

PAWEŁ POPIELSKI, JACEK STASIERSKI\*

## SYMULACJA PROCESU DEFORMACJI WIELKOKUBATUROWYCH BUDOWLI ZIEMNYCH

---

### SIMULATION OF DEFORMATION PROCESS OF LARGE-SIZED SOIL STRUCTURES

---

#### Streszczenie

Jednym z elementów oceny poziomu bezpieczeństwa obiektu budowlanego jest interpretacja wyników pomiarów kontrolnych. W artykule przedstawiono procedurę postępowania podczas przygotowania, tarowania i weryfikacji modelu wielkokubaturowej budowli ziemnej do celów wspomagania interpretacji wyników monitoringu na przykładzie składowiska odpadów poflotacyjnych „Żelazny Most”.

*Słowa kluczowe: składowisko odpadów, symulacja numeryczna, ocena bezpieczeństwa, monitoring*

#### Abstract

One of the components of establishing the safety valuation level of a construction project is the interpretation of its performance measurements. The paper presents procedures during the preparation, scaling and verification of the large size soil construction project for the purposes of enhancing the interpretation of monitoring results on the example of the „Żelazny Most” waste disposal plant.

*Keywords: waste disposal, numerical simulation, assessment of reliability, monitoring*

---

\*Dr inż. Paweł Popielski, dr inż. Jacek Stasiński, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska.

### Oznaczenia

- $\gamma$  – ciężar objętościowy
- $n$  – porowatość
- $\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego
- $c$  – kohezja
- $E$  – moduł odkształcenia
- $\nu$  – współczynnik Poissona
- $k$  – współczynnik filtracji

### 1. Wstęp

W większości przypadków przeprowadzenie symulacji numerycznej współpracy budowli z podłożem wymaga ograniczenia rozmiarów schematu obliczeniowego. Stosując metody aproksymacyjne, zmuszeni jesteśmy do poszukiwania kompromisu wynikającego z fizycznych ograniczeń używanego narzędzia. Gwarancją poprawnego odwzorowania pracy półprzestrzeni gruntowej jest odsunięcie granic schematu maksymalnie daleko od granic budowli, co jednak powoduje nieracjonalny wzrost błędu aproksymacji ze względu na rozrzedzenie siatki aproksymacyjnej i jest źródłem pogorszenia dokładności funkcji rozwiązującej, a przede wszystkim jej pochodnych. Z drugiej strony, zbyt ograniczony schemat staje się, na skutek odcięcia obszarów biorących udział w modelowanych zjawiskach, nieadekwatny do rzeczywistości.



Ryc. 1. Składowisko „Żelazny Most” z lotu ptaka  
Fig. 1. Aerial view of „Żelazny Most” reservoir

Powyższy problem towarzyszy każdemu zadaniu tego rodzaju, jednak dla większości obiektów o przeciętnych rozmiarach i obciążeniach przekazywanych na podłoże można dość łatwo przewidzieć konstrukcję schematu obliczeniowego, gwarantującego uniknięcie

dużych błędów rozwiązania. W przypadku obiektów wielkokubaturowych, których zasięg oddziaływania na podłoże jest odpowiednio duży, rozstrzygnięcia wymagają dodatkowo inne problemy, nierzadko ze sobą powiązane. Najczęściej dotyczą one konieczności określenia wartości parametrów materiałowych podłoża na dużych głębokościach, znacznie przekraczających głębokości standardowych badań geotechnicznych i trudnych do wiarygodnego przewidywania na podstawie podobnych przypadków. Wraz ze wzrostem głębokości schematu coraz gorzej rozpoznana jest geometria warstw podłoża. W przypadku skomplikowanej geologii utrudnione jest również racjonalne sterowanie gęstością dyskretyzacji schematu i dostateczne zagęszczenie siatki w obszarach ważnych ze względu na dokładność rozwiązania, ponieważ zasoby obliczeniowe angażowane są w odwzorowanie trudnych geometrycznie obszarów materiałowych. Dotychczas najczęściej stosowanym rozwiązaniem w takich przypadkach jest ograniczenie rozważań do warunków płaskiego stanu odkształcenia, co – oczywiście – wpływa również na ograniczenie dokładności rozwiązania.

W niniejszym artykule pokazano technikę postępowania w procesie optymalizacji schematu obliczeniowego, zastosowanego do symulacji oraz oceny przemieszczeń obserwowanych na obwałowaniu wschodnim mokrego składowiska odpadów poftlotacyjnych „Żelazny Most”. Widok składowiska od strony południowo-wschodniej przedstawiono na ryc. 1 (zdjęcie uzyskano dzięki uprzejmości generalnego projektanta – firmy HYDROPROJEKT Sp. z o.o.).

