

Dariusz WOJTASIK¹, Magdalena FRAK², Hubert KOMOROWSKI³

¹Katedra Geoinżynierii SGGW

Department of Geotechnical Engineering WAU

²Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW

Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WAU

³Katedra Kształtowania Środowiska

Department of Environmental Improvement WAU

Wpływ kolmatacji na współczynnik filtracji układu grunt-geowłóknina

The influence of clogging in the test of permeability coefficient soil-geotextile system

Słowa kluczowe: geosyntetyki, geowłókniny, kolmatacja, współczynnik filtracji

Key words: geosynthetics, nonwoven geotextiles, clogging, permeability coefficient

Wprowadzenie

Zakłócenia przepływu filtracyjnego wody w gruncie zależą w dużym stopniu od cech ujmowanej wody, a także od właściwości fizykochemicznych i mechanicznych samego gruntu. Migracja cząstek gruntu a także substancji biologicznych, chemicznych oraz kolidów wpływa istotnie na przebieg procesów filtracji. Ponadto rozwój mikroorganizmów tworzących błonę biologiczną może doprowadzić do ograniczenia przepływu filtracyjnego (Nawrocki i Biłozor 2000, Skolasińska 2003). Zjawiska te są szczególnie ważne dla bezpieczeństwa konstrukcji inżynierskich i należy je uwzględniać już

w fazie projektowania systemów filtracyjnych.

Ze względu na coraz bardziej powszechne stosowanie wyrobów geosyntetycznych (m.in. geowłóknin) w konstrukcjach inżynierskich celowe wydaje się zbadanie zachowania układu grunt-geowłóknina podczas procesu filtracji. Szczególnie istotna jest analiza układu podczas długotrwałego przepływu filtracyjnego. Czas trwania przepływu oraz warunki, w jakich się on odbywa stanowią czynniki wpływające na intensywność kolmatacji. Ta, z kolei, powoduje ograniczenie przepuszczalności w badanym układzie.

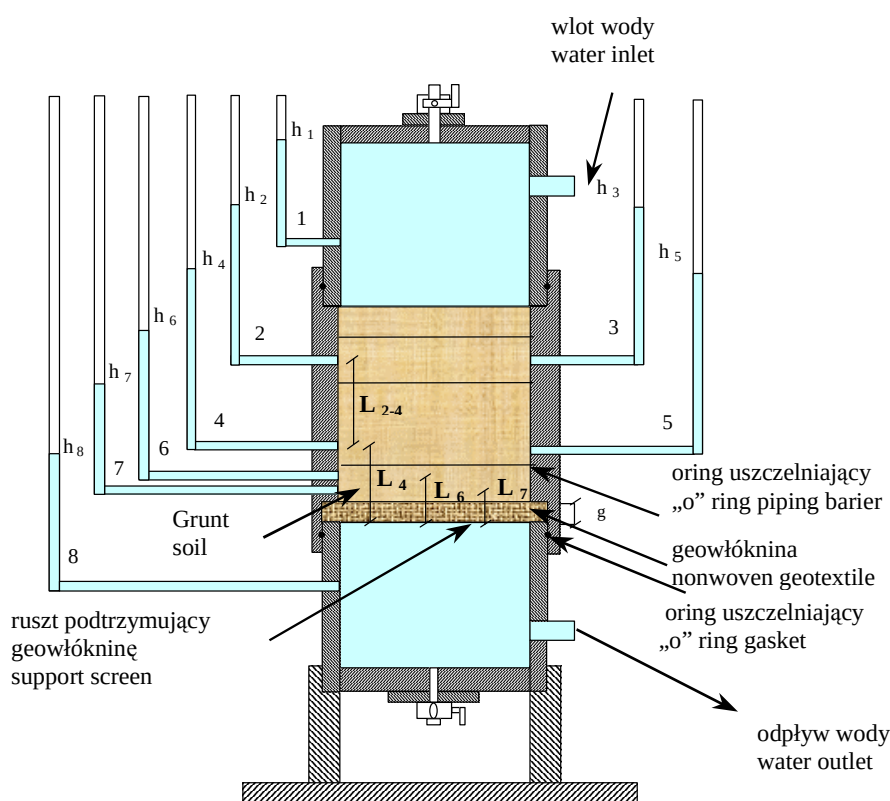
W artykule przedstawiono wyniki badań współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina przy różnych gradientach hydraulicznych ($i = 1 \div 10$), który został ograniczony na skutek kolmatacji mechanicznej oraz biologicznej.

