

## IDENTYFIKACJA SPRAWNOŚCI FUNKCJONOWANIA SYSTEMU DRENAŻU PIERŚCIENIOWEGO

Maciej Kroll<sup>1</sup>, Katarzyna Stefaniak<sup>1</sup>, Magdalena Walczak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Budownictwa i Geoinżynierii, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań, e-mail: katarzyna.stefaniak@up.poznan.pl

### STRESZCZENIE

Jedną z możliwości poprawy współczynnika stateczności nasypu budowlanego jest obniżenie położenia krzywej filtracji. W wyniku tego zabiegu uzyskuje się mniejsze siły masowe uruchamiające potencjalny zsuw oraz korzystniejsze parametry wytrzymałościowe gruntów, które przeciwdziałają ruchom osuwiskowym. W przypadku składowisk odpadów obniżenie krzywej filtracji wód uzyskuje się poprzez budowę studni odciążających i piętro- wych systemów drenażowych, spełniających wytyczne bezpiecznej eksploatacji obiektu. Celem niniejszej pracy jest wskazanie metody umożliwiającej monitoring rzeczywistego położenia krzywej filtracji w masywie składowanych osadów oraz ocena sprawności działania drenażu pierścieniowego składowiska. W pracy podjęto próbę wykorzystania do tego celu metody statycznego sondowania CPTU. Badanie CPTU umożliwia pomiar dyssypacji ciśnienia wody w porach gruntu, identyfikując warunki drenażu, które porównuje się z wynikami obserwacji piezometrycznych. Wyniki tego rodzaju badań umożliwiły kontrolę zmian położenia krzywej depresji wód nadosadowych w zaporach oraz określenie sprawności funkcjonowania systemu drenażu pierścieniowego.

**Słowa kluczowe:** drenaż pierścieniowy, filtracja, CPTU, test dyssypacji, osady poflotacyjne.

### DETERMINATION OF EFFICIENCY OF THE CIRCUMFERENTIAL DRAINAGE SYSTEM

#### ABSTRACT

One of the potential alternatives to improve the stability coefficient for an embankment structure is to flatten the filtration curve. As a result, we obtain lower body forces triggering the potential landslide and more advantageous soil strength parameters, which counteract landslide movements. In the case of waste dumps lowering the phreatic surface of waters is achieved thanks to the construction of auxiliary drainage systems, meeting the guidelines for their safe operation. The aim of this paper is to indicate a method facilitating the determination of the actual position of the phreatic surface within the deposited sediments and the assessment of efficiency of the circumferential drainage system in the waste dump. It was decided in this study to apply cone penetration test CPTU. The CPTU made it possible to measure dissipation of excess water pressure in pores identifying drainage conditions, which were compared with the results of piezometric measurements. The results of these tests made it possible to monitor changes in the position of the depression curve of supernatant waters in dams and to determine the efficiency of the circumferential drainage system.

**Keywords:** circumferential drainage, permeability, CPTU, dissipation test, tailings.

### WPROWADZENIE

Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobyczych Żelazny Most jest kluczowym elementem ciągu technologicznego produkcji miedzi w Polsce. Jednocześnie jest największym obiektem tego rodzaju w Europie i drugim największym na świecie. Jednocześnie proces eksploatacji i rozbudowy składowiska, metodą nad-

budowy do środka, powoduje zmiany warunków filtracji w masywie osadów. Z kolei zmiany te powodują sukcesywne podwyższenie krzywej filtracji wód nadosadowych, co w konsekwencji wymusza stosowanie specjalnych zabiegów technicznych, poprawiających warunki geotechniczne w masywie składowiska, które spełniać muszą kryteria określone w wytycznych bezpiecznej eksploatacji. Jednym z tego rodzaju zabiegów

jest budowa systemów drenazowych w postaci drenazu zapory podstawowej i pierścieniowego drenazu dodatkowego wspomagającego oraz pionowego w postaci bariery studni depresyjnych [Stefanek i in. 2010].