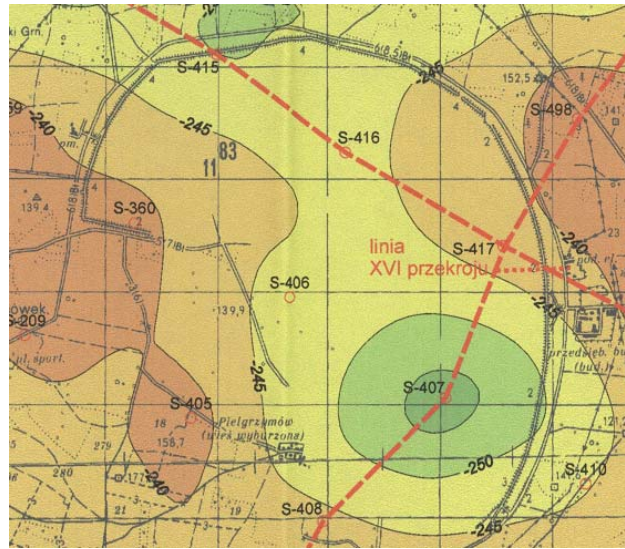
## 2. Warunki i cele symulacji

Celem opisywanej analizy było objaśnienie przyczyn przemieszczeń poziomych znacznej wartości repery nr 208, zlokalizowanego w przekroju XVIIE zapory wschodniej składowiska „Żelazny Most”. Położenie przekroju na planie składowiska zilustrowano na ryc. 2.

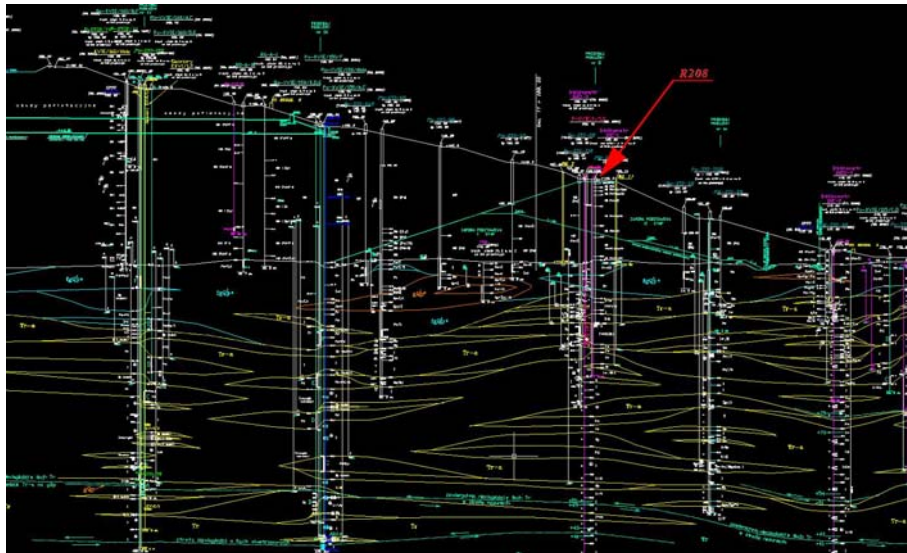
Przekrój ten znajduje się w miejscu, w którym obwałowanie przecina niewielką, płytką dolinę starego cieku, zaś zapora osiąga największą wysokość. Reper nr 208 usytuowany jest na koronie drugiego etapu obwałowania podstawowego (ryc. 3), dzięki czemu obserwowany jest niemal od początku eksploatacji obiektu. Ze względu na warunki posadowienia oraz wysokość zapory w omawianym przekroju zainstalowano wiele urządzeń kontrolno-pomiarowych, takich jak piezometry otwarte, inklinometry oraz repery głębinowe. Zasięg aparatury głębinowej dochodzi do ok. 100 m poniżej pierwotnego poziomu terenu. Obwałowanie pierwszego etapu, o wysokości ok. 20 m, wykonane jest z gruntów mineralnych niespoistych – od piasków średnioziarnistych do żwirów. Obwałowania wyższych etapów, o łącznej wysokości ok. 30 m, wykonane są z odpadów poftlotacyjnych odłożonych w przywałowej strefie składowiska. Jest to zwykle materiał o najgrubszym uziarnieniu i najlepszych parametrach mechanicznych.