Metodyka badań

Badania laboratoryjne współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina przeprowadzono w pięciu powtórzeniach z wykorzystaniem aparatu zalecanego przez normę ASTM D 5101-90. Aparat wykorzystany do badań został zmodyfikowany (rys. 1). Modyfikacja polegała na zainstalowaniu dodatkowych piezometrów 6 i 7, co umożliwiło

pomiary wysokości ciśnienia piezometrycznego w jak najbliższym sąsiedztwie geowłókniny.

Próbki gruntu do badań wysuszono w temperaturze 105°C i przesiano przez sito 2 mm. Tak przygotowany grunt rozdzielono na cztery równe porcje, które kolejno umieszczano na geowłókninie. Każdą ułożoną warstwę gruntu zagęszczano w aparacie poprzez sześciokrotne uderzanie w jego bok drew-



RYSUNEK 1. Schemat aparatu do badań przepuszczalności w układzie grunt-geowłóknina: h_n – manometryczny odczyt, dla manometru n , L_n – odległość pomiędzy piezometrem numer n , a spodem geowłókniny, L_{2-4} – odległość pomiędzy piezometrami o numerze 2 i 4, g – grubość geowłókniny
FIGURE 1. The scheme apparatus for coefficient permeability test in soil-geotextile system: h_n – the manometer reading, for the manometer number n , L_n – distance between piezometer number n and the bottom of geotextiles, L_{2-4} – distance between piezometers number 2 and 4, g – thickness of geotextile

nianym klockiem. W celu usunięcia nagromadzonego powietrza doprowadzono odpowietrzoną wodę w temperaturze 20°C od dołu badanej próbki. Po 12 godzinach rozpoczęto badanie, zmieniając kierunek przepływu zgodny z kierunkiem siły grawitacji. Woda podczas doświadczenia krążyła w obiegu zamkniętym. Badania przeprowadzono przy zewnętrznych gradientach hydraulicznych, wynoszących odpowiednio: 1, 2,5, 5, 7,5 i 10. Pomiary obejmowały wyznaczenie temperatury przepływającej wody (T), jej objętości (V), czasu przepływu (t) oraz wysokości ciśnienia piezometrycznego dla poszczególnych piezometrów (Δh). Czas, po którym dokonano odczytów, wynosił od momentu stabilizacji przepływu odpowiednio: 0, 0,5, 1, 2, 3, 4, 6, 24 h itd., aż od momentu zakończenia badania (zanik przepływu wody). Współczynnik filtracji wyznaczono, wykorzystując zależność:

$$k = \frac{VR_T L}{\Delta h A t} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

gdzie:

V – objętość wody,

A – powierzchnia próbki,

t – czas przepływu mierzonej objętości wody,

Δh – różnica odczytów piezometrycznych,

L – grubość warstwy filtracyjnej,

R_T – temperaturowy współczynnik korekcyjny wody (odniesiony do 20°C), można go odczytać z tabeli zamieszczonej w normie ASTM D 4491-92, z wykresów (EN 12040 pr.) lub obliczyć z zależności:

$$R_T = \frac{\eta_T}{\eta_{20}} = \frac{1,762}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad (2)$$

$$\eta_T = \frac{1,78}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad [\text{MPa}\cdot\text{s}] \quad (3)$$

gdzie:

η_T – dynamiczny współczynnik lepkości wody w temperaturze $T^\circ\text{C}$ [$\text{MPa}\cdot\text{s}$],

T – temperatura wody [$^\circ\text{C}$],

η_{20} – dynamiczny współczynnik lepkości wody w temperaturze 20°C [$\text{MPa}\cdot\text{s}$].

