

Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych „Żelazny Most” – olbrzymie wyzwanie geotechniczne

Dr hab. inż. Waldemar Świdziński – Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Dr hab. inż. Wojciech Tschuschke – Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska

Mgr inż. Wiesław Świerczyński – O/ZH KGHM POLSKA MIEDŹ S.A.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Wolski – Geoteko sp. z o.o., Warszawa

Składowisko „Żelazny Most”, które od 2008 roku na mocy ustawy o odpadach wydobywczych stało się Obiektem Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych (OUOW) „Żelazny Most”, rozpoczęło pracę w 1977 roku z przeznaczeniem do składowania odpadu powstałego z flotacyjnego wzbogacania rud miedzi. Rudy miedzi wydobywane ze znacznych głębokości zawierają jedynie niewielki procent czystego metalu, natomiast resztę stanowi odpad w postaci rozkruszonych skał, powstały w procesie flotacji. Szacuje się, że odpady poflotacyjne stanowią około 94% wydobywanego urobku, który musi być zagospodarowany. Rocznie, Zakłady Wzbogacania Rudy (ZWR), odbierające rudę z trzech obecnie działających kopalń: „Lubin”, „Polkowice-Sieroszowice” i „Rudna”, produkują około 29 mln ton odpadów poflotacyjnych.

Po zamknięciu w 1980 roku składowiska „Gilów” jedynym miejscem deponowania odpadu poflotacyjnego z całego zagłębia miedziowego jest OUOW „Żelazny Most”, co powoduje, że stanowi on kluczowe ogniwo technologiczne, bez którego produkcja koncentratu miedziowego byłaby niemożliwa.

Skomplikowana budowa geologiczna podłoża składowiska oraz rosnący nacisk wywołany masą zdeponowanych odpadów powodują, że najistotniejszym elementem z punktu widzenia bezpieczeństwa w procesie projektowym kolejnych, wyższych obwałowań składowiska jest stateczność jego zapór. Stateczność ta jest determinowana zarówno wytrzymałością warstw podłoża, jak też masywu osadów. W przypadku tego pierwszego, szereg następujących po sobie złożonych procesów geologicznych oraz towarzyszących im zjawisk glaciektonicznych i peryglacialnych spowodował niekorzystne przekształcenia podłoża rodzimego pod obiektem skutkujące powstaniem szeregu stref osłabień. Te stosunkowo głęboko leżące strefy uaktywniły się w trakcie rozbudowy obiektu w wyniku rosnącego nacisku wywołanego rosnącym masywem odpadów. Z kolei masyw odpadów, który jest zbudowany z gruntów piaszczystych, lokalnie o dużej zawartości frakcji drobnej, a dodatkowo nawodnionych, może być podatny na zjawisko upłynnienia.

Potencjalne zagrożenie utratą stateczności czy też upłynnieniem się osadów zdeponowanych w obiekcie potęguje fakt występowania w pobliżu obiektu wstrząsów górniczych, które ze względu na bliskie sąsiedztwo kopalń powodują, że na zapory ziemne i masyw osadów oddziałują dodatkowe obciążenia dynamiczne podobne do tych, generowanych w czasie naturalnych trzęsień ziemi.

To wszystko sprawia, że bezpieczna eksploatacja obiektu, jak też jego dalsza rozbudowa poprzez podwyższanie jego obwałowań wymaga prowadzenia bardzo specjalistycznych badań geotechnicznych zarówno w warunkach polowych, jak i laboratoryjnych. Zakres i jakość prowadzonych badań oraz wymagania związane z zapewnieniem bezpieczeństwa zapór powodują,

że OUOW „Żelazny Most” ogniskuje w sobie najwyższe światowe standardy geotechniczne.

W artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące budowy geologicznej i geotechnicznej podłoża OUOW „Żelazny Most” oraz masywu osadów. Pokazano podstawowe działania geotechniczne zmierzające do oceny wytrzymałości gruntów budujących podłoże naturalne oraz osadów poflotacyjnych prowadzone zarówno poprzez specjalistyczne badania polowe (głębokie wiercenia dochodzące do 160 m z poborem prób NNS, sondowania CPTU, SCPTU, DMT, SDMT, badania *cross-hole* i *down-hole*), jak też laboratoryjne (specjalistyczne badania trójosiowe rodzaju TXCIU, TXCK₀U, TXEK₀U z pomiarem prędkości fali sejsmicznej zarówno monotoniczne, jak i cykliczne, badania w aparacie pierścieniowym, badania edometryczne i konsolidometryczne przy bardzo dużych obciążeniach, itd.).

Artykuł stanowi generalne wprowadzenie do zgłoszonej na konferencję serii prac dotyczących OUOW „Żelazny Most”, w których przedstawiono szczegółowo znakomitą część zasygnalizowanych zagadnień.

KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Nieprzerwany od prawie już 40 lat proces systematycznego deponowania odpadów w składowisku spowodował, że OUOW „Żelazny Most” stał się największym tego rodzaju obiektem w Europie i jednym z największych na świecie. Zajmuje on obszar około 1400 ha, a wysokość jego zapór osiągnie niedługo lokalnie 70 m. Pod koniec 2013 roku ilość zgromadzonych w jego wnętrzu odpadów wyniosła ponad 540 mln m³. W długofalowych planach związanych z wydobywaniem miedzi przewiduje się, że będzie istniała potrzeba zdeponowania dodatkowych 400 mln m³ odpadów.

Odpady poflotacyjne w postaci mieszaniny wód kopalniano-technologicznych i mielonych skał są doprowadzane do składowiska systemem rurociągów metodą hydrotransportu i gromadzone w jego czaszy w procesie namywu. Namyw płynnych odpadów odbywa się sekcjami o szerokości kilkuset metrów. W czasie namywu wody kopalniano-technologiczne wpływają grawitacyjnie do środka składowiska, zasilając tzw. staw nadosadowy (akwen), gdzie odbywa się klarowanie wody, która wieżami ujęciowymi jest następnie zwracana do ZWRów (około 0,5 mln m³ dziennie!) i wykorzystana do procesu flotacji.