W podłożu można wydzielić dwie zasadnicze strefy. W pierwszej z nich, rozciągającej się od poziomu terenu do głębokości od 20 do 70 m, zalegają utwory polodowcowe w postaci niewielkich soczewek piasków o różnym uziarnieniu, glin, żwirów oraz namulów wymieszanych z trzeciorzędowymi ilami, które budują drugą – dolną warstwę podłoża. Warstwa ilów, ze względu na głębokość zalegania, jest znacznie słabiej rozpoznana. W jej górnej części stwierdzono kilka powierzchni nieciągłości, zinterpretowanych jako rezultat nasunięć i zaburzeń glacitektonicznych. Górna strefa największą miąższość osiąga w oko-

licach osi obwałowania pierwszego etapu składowania. Ze względu na jej dużą zmienność odwzorowanie warstw materiałowych jest bardzo niepewne [2, 3]. Głębiej w podłożu zalegają skały z okresów Triasu i Permu – głównie piaskowce, wapienie i dolomity (ryc. 6, warstwy T1, T1-2, P1, P3).



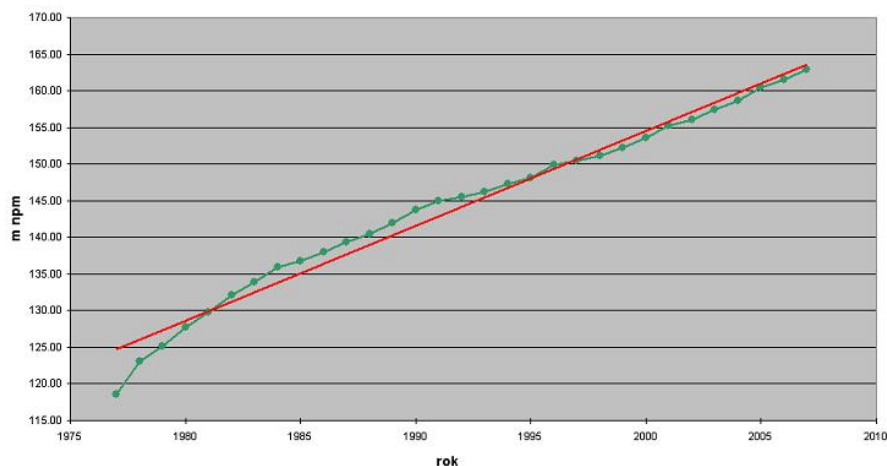
Ryc. 2. Plan składowiska z zaznaczonym przekrojem XVII  
Fig. 2. Plan of the reservoir – location of section XVII



Ryc. 3. Położenie reperu nr 208 w przekroju XVII  
Fig. 3. Section XVII – location of the benchmark 208

Głównym źródłem zasilania górnego poziomu wodonośnego są wody nadosadowe ze składowiska. Z powodu poziomego uwarstwienia materiału zdeponowanego w osadniku w cyklicznym procesie sedymentacji poziomy współczynnik filtracji ma znacznie wyższą wartość niż pionowy. Wskutek tego migracja wody z wnętrza składowiska odbywa się głównie poziomymi warstwami, a zwierciadło wody układa się prawie poziomo – aż do strefy przywałowej o szerokości kilkudziesięciu metrów, z której pobierano materiał do nadbudowy – niszcząc jego warstwową strukturę. W tej strefie obserwowany jest gwałtowny spadek krzywej depresji, która następnie łagodnie opada w kierunku zewnętrznego drenażu obwałowań. W rejonie skarpy odpowietrznej zapory, o średnim nachyleniu wynoszącym ok. 1:4, zwierciadło wody układa się bardzo nisko – średnio ok. 20 m poniżej obrysu skarpy i ma niewielki spadek (ok. 1:7), któremu towarzyszy parcie hydrodynamiczne o stosunkowo niewielkiej wartości. Wszystko to sprawia, że mimo znacznej wysokości już na pierwszy rzut oka zapora wydaje się konstrukcją bezpieczną.

Potwierdzają to również wyniki monitoringu geodezyjnego, prowadzonego od początku istnienia zapory. Jest jednak jeden wyjątek. Przemieszczenia poziome reperów w przekroju XVIIE, a szczególnie reperu nr 208 osiągają znaczne wartości, wyraźnie odbiegające od oczekiwanej przeciętnej. Ponadto tempo ich przyrostu wzrasta wraz z wysokością składowiska. Wysokość składowania w latach 1977–2006 rosła prawie liniowo, z prędkością ok. 1,25 m/rok (ryc. 4), natomiast przemieszczenia poziome reperu 208 – prawie kwadratowo, przy jednoczesnej wyraźnej stabilizacji przemieszczeń pionowych (ryc. 5).



