

Paweł Stefanek, Paweł Sorbjan, Michał Stępień

**MONITORING I JEGO WYKORZYSTANIE
W EKSPLOATACJI I PROJEKTOWANIU ROZBUDOWY
SKŁADOWISKA „ŻELAZNY MOST”**

***THE IMPORTANCE OF GEOTECHNICAL MONITORING
FOR SAFE EXPLOITATION AND DEVELOPMENT
OF „ZELAZNY MOST” TAILINGS POND***

Streszczenie

Składowisko odpadów poflotacyjnych „Żelazny Most” jest jednym z największych tego typu obiektów na świecie. Ze względu na obecną wysokość zapór wykonanych z materiałów odpadowych, a także położenie geograficzne, eksploatacja i rozbudowa składowiska stanowi duże wyzwanie dla inżynierów. Projektowanie zapór składowiska odbywa się na podstawie tak zwanej metody obserwacyjnej, która jest metoda aktywną – obserwacje zachowania się składowiska dają podstawę do procesu projektowania. W tym celu niezbędne jest bardzo staranne monitorowanie składowiska. Na składowisku „Żelazny Most” stosuje się rozbudowany system monitoringu do pomiarów i obserwacji różnego rodzaju parametrów pracy składowiska. Monitoring prowadzony na składowisku dotyczy: zjawisk filtracji w korpusie zapory i w podłożu, przemieszczeń poziomych i pionowych zapory i podłoża, aktywności parasejsmicznej w podłożu, wydajności filtracji oraz pewnych wybranych parametrów ekologicznych, np. zasolenia wód podziemnych. Dane otrzymywane z sieci aparatury kontrolno-pomiarowej i wyniki okresowych inspekcji wizualnych są wykorzystywane do codziennej oceny stanu technicznego składowiska „Żelazny Most”. Składowisko „Żelazny Most” jest przykładem obiektu hydrotechnicznego, przy którym do eksploatacji i projektowania dalszej rozbudowy wykorzystuje się wyniki monitoringu.

Słowa kluczowe: monitoring, obiekt hydrotechniczny, metoda obserwacyjna

Summary

Zelazny Most tailings pond is one of the biggest objects of such type in the world. Due to the present height of the dams constructed from post flotation materials as well as location of the pond, „Żelazny Most” is a challenging task for engineers. Dam design is based on observational method, which is an active design method accounting for current observations. Therefore careful monitoring of the tailings pond is required that includes both visual inspections and instrumentation aimed at analyses of vast amount of different data. Monitoring of dam operation (i.e. seepage, deformations, pore pressure, seismicity, some ecological parameters like groundwater salinity and more). Data collected from monitoring equipment and visual inspections are used for everyday technical state and safety assessment of the dams as well as for designing process. „Żelazny Most” tailings pond is an example of hydrotechnical object where monitoring results are on the current basis used for design, construction and development.

Key words: geotechnical monitoring, hydrotechnical structure, observational method

WSTĘP

Składowisko odpadów poflotacyjnych „Żelazny Most”, jedno z największych tego typu obiektów na świecie położone jest w południowo-zachodniej części Polski pomiędzy Lubinem a Głogowem, w odległości około 80 km od Wrocławia (rys. 1).



Rysunek 1. Lokalizacja składowiska „Żelazny Most”
Figure 1. Location of „Żelazny Most” tailings pond

Do usytuowania składowiska zostało wykorzystane naturalne obniżenie terenu w południowo-wschodniej części Wzgórz Dalkowskich, stanowiących część Wału Trzebnickiego. Obniżenie to ma formę naturalnej misy wytopiskowej, otoczonej wzgórzami spiętrzonyj moreny czołowej z okresu zlodowacenia środkowopolskiego.

