

Michał Gwoździwicz\*, Mirosława Bukowska\*

## ZMIANY WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI RÓŻNOWIEKOWYCH ODPADÓW WYDOBYWCZYCH W BRYLE SKŁADOWISKA „BOGDANKA” W ŚWIETLE BADAŃ MODELOWYCH ORAZ *IN SITU*

### Streszczenie

Składowanie odpadów wydobywczych z górnictwa węgla kamiennego powoduje duże zmiany struktury skał, szczególnie składu ziarnowego i wartości ich parametrów filtracyjnych. Wietrzenie odpadów zwiększa kompakcję zwałowanych skał, zwłaszcza przy dużych wysokościach (miąższości) składowiska odpadów wydobywczych. Taka sytuacja ma miejsce na składowisku „Bogdanka” w Lubelskim Zagłębiu Węglowym. W artykule przedstawiono wyniki badań współczynnika filtracji różnowiekowych odpadów wydobywczych *in situ* na składowisku. Zaprezentowano także wyniki badań laboratoryjnych, z uwzględnieniem modelu pionowego zagęszczenia odpadów na skutek wietrzenia fizycznego i nacisku pionowego nadkładu. Przeprowadzone badania miały na celu ustalenie rzeczywistych zmian współczynnika filtracji w bryle składowiska nadpoziomowego wraz z wiekiem jego składowania na powierzchni oraz sukcesywnego podnoszenia wysokości składowiska do około 60 m. Ocena wybranych parametrów fizykomechanicznych i filtracyjnych oraz ich zmian dostarcza danych, które mogą być wykorzystane w praktyce, np. przy projektowaniu obiektów inżynierskich i hydrotechnicznych.

### Changes of the filtration coefficient of mining exploitation wastes of different ages in the solid of the “Bogdanka” dump in the light of model and *in situ* investigations

### Abstract

The storage of exploitation wastes from hard coal mining causes great changes of the rock structure, particularly of the size analysis and values of rock filtration parameters. The weathering of wastes increases the compaction of dumped rocks, especially in the case of great height of the exploitation wastes dump. Such a situation takes place at the “Bogdanka” dump in the Lublin Coal Basin. The article presents the results of investigations of the filtration coefficient of mining exploitation wastes of different ages *in situ* at the dump. Moreover, the results of laboratory tests have been presented taking into account the model of vertical waste compaction as a result of physical weathering and vertical pressure of the overburden. The performed investigations aimed at the determination of real changes of the filtration coefficient in the solid of the dump along with the age of its storage on the surface and successive increase of the height of the dump up to about 60 m. The assessment of selected physico-mechanical and filtration parameters and their changes provides data, which can be used in practice, for example when designing engineering and hydrotechnical objects.

## 1. WPROWADZENIE

Kopalnia Lubelski Węgiel „Bogdanka” SA jest jednym z największych wytwórców odpadów wydobywczych wschodniej Polski. Obecnie ilość wytwarzanych tam odpadów sięga prawie 2 mln ton rocznie. Ze względu na rozbudowę kopalni zaplano-

---

\* Główny Instytut Górnictwa

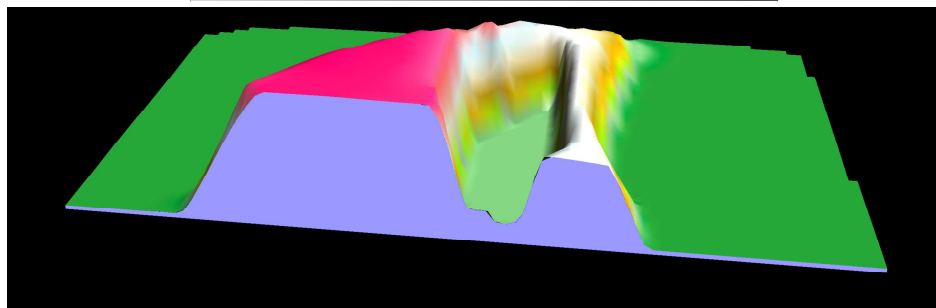
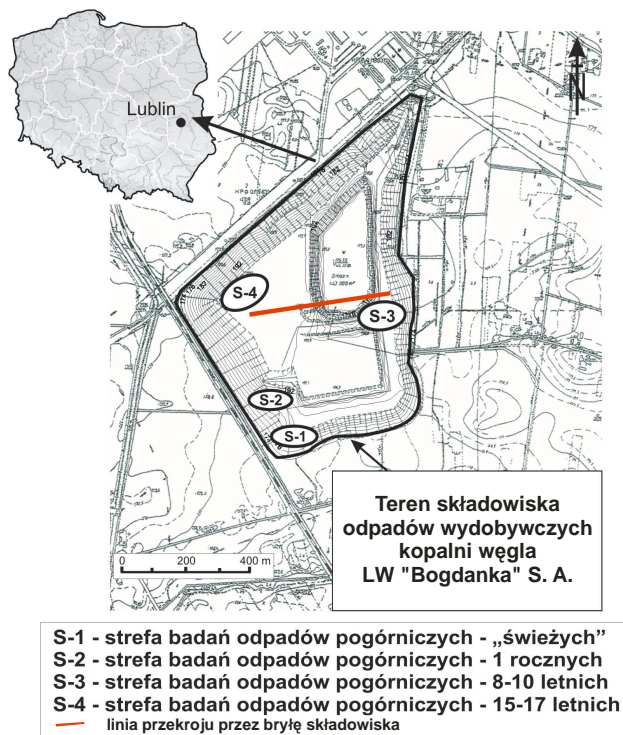
wano powiększenie obszaru składowiska, a także wzrost rocznego składowania odpadów do około 6 mln ton. W związku z planowanym rozwojem, składowisko odpadów w kolejnych latach zostanie rozbudowane z obecnych 60 do 144 ha, docelowo zaś do 230 ha. Pozwoli to na zwiększenie ilości zwałowanych odpadów do około 120 mln ton. Obecna wysokość składowiska wynosi około 30 m, a w przyszłości rozważa się możliwość jego podniesienia do wysokości 60 m n.p.t. Określenie wartości współczynnika filtracji zwałowanych odpadów wydobywczych w Lubelskim Zagłębiu Węglowym i określenie zmian zachodzących w czasie zwałowania odpadów oraz zwiększanie wysokości składowiska są istotnymi czynnikami, które warunkują ilość i szybkość uwalnianych odcieków z bryły składowiska. Szybki rozpad ziarnowy w wyniku wietrzenia fizycznego odpadów wydobywczych oraz bardzo mała i mała wytrzymałość na ściskanie zwałowanych skał (Bukowska 2012) to ważne czynniki zmieniające wartości współczynnika filtracji w obrębie bryły składowiska na przestrzeni lat. Zmiany te intensyfikują się zwłaszcza w wyniku wzrostu ciśnienia pionowego, wynikającego z wysokości składowiska.