W niniejszej pracy wskazano metodę umożliwiającą określenie położenia krzywej filtracji oraz ocenę sprawności działania drenazu na podstawie wyników badania statycznego sondowania CPTU. Jest to obecnie jedno z najczęściej stosowanych badań terenowych w geotechnice, umożliwiające wszechstronną charakterystykę, zarówno podłoża gruntowego, masywu składowiska, jak i warunków wodnych.

## OBIEKT BADAWCZY

W południowo – zachodniej części kraju koncentruje się przemysł wydobywczy rud metali nieżelaznych, w tym rudy miedzi i srebra. Największym producentem jest KGHM Polska Miedź S.A., dla którego strategicznym elementem ciągu technologicznego jest Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych (OUOW) Żelazny Most. Obiekt ten jest mega-budowlą hydrotechniczną, aktualnie drugą pod względem wielkości na świecie. O skali obiektu świadczą jego parametry (powierzchnia składowiska – 14 km<sup>2</sup>, długość zapór otaczających składowisko – 14,3 km, wysokość najwyższych zapór powyżej 60 m, objętość stawu wód nadosadowych – 7 mln m<sup>3</sup>) oraz ilość deponowanych nieprzerwanie od 1977 r. odpadów, powstałych w ciągu technologicznym pozyskiwania koncentratu miedziowego - ponad 600 mln m<sup>3</sup>. W procesie tym skruszona skała macierzysta poddawana jest flotacji, w wyniku której następuje oddzielenie koncentratu miedziowego od pozostałej części urobku, stanowiącego w tym miejscu procesu technologicznego odpad poflotacyjny [Tschuschke i in. 2015a]. W wyniku procesu flotacji każdego roku przybywa około 25 mln Mg odpadu transportowanego rurociągami do składowiska metodą hydrotransportu i unieszkodliwianego na obiekcie. OUOW Żelazny Most charakteryzowany jest jako obiekt wyjątkowo skomplikowany, zwłaszcza ze względu na warunki hydrogeologiczne, geologiczne, a także geotechniczne panujące w podłożu [Chrost i in. 2009]. Masyw składowiska jest budowlą hydrotechniczną, ziemną, nadpoziomową, realizowaną etapami z materiału zdominowanego przez frakcje piaszczystą i pylastą. Prowadzona jest także

ciągła rozbudowa obiektu poprzez nadbudowę zapór okalających masyw składowiska metodą *upstream*. Nadbudowa prowadzona jest z materiału o najgrubszej frakcji, który pozyskiwany jest z plaż składowiska, zgodnie z wytycznymi formowania nadbudowy zapór [Tschuschke i in. 2015b]. Moduł nadbudowy wynosi 2,5 m, co przekłada się na średnioroczny przyrost wysokości zapór o około 1,3 m.

## METODYKA BADAŃ

Do najczęściej wymienianych zagrożeń Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych (OUOW) Żelazny Most zalicza się osunięcie skarp obwałowania i uwolnienie wody nadosadowej wraz z upłynnionymi odpadami na sąsiednie tereny. W związku z wynikającym z działalności obiektu zagrożeniem, konieczna jest stała kontrola parametrów technicznych umożliwiających ocenę stanu technicznego oraz bezpieczeństwa budowli [Tschuschke 2006]. Przyjęta metoda deponowania odpadów poflotacyjnych sprawia, że w masywie składowiska tworzą się liczne laminacje sedymentujących osadów. Osady spoiste, na przemian z niespoistymi, tworzą warstewki o niewielkim nachyleniu w kierunku wewnętrznej części zbiornika. Laminy materiału spoistego stanowią utrudnienie dla swobodnej filtracji pionowej wód technologicznych i opadowych, co powodować może podnoszenie się krzywej filtracji w masywie składowiska i mniej korzystne jej położenie względem obwałowań zewnętrznych [Kroll 2003]. Jedną z możliwości poprawy współczynnika stateczności skarp nasypu budowlanego jest obniżenie krzywej filtracji. W przypadku składowisk odpadów obniżenie krzywej filtracji wód uzyskuje się poprzez budowę dodatkowych systemów drenazowych plaży na różnych piętrach deponowanych osadów wraz z kominami żwirowymi przecinającymi ukośnie laminy. Piezometry, które mają za zadanie kontrolę położenia krzywej filtracji, instalowane są w korpusach zapór oraz w składowanych odpadach. W osadach plaży, od roku 1989 funkcjonuje system poziomego drenazu pierścieniowego, obejmujący instalację drenazu poprzez poszczególne piętra, aż do poziomu korony zapór [Monografia 30-lecia eksploatacji składowiska Żelazny Most 2007]. Efektywność jego prawidłowego działania, która skutkuje obniżeniem krzywej filtracji, pozwala na znaczącą