Przy przyjętej metodzie rozbudowy składowiska do środka i ku górze odbiór kolejnych partii odpadów wiąże się z sukcesywnym podwyższaniem rzędnych zapór ograniczających deponowane odpady, co powoduje, że powierzchnia składowiska nie zmienia się, zwiększa się natomiast jego wysokość.

Zapory składowiska są zaporami ziemnymi. Jedynie w początkowym etapie zbudowano je z materiału nawiezionego (piaszczysto-żwirowego), tworząc nasyp ograniczający zwany zaporą podstawową. Kolejne obwałowania tworzące zapory były już wykonywane z materiału pozyskanego ze zdeponowanych w składowisku odpadów. Wysokość formowania poszczególnych odcinków obwałowań ma stałą wartość i wynosi 5 m. Przy średniej rocznej objętości deponowanych odpadów wynoszącej 18 mln m³ średnie roczne tempo przyrostu odpadów w składowisku wynosi około 1,3 m.

Nadbudowywaną część korpusu zapory posadowiono na istniejącej koronie obwałowania oraz na odpowiednio przygotowanym przyległym pasie plaży w taki sposób, aby skarpa odpowietrzna korpusu stanowiła przedłużenie skarpy istniejącej. Do rzędnej korony 150 m n.p.m. konstrukcję poszczególnych zapór dostosowano do ukształtowania terenu. Najniższe rzędne terenu przed budową składowiska występowały w najniższym miejscu zapory wschodniej – 112 m n.p.m., a najwyższe w najwyższym miejscu zapory południowej – 150 m n.p.m. Obecna rzędna korony wszystkich czterech zapór, nazwanych zgodnie z kierunkami stron świata, zbliża się do 180 m n.p.m., a ich średnie nachylenie wynosi około 1:4,5. Zróżnicowanie morfologiczne terenu rodzimego w miejscu lokalizacji obiektu oraz jego skalę pokazano schematycznie na rys. 1, wykorzystując trójwymiarowy model terenu [7].

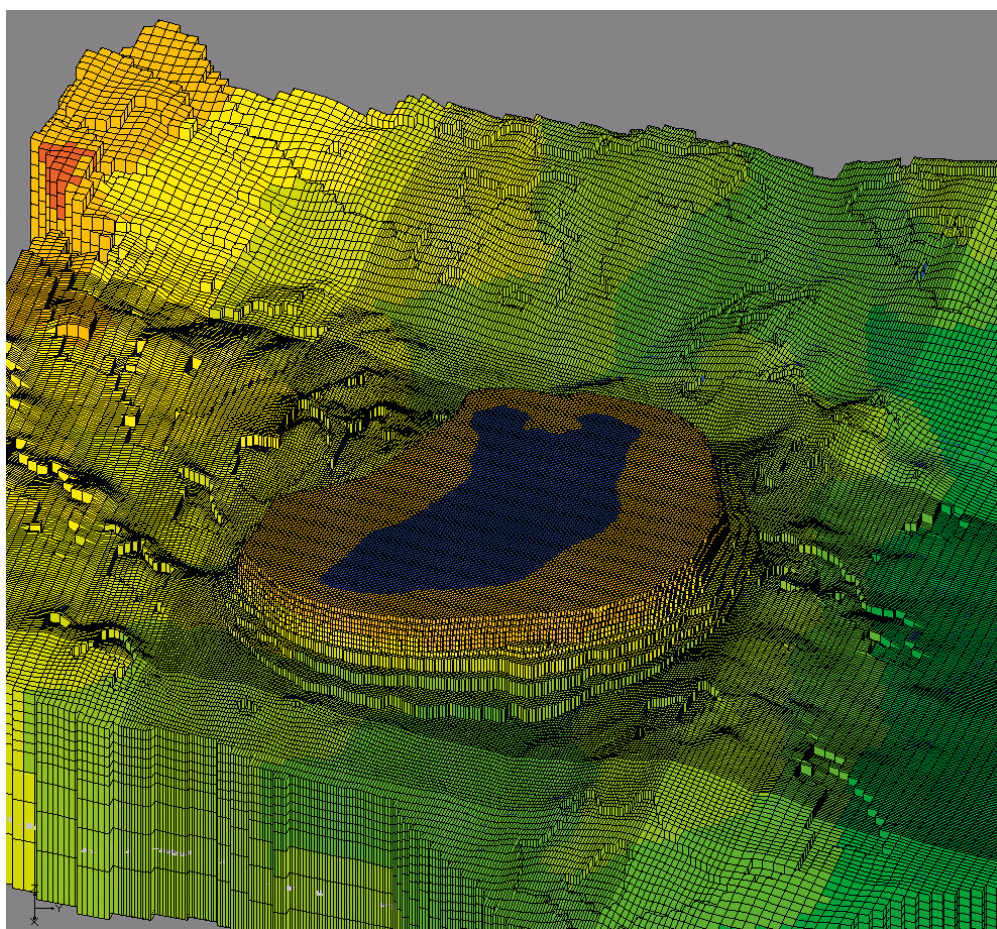
Ze względu na to, że zapory obiektu są zaporami rodzaju filtracyjnego, umożliwiającymi przepływ wód nadosadowych

w kierunku niżej położonych warstw podłoża pod masywem osadów i na przedpolu, na składowisku istnieje rozbudowany system drenażu. Podstawowym zadaniem systemu drenażowego jest utrzymanie jak najniższego położenia krzywej depresji w masywie osadów i korpusach zapór oraz przejście części wód nadosadowych migrujących w podłoże składowiska w celu ograniczenia degradującego wpływu zasolonych wód na wody podziemne. Zasadnicze elementy tego systemu to drenaż zapory podstawowej wraz z drenażami wspomagającymi, rowy opaskowe, drenaż pierścieniowy oraz drenaż pionowy w postaci tzw. studni odciążających oraz studni drenażowych (rys. 2).