Proces zmian fizykomechanicznych skał jest interesujący ze względu na szybkie zniszczenie naturalnej struktury wydobytych skał karbońskich na skutek ich fizycznego wietrzenia i wzajemnego przypadkowego pokruszenia, rozdrobnienia, wymieszania i nawodnienia. W rezultacie nakładania się tych procesów powstaje nowy rodzaj gruntu o właściwościach odmiennych od pierwotnego. Ocena zmian parametrów filtracyjnych zdeponowanych skał oraz ich stopniowego przekształcenia dostarcza informacji, które mogą być wykorzystane przy zagospodarowaniu odpadów wydobywczych do celów budowlanych lub środowiskowych. Należy pamiętać, że istotnym kryterium przy wykorzystywaniu odpadów dla potrzeb inżynierskich jest wartość współczynnika filtracji.

## **2. KRYTERIA WYBORU OBIEKTU BADAŃ I SPOSOBU ICH PROWADZENIA**

W związku z małą zmiennością litologiczną zdeponowanych karbońskich odpadów wydobywczych gromadzonych na składowisku przez wiele lat (badania prowadzone w latach 1995–2011) oraz niezmiennymi od wielu lat warunkami technicznymi składowania stwierdzono, że składowisko „Bogdanka” jest dobrym obiektem do badania i modelowania zmian wybranych parametrów odpadów. Dodatkowym kryterium wyboru było występowanie na wierzchołkach składowiska obszarów, na których, od kilkunastu lat po zakończeniu składowania odpadów, nie były prowadzone prace. Wytypowano zatem cztery różnowiekowe obszary badawcze na wierzchołkach składowiska. W ich obrębie, w latach 2007–2011 przeprowadzano szereg badań i pomiarów polowych oraz pobierano próbki do badań laboratoryjnych. Na rysunku 1 przedstawiono lokalizację obszarów badań oraz linię przekroju, którą wytypowano do wykonania modelu obliczeniowego. Dodatkowo, na świeżych odpadach pobranych po zwałowaniu na składowisko oraz z taśmociągu transportującego odpady z zakładu przerobczego, wykonano badania laboratoryjne dla modelu zmian współczynnika filtracji. Badania te prowadzono w warunkach symulujących rozpad ziarnowy skał na skutek wietrzenia i zmiany ciśnienia nakładu na różnych głębokościach zalegania

w bryle składowiska. Wyniki badań laboratoryjnych i *in situ* współczynnika filtracji na składowisku wykorzystano do opracowania modelu zmienności współczynnika filtracji w obrębie składowiska o projektowanej wysokości 60 m, wzdłuż linii przekroju (rys. 1).



**Rys. 1.** Lokalizacja składowiska odpadów wydobywczych kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka” SA z zaznaczonymi obszarami badań różnowiekowych odpadów wydobywczych *in situ*, linią przekroju oraz przekrojem przez model powierzchni składowiska

**Fig. 1.** Location of the dump of mining exploitation wastes of the Lublin Coal “Bogdanka” mine with marked areas of investigations of exploitation wastes of different ages *in situ*, cross-section line and cross-section through the dump surface model

### 3. CHARAKTERYSTYKA SKŁADOWANYCH ODPADÓW KOPALNI LUBELSKI WĘGIEL „BOGDANKA” SA

Odpady wydobywcze z Lubelskiego Zagłębia Węglowego od 1982 r. są składowane na składowisku kopalni w Bogdancie k. Łęcznej. Miejsce to zlokalizowane jest kilkaset metrów na południe od głównych szybów kopalni „Bogdanka”. Materiałem budującym składowisko są skały płonne, pochodzące z zakładu wzbogacania węgla tejże kopalni oraz z robót górniczych i udostępniających dwa pokłady (382 i 385/2) z obrębu warstw lubelskich (westfal B) (tab. 1).

**Tabela 1.** Stratygrafia karbonu górnego wraz ze stosowanymi podziałami i ogniwami stratygraficznymi Górnośląskiego i Lubelskiego Zagłębia Węglowego oraz z położeniem pokładów 382 i 385/2 (Raport... 2009)

Podział karbonu rekomendowany przez ICS (2008)		Podział stosowany w opracowaniach naukowych				Podział stosowany w górnictwie		Wiek (mln lat)	Podział karbonu LZW	
Epoka	Wiek	Ogniwa litostratygraficzne GZW							litostratygrafia	
PENNSYLVAN	środkowy	moskow	WESTFAL	D	warstwy lbiańskie	p. 110	warstwy lbiańskie	p. 110	307,2±1,0	formacja magnuszewska
				C	warstwy łaziskie	p. 119	warstwy łaziskie	p. 119		
				B	warstwy orzeskie s.s.	p. 301	warstwy orzeskie	p. 301		
				A	warstwy załęskie	p. 364	warstwy rudzkie	p. 401		
				W	warstwy rudzkie s.s.	p. 419	warstwy rudzkie	p. 401		
	dolny	baszkir	WESTFAL	D	warstwy siódłowe	p. 501	warstwy siódłowe	p. 501	311,7±1,1	w-wy lubelskie płk. 382 płk. 385/2
				C	warstwy jejkowickie	p. 510	warstwy jejkowickie	p. 510		
				B	warstwy porębskie	p. 601	warstwy porębskie	p. 601		
				A	warstwy grodzieckie	p. 701	warstwy jakłowieckie	p. 701		
				W	warstwy jakłowieckie	p. 723	warstwy jakłowieckie	p. 701		
MISSISSIP	górnym	serpuchow	NAMUR	D	warstwy gruszowskie*	p. 801	warstwy gruszowskie	p. 801	318,1±1,3	formacja dęblińska
				C	warstwy gruszowskie	p. 848	warstwy gruszowskie	p. 801		
				B	warstwy pietrzkowickie	p. 901	warstwy pietrzkowickie	p. 901		
				A	warstwy pietrzkowickie	p. 915	warstwy pietrzkowickie	p. 901		
				W	warstwy pietrzkowickie	p. 915	warstwy pietrzkowickie	p. 901		
MISSISSIP	górnym	serpuchow	NAMUR	D	warstwy sarnowskie*	p. 915	warstwy sarnowskie*	p. 915	328,3±1,6	formacja terebina
				C	warstwy sarnowskie*	p. 915	warstwy sarnowskie*	p. 915		
				B	warstwy sarnowskie*	p. 915	warstwy sarnowskie*	p. 915		
				A	warstwy sarnowskie*	p. 915	warstwy sarnowskie*	p. 915		
				W	warstwy sarnowskie*	p. 915	warstwy sarnowskie*	p. 915		

Co najmniej od 20 lat na składowisku gromadzone były skały płonne o bardzo podobnym składzie petrograficznym, mineralnym i fizykochemicznym, a także o podobnym uziarnieniu. Stanowią one mieszaninę przystropowych i przyspągowych skał pokładów 382 i 385/2, takich jak:

- łupki ilaste laminowane węglem kamiennym,
- łupki ilaste,
- ilowce, w tym charakterystyczne dla Lubelskiego Zagłębia Węglowego tzw. gleby stigmariowe (Cichoń 1977),
- mułowce i mułowce syderytowe,

- piaskowce średnioziarniste i drobnoziarniste,
- syderyty ilaste,
- sferosyderyty.