poprawę stateczności skarp masywu składowiska, a także na przechwytywanie zasolonych wód infiltrujących do podłoża rodzimego.

Wielkość składowiska, skomplikowany charakter budowy geologicznej podłoża, jego oddziaływanie na środowisko, warunki eksploatacji i projektowania wynikające z przepisów prawa oraz przyjęte rozwiązania w projekcie budowlanym powodują, że składowisko monitorowane jest pod względem geotechnicznym i środowiskowym. W zakresie monitoringu geotechnicznego realizowany jest szereg różnego rodzaju badań, pomiarów i obserwacji. Jednym z takich badań jest test sondowania statycznego CPT (*Cone Penetration Test*). Zastosowanie metody sondowania statycznego umożliwia w sposób bezpośredni lub pośredni określenie rodzaju gruntów oraz ich parametrów geotechnicznych [Lunne 1997, Schnaid 2009]. Sondowanie statyczne (CPT) jest badaniem geotechnicznym, które polega na wciskaniu w podłoże gruntowe stożkowej końcówki pomiarowej, ze stałą prędkością 2 cm/s [TC-16 ISSMGE – *International Reference Test Procedure for Cone Penetration Test (CPT) and Cone Penetration Test with Pore Pressure (CPTU)* 1999, Lunne i in. 1997, Schnaid 2009]. Końcówka pomiarowa o kącie wierzchołkowym  $60^\circ$  ma powierzchnię podstawy stożka  $10 \text{ cm}^2$ , powierzchnię pobocznic  $150 \text{ cm}^2$  (rys. 1). Standardowe badanie CPT umoż-

liwia rejestrowanie wraz z głębokością dwóch, niezależnych charakterystyk penetracji, a mianowicie: oporu stożka –  $q_c$  oraz tarcia na tulei ciennej –  $f_s$ . Otrzymane parametry testu umożliwiają charakterystykę podłoża, na którym posadowione jest składowisko oraz odpadów zdeponowanych na składowisku.

Dodatkowo, w metodzie statycznego sondowania CPTU (*Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement*), oprócz wspomnianych wcześniej charakterystyk penetracji, może być rejestrowana nadwyżka ciśnienia wody w porach gruntu –  $\Delta u$ . Pomiar dokonywany jest na określonej głębokości podłoża, stożkiem wyposażonym w jeden lub dwa z trzech możliwych filtrów do pomiaru ciśnienia wody w porach gruntu (rys. 1). W momencie zatrzymania penetracji następuje dyssypacja ciśnienia wody w porach, która wyraża rozproszenie ciśnienia wody w funkcji czasu (równanie 1).

$$\Delta u = u_c - u_0 \quad (1)$$

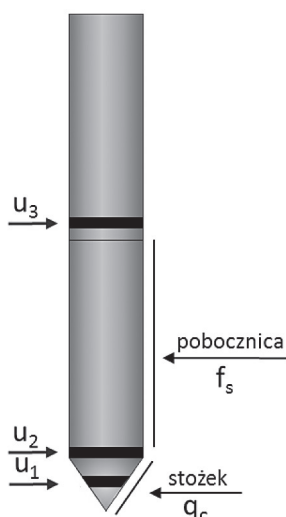
gdzie:  $u_c$  – zarejestrowana wartość ciśnienia wody w porach badanych osadów, tj.  $u_1$ ,  $u_2$  lub  $u_3$  (rys. 1),  
 $u_0$  – istniejące ciśnienie wody w porach gruntu w poziomie penetracji stożka przed badaniem.

