ratio decrease in the consolidation process of mineral-organic low-carbonate gytija

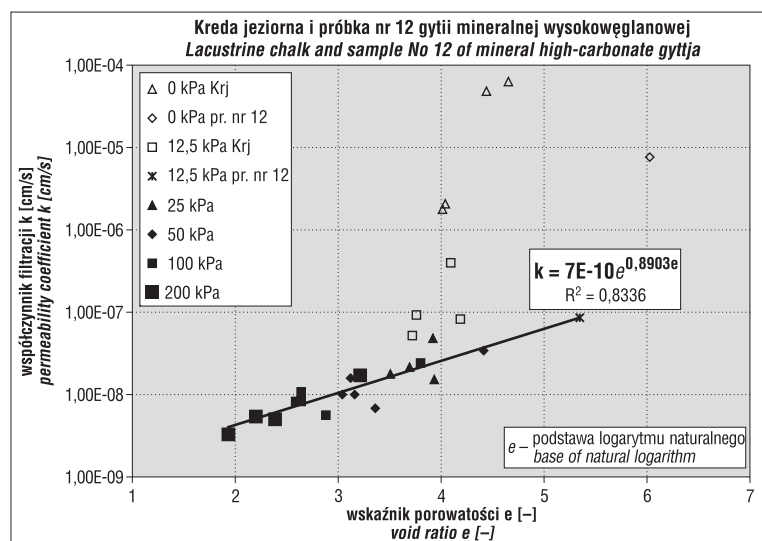
Tendencję zmian – zmniejszania się wartości współczynnika filtracji wraz ze zmianą wskaźnika porowatości w procesie konsolidacji – określono w przedziale naprężeń 0–200 kPa. Wspólną tendencję zmian określono dla trzech próbek (nr 2, 3 i 4). Odrębną tendencję określono dla jednej próbki (nr 1) – charakteryzującej się odmienną, widoczną w badaniu makroskopowym strukturą gruzełkową i większą kruchością. Najprawdopodobniej jest to efekt procesu murszenia, który rozwijał się w okresach obniżonego zwierciadła wody w gytiovisku (próbki pobrano z głęb. 1,0 m p.p.t.). Stwierdzone tendencje zmian są opisane dwiema różnymi zależnościami, mieszczącymi się jednak w obrębie funkcji potęgowej (ryc. 2).

W obrębie kredy jeziornej badaniu poddano cztery próbki z gytioviska Umląg (nr 5, 6, 7, 8), pobrane z różnych głębokości (1,8–3,8 m p.p.t.). Charakterystyczny jest w nich niski udział substancji organicznej od 0,72 do 1,76% i bardzo wysoki udział węglanu wapnia od 91,29 do 95,58%. Pod względem uziarnienia są to pyły i gliny pylaste o relatywnie wysokiej zawartości frakcji piaszczystej od 16,77 do 23,70% i frakcji iłowej od 8,02 do 10,86% (tab. 1). Początkowe wartości wskaźnika porowatości ( $e$ ) zawierają się w przedziale 4,0–4,5, a współczynnika filtracji ( $k$ ) w granicach 1,8E-06 do 6,3E-05 cm/s (tab. 2). Wspólną tendencję zmian określono dla wszystkich czterech próbek kredy jeziornej oraz dla jednej próbki gytii mineralnej wysokowęglanowej (próbka nr 12), pobranej z gytioviska Unieszewo II, z głębokości 2,0 m p.p.t. Probka nr 12 charakteryzuje się najwyższą, poza kredą jeziorną, zawartością węglanu wapnia (67,72%) i najniższą, poza kredą jeziorną, zawartością części organicznych (8,07%) wśród wszystkich analizowanych próbek. Ze względu na uziarnienie stanowi ona pogranicze pyłu i gliny pylastej o niskiej zawartości frakcji piaszczystej – 6,02% i relatywnie wysokiej frakcji iłowej – 9,94% (tab. 1).