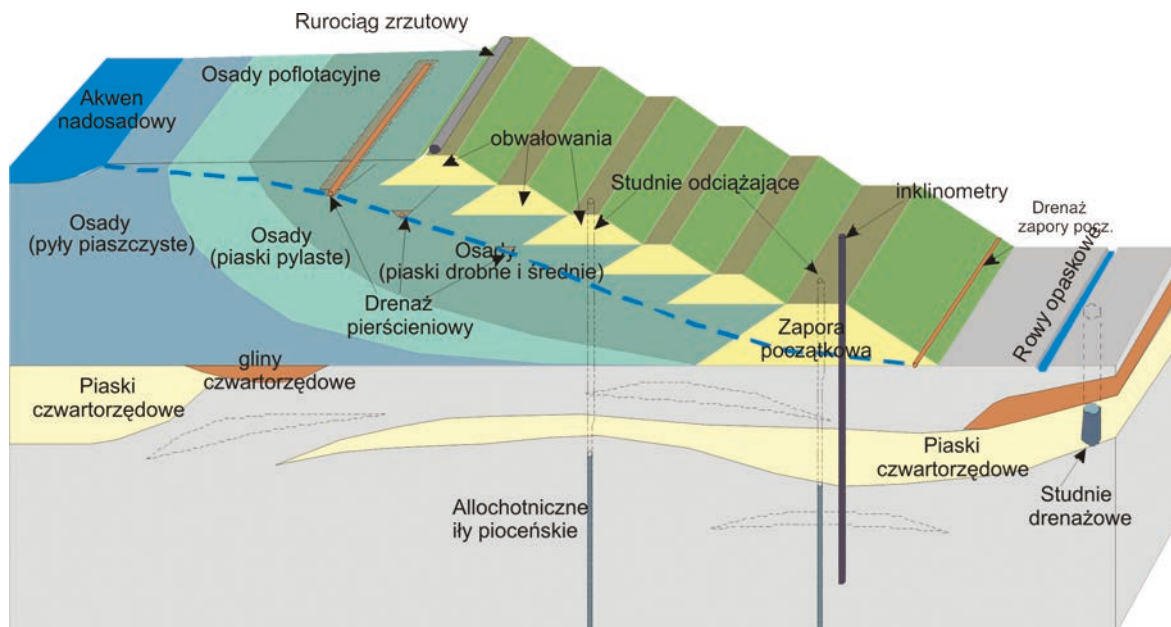
Projektowanie kolejnych, wyższych obwałowań obiektu odbywa się metodą obserwacyjną, Eurokod 7. Metoda ta polega na ciągłej weryfikacji projektu podczas wznoszenia obiektu w ramach przyjętych dopuszczalnych granic zachowania konstrukcji wyrażonych wartościami dopuszczalnych deformacji i sił wewnętrznych, ustaleniu programu monitorowania i planu działań naprawczych wdrażanych w przypadku, gdy obserwacje wykażą zachowania wykraczające poza akceptowane granice.

Inicjatorem rozbudowy obiektu na podstawie metody obserwacyjnej jest, powołany w 1992 roku przez właściciela obiektu, Zespół Ekspertów Międzynarodowych (ZEM), na czele którego stoi prof. M. Jamiołkowski. Od ponad 20 lat ZEM stanowi podstawowe ciało doradcze i opiniotwórcze w zakresie bezpiecznej eksploatacji i rozbudowy obiektu.

Ocena stateczności zapór składowiska odbywa się każdorazowo w ramach projektów wykonawczych do kolejnych



Rys. 1. OUOW „Żelazny Most” na tle morfologii terenu na podstawie trójwymiarowego modelu terenu [8]



Rys. 2. Schematyczny typowy przekrój przez zapory OUOW „Żelazny Most” z systemem drenażu

wyższych obwałowań w module co 5 m, realizowana w około 100 przekrojach poprzecznych, a w najbardziej krytycznych 26 przekrojach w module co 2,5 m. Projektowanie to jest każdorazowo poprzedzone aktualizacją rozpoznania geologicznego, hydrogeologicznego oraz geotechnicznego na podstawie wykonanych wcześniej sondowań i otworów badawczych, uzupełnionych o aktualne dane z monitoringu. W ramach projektów wykonawczych dokonuje się szczegółowych analiz stateczności, wykorzystując głównie metody pseudo-statyczne [10].

BUDOWA GEOLOGICZNA I GEOTECHNICZNA PODŁOŻA OUOW „ŻELAZNY MOST”

Ze względu na to, że teren lokalizacji obiektu w okresie plejstocenu był poddany trzem kolejnym zlodowaceniom, jego budowa geologiczna i wynikająca z niej budowa geotechniczna są bardzo skomplikowane. Lodowce, których miąższość przekraczała ponad 1000 m, wywołały szereg procesów glacytektonicznych i peryglacialnych, które w istotny sposób przeobraziły i zniszczyły pierwotną strukturę układu warstw geologicznych podłoża rodzimego. Dotyczy to szczególnie warstw ilów trzeciorzędowych (plioceńskich), które na obszarze tym podlegały silnym deformacjom glacytektonicznym, prowadzącym do ich sfaldowania i spiętrzenia. Lokalnie ily zostały odklute od pierwotnego poziomu i nasunięte oraz przemieszczone jako porwaki w osady fluwioglacjalne plejstocenu. Iły zdeformowane glacytektonicznie są silnie zlustrowane wielokierunkowo, a strefy tych zaburzeń sięgają niejednokrotnie głębokości około 100 m, w istotny sposób determinując stateczność zapór obiektu. Konsekwencją przeobrażeń glacytektonicznych jest fakt występowania w podłożu rodzimym obiektu starszych utworów trzeciorzędowych nad młodszymi czwartorzęдовymi, niejednokrotnie z wychodniami na powierzchni terenu. Dodatkowo, na skutek cofania się i postępujących ruchów lodowca, zachodzących w okresach peryglacialnych, przypowierzchniowa strefa grun-