## ANALIZA WYNIKÓW

W celu weryfikacji sprawności działania systemu drenażowego oraz określenia głębokości stabilizacji wody w profilu punktu badawczego, wykonano badania in situ metodą CPTU z pomiarem ciśnienia wody w porach gruntu ( $u_2$ ) (rys. 2 i 3). Testy CPTU przeprowadzono w sześciu punktach badawczych, w obrębie obwałowań oraz na plaży zapory południowej Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych Żelazny Most (rys. 4). Pierwsze sondowanie zlokalizowane było na przedpolu składowiska, dwa kolejne na półkach obwałowań zewnętrznych, a pozostałe trzy na plaży składowiska (rys. 4). Na podstawie wyników badań wyznaczono charakterystykę zmian współczynnika tarcia –  $R_f$  (równanie 2) (rys. 2 i 3), który posłużył do wydzielenia pięciu grup osadów, charakteryzujących się różnicowanymi warunkami filtracji.

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100\% \quad (2)$$

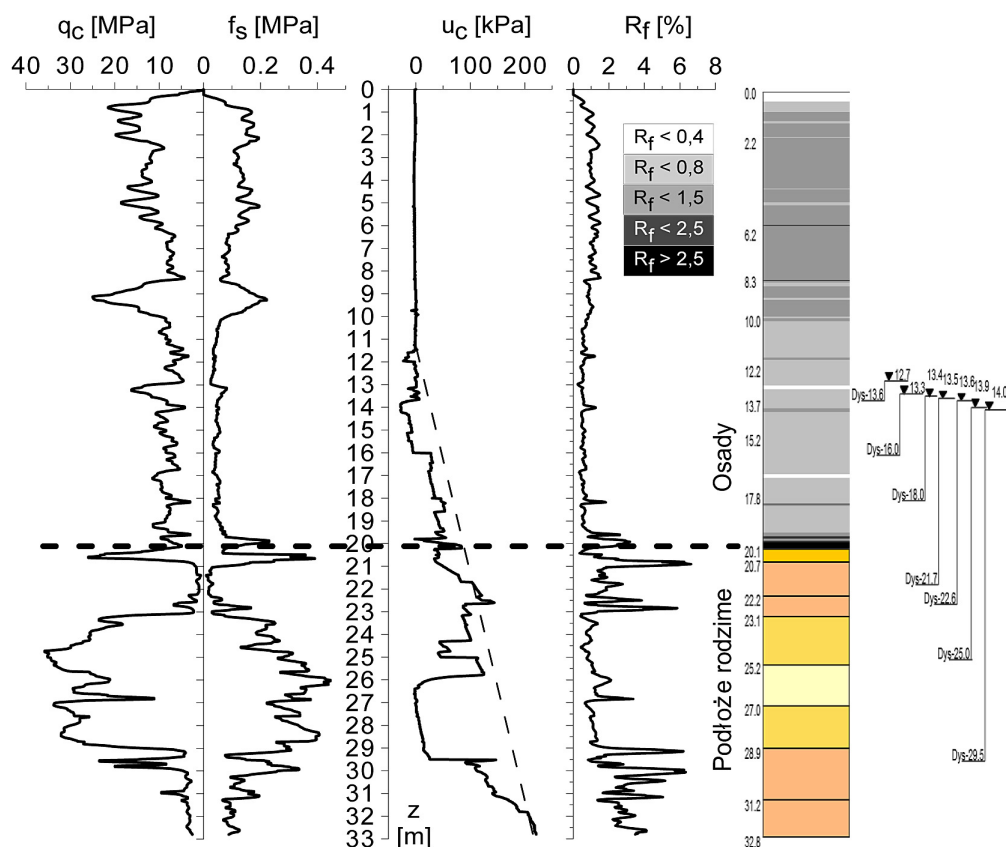
gdzie:  $f_s$  – tarcie na tulei ciennej,  
 $q_c$  – opór stożka.



