

## PARAMETRY MIGRACJI ZANIECZYSZCZEŃ W ODPADACH FLOTACYJNYCH NA PODSTAWIE TERENOWEGO EKSPERYMENTU ZNACZNIKOWEGO NA PRZYKŁADZIE OBIEKTU UNIESZKODLIWIANIA ODPADÓW WYDOBYWCZYCH „GILÓW”

### POLLUTANT MIGRATION PARAMETERS OF FLOTATION TAILINGS BASED ON A FIELD TRACER-TEST (CASE STUDY OF THE GILÓW TAILINGS POND)

KRZYSZTOF CHUDY<sup>1</sup>, MAGDALENA WORSZA-KOZAK<sup>2</sup>

**Abstrakt.** W artykule zaprezentowano wyniki terenowego eksperymentu znacznikowego oraz szacowania parametrów migracji zanieczyszczeń dla drobnoziarnistych odpadów flotacyjnych na potrzeby danych wejściowych do modelu numerycznego migracji. Badania przeprowadzono dla Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych (OUOW) „Gilów” na 3 poligonach badawczych z wykorzystaniem jonu  $\text{Cl}^-$  jako znacznika. Odpady flotacyjne zdeponowane w obiekcie mają charakterystykę gruntów drobnoziarnistych piaszczystych i pylastych, co przekłada się na ich niskie parametry migracji zanieczyszczeń. Prędkości migracji w poszczególnych profilach, oszacowane zarówno z krzywej przejścia znacznika, jak i obliczone w programie CXTFIT oscylowały w granicach od 0,27 do 1,8 m/a, klasyfikując odpady flotacyjne do najniższej, 5 klasy pod względem prędkości migracji. Przeprowadzone testy terenowe pozwoliły na uzyskanie rzeczywistych danych stanowiących wiarygodny wsad wejściowy na potrzeby dalszych analiz migracji zanieczyszczeń w obrębie OUOW „Gilów” i w jego otoczeniu.

**Słowa kluczowe:** infiltracja, eksperyment znacznikowy, odpady flotacyjne, grunty drobnoziarniste, Gilów.

**Abstract.** The paper presents the results of the field tracer test and the results of estimation of pollutants migration parameters for fine-grained flotation wastes. The need of reliable input data for the numerical migration model was the cause of the research. It was carried out for the “Gilów” tailings pond on three sampling sites using the  $\text{Cl}^-$  ion as a tracer. The flotation wastes deposited in the facility are classified as fine sandy and silty soils what corresponds with their low migration parameters. Migration rates in individual profiles, estimated from the tracer transition lines and calculated with the CXTFIT software, have been oscillated within the limits of 0.27 to 1.8 m/a. It places flotation wastes in the lowest, 5th class in terms of migration speed. The conducted field tests allowed to obtain real data constituting a reliable input for the purposes of further analysis of pollutants migration within the “Gilów” tailings pond and its surroundings.

**Key words:** infiltration, tracer test, tailings, fine-grained soils, Gilów.

### WSTĘP

Skład chemiczny i mineralny oraz parametry filtracyjne odpadów flotacyjnych mają niezwykle istotne znaczenie dla migracji zanieczyszczeń oraz jakości wód powierzch-

niowych i podziemnych w otoczeniu obiektów gromadzących takie odpady (Castilla, 1983; Cappuyns i in., 2006). Miejsca przeznaczone do składowania odpadów wydobywczych w różnych formach, w tym hałdy i stawy osadowe wraz z tamami i innymi konstrukcjami budującymi ten

<sup>1</sup> KGHM Cuprum Centrum Badawczo-Rozwojowe sp. z o.o., ul. Sikorskiego 2–8, 53-659 Wrocław; e-mail: k.chudy@cuprum.wroc.pl.

<sup>2</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, ul. Na Grobli 15, 50-421 Wrocław; e-mail: magdalena.worsa-kozak@pwr.edu.pl.

obiekt, zgodnie z definicją z art. 3, ust. 1 Ustawy z dnia 10 lipca 2008 r. o odpadach wydobywczych (t.j.: DzU z 2017 r., poz. 1849), noszą nazwę Obiektów Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych (OUOW). Tylko w 2017 r. na terenie województwa dolnośląskiego zostało wytworzonych 607 667,4 tys. ton odpadów z flotacyjnego wzbogacania rud metali nieżelaznych (Domańska, 2018). Odpady z flotacji rud miedzi są obecnie gromadzone na jedynym czynnym obiekcie – OUOW „Żelazny Most”. Jest to jedna z największych na świecie budowli hydrotechnicznych tego typu. Pełni ona kluczową rolę w ciągu technologicznym KGHM Polska Miedź SA i kształtuje warunki hydrochemiczne i hydrodynamiczne wód podziemnych i powierzchniowych na obszarze kilkunastu kilometrów kwadratowych. Niespełna 5 km na południowy zachód od „Żelaznego Mostu” znajduje się OUOW „Gilów” (fig. 1) – dużo mniejszy, wyłączony z eksploatacji obiekt, który również stanowi potencjalne ognisko zanieczyszczeń środowiska. OUOW „Gilów” był przedmiotem wielu badań i opracowań, m.in. w zakresie składu mineralogicznego i chemicznego zdeponowanych w nim odpadów (Bogda, Chodak, 1995; Baran i in., 2013), potencjalnych zasobów pierwiastków użytecznych (Kijewski, 1998; Duczmal-Czernikiewicz, Suchan, 2015), czy też w aspekcie zanieczyszczeń wprowadzanych do środowiska (Sun i in., 2000). Nie zbadano jednak dotychczas parametrów filtracyjnych zdeponowanych w obiekcie odpadów. Impulsem do przeprowadzonych i zaprezentowanych w artykule badań była potrzeba opracowania modelu numerycznego migracji zanieczyszczeń z obszaru OUOW do wód podziemnych. W celu uzyskania rzeczywistych danych do modelu przeprowadzono terenowy eksperyment znacznikowy pozwalający na wyznaczenie niezbędnych parametrów wejściowych do modelu.