Ze względu na obecną wysokość zapór wykonanych z materiałów odpadowych, a także położenie, eksploatacja i dalsza rozbudowa składowiska stanowi duże wyzwanie dla inżynierów. Projektowanie zapór składowiska odbywa się na podstawie tak zwanej metody obserwacyjnej, która jest metodą aktywną – obserwacje zachowania się składowiska dają podstawę do procesu projektowania. W tym celu stosuje się rozbudowany system monitoringu różnego rodzaju parametrów pracy składowiska. Składowisko jest obiektem wielkoobszarowym o bardzo dużym zróżnicowaniu, a co za tym idzie ilość danych, która musi być pozyskana jest bardzo duża. Monitoring prowadzony na składowisku dotyczy: zjawisk filtracji w korpusie zapory i w podłożu, przemieszczeń poziomych i pionowych zapory i podłoża, aktywności parasejsmicznej w podłożu, natężenia filtracji oraz pewnych wybranych parametrów ekologicznych. Dane otrzymywane z sieci aparatury kontrolno pomiarowej i wyniki okresowych inspekcji wizualnych są wykorzystywane do bieżącej oceny stanu technicznego składowiska. Składowisko „Żelazny Most” jest przykładem obiektu hydrotechnicznego, przy którym do eksploatacji i projektowania dalszej rozbudowy wykorzystuje się wyniki monitoringu.

Budowę obiektu rozpoczęto w 1974 r., a jego eksploatacja i równoczesna rozbudowa trwa od 1977 roku. Składowisko otoczone jest ze wszystkich stron zaporami ziemnymi o łącznej długości 14,35 km.

Podstawowe parametry składowiska odpadów „Żelazny Most” w dniu 01.05.2010 roku miały następujące wartości:

– objętość całkowita składowiska [mln m ³]	– 484,3
– objętość zdeponowanych odpadów [mln m ³]	– 476,8
– objętość stawu nadosadowego [mln m ³]	– 7,54
– powierzchnia całkowita składowiska [ha]	– 1 394,0
– w tym:	
powierzchnia plaż [ha]	– 872,0
powierzchnia stawu [ha]	– 522,0
– rzędna piętrzenia wody m n.p.m.	– 167,25
– rzędna korony zapór m n.p.m.	– 170,0-172,5

Obwałowania formowane są metodą nadbudowy do środka co 2,5 m w granicach każdej z 26 sekcji namywu. Namywanie plaż prowadzone jest przy użyciu rurociągów, rozmieszczonych wzdłuż korony obwałowań. Wewnątrz znajduje się akwen, wypełniony wodami nadosadowymi o głębokości do 4 m.

SYSTEM MONITOROWANIA ZAPÓR SKŁADOWISKA

Monitoring geotechniczny składowiska „Żelazny Most” dotyczy zasadniczych zjawisk/objawów, stanowiących o bezpieczeństwie użytkowania obiektu. Należy do nich zaliczyć:

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

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 w projektowaniu dalszej rozbudowy składowiska metody obserwacyjnej, w której parametry do projektowania koryguje się w zależności od wyników monitoringu. Na składowisku zainstalowanych jest m.in. ok. 1700 piezometrów różnego typu, ponad 360 geodezyjnych punktów pomiarowych, 59 inklinometrów. 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 korony i przedpoła zbiornika „Żelazny Most” składa się z 362 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 przedpolu zapory w odległościach od 50 do 500 m od osi korony. Podstawowym zadaniem reperów wglębnych jest pomiar osiadań głębiej zalegających warstw gruntu wywołanych obciążeniem zaporą (lub inną konstrukcją).

Piezometry otwarte – zainstalowane na zaporach i przedpolu składowiska ŻM służą do obserwacji zmian poziomu wody w osadach i w podłożu. Liczbę piezometrów otwartych zlokalizowanych w poszczególnych częściach zapory przedstawia tabela 1.