$u_1$  – filtr zlokalizowany na powierzchni pobocznic stożka  
 $u_2$  – filtr zlokalizowany tuż za wierzchołkiem stożka  
 $u_3$  – filtr zlokalizowany bezpośrednio za tuleją ciennej stożka

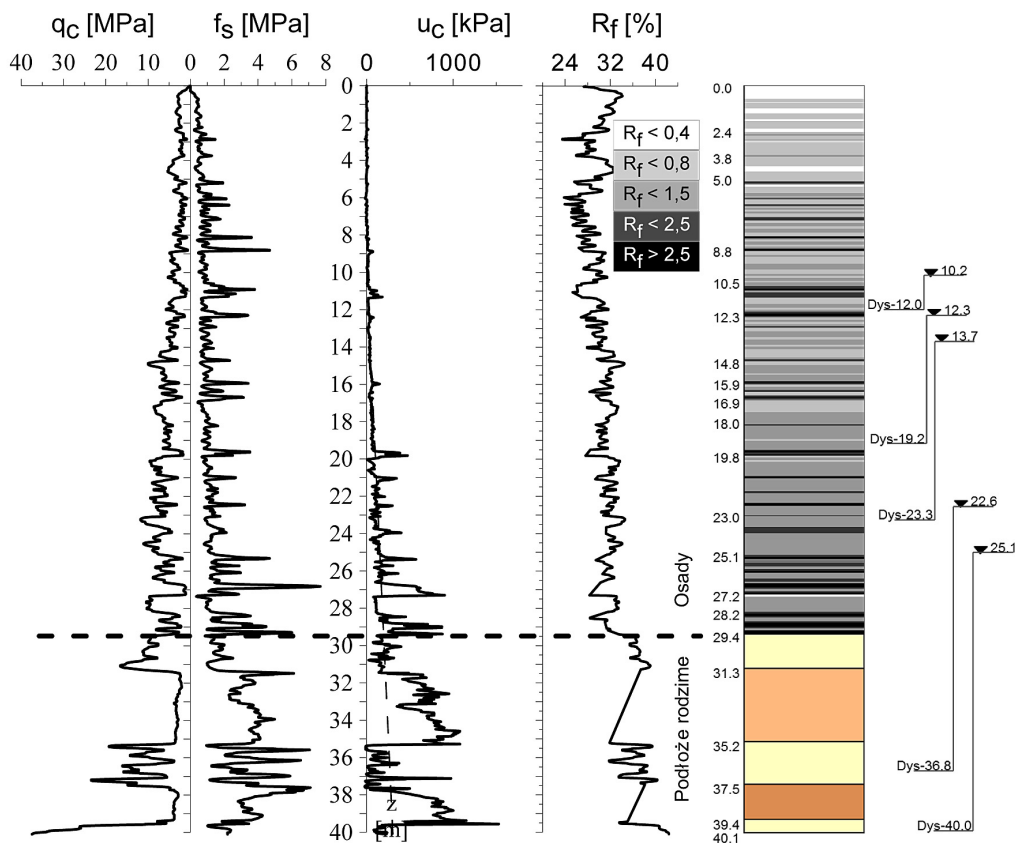
**Rys. 1.** Schemat końcówki pomiarowej CPTU [Lunne i in. 1997]