Ryc. 4. Wysokość składowania w latach 1977–2006

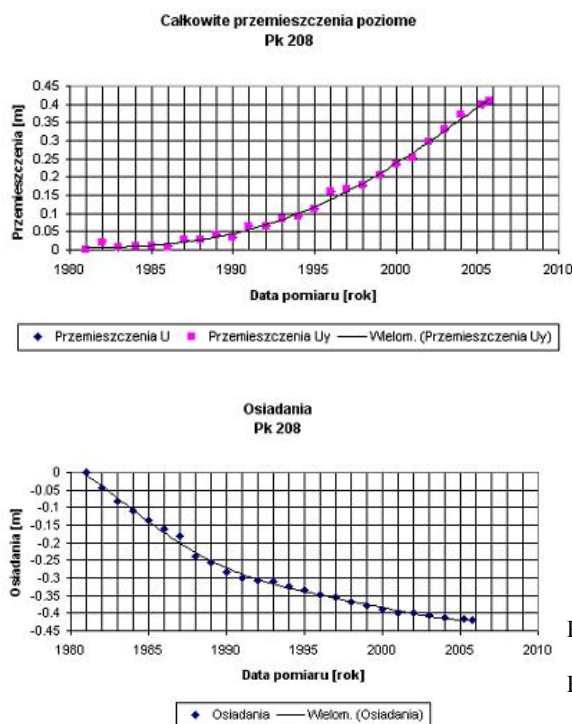
Fig. 4. Height of storage in the years 1977–2006

Rodzi to pytanie, czy obserwowane zjawisko jest sygnałem osiągnięcia stanu granicznego i początkiem procesu prowadzącego do katastrofy, czy też całkowicie naturalną i bezpieczną reakcją na powolny, lecz systematyczny wzrost obciążenia podłoża? Odpowiedź wymaga sformułowania i weryfikacji szczegółowych hipotez dotyczących jego możliwych przyczyn.

Jako najbardziej prawdopodobną hipotezę inicjacji procesu prowadzącego do katastrofy przyjęto głęboki poślizg wzdłuż jednej z powierzchni nieciągłości odkrytej w warstwie ilów. Potwierdzeniem dla niej są obserwacje jednego z inklinometrów, który w pobliżu tej



powierzchni uległ deformacji uniemożliwiającej wprowadzenie elementu pomiarowego. Zaś przeciwko niej świadczą wyniki wstępnej analizy stateczności obwałowania wraz z podłożem, w rezultacie której dla głębokich powierzchni poślizgu uzyskano minimalną wartość współczynnika stateczności równą blisko 1,7.



Ryc. 5. Przemieszczenia poziome i pionowe reperu nr 208

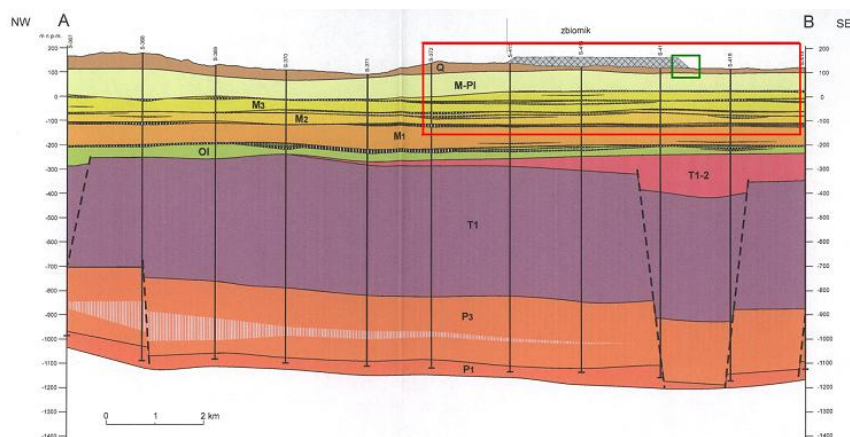
Fig. 5. Horizontal and vertical displacements of benchmark 208

Jako hipotezę przeciwną przyjęto prawie sprężyste odkształcenie bryły prekonsolidowanego lodowcem podłoża, pod wpływem znacznego obciążenia wtórnego rozłożonego na rozległym obszarze. Wyjawszy brak innych sygnałów pogorszenia bezpieczeństwa obwałowań, nie ma jednoznacznych argumentów za i przeciw tej hipotezie. Jej weryfikacja stała się głównym celem opisywanej symulacji.