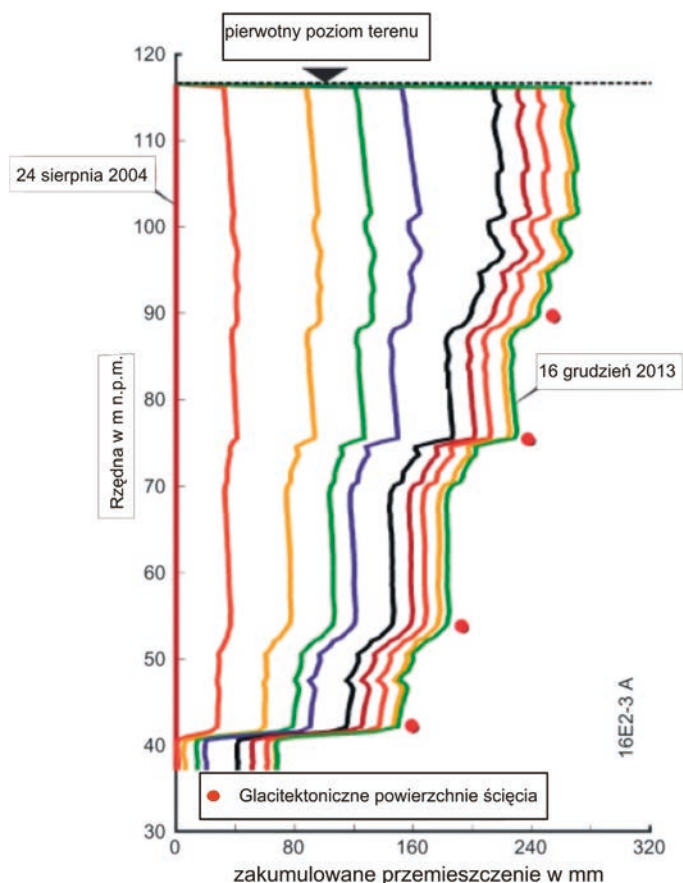
tów podlegała powtarzającym się procesom odmarzania i zamrażania, w wyniku których wytworzyły się w niej zmiany rodzaju soliflukcyjnego lub krioturbacyjnego, również z wyraźnymi cechami osłabień wytrzymałościowych.

Zdeformowane glaciektonicznie iły trzeciorzędowe zostały wydzielone jako tzw. iły allochtoniczne, w odróżnieniu od iłów *in situ* (rys. 2). Iły allochtoniczne charakteryzują się występowaniem stref o niskiej wytrzymałości na ścinanie, zalegających na różnych głębokościach. Z geotechnicznego punktu widzenia zjawiska glaciektonicznie wywołane przejściem lodowca spowodowały wystąpienie w podłożu układu naprężenia odpowiadającego prostemu ścinaniu [1].

W ostatnich 10 latach „uśpione” powierzchnie poślizgu uaktywniły się lokalnie w wyniku rosnącego obciążenia wywołanego coraz wyższym nakładem deponowanych osadów. Powierzchnie te zidentyfikowano na podstawie pomiarów inklinometrycznych w głębokich inklinometrach zainstalowanych w miejscach występowania w podłożu allochtonicznych ilów trzeciorzędowych (rys. 3).

Innym negatywnym efektem rosnącego obciążenia podłoża masywem odpadów o znacznej miąższości jest występowanie w warstwach iłów trzeciorzędowych znacznej nadwyżki ciśnienia wody w porach, którego swobodne zwierciadło nierzadko kształtuje się nad powierzchnią terenu. Ze względu na niską przepuszczalność iłów trzeciorzędowych ciśnienie wody w porach w wyniku konsolidacji może zanikać bardzo powoli, przez wiele lat. Stąd, zgodnie z zaleceniem ZEM, w celu przyspieszenia procesów konsolidacyjnych, w miejscach występowania pod zaporami allochtonicznych iłów trzeciorzędowych, zainstalowano system tzw. studni odciążających z długim ciągłym filtrem.

Dokładna identyfikacja stref ścięcia oraz wiarygodne wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych w zlokalizowanych strefach osłabień jest kluczowe do właściwej oceny stateczności zapór. Jednakże, jak pokazują badania, strefy osłabień z parametrami wytrzymałościowymi bliskimi rezydującym są niecia-



Rys. 3. Wyniki pomiarów inklinometrycznych prowadzone w latach 2008-2013 w inklinometrze zainstalowanym na zaporze wschodniej [1]

głe i nieregularne, charakteryzujące się dużą zmiennością przestrzenną, co powoduje, że odtworzenie wiarygodnego modelu budowy geologicznej i geotechnicznej podłoża jest zadaniem niezwykle trudnym [1]. Stąd potrzeba nieustannego prowadzenia badań podłoża obiektu, szczególnie w miejscach występowania zdeformowanych glacitektonicznie iłów trzeciorzędowych.

Badania polowe

Główne cele prowadzenia permanentnego rozpoznania podłoża pod obiektem to:

- identyfikacja głęboko leżących powierzchni osłabień w allochtonicznych iłach plioceńskich,
- pobór prób o nienaruszonej strukturze do badań laboratoryjnych,
- aktualizacja rozpoznania podłoża rodzimego w celu oceny wpływu zmian zachodzących w gruntach rodzimych w wyniku oddziaływania obiektu oraz przygotowania projektów wykonawczych do kolejnych wyższych obwałowań zapór.

Dodatkowe rozpoznanie prowadzi się również przy okazji instalacji głębokich inklinometrów oraz studni odciążających służących do obniżenia ciśnienia wody w porach w iłach trzeciorzędowych.

Rozpoznanie podłoża prowadzi się głównie metodami tradycyjnymi poprzez wykonywanie głębokich wierceń lub statycznych badań penetracyjnych sondą wciskaną. Uzupełniająco stosuje się badania rodzaju *cross-hole* oraz badania dylatometryczne. W przypadku głębokich wierceń (wiercenia na płuczkę z pełnym rdzeniowaniem) stosuje się najwyższe światowe standardy związane głównie z poborem prób NNS z głęboko leżących warstw podłoża rodzimego. Świadczy o tym chociażby pomiar ciśnienia ssania zaraz po wyjęciu próbki NNS na powierzchnię, w celu określenia wpływu odprężenia próbki na jej stan fizyczny (zmiana wskaźnika porowatości, wyznaczenie współczynnika parcia bocznego K_0 , itd.).

