



Elżbieta PILECKA*, Justyna MORMAN**

Stateczność wałów przeciwpowodziowych z wbudowaną warstwą odpadów powęglowych w świetle obliczeń numerycznych

Streszczenie: W artykule zaprezentowano analizę stateczności dla zmodernizowanego wału przeciwpowodziowego z wbudowaną warstwą materiałów odpadów powęglowych z Kopalni Węgla Kamiennego Piast. Dla przedstawionego przypadku prawego wału przeciwpowodziowego rzeki Małej Wisły, przeprowadzono analizę stateczności i przepływ wody w korpusie wału podczas maksymalnego spiętrzenia wody na skarpie dowodnej. Do obliczeń numerycznych wykorzystano program bazujący na metodzie elementów skończonych (MES) MIDAS GTS NX. Współczynnik został wyznaczony metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie (SRM) dla stanu początkowego (normalny układ obciążeń), podczas maksymalnego piętrzenia się wody powodziowej na skarpie odwodnej (wyjątkowy układ obciążeń) oraz dla korpusu wału nasączonego wodą po odpływie fali wezbraniowej. Uzyskane w obliczeniach wartości współczynnika pewności dla korpusu wału zostały odniesione do wytycznych z Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz. U. 2007 Nr 86 poz. 579). Współczynnik pewności dla analizowanego wału przeciwpowodziowego podczas wyjątkowego układu obciążeń nie spełnia warunku stateczności, dlatego w pracy rozpatrzono możliwości poprawy stateczności wału podczas piętrzenia wody oraz jej odpływu. W tym celu za pomocą modelowania sprawdzono stateczność korpusu wału przeciwpowodziowego po zastosowaniu kolumn gruntowych z użyciem materiału antropogenicznego z kopalni KWK Piast u podnóża korpusu wału zarówno po stronie dowodnej, jak i odpowietrzanej. Dla wszystkich modeli zastosowano ten sam scenariusz obliczeniowy. Dzięki większej wodoprzepuszczalności materiału gruntowego zastosowanego w kolumnach gruntowych, została obniżona krzywa depresji wody w korpusie wału, co zapewniło stateczność wału podczas wezbrania wody.

Słowa kluczowe: wały przeciwpowodziowe, odpady powęglowe, stateczność wałów przeciwpowodziowych, obliczenia numeryczne

* Dr hab. inż., prof. PK, ** Mgr inż., Politechnika Krakowska, Kraków; e-mail: epilecka@pk.edu.pl, jmorman@pk.edu.pl

The stability of the flood embankment with a layer of coal mining wastes

Abstract: The article presents an analysis of the stability of the modernized flood embankment with built layer of material coal mining wastes the Coal Mine "Piaś". For the present case, the Small Vistula River right flood embankment, an analysis of the stability and the flow of water in the body of the shaft during the maximum stacking water on a slope was conducted. A program based on the finite element method (FEM) MIDAS GTS NX was used for numerical calculations. The stability factor was determined by the reduction of shear strength (SRM) for the initial state (normal load), during the maximum damming the flood water on the upstream slope (special system load) and for the shaft body soaked with water after the outflow of the flood wave. The resulting calculation of the stability factor for the body of flood embankment were referred in the Regulation of the Minister of Environment of 20 April 2007 on the technical conditions to be met by hydraulic structures and their location (Journal of Laws 2007 No 86, item. 579). The stability factor for the analyzed flood embankment during the special system load does not satisfy the condition of stability. The article checked the possibility of improving the stability of the shaft during the impoundment of water and its outflow. Using the modeling checked the stability of the body of flood embankment after using columns of land with mining waste from the mine KWK "Piaś" at the foot of the body of the shaft on both sides. We used the same scenario calculation for all the models. With more water permeability soil material used in the columns of ground, it was reduced depression curve of water in the body of flood embankment which ensured the stability embankment during flood water.

Keywords: flood embankment, the coal mining wastes, slope stability analysis

Wprowadzenie

Według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz. U. 2007 Nr 86 poz. 579) wały przeciwpowodziowe zaliczane są jako budowle hydrotechniczne z podziałem na 4 klasy w zależności od wielkości obszaru jaki mają chronić (tab. 1).

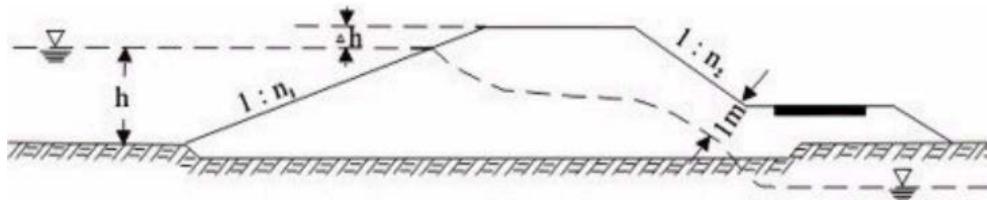
TABELA 1. Klasyfikacja obwałowań przeciwpowodziowych wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. (Dz. U. 2007 Nr 86 poz. 579)

TABLE 1. Classification of the Flood Embankments by the Regulation of the Minister of Environment of 20 April 2007 (Journal of Laws 2007 No 86, item. 579)

Obszar chroniony F [km ²]	Wartość wskaźnika dla klasy			
	I	II	III	IV
	F > 300	150 < F < 300	10 < F ≤ 150	F ≤ 10

Za obszar chroniony uznaje się powierzchnię, która przed obwałowaniem uległaby zatopieniu wodami z prawdopodobieństwem wystąpienia fali powodziowej $p = 1\%$. Rzędna korony wału przeciwpowodziowego wynika z położenia zwierciadła wód obliczeniowych ustalonych na podstawie przepływów miarodajnych i kontrolnych. Brany jest również pod uwagę wynik obliczeń hydrologicznych dla przyjętego rozstawu wałów. Przy projektowaniu przekroju poprzecznego wału przeciwpowodziowego w celu zapewnienia stateczności należy uwzględnić krzywą depresji w korpusie wału. Prawidłowo, gdy krzywa depresji oddalona jest od powierzchni skarpy odpowietrznej nie mniej niż 1 m (rys. 1).

Uznaje się, że bezpieczne wzniesienie korony wału wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. (Rozporządzenia MŚ 2007) uzyskuje się przez dodanie zapasu wysokości ponad obliczony poziom wody. Wartość Δh uzależniona jest od klasy



Rys. 1. Przekrój poprzeczny wału przeciwpowodziowego; $1:n_1$ – nachylenie skarpy odwodnej, $1:n_2$ – nachylenie skarpy odpowietrznej, h – stan wody obliczeniowej, Δh – bezpieczne wzniesienie korony wału (Borys 2006)

Fig. 1. Cross –section of a flood embankment; $1:n_1$ – slope of the river escarp, $1:n_2$ – slope of land escarp, h – water stage, Δh – safe elevation of the embankment’s crest (Borys 2006)

wału oraz charakteru powierzchni zwierciadła wody (stateczny poziom wody, poziom wywołany falowaniem).

Modernizacja wałów przeciwpowodziowych w Polsce stanowi wciąż aktualny problem. Według „Raportu analizy obecnego systemu ochrony przeciwpowodziowej na potrzeby opracowania planów zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszarów dorzeczy i regionów” (2012) w latach 1997, 2001, 2010 w zestawieniu gmin w roku 1997 szkody poniosło 18,9% gmin, przez które przepływają rzeki, w 2001 r. – 23,4% gmin. Powódź w roku 2010 wyrządziła szkody aż w 28,4% gminach.

W dużej mierze stan obwałowań przeciwpowodziowych decyduje o bezpieczeństwie mienia i ludzi. Czynniki wpływające na wybór sposobu modernizacji wałów mogą zależeć od (Borys 2006):

- przepływu i stanu wody miarodajnej i kontrolnej i ich relacje w stosunku do rzędnej korony wału,
- wielkości obszaru chronionego i sposób użytkowania, klasy wału,
- stanu koryta rzeki i warunki przepływu wód wielkich,
- stanu i budowy modernizowanego korpusu wału, w tym rodzaju gruntu i jego stan, warunki filtracji i stateczności,
- stanu i budowy podłoża, w tym rodzaju gruntu i jego stan, warunki filtracji i stateczności, ewentualną zabudowę starorzeczy,
- możliwości pozyskania gruntów do przebudowy korpusu, ich rodzaj i ilość,
- warunków komunikacji wzdłuż obwałowań,
- warunków odprowadzania wód filtracyjnych, opadowych i z własnej zlewni od strony zawala,
- wpływu modernizacji obwałowań na środowisko.

Metody modernizacji obwałowań zależą od wymienionych wyżej czynników. W przypadku modernizacji korpusu wału wykorzystywane są takie rozwiązania jak:

- podwyższenia wałów połączone z ewentualnym poszerzeniem,
- uszczelnienie skarp od strony odwodnej ekranem,
- dogęszczanie korpusu,
- uszczelnianie korpusu pionową przegrodą przeciwfiltracyjną,
- zabezpieczenie stopy skarpy odpowietrznej połączone z odprowadzaniem wody (drenaż).

W Rozporządzeniu Ministra Środowiska (Dz. U. 2007 Nr 86 poz. 579) podano wartości współczynnika pewności dla budowli hydrotechnicznych i wałów dla podstawowego układu obciążeń oraz w przypadku wyjątkowego układu obciążeń. Jako wyjątkowy układ obciążeń rozumie się piętrzenie wody na skarpie wału. Wartości współczynnika pewności zostały przedstawione w tabeli 2.

TABELA 2. Wartość współczynnika pewności wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. (Dz. U. 2007 Nr 86 poz. 579)

TABLE 2. The value of the safety factor Regulation of the Minister of Environment of 20 April 2007 (Journal of Laws 2007 No 86, item. 579)

	Dla podstawowego układu obciążeń	Dla wyjątkowego układu obciążeń
Wartość współczynnika pewności niezależnie od klasy budowli hydrotechnicznej	1,5	1,3
Przypadku dokładnego rozpoznania budowy podłoża w układzie warstw geotechnicznych i przeprowadzenia badań właściwości gruntów spoistych w poszczególnych warstwach podłoża	1,3	1,15
Dla budowli hydrotechnicznych klasy III i IV	1,3	1,1

W artykule przedstawiono sposób modernizacji wału przeciwpowodziowego polegający na specjalnym użyciu kolumn gruntowych z materiału antropogenicznego. Sposób ten poprawia stateczność wału, zwłaszcza gdy zostanie on obciążony wysoką falą powodziową o prawdopodobieństwie wystąpienia 0,2%. Zaproponowane rozwiązanie sprawdzono za pomocą modelowania metodą elementów skończonych w programie MIDAS GTS NX.

1. Przebudowa prawego wału przeciwpowodziowego rzeki Małej Wisły

Rozpatrywany fragment wału wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. został sklasyfikowany jako wał III klasy. Powierzchnia zlewni wynosi 1779,72 km² a rzędna zera wodowskazu wynosi 226,30 m n kr.

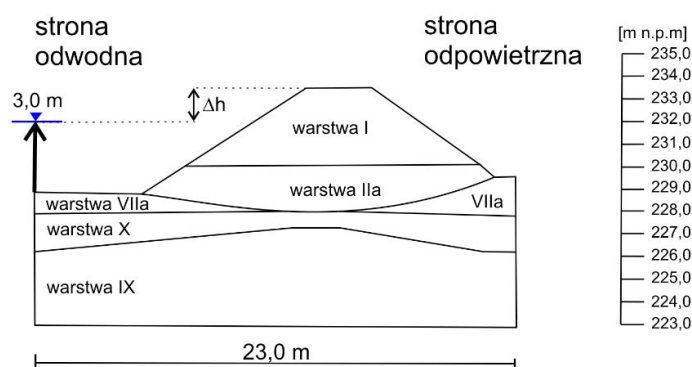
Projekt modernizacji wału Małej Wisły na odcinku Babice, Brzezinka–Wał prawy na km 0+000 – 7+340 przewidywał podwyższenie i rozbudowę istniejącego korpusu wału od strony odwodnej. Podwyższenie korony wału zawierało się w granicach kilkudziesięciu centymetrów, a jego poszerzenie od strony odwodnej do kilkunastu metrów w stopie wału. Wysokość korpusu dobudowanego wynosi 3,0–5,0 m. Grunt na rozbudowę wału pobierany był z Kopalni Węgla Kamiennego Piast w Bieruniu. Materiał układany był w warstwach miąższości około 30 cm i zagęszczany walcem wibracyjnym okołkowanym (Przedsiębiorstwo Usług Geologiczno-Laboratoryjnych CHEMKOP-LABORGEO Sp. z o.o. 2013).

Na tym odcinku obwałowania rzeki tzw. Małej Wisły w górnej części zbudowane są z gliny pylastej w stanie półzwardym lub twardoplastycznym, z dużą zawartością rumoszu łupka ilastego i piaskowca oraz okruchów węgla kamiennego. Miąższość tej warstwy wy-

nosi 1,7 do 4,0 m, a miejscami do 5,5 m. Korona wału wzmocniona jest warstwą kruszywa łamanego. Wysokość nasypów waha się od 3,2 do 6,5 m.

Podłoże gruntowe obwałowań budują utwory czwartorzędowe przez osady rzeczne, natomiast głębsze podłoże stanowią warstwy ilów wieku mioceńskiego. Utwory rzeczne wykształcone są w dolnej części przekroju z pospółek i piasków średnich ze żwirem w stanie zagęszczonym i średnio zagęszczonym.

Układ i charakterystykę warstw oraz parametry geotechniczne dla wybranego przekroju geotechnicznego wału zostały przedstawione na rysunku 2 oraz w tabeli 2 (Przedsiębiorstwo... 2013).



Rys. 2. Schemat modelu na przykładzie poprzecznego przekroju prawego wału odcinek Wisła-Babice z zaznaczonym poziomem wody w rzece, Δh – bezpieczne wzniesienie korony wału (Przedsiębiorstwo... 2013)

Fig. 2. Scheme of model on the example of the right cross-section of the shaft section of Wisła-Babice with a marked water level in the river, Δh – safe elevation of the embankment's crest (Przedsiębiorstwo... 2013)

Warstwa I – nasyp budowlany – glina pylasta zwięzła z rumoszem łupka ilastego i piaskowca oraz węgla kamiennego. Warstwa ma miąższość 3,5 m. Grunty są w stanie półzwałym lub twardoplastycznym, mało wilgotne, barwy czarnej lub ciemnoszarej. Wilgotność naturalna skały płonnej została oznaczona jako 10,0–11,0%, wyznaczona w aparacie Proctora wilgotność optymalna wyniosła 12,9% oraz maksymalna gęstość objętościową szkieletu gruntowego $\rho_{ds} = 1,9 \text{ t/m}^3$. Uziarnienie badanych próbek skały płonnej z KWK Piast pod względem procentowej zawartości poszczególnych frakcji odpowiada żwirom gliniastym, żwirom piaszczysto-gliniastym. Uzyskane współczynniki filtracji dla badanej próby ze skałą płoną z KWK Piast zagęszczonej do wskaźnika zagęszczenia około $I_s = 0,92$ zawierały się w granicach $3,88 \cdot 10^{-5}$ – $1,50 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$ (Borys i in. 2006).

Warstwa IIa – nasyp budowlany – gliny. W gruntach tych często występują domieszki piasku i żwiru. W stanie półzwałym i twardoplastycznym, mało wilgotne lub wilgotne.

Warstwa VIIa – gliny pylaste. Jest to warstwa z gruntów rodzimych, mineralnych pochodzenia rzeczno. Występują przewarstwienia i laminy pyłów piaszczystych, piasków drobnych i średnich oraz domieszek części organicznych. Grunty są w stanie półzwałym i twardoplastycznym, wilgotne.

Warstwa X – piaski średnie. Warstwa z gruntów rodzimych, mineralnych, pochodzenia rzeczno. W warstwie tej występują przewarstwienia glin pylastych, pyłów piaszczystych, piasków gliniastych i piasków drobnych. Grunty są w stanie średnio zagęszczonym, wilgotne.

Warstwa XI – pospółki – jest to warstwa gruntów rodzimych, mineralnych. Pochodzenia rzeczno zbudowana z gruntów niespoistych, głównie piasków średnich ze żwirem lub piasków grubych. Grunty te są w stanie od średnio zagęszczonego od zagęszczonego.

Parametry mechaniczne gruntów, tj. kohezja c_u , kąt tarcia wewnętrzznego ϕ_u , moduł pierwotnego odkształcenia gruntu E_0 zostały oznaczone metodą B wg normy PN 81/ B-03020.

Parametr bocznej rozszerzalności gruntu dla modelowanych warstw geotechnicznych przyjęto na podstawie stopnia plastyczności dla gruntów spoistych i stopnia zagęszczenia – grunty niespoiste wg Wiłuna (2010).

Współczynnik filtracji dla warstwy I został przyjęty na podstawie wyników badań (Borys i in. 2006). Współczynniki filtracji dla warstw IIa, VIIa, X, XI przyjęto na podstawie Wiłuna (2010).

TABELA 3. Parametry warstw geotechnicznych (Przedsiębiorstwo... 2013)

TABLE 3. The parameters of geotechnical layers (Przedsiębiorstwo... 2013)

Nr warstwy	Rodzaj gruntu	Symbol	Stan gruntu	Wilgotność [%]	Stożek plastyczności / stopień zagęszczenia I_L/I_p	Gęstość objętościowa ρ [g/cm ³]	Kohezja c_u [kPa]	Kąt tarcia wewnętrzznego ϕ_u [°]	Moduł pierwotnego odkształcenia gruntu E_0 [MPa]	Współczynnik filtracji k [m/s]
I	Nasyp budowlany – glina pylasta zwięzła z rumoszem łupka ilastego, piaskowca, z węglem kamiennym	G π z+ +KR _{li+pc} + +WK (Żpg)	pzw/ tpl	s/mw	0,05	2,10	15,0	20,0	30,0	3,88 *10 ⁻⁷
IIa	Nasyp budowlany Glina	G	tpl/ pzw	mw/w	0,15	2,10	17,0	15,0	23,0	10 ⁻¹⁰
VIIa	Gliny pylaste	G π	tpl/ pzw	mw/w	0,20	2,10	16,0	15,0	20,0	10 ⁻¹⁰
X	Piaski średnie	Ps	szg	w/nw	0,35	1,80	1,0	32,0	50,0	10 ⁻³
XI	Pospółki	Po	szg	w/nw	0,60	2,00	–	33,0	150,0	10 ⁻¹

2. Sposób numerycznych obliczeń współczynnika pewności oraz przepływu wody na przykładzie wałów przeciwpowodziowych rzeki Małej Wisły

Model wału oparty został na przekroju poprzecznego prawego wału Małej Wisły na odcinku Wisła–Babice (rys. 2). W przekroju poprzecznym wał u podstawy ma szerokość 16 m, korona wału ma szerokość 5,5 m. W rozpatrywanym przekroju wału warstwa antropogeniczna z materiałem powęglowym ma 3,5 m miąższości.

Do obliczeń przyjęto modele fizyczny jako idealnie sprężysto-plastyczny z liniowym warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra. Obliczenia były prowadzone metodą elementów skończonych (ang. *Finite Element Method*) w programie Midas GTS NX na modelu 2D. Zagadnienie analizowano za pomocą 4 modeli dla różnych wariantów. W obliczeniach uwzględniano stan początkowy, stateczność podczas piętrzenia się wody powodziowej na skarpie odwodnej oraz stan wału po przejściu fali powodziowej. Następnie wykonano model ze wzmocnieniem wału przy skarpie odwodnej i odpowietrznej.

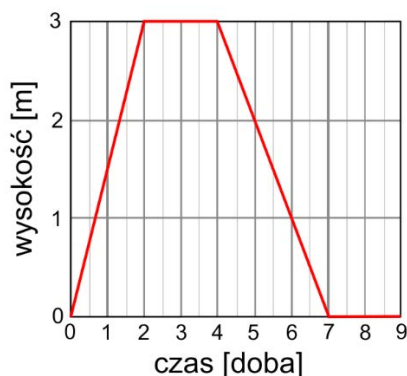
Model I – wał przeciwpowodziowy bez wzmocnienia (rys. 2).

Model II – wał przeciwpowodziowy ze wzmocnieniem kolumną gruntową. Kolumna od strony skarpy odwodnej o średnicy 1,0 m i długości 2,5 m. Wykonana z materiału gruntowego pochodzącego z kopalni KWK Piast. Parametry geotechniczne gruntu w modelu zadano takie jak dla warstwy I według tabeli 2.

Model III – wał przeciwpowodziowy ze wzmocnieniem kolumną od strony odpowietrzanej. Kolumna o średnicy 1,0 m i długości 3,2 m zaprojektowana z materiału gruntowego takiego jak warstwa I według parametrów według tabeli 2.

Model IV – wał przeciwpowodziowy ze wzmocnieniem kolumnami od strony skarpy odpowietrzanej (o średnicy 1,0 m i długości 3,2 m) i skarpy odwodnej (o średnicy 1,0 m i długości 2,5 m). Kolumny zaprojektowano z materiału gruntowego takie jak warstwa I według parametrów według tabeli 2.

Przeływ maksymalny o zadanym prawdopodobieństwie oraz odpowiadający stan wody w rzece na badanym obszarze przedstawiono w tabeli 3. Przyjęto wysokość fali powodziowej o prawdopodobieństwie wystąpienia 0,2%, a więc na wysokość 232,33 m n.p.m. Do obliczeń przyjęto schemat przepływu fali powodziowej tak jak na wykresie (rys. 3) Bez-



Rys. 3. Wysokość i czas przepływu fali powodziowej w modelu

Fig. 3. The height and duration of the flood wave in the model

pieczny poziom wzniesienia korony wału w przypadku wału klasy III (Rozporządzenie MŚ 2007) nad statecznym poziomem zwierciadła wody wynosi 1,0 m oraz 0,5 m nad poziomem wywołanym falowaniem.

W obliczeniach przyjęto, że poziom wody podnosił się w czasie od momentu startu obliczeń i osiągnął maximum 3,0 m n.p.t. w czasie 2 dni. Najwyższy poziom wody utrzymywał się przez 2 dni a następnie poziom wody w rzece opadał z prędkością ok. 1,0 m/d. W modelowaniu nie uwzględniano ruchu wody w rzece wzdłuż wału.

Sposób obliczeń polegał na obliczeniu współczynnika pewności wału w stanie suchym bez piętrzenia wody. W drugim etapie analizowano przepływ wody w wale podczas piętrzenia wody przez kolejne 3 dni. Kolejno obliczono współczynnik pewności wału, gdy poziom wody powodziowej osiągnął maksimum, a zwierciadło wody gruntowej znajdowało się w najwyższym punkcie. W dalszym etapie obliczano przepływ wody w wale podczas opadania wody powodziowej, a następnie wykonano obliczenia współczynnika pewności wału. Dla uzyskania dokładności obliczeń wykonano modele z siatką obliczeniową o rozmiarach 0,5, 0,2 i 0,1 m. Współczynnik pewności w programie Midas GTS NX (2013) wyznaczony jest metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie (SRM). Metoda polega na osłabieniu w kolejnych krokach obliczeniowych parametrów geotechnicznych gruntu do momentu utworzenia płaszczyzny poślizgu.

TABELA 4. Przepływy oraz wysokość staniu wody, stacja wodowskazowa Nowy Bieruń (Raport 2011)

TABLE 4. Flows and the height of the water level in the river, the Nowy Bieruń station water gauge (Raport 2011)

Przepływ maksymalny o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia Q_{max} [%] $[m^3/s]$ oraz odpowiadający stan wody H [cm]					
$Q_{10\%}$	$H_{Q10\%}$	$Q_{1\%}$	$H_{Q1\%}$	$Q_{0,2\%}$	$H_{Q0,2\%}$
363	493	666	567	877	603
Rzędna zera wodowskazu wynosi 226,30 m n.p.m.					

3. Wyniki obliczeń numerycznych i ich analiza

Po obliczeniu modeli według założonej metodyki uzyskano wskaźnik pewności dla 12 przypadków. W tabeli 4 przedstawiono wyniki współczynnika pewności dla siatki o rozmiarze 0,1 m oraz liczbę elementów i węzłów.

W wyniku obliczeń numerycznych okazało się, że płaszczyzna poślizgu tworzy się dla skarpy odwodnej wału (rys. 4). Obliczenia numeryczne pokazały, że po nawodnieniu wału przez piętrzącą się wodę i rosnące ciśnienie wody w porach, płaszczyzna poślizgu tworzy się dla skarpy odpowietrznej. Na rysunkach 6 i 8 przedstawiono wyniki obliczeń wskaźnika pewności dla modeli w wariancie I i IV po przejściu fali powodziowej na skarpy odpowietrznej.

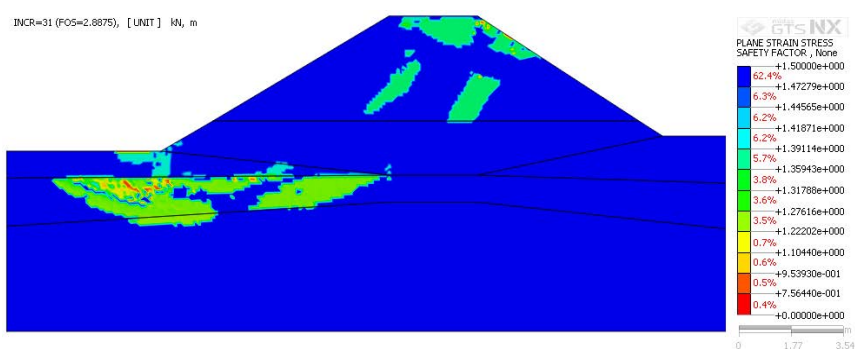
Wysokość zwierciadła wody podczas maksymalnego wezbrania wody w rzece (3,0 m) po 3 dniach piętrzenia dla modelu w wariancie I i IV zaprezentowano na rysunkach 5 i 7.

Dla rozpatrywanego przypadku wału przeciwpowodziowego III klasy współczynnik pewności wg Rozporządzenia Ministra Środowiska (Dz. U. 2007 Nr 86 poz. 579) powinien charakteryzować się wartością większą od 1,3 w przypadku wału dla podstawowego układu

TABELA 5. Współczynnik pewności obliczanych modeli

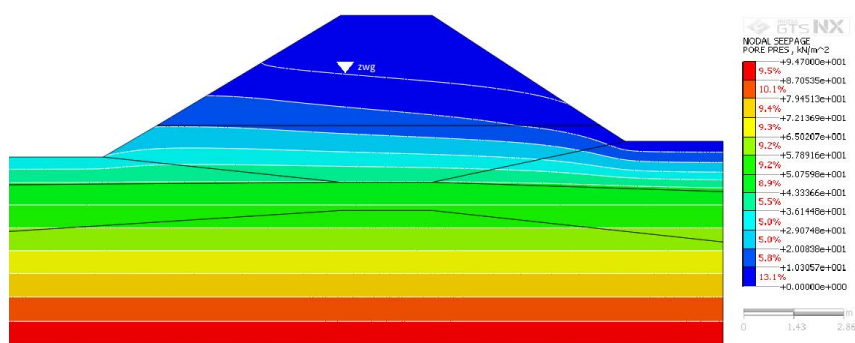
TABLE 5. The coefficient of certainty calculated models

Model		Współczynnik pewności FOS		
wariant	przypadek	liczba węzłów	liczba elementów	rozmiar siatki 0,1 m
I	Bez obciążenia	20 436	20 175	2,887
	Po 3 dniach wezbrania			1,053
	Po odpływie wody			1,286
II	Bez obciążenia	20 423	20 172	2,912
	Po 3 dniach wezbrania			1,319
	Po odpływie wody			1,315
III	Bez obciążenia	20 325	20 071	2,093
	Po 3 dniach wezbrania			1,893
	Po odpływie wody			1,893
IV	Bez obciążenia	23 605	23 314	1,963
	Po 3 dniach wezbrania			1,781
	Po odpływie wody			1,787



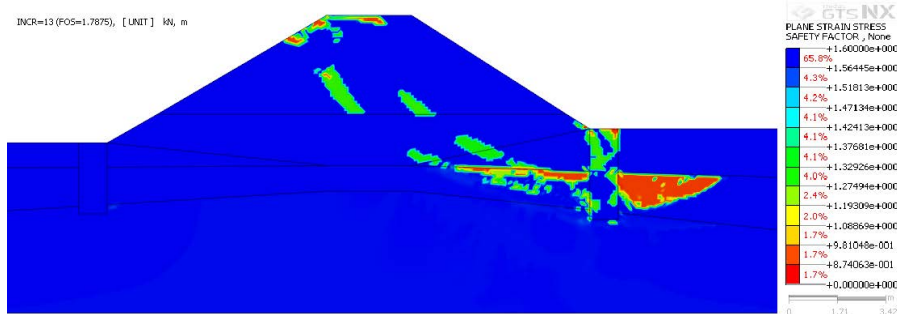
Rys. 4. Częstkowe współczynniki pewności (stateczność ogólna FOS = 2,887) – model wału bez obciążeń – wariant I

Fig. 4. The partial safety factor (general FOS = 2,887) – Model no load embankment – variant I



