

## WPLYW ZMIAN STANÓW WODY NA ZACHOWANIE SIĘ MODELI NASYPÓW HYDROTECHNICZNYCH WYKONANYCH Z POPIOŁO-ŻUŻLA

Przemysław Baran, Mariusz Cholewa, Małgorzata Klimek  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

**Streszczenie.** Celem artykułu była analiza wpływu sposobu piętrzenia wody na zjawiska filtracyjne zachodzące w modelu nasypu wykonanego z popioło-żużla. Model nasypu został uformowany w korycie hydraulicznym w skali półtechnicznej (wysokość 0,6 m, długość w podstawie 2,0 m, szerokość 1,0 m). Badania polegały na obserwacji zachowania się modelu nasypu podczas kontrolowanego piętrzenia i opuszczania wody od strony górnej, dolnej oraz jednocześnie górnej i dolnej. Dodatkowo wykonano badania wybranych parametrów geotechnicznych materiału, który osadził się po stronie dolnej na skutek przelania się wody przez koronę nasypu. W wyniku przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, iż popioło-żużel może być stosowany jako materiał do budowy grobli, gdyż równoczesne piętrzenie i obniżanie wody po obu stronach nasypu nie spowodowało wystąpienia negatywnych skutków filtracji. W przypadku budowy piętrzących tylko z jednej strony badany materiał antropogeniczny wykazuje cechy niestabilne, wymagające zastosowania zabezpieczeń skarp przed negatywnymi skutkami filtracji.

**Słowa kluczowe:** popioło-żużel, nasyp hydrotechniczny, grobla ziemna, filtracja

### WSTĘP

Rozwój prac naukowo-badawczych nad zjawiskiem filtracji obserwuje się od lat dwudziestych ubiegłego stulecia, przy czym ziemne budowle hydrotechniczne (zapory, wały przeciwpowodziowe) wznoszono wyłącznie na podstawie doświadczeń i praktyki. Nie prowadzono obliczeń filtracji i stateczności, w niewielkim tylko stopniu wprowadzano nowe elementy konstrukcyjne oraz intuicyjnie uzasadniano potrzebę zastosowa-

---

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Przemysław Baran, dr inż. Mariusz Cholewa, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: [p.baran@ur.krakow.pl](mailto:p.baran@ur.krakow.pl), [m.cholewa@ur.krakow.pl](mailto:m.cholewa@ur.krakow.pl)  
mgr inż. Małgorzata Klimek – absolwentka Wydziału Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

nia elementów uszczelniających i drenujących [Molski 2010]. Do wznoszenia budowli ziemnych pracujących w warunkach filtracji wykorzystywano głównie grunty pochodzenia naturalnego. Mając na względzie ograniczone zasoby naturalne, zaczęto zwracać się w kierunku możliwości zastosowania materiałów pochodzenia antropogenicznego. Wykorzystywanie surowców wtórnych, jakimi są odpady, jest ważne z punktu widzenia potrzeb gospodarczych. Stosowanie odpadów przemysłowych (np. pochodzących z przemysłu energetycznego) w budownictwie ziemnym pozwala na oszczędzanie naturalnych zasobów naszej planety. Ochrona środowiska i względy ekonomiczne sprawiły, że uznawany za bezwartościowy odpad z energetyki stał się materiałem budowlanym jako alternatywa rozwiązań tradycyjnych. Ilość odpadów przemysłowych, jakie powstają w ciągu roku w Polsce, to około 130 mln ton. Popioły i żużle z elektrowni stanowią około 15% wszystkich odpadów przemysłowych [Rocznik... 2011]. Odpady elektrowniane charakteryzują się jednak znacznym zróżnicowaniem cech fizycznych i mechanicznych zależnie od rodzaju spalanego węgla i technologii jego spalania, sposobu transportu oraz składowania. Jest to powodem, dla którego wymagają indywidualnej oceny ich właściwości geotechnicznych. Jednym z możliwych kierunków utylizacji odpadów paleniskowych jest budownictwo drogowe, gdzie dopuszcza się ich stosowanie do wznoszenia dolnych warstw nasypów poniżej strefy przemarzania w miejscach suchych lub gdy są izolowane od wody [Zydroń i Gruchot 2014]. Popioło-żużel to produkt przemysłowego spalania węgla w elektrowniach. Zastosowanie tego typu odpadów w budownictwie jest korzystnym rozwiązaniem, jednakże zapewnione musi być bezpieczeństwo środowiska przyrodniczego oraz samego obiektu zarówno w fazie wykonawstwa, jak i eksploatacji budowli. Celem niniejszego artykułu była analiza wpływu sposobu piętrzenia wody na zjawiska filtracyjne zachodzące w nasypie z popioło-żużla. Bezpieczeństwo ziemnych budowli hydrotechnicznych jest możliwe do osiągnięcia między innymi na podstawie znajomości warunków filtracji. Filtracja to nieodłączny proces w tego typu obiektach. Ponieważ pewne zjawiska związane z ruchem wody gruntowej są lepiej widoczne w sytuacji, kiedy wytworzy się dla nich warunki zbliżone do naturalnych, stąd istnieje realna potrzeba prowadzenia badań na modelach ziemnych obiektów hydrotechnicznych, zwłaszcza wykonanych z użyciem materiałów odpadowych [Baran i Cholewa 2012].

## CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁU UŻYTEGO DO BADAŃ

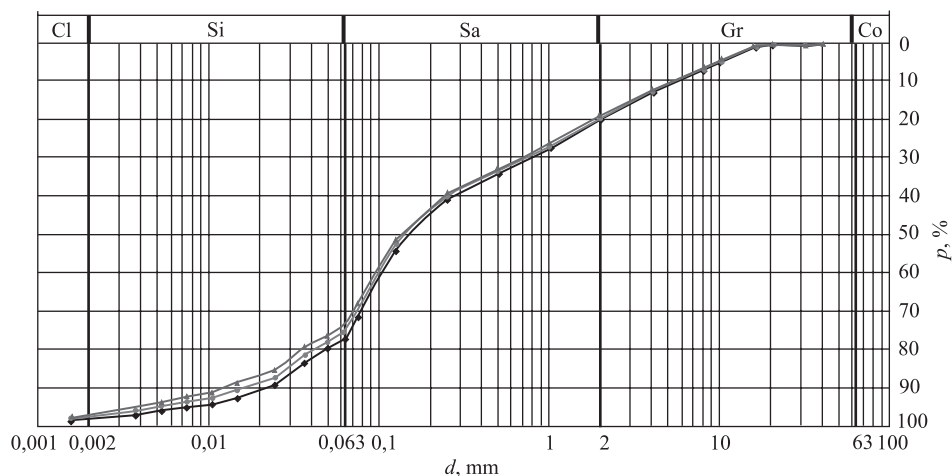
Popioło-żużel – materiał wykorzystany do budowy modeli nasypów hydrotechnicznych – pochodził z mokrego składowiska odpadów Elektrowni Skawina (ryc. 1). Elektrownia Skawina SA to jedna z największych firm przemysłowych w Skawinie oraz jedna z większych w tym rejonie. Od miasta Krakowa dzieli ją odległość 20 km. Zasila w ciepło miasto Skawinę, jak również zachodnią część Krakowa. Elektrownia obok produkcji energii elektrycznej jest dostawcą pary technologicznej, wody pitnej oraz wody przemysłowej dla przedsiębiorstw działających w Skawinie. Stosowane paliwo to węgiel kamienny, biomasa oraz olej opałowy służący do rozpalania. Węgiel pochodzi przede wszystkim z Nadwiślańskiej Spółki Węglowej i Katowickiego Holdingu Węglowego. Dowożony jest za pomocą transportu kolejowego. Elektrownia od 1975 roku eksploatuje składowisko odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne.



Ryc. 1. Lokalizacja miejsca poboru materiału do badań (Mapy Google)

Fig. 1. Location of the research material taken place (Maps Google)

Składowisko znajduje się w jednym z wyrobisk, w którym prowadzona była dawniej eksploatacja kruszywa naturalnego. Całkowita powierzchnia składowiska wynosi około 68 ha. Obecnie wykorzystywana powierzchnia to 47,3 ha. Odpady paleniskowe w postaci mieszaniny popiołowo-żużlowej przemieszczane są hydrotransportem na składowisko odpadów. Stamtąd został pobrany materiał do przedmiotowych badań modelowych. Rozkład uziarnienia badanego popiołu-żużla pokazano na ryc. 2. Wybrane wartości parametrów geotechnicznych przedstawiono w tabeli 1. Według normy PKN-CEN ISO/TS 17892-4 badany materiał sklasyfikowano jako piasek zapyłony.