W artykule przedstawiono wyniki badań współczynnika filtracji (ograniczonego na skutek kolmatacji) w wybranych strefach, które zostały podzielone następująco:

- strefa 1–2,3; 25 mm warstwy gruntu znajdującej się w odległości 75–100 mm powyżej geowłókniny, między piezometrami 1 oraz 2 i 3,
- strefa 2,3–4,5; 50 mm warstwy gruntu znajdującej się w odległości 25–75 mm powyżej geowłókniny, między piezometrami 2 i 3 oraz 4 i 5,
- strefa 7–8; geowłóknina i 4 mm warstwy gruntu znajdującej się powyżej geowłókniny między piezometrami 7 do 8.

Charakterystyka badanych materiałów

Do badań laboratoryjnych wykorzystano geowłókninę igłowaną K-500 oraz piasek gliniasty. Geowłóknina o grubości $g = 5,1 \text{ mm}$ i charakterystycznej średnicy porów $O_{90} = 0,06 \text{ mm}$ posiadała współczynnik filtracji w kierunku

prostopadłym do jej powierzchni $k_v = 5,8 \cdot 10^{-3}$ m/s. Piasek gliniasty zawierał frakcji piaskowej 83%, pyłowej 8% oraz łąkowej 9%. Zgodnie z kryterium Kenneya i Lau (1985), piasek gliniasty jest gruntem wewnątrznie niestabilnym. Badany grunt charakteryzował się następującymi właściwościami: wskaźni-

kiem nierównomierności uziarnienia $C_u = 37,5$, wskaźnikiem krzywizny $C_c = 12$, porowatością $n = 0,43$ i współczynnikiem filtracji $k = 4,8 \cdot 10^{-4}$ m/s. Zbiorcze zestawienie właściwości fizycznych, hydraulicznych oraz mechanicznych badanej geowłókniny oraz gruntu przedstawiono w tabelach 1 i 2.

TABELA 1. Właściwości badanej geowłókniny K-500
TABLE 1. The properties of tested nonwoven geotextile K-500

Właściwości Properties	Wartości parametru Parameter value
Fizyczne / Physicals - Grubość przy obciążeniu 2 kPa / Thickness for the applied load 2 kPa - Masa powierzchniowa / Mass per unit area - Charakterystyczna wielkość porów / Apparent Opening Size	$g = 5,1$ mm $\mu_A = 526$ g/m ² $O_{90} = 0,06$ mm
Hydrauliczne / Hydraulics - Współczynnik filtracji prostopadły do powierzchni geowłókniny / Permeability coefficient (Cross-plane flow) - Przepuszczalność w płaszczyźnie geowłókniny / Transmissivity (In-plane Flow)	$k_v = 5,8 \cdot 10^{-3}$ m/s $k_h = 2,7 \cdot 10^{-3}$ m ² /s
Mechaniczne / Mechanicals - Wytrzymałość na rozciąganie - w szerz pasma / strip tensile cross machine direction - wzdłuż pasma / strip tensile machine direction - Przebite statyczne (met. CBR) / Static puncture (met. CBR)	$\alpha_{f\ c.m.d} = 23$ kN/m $\alpha_{f\ m.d} = 15,5$ kN/m $F_p = 3,04$ kN

