

Dariusz WOJTASIK, Zygmunt KRZYWOSZ

Katedra Geoinżynierii SGGW
Department of Geotechnical Engineering WAU

Zmiana współczynnika filtracji układu piasek średni-geowłóknina K 500

The change in permeability coefficient in medium sand-nonwoven geotextile K 500 system

Słowa kluczowe: geosyntetyki, geowłókniny, współczynnik filtracji, gradient hydrauliczny

Key words: geosynthetics, nonwoven geotextiles, permeability coefficient, hydraulic gradient

Wprowadzenie

Geowłókniny są produktami syntetycznymi, których parametry fizyczne, mechaniczne i hydrauliczne pozwalają na stosowanie ich w budownictwie w bezpośrednim kontakcie z gruntem (Kozłowski 2000). Dobór geowłókniny do ochrony gruntu jest ściśle związany z przepuszczalnością zarówno samego filtra geosyntetycznego, jak i gruntu chronionego. Dotychczasowe badania wykazują, że współczynnik filtracji układu grunt-geowłóknina zależy od rodzaju i właściwości gruntu, zadanego gradientu hydraulicznego, właściwości geowłókniny i jej kolmatacji (mechanicznej, chemicznej i biologicznej). Do najważniejszych czynników gruntowych można zaliczyć: rodzaj

gruntu, uziarnienie, kształt ziaren, stopień wilgotności, porowatość, stopień lub wskaźnik zagęszczenia, ciśnienie wody w porach i jej temperaturę. Do właściwości geowłókniny wpływających na przepuszczalność należy zaliczyć rodzaj geowłókniny (skład surowcowy, technologia produkcji) i jej porowatość (Lechowicz i in. 2003).

Dotychczasowa metodyka badań parametrów hydraulicznych ograniczona była najczęściej do wyznaczenia oddzielnie współczynnika filtracji gruntu i współczynnika filtracji geowłókniny w kierunku prostopadłym i podłużnym (ASTM D 4491, Collins i Karge 1978, Krzywosz 1995, Lewandowski i Młynarek 1979, Maślanka 1996).

Wbudowana geowłóknina, spełniająca funkcję filtracyjną i/lub drenażową, powinna posiadać taką porowatość, aby cząsteczki gruntu, które mogą się do niej dostać podczas przepływu nie ograniczały w istotnym stopniu jej zdolności filtracyjnych. Z drugiej strony porowatość geowłókniny nie powinna umożliwiać istotnej sufozji w gruncie.

Analizując parametry hydrauliczne układu grunt-geowłóknina, należy zwrócić uwagę, że przepuszczalność geowłókniny (k_{geo}) nie może być mniejsza od przepuszczalności gruntu (k_{gr}) (Rosen i Marks 1975, Giroud 1982, Chlister i Holts 1985). Kryterium przepuszczalności można zapisać w postaci nierówności:

$$k_{geo} > \alpha k_{gr} \quad (1)$$

gdzie:

k_{geo} – współczynnik filtracji geowłókniny [m/s],

k_{gr} – współczynnik filtracji gruntu [m/s],

$\alpha = 1 \div 10$

W artykule przedstawiono wyniki badań współczynnika filtracji układu piasek średni-geowłóknina K 500 przy różnych wartościach gradientu hydraulicznego. Badanie współczynnika filtracji w układzie grunt-geowłóknina przeprowadzono zgodnie z metodyką przedstawioną w normie ASTM D 5101-90. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na opracowanie zależności empirycznej umożliwiającej określenie zmiany współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina w procesie filtracji.