Początkowa wartość wskaźnika porowatości ( $e$ ) wynosi 6,03 i jest wyższa niż dla kredy jeziornej, wartość współczynnika filtracji ( $k$ ) natomiast mieści się w przedziale określonym dla kredy jeziornej (tab. 2). Wspólną tendencję zmian dla próbek kredy jeziornej określono w zakresie wartości wskaźnika porowatości odpowiadających zakresowi zmian obciążenia 25–200 kPa. Dla zakresu obciążenia 0–25 kPa nie stwierdzono istotnej zależności. Dla próbki nr 12 wspólną tendencję stwierdzono dla obciążeń 12,5–200,0 kPa, a dla zakresu 0,0–12,5 kPa nie stwierdzono istotnej zależności. Jest to najprawdopodobniej skutek makroskopowo niewidocznego naruszenia struktury w trakcie pobierania próbek lub obsadzania ich w pierścieniu edometrycznym. W badaniu makroskopowym kreda jeziorna i gytia mineralna wysokowęglanowa (próbka nr 12) wykazywały bardzo dużą kruchość – zdecydowanie większą wrażliwość na naruszenie struktury. W tym przypadku prawdopodobnie naruszenie struktury powodowało powstanie mikropęknięć, które ułatwiały filtrację i dawały w efekcie zawyżone początkowe wartości współczynnika filtracji. Wpływ naruszenia struktury w przypadku kredy jeziornej zaniżał po drugim stopniu obciążenia – o wartości 25 kPa, a w przypadku gytii mineralnej wysokowęglanowej (próbka nr 12) – już po pierwszym stopniu obciążenia – o wartości 12,5 kPa.

Stwierdzona wspólna tendencja zmian jest opisana zależnością w postaci funkcji wykładniczej (ryc. 3).

Z gytii mineralno-organicznej wysokowęglanowej i węglanowej (próbka nr 11, gytii na pograniczu mineralno-organicznej wysoko- i niskowęglanowej – MOW\* w tab. 1), badaniu poddano cztery próbki, pobrane z gytioviska Guzowy Młyn (nr 9, 10, 11) i Unieszewo II (nr 13) z głęb. 3–5 m p.p.t. (tab. 1 i 4). Pod względem uziarnienia są to pyły i gliny pylaste. W przypadku analizowanych trzech próbek gytii mineralno-organicznej wysokowęglanowej i jednej próbki



**Ryc. 3.** Zmiany wartości współczynnika filtracji w zależności od zmniejszania się wartości wskaźnika porowatości w procesie konsolidacji kredy jeziornej i gytii mineralnej wysokowęglanowej

**Fig. 3.** Permeability coefficient changes corresponding to void ratio decrease in the consolidation process of lacustrine chalk and mineral high-carbonate gytija

gytii węglanowej, występuje istotne zróżnicowanie zawartości substancji organicznej i węgla wapnia oraz zawartości frakcji piaskowej i iłowej. Zawartości poszczególnych składników charakteryzujących litologię mieszczą się w stosunkowo szerokich przedziałach: substancja organiczna od 12,0 do 16,96%, węgiel wapnia od 39,0 do 60,6%, frakcja piaskowa od 3,01 do 13,65%, frakcja iłowa od 8,52 do 12,26% (tab. 1). Początkowe wskaźniki porowatości ( $e$ ) zawierają się w przedziale od 5,10 do 7,32, a współczynniki filtracji ( $k$ ) w granicach od  $6,16E-07$  do  $3,07E-06$  cm/s (tab. 2). Stwierdzono trzy różne tendencje zmian – zmniejszania się współczynnika filtracji wraz ze zmniejszaniem się wskaźnika porowatości w procesie konsolidacji. Są one opisane trzema zależnościami mieszczącymi się w obrębie funkcji wykładniczej. Wspólną tendencję określono dla dwóch próbek nr 9 i 10, odrębne tendencje – dla próbki nr 11 i 13 (ryc. 4).

Zróżnicowanie tendencji jest najprawdopodobniej związane ze stosunkowo dużą zmiennością zawartości składników określających typ gytii i rodzaj gruntu, czyli zawartości [%]:  $CaCO_3$ ,  $I_{om}$ ,  $f_p$ ,  $f_i$  (tab. 1).

Funkcje wykładnicze opisujące zmiany współczynnika filtracji ( $k$ ) w zależności od wskaźnika porowatości ( $e$ ) mają ogólną postać:

$$k = ae^{be} \quad [1]$$

gdzie:

$e$  – podstawa logarytmu naturalnego.