Ryc. 2. Wykres uziarnienia popiołu-żużla użytego do badań

Fig. 2. Grain size distribution of the ash-slag used in tests

Tabela 1. Wybrane właściwości fizyczne badanego popiołu-żużla z Elektrowni Skawina  
 Table 1. Selected physical properties of analyzed ash-slag from Skawina Power Station

| Parametr<br>Parameter                                                                                  | Symbol<br>Symbol | Wartość<br>Value |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| Zawartość frakcji – Fraction content, %:                                                               |                  |                  |
| • żwirowa – gravel 63÷2 mm                                                                             | Gr               | 19,38            |
| • piaskowa – sand 2÷0,063 mm                                                                           | Sa               | 55,77            |
| • pyłowa – silt 0,063÷0,002 mm                                                                         | Si               | 22,38            |
| • ilowa – clay < 0,002 mm                                                                              | Cl               | 2,49             |
| Wilgotność optymalna, %<br>Optimum moisture content, %                                                 | $w_{opt}$        | 30,5             |
| Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, $g \cdot cm^{-3}$<br>Maximum dry density, $g \cdot cm^{-3}$ | $\rho_{ds}$      | 1,26             |
| Gęstość właściwa szkieletu, $g \cdot cm^{-3}$<br>Specific gravity, $g \cdot cm^{-3}$                   | $\rho_s$         | 2,39             |

## METODY

Zakres prac obejmował badania przebiegu zjawisk filtracyjnych w modelu nasypu hydrotechnicznego wykonanego w skali półtechnicznej w korycie hydraulicznym. Model ten został uformowany z mieszanki popiołowo-żużłowej warstwami o grubości 10 cm, zagęszczając je w celu uzyskania wskaźnika zagęszczenia  $I_s = 0,95$ . Stanowisko badawcze (ryc. 3) miało wymiary wewnętrzne: 600 cm długości, 100 cm szerokości i 120 cm wysokości.

We wnętrzu koryta znajdowały się odpowiednie przegrody przelewowe, dzięki którym możliwe było sterowanie położeniami zwierciadeł wody po obu stronach nasypu. System orurowania wewnętrznego i zewnętrznego umożliwiał regulację wydatku dopływającej wody, pomiar poziomu wody wewnątrz nasypu, pomiar wydatku filtracyjnego po przejściu przez nasyp [Cholewa i Baran 2013]. Badania przebiegu zjawisk filtracyjnych polegały na analizowaniu poziomu wody w rurkach pomiarowych, usytuowanych w osi koryta hydraulicznego i w osi nasypu, w trakcie zadawania różnych wielkości piętrzeń po obu stronach modelu (ryc. 4).

Szczegółowy sposób piętrzenia wody przedstawiał się następująco:

- *model 1*: napełnianie stanowiska wody górnej przez 5 godzin do poziomu 50 cm, utrzymywanie tego stanu przez 7 dni, opuszczenie zwierciadła wody górnej do poziomu 0 cm w ciągu 5 godzin;
- *model 2*: równoczesne napełnianie stanowiska wody górnej i dolnej przez 5 godzin do poziomu 50 cm, utrzymywanie tych stanów napełnienia przez 3 dni, następnie równoczesne opuszczenie zwierciadła wody górnej i dolnej do poziomu 0 cm w ciągu 5 godzin;

- *model 3*: napełnianie stanowiska wody górnej przez 5 godzin do poziomu 50 cm, następnie napełnianie stanowiska wody dolnej przez 5 godzin do tego samego poziomu co zwierciadło wody górnej, utrzymywanie tych stanów napełnienia przez 3 dni, a następnie opuszczenie w pierwszej kolejności zwierciadła wody dolnej do poziomu 0 cm w ciągu 5 godzin, a następnie opuszczenie zwierciadła wody górnej do tego samego poziomu i w tym samym czasie;
- *model 4*: napełnianie stanowiska wody górnej przez 5 godzin do poziomu 50 cm, utrzymywanie jednostronnego stanu wody przez 4 dni, następnie podniesienie wody o 10 cm w ciągu 2 godzin i utrzymywanie maksymalnego spiętrzenia przez 14 dni, następnie podniesiono wodę górną nieznacznie powyżej poziomu korony w celu wywołania efektu jej przelania przez koronę nasypu i utrzymywano taki stan przez 5 dni, po czym opuszczono zwierciadło wody górnej do poziomu 0 cm w ciągu 7 godzin.