#### 4. METODYKA BADAŃ WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI

Istotną właściwością ośrodka porowatego, którą wykorzystuje się do określenia prędkości migracji zanieczyszczeń i w geotechnice, zwłaszcza przy budowie obwałowań osadników, cieków, wałów przeciwpowodziowych jest jego przepuszczalność. Jest ona najczęściej wyrażona za pomocą współczynnika filtracji. Spośród wielu metod określania wartości tego parametru (Pazdro 1977; Myślińska 1998) w artykule omówiono jedynie te, które zostały wykorzystane przez autorów niniejszego artykułu.

##### 4.1. Badania terenowe metodą infiltrometru Guelph

Badania terenowe współczynnika filtracji w różnowiekowych obszarach składowiska wykonano przy zastosowaniu aparatu Guelph Pressure Infiltrometr 2805 (Guelph... 2005) na głębokościach od 0,1 do 1,0 m pod powierzchnią składowiska. Metoda pomiarowa polega na wykonaniu otworu w gruncie specjalnym świdrem o średnicy 50,8 mm. Do tak przygotowanego otworu wprowadza się następnie końcówkę infiltrometru zaopatrzoną w kulkowo-ciśnieniowy zawór, który utrzymuje stały poziom wprowadzonej tam wody. Badanie za pomocą infiltrometru Guelph opiera się na zasadzie działania tuby Mariotte'a i prawie Boyle'a-Mariotte'a. Pomiar i obsługa urządzenia w terenie umożliwiają wykonanie pomiarów dla gruntów spoistych, które trwają od kilkunastu do kilkudziesięciu minut. W trakcie przebiegu eksperymentu mierzy się różnice naporu hydraulicznego  $\Delta H$  do chwili osiągnięcia ustalonego przepływu (rys. 2). Stanowi to podstawę obliczeń współczynnika filtracji za pomocą wzoru [patrz wzór (1)], który został podany przez Moriana i Olsena w 1987 r. (Elrick i in. 1990; Elrick, Reynolds 1992; Esaki i in. 1996).

Współczynnik filtracji z użyciem infiltrometru Guelph  $k_{fs}$  [LT-1] oblicza się według wzoru

$$k_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (1)$$

gdzie:

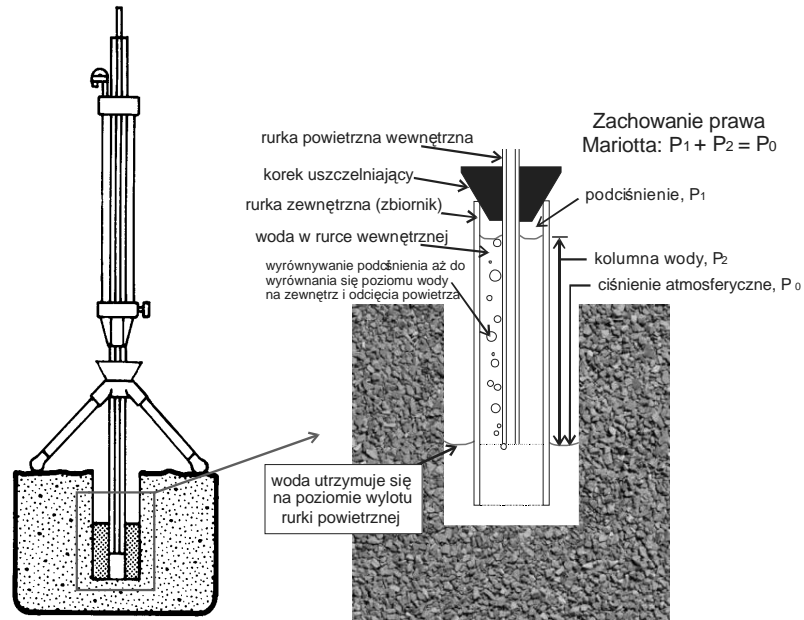
$$G_1 = G_2 \frac{[H_2 C_1]}{[H_1 C_2]},$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi [2 H_1 H_2 (H_2 - H_1) + \alpha^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]},$$

$Q_1 = (X) \overline{R}_1$  – funkcja spadku objętości słupa wody (prędkości spadku poziomu wody) w tubie infiltrometru przy  $H_1$ ,

$Q_2 = (X) \overline{R}_2$  – funkcja spadku objętości słupa wody (prędkości spadku poziomu wody) w tubie infiltrometru przy  $H_2$ , przy czym:

$H_1$  i  $H_2$  – wysokości słupa wody w tubie Mariotte'a, gdzie  $H_1$  – wysokość początku pomiaru,  $H_2$  – wysokość na końcu pomiaru,  $C_1$  i  $C_2$  – współczynniki ciśnienia przepływu wody odpowiadające wysokościami słupa wody  $H_1$  i  $H_2$ ,  $\alpha$  – log dziesiętny z funkcji przewodności hydraulicznej do ciśnienia ssącego gruntu (standardowo w literaturze stosuje się wartość 0,5 – bezwymiarowy (Guelph... 2005).

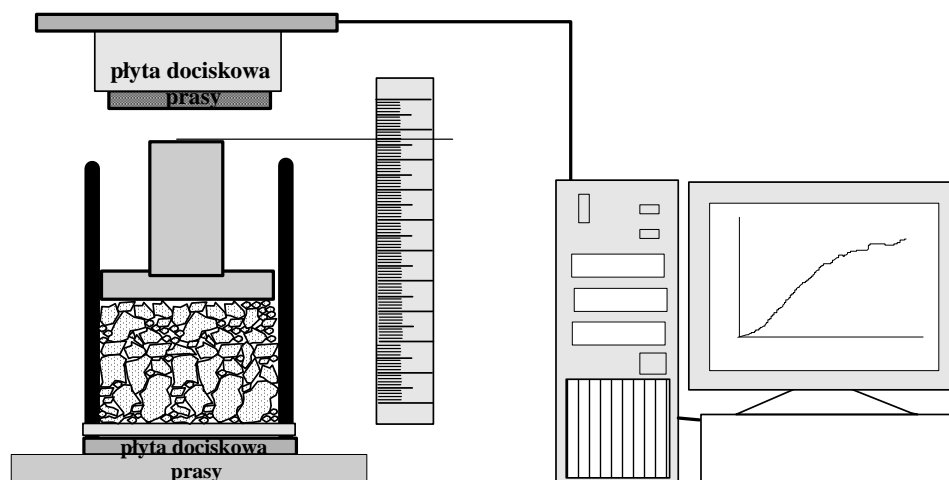


Rys. 2. Ogólny widok infiltrometru oraz schematycznie przedstawiona zasada działania i zastosowanie infiltrometru Guelph

