

## **LABORATORYJNE BADANIA WODOPRZEPUSZCZALNOŚCI POPRZECZNEJ POD OBCIĄŻENIEM GEOWŁÓKNINY EKSPLOATOWANEJ NA SKŁADOWISKU ODPADÓW**

Sylwia Stępień, Piotr Osiński, Eugeniusz Koda  
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** Geowłókniny są materiałami szeroko stosowanym w systemach drenarskich takich obiektów, jak składowiska odpadów komunalnych. Ich główną funkcją jest ograniczenie efektu kolmatacji drenażu. Parametrem, którego wyznaczenie determinuje przydatność geowłókniny przy tego typu rozwiązaniach, jest wodoprzepuszczalność poprzeczna. W artykule zaprezentowana została metodyka i wyniki badań wodoprzepuszczalności poprzecznej geowłókniny eksploatowanej oraz czystej, poddanych obciążeniom normowym. Celem badań było określenie przepuszczalności na różnym etapie oraz w różnych warunkach obciążeniowych podczas eksploatacji materiału. Badania przeprowadzone zostały przy zastosowaniu obowiązujących norm. Uzyskane wyniki pozwoliły ocenić faktyczne zmiany wodoprzepuszczalności poprzecznej geowłókniny czystej i eksploatowanej pobranej ze składowiska odpadów Radiowo, w zależności od przyłożonego obciążenia, oraz zweryfikować efektywność zastosowanego materiału.

**Słowa kluczowe:** geowłóknina, obciążenie, kolmatacja, wodoprzepuszczalność

### **WSTĘP**

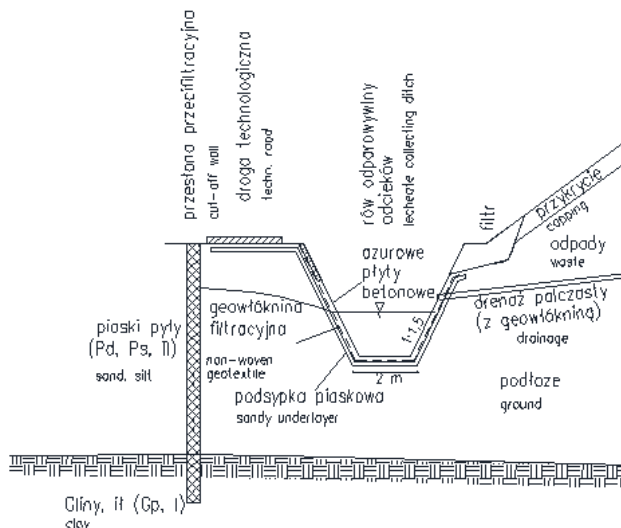
Jednym z głównych elementów bezpiecznej eksploatacji składowisk odpadów komunalnych jest poprawnie zaprojektowany system odprowadzania odcieków. W tym celu bardzo często zalecane jest zastosowanie materiałów geosyntetycznych poprawiających efektywność działania systemów drenarskich na tego typu obiektach [Fannin i in. 1998, Narejo 2005, Stępień i in. 2012]. Jednak podczas procesu selekcji odpowiedniej do wbudowania geowłókniny należy pamiętać, iż jednym z głównych problemów mogących wystąpić podczas eksploatacji jest efekt kolmatacji, którego wpływ (w różnych warunkach obciążenia) został przeanalizowany w niniejszym artykule.