### 3. Dobór schematu obliczeniowego

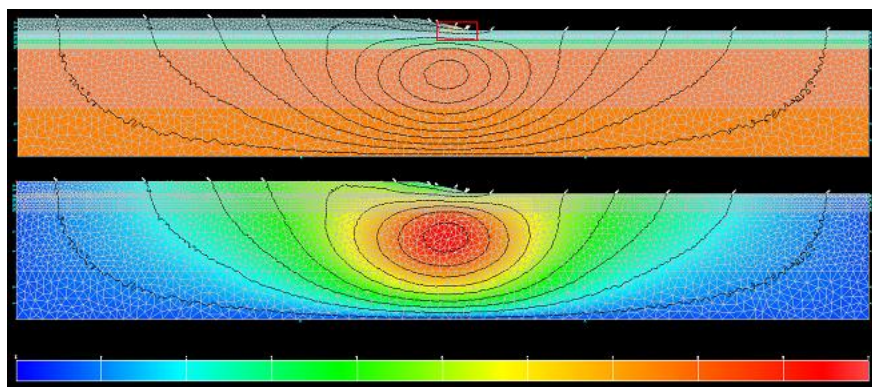
Ze względu na rozmiary obiektu i rozłożenie obciążenia na dużym obszarze przyjęto, że naprężenia pionowe od ciężaru składowiska mogą zanikać znacznie wolniej niż w przypadku podobnych obiektów liniowych (np. zapór wodnych). Wartość obciążenia (ciężar zgromadzonych odpadów) jest również większa niż ciężar wody zgromadzonej w zbiorniku zaporowym o porównywalnym piętrzeniu. Głębokość oddziaływania obciążenia może być znacznie większa niż w typowych przypadkach. Mechanizm, który model powinien odwzorowywać, polega na równomiernym ściskaniu poziomej warstwy podłoża i „wyciskaniu” materiału od geometrycznego środka składowiska w kierunku obwałowań. Przemieszczenia poziome będą się wówczas sumować na znacznej długości, zanim stan naprężenia

nie zbliży się dostatecznie do stanu hydrostatycznego ściskania. Teoretycznie więc schemat obliczeniowy powinien obejmować całe składowisko wraz z odpowiednio dużym fragmentem podłoża (ryc. 6) lub sięgać do geometrycznego środka zbiornika, w okolicy którego przemieszczenia poziome powinny całkowicie zanikać, a następnie zmieniać zwrot.



Ryc. 6. Szkic składowiska na tle przekroju geologicznego  
Fig. 6. Sketch of reservoir on the geological section

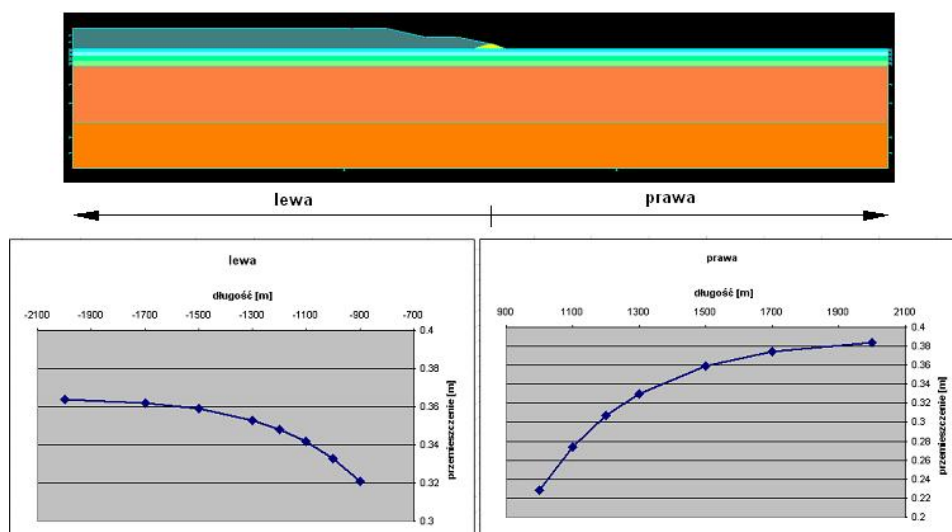
Określenie wrażliwości modelu na położenie granic schematu obliczeniowego przeprowadzono na podstawie serii obliczeń dla schematów o różnej długości i głębokości. Obserwowano wartość składowej poziomej przemieszczenia reperu nr 208, która została przyjęta jako kryterium poprawności schematu. Schemat obliczeniowy, który został uznany za wystarczająco dokładny, wraz z siatką elementów skończonych przedstawiono na ryc. 6. Jego całkowita szerokość wynosi 3500 m, zaś głębokość – 400 m poniżej powierzchni terenu. Na rycinie tej przedstawiono również rozkład przemieszczeń poziomych, które osiągają maksymalną wartość w pobliżu osi obwałowania pierwszego etapu, na głębokości blisko 200 m poniżej poziomu terenu, równą ok. 1,5 m.