**Fig. 1.** The scheme of the CPTU cone [Lunne et al. 1997]



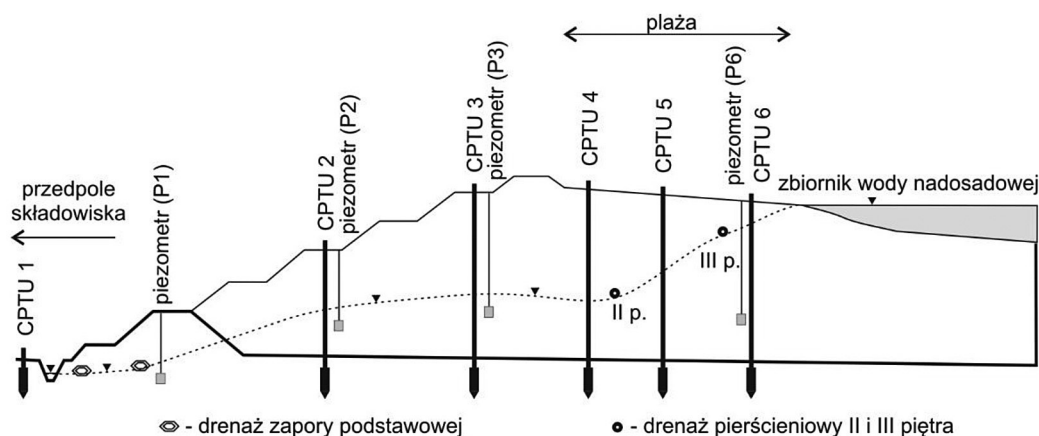
Rys. 2. Charakterystyki penetracji wraz z profilem badawczym (CPTU 2)

Fig. 2. Penetration characteristics from CPTU and testing profiles (CPTU 2)



Rys. 3. Charakterystyki penetracji wraz z profilem badawczym (CPTU 6)

Fig. 3. Penetration characteristics from CPTU and testing profiles (CPTU 6)



Rys. 4. Lokalizacja punktów badawczych

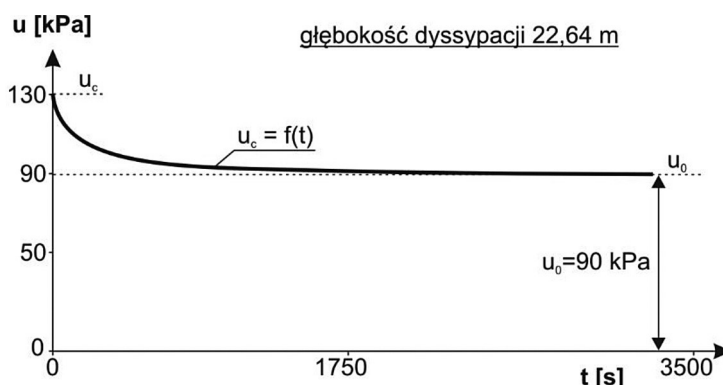
Fig. 4. The location of research points

Układ wydzielonych warstw osadów w profilach na rysunkach 2 i 3 oraz miąższości przewarstwień przedstawiono graficznie poprzez zmienność barw warstw, według schematu: osady piaszczyste – barwa jasno-szara, osady pylaste, mało spoiste – barwa szara, osady pylaste średnio i zwięzłe spoiste – barwa czarna (rys. 2 i 3). Rodzaj gruntu podłoża rodzimego ustalono na podstawie systemu klasyfikacyjnego, opracowanego w Katedrze Geotechniki Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu oraz systemu Robertsona [Młynarek 1997].

Przed wykonaniem badania, filtry oraz cały układ pomiarowy ciśnienia wody w porach gruntu, zostały w pełni nasycone oraz starannie odpowietrzone [TC-16 ISSMGE 1999]. W profilach wykonano od trzech do siedmiu testów dyssypacji. Na rysunku 5 przedstawiono przykładową krzywą dyssypacji ciśnienia wody w porach badanych osadów.