## OBSZAR BADAŃ

OUOW „Gilów” zajmuje całkowitą powierzchnię 6,2 km<sup>2</sup> (Werno, 2007) i jest położony przy północno-wschodniej granicy pomiędzy powiatami lubińskim a polkowickim, po wschodniej stronie drogi krajowej nr 3 (fig. 1). Wybudowano go z wykorzystaniem naturalnego ukształtowania terenu w obrębie wzgórz Dalkowskich jako nadpoziomowy, zboczowy, w wyniku utworzenia zapory ziemnej na południowo-zachodnim stoku jednego ze wzgórz. Odpady lokowano w formie namywu zawiesiny wodnej w sekcjach namywających umiejscowionych w różnych częściach obiektu. Zapórę formowano z gromadzonych w obiekcie piaszczystych odpadów gruboziarnistych, które były tu składowane w latach 1968–1980 i pochodziły z przeróbki piaskowcowej rudy miedzi w ZWR „Lubin”, a następnie po 1975 r., także z ZWR „Rudna”. Pylasto-ilaste odpady pochodzące z przeróbki skał węglanowych z ZWR „Polkowice” lokowano od strony naturalnego zbocza do centrum zbiornika. W OUOW „Gilów” zdeponowano łącznie ok. 68 mln m<sup>3</sup> odpadów flotacyjnych, a maksymalne rzędne zapór osiągnęły 178–179 m n.p.m. (Werno, 2007). W roku 1980, w związku z przejściem całego strumienia odpadów przez zbiornik „Żelazny Most”, zaniechano eksploatacji OUOW „Gilów”, który z biegiem czasu uległ częściowej, samoistnej rekultywacji.

## CHARAKTERYSTYKA POLIGONÓW BADAWCZYCH

W celu scharakteryzowania zmienności parametrów migracji zanieczyszczeń w zależności od uziarnienia zdeponowanych w zbiorniku odpadów oraz od wykształcenia obecnej strefy aeracji wytypowano 3 poligony badawcze,

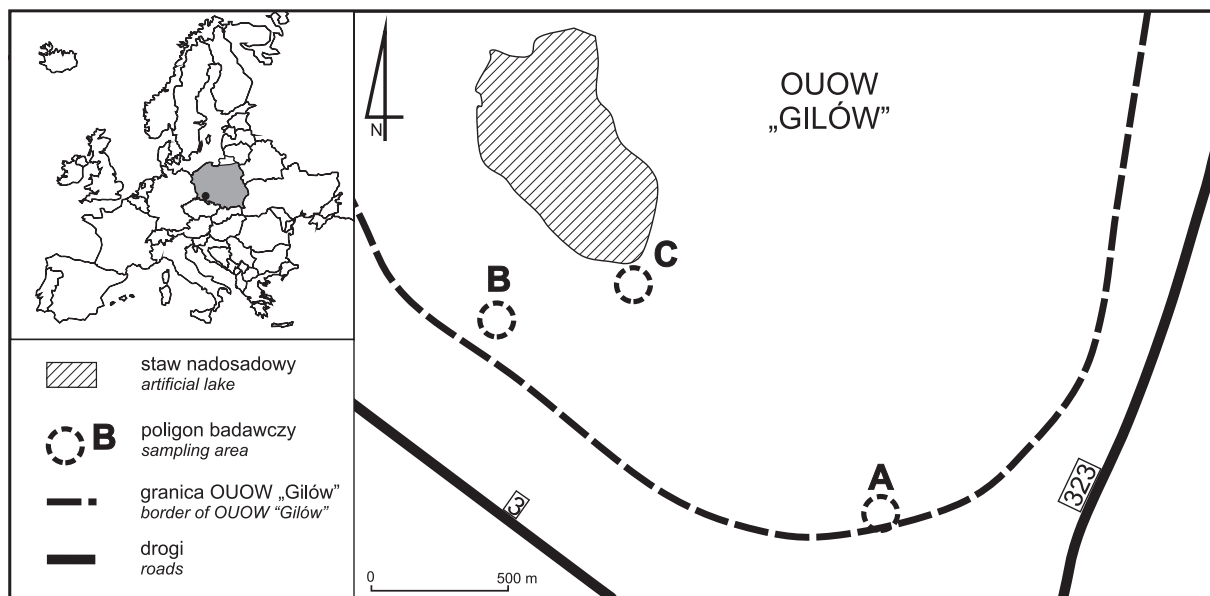


Fig. 1. Położenie poligonów badawczych

Location of test sites

każdy o powierzchni 4 m<sup>2</sup>. Poligony rozlokowano w południowej części zbiornika z uwzględnieniem litologii, odległości od zapory zbiornika OUOW „Gilów” i dostępności terenu (fig. 1). Poligon A znajdował się w najbardziej na południe wysuniętej części obiektu w odległości 10–15 m od zapory. Poligon B wyznaczono w odległości 45–50 m od zapory, a poligon C zlokalizowano najbliżej obecnego zbiornika wód nadosadowych w odległości ok. 400 m od zapory.

## OPIS EKSPERYMENTU

Wśród metod znacznikowych stosowanych w badaniach hydrogeologicznych na uwagę zasługują te oparte na znacznikach anionowych tj.: Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup> czy I<sup>-</sup> (Wilson, Mackay, 1993, 1996; Dillon i in., 1999, 2003; Gamlin i in., 2001; Clark i in., 2005). Znaczniki te, ze względu na fakt, że nie podlegają sorpcji na drodze przepływu, uważane są za znaczniki idealne. Jednym z najważniejszych zastosowań znaczników sztucznych jest pomiar prędkości filtracji pionowej w strefie aeracji skał klastycznych, który łącznie z pomiarem wilgotności umożliwia wyznaczenie wielkości zasilania oraz parametrów migracji potencjalnych zanieczyszczeń niepodlegających sorpcji i/lub rozpadowi (Bury, 1994; Herzig, 1999; Nałęczki, 1999). W tym celu w eksperymencie znacznikowym na OUOW „Gilów” wykorzystano znacznik w postaci jonu Cl<sup>-</sup>, którego współczynnik retardacji R = 1. Oznacza to, że jon ten jest transportowany w wodach podziemnych z maksymalną możliwą prędkością, co pozwala na prognozowanie zagrożeń najwyższego stopnia (Kleczkowski, 1991).