Fig. 2. General view of an infiltrometer and schematically presented principle of operation and application of the Guelph infiltrometer

#### 4.2. Badania laboratoryjne z zastosowaniem aparatu typu edometr (Bromek, Bukowski 2002)

Zastosowany w badaniach aparat typu edometr to modyfikacja metody rurki Kamińskiego, opracowana w Głównym Instytucie Górnictwa, w celu określania współczynnika filtracji zasypów likwidowanych szybów kopalnianych (Bromek, Bukowski 2002). Autorzy pracy w prowadzonych badaniach zastosowali zmiennie-gradientowy sposób pomiaru. Oznacza to, że gradient hydrauliczny zmniejsza się wraz z upływem czasu, zbliżając się asymptotycznie do określonego poziomu. Ze względu na niewielkie różnice w poziomach wody przed i po zakończeniu badania, twórcy tej metody przyjęli wartość spadku hydraulicznego równą jeden. Na próbce uprzednio nawodnionej i odsączonej grawitacyjnie naprzemiennie prowadzi się badania współczynnika filtracji i ściśliwości materiału skalnego. Próbkę umieszcza się w naczyniu między płytami maszyny wytrzymałościowej (rys. 3).

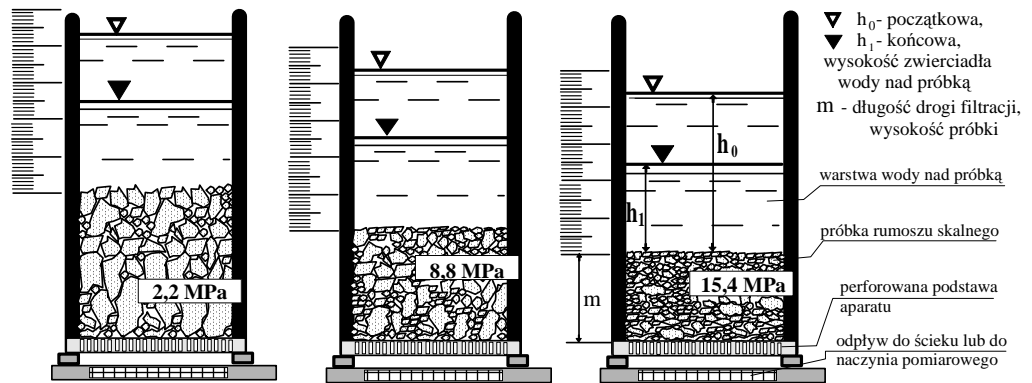


**Rys. 3.** Schemat urządzenia do pomiarów ściśliwości materiału skalnego oraz badania współczynnika filtracji po kolejnych etapach ściskania próbki (Bromek, Bukowski 2002)

**Fig. 3.** Scheme of device for measurements of rock material compressibility and investigations of the filtration coefficient after successive stages of sample compression (Bromek, Bukowski 2002)

Przebieg oznaczenia współczynnika filtracji skał pobranych ze składowiska „Bogdanka”, wykonany w omawianym aparacie pomiarowym, miał następujący przebieg:

- ściskanie wilgotnych odpadów wydobywczych w maszynie wytrzymałościowej, pomiar obciążenia i odkształcenia próbki,
- zalanie próbki wodą w sposób pozwalający na przepuszczenie przez nią wody, od momentu zaobserwowania wypływu z dolnej części aparatu, aż do ustalenia się wartości przepływu wody przez próbkę (rys. 4),
- pomiar czasu obniżania się poziomu wody nad próbką umieszczoną w aparacie od wartości  $h_0$  do  $h_1$  (S),
- obliczenie współczynnika filtracji zgodnie ze wzorem na obliczanie wodoprzepuszczalności metodą rurki Kamieńskiego według metodyki przedstawionej w pracy Myślińskiej (1998),
- odsączenie wody z próbki, a następnie ponowne jej ściskanie w prasie z rejestracją obciążenia i odkształcenia; następnie powtórzenie cyklu badania współczynnika filtracji dla kolejnych wyższych wartości ciśnienia pionowego,
- powtórzenie cyklu badawczego z krotnością zależną od potrzeb – w przypadku odpadów wydobywczych z Lubelskiego Zagłębia Węglowego do momentu uzyskiwania zakładanego ciśnienia pionowego lub wyników współczynnika filtracji poniżej  $1,0 \cdot 10^{-7}$  m/s (wartości na poziomie  $1,0 \cdot 10^{-8}$  m/s i mniejsze wymagają bardzo długiego czasu pomiarów).



Rys. 4. Schemat przeprowadzenia badania współczynnika filtracji odpadów wydobywczych (Bromek, Bukowski 2002)

Fig. 4. Scheme of investigation conducting of the filtration coefficient of mining exploitation wastes (Bromek, Bukowski 2002)

Współczynnik filtracji  $k$  dla tej metody można obliczyć według wzoru

$$k = \frac{m}{T} f\left(\frac{S}{h_0}\right) \quad (2)$$

gdzie:

- $m$  – wysokość badanej próbki w przyrządzie, cm;
- $T$  – czas obniżania się słupa wody na wysokości  $S$  od początku pomiaru, s;
- $S$  – wielkość obniżenia się słupa wody ( $h_0 - h_1$ ), cm; przy czym:  $h_0$  – początkowa wysokość wody, cm;  $h_1$  – końcowa wysokość wody, cm;
- $f(S/h_0)$  – współczynnik zależny od wartości funkcji różnicy  $S$  do  $h_0$  (Myślińska 1998).