Parametry  $a$  i  $b$  funkcji wykładniczych [1] zostały powiązane ze zróżnicowaniem podstawowych cech litologicznych, przez określenie ich zależności od zaproponowanego w niniejszym artykule bezwymiarowego **litologicznego współczynnika wpływu** –  $Li$ . Rozumiany jest on jako współczynnik wpływu na przebieg zmian wartości współczynnika filtracji w zależności od wskaźnika porowatości w procesie etapowej konsolidacji.

Litologiczny współczynnik wpływu  $Li$  [-] zdefiniowano jako:

$$Li = Wt \cdot Wu \quad [2]$$

$$Li = \left( \frac{CaCO_3}{I_{om}} \right) \cdot \left( \frac{f_i}{f_i + f_p} \right) \quad [3]$$

gdzie:

$$Wt = \frac{CaCO_3}{I_{om}} - \text{wskaźnik typu [-]} \quad [4]$$

$$Wu = \frac{f_i}{f_i + f_p} - \text{wskaźnik uziarnienia [-]} \quad [5]$$

$CaCO_3$  – zawartość węgla wapnia wg metody Scheiblera [%]

$I_{om}$  – zawartość substancji organicznej wg metody Tiurina [%]

$f_i$  – zawartość frakcji iłowej oznaczona w aparacie Analysette 22 [%]

$f_p$  – zawartość frakcji piaskowej oznaczona w aparacie Analysette 22 [%].

Wartości przedstawionych powyżej charakterystyk litologicznych i odpowiadające im wartości parametrów funkcji wykładniczych przedstawiono w tabeli 5.

Litologiczny współczynnik wpływu [2], [3] jest określony jako iloczyn wskaźnika typu gytii –  $Wt$  [4] i wskaźnika uziarnienia gytii –  $Wu$  [5]. Wskaźnik typu gytii jest określony jako stosunek udziałów dwóch głównych składników decydujących o typie gytii, wg klasyfikacji Długaszka (1990), tzn. zawartości procentowej węgla wapnia i zawartości procentowej substancji organicznej. Wskaźnik uziarnienia gytii bierze pod uwagę udział frakcji, które w największym stopniu różnicują osad, czyli zawartość frakcji iłowej i frakcji piaskowej. Jest on konstruowany jako stosunek udziału frakcji iłowej do sumy frakcji piaskowej i iłowej.

Dla parametrów  $a$  i  $b$  funkcji wykładniczych uzyskano zależności od litologicznego współczynnika wpływu  $Li$ :

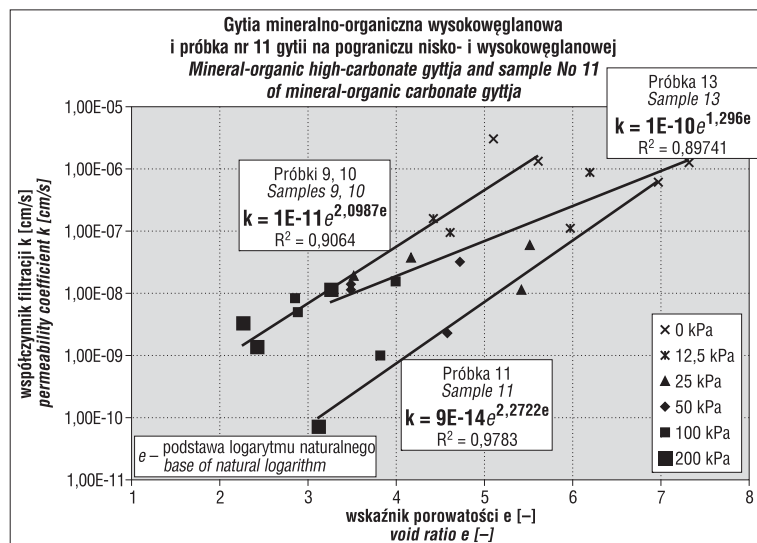
– dla parametru  $a$  w postaci funkcji logarytmicznej (ryc. 5);

– dla parametru  $b$  w postaci funkcji wykładniczej (ryc. 6).