Na każdym z poligonów badawczych wykonano taki sam zestaw badań terenowych i laboratoryjnych, który objął:

- wyznaczenie i przygotowanie poletek doświadczalnych,
- odwiercenie otworów i pobór próbek gruntu w stanie naturalnej wilgotności z różnych głębokości do maksymalnie 2 m p.p.t. (pierwsza seria terenowa – sierpień 2015 r.),
- przygotowanie znacznika i pobranie próbek znacznika do oznaczenia stężenia początkowego jonu Cl<sup>-</sup>,
- wprowadzenie znacznika na poletkach o wymiarach 2×2 m (pierwsza seria terenowa – sierpień 2015 r.),
- wiercenie otworów i pobór próbek gruntu z różnych głębokości do maksymalnie 2 m p.p.t. po 80, 133, 212 i 408 dniach od czasu iniekcji znacznika,
- dla każdej z próbek pobranych w czasie pierwszej sesji terenowej przeprowadzenie w laboratorium analizy granulometrycznej, oznaczenia wilgotności naturalnej oraz oznaczenia pierwotnego stężenia jonu Cl<sup>-</sup>
- oznaczenie wilgotności w próbkach pobranych po 80 dniach oraz oznaczenie stężenia jonów Cl<sup>-</sup> w próbkach pobranych po 80, 133, 212 i 408 dniach od czasu iniekcji znacznika w celu oceny tempa migracji znacznika przez strefę aeracji.

Przygotowany roztwór NaCl aplikowano na powierzchnię poletek doświadczalnych równomiernie przy pomocy konewki, pobierając uprzednio próbkę roztworu do określenia stężenia jonu Cl<sup>-</sup> w aplikowanym roztworze, które wynosiło:

- poligon B – 24 395 mg Cl<sup>-</sup>/dm<sup>3</sup>,
- poligon C – 22 272 mg Cl<sup>-</sup>/dm<sup>3</sup>,
- poligon A – 23 856 mg Cl<sup>-</sup>/dm<sup>3</sup>.

Próbki gruntów pobierane były do szczelnych woreczków strunowych, składowane w pojemniku termicznym w temperaturze 4°C, a następnie transportowane do laboratorium w ciągu 12 godzin, gdzie poddawane były dalszym analizom.

Do oznaczenia stężenia jonu Cl<sup>-</sup> wykorzystano metodę wyciągu wodnego. Pozwala ona w pośredni sposób określić skład chemiczny roztworu porowego. Metoda ta polega na suszeniu gruntu w temperaturze 105–110°C przez 24 godziny, roztarciu w moździerzu i zalaniu wodą redestylowaną w proporcji 1:5. Do wyciągu wodnego zastosowano naważkę 30 g. Następnie przygotowany roztwór przechowuje się w zamkniętym naczyniu przez 24 godziny, aby umożliwić całkowitą wymianę jonową chlorków. Po tym czasie roztwór poddano analizie chemicznej, stosując metodę miareczkowania argentometrycznego Mohra, czyli oznaczanie jonu Cl<sup>-</sup> za pomocą AgNO<sub>3</sub>, wobec 10% chromianu (VI) potasu K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>.

Wilgotność gruntu (*w*) oznaczono jako stosunek masy wody zawartej w porach gruntu do masy szkieletu gruntowego (podawana w %) zgodnie z metodyką zamieszczoną m.in. w pracy Myślińskiej (2016).

Prędkość przepływu znacznika w gruncie ( $\Delta h/\Delta t$ ) jest mierzona od powierzchni (lub innej głębokości iniekcji) z przesunięcia  $\Delta h$  krzywej znacznika (krzywej przejścia) w odstępie czasu ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ). Krzywa znacznika w funkcji głębokości (*h*) dla danego czasu (*t*<sub>1</sub>) wyznaczona jest w oparciu o pobór próbek na różnych głębokościach za pomocą wierconego ręcznie otworu. Następną krzywą, dla innego czasu (*t*<sub>2</sub>) uzyskuje się przez podobny pomiar w najbliższym sąsiedztwie, znajdującym się w obszarze iniekcji. Średnie położenie głębokości znacznika znajduje się za pomocą zwykłego modelu dyspersyjnego. Wtedy wielkość infiltracji *I* można policzyć ze wzoru (Zuber, 2007):

$$I = w \frac{\Delta h}{\Delta t} \text{ [m/a]}$$

gdzie:

$\Delta h$  – zmiana średniej głębokości położenia znacznika w odstępie czasu  $\Delta t$

*w*<sub>o</sub> – wilgotność objętościowa.

Najlepszym sposobem interpretacji badań znacznikowych jest stosowanie adekwatnych modeli analitycznych lub numerycznych. Przez taki model rozumie się model zawierający wszystkie parametry istotne w opisie migracji użytej substancji w badanym systemie wodonośnym. Dla znaczników zachowawczych w skałach porowych, adekwat-

nym modelem jest uproszczona forma zwykłego równania migracji (Zuber, 2007):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \left( \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - v \frac{\partial C}{\partial x}$$

gdzie:

$v$  – prędkość przepływu,

$D_L$  – współczynnik dyspersji podłużnej,

$D_T$  – współczynnik dyspersji poprzecznej;

i jego odpowiednie rozwiązania analityczne. Można również stosować rozwiązania numeryczne.

Wyniki badań na OUOW „Gilów” poddano ponadto interpretacji za pomocą programu numerycznego CXTFIT, dzięki któremu uzyskano parametry średniej rzeczywistej prędkości migracji  $U$ , współczynnika dyspersji podłużnej  $D_L$  oraz stałej dyspersji podłużnej  $\alpha_L$ .

## WYNIKI BADAŃ

### SKŁAD GRANULOMETRYCZNY

**Poligon A.** Oznaczenia składu granulometrycznego próbek gruntu z poligonu A wykonano na próbkach pobranych od powierzchni terenu do głębokości 1,2 m.

Grunty budujące strefę aeracji w tym miejscu charakteryzuje najbardziej jednolity skład granulometryczny spośród analizowanych poligonów badawczych. Dominuje tu frakcja piaszkowa z udziałem frakcji pyłowej w przedziale 15–25%. Według normy PN 86/02480 są to głównie piaski pylaste (fig. 2).

**Poligon B.** Próbki pobrane w strefie aeracji (do 2 m p.p.t.) z poligonu B w większości mają jednolity skład granulometryczny, w którym dominuje frakcja piaszkowa. Według normy PN 86/02480 są to głównie piaski drobnoziarniste na pograniczu piasków pylastych (fig. 2). Nieco drobniejsze uziarnienie wykazały pojedyncze próbki gruntu pobrane ze strefy 1,2–1,4 m p.p.t., w których występuje zwiększona zawartość frakcji pylastych (pyły piaszczyste).

