

Zastosowanie monitoringu geotechnicznego i środowiskowego na Obiekcie Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych Żelazny Most

Dr inż. Paweł Stefanek – KGHM Polska Miedź S.A. Oddział Zakład Hydrotechniczny, Rudna

Mgr inż. Daniel Romaniuk – Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., Warszawa

Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych Żelazny Most (OUOW) jest jednym z największych składowisk tego rodzaju na świecie, a zarazem największym w Europie (rys. 1). Podstawowa produkcja KGHM Polska Miedź S.A. jest w pełni

zintegrowanym technologicznie procesem, w którym produkt końcowy jednej fazy technologicznej stanowi półprodukt wykorzystywany w kolejnej fazie. Ruda miedzi wydobywana w kopalniach (ZG Lubin, ZG Polkowice – Sieroszowice i ZG Rudna)



Rys. 1. Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych Żelazny Most

jest transportowana do zakładów przeróbki (Zakładów Wzbogacania Rudy – ZWR Rejony: Lubin, Polkowice, Rudna), w których następuje proces wzbogacania. W jego wyniku powstaje koncentrat miedzi, który jest dostarczany do hut. Proces flotacji wymaga użycia dużej objętości wody – $4 \div 5 \text{ m}^3/\text{t}$ nadawy rudy. Koncentrat miedzi uzyskany w wyniku wzbogacania stanowi jedynie około 6% masy urobku. W związku z tym około 94% wydobytego urobku jest odpadem, który zostaje zagospodarowywany na powierzchni. Odpady z flotacji są szlamem w stanie płynnym, w którym części stałe zajmują $6,5 \div 8,7\%$ objętości. Są one transportowane rurociągami do OUOW Żelazny Most, który jest jedynym miejscem deponowania odpadów z flotacji rud miedzi pochodzących z wszystkich Zakładów Górniczych KGHM Polska Miedź S.A., co powoduje, że stanowi on kluczowe ogniwo technologiczne, bez którego produkcja koncentratu miedziowego byłaby niemożliwa.

Budowę OUOW Żelazny Most rozpoczęto w 1974 roku, a jego eksploatacja i równoczesna rozbudowa trwa od 1977 roku. Obecnie Obiekt jest rozbudowywany do pojemności całkowitej 700 mln m^3 , przy pojemności użytkowej około 640 mln m^3 i rzędnej korony zapór 180 m n.p.m. Zbiornik z wszystkich stron ograniczają zapory ziemne (rys. 1). Ze względu na zastosowaną technologię rozbudowy OUOW „do środka”, oprócz początkowego obwałowania – zapory podstawowej, do budowy której wykorzystano rodzime grunty piaszczyste, zapory są wznoszone z odpadów deponowanych na OUOW. Długość obwodu wszystkich zapór wynosi 14,35 km. Wysokość zapór jest determinowana przez morfologię terenu, na którym jest wzniesiony OUOW, i obecnie waha się od około 28 m n.p.t. (zapora południowa) aż do około 63 m n.p.t. w najwyższym miejscu (zapora wschodnia).

Zarówno w płytkim, jak i głębokim podłożu OUOW Żelazny Most, występują bardzo skomplikowane warunki geologiczne (rys. 2). Na przeważającej części obwodu OUOW jego zapory są posadowione na podłożu zbudowanym z czwartorzędowych gruntów spoiowych i niespoistych. Pomimo tego, na ich statecz-