Ryc. 7. Przekrój obliczeniowy wraz z siatką elementów skończonych  
Fig. 7. Calculation cross section with finite element mesh

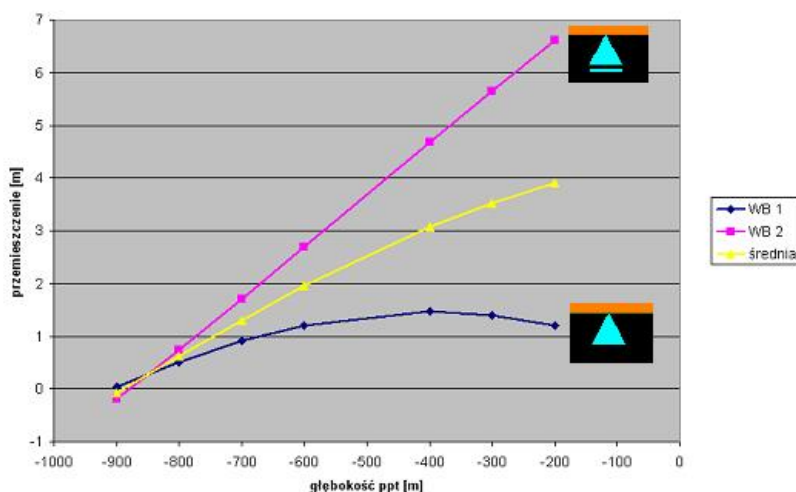
Wartość przemieszczenia poziomego węzła referencyjnego siatki, odpowiadającego położeniu reperu nr 208, w zależności od położenia lewej i prawej granicy schematu obliczeniowego zilustrowano na wykresach na ryc. 8. W obu przypadkach widoczna jest wyraźna tendencja do stabilizacji wartości obserwowanego przemieszczenia wraz ze wzrostem szerokości schematu. Zależność obserwowanego przemieszczenia od głębokości schematu i warunku brzegowego na jego dolnej krawędzi przedstawiono na wykresie na ryc. 9. Dla standardowego warunku brzegowego (podparcie nieprzesuwne) przemieszczenie poziome osiąga wartość maksymalną dla głębokości schematu równej ok. 400 m poniżej poziomu terenu. Przy większych głębokościach zaczyna ujawniać się zjawisko wciągania górnej warstwy przekroju do wnętrza zbiornika (przesunięcie w lewo) na skutek dużych osiadań, swobodnego przesuwu wzdłuż lewej pionowej krawędzi schematu i znacznie niedoszacowanej sztywności warstw gruntu zalegających na dużych głębokościach. Oszacowanie wartości parametrów materiałowych gruntów na dużych głębokościach stanowi osobny, bardzo istotny problem. Dla warunku brzegowego w postaci podparcia przesuwnego, modelującego poślizg bez tarcia wzdłuż poziomej powierzchni nieciągłości, uzyskano wyniki wielokrotnie przekraczające wartości obserwowane w naturze. Dla powierzchni nieciągłości znajdującej się na głębokości ok. 100 m poniżej poziomu terenu przemieszczenia poziome reperu 208 osiągają wartość 7 m. Wydaje się więc, że hipoteza poślizgu po powierzchni nieciągłości jest mało prawdopodobna.

Ponadto przeanalizowano wpływ piętrzenia wody w zbiorniku na wartości przemieszczeń poziomych obwałowań. Wpływ ten okazał się niewielki, prawdopodobnie ze względu na wysokie położenie stropu nieprzepuszczalnej warstwy ilów w stosunku do dolnej granicy schematu obliczeniowego. Zależność zmiany przemieszczenia poziomego węzła referencyjnego w funkcji rzędnej zwierciadła wody w zbiorniku pokazano na wykresie na ryc. 10.