Zależności  $a$ - $Li$  oraz  $b$ - $Li$  są efektem analizy tylko czterech próbek gytii i należy je traktować jako wstępne dla gytii mineralno-organicznej wysokowęglanowej i węglanowej (MOW\* w tab. 1).

Zastosowanie w praktyce przedstawionych zależności do prognozowania zmian wartości współczynnika filtracji w procesie konsolidacji, wymaga potwierdzenia uzyskanych wyników na większej liczbie próbek gytii i kredy jeziornej. Wykorzystanie wstępnie określonych i przedstawionych powyżej zależności jest ograniczone do przedziałów wartości charakterystyk gruntowych przebadanych dotychczas próbek gytii i kredy jeziornej (tab. 1 i 2). Uwarunkowane jest zatem wykonaniem następujących oznaczeń:

– oznaczenie początkowych wartości wskaźnika porowatości ( $e$ ) i współczynnika filtracji ( $k$ );



**Ryc. 4.** Zmiany wartości współczynnika filtracji w zależności od zmniejszania się wartości wskaźnika porowatości w procesie konsolidacji gytii mineralno-organicznej wysokowęglanowej i gytii mineralno-organicznej węglanowej (MOW\* w tab. 1)

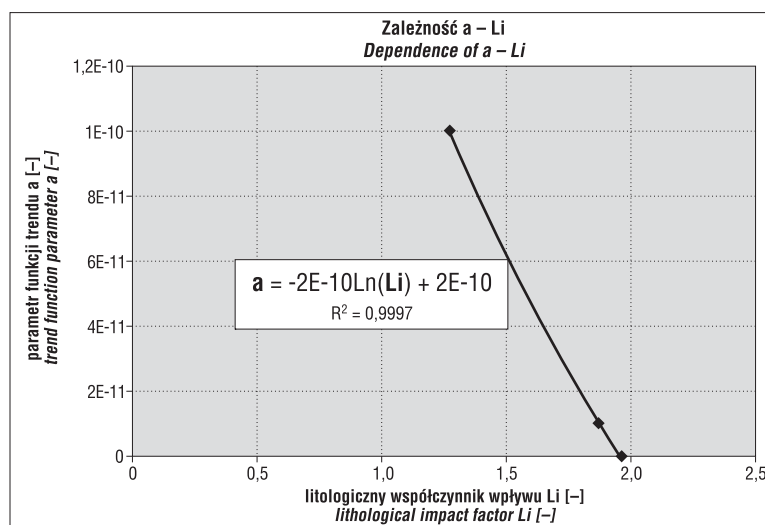
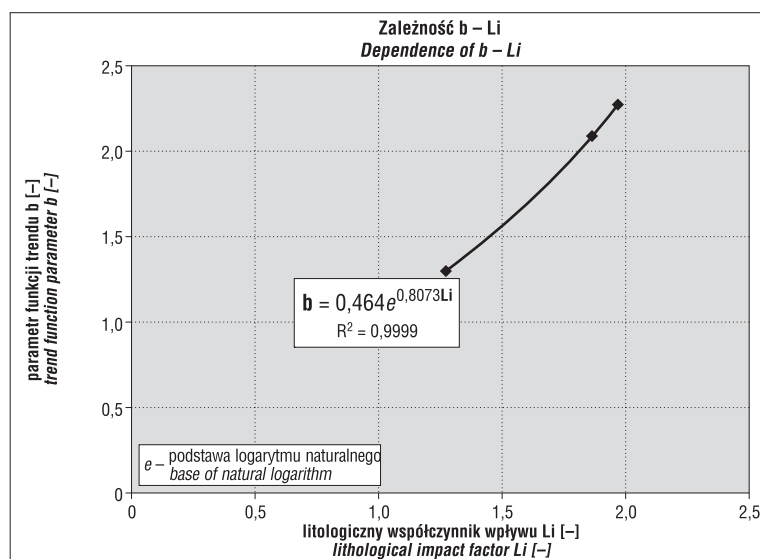
**Fig. 4.** Permeability coefficient changes corresponding to void ratio decrease in the consolidation process of mineral-organic high-carbonate gytija and mineral-organic carbonate gytija (MOW\* in Table 1)