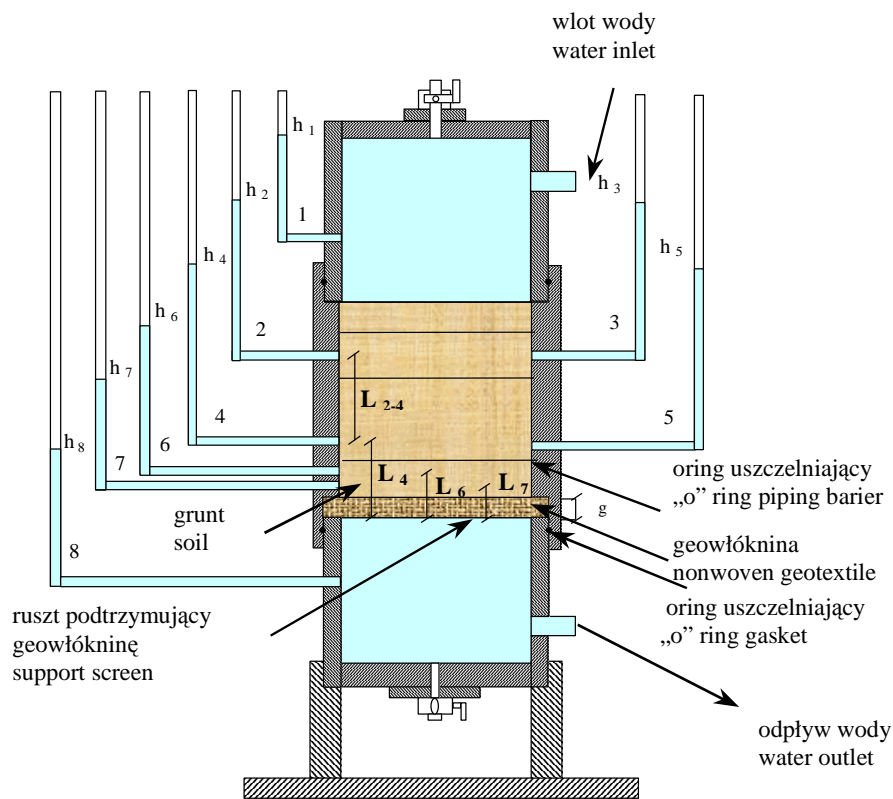
Metodyka badań

Badania laboratoryjne współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina przeprowadzono w zmodyfikowanym aparacie przedstawionym na rysunku 1. Modyfikacja zalecanego w normie ASTM D 5101-90 aparatu polegała na zainstalowaniu dodatkowych piezometrów 6 i 7. Zastosowany układ piezometrów zapewnia pomiary wysokości ciśnienia piezometrycznego na wybra-

nych poziomach zarówno układu grunt-geowłóknina, jak i samego gruntu. Zainstalowane piezometry umożliwiają analizę zachowania się układu grunt-geowłóknina w następujących strefach (rys. 1):

- strefa 7–8, geowłóknina i 4 mm warstwy gruntu od piezometru 7 do 8,
- strefa 6–8, geowłóknina i 8 mm warstwy gruntu od piezometru 6 do 8,
- strefa 4,5–8, geowłóknina i 25 mm warstwy gruntu od piezometrów 4 i 5 do 8.
- strefa 6–7, 4 mm warstwa gruntu znajdująca się w odległości 4–8 mm powyżej geowłókniny, między piezometrami 6 i 7,
- strefa 4,5–6, 17 mm warstwa gruntu znajdująca się w odległości 8–25 mm powyżej geowłókniny, między piezometrami 4 i 5 oraz 6,
- strefa 2,3–4,5, 50 mm warstwa gruntu znajdująca się w odległości 25–75 mm powyżej geowłókniny, między piezometrami 2 i 3 oraz 4 i 5.

Badania laboratoryjne obejmowały wyznaczenie współczynnika filtracji materiału geosyntetycznego przed badaniem i po badaniu, jak również jego wartości w układzie grunt-geowłóknina. Do badań przygotowano próbki gruntu wysuszonego w temperaturze 105°C przesianego przez sito o średnicy oczek 2 mm. Przygotowany grunt rozdzielono na cztery równe porcje, które kolejno umieszczono na geowłókninie. Każdą porcję gruntu, zagęszczano w aparacie poprzez sześciokrotne uderzanie w jego bok drewnianym klockiem. W celu usunięcia nagromadzonego powietrza doprowadzono odpowietrzoną wodę w temperaturze 20°C od dołu badanej próbki.