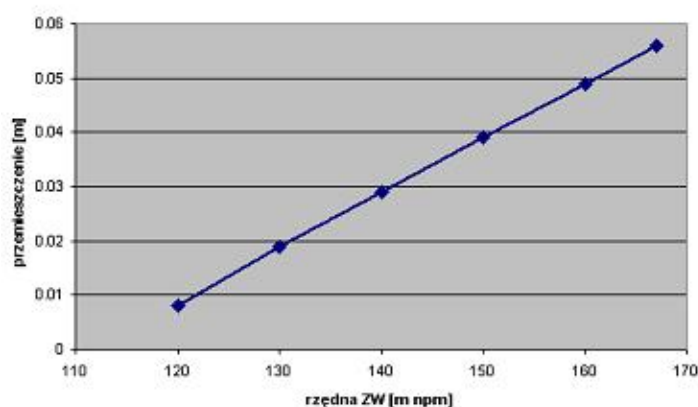


Ryc. 8. Zależność przemieszczenia poziomego reperu nr 208 od szerokości schematu  
Fig. 8. Dependence of horizontal displacement of benchmark 208 on width of scheme





Ryc. 9. Zależność przemieszczenia poziomego reperu nr 208 od głębokości schematu  
Fig. 9. Dependence of horizontal displacement of benchmark 208 on depth of scheme



Ryc. 10. Zależność przemieszczenia poziomego reperu nr 208 od wysokości piętrzenia  
Fig. 10. Dependence of horizontal displacement of benchmark 208 on head of water

#### 4. Prognoza wskazań reperu nr 208 podczas dalszej nadbudowy składowiska

Opierając się na przedstawionym wyżej schemacie obliczeniowym, przygotowano prognozę przemieszczeń poziomych obserwowanego reperu w funkcji wysokości składowania. Prognoza uwzględnia aktualne założenia projektowe w zakresie docelowej rzędnej składowiska oraz geometrii przekroju poprzecznego, tj. wzajemnego usytuowania i wysokości wałów kolejnych etapów. Aktualnie przewiduje się zakończenie nadbudowy składowiska na rzędnej 200 m n.p.m. W schemacie obliczeniowym wydzielono pięć stref materiałowych. Są to:

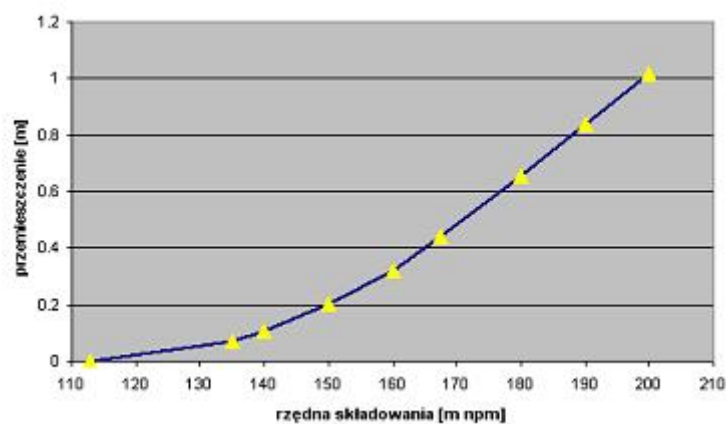
- 1) odpady zdeponowane we wnętrzu składowiska,
- 2) odpady wbudowane w obwałowania od etapu drugiego wznwyż,
- 3) grunty rodzime niespoiste wbudowane w obwałowania pierwszego etapu,
- 4) pierwsza (górna) warstwa podłoża o miąższości 70 m – utwory lodowcowe (piaski, gliny, żwiry oraz namuły) przemieszane z rodzimymi ilami trzeciorzędowymi,
- 5) druga (dolna) warstwa podłoża o miąższości 330 m – jednorodne iły trzeciorzędowe.

Wartości parametrów materiałowych przyjęto za [1, 2] dla odpadów i wałów od etapu drugiego wznwyż [dok. arch.], dla obwałowań pierwszego etapu oraz [2, 3] – dla podłoża. Ponadto w warstwach podłoża wydzielono podwarstwy o jednakowej miąższości, w których zróżnicowano sztywność, zwiększając wartość modułu odkształcenia wraz z głębokością [4, 5]. W górnej warstwie podłoża (czwartorzęd) wydzielono cztery takie podwarstwy, w dolnej (trzeciorzęd) – dwie. Wartości parametrów materiałowych przyjętych do obliczeń zestawiono w tablicy 1. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresie – ryc. 10.