**Tab. 5.** Charakterystyki litologiczne i odpowiadające im parametry funkcji wykładniczych zmian współczynnika filtracji w etapowej konsolidacji gytii mineralno-organicznej**Table 5.** Lithological characteristics and related exponential function parameters of permeability coefficient changes in the stage consolidation of mineral-organic gytja

| Nr próbek<br>Sample number | Wskaźnik typu<br>Type index | Wskaźnik uziarnienia<br>Granulation index | Litologiczny<br>współczynnik wpływu<br>Lithological impact<br>factor | Parametry funkcji trendu<br>Trend function parameter |        |
|----------------------------|-----------------------------|---|--|--|--------|
|                            | $Wt = CaCO_3/I_{om}$        | $Wu = f_i/f_i + f_p$                      | $Li = Wt \times Wu$  | a  | b      |
| 9, 10                      | 4,187*                      | 7,85E-01*                                 | 1,8673   | 1,00E-11   | 2,0897 |
| 11                         | 2,448                       | 4,07E+00                                  | 1,9655   | 9,00E-14   | 2,2722 |
| 13                         | 2,78                        | 8,40E-01                                  | 1,2721   | 1,00E-10   | 1,296  |

\* Wartość uśredniona z dwóch próbek reprezentujących wspólną linię trendu

\* Average value of two samples representing the common line of trend

**Ryc. 5.** Logarymiczna zależność parametru **a** od litologicznego współczynnika wpływu – **Li****Fig. 5.** Logarithmic dependence of function parameter **a** from lithological impact factor – **Li****Ryc. 6.** Wykładnicza zależność parametru **b** od litologicznego współczynnika wpływu – **Li****Fig. 6.** Exponential relationship of function parameter **b** from lithological impact factor – **Li**

– oznaczenie zawartości części organicznych  $I_{om}$  [%] wg Tiurina, węgla wapnia  $CaCO_3$  [%] wg Scheiblera, co pozwala zakwalifikować osad do właściwego typu gytii, czyli w przypadku gytii mineralno-organicznej niskowęglanowej, kredy jeziornej i gytii mineralnej wysokowęglanowej określa odpowiednią zależność zmian dla gytii niezmurszałych;

– ocena ewentualnego zmurszenia gytii, co w przypadku gytii mineralno-organicznej niskowęglanowej (próbka nr 1; ryc. 2) pozwala zastosować odmienną zależność;

– w przypadku niezmurszałej gytii mineralno-organicznej wysokowęglanowej i węglanowej (MOW\* w tab. 1) do określenia odpowiedniej zależności (wyznaczenia wartości parametrów **a** i **b** funkcji opisujących tę zależności) konieczne jest oznaczenie zawartości [%] poszczególnych frakcji metodą dyfrakcji promieni laserowych w aparacie Analysette 22 i określenie litologicznego współczynnika wpływu **Li**.

## WNIOSKI

1. W odniesieniu do przebadanych próbek gytii i kredy jeziornej stwierdzono istotne zależności zmian współczynnika filtracji w procesie konsolidacji od malejących wartości wskaźnika porowatości.

2. Szacowanie zmieniającego się w procesie konsolidacji gytii i kredy jeziornej współczynnika filtracji, może opierać się na podstawie oznaczenia początkowych wartości wskaźnika porowatości i współczynnika filtracji oraz na wykorzystaniu określonych w artykule tendencji ich zmian dla danego typu osadu. W przypadku gytii mineralno-organicznej o wysokiej zawartości węgla wapnia konieczna jest dodatkowo identyfikacja właściwej tendencji na podstawie wartości litologicznego współczynnika wpływu – **Li**.

3. Odrębne tendencje zależności zmian współczynnika filtracji w procesie konsolidacji od malejących wartości wskaźnika porowatości stwierdzono dla różnych typów gytii, określonych wg geologiczno-inżynierskiej klasyfikacji gruntów typu gytii (Długaszek, 1990).