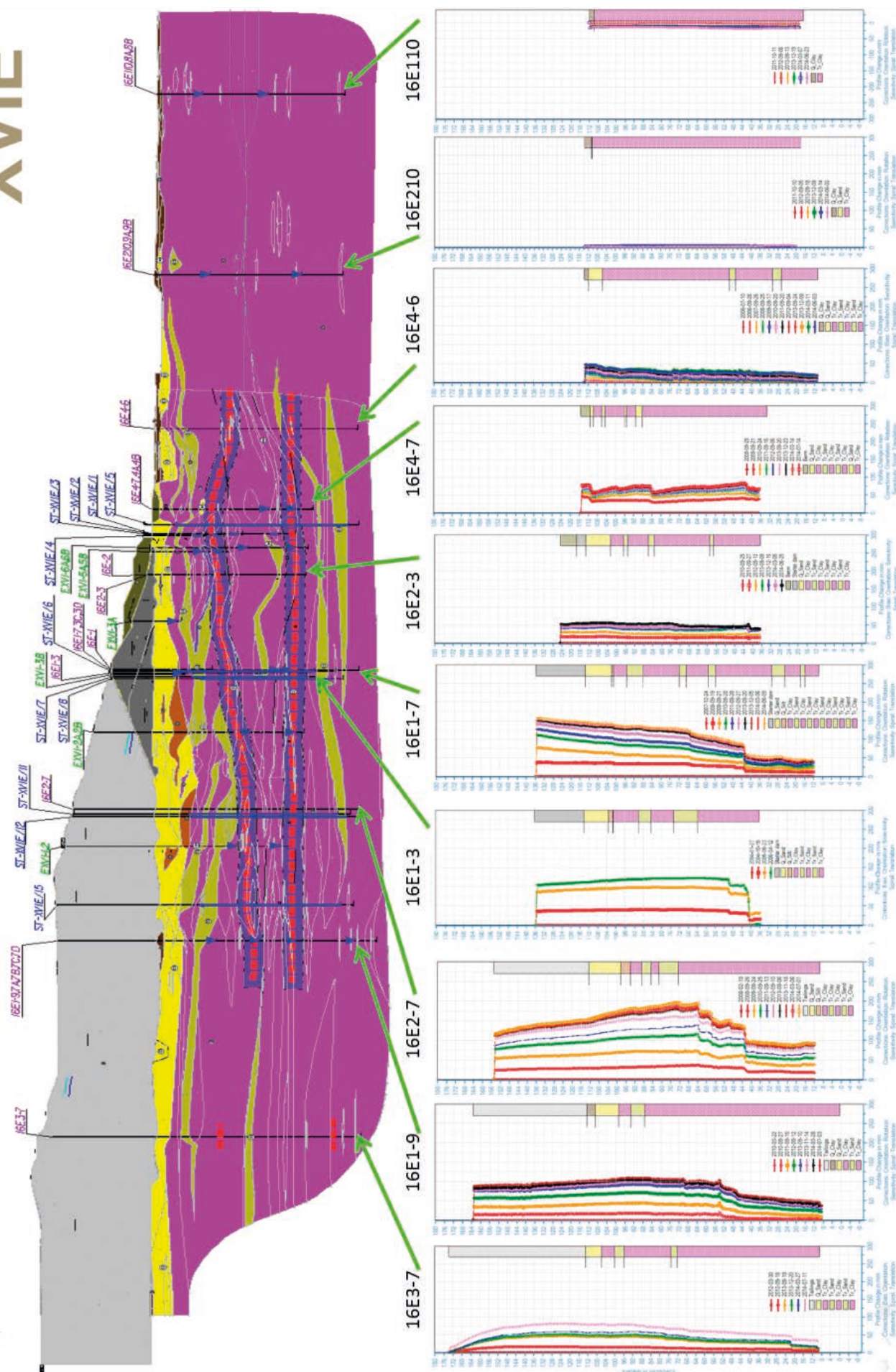
ność największy wpływ mają utwory neogenu, a w szczególności bardzo spoiowe iły plioceńskie, które podczas zlodowaceń uległy deformacjom glaciektonicznymi. Występują one w podłożu w postaci łusek, nasunięć i porwaków z wychodniami na powierzchnię terenu. Oprócz tego w ilach tych występują zlustringowania, co dodatkowo osłabia ich wytrzymałość.