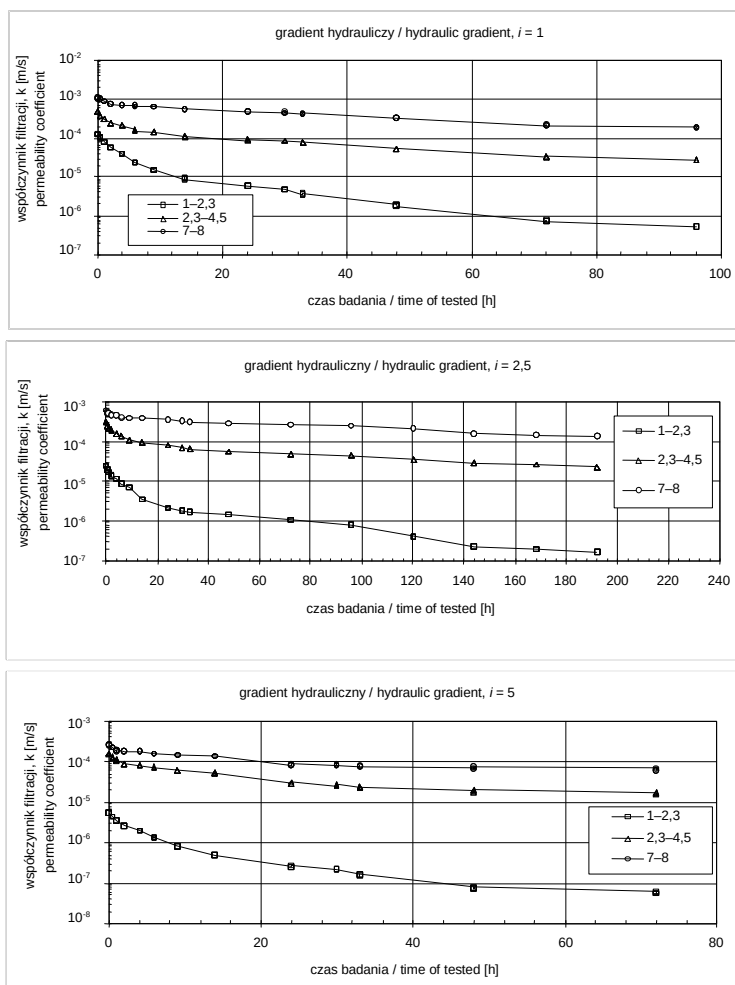
TABELA 2. Właściwości badanego gruntu
TABLE 2. The properties of tested soil

Właściwości Properties	Wartości parametru Parameter value
Rodzaj / Type - Piasek gliniasty / Slightly clayey sand - Wskaźnik nierównomierności uziarnienia / Coefficient of uniformity - Wskaźnik krzywizny / Coefficient of curvature - Charakterystyczne średnice / Characteristic diameters	Piasek / Sand 83%, Pył / Clay 8%, Ł / Silt 9% $C_u = d_{60}/d_{10} = 37,5$ $C_c = d_{30}^2/(d_{60} \cdot d_{10}) = 12$ $d_{90} = 0,47$ mm; $d_{60} = 0,3$ mm; $d_{10} = 0,008$ mm
Fizyczne / Physicals - Gęstość objętościowa suchej masy gruntu / Density of dry soil - Porowatość / Porosity - Wskaźnik zagęszczenia / Relative compaction	$\rho_d = 1,5$ Mg/m ³ $n = 0,43$ $I_s = 0,76$
Hydrauliczne / Hydraulics Współczynnik filtracji / Permeability coefficient	$k = 4,8 \cdot 10^{-4}$ m/s

Analiza wyników badań

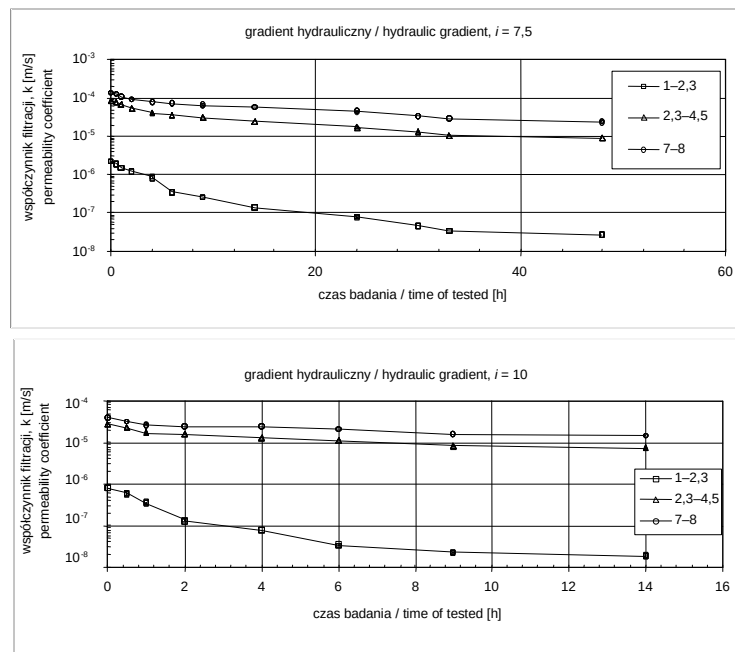
Wyniki badań współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina (strefa 7–8) oraz gruntu (strefa 1–2,3 oraz 2,3–4,5) w zależności od zewnętrznego gradientu hydraulicznego $i = 1 \div 10$ zamieszczono na rysunkach 2 i 3.