Pomiar wydajności drenaży – Pomiary objętości wody odpływającej z poszczególnych węzłów drenażowych (odcinków drenażowych) (rys. 2) lub ich zespołów na tle wahań poziomu piezometrycznego w wytypowanych punktach pomiarowych mają na celu:

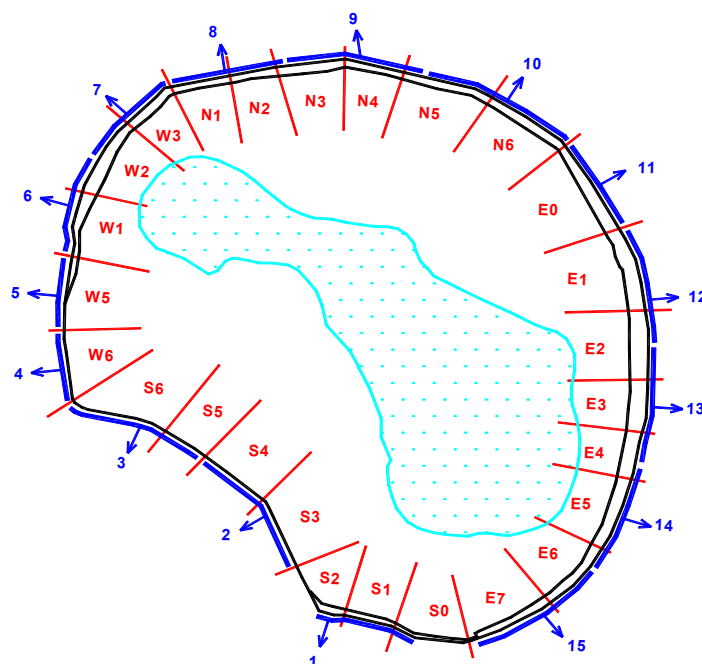
- ocenę skuteczności drenażu zapór podstawowych w funkcji czasu i piętrzenia wody w składowisku,
- uchwycenie zmian w działaniu drenażu oraz ustalenie ich przyczyn,
- ogólne scharakteryzowanie zjawisk filtracyjnych mających miejsce w korpusie zapory na wysokości poszczególnych przekroi,

– określenie łącznej ilości odprowadzanej omawianym drenażem wody w celach bilansowych.

Tabela 1. Liczba piezometrów otwartych zainstalowanych na przedpolu i zaporze składowiska „Żelazny Most” – stan na 01.05.2010 r.

Table 1. Number of piezometers installed In the dam and on the forefield – state on 01.05.2010

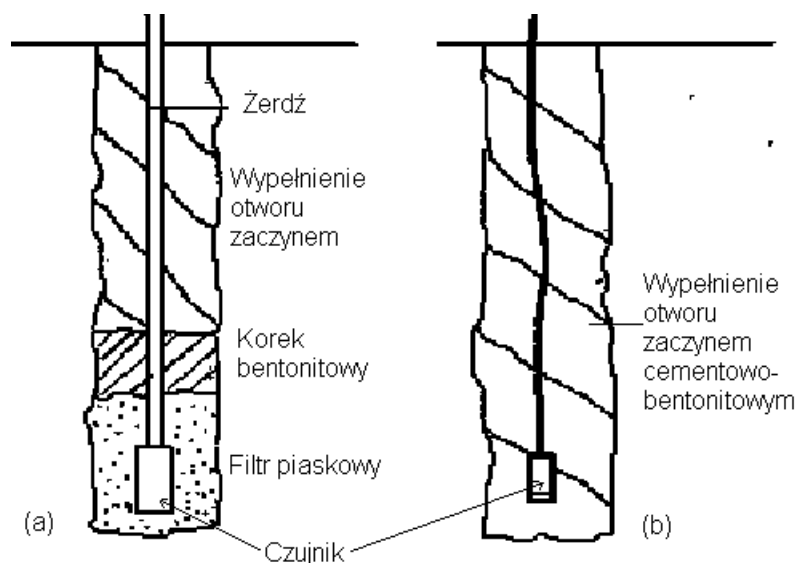
Lokalizacja Location	Zapora /Zapora				Razem Total
	S	W	N	E	
Piezometry przedpola Piezometers on forefield	29	126	83	181	419
Piezometry zapory Piezometers on the dam	163	350	243	501	1257
Suma końcowa Total	192	476	326	682	1676