Z kolei badania penetracyjne to przede wszystkim badania rodzaju CPTU/CPTUU i SCPTU (ze stożkiem sejsmicznym) wraz z badaniami dyssypacji ciśnienia wody w porach, którym towarzyszy pobór rdzeni gruntowych próbnikiem Mostap, z wydzielonych na podstawie analizy krzywych penetracji warstw gruntów rodzimych.

W zdecydowanej większości przypadków rozpoznanie podłoża gruntowego w rejonie obiektu dokonuje się wzdłuż przekrojów poprzecznych biegnących prostopadle do osi jego zapór. W ramach tych przekrojów prowadzi się interpretację układu warstw geologicznych i geotechnicznych, które stanowią podstawę do analiz stateczności kolejnych, wyższych rzędnych zapór [10].

Rozmiary obiektu, jak też skomplikowana budowa geologiczna podłoża gruntowego wymagająca nieustannego monitorowania ze względu na zaangażowanie coraz głębszych warstw podłoża rodzimego oraz zmieniające się właściwości gruntów zalegających w podłożu pod obiektem powodują, że liczba punktów badawczych w rejonie składowiska (sondowania, wiercenia) przekroczyła już liczbę 9 tysięcy i ciągle rośnie.

Badanie laboratoryjne

Celem tych badań jest wiarygodne wyznaczanie charakterystyk odkształceniowych i wytrzymałościowych gruntów podłoża do analiz stateczności oraz innych parametrów przyjmowanych do modelowania zachowania się budowli za pomocą różnych modeli numerycznych. Szczególną uwagę poświęcono wyznaczeniu tych charakterystyk dla, zdeformowanych glacitektonicznie, iłów plioceńskich, zlokalizowanych w zidentyfikowanych strefach osłabień. W celu zapewnienia wysokiej jakości prowadzonych badań, jak też reprezentatywności i obiektywności otrzymanych wyników, badania laboratoryjne są wykonywane za pomocą wysoce specjalistycznej aparatury badawczej z wykorzystaniem najnowszych technik badawczych stosowanych na świecie. Ze względu na rosnące wymagania związane z zapewnieniem bezpieczeństwa zapór OUOW „Żelazny Most” obiekt ten stał się swoistym poligonem doświadczalnym pozwalającym na badanie i wdrażanie najnowocześniejszych procedur badawczych, co w dużej mierze należy zawdzięczać pracy Zespołu Ekspertów Międzynarodowych.

Zasadnicze badania laboratoryjne na próbach NNS gruntów rodzimych prowadzi się w zmodyfikowanym aparacie trójosiowego ściskania. W celu odzwierciedlenia zróżnicowanego cha-

rakteru pracy gruntów podłoża w złożonych warunkach stanu naprężenia, w aparacie tym prowadzono serie badań rodzaju TXCID, TXCIU, TXUU, TXK₀D, TXEID, itd. Zmodyfikowany aparat trójosiowego ściskania wykorzystywany do powyższych badań wyklucza możliwość mimośrodowego obciążenia próbki gruntu. Dodatkowo, w celu wyznaczenia reprezentatywnych charakterystyk odkształceniowych oraz dokładnego śledzenia zmian wskaźnika porowatości we wstępnym etapie prowadzenia badania przed przyłożeniem obciążenia dewiatorowego, jak też w trakcie samego procesu ścinania próbki, aparaty trójosiowe są wyposażone w system do lokalnego pomiaru mikroprzemieszczeń. Z kolei w celu wyznaczenia maksymalnej sztywności badanych gruntów aparat trójosiowy ma wbudowany system piezoelementów rodzaju bender do wywołania fali akustycznej. Powyższe wyposażenie aparatów stało się już od wielu lat standardem w przypadku prowadzenia badań trójosiowych na potrzeby obiektu.

Szczególną uwagę poświęca się przygotowaniu próbek do badań, a przede wszystkim odtworzeniu stanu fizycznego oraz naprężenia, jakiemu dana próbka była poddana w warunkach *in situ*. Przed przyłożeniem naprężenia dewiatorowego każda z nich jest poddana procesowi nasączenia, realizowanemu etapowo metodą ciśnienia wyrównawczego, a następnie procesowi kilkustopniowej konsolidacji, podczas której wykonuje się pomiary prędkości fali poprzecznej do wyznaczenia sztywności gruntu w zakresie małych odkształceń, w funkcji średniego naprężenia efektywnego. Nierzadko, w celu oceny rozkładu ciśnienia wody w porach wewnątrz próbki, w badaniach tych stosuje się specjalny czujnik do pomiaru ciśnienia wody montowany w połowie jej wysokości. Sam proces ścinania odbywa się często przy bardzo małych prędkościach odkształcenia rzędu 0,001 mm/min, co ma na celu odtworzenie procesu obciążenia, jakiemu jest poddany grunt w warunkach rzeczywistych. W przypadku próbek gruntów pobranych z głębokości ponad 100 m pojedyncze badanie trójosiowe trwało w sposób nieprzerwany około 1 miesiąca.

Oprócz podstawowych badań trójosiowych, których ogólna liczba wynosi już tysiące, są wykonywane dodatkowo badania edometryczne i konsolidometryczne do wyznaczenia charakterystyk ściśliwości, konsolidacyjnych oraz pęcznienia, jak też badania w aparacie pierścieniowym w celu wyznaczenia rezydualnych wartości parametrów wytrzymałościowych na rekonstruowanych próbkach iłów trzeciorzędowych pobranych z rejonu stref osłabień.

W celu zapewnienia reprezentatywności i obiektywności wyników badań laboratoryjnych prace te są prowadzone równolegle w renomowanych ośrodkach europejskich (NGI, Norwegia, ISMGEO, Włochy) oraz krajowych (Geoteko, będące wiodącą firmą geotechniczną oraz IBW PAN).

Wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań pozwoliły na wyznaczenie reprezentatywnych charakterystyk wytrzymałościowych, odkształceniowych, ściśliwości oraz zmian modułu ścinania w funkcji średniego naprężenia efektywnego oraz odkształcenia postaciowego dla wszystkich podstawowych gruntów zalegających w podłożu rodzimym obiektu, ze szczególnym uwzględnieniem iłów allochtonicznych z rejonu zidentyfikowanych pomiarami inklinometrycznymi stref ścięcia, decydujących o stateczności zapór obiektu.