Ze względu na rozmiary obiektu i jego znaczenie dla KGHM Polska Miedź S.A., a co za tym idzie zapewnienie nieprzerwanej i bezpiecznej eksploatacji OUOW Żelazny Most, w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku powołano grupę konsultantów międzynarodowych – Zespół Ekspertów Międzynarodowych (ZEM), w skład której weszli uznani specjaliści z zakresu mechaniki gruntów, geotechniki i geologii. Po przeprowadzeniu wielu analiz ZEM zalecił zastosowanie tzw. „metody obserwacyjnej” przy projektowaniu i rozbudowie OUOW Żelazny Most [1]. Projektowanie przy wykorzystaniu metody obserwacyjnej polega głównie na ocenie aktualnych parametrów geotechnicznych otrzymanych z analizy wyników prowadzonego monitoringu oraz wykonywanych badań, dzięki czemu można wyciągać wnioski na temat zachowania się obiektu będącego przedmiotem obserwacji [4].

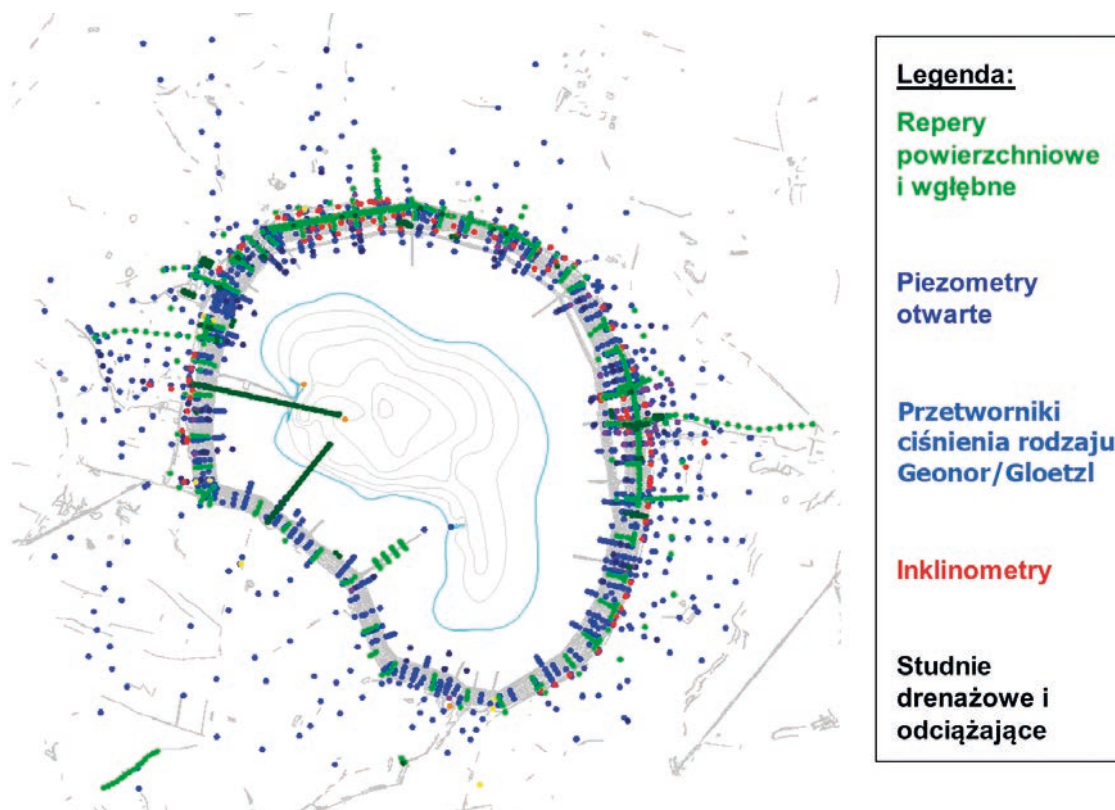
SYSTEM MONITOROWANIA ZAPÓR SKŁADOWISKA

Monitoring geotechniczny składowiska Żelazny Most dotyczy zjawisk stanowiących o bezpieczeństwie użytkowania obiektu. Należy do nich zaliczyć obserwacje:

- położenie zwierciadła wody w korpusie zapory i podłożu oraz ciśnienia wody w porach spoiowych gruntów podłoża,
- deformacje i przemieszczenia zapór składowiska oraz podłoża,
- wydajność drenaży oraz przepływy w rowach,
- wstrząsy parasejsmiczne.