## 5. ZMIANY UZIARNIENIA RÓŻNOWIEKOWYCH ODPADÓW

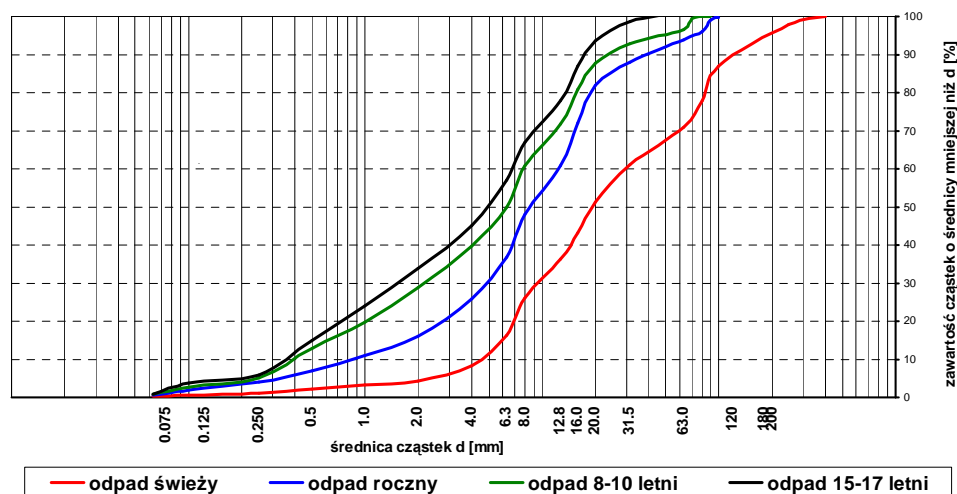
### 5.1. Zmiany uziarnienia w warunkach składowania odpadów

Zmniejszanie się średnicy ziaren oraz rozpad okruchów skał karbońskich zdeponowanych na składowisku „Bogdanka”, powodują obniżanie współczynnika filtracji całego składowiska. Dla zobrazowania rozpadu fizycznego skał zwałowanych przedstawiono krzywe granulometryczne różnowiekowych odpadów pogórnich oraz tzw. odpadów świeżych ze zwałowiska „Bogdanka” (rys. 5).

Z porównania składu granulometrycznego świeżych odpadów pogórnich (patrz rys. 1 – strefa S-1 na składowisku) z uziarnieniem odpadów zalegających na składowisku od kilku do kilkunastu lat wynika, że odpady te wraz z czasem ich zalegania zawierają zdecydowanie mniej ziaren należących do frakcji kamienistej (wietrzenie fizyczne). Zwiększa się natomiast zawartość ziaren drobniejszych, szczególnie frakcji piaskowej i pyłowej. W miarę upływu czasu składowania odpadów ich uziarnienie zmienia się najszybciej w warstwie przypowierzchniowej, która odpowiada w przybliżeniu strefie



przemarzania (do 1,0 m). Proces ten zauważono, obserwując zmiany uziarnienia odpadów pobranych z warstwy o grubości do 1 m w różnowiekowych strefach zwałowiska – po okresie około jednego roku, 8–10 latach i 15–17 latach ich składowania (rys. 1). Zmiany uziarnienia w wyniku wietrzenia fizycznego na składowisku „Bogdanka”, po różnym okresie składowania przedstawiono na fotografiach 1–4.



**Rys. 5.** Przykładowe krzywe uziarnienia różnowiekowych odpadów składowiska „Bogdanka”

**Fig. 5.** Examples of grain size curves of fresh wastes of different ages of the “Bogdanka” dump



**Fot. 1.** Odpady bezpośrednio po ich zeskładowaniu

**Photo 1.** Wastes directly after their storage



**Fot. 2.** Odpady po okresie około roku składowania

**Photo 2.** Wastes after the period of about one year of storage



**Fot. 3.** Odpady po około 8–10 latach składowania  
**Photo 3.** Wastes after about 8–10 years of storage



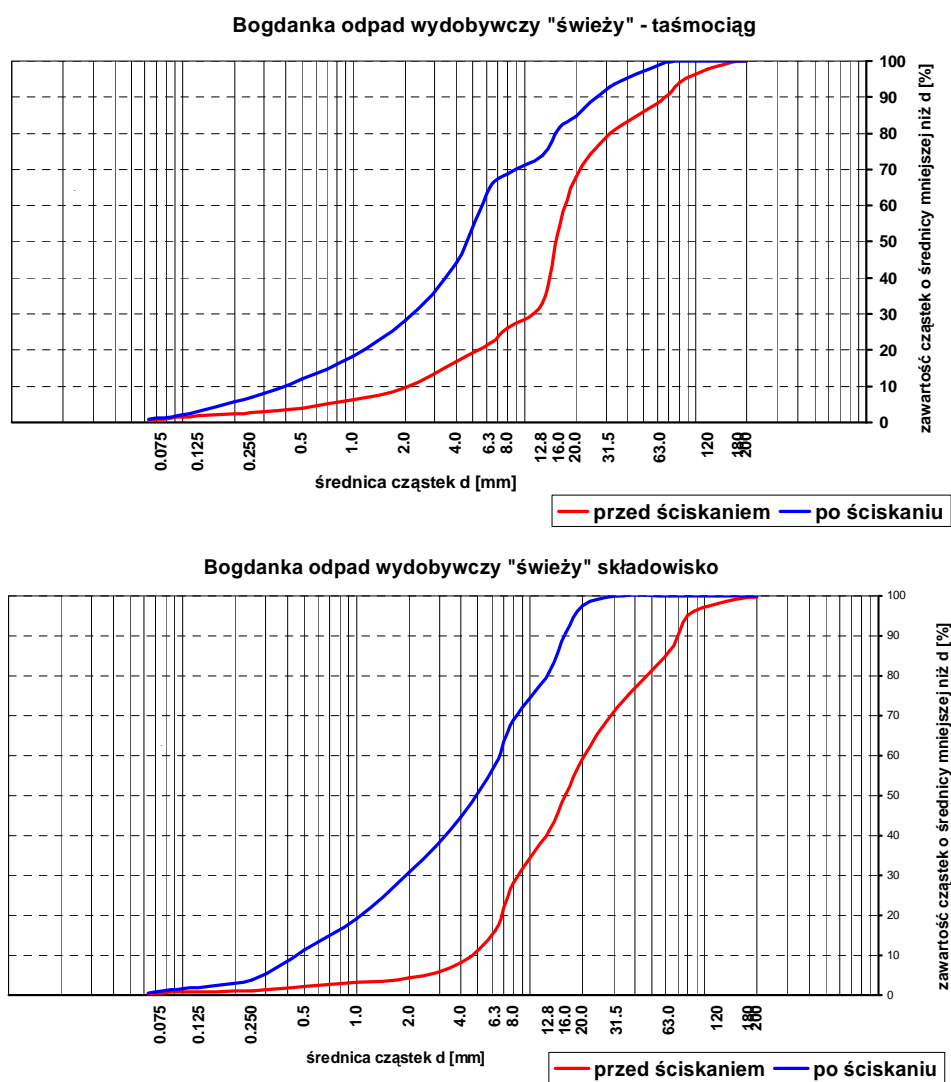
**Fot. 4.** Odpady po około 15–17 latach składowania  
**Photo 4.** Wastes after about 15–17 years of storage

## 5.2. Zmiany uziarnienia w modelowych badaniach laboratoryjnych

Zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumentacji projektu badawczego nr 4670/B/T02/2009/36 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Bukowska i in. 2011), porównano uziarnienie świeżych odpadów wydobywczych przed i po wykonanym ścisaniu w maszynie wytrzymałościowej<sup>1</sup>. Zestawienia tego dokonano w celu nawiązania do zmian uziarnienia zachodzących na skutek wietrzenia fizycznego na składowisku i w warunkach narastania ciśnienia pionowego wywołanego ciężarem odpadów nadległych. Przykładowe zmiany uziarnienia przed i po wykonanych modelowych badaniach laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 6.