Z geotechnicznego punktu widzenia sposób deponowania odpadów metodą na mokro niesie z sobą poważne zagrożenia. Rozdrobniona w procesie technologicznym skała płonna jest zamieniana na drobniejsze frakcje ze znaczną przewagą frakcji piaszczystej dochodzącej do ponad 90%. Mieszanina wodno-gruntowa drobno zmielonej skały oraz wody jest deponowana w składowisku metodą namywania poprzez zrzut odpadów na plażę, w wyniku którego następuje naturalny proces segregacji powodujący, że frakcje grubsze odkładają się w sąsiedztwie korony zapory, a frakcje drobniejsze w postaci szlamów są kierowane ku środkowej części składowiska. Taki sposób deponowania powoduje, że osady wypełniające wnętrze składowiska mają bardzo zróżnicowany skład granulometryczny oraz mogą znajdować się lokalnie w stanie luźnym, miejscami bardzo luźnym. Dodatkowo, na skutek sukcesywnego składowania nowych objętości odpadów znaczna część masywu zdeponowanych już osadów jest całkowicie nawodniona. Stwarza to „modelowe” wręcz warunki do wystąpienia zjawiska ich upłynnienia. Do jego zainicjowania są potrzebne jeszcze dodatkowe dwa czynniki, tj.: ograniczony odpływ wody z porów oraz wystąpienie niekorzystnego układu obciążeń. Taki niekorzystny układ obciążeń może mieć miejsce wówczas, gdy składowe ścinające naprężenia pochodzące od sił masowych (np. od rosnącego nadkładu osadów) osiągną wartości większe niż wytrzymałość rezydualna nawodnionych osadów w warunkach bez odpływu (statyczne upłynnienie). Innym rodzajem niekorzystnego układu obciążeń mogą być obciążenia cykliczne wywołane oddziaływaniem fali parasejsmicznej indukowanej wstrząsem górniczym. Obydwa te przypadki mogą wystąpić na składowisku.

Dlatego też badania właściwości fizycznych i mechanicznych osadów zdeponowanych na składowisku stały się kluczowym elementem oceny stopnia podatności tych osadów na upłynnienie oraz wyznaczenia reprezentatywnych wartości wytrzymałości na ścinanie nawodnionych osadów w warunkach bez odpływu wody z porów, zakładanych w analizach stateczności zapór.

Badania osadów były realizowane w ramach kilku dużych programów badawczych, z których pierwszy zainicjowano już w latach dziewięćdziesiątych, kiedy to po raz pierwszy pojawił się problem możliwości statycznego upłynnienia się tych osadów. Ze względu na to, że nie dysponowano wówczas urządzeniami do poboru prób o nienaruszonej strukturze z gruntów o przeważającej zawartości frakcji piaszczystej, badania prowadzono wyłącznie na próbkach rekonstruowanych, sztucznie preparowanych z osadów o różnej zawartości frakcji drobnej [3]. Podstawowym problemem było skorelowanie tych badań z rzeczywistym stanem, w jakim znajdują się zdeponowane w składowisku osady, gdyż badania *in situ* nie pozwalały na reprezentatywne wyznaczenie rozkładów wskaźnika porowatości w masywie osadów, kluczowego z punktu widzenia reakcji gruntu poddanego ścinaniu.

Ze względu na to, w 2009 roku zapoczątkowano kolejny program badań osadów, tym razem na próbkach NNS pobranych powierzchniowo z wykopów badawczych, zlokalizowanych w różnej odległości od korony zapory, reprezentujących osady o różnej zawartości frakcji drobnej. Program badań obejmował

zarówno badania statyczne, jak i cykliczne w warunkach trójosiowego ściskania. Pobieranie prób NNS z gruntów o dużej zawartości frakcji piaszczystej jest zadaniem niezwykle trudnym. Dlatego też wypracowano specjalną procedurę ich poboru z osadów plaży składowiska. Również i w tym przypadku próbki te były badane w czterech wymienionych wcześniej ośrodkach badawczych, w warunkach trójosiowego ściskania (TXCK₀U i CTXCK₀U) z zachowaniem podobnego reżimu badania jak w przypadku gruntów podłoża. Wyniki otrzymane z tych badań potwierdziły praktycznie wyłącznie dylatywny charakter reakcji osadów na przyłożone obciążenie (przy bardzo dużych średnich naprężeniach efektywnych zdarzały się reakcje kontraktywno-dylatywne). Jednakże wyników tych badań ciągle nie można było traktować jako reprezentatywnych dla całego masywu odpadów, gdyż badane próby NNS pobrano z niewielkich głębokości (maksymalnie 2,4 m). Zasadniczą zmianę w tej materii zanotowano ostatnio dzięki wprowadzeniu do praktyki tzw. próbnika japońskiego (*Push-gel sampler*) do poborów prób NNS z gruntów niespoistych. Pierwsze próby zastosowania tego urządzenia na składowisku (zarazem pierwsze w Europie) miały miejsce pod koniec 2013 roku. W chwili obecnej przeprowadzono już kolejną serię badań na próbkach NNS osadów pobranych tym próbnikiem ze znacznych głębokości.

Istotną rolę w ocenie podatności zdeponowanych osadów na upłynnienie odegrały przeprowadzone badania rodzaju *cross-hole*, których głównym celem było określenie rzeczywistej porowatości osadów w warunkach *in situ*. Wyniki tych badań pokazały, że strefa pełnego nasycenia porów wodą znajduje się na znacznie większych głębokościach niż wynika to z pomiarów piezometrycznych czy też badań dyssypacji ciśnienia wody w porach wykonywanych przy okazji licznych sondowań masywu osadów. Wyklucza to praktycznie, a przynajmniej bardzo ogranicza, zagrożenie upłynnienia się osadów skutkujące ich wpływem poza obiekt, potwierdzając przy tym, że za stateczność zapór odpowiada głównie podłoże.