Rys. 2. Wycinek przekroju XVIE – skomplikowana budowa geologiczna podłoża



Rys. 3. Lokalizacja urządzeń Aparatury Kontrolno Pomiarowej (AKP)

Skuteczny monitoring powinien zapewniać stały dopływ wiarygodnych informacji o stanie obiektu. Wiarygodność informacji zależy od jakości funkcjonowania urządzeń monitorujących. Fakt ten nabiera szczególnej wagi przy stosowaniu metody obserwacyjnej w projektowaniu dalszej rozbudowy składowiska. Przy takim podejściu przyjmowane do projektowania parametry koryguje się w zależności od wyników uzyskanych z urządzeń aparatury kontrolno-pomiarowej (AKP), tworzących sieć monitoringu. Funkcjonująca na OUOW sieć monitoringu jest bardzo rozbudowana ze względu na jego skalę i znaczenie.

Ze względu na technologię deponowania odpadów obwód OUOW podzielono na sekcje namywu, w których poprzecznie do zapór wytyczono przekroje pomiarowe, w których są instalowane urządzenia AKP. Na składowisku zainstalowano, między innymi, 1642 piezometry różnego rodzaju, 311 przetworników ciśnienia, ponad 480 geodezyjnych punktów pomiarowych, 89 inklinometrów (rys. 3). W dalszej części przedstawiono krótką charakterystykę urządzeń zainstalowanych na składowisku Żelazny Most.

APARATURA „TRADYCYJNA”

Repery powierzchniowe i wglębne. Geodezyjna sieć obserwacyjna służąca do badań deformacji zapór i przedpoła OUOW Żelazny Most składa się z 480 punktów badawczych, którymi są znaki geodezyjne zastabilizowane w zaporze podstawowej zbiornika oraz we wznoszonym coraz wyżej korpusie zapory, na kolejnych jego poziomach (półkach). Oprócz tego punkty takie są zastabilizowane na przedpołu zapory w odległościach

Tabl. 1. Liczba piezometrów otwartych zainstalowanych na przedpołu i zaporze składowiska Żelazny Most – stan na 01.11.2014 roku

Rodzaj urządzenia	Lokalizacja	Liczba	Suma
Piezometr otwarty	Zapora	1198	1642
	Przedpole	444	
Przetworniki ciśnienia	Zapora	272	311
	Przedpole	39	
Inklinometry	Płytkie < 79 m	15	89
	Głębokie > 79 m	74	

od 50 do 500 m od osi korony. Część znaków geodezyjnych stanowią repery wglębne, których zadaniem jest pomiar osiadań naturalnego podłoża wywołanych obciążeniem zaporą.

Piezometry otwarte zainstalowane na zaporach i przedpołu OUOW służą do obserwacji zmian poziomu wody w osadach i w podłożu oraz oceny jakości wód filtrujących ze zbiornika. Liczbę piezometrów otwartych zlokalizowanych w poszczególnych częściach zapory przedstawiono w tabl. 1.

Pomiar wydajności drenaży. Pomiary objętości wody odpływającej z poszczególnych odcinków i zespołów drenaży, na tle wahań poziomu piezometrycznego w wytypowanych punktach pomiarowych mają na celu:

- ocenę skuteczności drenaży,
- uchwycenie zmian w działaniu drenażu oraz ustalenie ich przyczyn,

- ogólne scharakteryzowanie zjawisk filtracyjnych mających miejsce w korpusie zapory,
- określenie łącznej objętości wody odprowadzanej omawianym drenażem w celach bilansowych.

POMIAR CIŚNIENIA WODY W PORACH GRUNTÓW PODŁOŻA

Na OUOW Żelazny Most zainstalowano ponad 170 sztuk strunowych przetworników ciśnienia rodzaju Geonor lub Glotzl (tabl. 3), które pozwalają na wykonywanie pomiarów ciśnienia wody w porach, w jednym otworze na różnych, określonych przez projektanta głębokościach. Czujniki takie są wyposażone w czule stalowe membrany, na które oddziałuje ciśnienie wody otaczającego czujnik ośrodka gruntowego, powodując zmiany napięcia i drgania stalowej struny połączonej z membraną. Po przetworzeniu sygnał ten daje informacje na temat wysokości ciśnienia wody w porach podłoża.