**Poligon C.** W próbkach pobranych z poligonu C dominują grunty o składzie granulometrycznym odpowiadającym, według normy PN 86/02480, glinom pylastym na pograniczu pyłów (fig. 2). Przeważa tu frakcja pyłowa nad piaszkową, a nieco odmienny skład ziarnowy wykazuje 6 próbek gruntów – w przedziale głębokości 1,2–1,4 m p.p.t. gliny pylaste przechodzą w pyły piaszczyste, natomiast na głębokości 1,6–2,0 m p.p.t. występują przewarstwienia piasków pylastych przechodzących w piasek gliniasty.

### WILGOTNOŚĆ GRUNTU

W obrębie OUOW „Gilów” wykonano dwie serie oznaczeń wilgotności gruntów: pierwsze oznaczenie miało miejsce w sierpniu, a drugie w październiku 2015 r.

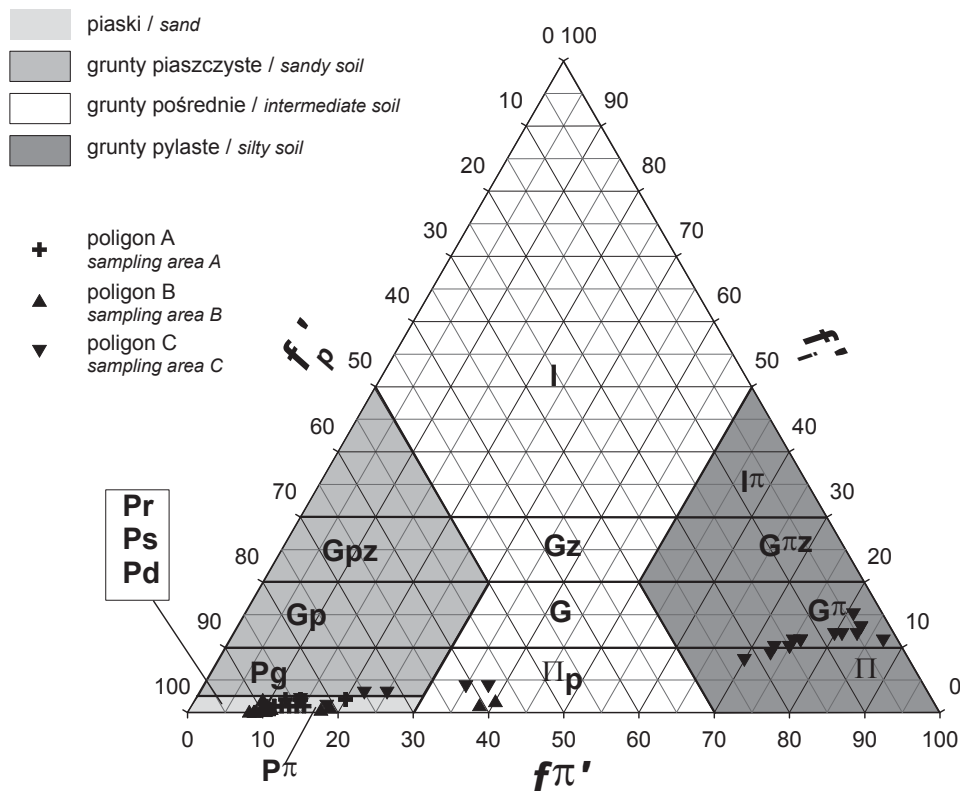


Fig. 2. Rodzaj gruntów budujących strefę aeracji na poligonach badawczych A, B, C wg normy PN-B-02480:1986

Classification of soil from the vadose zone in the test fields A, B and C acc. to PN-B-02480:1986

Na **poligonie A** wilgotność oznaczono tylko do głębokości 1,2 m p.p.t. Na tym poligonie wilgotność wykazuje najmniejszą zmienność w profilu pionowym (fig. 3) i zawiera się między 1 a 6%. Sezonowa zmienność wilgotności zaznacza się do 0,6 m p.p.t., podobnie jak na poligonie B.

Na **poligonie B** położnym ok. 50 m od korony zapory wilgotność gruntu mieściła się w zakresie od 1 do 5% w całym profilu badawczym, w obydwu seriach pomiarowych. Na wykresie (fig. 3) widoczna jest przesuwająca się w dół strefa podwyższonej wilgotności notowana w sierpniu 2015 r. na głębokości 1,2 m p.p.t., a w październiku na głębokości 1,6 m p.p.t. W rozpatrywanym okresie widać również znaczne wahania wilgotności w strefie najbliższej powierzchni, co związane jest z opadami atmosferycznymi oraz pośrednio temperaturą powietrza. Sezonowa zmienność wilgotności w tym profilu zanika na głębokości ok. 0,6 m p.p.t.

Najwyższe wartości wilgotności w profilu pionowym, dochodzące do 45%, zanotowano na **poligonie C**. Strefą o najwyższej wilgotności, stwierdzoną w 2 seriach pomiarowych, jest strefa na głębokości pomiędzy 0,2 a 1,2 m p.p.t. (fig. 3), w której wilgotność zawierała się w przedziale 28–45%. Poniżej oraz powyżej tej strefy wilgotność była znacznie niższa i oscylowała w zakresie pomiędzy 10 a 20%. Na poligonie tym uwidacznia się również zmienność sezonowa wilgotności w najpłytszej strefie przypowierzchniowej. W strefie do 0,2 m p.p.t. różnica pomiędzy 1 a 2 serią pomiarową dochodziła do 15%, co należy wiązać z warunkami klimatycznymi.

#### TEST ZNACZNIKOWY

Do wyznaczenia stężenia jonu  $\text{Cl}^-$  w roztworach porowych wykorzystano metodę wyciągu wodnego. W trakcie pierwszej serii badawczej w sierpniu 2015 r. przed zalaniem poletka

znacznikiem pobrano próbki gruntu do określenia naturalnego tła chlorkowego przypowierzchniowej strefy OUOW „Gilów”, a następnie w określonych odstępach czasu dokonywano obserwacji pionowego przepływu znacznika  $\text{Cl}^-$ .