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 piezometriami 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

Po 12 godzinach rozpoczęto badanie, zmieniając kierunek przepływu w kierunku siły grawitacji. W kolejnych seriach pomiarowych zewnętrzne gradienty hydrauliczne wynosiły odpowiednio: 1,0, 2,5, 5, 7,5 i 10. Pomiarы obejmowały wyznaczenie temperatury przepływającej wody (T), jej objętości (V), czasu przepływu (t) oraz wysokości ciśnienia piezometrycznego dla poszczególnych

piezometrów (Δh). Czas, po którym dokonywano odczytów, mierzony był od momentu stabilizacji przepływu i wynosił: 0, 0,5, 1, 2, 4, 6, 9, 14, 24 h. Badania przeprowadzono w pięciu powtórzeniach. Współczynnik filtracji wody zarówno dla geowłókniny, jak i gruntu obliczono z następującej zależności:

$$k = \frac{V \cdot R_T \cdot L}{\Delta h \cdot A \cdot t} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

gdzie:

Δh – różnica odczytów piezometrycznych,

A – powierzchnia próbki,

t – czas przepływu mierzonej objętości wody,

V – objętość wody,

L – grubość warstwy filtracyjnej,

R_T – temperaturowy współczynnik korekcyjny wody (odniesiony do 20°C), można go odczytać z tabeli zamieszczonej w normie ASTM D4491, wykresów (EN 12040 pr.) lub obliczyć z zależności:

$$R_T = \frac{\eta_T}{\eta_{20}} = \frac{1,762}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad (3)$$

$$\eta_T = \frac{1,78}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad [\text{MPa}\cdot\text{s}] \quad (4)$$

gdzie:

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

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

η_{20} – dynamiczny współczynnik lepkości wody w temperaturze 20°C [MPa·s].

Charakterystyka badanych materiałów

Do badań laboratoryjnych wykorzystano geowłókninę igłowaną K-500 oraz piasek średni. Geowłóknina o grubości

$g = 5,3$ mm i charakterystycznej średnicy porów $O_{90} = 0,06$ mm posiadała współczynnik filtracji w kierunku prostopadłym do jej powierzchni $k_v = 5,5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Badany grunt zawierał 100% frakcji piaskowej i charakteryzował się następującymi właściwościami: wskaźnik nierównomierności uziarnienia $C_u = 2,04$, wskaźnik krzywizny $C_c = 0,9$ oraz porowatość $n = 0,35$ i współczynnik filtracji $k = 1,2 \cdot 10^{-3}$ m/s. Zgodnie z kryterium Kenneya i Lau (1985), piasek średni jest gruntem wewnątrznie stabilnym. Zbiorcze zestawienie właściwości fizycznych, hydraulicznych oraz mechanicznych badanej geowłókniny oraz gruntu przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Analiza wyników badań