Rysunek 2. Schemat rozmieszczenia wylotów zbiorczych drenażu pierścieniowego do rowu opaskowego

Figure 2. Location of circumferential drainage outlets

Pomiar ciśnienia wody w porach. Piezometr zamknięty umożliwia pomiar w jednym otworze ciśnienia wody porowej na różnych określonych przez projektanta poziomach. Czujniki do pomiaru ciśnienia wody porowej instalowane są w otworach wiertniczych, które następnie wypełnia się zaczynem cementowo-bentonitowym. Na składowisku zainstalowanych jest ponad 170 sztuk przetworników ciśnienia (Geonor+Glotzl). Schemat instalacji strunowych przetworników ciśnienia w filtrze piaskowym oraz w otworze wypełnionym zaczynem cementowo-bentonitowym przedstawia rysunek 3.



Rysunek 3. Schemat instalacji strunowych przetworników ciśnienia w filtrze piaskowym (a) oraz w otworze wypełnionym zaczynem cementowo-bentonitowym (b)

Figure 3. Scheme of installation of the pore pressure transducers in Fuldy grouted boreholes (a) and traditional (b)

Zastosowanie nowej technologii pozwoliło na instalowanie czujników strunowych w jednym otworze z rurą inklinometryczną. W ten sposób możliwa jest instalacja kilku czujników wraz z rurą inklinometryczną w otworze.

Pomiary inklinometryczne. Pomiary inklinometryczne są istotnym elementem systemu monitoringu składowiska „Żelazny Most” i jego przedpola. Inklinometry zlokalizowane są w wybranych przekrojach zapory zachodniej, północnej i wschodniej. Celem instalacji inklinometrów jest objęcie pomiarami przemieszczeń poziomych stropowych warstw ilów trzeciorzędowych, gdzie występują największe deformacje poziome, spowodowane obciążeniem zapora

i osadami. Na składowisku zainstalowanych jest 59 inklinometrów głębokich (o długości od 79 do 164 m ppt) i 18 płytkich (od 20,5–56,5 m ppt). Pomiary wykonuje się sondą wyposażoną w dwa serwoakcelerometryczne przetworniki wychyleń kątowych, co umożliwia jednoczesny pomiar w dwóch płaszczyznach. Sondę opuszcza się w kolumnach rur prowadniczych zainstalowanych w otworach wiertniczych.

Pomiary zautomatyzowane. Na składowisku zainstalowano zautomatyzowany system pomiaru i rejestracji zmian poziomu wody w piezometrach zainstalowanych na wybranych przekrojach.

W celu monitorowania deformacji środkowej części zapory wschodniej uruchomiono automatyczny system pomiarowy firmy Leica – GeoMoS, stanowiący część monitoringu geodezyjnego. Stanowisko pomiarowe zlokalizowane zostało w kontenerze umiejscowionym na dachu pompowni „Kalinówka”. Stacja monitorująca wykonuje pomiary współrzędnych i rzędnych 23 mikroluster zlokalizowanych na skarpie odpowietrznej zapory wschodniej. Odległości pomiędzy stacją monitoringu a mikrolustrami waha się od ok. 50 do ok. 600 m.

Inspekcje wizualne. Niezależnie od pomiarów aparaturą kontrolno-pomiarową, bardzo ważne jest prowadzenie stałych obserwacji wizualnych stanu zapory. Oceny wizualne stanu składowiska wykonywane są w formie obchodu zapór oraz ich elementów, które mają istotny wpływ na bezpieczeństwo. Częstotliwość wykonywanych obchodów wynosi od 2 do 4 tygodni w zależności od bieżącego stanu poszczególnych elementów zapory. Obserwacje prowadzone są według stałego schematu, co zapewnia jednoznaczne porównanie stanu stałych elementów zapór. Wyniki obchodu są dokumentowane w specjalnym formularzu oraz w formie dokumentacji fotograficznej.