**Poligon A** położony jest przy samej koronie zapory. Początkowe stężenie jonu chlorkowego w profilu pionowym strefy aeracji dla poligonu A wynosiło od  $48,37 \text{ mg/dm}^3$  na głębokości 1,2 m p.p.t. do  $224,92 \text{ mg/dm}^3$  w strefie przypowierzchniowej. W trakcie drugiej serii obserwacji zanotowano najwyższe koncentracje jonu chlorkowego na głębokości 0,4 m p.p.t. dochodzące do  $1889,53 \text{ mg/dm}^3$ . W kolejnej serii obserwacyjnej maksimum wystąpiło na głębokości 0,5 m p.p.t. i wyniosło  $2037,88 \text{ mg/dm}^3$ . W wiosennej, IV serii wierceń najwyższe wartości zanotowano na głębokości 0,6 m p.p.t. dochodzące do  $1705,23 \text{ mg/dm}^3$  (fig. 4).

**Poligon B.** Początkowe stężenie jonu chlorkowego w profilu pionowym strefy aeracji dla poligonu B wynosiło od  $6,25 \text{ mg/dm}^3$  na głębokości 1,8 m p.p.t. do  $98,91 \text{ mg/dm}^3$  na głębokości 1,6 m p.p.t. Po 80 i 133 dniach zauważalny był niewielki przepływ znacznika przez strefę aeracji. Niewątpliwie wiązać to należy z zanikiem infiltracji wód opadowych spowodowanych zamarznięciem strefy przypowierzchniowej gruntu oraz utrzymującą się pokrywą śnieżną. Najwyższe stężenie jonu  $\text{Cl}^-$  zarejestrowano ok. 212 dni od iniekcji znacznika na głębokości 0,7 m p.p.t. i wyniosło ono  $1654,63 \text{ mg/dm}^3$  (fig. 4).

**Poligon C.** Początkowe stężenie jonu chlorkowego w profilu pionowym strefy aeracji dla poligonu C wynosiło od  $22,91 \text{ mg/dm}^3$  na głębokości 0,4 m p.p.t. do  $417,15 \text{ mg/dm}^3$  w strefie przypowierzchniowej. Po 80 i 133 dniach zauważalny był niewielki przepływ znacznika przez strefę aeracji w zakresie 0,1–0,2 m. Co, jak w poprzednich przypadkach, można powiązać z zanikiem infiltracji wód opadowych spowodowanych zamarznięciem strefy przypowierzchniowej

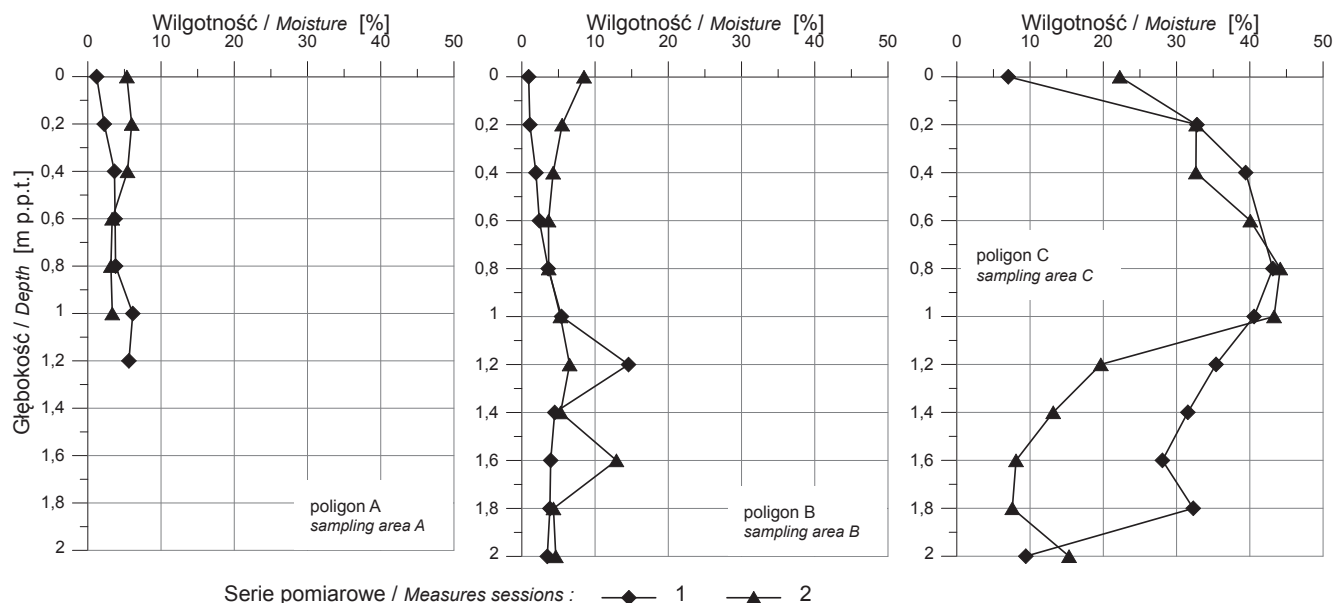


Fig. 3. Rozkład wilgotności gruntu w profilu pionowym na poligonach badawczych w czasie pierwszej (1) i drugiej (2) serii pomiarowej

Distribution of moisture in the vertical soil profile in the test fields during the first (1) and the second (2) measuring sessions