- Dla próbek gytii mineralno-organicznej niskowęglanowej (MONw) występującej stale pod wodą określono wspólną zależność, a odrębną dla gytii wykazującej oznaki zmurszenia (próbka nr 1), obie opisane są jednak funkcjami potęgowymi (ryc. 2).
- Dla próbek kredy jeziornej (KrJ) i jednej próbki gytii mineralnej wysokowęglanowej (Mww) określono wspólną zależność opisaną funkcją wykładniczą, ale w zakresie zmian wartości wskaźnika porowatości odpowiadającym obciążeniu w przedziale 25–200 kPa (ryc. 3).
- Dla próbek gytii mineralno-organicznej wysokowęglanowej (MOww) i mineralno-organicznej węglanowej (MOw\* w tabl. 1), określono trzy różne zależności opisane trzema różnymi funkcjami wykładniczymi (ryc. 4).

4. Wartości parametrów funkcji wykładniczych **a** i **b**, opisujących zależności dla gytii mineralno-organicznej wysokowęglanowej (MOww) i mineralno-organicznej węglanowej (MOw\* w tabl. 1), wykazują związek z cechami litologicznymi określonymi w postaci zaproponowanego w niniejszym artykule litologicznego współczynnika wpływu **Li** (tab. 3; ryc. 5 i 6). Litologiczny współczynnik wpływu **Li** jest rozumiany jako współczynnik wpływu na przebieg zmian wartości współczynnika filtracji w zależności od wskaźnika porowatości w procesie etapowej konsolidacji. Zdefiniowany jest jako powiązanie podstawowych cech litologicznych (równania 2 i 3), decydujących o przynależności osadu do danego typu gytii i nazwy gruntu (tab. 1).

Dziękuję bardzo recenzentom i redaktorowi naczelnemu za wnikliwą ocenę mojego artykułu i uwagi, których uwzględnienie, mam nadzieję, wpłynęło na precyzję i klarowność opisu. Badania wykorzystane w artykule były finansowane z tematu badawczego statutowego, realizowanego w Katedrze Geotechniki i Budownictwa Drogowego UWM w Olsztynie.