ORGANIZACJA MONITORINGU W ZAKŁADZIE HYDROTECHNICZNYM

Zespół monitoringu. Bardzo ważna jest koordynacja i zintegrowana analiza wyników pomiarów ze wszystkich urządzeń, tj. piezometrów otwartych, czujników strunowych, inklinometrów, geodezyjnych punktów kontrolowanych, wylotów z drenaży. Zjawiska jakie zachodzą na składowisku „Żelazny Most” są monitorowane przez specjalnie powołaną do tego komórkę specjalistów ds. monitoringu.

SyZeM- System Żelazny Most. SyZeM to numeryczny system informacji o składowisku „Żelazny Most” stworzony w celu gromadzenia, weryfikacji, aktualizacji, przetwarzania i udostępniania tematycznych bloków danych: geodezyjnych, geologicznych, hydrogeologicznych, geotechnicznych i geofizycznych pochodzących z monitoringu składowiska „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 odpowiednio prowadzonego monitoringu obiektu do analizy wstecznej, można ocenić tzw. projektowe parametry obserwacyjne. Parametry te, zastosowane w obliczeniach, umożliwiają przeprowadzenie korekty rozwiązań projektowych. Taki sposób postępowania stosowany był nieświadomie dawniej, wypełniając braki teoretycznych podstaw projektowania, w tym mechaniki gruntów. Obiekty projektowano metodą prób i błędów, prowadząc jednocześnie obserwacje w czasie budowy, aby zrozumieć reakcje grunt-budowla, zachowanie konstrukcji, a następnie polepszać kolejne projekty.

Znaczącą rolę w sformalizowaniu stosowania metody obserwacyjnej odegrali Terzaghi, a później Peck. Zwrócili uwagę, że projekt bazujący na najbardziej niesprzyjających założeniach jest nieekonomiczny [Terzaghi, Peck 1967]. Jednakże, jeżeli projektant pozwala na modyfikację projektu w trakcie budowy, można uzyskać znaczące oszczędności poprzez projektowanie na podstawie najbardziej prawdopodobnych, a nie najbardziej niekorzystnych parametrów. Braki w dostępnych informacjach są uzupełniane poprzez obserwacje prowadzone w czasie budowy, a projekt jest modyfikowany zgodnie z uzyskanymi danymi. Taki sposób projektowania nazwali *procedurą obserwacyjną*.

Termin *metoda obserwacyjna* został zdefiniowany po raz pierwszy w roku 1969 przez R. B. Pecka. W swojej publikacji [Peck 1969] przedstawił osiem elementów warunkujących stosowanie metody obserwacyjnej:

- badania wystarczające do ustalenia ogólnych warunków geotechnicznych, właściwości gruntu, ale nie koniecznie w szczegółach;
- oszacowanie najbardziej prawdopodobnych warunków i najbardziej niekorzystnych wyobraźalnych dewiacji tych warunków;
- ustalenie projektu bazującego na roboczej hipotezie zachowania przewidywanego przy najbardziej prawdopodobnych warunkach;
- wybór wielkości, których zmiany należy obserwować i obliczenia ich przewidywanych wartości na podstawie hipotezy roboczej;
- obliczenia wartości tych samych parametrów przy najbardziej niekorzystnych warunkach zgodnie z dostępnymi danymi odnośnie warunków podłoża;
- wybór sposobu działania lub zmiany projektu dla znaczących odchyłeń wyników obserwacji od przewidywanych na podstawie hipotezy roboczej;
- pomiary wytypowanych do obserwacji wielkości i ocena aktualnych/rzeczywistych warunków;
- modyfikacja projektu, aby dopasować go do aktualnych warunków.

Dalszy dynamiczny rozwój metody obserwacyjnej miał miejsce w latach 90. ubiegłego wieku, szczególnie za sprawą nowego podejścia prezentowanego przez Nicholsona i Powderhama. Pierwszy z nich podkreślał podobieństwa pomiędzy metodą obserwacyjną a wytycznymi zarządzania bezpieczeństwem w praktyce brytyjskiej. Natomiast Powderham przedstawił koncepcję postępującej modyfikacji (*progressive modification*) [Powderham 1998; Powderham, Nicholson 1996], wprowadzając pojęcie *bardziej prawdopodobnych* warunków, wyjaśniając, że bazujący na nich projekt będzie znacznie mniej konserwatywny od standardowego, ale bardziej konserwatywny niż oparty na warunkach *najbardziej prawdopodobnych*, jakie sugerowali stosować Terzaghi i Peck.