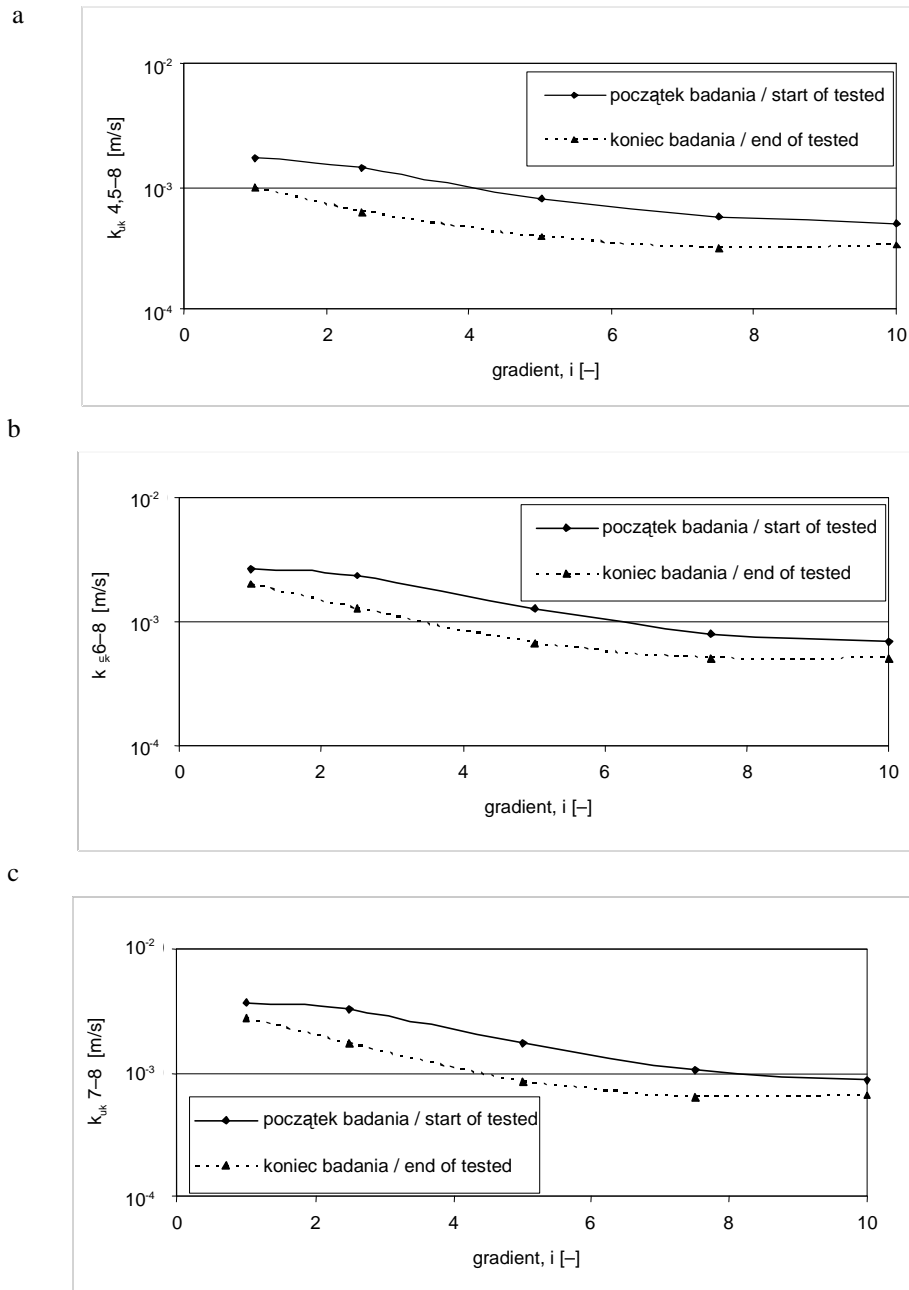
Zmiany współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina, jak również samego gruntu przy zewnętrznym gradiencie hydraulicznym w zakresie od $i = 1$ ÷10 przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Zamieszczono na nich początkowe i końcowe wartości współczynników filtracji w poszczególnych strefach. Wyniki badań wskazują, że największe wartości współczynnika filtracji występują na początku każdego zadanego gradientu hydraulicznego, a najmniejsze na zakończenie procesu filtracji. Największe wartości współczynnika filtracji zaobserwowano przy zewnętrznym gradiencie hydraulicznym $i = 1$, najmniejsze zaś przy $i = 10$. Zestawienie wyników badań początkowego i końcowego współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina oraz samego gruntu zamieszczono w tabeli 3. Przedstawiono