POMIARY INKLINOMETRYCZNE

Pomiary inklinometryczne są istotnym elementem systemu monitoringu zapór OUOW Żelazny Most i jego przedpola. Celem instalacji inklinometrów jest objęcie pomiarami przemieszczeń poziomych w podłożu zapór. Największe deformacje poziome spowodowane obciążeniem zaporą i osadami występują głównie w warstwach przeobrażonych glaciektonicznie iłów plioceńskich, ze względu na obniżone parametry wytrzymałościowe. Na OUOW zainstalowano 74 głębokie inklinometry (o długości od 79 do 164 m p.p.t.) oraz 15 płytkich (od 20,5 ÷ 56,5 m p.p.t.). Pomiary wykonuje się sondą wyposażoną w dwa serwoakcelerometryczne przetworniki wychyleń kątowych, co umożliwia jednoczesny pomiar przemieszczeń poziomych w dwóch płaszczyznach. Przykładowe wyniki pomiarów inklinometrycznych zaprezentowano na rys. 2.

POMIARY ZAUTOMATYZOWANE

Na składowisku zainstalowano zautomatyzowany system pomiaru i rejestracji zmian poziomu wody w piezometrach zlokalizowanych w wybranych przekrojach.

W celu monitorowania deformacji powierzchniowych najbardziej wrażliwych odcinków zapór, na środkowej – najwyższej – części zapory wschodniej uruchomiono automatyczny system pomiarów przemieszczeń powierzchniowych firmy Leica – GeoMoS, stanowiący część monitoringu geodezyjnego. Na stacji monitorującej wykonuje się pomiary współrzędnych i rzędnych 23 mikro-luster zlokalizowanych na skarpie odwodniającej zapory wschodniej. Również na zaporze północnej w dwóch jej rejonach zlokalizowano cztery stanowiska GPS do precyzyjnych pomiarów przemieszczeń powierzchni zapór.

INSPEKCJE WIZUALNE

Niezależnie od pomiarów urządzeń AKP bardzo ważne jest prowadzenie stałych obserwacji wizualnych stanu zapory. Oce-

ny wizualne stanu składowiska są wykonywane w formie obchodu zapór oraz ich elementów, które mają istotny wpływ na bezpieczeństwo. Częstotliwość wykonywanych obchodów dobrano w taki sposób, aby w cyklu miesięcznym przeprowadzić szczegółowe inspekcje na całym obwodzie OUOW. Obserwacje są prowadzone według stałego schematu, co umożliwia łatwe porównanie stanu poszczególnych elementów zapór. Wyniki obchodu są dokumentowane w specjalnych formularzach oraz w formie dokumentacji fotograficznej, które zapewniają znaczącą pomoc przy interpretacji wyników z pomiarów urządzeń AKP.

ORGANIZACJA MONITORINGU W ZAKŁADZIE HYDROTECHNICZNYM

Bardzo ważna jest koordynacja i zintegrowana analiza wyników pomiarów ze wszystkich urządzeń, tj. piezometrów otwartych, czujników strunowych, inklinometrów, geodezyjnych punktów kontrolowanych, wydajności drenażu. Zjawiska jakie zachodzą na OUOW Żelazny Most są monitorowane przez powołaną do tego komórkę specjalistów do spraw monitoringu.

W celu gromadzenia, weryfikacji, aktualizacji, przetwarzania i udostępniania tematycznych bloków danych: geodezyjnych, geologicznych, hydrogeologicznych, geotechnicznych i geofizycznych pochodzących z sieci monitoringu OUOW Żelazny Most stworzono kompleksową informatyczną bazę danych z informacjami o obiekcie pod nazwą SyZeM – System Żelazny Most.