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Eugeniusz Koda, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa,  
e-mail: eugeniusz\_koda@sggw.pl

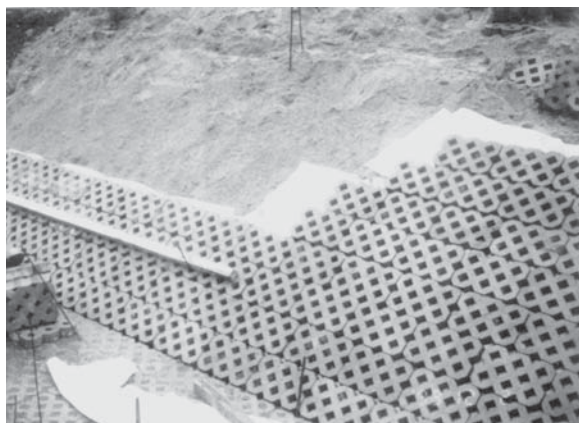
Materiał badawczy wykorzystany do analizy został pobrany z rowów drenażowo-retencyjnych obok składowiska odpadów Radiowo. Składowisko Radiowo zlokalizowane jest w północnozachodniej części Warszawy, w otulinie Kampinoskiego Parku Narodowego. Od wczesnych lat 60. do 1991 roku odpady komunalne składowane były w sposób niekontrolowany. Obecnie teren zajmowany przez odpady to około 15 ha, a bryła składowiska sięga wysokości 60 m. Od 1992 roku na składowisku deponowane są jedynie odpady balastowe pochodzące z kompostowni zlokalizowanej obok składowiska. Balast składa się głównie z odpadów plastikowych, tekstylnych, szklanych oraz gruzu budowlanego. Składowisko Radiowo do końca lat 90. nie było zaopatrzone w żaden system zabezpieczający środowisko gruntowo-wodne przed odciekami migrującymi ze składowiska. Dopiero na początku 2000 roku wprowadzone zostały zabiegi rekultywacyjne, na które składały się m.in.: instalacja przesłony przeciwfiltracyjnej, drenaż odcieków oraz odbierające odcieki rowy drenażowo-retencyjne zaprojektowane od strony zachodniej (rowy A i B) oraz od strony wschodniej (rowy C i D) [Koda 2011].

Badania przedstawione w artykule przeprowadzone zostały na geowłókninie polipropylenowej igłowanej o masie powierzchniowej  $500 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . Materiał pobrany został z rowów drenażowo-retencyjnych C i D, będących częścią systemu odwodnienia na składowisku Radiowo [Stępień i in. 2012]. Głównym zadaniem rowów, o szerokości dna 2 m i nachyleniu skarp 1 : 1,5 m, był odbiór odcieków ze składowiska oraz wód opadowych spływających ze skarp. Dodatkową funkcją była retencja nadmiaru wód odciekowych z okresów deszczowych. Skarpy rowów zostały wyłożone betonowymi płytami ażurowymi typu EKO, ułożonymi na badanej geowłókninie oraz podsypce piaskowej o miąższości 0,1 m. Konstrukcja rowów przedstawiona została na rysunkach 1 i 2. Geowłóknina wykorzystana do badań przepuszczalności pod obciążeniem pobrana została podczas prac związanych z projektem zamiennym ukształtowania bryły składowiska [Koda 2012].



Rys. 1. Schemat konstrukcji rowów drenażowo-retencyjnych na składowisku Radiowo wraz z dodatkowymi elementami zabezpieczeń środowiska

Fig. 1. Scheme of drainage ditches construction at Radiowo landfill site, including additional environment protecting elements



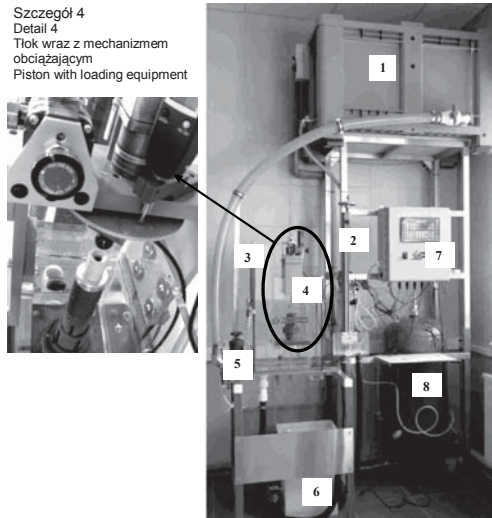
Rys. 2. Umocnienie skarp rowów C i D  
Fig. 2. Slope reinforcement of ditches C and D