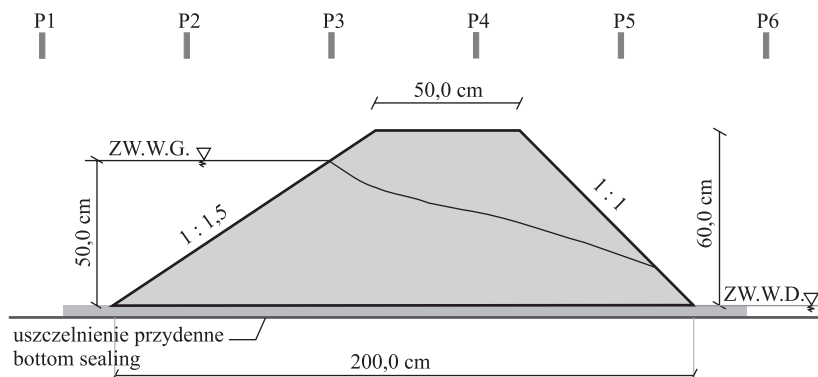
Dodatkowo, w ramach badań filtracyjnych oznaczano temperaturę wody oraz wysokość nasypu. Nieodłącznym elementem badań była obserwacja skarpy odpowietrznej i odwodnej z punktu widzenia możliwości wystąpienia niekorzystnych czy nawet niebezpiecznych skutków filtracji. Na podstawie obserwacji poziomów wody w modelu oraz po obu stronach koryta hydraulicznego możliwe było sporządzenie krzywych filtracji



Ryc. 3. Ogólny widok stanowiska do badań modelowych: a), b) widok ściany czołowej, c) model nasypu z wymiarami, d) tablica pomiarowa poziomów wody

Fig. 3. General view of model research post: a), b) headwall view, c) embankment model with dimensions, d) measurement board for water levels

w zależności od zadanych warunków piętrzenia. W sytuacji, kiedy nastąpiło przelanie się wody przez koronę nasypu modelowego, część materiału wypełnienia została przetransportowana i osadziła się poniżej nasypu, w dwóch strefach koryta hydraulicznego, które zostały rozdzielone trzema przekrojami (ryc. 5). Materiał ten został następnie poddany badaniom geotechnicznym, w ramach których określono skład granulometryczny, wyznaczono krzywe uziarnienia oraz wyznaczono gęstość właściwą szkieletu gruntowego. Odniesiono się również, w oparciu o równoległe badania [Cholewa i in. 2014], do składu chemicznego wody po przejściu przez nasyp modelowy 1.



Ryc. 4. Przekrój poprzeczny przez model 1 (P1–P6 – rurki do pomiaru położenia wody)

Fig. 4. Cross-section through the model embankment 1 (P1–P6 – water level measuring pipes)



Ryc. 5. Położenie przekrojów od strony skarpy odpowietrznej dla modelu 4

Fig. 5. Cross-sections localization from downstream slope for model 4

## WYNIKI I DISKUSJA

Z uwagi na fakt, iż badane modele nie były symetryczne względem środka korony, spodziewano się różnych zachowań skarp w trakcie wymuszonych procesów filtracji. Szczególnie narażona była na oddziaływania filtrującej wody skarpa odpowietrzna, gdyż miała ona ostrzejsze nachylenie w stosunku do skarpy odwodnej. Zachowanie się badanych nasypów w trakcie piętrzenia i opuszczania wody opisano poniżej.

*Model 1.* Podczas piętrzenia wody górnej skarpa odwodna nie uległa żadnemu zniszczeniu. Po około 5 godzinach od rozpoczęcia podnoszenia zwierciadła, woda przefiltrowała na stronę skarpy odpowietrznej. Pierwsze uszkodzenia w skarpie odpowietrznej zauważono po 21 godzinach od zakończenia piętrzenia wody. Zniszczenia obejmowały podstawę skarpy do wysokości około 15 cm, jednakże nie na jej całej szerokości. Po 30 godzinach od ustalenia się zwierciadła wody górnej na poziomie 50 cm, stwierdzono zwiększenie uszkodzeń w jednej części skarpy odpowietrznej. Po 7 dniach od zakończenia piętrzenia zaobserwowano również lekkie obsunięcie się skarpy odwodnej. Po opuszczeniu wody nie zauważono dodatkowych uszkodzeń ani na skarpie odpowietrznej, ani odwodnej.