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

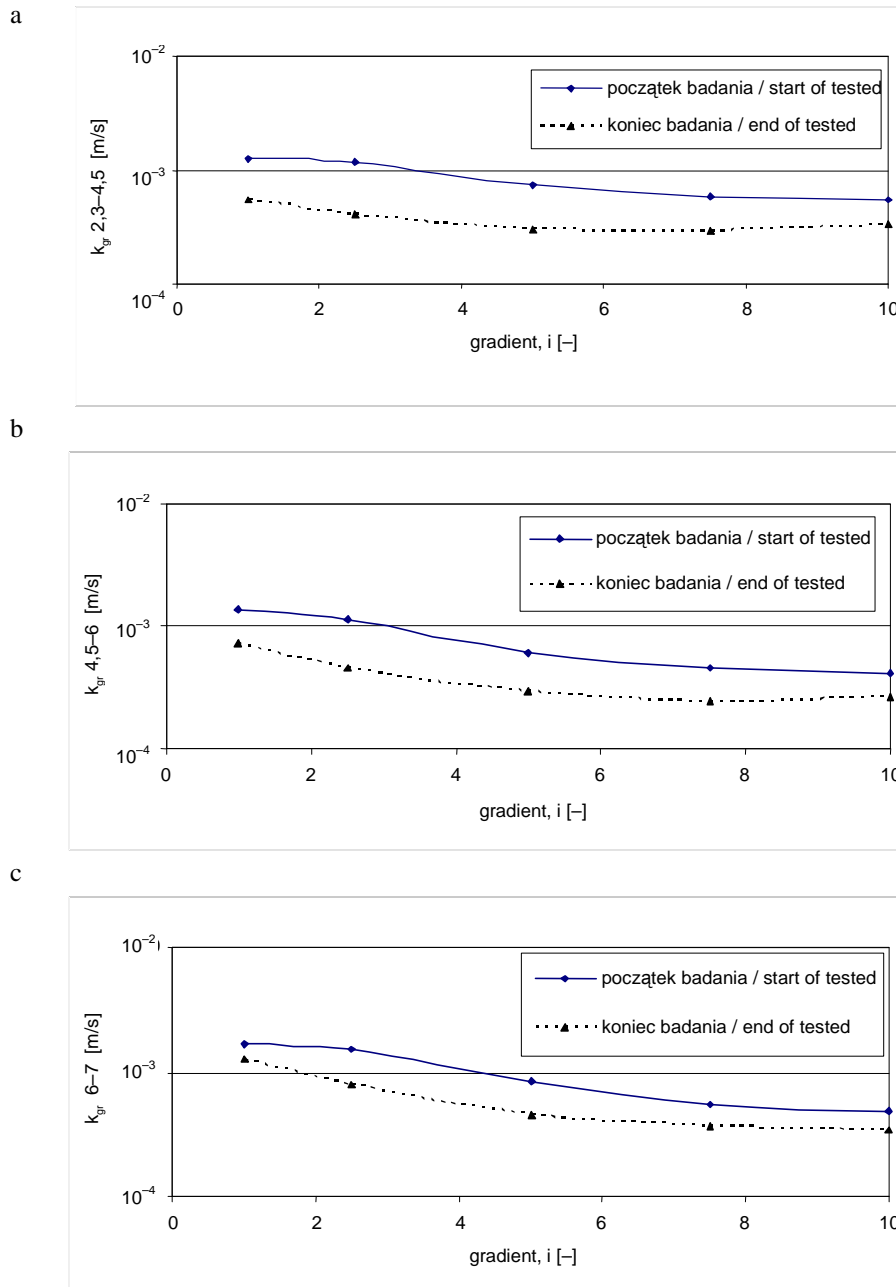
Właściwości Properties	Wartości parametru Parameter value
Fizyczne / Physicals <ul style="list-style-type: none"> • Grubość przy obciążeniu 2 kPa / Thickness for the applied load 2 kPa • Masa powierzchniowa / Mass per unit area • Charakterystyczna wielkość porów / Apparent Opening Size 	$g = 5,3 \text{ mm}$ $\mu_A = 505,3 \text{ g/m}^2$ $O_{90} = 0,06 \text{ mm}$
Hydrauliczne / Hydraulics <ul style="list-style-type: none"> • Współczynnik filtracji prostopadły do powierzchni geowłókniny / Permeability coefficient (Cross-plane flow) • Przepuszczalność w płaszczyźnie geowłókniny / Transmissivity (In-plane Flow) 	$k_v = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ $k_{it} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Mechaniczne / Mechanicals <ul style="list-style-type: none"> • Wytrzymałość na rozciąganie <ul style="list-style-type: none"> – w szerz pasma / strip tensile cross machine direction – wzdłuż pasma / strip tensile machine direction • Przebicie statyczne (met. CBR) / Static puncture (met. CBR) 	$\alpha_{f.c.m.d} = 23 \text{ kN/m}$ $\alpha_{f.m.d} = 15,5 \text{ kN/m}$ $F_p = 3,04 \text{ kN}$