## CEL I METODYKA BADAŃ

Celem badań było określenie wpływu zakolmatowania geowłókniny na jej przepuszczalność poprzeczną, w zależności od przyłożonego obciążenia. Badania zostały przeprowadzone w aparacie do wyznaczania wodoprzepuszczalności w kierunku prostopadłym do powierzchni materiału, na próbkach geowłókniny czystej i eksploatowanej pobranej z rowów retencyjnych C i D ze składowiska odpadów Radiowo. Doświadczenie zostało przeprowadzone w warunkach bez obciążenia, metodą stałej wysokości naporu hydraulicznego według normy PN-EN ISO 11058: 2010 oraz w warunkach pod obciążeniem według normy EN ISO 10776:2012 (Geotextiles and geotextile-related products – Determination of water permeability characteristics normal to the plane, under load). Pomiar wodoprzepuszczalności geowłókniny został przeprowadzony z wykorzystaniem aparatury będącej na wyposażeniu Centrum Wodnego SGGW (rys. 3).

Elementy stanowiska badawczego (rys. 3) obejmują: 1 – zbiornik z wodą zasilającą, odpowietrzoną, 2 – pokrętło do regulacji różnicy naporu hydraulicznego, 3 – obudowę przyrządu do pomiaru wodoprzepuszczalności, 4 – uchwyt do mocowania próbki, 5 – zawór dławiący wlot wody, 6 – pojemnik do zbierania wody, 7 – urządzenie rejestrujące, 8 – zbiornik do odpowietrzania wody.

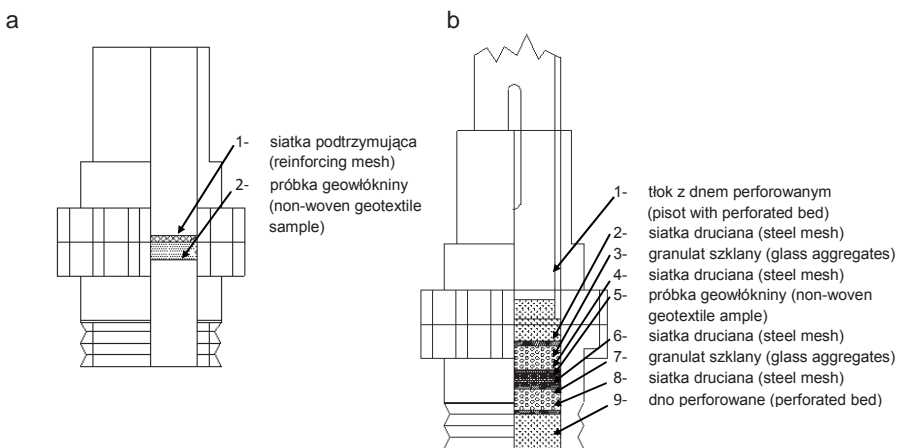
Badanie prędkości przepływu bez obciążenia polegało na pomiarze przepływu wody prostopadle do płaszczyzny próbki geowłókniny w określonym czasie oraz przy odpowiednio zadanym gradiencie hydraulicznym. Powyższe czynności zostały powtórzone dla pięciu wielkości naporu hydraulicznego, kolejno dla: 70, 56, 42, 28 i 14 mm [PN-EN ISO 11058:2010] dla 5 próbek materiału o powierzchni 0,001963 m<sup>2</sup> każda. Do badania wykorzystano pojedynczą warstwę geowłókniny czystej oraz eksploatowanej pobranej z rowów C i D. W cylindrze zastosowano siatkę podtrzymującą w celu uniknięcia odkształcenia materiału pod wpływem naporu wody przepływającej przez uchwyt zamontowany w urządzeniu do badania wodoprzepuszczalności (rys. 4). Rzeczywista objętość wody