*Model 2.* W trakcie jednoczesnego piętrzenia oraz opuszczania wody górnej i dolnej, nie zauważono zniszczeń w badanym nasypie. Jediną zmianą było lekkie rozmycie skarpy odpowietrznej u podstawy (podobnie jak to miało miejsce w przypadku skarpy odwodnej modelu 1).

*Model 3.* W przypadku piętrzenia w pierwszej kolejności wody górnej, po około 2,5 godzinach woda przefiltrowała na stronę skarpy odpowietrznej. Po 4,5 godzinach skarpa odpowietrzna zaczęła się obsuwać. W piątej godzinie zaczęto podnosić zwierciadło wody dolnej do poziomu zwierciadła wody górnej (50 cm). Z chwilą rozpoczęcia piętrzenia po stronie wody dolnej, ustały procesy destrukcji materiału skarpy odpowietrznej. Również podczas opuszczania wody, na początku dolnej, potem górnej, zmian na skarpach nie zaobserwowano.

*Model 4.* Po spiętrzeniu wody górnej do wysokości 50 cm, co miało miejsce w czasie 5 godzin, pojawiły się znaczne zniszczenia na całej szerokości skarpy odpowietrznej. Wspomniane zniszczenia pogłębiały się z chwilą podniesienia zwierciadła wody górnej do poziomu 60 cm – co było równoznaczne z osiągnięciem spiętrzenia równo z koroną nasypu. Po 18 dniach od chwili rozpoczęcia piętrzenia, zwiększono dopływ wody na stanowisko górne, co w konsekwencji spowodowało przelanie się wody przez koronę nasypu modelowego. Dalsze obserwacje wykazały daleko idącą destrukcję skarpy odpowietrznej do wysokości około 35 cm, co stanowiło ponad połowę pierwotnej wysokości skarpy.

Wspomnianemu procesowi destrukcji towarzyszyło sukcesywne wymywanie i osadzanie się materiału gruntowego, z którego uformowany był model nasypu. Lokalizując przekroje badawcze zgodnie z ryc. 5, rozfrakcjonowany na skutek sedymentacji materiał poddano badaniom geotechnicznym, w których skoncentrowano się na ustaleniu uziarnienia i gęstości właściwej szkieletu gruntowego. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, iż zmiane, w stosunku do materiału wyjściowego, z którego zbudowany był nasyp, uległ najbardziej materiał osadzony w najdalszej części koryta hydraulicznego; natomiast część środkowa i ta zlokalizowana najbliżej

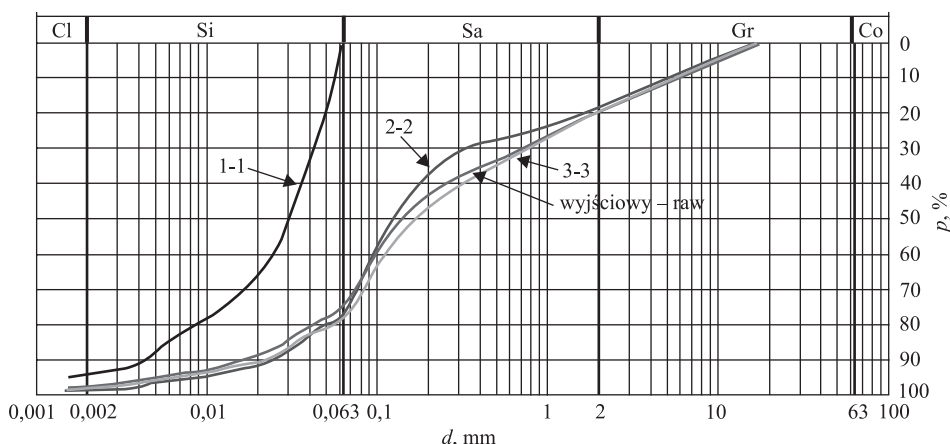
skarpy odpowietrznej miała bardzo podobną do wyjściowej charakterystykę uziarnienia. Zostało to pokazane na ryc. 7. Średnia gęstość właściwa szkieletu gruntowego dla przekroju 3-3 wyniosła  $2,32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , dla przekroju 2-2 –  $2,43 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , a dla przekroju 1-1 –  $2,44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Dodatkowo, dla modelu 1, wykonano oznaczenia pH, zawartości metali alkalicznych (Ca, Na, K, Mg), oraz śladowych (Cd, Pb, Cr, Cu) w dopływającej wodzie, następnie ujętej wewnątrz korpusu, oraz po przejściu przez nasyp. Miało to na celu