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

Właściwości Properties	Wartości parametru Parameter value
Rodzaj / Type <ul style="list-style-type: none"> • Piasek średni / Medium sand • Wskaźnik nierównomierności uziarnienia / Coefficient of uniformity • Wskaźnik krzywizny / Coefficient of curvature • Charakterystyczne średnice / Characteristic diameters 	piasek / sand – 100%, $C_u = d_{60}/d_{10} = 2,04$ $C_c = d^2_{30}/(d_{60} \cdot d_{10}) = 0,9$ $d_{90} = 0,79 \text{ mm}; d_{60} = 0,47 \text{ mm};$ $d_{10} = 0,23 \text{ mm}$
Fizyczne / Physicals <ul style="list-style-type: none"> • Gęstość objętościowa suchej masy gruntu Density of dry soil • Porowatość / Porosity • Stopień zagęszczenia / Density index 	$\rho_d = 1,7 \text{ Mg/m}^3$ $n = 0,35$ $I_D = 0,47$
Hydrauliczne / Hydraulics <ul style="list-style-type: none"> • Współczynnik filtracji / Permeability coefficient 	$k = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$



RYSUNEK 2. Zmiana współczynnika filtracji układu grunt-geowłókna przy zewnętrznych gradientach hydraulicznych dla poszczególnych stref: a – strefa 4,5–8, b – strefa 6–8, c – strefa 7–8
 FIGURE 2. The change in permeability coefficient in soil-geotextile system under different hydraulic gradients for selected zones: a – zone 4,5–8 b – zone 6–8, c – zone 7–8



RYSUNEK 3. Zmiana współczynnika filtracji w gruncie przy różnych zewnętrznych gradientach hydraulicznych dla poszczególnych stref: a – strefa 2,3–4,5, b – strefa 4,5–6, c – strefa 6–7
 FIGURE 3. The change in permeability coefficient in soil under different hydraulic gradients for selected zones: a – zone 2,3–4,5, b – zone 4,5–6, c – zone 6–7

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

Rodzaj strefy Zone type	Badana strefa Tested zone	Numery piezometrów Piezometer number	Współczynnik filtracji, k [m/s] Permeability coefficient		Redukcja współczynnika filtracji (k_p/k_k) Reduction of permeability coefficient ($i = 1 \div 10$)
			Początek badania (k_p) Start of tested $i = 1$	Koniec badania (k_k) End of tested $i = 10$	
Układ grunt-geowłóknina	geo+4 mm	7–8	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	≈ 6
	geo+8 mm	6–8	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	≈ 6
	geo+25 mm	4,5–8	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	≈ 6
Grunt	4–8 mm	6–7	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	≈ 5
	8–25 mm	4,5–6	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	≈ 6
	25–75 mm	2,3–4,5	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	≈ 4

w niej stosunek początkowego ($i = 1$) do końcowego ($i = 10$) współczynnika filtracji w poszczególnych strefach. Określono w ten sposób zmiany współczynnika filtracji w poszczególnych strefach gruntu, znajdującego się powyżej geowłókniny.