Rys. 3. Widok stanowiska do wyznaczania charakterystyk wodoprzepuszczalności geowłókniny w kierunku prostopadłym do powierzchni wyrobu (opis elementów zawarty w tekście)

Fig. 3. Laboratory equipment for determination of geotextile water permeability characteristics in normal direction to the plane (for description of elements please refer to text)

została ustalona na podstawie średniej z trzech odczytów. Procedury badania prędkości przepływu dla próbek pod obciążeniem były zbliżone do omawianych powyżej. Różniły się jedynie wysokością naporu hydraulicznego zadanego dla próbek geowłókniny, który wynosił 50 mm. W cylindrze zastosowano warstwy szklanego granulatu i siatki podtrzymujące, aby uniknąć odkształcenia materiału oraz odwzorować warunki gruntowe (rys. 4). Na przygotowaną próbkę działał tłok pod odpowiednim obciążeniem, wynoszącym: 2, 20, 200 kPa.



Rys. 4 Cylinder z próbką do badań: a – bez obciążenia, b – pod obciążeniem

Fig. 4 Cylinder with tested sample: a – without load, b – under load

## WYNIKI BADAŃ

Po przeprowadzonych badaniach przepływu bez obciążenia dla każdej próbki i przy zadanych naporach hydraulicznych została obliczona prędkość przepływu wody z wykorzystaniem następujących wzorów empirycznych [PN-EN ISO 11058:2010]:

$$v_{20} = \frac{V \cdot R_t}{A \cdot t} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

gdzie:

$$R_t = \frac{\eta_T}{\eta_{20}} = \frac{1,762}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \text{ [-]} \quad (2)$$

$$\eta_T = \frac{1,78}{1 + 0,337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \text{ [mPa} \cdot \text{s]} \quad (3)$$

gdzie:

$V$  – zmierzona objętość wody [ $\text{m}^3$ ],

$R_t$  – współczynnik korekcyjny w odniesieniu do wody o temperaturze  $20^\circ\text{C}$  [-],

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

$A$  – czynna powierzchnia próbki [ $\text{m}^2$ ],

$t$  – czas zmierzony do momentu osiągnięcia objętości wody  $V$  [s],

$\eta_T$  – lepkość dynamiczna w temperaturze badania  $T^\circ\text{C}$  [mPa·s],

$\eta_{20}$  – lepkość dynamiczna w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  [mPa·s].

Norma EN ISO 10776:2012 zaleca, aby wskaźnik prędkości przepływu dla próbek badanych pod obciążeniem 2, 20 i 200 kPa został obliczony według wzoru:

$$v_{N50,\sigma} = \frac{V}{A \cdot t} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

Po opracowaniu wyników badań na podstawie otrzymanego równania krzywej obliczono wskaźnik prędkości przepływu ( $V_{H50}$ ) dla wysokości naporu hydraulicznego równego 50 mm. Dodatkowo został obliczony współczynnik wodoprzepuszczalności ( $k_n$ ) dla tej samej wysokości naporu hydraulicznego według wzoru:

$$k_n = \frac{V \cdot g}{A \cdot t \cdot \Delta h} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5)$$