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono zmiany w czasie współczynnika filtracji na skutek kolmatacji w poszczególnych strefach. Wyniki badań wskazują, że największa wartość tego współczynnika występuje na początku każdego zadane-go gradientu, także w strefie wyznaczonej przez piezometry 7–8 (tj. geowłók-



RYSUNEK 2. Zmiana współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina (strefa 7–8) oraz gruntu (strefa 1–2,3 oraz 2,3–4,5) przy zewnętrznym gradiencie hydraulicznym $i = 1 \div 5$

FIGURE 2. The change in permeability coefficient in soil-geotextile system (zone 7–8) and soil (zone 1–2,3 as well as 2,3–4,5) under different hydraulic gradient $i = 1 \div 5$



RYSUNEK 3. Zmiana współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina (strefa 7–8) oraz gruntu (strefa 1–2,3 oraz 2,3–4,5) przy zewnętrznym gradiencie hydraulicznym $i = 7,5 \div 10$
 FIGURE 3. The change in permeability coefficient in soil-geotextile system (zone 7–8) and soil (zone 1–2,3 as well as 2,3–4,5) under different hydraulic gradient $i = 7,5 \div 10$

nina + 4 mm gruntu znajdującego się powyżej geowłókniny), natomiast najmniejsza w strefie 1–2,3 (75–100 mm gruntu powyżej geowłókniny). Wynika to z faktu, iż geowłóknina charakteryzuje się większą porowatością aniżeli badany grunt, pomimo iż jej początkowy współczynnik filtracji $k_{\text{geo}} = 5,8 \cdot 10^{-3}$ m/s uległ zmniejszeniu na zakończenie serii badań do $k_{\text{geo}} = 4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

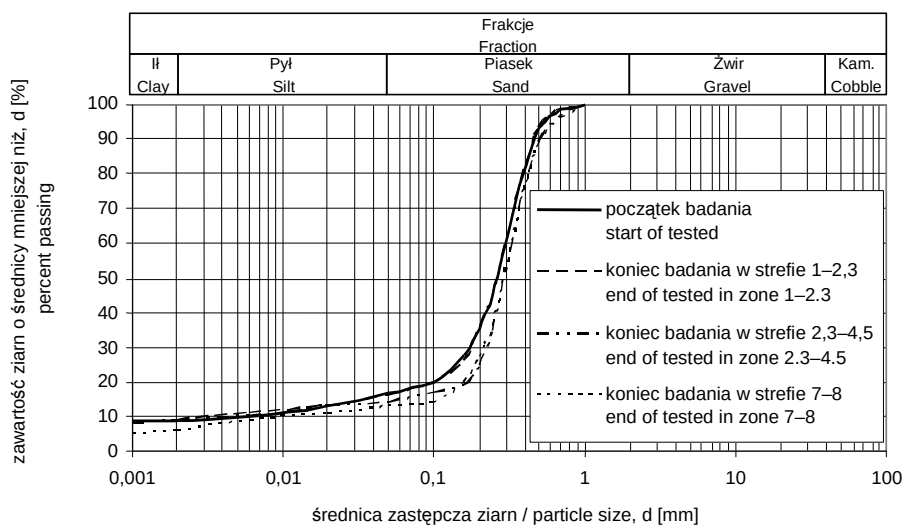
Wyniki badań (tab. 3) wskazują, że największe zmniejszenie współczynnika filtracji w gruncie na skutek kolmatacji wystąpiło w strefie między piezometrami 1–2,3 (75–100 mm gruntu powyżej geowłókniny) przy gradiencie hydraulicznym $i = 1$ (ponad 200-krotne), natomiast najmniejsze (około 3-krotne) w układzie grunt-geowłóknina, w strefie

wyznaczonej przez piezometry 7–8 przy gradiencie hydraulicznym $i = 10$. Przyczyną ograniczenia współczynnika filtracji była kolmatacja mechaniczna spowodowana migracją drobnych cząstek gruntu w kierunku filtracji (rys. 4) oraz kolmatacja biologiczna powstała w górnej warstwie gruntu w strefie 1–2,3 (rys. 5).