Ryc. 6. Efekt finalny przelania się wody przez koronę modelu 4: a) widok od strony skarpy odpowietrznej, b) ubytek masy gruntu w widoku z boku

Fig. 6. Final effect of overflow through the crest of the model 4: a) view from downstream slope, b) weight loss of soil in a side view



Ryc. 7. Wykres uziarnienia popioło-żużla przed i po badaniu w modelu 4 w wyznaczonych przekrojach na stanowisku dolnym

Fig. 7. Grain size distribution of the ash-slag before and after the test in model 4 in appointed cross-sections of downstream

zbadań wykorzystanej mieszanki popiołowo-żużlowej w warunkach eksploatacji pod kątem oddziaływania na środowisko wodne. Szczegółowe wyniki przeprowadzonych badań zestawiono w pracy Cholewy i in. [2014], natomiast tutaj ograniczono się do stwierdzenia, iż w stosunku do wody dopływającej, ta znajdująca się wewnątrz modelu, jak i po przefiltrowaniu przez model, wyraźnie się różniły dla wartości konduktancji (4,6 raza), zawartości Na (5 razy), K (21 razy), Ca (2,4 raza) i Mg (11 razy). Ze względu na wartość konduktancji, próbki wody wewnątrz nasypu i na stanowisku dolnym nie spełniały wartości dopuszczalnych dla wód powierzchniowych i podziemnych [Rozporządzenie... 2008, Rozporządzenie... 2011] oraz wymagań w sprawie substancji szczególnie szkodliwych wprowadzanych do wód lub ziemi [Rozporządzenie... 2006]. Najniższym odczynem ( $\text{pH} = 6,7$ ) charakteryzowała się próbka wody pobrana z wnętrza korpusu modelu, wyższym i w miarę wyrównanym odczynem charakteryzowały się próbki pobrane od strony wody górnej ( $\text{pH} = 7,3$ ) oraz wody dolnej ( $\text{pH} = 7,6$ ). Obniżony odczyn w odcieku z korpusu zapory może być następstwem wpływu wykorzystanego materiału. Znacznie mniejsze zróżnicowanie obserwowane jest w odniesieniu do stężeń pierwiastków śladowych w ocenianych odciekach. Uznawane za substancje priorytetowe dla jakości wód Pb, Cd oraz szczególnie szkodliwy Cr występują w stosunkowo wyrównanych zakresach. Wszystkie oznaczone zawartości kadmu i chromu były bardzo niskie i nie przekroczyły progu oznaczalności użytego urządzenia pomiarowego. Zawartości Cd, Cr i Pb spełniają normy dopuszczalne dla wód powierzchniowych i podziemnych oraz w sprawie wymagań dla ścieków wprowadzanych do wód lub ziemi [Rozporządzenie... 2014, Rozporządzenie... 2009, Rozporządzenie... 2011]. Inna sytuacja ma miejsce w przypadku miedzi – wyższe stężenia tego metalu występują w wodzie na stanowisku górnym, przekraczając wartości dopuszczalne dla wód podziemnych [Rozporządzenie... 2008]. Stan taki może być spowodowany ługowaniem tego pierwiastka w warunkach niższego  $\text{pH}$ .

## WNIOSKI

1. Sposób piętrzenia wody ma wpływ na zjawiska filtracyjne i intensywność uszkodzeń w nasypie z badanego popioło-żużla. Przy równoczesnym piętrzeniu wody po obu stronach nasypu nie zaobserwowano negatywnych skutków filtracji. W związku z tym postuluje się, aby tego typu materiał odpadowy, jeżeli ma być użyty do formowania nasypów hydrotechnicznych, został wykorzystany do budowy grobli, obustronnie piętrzących wodę.
2. Piętrzenie wody tylko po jednej stronie nasypu wywoływało uszkodzenia w podstawie skarpy odpowietrznej na skutek wymywania materiału wypełnienia, przy czym bardziej strome nachylenie skarpy nasypu powoduje większe jej zniszczenia wskutek filtrującej wody.
3. Przelanie wody przez koronę nasypu spowodowało wymycie materiału wypełnienia poza obręb modelu; cząstki najmniejsze zostały wymyte najdalej od nasypu, w środkowej części osadził się materiał o średniej wielkości cząstek, natomiast cząstki najgrubsze pozostały najbliżej budowli. Przelaniu wody towarzyszyła znaczna destrukcja skarpy odpowietrznej, zatem w przypadku tego typu materiału,