Porównanie uzyskanych krzywych uziarnienia pozwala na stwierdzenie, że świeże odpady po wykonanym badaniu odpowiadają w przybliżeniu uziarnieniem odpadom 8–10-letnim zdeponowanym na składowisku. Potwierdzają to również wyniki współczynnika filtracji przedstawione w tabeli 2, które dla symulacji wysokości nadkładu na poziomie 30–40 m osiągają wartości  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  m/s. Dane przedstawione w tabeli 2 oraz wykresy uziarnienia (rys. 6) sugerują, że ciśnienie pionowe na poziomie około 1,5 MPa (przy maksymalnej wartości uzyskanej ściśliwości ok. 28%) powoduje rozpad ziarnowy odpadów, podobny do kilkunastoletniego wietrzenia odpadów w środowisku (rys. 5). Współczynnik filtracji odpadów zmniejsza się wtedy do około  $1,4 \cdot 10^{-8}$  m/s.

<sup>1</sup> Postąpiono zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 4.2.



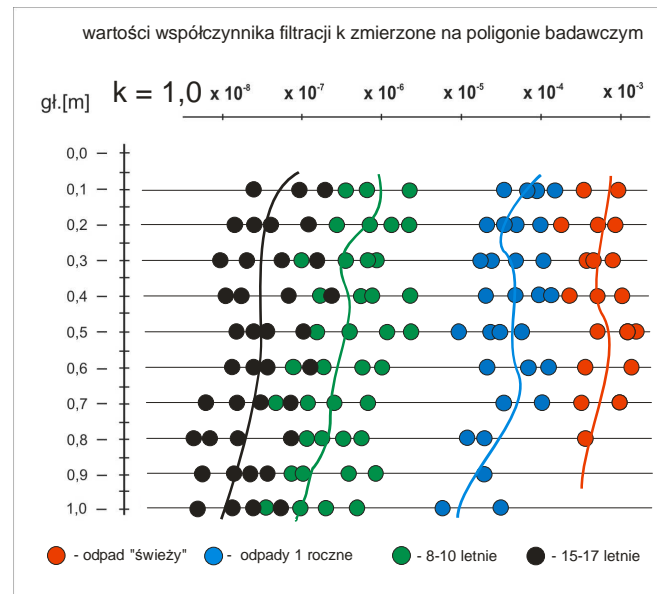
**Rys. 6.** Przykładowe zmiany uziarnienia odpadów świeżych poddanych modelowym badaniom laboratoryjnym współczynnika filtracji

**Fig. 6.** Examples of changes of graining of fresh wastes subjected to model laboratory tests of the filtration coefficient

## 6. ZMIANY WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI RÓŻNOWIEKOWYCH ODPADÓW NA TLE WYNIKÓW BADAŃ TERENOWYCH

Badanie współczynnika filtracji różnowiekowych odpadów wydobywczych zdeponowanych na składowisku „Bogdanka” (rys. 1 – strefy S1–S4) przeprowadzono metodą infiltrometru Guelph do głębokości 1,0 m. Pomiary współczynnika filtracji odpadów świeżych ustaliły charakterystyczny dla nich zakres wartości  $8,2 \cdot 10^{-2}$

$-9,1 \cdot 10^{-3}$  m/s. Natomiast odpady po okresie jednego roku wietrzenia charakteryzują się wartościami zmieniającymi się w zakresie od  $8,5 \cdot 10^{-3}$  do  $1,3 \cdot 10^{-5}$  m/s. Dla odpadów poddawanych około 8–10-letniemu procesowi wietrzenia współczynniki filtracji zmieniają się w zakresie od  $5,0 \cdot 10^{-5}$  do  $3,1 \cdot 10^{-7}$  m/s (rys. 7). Są to podobne wartości do uzyskanych w badaniu takich samych odpadów, przeprowadzonych w latach ubiegłych (Borys i in. 2002). Badania terenowe odpadów wydobywczych po 15–17 latach składowania wykazały różnicowanie się wartości współczynnika filtracji w zakresie od  $4,2 \cdot 10^{-6}$  do  $3,9 \cdot 10^{-8}$  m/s (rys. 8).



**Rys. 7.** Zakres zmian współczynnika filtracji  $k$  odpadów wydobywczych na składowisku „Bogdanka” wraz z liniami odpowiadającymi średnim wartościom dla poszczególnych różnowiekowych grup odpadów

**Fig. 7.** The scope of changes of the filtration coefficient  $k$  of mining exploitation wastes at the “Bogdanka” dump together with lines corresponding with average values for individual waste groups of different ages

Zmiany wartości współczynnika filtracji zachodzą pod wpływem różnych czynników, m.in.:

- charakteru petrograficznego odpadów w poszczególnych miejscach,
- rozwijania się makropor wraz z czasem składowania odpadów,
- uprzywilejowanych dróg migracji wody (wpływa to w decydujący sposób na wartość współczynnika w skali makro).

Rozważając efekt skali (Cunha ed. 1990), należy stwierdzić m.in. za (Simunek i in. 2003), że wartość współczynnika filtracji zwykle jest większa od oznaczonej na próbkach laboratoryjnych lub w skali mikro. Większy udział skał ilastych w profilu pionowym składowiska oraz postępujący proces rozpadu fizycznego fragmentów skalnych wpływa na zmniejszanie współczynnika filtracji zgromadzonych odpadów. Jednocześnie duże ilości syderytów oraz piaskowców tworzą strefy o większej wodo-

przepuszczalności. Postępujący proces wietrzenia i zmniejszania się frakcji uziarnienia odpadów w czasie powoduje również ich zagęszczanie w profilu pionowym, zwłaszcza przy narastającej wysokości składowiska do kilkudziesięciu metrów. Zjawisko to potwierdzają wykonane przez kopalnię „Bogdanka” w 2000 i 2008 r. rdzeniowe otwory wiertnicze. Wykonano je do głębokości około 20 m w głąb składowiska oraz przeprowadzono pilotowe zalewania otworów. Czynność ta potwierdziła, że współczynnik filtracji w obrębie bryły składowiska zmienia się w granicach  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  m/s. Z badań wynika, że zagęszczanie odpadów oraz przyrost drobnej frakcji ilowej w procesie wietrzenia odpadów wydobywczych powoduje powstawanie stref bardzo słabo przepuszczalnych, zwłaszcza na głębokości ponad 20 m. Podobne zjawisko obserwuje się w badaniach terenowych odpadów na powierzchni składowiska po kilkunastu latach wietrzenia. Zarówno obserwacje procesów wietrzenia, jak i wyników badań laboratoryjnych pozwalają na odwzorowanie wyników modelowych badań laboratoryjnych w odniesieniu do głębszych stref składowiska.