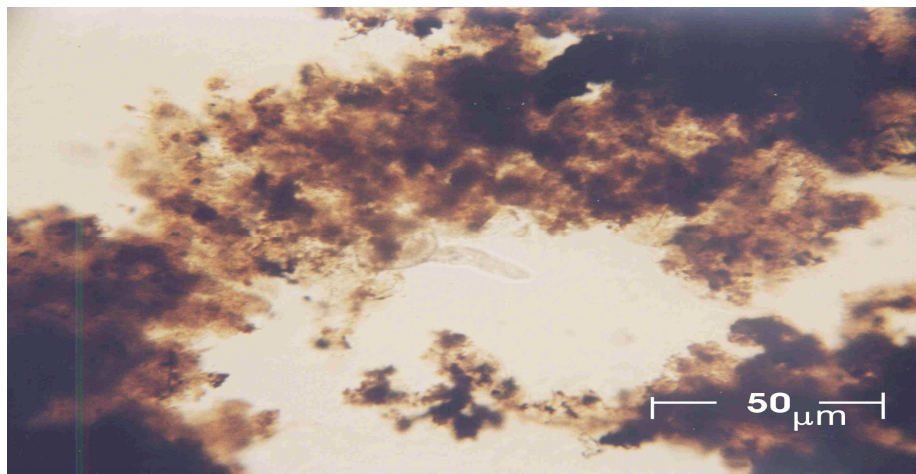
Warunki, jakie panowały podczas doświadczenia, umożliwiały wzrost i rozwój mikroorganizmów, m.in. stały dostęp światła, temperatura około 20°C oraz zamknięty obieg wody. Analiza składu wody po badaniu wskazała podwyższone zasolenie do ponad $230 \mu\text{S}/\text{cm}$ oraz zawartość BZT₅ o $5 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$ w stosunku do wody wodociągowej. W tych warunkach rozwijające

TABELA 3. Wartości współczynników filtracji dla poszczególnych stref
TABLE 3. The value of coefficient permeability for selected zones

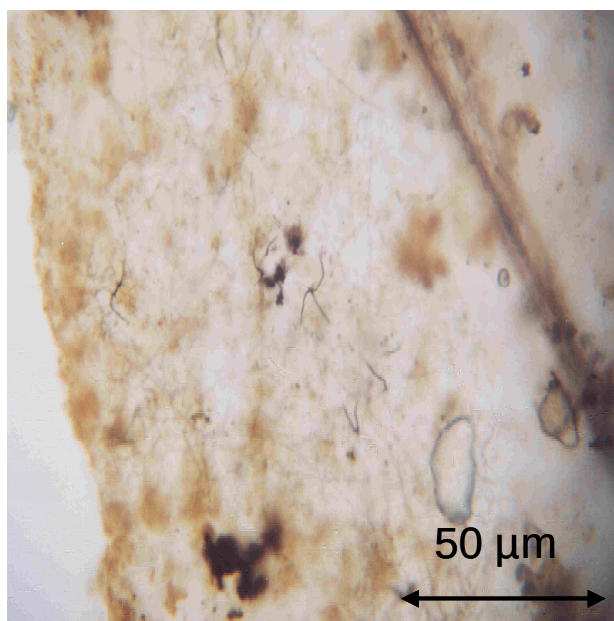
Badana strefa Tested zone	Numery piezome- trów Piezometer number	Współczynnik filtracji Permeability coefficient k [m/s]				Redukcja współ- czynnika filtracji k_p/k_k Reduction of permeability coefficient dla ($i = 1 \div 10$) gradient	
		Badanie przy gradien- cie / Gradient of tested $i = 1$		Badanie przy gra- dience / Gradient of tested $i = 10$			
		początek start k_p	koniec end k_k	początek start k_p	koniec end k_k		
						$i = 1$	$i = 10$
75–100 mm gruntu powyżej geowłókniny	1–2,3	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	≈ 236	≈ 40
25–75 mm gruntu powyżej geowłókniny	2,3–4,5	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	≈ 18	≈ 4
Geowłóknina + 4 mm gruntu powyżej geo- włókniny	7–8	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	≈ 6	≈ 3