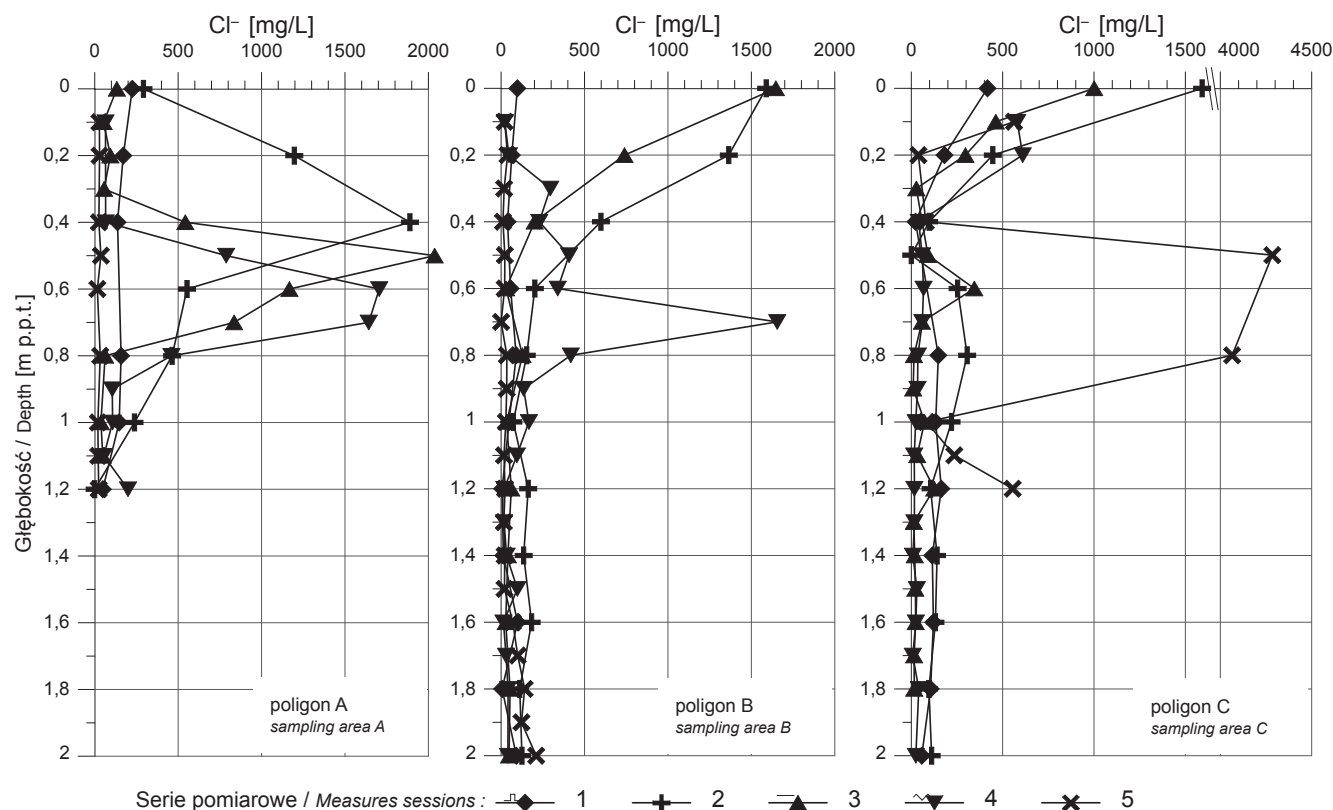


Fig. 4. Krzywe przejścia znacznika przez badane profile litologiczne

Serie pomiarowe: 1 – 24–28.08.2015, 2 – 13.11.2015, 3 – 04.01.2016, 4 – 23.03.2016, 5 – 06.10.2016

Transition lines of the tracer through the soil profile of the sampling areas

Measuring sessions: 1 – 24–28.08.2015, 2 – 13.11.2015, 3 – 04.01.2016, 4 – 23.03.2016, 5 – 06.10.2016

gruntu. Najwyższe stężenie jonu  $\text{Cl}^-$  zarejestrowano ok. 408 dni od iniekcji znacznika na głębokości 0,5 m p.p.t. i wynosiło ono 4284,60  $\text{mg}/\text{dm}^3$  (fig. 4).

## INTERPRETACJA WYNIKÓW

Odmienne parametry przepuszczalności wynikające z różnej granulacji odpadów oraz różne własności kapilarne zgromadzonego materiału pozwoliły na indywidualną interpretację krzywych przejścia w obrębie poszczególnych poligonów.

Analizując krzywe przejścia sztucznego znacznika  $\text{Cl}^-$  na poletku zlokalizowanym na poligonie A, które wyznaczono na podstawie wyników badań roztworów porowych metodą wyciągu wodnego, można zauważyć, że najszybciej znacznik przemieszczał się w początkowym okresie – 80 dni (1,8 m/a) (tab. 1). Można to korelować z granulometrią gruntu na tym poligonie sprzyjającą przepływowi wód. Do tego poligon ten znajduje się tuż na krawędzi występowania wysokiego drzewostanu, co mogło wpływać na prędkość zamrażania strefy przypowierzchniowej. W okresie wiosennym, po zimowych roztopach pokrywy śnieżnej nie widać nagłego przyspieszenia migracji znacznika chlorkowego, wręcz przeciwnie – prędkość jego przepływu maleje do wartości 1,32 m/a po 133 dniach oraz 1,03 m/a po 212 dniach.

Procesy przepływu pionowego wód i zanieczyszczeń na poligonie B przebiegały najszybciej (do 1,2 m/a) w okresie od 133 do 212 dnia po rozpoczęciu badań (tab. 1). Doszło wtedy do nagłego wzrostu zasilania, wynikającego z wiosennych roztopów oraz opadów deszczu. Wraz z upływem czasu maksymalne koncentracje jonu chlorkowego przemieszczają się pionowo w dół. Po okresie 408 dni w profilu nie widać strefy z wyraźnie podwyższoną koncentracją znacznika, jedynie na głębokości 1,80–1,90 m zaznacza się niewielki wzrost zawartości jonów chlorkowych w wyciągach wodnych (fig. 4).

Analizując krzywe przejścia znacznika  $\text{Cl}^-$  na poletku zlokalizowanym na poligonie C oraz mając na uwadze wyniki oznaczeń współczynnika filtracji  $k$  i obserwacje w trak-

Tabela 1

Prędkość migracji jonu  $\text{Cl}^-$  wg analizy krzywych przejścia  
Velocity of  $\text{Cl}^-$  migration based on transition lines analysis

| Czas [d] | Prędkość migracji [m/a] |           |           |
|----------|-------------------------|-----------|-----------|
|          | poligon A               | poligon B | poligon C |
| 0        | –                       | –         | –         |
| 80       | 1,80                    | 0,35      | 0,27      |
| 133      | 1,32                    | 1,10      | 0,45      |
| 212      | 1,03                    | 1,20      | 0,52      |
| 408      | –                       | 1,80      | 0,73      |

cie wierzeń można stwierdzić, że migracja zanieczyszczeń w tym rejonie jest procesem wieloczynnikowym, na który składa się:

- odmienne wykształcenie litologiczne gruntów, co uwidacznia się na krzywych uziarnienia.
- sedymentowanie w tym obszarze materiału najdrobniejszego, który odznacza się zwiększoną wilgotnością naturalną.
- procesy kapilarne i podsiąkowe, które prowadzą do powstawania wód zawieszonych.