wykorzystywanego do budowy nasypów hydrotechnicznych, taka sytuacja jest niedopuszczalna.

4. Badany materiał wpływa na zmianę chemizmu wód mających z nim bezpośredni kontakt szczególnie w odniesieniu do konduktancji, która przekracza dopuszczalne dla wód powierzchniowych i podziemnych normy. W związku z tym faktem pozostaje aktualny postulat ujęty w punkcie 1 niniejszych wniosków odnośnie do wbudowania tego rodzaju materiału w groble, gdyż przy niewielkich spadkach zwierciadła wody w nasypie, ograniczona będzie migracja wód mogąca zmieniać negatywnie wartości wspomnianego parametru.

## PIŚMIENNICTWO

- Baran, P., Cholewa, M. (2012). Wpływ zastosowanego geosyntetyku na wodoprzepuszczalność zbrojonych nasypów z odpadów powęglowych. *Przegl. Górn.*, 68(10), 59–64.
- Cholewa, M., Baran, P. (2013). Modeling of permeability flow in embankments formed from ash-slag mixture. *Rocz. Ochr. Środ.*, 15, 479–491.
- Cholewa, M., Szwałec, A., Mundała, P. (2014). Ocena właściwości chemicznych i geotechnicznych mieszaniny popiołowo-żuźlowej z Elektrowni Skawina SA w modelowym badaniu zapory ziemnej. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumietus*, 13(4), 45–54.
- Molski, T. (2010). Wpływ warunków filtracji naporowej na stateczność ziemnych budowli hydrotechnicznych i podłoża. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, Wrocław.
- Rocznik statystyczny (2011). GUS, Warszawa.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. *Dz.U. z 2014 r., poz. 1800*.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 lipca 2008 r. w sprawie kryteriów i sposobu oceny stanu wód podziemnych. *Dz.U. z 2008 r. Nr 143, poz. 896*.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 listopada 2011 r. w sprawie sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych oraz środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych. *Dz.U. z 2011 r. Nr 257, poz. 1545*.
- Zydroń, T., Gruchot, A. (2014). Wpływ wilgotności i zagęszczenia na wytrzymałość na ścinanie popioło-żuźli i stateczność budowanych z nich nasypów. *Rocz. Ochr. Środ.*, 16, 498–518.

## THE INFLUENCE OF WATER LEVELS CHANGES ON THE BEHAVIOR OF HYDRAULIC EMBANKMENTS MODELS CONSTRUCTED FROM ASH-SLAG

**Abstract.** The aim of the article was an analysis of water level influence on a filtration phenomena occurring in a model test embankment constructed from ash-slag. The model has formed in a hydraulic channel in semi-full technical scale (0.6 m high, 2.0 m long at the base, 1.0 m width). The research involved on observation of the model test behavior during controlled rising and lowering water level on upstream, downstream, as well as synchronous up- and downstream slope. Tests of selected geotechnical parameters of the material that was silt up on the downstream slope of the embankment due to water overflow through the crest, have been also performed. Studies and analysis carried out that ash-slag can be used as the construction material for dikes, because simultaneous rising and lowering

of water level on both sides of the embankment caused no negative filtration effects. In case of hydraulic structure with only one side of water level, the investigated anthropogenic material has the unstable characteristics, requires a slope stabilization against negative filtration phenomena.

**Key words:** ash-slag, hydraulic embankment, earth dyke, filtration

*Accepted for print – Zaakceptowano do druku: 30.11.2016*

Do cytowań – For citation: Baran, P., Cholewa, M., Klimek, M. (2016). Wpływ zmian stanów wody na zachowanie się modeli nasypów hydrotechnicznych wykonanych z popiołu-żużla. Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 15(4), 41–51.