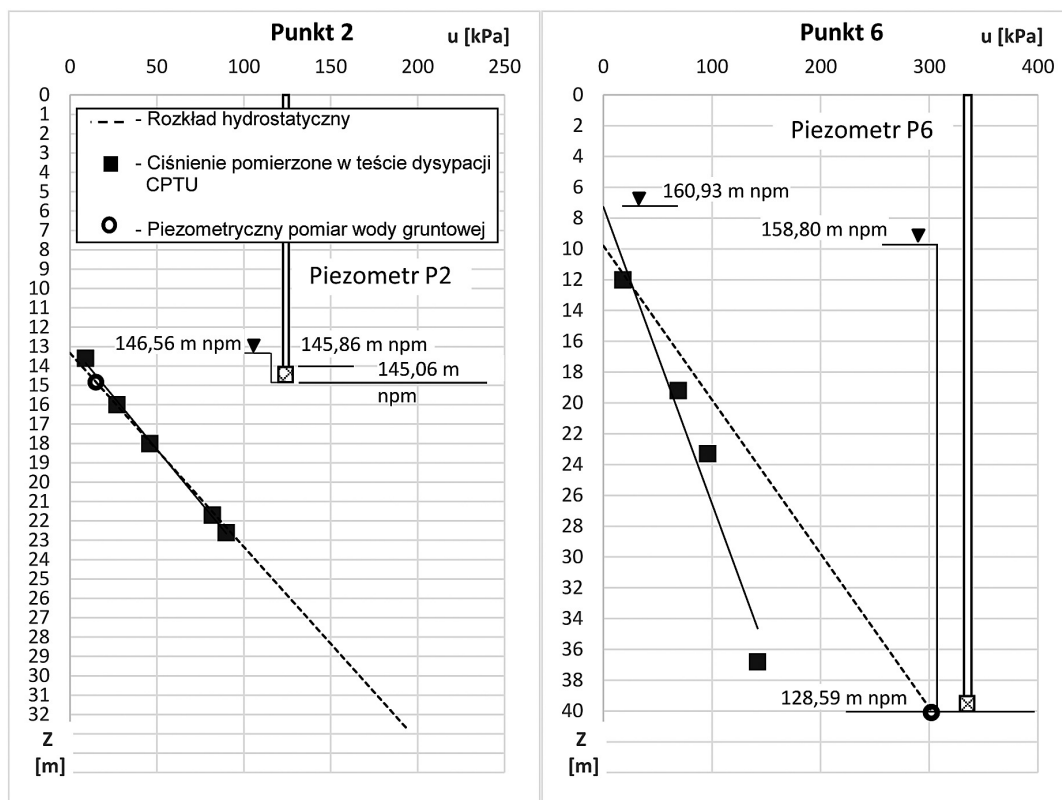
Wyniki testów dyssypacji ciśnienia wody w porach badanych osadów wykazały, że w zależno-

ści od lokalnych warunków gruntowych podłoża rodzimego oraz makrostruktury osadów zdeponowanych w masywie składowiska, obserwuje się zróżnicowane rozkłady ciśnienia wody wraz z głębokością. Otrzymane wyniki testów dyssypacji z badania sondą statyczną porównano ze standardowymi obserwacjami piezometrycznymi. W wyniku analizy rozkładów ciśnienia wody w porach gruntu wyznaczono dwie strefy, A i B. Strefa A to obszar charakteryzujący się w miarę poziomym położeniem krzywej filtracji (rys. 4), w którym rozkład ciśnienia wody określony na podstawie testu dyssypacji pokrywa się z rozkładem hydrostatycznym, wyznaczonym na podstawie odczytów z piezometrów (rys. 6, punkt 2). Taka sytuacja ma miejsce zarówno na przedpolu składowiska, jak i w strefie zapory podstawowej i niższych półek obwałowań. Z kolei w strefie B krzywa filtracji znacząco obniża się, a rozkład ciśnienia pomierzonego w teście dyssypacji nie pokrywa się z rozkładem hydrostatycznym, wyznaczonym na podstawie odczytów z piezometrów (rys. 6, punkt 6).



Rys. 5. Przykładowy wykres dyssypacji ciśnienia wody w porach gruntów w punkcie badawczym CPTU 2;  $u_e$  – zarejestrowana wartość ciśnienia wody w porach gruntu,  $u_0$  – istniejące ciśnienie wody w porach gruntu w poziomie penetracji stożka przed badaniem

Fig. 5. Typical dissipation curves from CPTU 2;  $u_e$  – measured pore water pressure,  $u_0$  – in situ pore pressure



Rys. 6. Rozkład ciśnienia wody gruntowej w rejonie punktów badawczych nr 2 i 6

Fig. 6. Example of identification of water conditions in tailings from research point No. 2 and 6