Wymienione czynniki powodują powstanie w centralnej części OUOW „Gilów” całorocznego zbiornika wodnego, w którym stagnują wody opadowe. Przekłada się to na wyniki, jakie otrzymano oznaczając migrację jonu chlorkowego. W pierwszym okresie badawczym znacznik chlorkowy koncentrował się w strefie przypowierzchniowej o miąższości ok. 0,20 m. Nie uwidacznia się w tym rejonie wzmoczona infiltracja w okresie wiosennym, po roztopach. Na tej podstawie można przyjąć, że w okresie zimowo-letnim prędkość migracji wynosi od 0,27 do 0,45 m/a (tab. 1). Znaczny wzrost prędkości migracji pionowej, do 0,73 m/a, nastąpił dopiero między 212 a 408 dniem trwania eksperymentu. W wyciągach wodnych z próbek gruntu pobranych w październiku 2016 r. uwidacznia się znaczne przesunięcie maksymalnej koncentracji jonu chlorkowego na głębokość 0,5 i 0,8 m p.p.t. (fig. 4)

Zgodnie z założeniami projektu wyniki pomiarów stężenia znacznika w roztworach porowych poddano interpretacji wykorzystując program numeryczny CXTFIT (Parker, van Genuchten, 1984; Witczak, 1987). Do obliczenia parametrów migracji zanieczyszczeń zastosowano model 1, typu Resident, opisany przez analityczne równanie migracji konwekcyjno-dyspersyjnej uwzględniające sorpcję zgodnie z izotermą liniową oraz reakcje z kinetyką zerowego rzędu i rozpad zgodny z kinetyką pierwszego rzędu (Witczak, 1987). Program stworzono głównie z myślą o interpretacji badań laboratoryjnych, jednak sprawdza się on również bardzo dobrze w przypadku analizy wyników badań terenowych, w warunkach migracji jednoosiowej. Zastosowanie programu CXTFIT pozwoliło na wyznaczenie następujących parametrów:

- średnia rzeczywista prędkość migracji  $U$ ,
- współczynnik dyspersji podłużnej  $D_L$ ,
- stała dyspersji podłużnej  $\alpha_L$ .

Są to parametry zależne od budowy geologicznej ośrodka oraz wielkości i kierunku strumienia filtracyjnego (Pazdro, Kozerski, 1990).

Aby dokonać obliczenia parametrów  $D_L$  i  $U$ , należy przyjąć ich wartości szacunkowe. Współczynnik dyspersji podłużnej ocenia się porównując jego stosunek z prędkością migracji do przybliżonego rozmiaru niejednorodności badanego ośrodka. Za niejednorodność traktuje się średnicę ziarn  $d_{50}$  (Witczak, 1987). Wstępną wartość  $U$  przyjęto na podstawie średniej prędkości z analizy krzywych przejścia jonu  $Cl^-$ . Średnią wartość parametrów migracji zanieczyszczeń obliczonych w programie CXTFIT przedstawiono w tabeli 2.

Według klasyfikacji gruntów pod względem prędkości transportu adwekcyjnego wód podziemnych opracowanej przez Witczaka i Adamczyka (1994), wszystkie obliczone dwoma metodami wartości mieszczą się w 5. i zarazem najniższej klasie.

## PODSUMOWANIE

W celu oszacowania parametrów wejściowych do numerycznego modelu migracji zanieczyszczeń z obiektu unieszkodliwiania odpadów wydobywczych przeprowadzono terenowy test znacznikowy na 3 poligonach badawczych w obrębie OUOW „Gilów”. Wyniki tych badań zinterpretowano dwoma metodami – analizując krzywe przejścia znacznika oraz wykorzystując program CXTFIT.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że terenowy eksperyment znacznikowy jest stosunkowo niedrogą i wiarygodną metodą badań, która jednak jest pracochłonna i czasochłonna, a jej wyniki w znacznym stopniu są uzależnione od warunków atmosferycznych i lokalnych uwarunkowań terenowych.

Zidentyfikowane niskie parametry filtracji i tym samym parametry migracji zanieczyszczeń, a zwłaszcza prędkość migracji  $U$ , klasyfikują odpady flotacyjne z obiektu „Gilów” w najniższej 5. klasie. Świadczy to o niewielkim potencjale do wymywania zanieczyszczeń z masy odpadów zgromadzonych w „Gilowie”. Drobnodziarniste odpady flotacyjne nie były dotąd badane pod kątem możliwej migracji zanieczyszczeń i przeprowadzone testy pozwoliły na oszacowanie niezbędnych parametrów wejściowych do analiz numerycznych związanych z modelowaniem migracji zanieczyszczeń z czaszy OUOW „Gilów”.

Oszacowanie prędkości migracji z wykorzystaniem dwóch metod pozwoliło uzyskać dodatkowy stopień wiarygodności otrzymanych wyników. Wartości uzyskane obiema metodami były do siebie bardzo zbliżone.

Tabela 2

### Zestawienie parametrów migracji jonu $Cl^-$ obliczonych w programie CXTFIT

Parameters of  $Cl^-$  migration estimated with the CXTFIT software

| Poligon badawczy | Prędkość migracji $U$ [m/a] | Współczynnik dyspersji podłużnej $D_L$ [cm <sup>2</sup> /d] | Stała dyspersji podłużnej $\alpha_L$ [cm] |
|------------------|-----------------------------|---|---|
| A                | 1,02                        | 0,00670   | 0,0333                                    |
| B                | 1,17                        | 0,01360   | 0,0364                                    |
| C                | 0,63                        | 0,00032   | 0,0156                                    |

*Badania zrealizowano w ramach projektu finansowanego z Funduszu Innowacyjności KGHM Cuprum Centrum Badawczo-Rozwojowego sp. z o.o. o numerze I/14/0009.*