EUROCODE 7 podaje następujące warunki stosowania metody obserwacyjnej:

„1. Jeżeli prognozowanie zachowania podłoża gruntowego jest trudne, właściwe może być zastosowanie podejścia znanego jako metoda obserwacyjna, w którym rozwiązanie projektowe jest korygowane podczas budowy.

2. Przed rozpoczęciem budowy należy spełnić następujące wymagania:

– ustalić granice zachowań dopuszczalnych;

– oszacować przedział możliwego zachowania konstrukcji i wykazać dostateczne prawdopodobieństwo, iż rzeczywiste zachowanie konstrukcji będzie w dopuszczalnych granicach;

– ustalić program monitoringu, który umożliwi stwierdzenie, czy zachowanie obiektu mieści się w akceptowalnych granicach. Monitorowanie powinno wykazać to w dostatecznie wczesnym stadium robót i z wystarczającą częstotliwością, by w sytuacji zagrożenia była możliwość podjęcia skutecznych działań interwencyjnych;

– dostosować czas reakcji przyrządów i procedury analizy wyników do szybkości możliwych zmian systemu;

– opracować plan działań interwencyjnych, które można zastosować, jeśli monitorowanie wykaże zachowanie wykraczające poza granice zachowań dopuszczalnych.

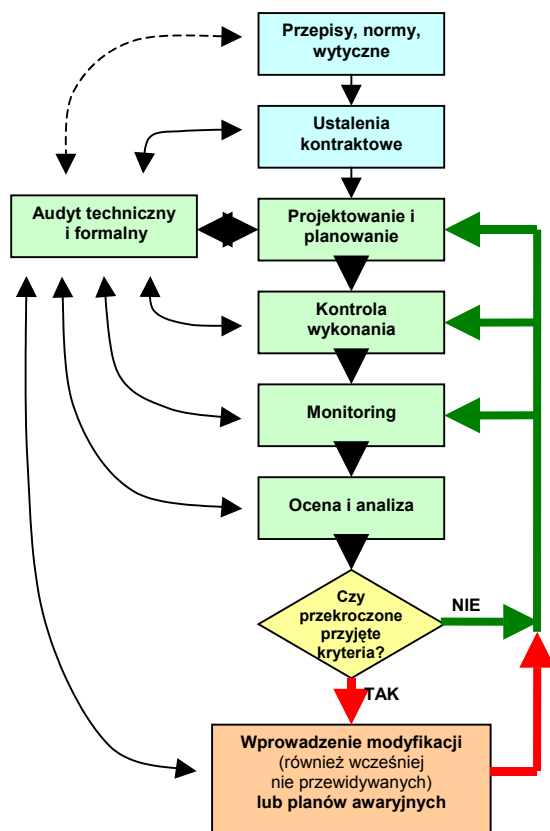
3. Podczas budowy należy prowadzić monitoring zgodnie z planem.

4. Wyniki monitorowania należy oceniać w odpowiednich stadiach budowy, a w przypadkach przekroczenia dopuszczalnych granic zachowań należy uruchomić działania interwencyjne.

5. Jeżeli urządzenia do monitorowania nie zapewniają wystarczająco wiarygodnych informacji, to należy je wymienić lub udoskonalić.”