## 7. BADANIA LABORATORYJNE ZMIAN WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI I UZIARNIENIA ODPADÓW WYDOBYWCZYCH W LUBELSKIM ZAGŁĘBIU WĘGLOWYM

Określenia współczynnika filtracji świeżych odpadów wydobywczych z kopalni „Bogdanka” poddanych badaniu ściśliwości, przy zmiennym nacisku odpowiadającym wzrostowi ciśnienia nadkładu, dokonano zgodnie z metodyką przedstawioną w podrozdziale 4.2. Wyniki oznaczeń przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Wyniki badania ściśliwości oraz zmiany współczynnika filtracji przy symulacji ciśnienia pionowego nadkładu składowiska „Bogdanka” w zakresie obciążenia zewnętrznego 0–6 ton

Ciśnienie pionowe MPa	Wysokość nadkładu, m	„Bogdanka” – odpad wydobywczy świeży – taśmociąg				„Bogdanka” – odpad wydobywczy świeży – składowisko			
		wysokość próbki	ściśliwość %	gęstość objętościowa kg/m <sup>3</sup>	współczynnik filtracji m/s	wysokość próbki cm	ściśliwość %	gęstość objętościowa kg/m <sup>3</sup>	współczynnik filtracji m/s
0	0	22,5	0	1471	$0,955 \cdot 10^{-2}$	20,5	0	1484	$1,378 \cdot 10^{-2}$
0,07	5	18,4	18,2	1798	$6,934 \cdot 10^{-3}$	17,4	15,1	1748	$1,114 \cdot 10^{-3}$
0,19	10	17,5	22,2	1891	$2,975 \cdot 10^{-4}$	16,7	18,5	1821	$2,438 \cdot 10^{-4}$
0,43	20	17,3	23,1	1913	$2,352 \cdot 10^{-5}$	16	21,9	1901	$4,260 \cdot 10^{-5}$
0,69	30	17,0	24,4	1946	$1,337 \cdot 10^{-5}$	15,6	23,9	1950	$1,544 \cdot 10^{-5}$
0,95	40	16,7	25,7	1981	$7,670 \cdot 10^{-6}$	15,3	25,4	1988	$8,921 \cdot 10^{-7}$
1,21	50	16,5	26,6	2005	$1,960 \cdot 10^{-6}$	15,1	26,3	2014	$5,643 \cdot 10^{-7}$
1,50	60	16,0	28,3	2068	$1,572 \cdot 10^{-7}$	14,8	27,8	2070	$8,438 \cdot 10^{-8}$

W celu otrzymania komputerowego modelu zmian współczynnika filtracji na składowisku odpadów wydobywczych, przy założeniu zwiększenia wysokości tegoż składowiska w przyszłości, podwyższono jego przekrój (rys. 1) z obecnych 30 do 60 m. Symulowano również zmiany współczynnika filtracji na skutek nacisku nadkładu kolejnych warstw odpadów oraz rozpadu ziarnowego (rys. 8). Aby rozwiązać tak postawione zadanie przyjęto model obliczeniowy, w którym wykorzystano metodę elementów skończonych z uwzględnieniem ciśnienia ssącego materiału, będącego w całym profilu

w strefie aeracji. Jako podstawowe narzędzie obliczeniowe wykorzystano program HYDRUS 2D. Do badań numerycznych przyjęto algorytm obliczeniowy wyznaczania współczynnika przewodnictwa hydraulicznego, oparty na metodzie polecanej przez autorów programu – metoda van Genuchten-Mualema (Simunek i in. 2003)

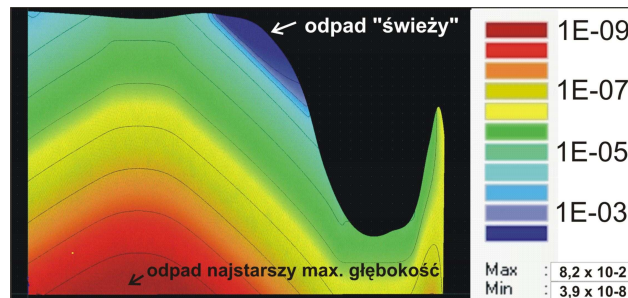
$$k(h) = k_r k_s \quad (3)$$

gdzie:

$k(h)$  – współczynnik przewodnictwa hydraulicznego w strefie nienasyconej, mm/d, zależny od wartości matrycowego potencjału wody gruntowej, wyrażony w jednostkach wysokości ciśnienia słupa wody; cm (zwanego także siłą ssącą lub ssaniem macierzystym),

$k_s$  – współczynnik filtracji w warunkach saturacji gruntu (próbki), mm/d;

$k_r$  – względny współczynnik przewodnictwa hydraulicznego (rezydualny), mm/d.



**Rys. 8.** Modelowanie zmian współczynnika filtracji wywołanego ciężarem nadkładu oraz fizycznym rozpadem odpadów wydobywczych na przykładowym przekroju przez składowisko

**Fig. 8.** Modelling of changes of the filtration coefficient caused by the weight of the overburden and physical decomposition of mining exploitation wastes on an example of the cross-section through the dump

Prezentowane obliczenia modelu numerycznego sugerują, że w spągu składowiska odpady wydobywcze ulegają wysokiemu zagęszczeniu oraz silnemu rozpadowi ziarnowemu. Na głębokości około 50–60 m osiągają one minimalną wartość współczynnika filtracji wynoszącą  $10^{-9}$  m/s.

Rysunek 8 przedstawia wynik modelowania fragmentu składowiska (linia przekroju według rys. 1) wykonany w sposób, w którym maksymalna prognozowana wysokość modelu składowiska wynosi 60 m, natomiast minimalna odpowiada miąższości 15 m nadkładu odpadów. Mając na uwadze, że podobne zmiany współczynników filtracji (od około  $10^{-3}$  do około  $10^{-8}$  m/s) obserwuje się na powierzchni składowiska, przy ich kilkunastoletnim narażeniu na warunki atmosferyczne, wydaje się zasadne stwierdzenie, że model zmian współczynnika filtracji, przedstawiony na rysunku 8 można przyjąć, jako zbliżony do warunków rzeczywistych.