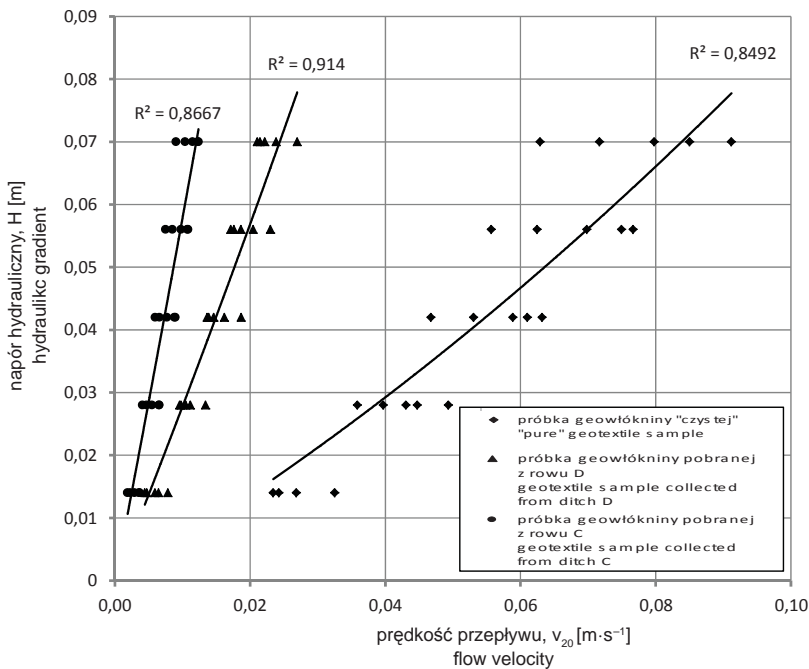
gdzie:

$g$  – grubość badanego materiału przy zadanim obciążeniu [m],

$\Delta h$  – różnica ciśnień nad i pod badaną próbką, wyrażona wysokością słupa wody [m].

Objętość wody pomierzona dla próbek geowłókniny czystej przy zadanych gradientach miała większe rozbieżności niż objętość wody dla próbek geowłókniny eksploatowanej.

Przy największym zadanym gradiencie hydraulicznym odnotowano znaczące różnice prędkości i objętości przepływu. Na podstawie analizy statystycznej i z wykorzystaniem programu Microsoft Excel na rysunku 5 w formie graficznej przedstawiono zależność prędkości przepływu wody od wysokości naporu hydraulicznego dla próbek geowłókniny czystej oraz dla próbek geowłókniny eksploatowanej, pobranych z rowów drenażowo-retencyjnych C i D. Przedstawione linie trendu oraz współczynniki korelacji liniowej  $R^2$  (rys. 5) wskazują na wysoką dodatnią korelację pomiędzy analizowanymi cechami oraz dobrą jakość przewidywania. Zmniejszenie przepuszczalności eksploatowanej geowłókniny może wynikać zarówno z kolmatacji mechanicznej, jak i biologicznej, obserwowanej w systemach drenażowych na terenie składowisk odpadów komunalnych [Brachman i in. 2000, Rowe i Yu 2010, Gardoni i in. 2010]. Zróznicowanie charakterystyk przepływu wody dla geowłókniny czystej wynika prawdopodobnie z niejednorodności strukturalnej tego produktu. Po opracowaniu wyników badań na podstawie otrzymanego równania charakterystyki przepływu obliczono wskaźnik prędkości ( $V_{H50}$ ) dla wysokości naporu hydraulicznego równego 50 mm (tab. 1).



Rys. 5. Charakterystyki prędkości przepływu wody dla badanych próbek geowłókniny  
Fig. 5. Flow velocity characteristics for tested non-woven geotextile samples

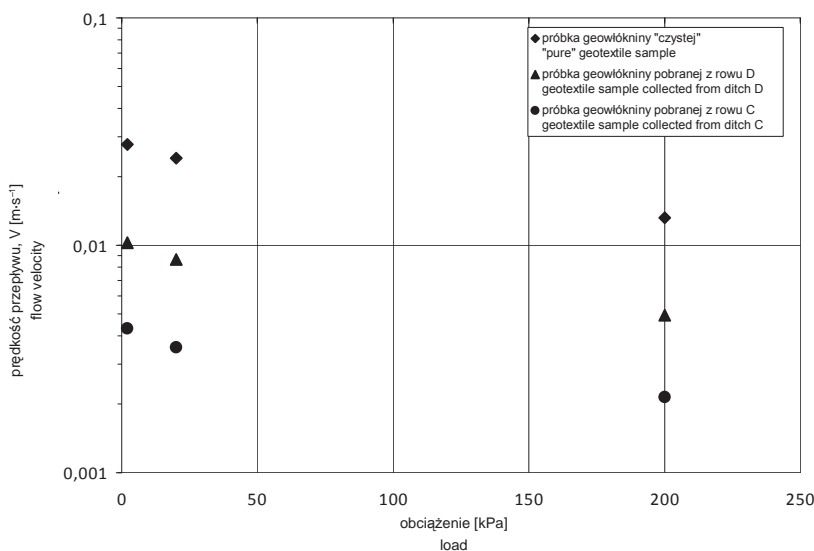
W tabeli 1 zestawiono również obliczone wielkości wskaźników prędkości dla próbek geowłóknin zbadanych pod obciążeniem, a na rysunku 6 przedstawiono graficznie zależność prędkości przepływu w skali logarytmicznej od zadanego obciążenia wynoszącego odpowiednio 2, 20 i 200 kPa.