RYSUNEK 4. Zmiana krzywej uziarnienia na skutek procesu filtracji w poszczególnych strefach układu grunt-geowłóknina
FIGURE 4. The change of grain-size distribution in consequence of filtration process for selected zones in soil-geotextile system



RYSUNEK 5. Widok błony biologicznej w strefie pomiędzy piezometrami 1–2,3
 FIGURE 5. The view of biological clogging in zone between piezometers 1–2,3



RYSUNEK 5. Widok strzępek grzybów (*Mycota*)
 FIGURE 5. The view of mycelium (*Mycota*)

się w wodzie drobnoustroje wytworzyły galaretowatą warstwę w górnej warstwie gruntu, powodując zmniejszenie jego porowatości. Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe wykazały, że powstała błonę biologiczną tworzyły bakterie nitkowate, śluzowe, wrotki (rys. 6). Nadmierny ich rozwój przyczynił się do znacznego ograniczenia współczynnika filtracji w badanym układzie grunt-geowłóknina.

Wnioski

Przeprowadzone badania zmiany współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina przy zewnętrznym gradientie hydraulicznym w zakresie $i = 1 \div 10$ wykazały, że:

1. Ograniczenie współczynnika filtracji nie wynika tylko ze zmian zachodzących podczas procesu filtracji w gruncie, ale także z biologicznej kolmatacji układu.
2. Biologiczna kolmatacja na skutek długotrwałego przepływu spowodowana była rozwojem bakterii śluzowatych, nitkowatych oraz grzybów.
3. Największe zmniejszenie współczynnika filtracji około 200-krotne, wystąpiło w strefie gruntu znajdującego się między piezometrami 1–2,3 (75–100 mm gruntu powyżej geowłókniny) przy zewnętrznym gradientie hydraulicznym $i = 1$.
4. Najmniejsza redukcja współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina, około 3-krotna, wystąpiła w strefie między piezometrami 7–8 (geowłóknina + 4 mm gruntu powyżej

geowłókniny) przy zewnętrznym gradientie hydraulicznym $i = 10$.

Literatura

- ASTM D 4491-92: Standard Test Method for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity.
- ASTM D 5101-90: Standard Test Method for Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio.
- EN 12040 pr. 1995: Determination of water permeability characteristics normal to the plane without load.
- KENNEY T.C., LAU D. 1985: Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal* 22, 2: 215–225.
- NAWROCKI J., BIŁOZOR S. 2000: Uzdatnianie wody. Procesy chemiczne i biologiczne. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- SKOLASIŃSKA K. 2003: Kolmatacja osadów w strefie aeracji pod wpływem infiltracji wód powierzchniowych (na przykładzie ujęcia wody „Dębina” w Poznaniu). *Przegląd Geologiczny* 2003–01, 51.

Summary

The influence of clogging in the test of permeability coefficient soil-geotextile system. The paper presents the results of laboratory tests carried out in the modified soil-geotextile permeameter (Fig. 1) recommended in ASTM standard D 5101-90. Laboratory tests were performed on non-woven geotextile K-500 (Tab. 1) and slightly clayey sand (Tab. 2). In figures 2 and 3 the change in permeability coefficient in soil-geotextile system for individual zones under different hydraulic gradients are shown. The changes in permeability

coefficient in soil-geotextile system are caused by phenomena mechanical (Fig. 4), biological (Fig. 5 and 6) and chemical clogging.

Authors' addresses:

Dariusz Wojtasik
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland

Magdalena Frąk
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland

Hubert Komorowski
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Kształtowania Środowiska
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland