

Paweł RYTEL

Zakład Inżynierii Wodnej i Melioracji, ITP Falenty
Department of Water Engineering and Land Reclamation, ITLS

Ocena stateczności zapory ziemnej zbiornika Nielisz z wykorzystaniem metody elementów skończonych Stability analysis of the main dam of Nielisz reservoir using finite element method

Słowa kluczowe: zapora, stateczność, metoda elementów skończonych, Plaxis v.8.5

Key words: water dam, stability, finite element method, Plaxis v.8.5

Wprowadzenie

Budowle ziemne wymagają stałego procesu kontroli zarówno w fazie budowy, jak i eksploatacji. W tym celu konieczne jest przeprowadzanie analizy stateczności. Analiza ta może być wykonana przy użyciu metod tradycyjnych lub metod numerycznych.

Metody numeryczne zaczęły być stosowane w analizie stateczności kilkanaście lat po użyciu komputerów do tego celu. W latach osiemdziesiątych XX wieku nastąpił szybki rozwój analizy stateczności dzięki wykorzystaniu metody elementów skończonych (MES). Z biegiem czasu metody numeryczne zaczęto wykorzystywać do rozwiązywania

bardziej skomplikowanych problemów, jakimi są na przykład posadowienie nasypów na gruntach słabonośnych, zarówno pochodzenia mineralnego, jak i organicznego.

Problem dotyczący posadowienia nasypu na gruntach słabonośnych polega na większej ściśliwości tych gruntów oraz mniejszej początkowej wytrzymałości na ścinanie w porównaniu z gruntami nośnymi. Dokładna analiza stateczności jest zagadnieniem bardzo istotnym ze względu na bezpieczeństwo przyszłych użytkowników budowli.

Metody obliczeń stateczności oparte na analizie równowagi granicznej nie zapewniają zgodności stanu naprężeń z rzeczywistymi warunkami panującymi wzdłuż potencjalnej powierzchni zsuwu. Wadą tych metod jest także brak związku między oceną zmian właściwości podłoża organicznego a zachodzącymi zmianami stanu naprężenia i odkształ-

cenia podczas obciążania. Połączenie zagadnienia oceny stateczności z zachowaniem się podłoża organicznego pod obciążeniem zapewnia analiza numeryczna prowadzona dzięki zastosowaniu metody elementów skończonych. Aby otrzymać poprawne rozwiązanie, trzeba jednak przyjąć odpowiedni model gruntu. Musi on charakteryzować przynajmniej sprężysto-plastyczne właściwości ośrodka gruntowego (Bąkowski 2003). Zastosowanie modelu sprężysto-idealnie plastycznego, ze względu na stosunkowo małą liczbę przyjętych parametrów, pozwala na przeprowadzenie obliczeń w większości przypadków budowlanych (Bąkowski 2003).

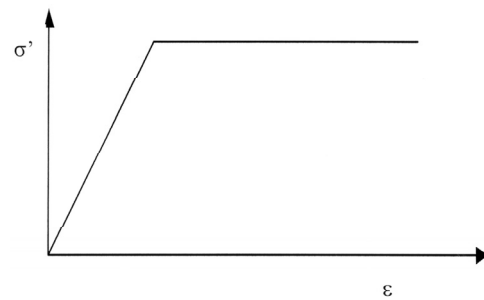
Celem pracy jest ocena stateczności zapory ziemnej zbiornika wodnego Nielisz w czasie jej budowy za pomocą MES. Stateczność będzie sprawdzana w najbardziej niekorzystnym przekroju zapory, w którym występuje największa miąższość gruntów słabonośnych. Zakres pracy obejmuje: krótki opis metody elementów skończonych w analizie stateczności z wykorzystaniem programu Plaxis v.8.5, charakterystykę obiektu i metodykę badań, wyniki badań i dyskusję oraz wnioski.

Metoda elementów skończonych w analizie stateczności

W programie Plaxis v.8.5 napisanym przez Brinkgrieve i Vermeer (1998) wykorzystywana jest metoda bezpośrednia – metoda redukcji parametrów wytrzymałościowych (Dawson i in. 1999), polegająca na redukowaniu parametrów wytrzymałościowych charakteryzujących grunt aż do chwili zniszczenia.

Obliczenia numeryczne dają możliwość określenia lokalnego współczynnika stateczności dzięki porównaniu wytrzymałości na ścinanie i naprężeń stycznych w poszczególnych elementach.

W tym programie numerycznym używane są cztery modele gruntu. Podstawowy model to model sprężysto-idealnie plastyczny stosowany do każdego rodzaju gruntów. Warunek plastyczności (rys. 1) zdefiniowany jest zgodnie z kryterium Coulomba-Mohra (Gryczmański 1995).



RYSUNEK 1. Model sprężysto-idealnie plastyczny (Brinkgrieve i Vermeer 1998)
FIGURE 1. Linear elastic perfectly plastic model (Brinkgrieve and Vermeer 1998)

W modelu sprężysto-idealnie plastycznym przyrost odkształcenia całkowitego ($\delta\epsilon$) składa się z przyrostu odkształcenia sprężystego ($\delta\epsilon^e$) i przyrostu odkształcenia plastycznego ($\delta\epsilon^p$):

$$\delta\epsilon = \delta\epsilon^e + \delta\epsilon^p$$

Zależność między przyrostem naprężeń efektywnych oraz przyrostem odkształceń przedstawiona jest we wzorze:

$$\delta\sigma' = D^e \cdot \delta\epsilon^e$$

gdzie: D^e – macierz sztywności materiału sprężystego.

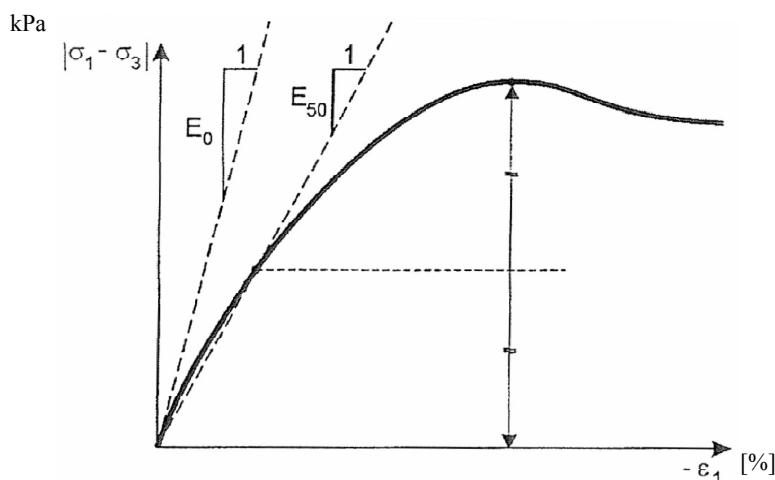
Dokładność wyników modelowania zależy od stopnia skomplikowania

danego przypadku. W modelu sprężysto-idealnie plastycznym, z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra, grunt określa się następującymi parametrami:

- liniowa sprężystość: moduł Younga (E), współczynnik Poissona (ν),
- kryterium plastyczności: kąt tarcia wewnętrznego (ϕ'), spójność (c').

Zgodnie z instrukcją programu Plaxis wartość modułu sprężystości dla gruntów piaszczystych przyjmuje się jako E_{50} (rys. 2). Wartość współczynnika Poissona kształtuje się od 0,3 do 0,4.

na rzece Wieprz oraz zbiornik wstępny na rzece Por. Dane techniczne zbiornika Nielisz zostały przedstawione w tabeli 1 (Sierant 2007). Zapora ziemna, oddana do użytku w 1997 roku, spełnia następujące funkcje: przeciwpowodziową – o stałej rezerwie powodziowej 6,49 mln m³ (Pichla i Jakimiuk 2011), rekreacyjną, nawadniającą oraz energetyczną. Dane techniczne zapory ziemnej Nielisz przedstawiono na rysunku 3 (Rytel 2008). Obszar należy do południowego odcinka Niecki Brzeżnej. W podłożu



RYSUNEK 2. Definicja wielkości E_0 i E_{50} (Brinkgrieve i Vermeer 1998)

FIGURE 2. Definition of E_0 and E_{50} values (Brinkgrieve and Vermeer 1998)

Material i metody badań

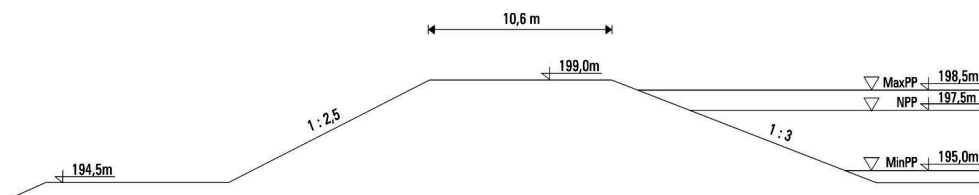
Zbiornik Nielisz położony jest w dolinie rzek Wieprz i Por na Zamojszczyźnie, 23 km na północny zachód od Zamościa. Zlokalizowany jest na terenach należących do wsi Nielisz, Deszkowice, Kulików oraz Nawóz, w powiecie zamojskim, w południowo-zachodniej części województwa lubelskiego. Podzielony jest na dwie części: zbiornik główny

zapory występują utwory czwartorzędowe o zróżnicowanej miąższości i litologii. Zalegają one z niezgodnością stratygraficzną na wyerodowanej powierzchni osadów kredy górnej reprezentowanej przez margle i opokę kredową.

Na tarasach w dnie doliny występują utwory holocenijskie w postaci pyłów, pyłów piaszczystych i piasków pylastych oraz namulów. Ich miąższość waha się od 3 do 6 m. Pod utworami holocenijskimi znajdują się utwory rzeczne (piaski

TABELA 1. Dane techniczne zbiornika Nielisz (Sierant 2007)
TABLE 1. Technical data of Nielisz reservoir (Sierant 2007)

Normalny poziom piętrzenia (NPP)	197,50 m n.p.m.
Minimalny poziom piętrzenia (MinPP)	195,00 m n.p.m.
Maksymalny poziom piętrzenia (MaxPP)	198,50 m n.p.m.
Pojemność całkowita (V_c)	19,48 mln m ³
Pojemność martwa (V_m)	4,71 mln m ³
Pojemność użyteczna (V_u)	14,77 mln m ³
Powierzchnia zalewu przy NPP (F_{npp})	888,00 ha
Powierzchnia zalewu przy MinPP (F_{min})	377,00 ha



RYSUNEK 3. Dane techniczne zapory ziemnej Nielisz (Rytel 2008)
FIGURE 3. Technical data of Nielisz dam (Rytel 2008)

drobne i pylaste) o miąższości do 2 m. Najgłębiej zalegają twory wodnolodowcowe w postaci piasków drobnych, średnich ze żwirem i pospółki. Na zboczach doliny zalegają osady eoliczne w postaci lessów i lessów spiazszonych (Sierant 2007).

W niniejszej pracy został wykorzystany program Plaxis v.8.5, który jest specjalistycznym dwuwymiarowo ograniczonym programem komputerowym służącym do obliczeń odkształceń i stateczności dla rozmaitych typów geotechnicznego zastosowania. Zagadnienia geotechniczne mogą być modelowane za pomocą modelu siatki numerycznej elementów trójkątnych, sześciolub piętnastowęzłowej w postaci układu *plane strain* (płaskiego) lub układu *axisymmetric* (osiowo-symetrycznego). W programie zastosowana jest graficzna możliwość szybkiego wprowadzenia

geometrii ośrodka gruntowego, parametrów gruntowych i wygenerowanie siatki elementów (*Input*). Po wygenerowaniu siatki elementów skończonych ustala się warunki początkowe związane z rozkładem ciśnienia wody w porach oraz stanu naprężenia. Kolejną czynność to przeprowadzenie obliczeń (*Calculations*) całkowicie automatycznie, opartych na procedurach numerycznych. *Output* to „wyprodukowanie” wyników odkształceń, natomiast *Curves* (krzywe) modelują krzywą ciśnienia wody w porach pod nasypem.

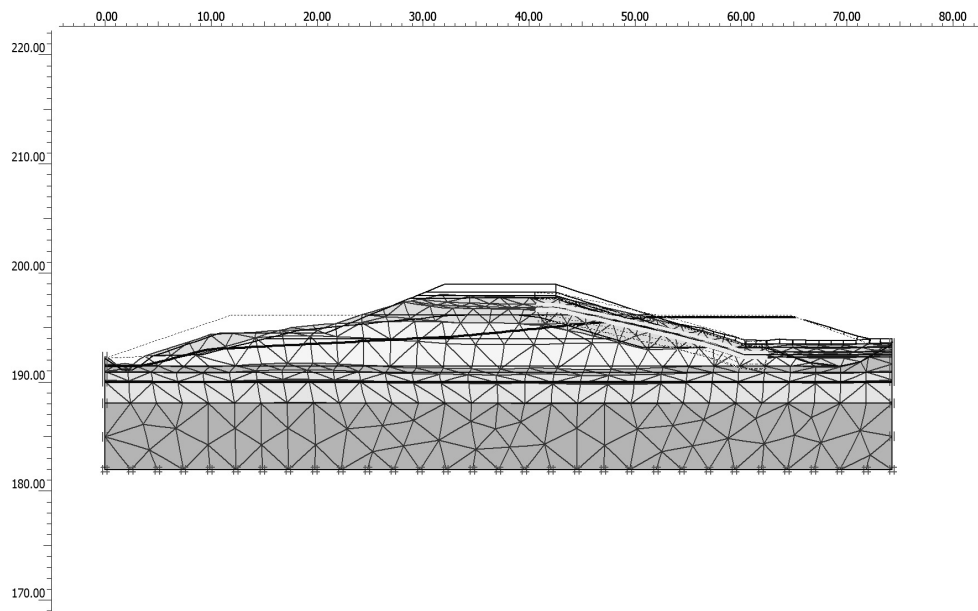
Trzeba pamiętać o odpowiednim wprowadzeniu warunków brzegowych. Polega to na zablokowaniu przemieszczeń poszczególnych węzłów siatki.

Autor zaczerpnął dane o miąższości warstw oraz rodzaju gruntów z badań przeprowadzonych przez Geoteko – Projekty i Konsultacje Geotechniczne

(Badania geotechniczne... 1994), Ryteł (2008), a także przyjął parametry geotechniczne niezbędne do przeprowadzenia analizy numerycznej (tab. 2). Schemat geometryczny przyjęty do obliczeń wraz z siatką elementów skończonych przedstawiono na rysunku 4 (Rytel 2008).

etapu budowy. Pierwszy etap budowy polegał na rozebraniu istniejącego nasypu do rzędnej 194,00 m n.p.m. (rys. 5) oraz wykonaniu nasypów przeciążeniowych i korpusu zapory do rzędnej 196,00 m n.p.m. (rys. 6) i obejmował:

- usunięcie istniejącego nasypu, czas trwania 7 dni,



RYSUNEK 4. Schemat geometryczny przyjęty do obliczeń w programie Plaxis (Rytel 2008)
 FIGURE 4. Geometric scheme for Plaxis calculations (Rytel 2008)

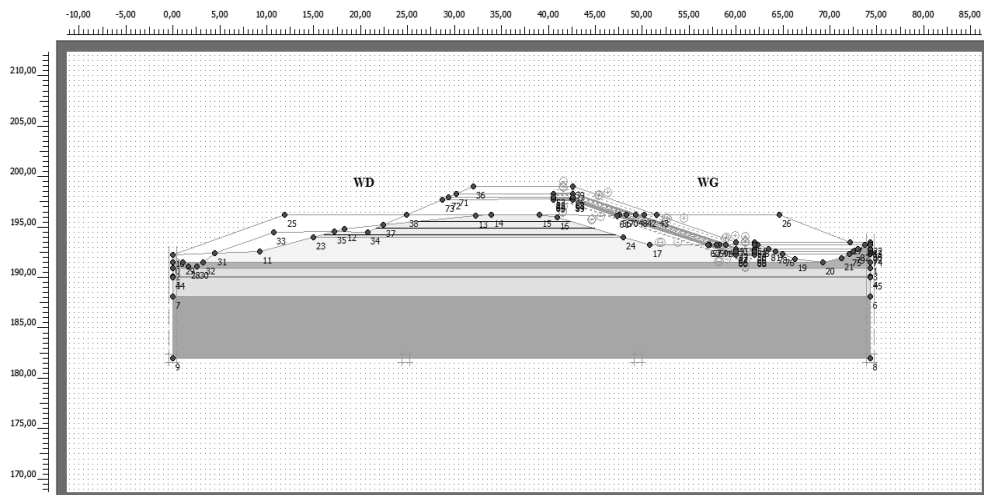
Przy budowie zapory zastosowano metodę wieloetapową, gdzie dochodzi do konsolidacyjnego wzmocnienia podłoża słabonośnego (Lechowicz i in. 1996, Lechowicz i Bąkowski 1999, 2000). Początkowo projekt zakładał 3-etapową budowę. Jednak budowa obiektu została skrócona ostatecznie do budowy 2-etapowej z przeciążeniem pomimo zwiększenia robót ziemnych (Ładniak 1996, Bortkiewicz i Szmagaj 1996, Sierant i Tchórz 1996). Współczynniki stateczności zapory były obliczane dla każdego

- przerwę technologiczną, czas trwania 21 dni,
- budowę nasypów przeciążeniowych i korpusu zapory do rzędnej 196,00 m n.p.m., czas trwania 30 dni,
- przerwę technologiczną, czas trwania 150 dni.

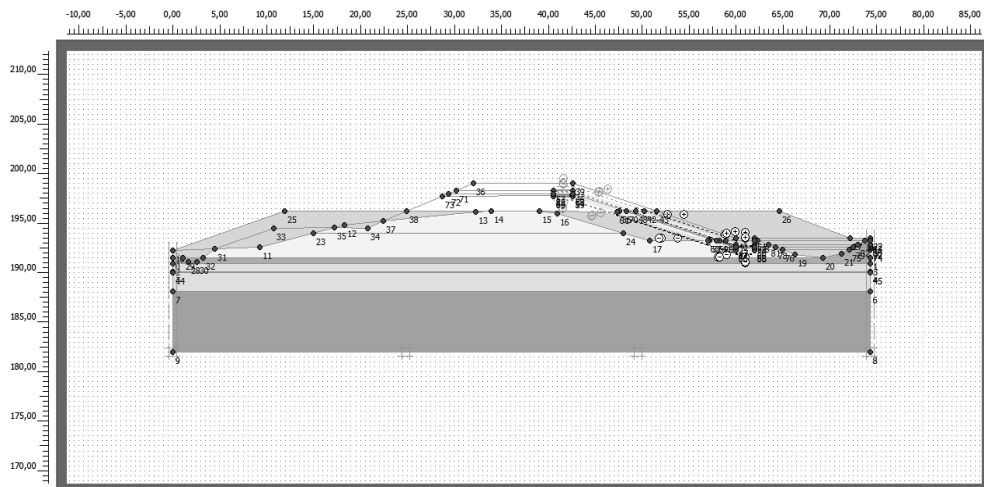
Drugi etap budowy polegał na nadbudowie korpusu zapory do rzędnej 199,00 m n.p.m. z materiału pochodzącego z nasypów przeciążeniowych (rys. 7) i obejmował:

TABELA 2. Parametry geotechniczne gruntów dla obliczeń Plaxis (Rytel 2008)
 TABLE 2. Geotechnical parameters for Plaxis calculations (Rytel 2008)

Rodzaj gruntu Soil Type	Miaższość warstwy Thickness h [m]	Ciężar objętościowy Unit weight γ [kN·m ⁻³]	Współczynnik filtracji Permeability coefficient k [m·s ⁻¹]	Współczynnik filtracji Permeability coefficient k [m·d ⁻¹]	K_o	Wskaźnik porowatości Void ratio e_o	Moduł odkształcenia Young's modulus E_o [MPa]	Edometryczny moduł ściśniętości (włórny) Oedometer modulus M [MPa]	Współczynnik Poissona Poisson's ratio ν	Spójność gruntu Cohesion c [kPa]	Kąt tarcia wewnętrznego Friction angle ϕ [°]
Nasyp stary Piasek pylasty siSa	4,5	18,5	$1 \cdot 10^{-5}$	$8,64 \cdot 10^{-1}$	0,43	0,5	8,5	11,5	0,3	0	30
Nasyp nowy i ławki Piasek pylasty siSa	3,0	18,5	$1 \cdot 10^{-4}$	8,64	0,43	0,5	10,0	13,5	0,3	0	33
Pył piaszczysty saSi	0,5	19,0	$1 \cdot 10^{-8}$	$8,64 \cdot 10^{-4}$	0,40	0,7	20,0	27,0	0,3	0	30
Namut górny Upper mud	0,8	16,0	$1,86 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,45	2,7	8,0	11,0	0,3	5	22
Pył piaszczysty saSi	0,1	19,0	$1 \cdot 10^{-8}$	$8,64 \cdot 10^{-5}$	0,40	0,7	20	27,0	0,3	2	30
Namut dolny Lower mud	2,0	16,0	$1,86 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,45	2,7	8,0	11,0	0,3	5	22
Piasek drobny FSa	2,0	18,5	$1,15 \cdot 10^{-5}$	1,0	0,50	0,5	100	135,0	0,3	0	38



RYSUNEK 5. Usunięcie istniejącego nasypu – program Plaxis
 FIGURE 5. Removing of existing embankment – Plaxis program

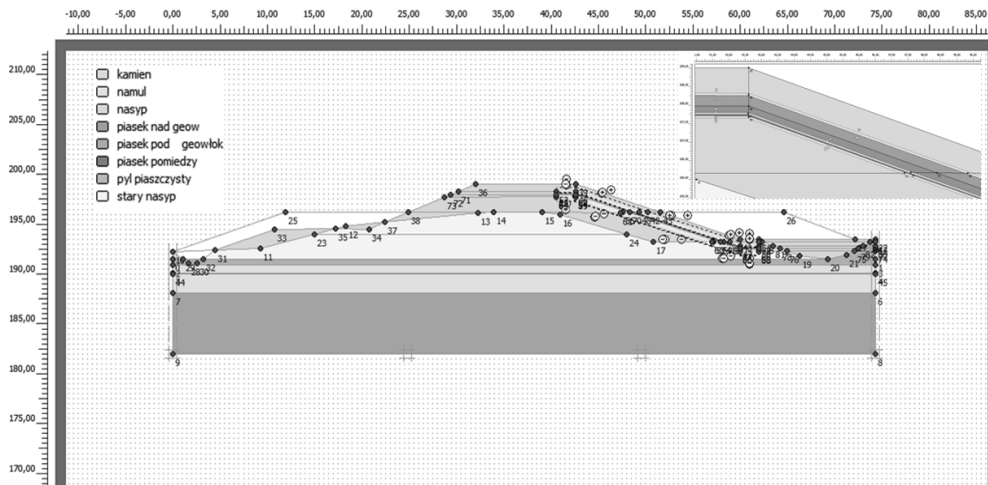


RYSUNEK 6. Budowa nasypów przeciążeniowych i korpusu zapory do rzędnej 196,00 m n.p.m.
 FIGURE 6. Construction of overload embankments and corps of a dam to the elevation 196,00 m

- zdjęcie nasypów przeciążeniowych i nadbudowę korpusu zapory, czas trwania 30 dni,
- przerwę technologiczną, czas trwania 366 dni (łącznie czas 604 dni).

Wyniki i dyskusja

Pod zaporą ziemną występują skomplikowane warunki geotechniczne, które charakteryzują się dużym uwarstwieniem podłoża w profilu pionowym,