Tabela 1. Wielkość wskaźników prędkości przepływu dla badanych próbek geowłókniny pod obciążeniem

Table 1. The values of flow velocity index for tested non-woven geotextile samples under load

Obciążenie [kPa] Load	Wskaźnik prędkości przepływu Flow velocity index $V_{H50}$ [m·s <sup>-1</sup> ]			Spadek wskaźnika prędkości przepływu Decrease of flow velocity index [%]		
	Geowłóknina Non-woven geotextile			Geowłóknina Non-woven geotextile		
	czysta pure	rów D ditch D	rów C ditch C	czysta pure	rów D ditch D	rów C ditch C
Bez obciążenia Without load	0,0636	0,0177	0,0087	100	72	86
2	0,0277	0,0102	0,0043	56	42	51
20	0,0242	0,0087	0,0036	62	51	59
200	0,0132	0,0049	0,0022	79	72	75

Wskaźnik prędkości przepływu wody przy gradiencie 50 mm dla próbek geowłókniny eksploatowanej pobranej z rowu C jest 7-krotnie mniejszy, natomiast dla próbek geowłókniny z rowu D jest tylko 3-krotnie mniejszy niż dla próbek geowłókniny czystej (rys. 6). Większe zakolmatowanie geowłókniny pobranej z rowu C wynikało z wyższych stężeń zawiesiny ogólnej zawartej w odciekach ze składowiska, spływających do tego rowu (4200 mg·dm<sup>-3</sup> w rowie C wobec 2380 mg·dm<sup>-3</sup> w rowie D) oraz innych wskaźników zanieczyszczenia badanych w ramach monitoringu składowiska Radiowo [Golimowski i Koda 2005].

Rys. 6. Zależność prędkości przepływu wody od obciążenia dla badanych próbek geowłókniny  
Fig. 6. Relationship of the flow velocity and load for tested non-woven geotextile samples

W tabeli 2 zostały przedstawione wielkości współczynnika wodoprzepuszczalności dla badanych materiałów. Procentowy spadek współczynnika wodoprzepuszczalności pod wpływem działającego obciążenia jest proporcjonalny do spadku wskaźnika prędkości przepływu. Zmniejszenie tego współczynnika o 80% w najbardziej niekorzystnym przypadku, czyli dla najbardziej zakolmatowanej geowłókniny pobranej z rowu C i pod największym obciążeniem, wynoszącym 200 kPa, nadal spełnia jedno z kryteriów (równanie 6), mówiące o tym, że przepuszczalność geowłókniny lub innego materiału geotekstylnego musi być 10-krotnie większa niż przepuszczalność gruntu przylegającego do geotekstyliów:

$$k_{\text{geowłókniny}} > 10k_{\text{gruntu}} \quad (6)$$

gdzie:  $k_{\text{geowłókniny}}$  – współczynnik wodoprzepuszczalności geowłókniny,  
 $k_{\text{gruntu}}$  – współczynnik przepuszczalności gruntu.