WYKORZYSTANIE WYNIKÓW MONITORINGU W PROCESIE PROJEKTOWANIA I BUDOWY – METODA OBSERWACYJNA

Metoda obserwacyjna w budownictwie polega na ocenie parametrów geotechnicznych w złożonych warunkach geologiczno-inżynierskich na podstawie zachowania się wznoszonej budowli. Wykorzystując wyniki uzyskane z odpowiednio prowadzonego monitoringu obiektu można przeprowadzić analizę wsteczną, dzięki czemu można ocenić tzw. projektowe parametry obserwacyjne. Parametry te, zastosowane w obliczeniach, umożliwiają przeprowadzenie korekt rozwiązań projektowych [5].

Mówiąc ogólnie, metoda obserwacyjna jest procesem, w którym w trakcie budowy wyniki obserwacji (monitoringu) są porównywane z założeniami i, w zależności od potrzeb, są wprowadzane modyfikacje do pierwotnego projektu. Stosowanie takiego rozwiązania daje potencjalne oszczędności czasu i kosztów, a monitoring pozwala na zapewnienie bezpieczeństwa konstrukcji.

ANALIZA WYNIKÓW Z MONITORINGU

Od 1981 roku na zaporze wschodniej są prowadzone ciągłe pomiary geodezyjne [3]. Na początku lat dziewięćdziesiątych zaobserwowano zwiększanie się tempa powierzchniowych przemieszczeń poziomych punktów kontrolowanych w przekrojach pomiarowych XVIIE i XVIIIIE. Obserwowane do tej pory przemieszczenia poziome punktu kontrolowanego pk208 zainstalowanego w przekroju XVIIE na linii pomiarowej na koronie

zaporę podstawowej, które nie były większe niż około 10 mm rocznie, podwoiły wówczas swoją wielkość.

Do monitorowania ciśnień w podłożu wykorzystywano za-instalowane na zaporze i przedpolu zapory piezometry otwarte, z filtrami zlokalizowanymi w przepuszczalnych soczewkach i przewarstwieniach przeobrażonych glaciektonicznie spolistych utworów neogenu. Obserwowane w tych piezometrach zwierciadło wody układało się blisko powierzchni terenu naturalnego i ponad nią.

Informacje na temat przemieszczeń w podłożu przekroju XVIIe dostarczyły inklinometry instalowane od 2001 roku. Początkowo były one dość płytkie, a ich głębokość instalacji nie przekraczała 56 m p.p.t. Monitorowały one przemieszczenia dużej, płytko zalegającej łuski nasunięcia przeobrażonych glaciektonicznie utworów neogonicznych zbudowanych głównie z ilów i glin płoceńskich. Interpretacja wyników pomiarów inklinometrycznych w nawiązaniu do powierzchniowych przemieszczeń mierzonych geodezyjnie wykazała, że dno rury inklinometrycznej nie jest zainstalowane w stabilnym podłożu, co powoduje przemieszczanie się całego profilu inklinometru wraz z podłożem. Pomimo to w jednym inklinometrze udało się zaobserwować wystąpienie stref ścinania.

Wykorzystując dane uzyskane z urządzeń AKP, przeprowadzono analizy stateczności zapory wschodniej. Na tej podstawie ZEM zalecił wykonanie środków stabilizacyjnych, które pozwoliłyby na opanowanie sytuacji i zmniejszenie przemieszczeń poziomych [2].

Głównym zabiegiem stabilizacyjnym mającym poprawić stateczność zapory w rejonie zwiększonych przemieszczeń poziomych była budowa dociążenia podstawy zapory. Jednak ZEM podkreślał, że samo dociążenie może nie przynieść zadowalających rezultatów ze względu na występowanie w podłożu, w miąższej warstwie ilów płoceńskich, dużych wartości ciśnień wody w porach. Z tego powodu zalecono wspomóc wpływ dociążenia przez instalację głębokich studni drenażowych – odciążających. Miały one wpłynąć na redukcję ciśnienia wody w porach podłoża, a tym samym zwiększenie sztywności i wytrzymałości podłoża przez zwiększenie naprężenia efektywnego w powierzchniach poślizgu, które obserwowano w inklinometrach.