RYSUNEK 7. Zdjęcie nasypów przeciążeniowych i nadbudowa korpusu zapory
 FIGURE 7. Removing of overload embankments and overbuild corps

a także w profilu poziomym. Badania geotechniczne przeprowadzone przez Geoteko (Badania geotechniczne... 1994) potwierdzają występowanie przewarstwień gruntów spoistych w stanie plastycznym i miękkoplastycznym. Grunty niespoiste występują często z przewarstwieniami w stanie luźnym. Istnieją także grunty słabonośne. Największy zasięg tych gruntów występuje m.in. w przekroju na 450. metrze, w którym wykonano obliczenia. Grunty słabonośne są w stanie plastycznym (grunty spoiste) i miękkoplastycznym (namuły). W wyniku konsolidacji grunty te uległy wzmocnieniu. Grunty spoiste zmieniły stan na twardoplastyczny, a namuły na stan plastyczny. W zaporze od strony wody dolnej znajduje się drenaż kamienno obniżający poziom zwierciadła wody, jednak ze względu na duży stopień komplikacji geometrii ośrodka gruntowego oraz dużą pracochłonność nie został wprowadzony do obliczeń metodą MES. Wyniki obliczeń współczynnika statecz-

ności otrzymane metodą MES zostały podane w tabelach 3 i 4. Tabela 3 przedstawia współczynniki stateczności obliczone w czasie budowy zapory ziemnej dla następujących faz:

- faza 1: usunięcie istniejącego nasypu,
- faza 2: budowa ławek i nasypu do rzędnej 196 m n.p.m.,
- faza 3: zdjęcie ławek i nasypu przeciążeniowego i nadbudowa korpusu zapory do rzędnej 199,0 m n.p.m.

TABELA 3. Wyniki obliczeń stateczności w czasie budowy zapory

TABLE 3. Results of stability calculations during building a dam

Faza Phase	Współczynnik stateczności Stability factor
1	1,84
2	1,44
3	1,26

Tabela 4 przedstawia wyniki współczynników stateczności obliczone w okresie samoistnego napełniania się zbiornika

Nielisz bez nadzoru obsługi zapory dla następujących faz:

- faza 4: piętrzenie wody do rzędnej 195,0 m n.p.m.,
- faza 5: opróżnianie zbiornika do rzędnej 193,5 m n.p.m.,
- faza 6: piętrzenie wody do rzędnej 197,5 m n.p.m.,

TABELA 4. Wyniki obliczeń stateczności w okresie od końca budowy do próbnego rozruchu (kwiecień 1997 r. – 15 maja 2007 r.)

TABLE 4. Results of stability calculations from the end of building to the trial run (April 1997 – 15th of May 2007)

Faza Phase	Współczynnik stateczności Stability factor
4	1,26
5	1,58
6	1,64
7	1,55

- faza 7: opróżnianie zbiornika do rzędnej 195,0 m n.p.m.

Wartości współczynnika stateczności są większe od 1,5, co jest zgodne z wymogami stawianymi ziemnym budowlom hydrotechnicznym posadawianym na podłożu słabonośnym. W trzech fazach (2, 3 i 4) współczynnik stateczności nie osiąga wymaganej wartości 1,5.

Wnioski

Na podstawie badań terenowych, materiałów dotyczących zagadnienia oraz obliczeń numerycznych sformułowano następujące wnioski:

1. Wartości współczynnika stateczności z obliczeń MES są mniejsze od wymaganego w czasie budowy po podwyższeniu nasypu do rzędnej 196,0 m

n.p.m. (faza 2), usunięciu ławek i nasypu przeciążeniowego i nadbudowy korony do rzędnej 199,0 m n.p.m. (faza 3) oraz przy pierwszym niekontrolowanym piętrzeniu (faza 4). Zakładając, że budowa podłoża została dokładnie rozpoznana, można stwierdzić, że wartości współczynnika stateczności mogą być zmniejszone do 1,30 (Borys 2009), a więc wartość współczynnika stateczności podczas budowy ławek i nasypu do rzędnej 196 m n.p.m. (faza 2) została osiągnięta.

2. Wyniki obliczeń stateczności wskazują na konieczność przeprowadzenia analiz współczynnika stateczności w czasie budowy w fazach: zdjęcia ławek i nasypu przeciążeniowego i nadbudowy korpusu zapory do rzędnej 199,0 m n.p.m. oraz pierwszego piętrzenia wody do rzędnej 195,0 m n.p.m.

3. W czasie niekontrolowanych piętrzeń i opróżnień zbiornika wodnego współczynnik stateczności jest większy od wymaganego.