## 8. PODSUMOWANIE

Zmiany fizykochemiczne i mechaniczne wietrzących odpadów wydobywczych kopalni „Bogdanka” mają istotne znaczenie przy różnorodnym wykorzystaniu tychże

odpadów w środowisku. Poznanie właściwości odpadów podczas kolejnych etapów wietrzenia, a także wykorzystanie wiedzy na temat zmieniających się cech wietrzejących odpadów pozwala na ocenę ich przydatności w pracach inżynierskich.

Odpady wydobywcze kopalni „Bogdanka” bezpośrednio po wydobyciu mają charakter okruchów skalnych o zmniejszającej się z czasem przepuszczalności, łatwych do transportu i formowania obiektów inżynierskich. Po upływie kilku lat odpady te nabierają charakteru gruntu spoistego słabo przepuszczalnego.

Terenowe badania współczynnika filtracji różnowiekowych odpadów udowodniły postępujące zmniejszanie się współczynnika filtracji odpadów w okresie kilkunastu lat. Początkowo obserwowane wartości wynoszące około  $10^{-3}$  m/s z czasem osiągały poziom około  $10^{-7}$  lub nawet  $10^{-8}$  m/s po upływie od kilku do kilkunastu lat. Podobny efekt uzyskano przy wykorzystaniu metodyki symulowania nacisku nadkładu składowiska w zakresie ciśnień pionowych, odpowiadających 30–40 m miąższości nadkładu. Wartości współczynnika filtracji uzyskane w ten sposób osiągnęły wartości rzędu  $10^{-6}$  i  $10^{-7}$  m/s. Odpowiada to wartościom uzyskiwanym w badaniach *in situ* na składowisku odpadów 8–10-letnich. Analiza zmienności uziarnienia różnowiekowych odpadów wydobywczych oraz wyników uzyskiwanych po laboratoryjnych badaniach ściskania, wykazują duże podobieństwa krzywych uziarnienia odpadów 8–10-letnich do krzywych po ściskaniu symulujących 30–40 m nadkład. Korelacje tych wyników pozwoliły na prognozowanie zmian współczynnika filtracji na składowisku, którego wysokość zostanie podniesiona do 60 m. W modelowaniu numerycznym uwzględniono zarówno rozpad ziarnowy, w wyniku wietrzenia, jak i w wyniku działania ciśnienia nadkładu odpadów. W efekcie modelowania uzyskano wartości współczynnika filtracji na poziomie  $10^{-9}$  m/s. Odpowiadają one głębokości około 60 m, przy zmienności współczynnika filtracji w pionie bardzo podobnej do wyników symulowanych badań laboratoryjnych oraz badań terenowych wykonanych na składowisku.

Wyniki przeprowadzonych badań, wykonanych różnymi sposobami, wykazują wysoką zbieżność. Zdaniem autorów, potwierdzają one słuszność przyjętych założeń i wiarygodność danych, jako danych wyjściowych do dalszych badań modelowych. Zastosowana metodyka badawcza pozwala na prognozowanie zachowania się odpadów w dłuższym czasie. Możliwe jest także prognozowanie zmienności współczynnika filtracji w warunkach zmieniającego się kształtu formowanej wierzchołki i bryły składowiska.

Wykonane badania oraz ich wyniki zaprezentowane w niniejszym artykule zrealizowane zostały w ramach projektu badawczego promotorskiego ogłoszonego przez Narodowe Centrum Nauki (nr 3361/B/T02/2011/4), realizowanego w latach 2011–2012.

#### Literatura

1. Borys M., Mosiej K., Czartoryski J., Filipowicz P. (2002): Wytyczne stosowania odpadów pogórnich z Kopalni Bogdanka do budowy wałów przeciwpowodziowych i innych budowli hydrotechnicznych. IMUZ Falenty.
2. Bromek T., Bukowski P. (2002): Ocena przepuszczalności materiałów zasypowych używanych do likwidacji szybów kopalnianych. Przegląd Górniczy nr 11, s. 18–23.
3. Bukowska M. (2012): Skłonność górotworu do tąpnięć – geologiczne i geomechaniczne metody badań. Katowice, Główny Instytut Górnictwa.

4. Bukowska M., Konopko W., Bukowski P., Szczepański A., Haładus A., Wadas M., Bogusz A., Augustyniak I., Niedbalska K., Borowczyk I. (2011): Opracowanie metodyki badań geomechanicznych dla potrzeb oceny zagrożenia wodnego w kopalniach węgla kamiennego w GZW. Dokumentacja GIG nr 04010369-142. Katowice, Główny Instytut Górnictwa (niepublikowana).
5. Bukowski P. (2010): Prognozowanie zagrożenia wodnego związanego z zatapianiem wyrobisk górniczych kopalń węgla kamiennego. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa nr 882.
6. Cichoń G. (1977): Charakterystyka mineralogiczno-petrograficzna karbońskich gleb stigmariowych z Dorohuczy. Zeszyty Naukowe AGH, Seria Geologia t. 3, z. 3.
7. Cunha A.P. ed. (1990): Scale Effects in Rock Masses. Mat. ISRM Commission on Scale Effects in Rock Mechanics. Rotterdam, Balkema.
8. Elrick D.E., Reynolds W.D., Geering H.R., Tan K.A. (1990): Estimating Steady Infiltration Rate Times for Infiltrimeters and Permeameters. Water Resource Research Vol. 26, No. 4, s. 759–769.
9. Elrick D.E., Reynolds W.D. (1992): Infiltration from Constant Head Well Permeameters and Infiltrimeters. W: Advances in Measurement of Soil Physical Properties. Bringing Theory Into Practice, G.C. Topp et al. (ed). SSSA Spec. Publ. 30, SSSA, Madison, WI, s. 1–24.
10. Esaki T., Zhang M., Takahashi M., Morin R.H., Endo H. (1996): Determining the Hydraulic Properties of Saturated, Low-Permeability Geological Materials in the Laboratory: Advances in Theory”. Kukuoka.
11. Guelph Pressure Infiltrimeter Instructions 2805-09/2005.
12. Myślińska E. (1998): Laboratoryjne badania gruntów. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN.
13. Pazdro Z. (1977): Hydrogeologia ogólna. Warszawa, Wydaw. Geologiczne.
14. Raport merytoryczny nr 3: segment I, rejon GZW. Projekt badawczy GIG, PIG, PBG „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania”, Warszawa, grudzień 2009.
15. Simunek J., Jarvis N.J., Van Genuchten M.Th., Gardenas A. (2003): Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow transport in the vadose zone. Journal of Hydrology Vol. 272, s. 14–35.