Przeprowadzona analiza wskazuje, jak błędnej oceny położenia poziomu zwierciadła wody gruntowej można dokonać, bazując wyłącznie na odczytach piezometrycznych. Spowodowane jest to tym, że piezometry zafiltrowane są na określonych głębokościach, umożliwiając jedynie odczyt punktowy. Odmienna sytuacja występuje w przypadku badania sondą statyczną CPTU. W badaniu tym pomiary dyssypacji wykonano na różnych głębokościach, co dało pełen obraz zmian położenia zwierciadła wody gruntowej w badanych osadach.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zastosowanie metody sondowania statycznego CPTU na Obiekcie Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych Żelazny Most umożliwia ocenę stanu technicznego i bezpieczeństwa obiektu, jak również dostarcza niezbędnych informacji do celów projektowania kolejnych etapów podwyższania zapór.

Za pomocą badania CPTU możliwe jest wykonanie pomiarów dyssypacji nadwyżki ciśnienia wody w porach gruntu w różnych punktach i na różnych głębokościach, co pozwala w sposób precyzyjny określić rzeczywiste położenie zwiercia-

dła wody w masywie składowiska odpadów, jak również zlokalizować wodę zawieszoną między warstwami osadów spoistych. W przypadku niehydrostatycznych rozkładów ciśnienia wody, jakie dokumentuje się w masywie deponowanych odpadów, kształt rozkładu wyznacza prawdziwą rzędną, na której stabilizuje się woda w profilu punktu badawczego. Zestawienie rzędnych wody w profilach umożliwia określenie przebiegu krzywej filtracji w przekroju. Porównanie rzędnej krzywej filtracji z rzędną założenia systemu drenażowego, uzupełnione analizą wydatku tego drenażu, umożliwia z kolei ocenę sprawności i efektywności działania systemu drenażowego plaży. Bazowanie w tej analizie wyłącznie na pojedynczej obserwacji piezometrycznej, prowadzącej do przyjęcia hydrostatycznego rozkładu ciśnienia wody, doprowadzają w konsekwencji do błędnego wnioskowania, że system drenażowy nie pracuje.

## LITERATURA

1. Chrost A., Janicki K., Koszulańska B., Krywult Ł. 2009. Zastosowanie nowych technik pomiarowych w procesie kontroli stateczności składowiska „Żelazny Most”. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 33(1).

2. Kroll M., 2003. Wyznaczanie współczynnika wodoprzepuszczalności osadów poflotacyjnych za pomocą testu dyssypacji w metodzie sondowania statycznego CPTU. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, CCCLV.
3. Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M. 1997. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic EF Spon/Routledge Publishers, New York, p. 312.
4. Młynarek Z. Tschuschke W., Wierzbicki J. 1997. Klasyfikacja gruntów podłoża budowlanego metodą statycznego sondowania. Mat. XI Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Gdańsk.
5. Monografia 30-lecia eksploatacji składowiska Żelazny Most 1977–2007. 2007. KGHM Polska Miedź S.A., Lubin.
6. Schnaid F. 2009. In situ testing in geomechanics. Taylor & Francis, London.
7. Stefanek P., Sorbian P., Stępień M. 2010. Monitoring i jego wykorzystanie w eksploatacji i projektowaniu rozbudowy składowiska „Żelazny Most”. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 8(1), 105–116.
8. TC-16 ISSMGE 1999. International Reference Test Procedure for Cone Penetration Test (CPT) and Cone Penetration Test with Pore Pressure (CPTU)
9. Tschuschke W. 2006. Sondowania statyczne w odpadach poflotacyjnych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Seria Budownictwo, z. 110, Gliwice.
10. Tschuschke W., Gogolik S., Kroll M., Walczak M. 2015a. Miary zagęszczenia odpadów poflotacyjnych w kontekście kryteriów odbioru robót ziemnych. Inżynieria Morska i Geotechnika, 36(3), 200–203.
11. Tschuschke W., Kroll M., Stefaniak K., Graf R. 2015a. Ocena stanu pylastych odpadów poflotacyjnych na podstawie wskaźnika konsystencji. Inżynieria Morska i Geotechnika, 36(3), 225–229.