Literatura

- Badania geotechniczne na obiekcie Nielisz 1994: Cz. I, cz. II. Geoteko – Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., Warszawa.
- BAKOWSKI J. 2003: Analiza stateczności nasypu na podłożu organicznym. Rozprawa doktorska. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- BORTKIEWICZ A., SZMAGAJ J. 1996: Zapora Nielisz – charakterystyka konstrukcyjna obiektów zapory czołowej. *Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska* 12: 291–302.
- BORYS M. 2009: Projektowanie i wykonawstwo ekranów przeciwfiltracyjnych z geomembran i mat bentonitowych w wałach przeciwpowodziowych i obwałowaniach małych zbiorników wodnych. Wydawnictwo IMUZ, Falenty.

- BRINKGRIEVE R.B.J., VERMEER B.A. 1998: PLAXIS Instruction Manual. Plaxis B.V., Delft.
- DAWSON E.M., ROTH W.H., DRESCHER A. 1999: Slope stability analysis by strength reduction. *Geotechnique* 49, 6: 835–840.
- GRY CZMAŃSKI M. 1995: Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa.
- LECHOWICZ Z., BĄKOWSKI J. 1999: Ocena stanu podłoża zapory czołowej zbiornika Mielimąka. Cz. I: Analiza wzmocnienia. VIII Konferencja Technicznej Kontroli Zapór, Zakopane – Kościelisko: 221–227.
- LECHOWICZ Z., BĄKOWSKI J. 2000: Ocena stateczności nasypu budowanego etapowo na podłożu organicznym. VII Krajowa Konferencja Mech. Grunt. i Fund., Szczecin, Cz. 1b: 17–26.
- LECHOWICZ Z., MIRECKI J., WOLSKI W. 1996: Zbiornik Nielisz – etapowa budowa zapory. *Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska* 12: 303–313.
- ŁADNIAK H. 1996: Zbiornik Nielisz – ogólna charakterystyka inwestycji. *Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji Inżynierii Środowiska* 12: 363–368.
- PICHLA A., JAKIMIUK S. 2011: Zbiornik wodny w Nieliszu w dorzeczu rzeki Wieprz. *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie* 1: 18–21.
- RYTEL P. 2008: Ocena stateczności zapory ziemnej zbiornika Nielisz w okresie eksploatacji. Praca magisterska. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- SIERANT M. 2007: Analiza wyników pomiarów piezometrycznych w zaporze czołowej zbiornika Nielisz w okresie rozruchu. Praca dyplomowa. Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- SIERANT M., TCHÓRZ T. 1996: Zbiornik Nielisz – problemy realizacji inwestycji. *Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska* 12: 369–374.

Streszczenie

Ocena stateczności zapory ziemnej zbiornika Nielisz z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Tematem

pracy jest ocena stateczności zapory ziemnej zbiornika Nielisz. Omówiono analizę stateczności wykorzystującą metodę elementów skończonych (MES). Podjęto problematykę doboru parametrów do obliczeń współczynnika stateczności. Analizę stateczności zapory Nielisz wykonano za pomocą programu Plaxis (Holandia). Wartości współczynnika stateczności z obliczeń MES są większe od 1,5 (co jest zgodne z wymogami stawianymi ziemnym budowlom hydrotechnicznym), z wyjątkiem fazy usunięcia ławek i nasypu przeciążeniowego i nadbudowy korony do rzędnej 199,0 m n.p.m. oraz przy pierwszym niekontrolowanym piętrzeniu. Zapora ziemna zachowuje odpowiednią stateczność.

Summary

Stability analysis of the main dam of Nielisz reservoir using finite element method. Subject of the paper is stability analysis of the main dam of Nielisz reservoir. The paper presents stability analysis based on the finite element method. The paper shows the problem of the parameters selection for stability factor calculations. Stability analysis for Nielisz dam were done by Plaxis (Netherlands) numerical program. The values of stability factor calculated by finite element method are greater than 1.5 except removing benches and overload embankment and overbuild an embankment crown to 199.0 meters above sea level phase and also the first uncontrolled lifting of water phase. The water dam has suitable stability.

Author's address:

Paweł Rytel
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy
Zakład Inżynierii Wodnej i Melioracji
Falenty, al. Hrabka 3, 05-090 Raszyn
Poland
e-mail: p.rytel@itp.edu.pl