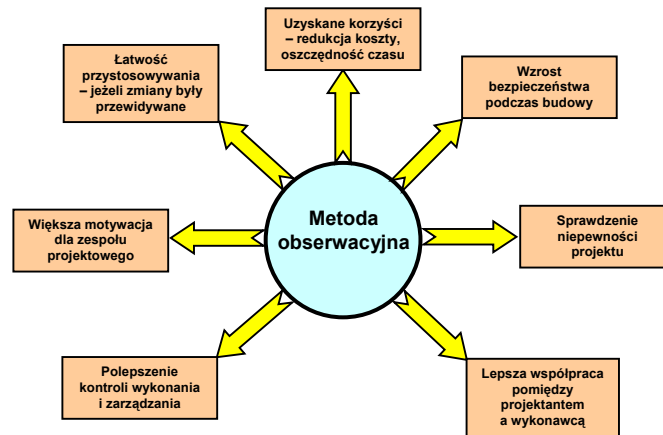
Mówiąc ogólnie, metoda obserwacyjna jest procesem, dla którego określone zostały dopuszczalne wartości zachowania się konstrukcji i podłoża. Dodatkowo, w pełni przygotowane są monitoring, projekty alternatywne, weryfikacja i modyfikacja planów oraz plany awaryjne. W trakcie budowy wyniki obserwacji (monitoringu) są porównywane z założeniami i, w zależności od potrzeb,

wprowadzane są do pierwotnego projektu modyfikacje. Schematycznie zasadę stosowania metody obserwacyjnej pokazano na rysunku 4.



Rysunek 4. Schemat metody obserwacyjnej [Nicholson i in. 1999]
Figure 4. Scheme of observational method [Nicholson i in. 1999]

Stosowanie metody obserwacyjnej zapewnia potencjalne oszczędności czasu lub kosztów, a monitoring pozwala na zapewnienie bezpieczeństwa konstrukcji. Niektóre potencjalne korzyści płynące ze stosowania metody obserwacyjnej pokazano na rysunku 5.



Rysunek 5. Niektóre potencjalne korzyści ze stosowania metody obserwacyjnej [Nicholson i in. 1999]

Figure 5. Main profits fom application of observational method [Nicholson i in. 1999]

PODSUMOWANIE

Monitoring geotechniczny składowiska „Żelazny Most” pełni podwójną rolę:

- dostarczania podstawowych danych umożliwiających ocenę stanu technicznego i bezpieczeństwa obiektu – funkcja wczesnego ostrzegania,
- dostarcza niezbędnych informacji dla celów projektowania kolejnych etapów podwyższenia składowiska i ewentualnej weryfikacji przyjętych założeń projektowych.

Zapewnienie prawidłowego monitoringu, przy tak dużej liczbie różnego typu urządzeń kontrolno-pomiarowych, wymaga wprowadzenia na możliwie szeroką skalę automatyzacji pomiarów oraz sprawnego systemu numerycznego, pozwalającego na prezentowanie bieżących danych pomiarowych. W tym celu stworzono system SyZeM, zapewniający udostępniania tematycznych bloków danych pochodzących z monitoringu składowiska „Żelazny Most”.

BIBLIOGRAFIA

- Nicholson D., Tse C., Penny C. *The Observational Method in ground engineering: principles and applications*. Report 185. Construction Industry Research and Information Association. London 1999.
- Peck, R. B. *Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics*. *Geotechnique* 19, No. 2, s. 171–187, 1969.

Paweł Stefanek, Paweł Sorbjan, Michał Stepień

- Powderham A.J. *The Observational Method – application through progressive modification*. Civil Engineering Practice. Fall/Winter 1998. 1998, s. 87–110.
- Powderham A.J., Nicholson D.P. *The observational method in geotechnical engineering*. The Institution of Civil Engineering. Thomas Telford. London 1996.
- Terzaghi K., Peck R. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2nd Edition. John Wiley & Sons, New York 1967 pp 294, 62.

Mgr inż. Paweł Stefanek
KGHM POLSKA MIEDŹ SA – Oddział Zakład Hydrotechniczny
ul. Polkowicka 52, 59-305 Rudna tel: 76-74-79 227
e-mail: p.stefanek@kg hm.pl

Dr inż. Paweł Sorbjan
Mgr inż. Michał Stepień
Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Spółka z o.o.,
ul. Wałbrzyska 3/5, 02-739 Warszawa tel. 22-21-89 370
e-mail: info@geoteko.com.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. Jerzy Kowalski*