Podkreślono jednak, że w celu osiągnięcia pełnego efektu, czyli obniżenia ciśnienia wody w porach poniżej ciśnienia hydrostatycznego, jest niezbędne prowadzenie ciągłego pompowania wody z zainstalowanych studni.

Ponadto, oprócz tych dwóch zabiegów postanowiono również o przesunięciu nadbudowy korony zapory do środka obiektu na odcinku największych przemieszczeń.

PODSUMOWANIE

Monitoring geotechniczny OUOW Żelazny Most pełni podwójną rolę:

- dostarcza podstawowych danych do oceny stanu technicznego i bezpieczeństwa obiektu – funkcja wczesnego ostrzegania,
- dostarcza niezbędnych informacji do projektowania kolejnych etapów podwyższenia składowiska i ewentualnej weryfikacji przyjętych założeń projektowych.

Dzięki zastosowaniu metody obserwacyjnej w procesie projektowania rozbudowy OUOW Żelazny Most była możliwa identyfikacja zagrożenia stateczności zapory wschodniej w rejonie przekroju XVIIe. Rozbudowana sieć monitoringu, w skład której wchodziły urządzenia monitoringu geodezyjnego (punkty kontrolowane i repery), hydrogeologicznego (piezometry i przetworniki strunowe) oraz geotechnicznego (inklinometry) zaobserwowano zwiększanie się tempa przemieszczeń powierzchniowych zapory i połączono je z obserwowanymi wysokimi ciśnieniami wody w podłożu oraz z aktywacją osłabionych stref w podłożu (strefy ścinania).

Analiza uzyskanych danych umożliwiła podjęcie decyzji o wprowadzeniu środków zaradczych – zabiegów stabilizacyjnych mających przeciwdziałać zwiększającym się przemieszczeniom:

- wykonanie dociążenia podstawy zapory wschodniej w rejonie przekroju XVIIe,
- instalacja głębokich studni odciążających w rejonie przekroju XVIIe,
- przesunięcie nadbudowy korony zapory o rzędnej 167,5 m n.p.m. w kierunku do akwenu, na odcinku zapory wschodniej.

Stałe pompowanie wody ze studni odciążających dały efekty w postaci znacznej redukcji ciśnienia wody w porach w przeobrażonych glaciektonicznie warstwach ilów płoceńskich, w których występują strefy ścinania.

Efekt pompowań w połączeniu z pozostałymi zabiegami stabilizacyjnymi można zaobserwować w postaci zahamowania tempa obserwowanych przemieszczeń powierzchniowych zapory na analizowanym obszarze. Pozytywne rezultaty zabiegów stabilizacyjnych potwierdziły również przeprowadzone obliczenia stateczności, które wykazały wzrost wartości współczynników stateczności. Do analiz przyjmowano aktualne ciśnienia wody w porach – obniżone w wyniku pompowań.

LITERATURA

1. Jamiolkowski M., Carrier W. D., Chandler R. J., Höeg K. (Zespół Ekspertów Międzynarodowych): Raport Końcowy. Ocena bezpieczeństwa formowania nasypów składowiska Żelazny Most do rzędnej korony 200 m n.p.m., 1999.
2. Jamiolkowski M., Carrier W. D., Chandler R. J., Höeg K.: III Raport Roczny ZEM 2004, Zespół Ekspertów Międzynarodowych, Warszawa 2004.
3. Jura J.: Interpretacja wyników geodezyjnych pomiarów deformacji zapór i przedpola oraz obiektów specjalnych w rejonie OUOW „Żelazny Most” – seria 2013. AGH Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Ochrony Terenów Górniczych, Geoinformatyki i Geodezji Górniczej, Kraków, 2014.
4. Peck R. B.: Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics, *Geotechnique*, 19, Nr. 1, str. 171–187, London 1999, 1969.
5. Stefanek P., Romaniuk D., Sorbian P.: Zastosowanie metody obserwacyjnej przy bezpiecznym wznoszeniu budowli geotechnicznych na przykładzie Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych Żelazny Most. *Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnicztwa Rud Cuprum*, 2013.