Tablica 1

Wartości parametrów materiałowych przyjętych do obliczeń

Nr warstwy	Nr podwarstwy	$\gamma$	$n$	$\varphi$	$c$	$E$	$\nu$	$k$
[–]	[–]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[%]	[°]	[kPa]	[MPa]	[–]	[m/d]
1	–	20,0	30	30	0	30	0,36	5,0
2	–	20,0	25	33	0	35	0,30	5,0
3	–	20,0	25	36	0	70	0,25	50,0
4	1	22,0	20	23	45	50	0,25	1,0
	2	22,0	20	23	45	100	0,30	1,0
	3	22,0	20	23	45	150	0,35	1,0
	4	22,0	20	23	45	200	0,35	1,0
5	1	22,0	10	12	55	80	0,35	0,01
	2	22,0	10	12	55	100	0,40	0,01



Ryc. 11. Prognoza przeszerzenia reperu nr 208 w funkcji wysokości składowania  
 Fig. 11. Prognosis of horizontal displacement of benchmark 208 in relation to height of storage

Wraz ze wzrostem poziomu składowania przemieszczenia poziome w przekroju XVIIE będą nadal rosnąć. W przypadku reperu nr 208 mogą osiągnąć wartość ok. 1 m. Ze względu na przesunięcie obwałowań obecnie eksploatowanego etapu podwyższania do wnętrza składowiska oraz znaczne złagodzenie nachylenia skarpy odpowietrznej zapory obserwowane przyrosty przemieszczeń poziomych powinny się w znacznym stopniu ustabilizować, nie przekraczając 15–20 mm na metr przyrostu wysokości składowania.

## 5. Podsumowanie

Przedstawiona wyżej analiza pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- Wysoce prawdopodobne jest, że wskazania reperu nr 208 są rezultatem naturalnej reakcji podłoża na wzrost obciążenia wskutek nadbudowy składowiska.
- Nie stwierdzono przesłanek potwierdzających hipotezę o zainicjowaniu procesu destrukcji wskutek osiągnięcia stanu granicznego w części obszaru podłoża.
- Możliwe jest, pod warunkiem uzyskania wystarczająco precyzyjnych wartości parametrów materiałowych dla głębokich warstw podłoża, opracowanie długoterminowej prognozy przemieszczeń.
- Prognoza taka może być podstawą do szybkiej oceny poziomu stateczności zapory przez identyfikację procesów zniszczenia w ich początkowej fazie.

Powyższe wnioski należy, oczywiście, traktować z właściwą ostrożnością. Nie wykluczają one categorycznie wystąpienia w przyszłości stanów awaryjnych, a jedynie pomagają przypisać prawdopodobieństwo ich wystąpienia na podstawie aktualnie dostępnych przesłanek. Prognozy powstałe w wyniku podobnych symulacji powinny ułatwiać interpretację wyników monitoringu. Również wyniki monitoringu powinny być podstawą weryfikacji poprawności prognozy i w razie potrzeby – jej aktualizacji.

## Literatura

- [1] Młynarek Z., Tschuschke W., Wierzbiński J., *Wykorzystanie metody sondowania statycznego i badania dylatometrycznego do oceny parametrów geotechnicznych odpadów kopalnianych*, „Nowoczesne metody badań gruntów”, Seminarium ITB, Warszawa, maj 2003, 23-35.
- [2] Zajberet A., Wrzosek K., *Składowisko odpadów poflotacyjnych „Żelazny Most”*. Projekt pasmowego drenażu pierścieniowego, X Jubileuszowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Kielce, 16–18 czerwca 2003, 507-515.
- [3] Król P., Sorbian P., Truty A., Wolski W., *Zastosowanie metod komputerowych w ocenie stanu zapór składowiska „Żelazny Most”*, XIV Konferencja Naukowa „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”, Korbiewów 2002, 105-120.
- [4] Georgiannou V.N., Rampello S., Silvestri F., *Static and dynamic measurements of undrained stiffness on natural overconsolidated clays*, Proc. 10<sup>th</sup> Firenze, Vol. 1, 1991, 91-95.
- [5] Popielski P., Stasiński J., *Zastosowanie pakietu HYDRO-GEO w geotechnice i hydrotechnice, dokładności obliczeń numerycznych, analiza wstecz*, XX Ogólnopolska Konferencja „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”, Wisła-Ustroń, marzec 2005.