## LITERATURA

- AL-TABBAE A. & WOOD D.M. 1987 – Some measurements of the permeability of kaolin. *Geotechnique*, 37: 499–504.
- ASSAOKA A. 1978 – Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations*, 18 (4): 87–101.
- BARDEN L. 1970 – Time dependent deformation of normally consolidated clays and peats. *J. Soil Mech. Found. Div., SM1*: 25–49.
- BERRY P.L. & POSKITT T.J. 1972 – The consolidation of peat. *Geotechnique*, 22: 27–52.
- BERRY P.L. & VICKERS B. 1975 – Consolidation of fibrous peat. *J. Geotechn. Eng. Div., GT8*: 1021–1043.
- BIOT M. A. & WILLIS D.G. 1957 – The elastic coefficient of a theory of consolidation. *J. Appl. Mech.*, 24: 594–601.
- CARLSTEN P. 1988 – Geotechnical properties of peat and up-to-date methods of design and construction on peat. 2 nd Baltic Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tallin.
- DAMICZ J. 1995 – Związek wieku osadów pojeziornych z ich typem litologicznym na Warmii i Mazurach. *Prz. Geol.*, 43 (1): 35–38.
- DAMICZ J. 2003 – Propozycja szacowania ściśliwości gytii i kredy jeziornej. *Prz. Geol.*, 51 (5): 419–424.
- DERSKI W. 1964 – Wstęp do matematycznej teorii konsolidacji. *Zesz. Nauk. PŁódz*, 60, Mechanika.
- DLUGASZEK M. 1990 – Próba geotechnicznej klasyfikacji gruntów organicznych typu gytii. *Drogownictwo*, 7/1990.
- DOBĄK P. 2007 – Określenie przepuszczalności gruntów spoistych w badaniach konsolidacji z ciągłym przyrostem obciążenia. *Prz. Geol.*, 55 (2): 126–132.
- DOBĄK P. & KOWALCZYK S. 2010 – Zachowania konsolidacyjne past gruntowych jako potencjalnego materiału izolacyjnego. *Prz. Geol.*, 58 (9/2): 903–911.
- DROZD P.A. & ZAJĄC W.N. 1968 – Rączki osadki nasypiej na bółotach. *Gidrotech. Mielior.*, 3.
- GIBSON R.E. & LO K.Y. 1961 – A theory consolidation for soil exhibiting secondary compression. *Acta Polit. Scandinavica*, 41: 1–15.
- HARTLEY J. & WOLSKI W. 1996 – *Embankments on Organic Soils*. Elsevier. Amsterdam, Lausanne, New York, Oxford, Sharon, Tokio.
- KOCISZEWSKA-MUSIAŁ G. 1988 – *Surowce mineralne czwartorzędu*. Wyd. Geol., Warszawa.
- LARSON R. 1981 – *Drained behavior of Swedish clays*. Swedish Geotechnical Institute, Report No. 12, Linköping.
- LECHOWICZ Z. & SZYMAŃSKI A. 1984 – Prediction of consolidation of organic soil. *Ann. Warsaw Agricult. Univ.-SGGW, Land Reclam.*, 21: 55–59.
- MOLISZ R., BARAN L. & WERNO M. 1986 – *Nasypy na gruntach organicznych*. WKŁ, Warszawa.
- MYŚLIŃSKA E. 1996 – *Leksykon gruntoznawstwa*. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MYŚLIŃSKA E. 2001 – *Grunty organiczne i laboratoryjne metody ich badania*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- PAJAŁ R. & DOBĄK P. 2008 – Określanie parametrów filtracyjnych z badań w konsolidometrze Rowe'a. *Geol. AGH*, 34: 677–689.
- PN-86/B-02480: *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*.
- PIASKOWSKI A. 1989 – Instrukcja ITB nr 289.
- POSTKITT T.J. 1969 – The consolidation of saturated clay with variable permeability and compressibility. *Geotechnique*, 16: 234–252.
- PRZYSTAŃSKI J. 1973 – O konsolidacji torfów niskich Niziny Wielkopolskiej. *Mat. II Konf. Nauk. Wydz. Budow. Łódzkiego Polit. Poznańskiej*, Poznań.
- RAJAN G. & SHRAMA R.P. 1994 – Non linear Visco-elastic constitutive model for time dependent behavior of clays. *New Delhi, XIII ICSMFE*: 421–424.
- ROZA S.A. 1950 – Osadki gidrotechnicznych сооруżeń na glinach s małej włączności. *Gidrotechniczskoje stroitelstwo*, 9: 25–30.
- SWATOWSKI J. & WOJNICKI J. 1979 – Zależność enometrycznego modułu ściśliwości od popielności i początkowego ciężaru objętościowego szkieletu gruntowego gytii. *Kreda jeziorna i gytie*, 1: 7–11.
- SZAFER G. 1977 – Nonlinear problems of consolidation theory. *Symp. French-Polish Club, Kraków*: 585–604.
- SZYMAŃSKI A. & LECHOWICZ Z. 1986 – Back analysis of organic soil consolidation. *Ann. Warsaw Agricult. Univ.-SGGW, Land Reclam.*, 22: 45–50.
- SZYMAŃSKI A. 1991 – Czynniki warunkujące analizę odkształcenia gruntów organicznych obciążonych nasypem. *Wyd. SGGW-AR, Warszawa*.
- TAVENAS F., LE BLOND P., JEAN P. & LE ROUEIL S. 1983 – The permeability of natural soft clays. Part I. Methods of laboratory measurements. *Canadian Geotech. J.*, 20: 629–660.
- WIŁUN Z. 1987 – *Zarys Geotechniki*. WKŁ, Warszawa.
- WOLSKI W. 1984 – *Metody badań gruntów słabych*. VII Kraj. Konf. Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Poznań.
- YOSHIKUNI H., KUSAKABE O., HIRAO T. & IKEGAMI S. 1994 – Elastoviscous modeling of time dependent behavior of clays. *New Delhi, XIII ICSMFE*: 417–420.
- ZADROGA B. & DAMICZ J. 2002 – Szacowanie ściśliwości gytii w zależności od gęstości objętościowej szkieletu gruntowego. XII Kraj. Konf. Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. *Problemy geotechniczne obszarów przymorskich. Szczecin-Międzyzdroje*: 407–417.

Praca wpłynęła do redakcji 25.01.2013 r.  
Aceptowano do druku 6.10.2014 r.