Uzyskane wyniki badań wskazują, iż największa (około 6-krotna) redukcja współczynnika filtracji nastąpiła w układzie grunt-geowłóknina, tj. geowłóknina oraz znajdujący się od 4 do 25 mm grunt powyżej geowłókniny. Najmniejsza natomiast (około 4-krotna) w strefie samego gruntu znajdującego się od 25 do 75 mm powyżej geowłókniny. Zakres niewielkich zmian współczynnika filtracji wynikał z faktu, iż badany grunt był wewnętrznie stabilny. Potwierdzają to wyniki badań początkowego (geowłóknina fabrycznie nowa, $k_{geo} = 5,5 \cdot 10^{-3}$ m/s) i końcowego (po zakończeniu procesu filtracji, $k_{geo} = 4,6 \cdot 10^{-3}$ m/s) współczynnika filtracji geowłókniny.

Na podstawie przeprowadzonych 5 serii badań opracowano zależność, pozwalającą na określenie zmiany współczynnika filtracji układu grunt-geo-

włóknina, który wyznaczono na podstawie początkowych wartości współczynnika filtracji geowłókniny i gruntu oraz zewnętrznego gradientu hydraulicznego w strefie wyznaczonej przez piezometry 4,5–8, tj. geowłóknina oraz 25 mm gruntu powyżej geowłókniny. Analiza statystyczna przeprowadzona z wykorzystaniem programu Startgraphics pozwoliła ustalić zależność o współczynniku determinacji $R^2 = 93\%$ w następującej postaci:

$$k_{uk} = k_{geo} k_{gr}^{0,16} i^{-0,46} \text{ [m/s]} \quad (5)$$

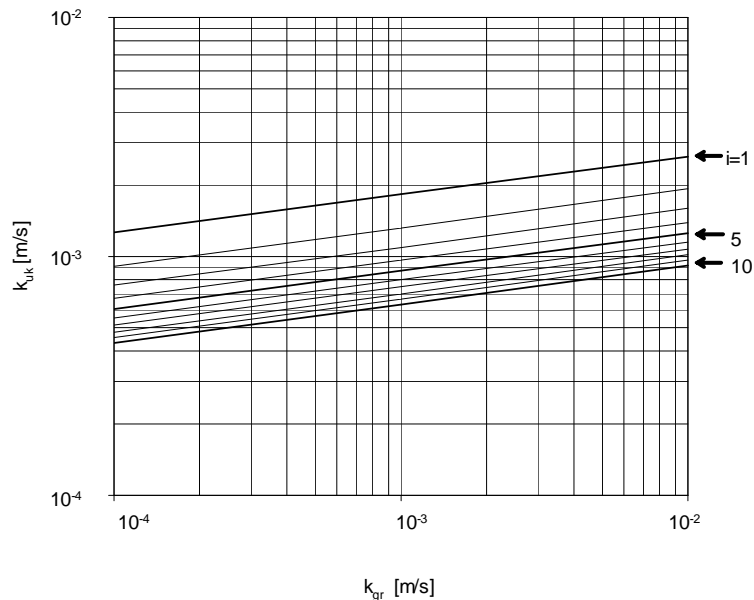
gdzie;

k_{geo} – początkowa wartość współczynnika filtracji geowłókniny [m/s],

k_{gr} – początkowa wartość współczynnika filtracji gruntu [m/s],

i – zewnętrzny gradient hydrauliczny [–].

Graficzną postać proponowanej zależności umożliwiającą określenie współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina przy współczynniku filtracji geowłókniny $k_{geo} = 5,5 \cdot 10^{-3}$ m/s przedstawiono na rysunku 4.