W warunkach podłoża składowiska Radiowo współczynnik przepuszczalności gruntu przylegającego do geowłókniny mieścił się w zakresie  $k_{\text{gruntu}} = 5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$ , a więc jest kilkanaście razy mniejszy niż przepuszczalność częściowo zakolmatowanej geowłókniny pod obciążeniem.

Tabela 2. Wielkość współczynników wodoprzepuszczalności poprzecznej dla badanych próbek geowłókniny pod obciążeniem

Table 2. The values of water permeability coefficient for tested non-woven geotextile samples under load

Obciążenie Load [kPa]	Współczynnik wodoprzepuszczalności poprzecznej Permeability coefficient of normal direction to the plane			Spadek współczynnika wodoprzepuszczalności poprzecznej Decrease of permeability coefficient normal direction to the plane		
	$k_s$ [m·s <sup>-1</sup> ]			[%]		
	Geowłóknina Non-woven geotextile			Geowłóknina Non-woven geotextile		
	czysta pure	rów D ditch D	rów C ditch C	czysta pure	rów D ditch D	rów C Ditch C
Bez obciążenia Without load	0,0079	0,0029	0,00133	100	64	83
2	0,0034	0,0019	0,00060	57	35	55
20	0,0030	0,0016	0,00050	62	44	62
200	0,0021	0,0008	0,00031	74	74	77

## PODSUMOWANIE

Odpowiedni dobór materiałów geosyntetycznych na warstwy filtracyjne ma podstawowe znaczenie dla zapewnienia efektywnej pracy i trwałości systemów drenażowych. Podstawowe znaczenie ma tu znajomość cech fizycznych i hydraulicznych oraz ich zmienności w czasie pracy. Istotna jest także świadomość zagrożeń wynikających ze



składu cieczy (odcieków) filtrującej przez materiał oraz sufozyjność chronionego gruntu. Badania wodoprzepuszczalności poprzecznej geowłókniny polipropylenowej przeprowadzono dla próbek czystych i próbek geowłókniny eksploatowanej pobranej ze skarp rowów drenażowo-retencyjnych na składowisku Radiowo. Duży wpływ na różny stopień kolmatacji badanej geowłókniny miały zróżnicowane wielkości zawiesiny ogólnej zawartej w odciekach przepływających przez ten materiał oraz praca materiału pod różnymi obciążeniami [Bergado i in. 2001, Hong i Wu 2011]. Przeprowadzone badania wykazały, że spadek współczynnika wodoprzepuszczalności geowłókniny po 12 latach eksploatacji wyniósł około 85%, jednakże nie ograniczyło to działania układu filtracyjnego, a współczynnik przepuszczalności geowłókniny (częściowo zakolmatowanej) zapewniał wystarczający dopływ odcieków do rowów drenażowo-retencyjnych.

Po przeprowadzonych badaniach według normy PN-EN ISO 11058:2011 i EN ISO 10776:2012 można zauważyć duże rozbieżności w metodyce badań oraz interpretacji wyników. Przy wyznaczaniu wskaźnika prędkości przepływu pod obciążeniem według wzoru (4) nie jest brana pod uwagę temperatura wody, która wpływa na lepkość tej cieczy. Ponadto nowa norma do wyznaczania wodoprzepuszczalności materiałów geotekstylnych nie jest precyzyjna, tak więc jej interpretacja także nie jest jednoznaczna. Dodatkową obserwacją jest przewidywany efekt znacznego spadku wodoprzepuszczalności geowłókniny pod zadaniem obciążeniem, co w przypadku systemów drenarskich na składowiskach odpadów ma niewątpliwie istotne znaczenie [Hufenus i Schrade 2006, Bhandari i Han 2010]. Powodem tego jest fakt, iż systemy te, wyposażone w warstwy ochronne wykonane z geofiltrów, są narażone na przyjmowanie znacznych obciążeń od warstw składowanych odpadów.