MONITORING OBIEKTU

Podstawą prawidłowego stosowania metody obserwacyjnej przy projektowaniu obiektu jest rozwinięta baza monitoringu, za pomocą której można ocenić rzeczywistą reakcję konstrukcji i współpracującego z nią podłoża. W przypadku OUOW „Żelazny Most” monitoring ten można podzielić na dwie zasadnicze grupy, które w niektórych elementach wzajemnie przenikają się [5]:

- monitoring geotechniczny,
- monitoring środowiskowy.

W niniejszej pracy będzie omówiony pierwszy rodzaj monitoringu prowadzonego na obiekcie. Monitoring geotechniczny jest przede wszystkim związany z pomiarem deformacji konstrukcji, jak też zmian wywołanych przez nią w podłożu gruntowym. Zasadnicze elementy tego monitoringu to:

- **badania penetracyjne oraz wiercenia głębokie** – prowadzone w ramach ciągłej aktualizacji rozpoznania podłoża i masywu osadów oraz przy okazji instalacji głębokich piezometrów, inklinometrów lub studni odciążających, uzupełnione o badania dylatometryczne,

badania rodzaju *cross-hole* i *down-hole*, rzadziej typowe badanie geofizyczne (badania elektrooporowe);

- **sieć geodezyjna** – sieć reperów powierzchniowych (około 300) zainstalowanych na zaporach i przedpolu obiektu do monitorowania przemieszczeń poziomych i pionowych konstrukcji oraz przedpola, sieć reperów wglębnych posadowionych na podłożu rodzimym do monitorowania osiadań wywołanych rosnącym nadkładem osadów;
- **stacja totalna** – zlokalizowana na przedpolu zapory wschodniej do ciągłego automatycznego pomiaru przemieszczeń poziomych 23 mikroluster zainstalowanych na skarpie odpowietrznej środkowej części zapory wschodniej;
- **stacje GPS** – 4 stacje zainstalowane na półkach zapory północnej w celu natychmiastowej identyfikacji zwiększonego tempa przemieszczeń poziomych i pionowych w newralgicznych przekrojach tej zapory;
- **sieć inklinometrów** – 89 inklinometrów w tym 74 inklinometry głębokie (79 ÷ 165 m) do identyfikacji potencjalnych powierzchni osłabienia w głęboko leżących warstwach gruntów podłoża pod obiektem (rys. 3); najgłębsze inklinometry zainstalowane na obiekcie są razem z najgłębszymi inklinometrami, które kiedykolwiek i gdziekolwiek zainstalowano;
- **sieć sejsmometryczna** – do rejestracji sygnałów akcelerometrycznych wywołanych drganiami indukowanymi wstrząsami górnymi; w chwili obecnej na obiekcie zainstalowano 16 stanowisk sejsmometrycznych, po dwa w przekrojach najbardziej narażonych na oddziaływania parasejsmiczne (jedno stanowisko na koronie zapory podstawowej, a drugie u jej podnóża, co pozwala na ocenę stopnia amplifikacji rejestrowanych sygnałów);
- **sieć piezometrów** – głównie piezometry otwarte do kontrolowania położenia krzywej filtracji w masywie odpadów oraz poziomu zwierciadła wody gruntowej w podłożu; obecnie na obiekcie i w jego najbliższym otoczeniu zainstalowano ponad 2000 piezometrów; część z nich wyposażono w czujniki do automatycznego pomiaru poziomu zwierciadła wody z próbkowaniem co godzina; piezometry otwarte służą również do badań środowiskowych (pobór prób wody do badań jej chemizmu);
- **sieć piezometrów strunowych** – do monitorowania nadwyżki ciśnienia wody w porach w nieprzepuszczalnych warstwach ilów trzeciorzędowych na znacznych głębokościach oraz do oceny efektywności pracy studni odciążających zainstalowanych w celu obniżenia tego ciśnienia (zainstalowano około 300 piezometrów strunowych);
- **pomiar wydatków filtracyjnych** – prowadzony we wszystkich elementach całego systemu drenażu pionowego i poziomego w celu oceny efektywności działania systemu drenażu, jak również monitorowania negatywnych zjawisk mających wpływ na bezpieczeństwo konstrukcji.

Opisując bazę monitoringu, trudno nie wspomnieć tutaj o zintegrowanym systemie informatycznym SyZeM (System

Żelazny Most) opartym na profesjonalnej, relacyjno-obiekto-
wej bazie danych firmy Oracle. Baza ta jest miejscem groma-
dzenia wszystkich danych pomiarowych pozyskiwanych z bazy
monitoringu oraz zawierającej wszelkie informacje techniczne
dotyczące obiektu, wykorzystując system informacji przestrzen-
nej GIS. Ze względu na bardzo rozbudowaną bazę monitoringu,
w wielu elementach zautomatyzowaną, liczba danych pomia-
rowych rośnie w setki tysięcy, stąd szybki dostęp do pojedyn-
czej danej pozwala na praktycznie natychmiastową ocenę stanu
bezpieczeństwa oraz potencjalnego stopnia zagrożenia poszcze-
gólnych elementów obiektu. Więcej szczegółów na temat bazy
monitoringu zainstalowanej na OUOW „Żelazny Most” oraz jej
funkcjonowania można znaleźć w pracy Stefanka i Romaniuka
[5].

PRACE STUDIALNE

Obok zakrojonych na bardzo szeroką skalę badań geotech-
nicznych bezpieczna eksploatacja i rozbudowa OUOW „Żela-
zny Most” jest wspomagana wynikami różnego rodzaju prac
teoretycznych związanych głównie z modelowaniem procesów
i zjawisk obserwowanych na obiekcie. Warto tutaj wymienić
trzy zasadnicze kierunki prac teoretycznych:

1. Modelowanie metodą elementów skończonych (MES)
powadzone w celu lepszego zrozumienia zjawiska wy-
stępowania przemieszczeń poziomych obserwowanych
w niektórych częściach zapór (środkowa część zapory
wschodniej, dwa rejonu na zaporze północnej), jak też
predykcji rozwoju tych przemieszczeń przy wyższych
rzędnych zapory oraz w celu sprawdzenia skuteczności
wdrażania różnych środków zaradczych służących do
redukcji przemieszczeń poziomych (dociążenia, studnie
odciążające, przesunięcia korony zapór, itd.).
2. Ocena stateczności zapór z uwzględnieniem oddziały-
wań parasejmicznych pseudo-dynamiczną metodą New-
marka. Ze względu na występowanie w rejonie obiektu
wstrząsów górniczych, ich oddziaływanie jest standardo-
wo uwzględniane w ocenach stateczności zapór z wyko-
rzystaniem tzw. metody pseudo-statycznej [10]. Metoda
ta ma jednak swoje ograniczenia stosowalności związane,
między innymi, z dopuszczalnym poziomem przyspie-
szeń gruntu generowanych przez dany wstrząs. W związ-
ku z tym, że predykcje tych przyspieszeń dla przyszłej
eksploatacji wyrobisk wykraczają poza przyjęte założe-
nia do stosowania metody pseudo-statycznej, ZEM za-
lecił przeprowadzenie dodatkowych analiz stateczności
z uwzględnieniem obciążeń dynamicznych innymi, bar-
dziej zaawansowanymi metodami [9]. Uzyskane wyniki
wskazują, że przy przewidywanych w przyszłości, wyż-
szych niż obserwowane obecnie, wartościach przyspie-
szeń nie należy spodziewać się wystąpienia trwałych de-
formacji, mogących zagrozić stateczności zapór.
3. Modelowanie pola hydrodynamicznego i migracji wód
zasolonych oraz ich oddziaływania na stan wód pod-
ziemnych i powierzchniowych w rejonie obiektu na

podstawie trójwymiarowego hydrogeologicznego mode-
lu rejonu OUOW Żelazny Most i predykcja zmian przy
wyższych rzędnych obiektu [7]. Prace te nie mają cha-
akteru geotechnicznego niemniej stanowią istotny ele-
ment bezpiecznej eksploatacji obiektu z punktu widzenia
oddziaływania środowiskowego.

WNIOSKI

W artykule starano się w skrótowym ujęciu przedstawić za-
sadnicze elementy badań geotechnicznych prowadzonych przez
lata w rejonie największego składowiska odpadów poftlotacyj-
nych OUOW „Żelazny Most”, jako generalne wprowadzenie
do serii prac złożonych na konferencję, a poświęconych szcze-
gółowym zagadnieniom geotechnicznym związanym z tym
obiektem. Z racji faktu, że jest to w tej chwili jedyne miejsce
deponowania odpadów będących produktem ubocznym przy
pozyskiwaniu miedzi, jego bezpieczna eksploatacja i rozbudowa
jest kluczowa do zapewnienia nieprzerwanej produkcji tego cen-
nego metalu. Ze względu na rozmiary obiektu, a przede wszyst-
kim niezwykle skomplikowaną geologię podłoża, na którym jest
posadowiony, jest on przedmiotem szeregu trudnych wyzwań
geotechnicznych wymagających zaangażowania najwyższej
klasy specjalistów oraz stosowania najwyższych światowych
standardów w dziedzinie geotechniki, nierzadko pionierskich.
Należy podkreślić przy tym duże zrozumienie managementu za-
rządzającego obiektem, w pełni akceptującego próby poszuki-
wania i wdrażanie najnowocześniejszych rozwiązań, mających
na celu zapewnianie bezpiecznego funkcjonowania obiektu. Jest
to wzorcowy wręcz przykład należytej współpracy przemysłu
z ośrodkami naukowymi z obopólną korzyścią dla obu stron.

LITERATURA

1. Jamiolkowski M.: Soil mechanics and the observational method: chal-
lenges at the Żelazny Most copper tailings disposal facility. *Geotechnique*, 64,
No. 8, 2014, 590-619.
2. Eurokod-7-EN, 1997 – Projektowanie geotechniczne cz. 1 i 2.
3. Lipiński M. J.: Undrained response of cohesionless soils to monotonic
loadings – Reakcja nawodnionych gruntów niespoistych pod obciążeniem mo-
notonicznym w warunkach bez odpływu wody z porów. Praca doktorska obro-
niona na Wydziale Bud. Wodnego i Inż. Środ. Politechniki Gdańskiej, 2000.
4. Lipiński M. J., Tymiński W., Świdziński W.: Badania laboratoryjne
gruntów głębokiego podłoża środkowej części zapory wschodniej składowiska
Żelazny Most. Monografia, 30-lecia składowiska Żelazny Most 1977-2007,
KGHM Polska Miedź S.A, Lubin, czerwiec, 2007, 208-221.
5. Stefane P., Romaniuk D.: Zastosowanie monitoringu geotechnicznego
i środowiskowego na OUOW Żelazny Most”. Referat zgłoszony na XVII Kra-
jową Konferencję Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej, Łódź 2015.
6. Świdziński W., Janicki K., Krzysik A.: Profesjonalne bazy danych
jako niezbędne narzędzie do bezpiecznego projektowania i eksploatacji dużych
obiektów hydrotechnicznych na przykładzie składowiska Żelazny Most. Ze-
szyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Lądowe, nr 57, Krynica
2006, 335-343.

7. Świdziński W., Maciejewski St., Walter A.: Prognoza oddziaływania składowiska Żelazny Most na wody podziemne i powierzchniowe w czasie jego eksploatacji do rzędnej 195 m n.p.m. i po jego zamknięciu. Konsorcjum IBW PAN – BMT ARGOS Sp. z o.o., Gdańsk, marzec 2011.

8. Świdziński W., Mierczyński J.: Reakcja nawodnionych osadów poflotacyjnych na obciążenia cykliczne w warunkach bez odpływu wody z porów. Referat zgłoszony na XVII Krajową Konferencję Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej, Łódź 2015.

9. Świdziński W., Korzec A.: Ocena dynamicznej odpowiedzi zapór ziemnych w świetle aktualnych unormowań. Referat zgłoszony na XVII Krajową Konferencję Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej, Łódź 2015.

10. Wrzosek K., Stasiński J., Dmytrow M., Stefanek P.: Zagadnienia stateczności zapór w bieżącej ocenie stanu technicznego i projektowanej rozbudowie OUOW Żelazny Most, referat zgłoszony na XVII Krajową Konferencję Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej, Łódź 2015.