RYSUNEK 4. Nomogram do wyznaczania współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina przy współczynniku filtracji geowłókniny $k_{geo} = 5,5 \cdot 10^{-3}$ m/s
 FIGURE 4. The graph to defining of coefficient permeability soil-geotextile system for coefficient permeability of geotextile $k_{geo} = 5,5 \cdot 10^{-3}$ m/s

Wnioski

Przeprowadzone badania zmiany współczynnika filtracji w układzie grunt-geowłóknina wykazały, że:

1. W miarę upływu czasu przy różnych gradientach hydraulicznych maleje współczynnik filtracji zarówno układu grunt-geowłóknina, jak i samego gruntu.
2. Na zakończenie procesu filtracji współczynnik filtracji geowłókniny igłowanej K-500 uległ nieznacznemu zmniejszeniu.
3. W procesie filtracji nastąpiła ponad 6-krotna redukcja współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina oraz ponad 4-krotna w gruncie.
4. Zmiana współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina może być określona na podstawie proponowanej zależności: $k_{uk} = k_{geo} \cdot k_{gr}^{0,16} \cdot i^{-0,46}$. Dla badanej geowłókniny o początkowej przepuszczalności $k_{geo} = 5,5 \cdot 10^{-3}$ m/s zmianę współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina można odczytać z nomogramu (rys. 4).
5. Opracowana zależność (5) umożliwia określenie współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina z pominięciem pracochłonnych badań laboratoryjnych.

Literatura

- ASTM D 4491-92: Standard Test Method for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity.
- ASTM Designation: D 5101-90: Standard Test Method for Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio.
- CHRISTOPHER B.R., HOLTZ R.D. 1985: Geotextile engineering manual. Federal Highway Administration. D.C. DTF H 61-80-00094, Washington.
- COLLINS H.J., KARGE H. 1978: Prüfung von Dränfilterstoffen. *Wasser und Boden* 10.
- EN 12040pr. 1995: Determination of water permeability characteristics normal to the plane without load.
- GIROUD J.P. 1982: Filter Criteria for Geotextiles. II Inter. Conf. on Geotextiles., Las Vegas. Vol. 1: 103-108.
- KENNEY T.C., LAU D. 1985: Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal* 22, 2: 215-225.
- KOZŁOWSKI T. 2000: Zdolność przepływu wody w płaszczyźnie geosyntetycznych mat drenażowych. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 2: 94-96.
- KRZYWOSZ Z. 1995: Geotekstylnia w budowlach inżynierskich-zalecenia praktyczne. *Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu, Konferencje VIII*, 266: 275-283.
- LECHOWICZ Z., KRZYWOSZ Z., WOJTASIK D. 2003: Zmiana współczynnika filtracji w układzie grunt-geowłóknina. *Przegl. Nauk. Inż. i Kształt. Środ.* 2(27): 38-47.
- LEWANDOWSKI J.B., MŁYNAREK J. 1979: O badaniach syntetycznych włóknin filtracyjnych dla potrzeb budownictwa wodno-melioracyjnego. *Gospodarka Wodna* 3: 85-96.
- MAŚLANKA K. 1996: Ocena geowłóknin zastosowanych w drenażach rolniczych i umocnieniach kanałów melioracyjnych. *Zeszyty Naukowe AR w Krakowie, Rozprawy nr 210*.
- ROSEN W.I., MARKS D.B. 1975: Investigation of filtration characteristics of nonwoven fabric filters. *Transportation Research Record* 532: 87-93.

Summary

Change in permeability coefficient in medium sand-nonwoven geotextile K 500 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 nonwoven geotextile K-500 (Tab. 1) and medium sand (Tab. 2). In figures 2 and 3 the change in permeability coefficient in soil-geotextile system and soil under different hydraulic gradients are shown. The relationship for the evaluation of the change in coefficient in soil-geotextile system based on the initial values of the permeability coefficient of geotextile and soil as well as hydraulic gradient is proposed.

Authors' address:

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