## PIŚMIENNICTWO

- Bergado D.T., Youwai S., Hai C.N., Voottipruex P., 2001. Interaction of non-woven needle-punched geotextiles under axisymmetric loading conditions. *Geotextiles and Geomembranes* 19, 299–328.
- Bhandari A., Han J., 2010. Investigation of geotextile-soil interaction under a cyclic vertical load using the discrete element method. *Geotextiles and Geomembranes*. 28 (1), 33–43.
- Brachman R.W.I., Rowe R.K., Moore I.D., 2000. Drainage pipes for landfill leachate collection systems. 6th Environmental Engineering Specialty Conference of the CSCE & 2nd Spring Conference of the Geoenvironmental Division of the Canadian Geotechnical Society, London – Ontario.
- EN ISO 10776:2012 Geotextiles and geotextile-related products. Determination of water permeability characteristics normal to the plane, under load.
- Fannin R.J., Shi Y.C., Vaid Y.P., 1998. Permeability requirements for geotextile filter design. 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, 1009–1012.
- Gardoni M.G.A., Senra Prado T., Cyrino Neto D., 2010. Evaluation of the Biological Clogging on the Geotextile Drainage Systems of Landfills. Proc. of the 6th International Congress on Environmental Geotechnics., New Delhi, 2, 919–922.
- Golimowski J., Koda E., 2005. Monitoring wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie składowiska i kompostowni Radiowo. Raport roczny 2004. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- Hong Y.S., Wu C.S., 2011. Filtration behaviour of soil-nonwoven geotextile combinations subjected to various loads. *Geotextiles and Geomembranes* 29, 102–115.

- Hufenus R., Schrade U., 2006. An optimized method to measure the hydraulic conductivity of geosynthetics under load. *Geotextiles and Geomembranes* 24 (4), 243–253.
- Koda E., 2011. Stateczność i migracja zanieczyszczeń z rekultywowanych składowisk odpadów przy wykorzystaniu metody obserwacyjnej. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Koda E., 2012. Projekt zagospodarowania rekultywowanego składowiska odpadów Radiowo jako stoku narciarskiego, z wykorzystaniem odpadów. X Konferencja „Dla miasta i środowiska. Problemy unieszkodliwiania odpadów”. Politechnika Warszawska, Warszawa, 110–117.
- Narejo D.B., 2005. Determination of transmissivity of synthetic drainage materials at low gradient. *Geotextiles and Geomembranes* 23 (6), 534–539.
- PN-EN ISO 11058:2010 Geotekstylnia i wyroby pokrewne. Wyznaczanie wodoprzepuszczalności w kierunku prostopadłym do powierzchni wyrobu, bez obciążenia.
- Rowe R.K., Yu Y., 2010. Factors Affecting the Clogging of Leachate Collection Systems in MSW Landfills. Proc. of the 6th International Congress on Environmental Geotechnics, New Delhi, 1, 3–23.
- Stępień S., Jędryszek M., Koda E., 2012. Ocena zmian przepuszczalności geowłókny zastosowanej jako filtr w systemie ujęcia odcieków ze składowiska odpadów komunalnych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 21 (3), 57, 159–170.

## LABORATORY TESTS OF WATER PERMEABILITY UNDER LOAD OF NON-WOVEN GEOTEXTILE EXPLOITED AT LANDFILL SITE

**Abstract.** The non-woven geotextile is a commonly used material as a component fulfilling drainage systems especially on sites such as municipal waste landfills. The main advantage of geofilters is they help minimizing a clogging effect of drainage. The parameter that determinates the application usability of this product is water permeability. The paper present the research methodology and results analyses obtained from laboratory measurements for pure and exploited non-woven geotextiles under loads. The aim of the research was to determinate water permeability under differ exploitation and loading conditions. The measurements were conducted according to national standards. The results obtained allowed assessment of water permeability changes of tested material in time and under loads, and also allowed verification of the effectiveness of applied geofilters which were collected from the old municipal solid waste landfill.

**Key words:** non-woven geotextile, load, clogging, water permeability

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 7.01.2013