## LITERATURA

- BARAN A., ŚLIWKA M., LIS M., 2013 – Selected properties of flotation tailings wastes deposited in the Gilów and Zielazny Most waste reservoirs regarding their potential environmental management. *Archives of Mining Sciences*, **58**, 3: 969–978.
- BOGDA A., CHODAK T., 1995 – Niektóre właściwości fizyczne i skład mineralogiczny osadów poflotacyjnych ze zbiornika „Gilów”. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, **418**, 1: 415–420
- BURY W., 1994 – Migracja zanieczyszczeń w lessach strefy aeracji przy wykorzystaniu znaczników naturalnych i sztucznych. AGH, Kraków.
- CAPPUYNS V., SWENNEN R., VANDAMME A., NICLAES M., 2006 – Environmental impact of the former Pb–Zn mining and smelting in East Belgium. *J. Geochem. Explor.*, **88**, 1–3: 6–9.
- CASTILLA J.C., 1983 – Environmental impact in sandy beaches of copper mine tailings at Chañaral, Chile. *Mar. Pollut. Bull.*, **14**, 12: 459–464.
- CLARK J.F., HUDSON G.B., AVISAR D., 2005 – Gas transport below artificial recharge ponds: Insights from dissolved noble gases and dual gas (SF<sub>6</sub> and <sup>3</sup>He) tracer experiment. *Environ. Sci. Technol.*, **39**: 3939–3945.
- DILLON K.S., BURNETT W.C., KIM G., CHANTON J., CORBETT D.R., ELLIOTT K., KUMP L., 2003 – Groundwater flow and phosphate dynamics surrounding a high discharge wastewater disposal well in the Florida Keys. *J. Hydrol.*, **284**: 193–210.
- DILLON K.S., CORBETT D.R., CHANTON J.P., BURNETT W.C., FURBISH D.J., 1999 – The use of sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) as a tracer of septic tank effluent in the Florida Keys. *J. Hydrol.*, **220**: 129–140.
- DOMAŃSKA W. (red.), 2018 – Ochrona Środowiska 2018. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
- DUCZMAL-CZERNIKIEWICZ A., SUCHAN J., 2015 – Nagromadzenia metali w osadnikach poflotacyjnych na Dolnym Śląsku. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **465**: 67–76.
- GAMLIN J.D., CLARK J.F., WOODSIDE G., HERNDORN R., 2001 – Large-scale tracing of ground water with sulfur hexafluoride. *J. Environ. Eng. ASCE*, **127**: 171–174.
- HERZIG J., 1999 – Prędkość migracji zanieczyszczeń w strefie aeracji glin i ilów. *W: Prędkość migracji zanieczyszczeń przez strefę aeracji na podstawie badań polowych i laboratoryjnych* (red. A.S. Kleczkowski). AGH, Kraków.
- KIJEWSKI P., 1995 – Ocena miedzionośności odpadów flotacyjnych na przykładzie osadników Wartowice i Gilów. *W: VI Seminarium: „Metodyka rozpoznawania i dokumentowania złóż kopalni oraz geologicznej obsługi kopalni”*: 237–244. Wydaw. CPPGSMiE, PAN, Kraków.
- KLECZKOWSKI A.S., 1991 – Ochrona wód podziemnych w Polsce. Stan i kierunki badań. Publ. CPBP, Warszawa.
- MYŚLIŃSKA E., 2016 – Laboratoryjne badania gruntów i gleb. Wydaw. UW, Warszawa.
- NAŁĘCKI P., 1999 – Prędkość migracji zanieczyszczeń w strefie aeracji utworów szczelinowo-krasowych zrębu Bielan. *W: Prędkość migracji zanieczyszczeń przez strefę aeracji na podstawie badań polowych i laboratoryjnych* (red. A.S. Kleczkowski): 109–127. AGH, Kraków.
- PARKER J.C., VAN GENUCHTEN M.TH., 1984 – Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments. Virginia Agricultural Experiments Station.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B., 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wydaw. Geol., Warszawa.
- SUN Y.Z., LEISCHNER A., GÖBBELS F.J., 2000 – Residuary toxic elements and PAHs in sediments of the zbiornik Gilow tailings pond and Zimmica Stream from Lubin District, southwest Poland. *Environ. Geochem. Health*, **22**, 3: 249–261.
- USTAWA z dnia 10 lipca 2008 r. o odpadach wydobywczych (t.j. DzU z 2017 r., poz. 1849).
- WERNO A., 2007 – Składowisko Gilów. *W: Monografia KGHM Polska Miedz S.A.* (red. A. Piestrzyński), **2**: 575–578. KGHM Cuprum, Wrocław.
- WILSON R.D., MACKAY D.M., 1993 – The use of sulfur hexafluoride as a conservative tracer in saturated sandy media. *Ground Water*, **31**: 719–724.
- WILSON R.D., MACKAY D.M., 1996 – SF<sub>6</sub> as a conservative tracer in saturated media with high intragranular porosity of high organic carbon content. *Ground Water*, **34**: 241–249.
- WITCZAK S., 1987 – Opis i instrukcja użycia programu CXTFIT. IHiGI AGH, Kraków.
- WITCZAK S., ADAMCZYK A., 1994 – Katalog wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników migracji zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania. Tom I. Wydaw. PIOS, Warszawa.
- ZUBER A. (red.), 2007 – Metody znacznikowe w badaniach hydrogeologicznych. Poradnik metodyczny. Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław.

## SUMMARY

The results of field tracer tests and estimation of pollutant migration parameters for fine-grained flotation wastes come from three sampling areas within the Gilów tailings pond (Fig. 1). The impulse for the research was the need to gain reliable input data for a numerical migration model. The novelty of the research is the estimation of migration parameters of tailings and the methodology used in this case. The flotation wastes deposited in the facility are classified as fine sandy and silty soils (Fig. 2), which corresponds with their low migration parameters (Table 2). The research was conducted using the

Cl<sup>-</sup> ion as a tracer. The migration rates in individual profiles, estimated from the tracer transition lines (Fig. 4, Table 1) and calculated with the CXTFIT software (Table 2) are very similar, making the values more reliable. The velocity of migration values oscillates within the limits of 0.27–1.8 m/a. It places flotation wastes in the lowest, 5th class in terms of migration speed. The field tests allowed obtaining actual data constituting a reliable input for the purposes of further analysis of pollutants migration within the “Gilów” tailings pond and its surroundings.