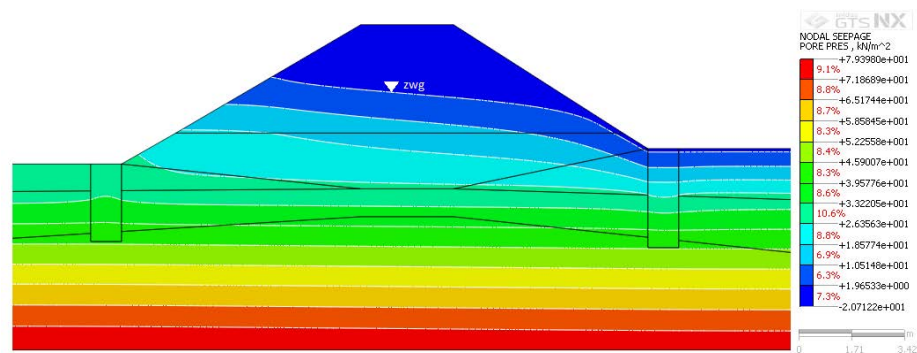
Rys. 5. Ciśnienie wody w porach i wysokość zwierciadła wody gruntowej podczas maksymalnego piętrzenia fali powodziowej, model wału wariant I

Fig. 5. Water pressure in the pores and height of ground water level during a maximum impoundment flood wave, model embankment variant I



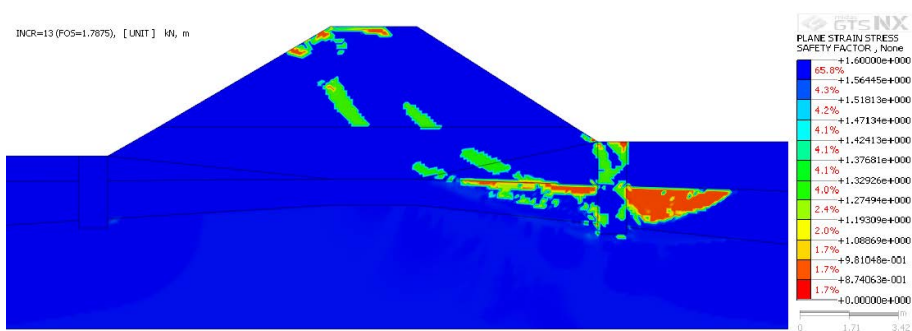
Rys. 6. Częstkowe współczynniki pewności (stateczność ogólna FOS = 1,053) podczas maksymalnego spiętrzenia fali powodziowej, model wału wariant I

Fig. 6. The partial safety factor (general FOS = 1,053) during a maximum impoundment flood wave, model embankment variant I



Rys. 7. Ciśnienie wody w porach i wysokość zwierciadła wody gruntowej podczas maksymalnego spiętrzenia fali powodziowej, model wału wariant IV

Fig. 7. Water pressure in the pores and height of ground water level a during maximum impoundment flood wave model embankment variant IV



Rys. 8. Częstkowe współczynniki pewności (FOS = 1,787) podczas maksymalnego spiętrzenia fali powodziowej, model wału wariant IV

Fig. 8. The partial safety factor (general FOS = 1,787) during a maximum impoundment flood wave, model embankment variant IV

obciążeń oraz 1,1 w przypadku wyjątkowego układu obciążeń. Z obliczeń modelowych we wszystkich wariantach wynika, że zmodernizowany wał spełnia warunek stateczności dla podstawowego układu obciążeń (stateczność ogólna dla skarpy odwodnej $FOS = 2,887; 2,912; 2,093; 1,963$). Podczas obliczeń modelu w wariacie I współczynnik pewności wyraźnie zmalał podczas przepływu wody wewnątrz wału. W rezultacie wał podczas maksymalnej wysokości piętrzenia wody nie spełnia warunku stateczności wg ([Rozporządzenia MŚ 2007](#)) (stateczność ogólna skarpy odpowietrznej, po 3 dniach wezbrania $FOS = 1,053$). Na rysunku 5 można zauważyć, że najniższe wartości współczynnika pewności znajdują się w podłożu wału od strony odpowietrznej po odpłynięciu wody. Po wstępnych obliczeniach okazało się, że stateczność wału może być zagrożona przez słabe podłoże gruntowe pod konstrukcją wału. Dlatego też rozpoczęto poszukiwania metody ustabilizowania wału.

Po obliczeniu modelu w wariacie II wzmocnionego kolumną od strony skarpy odwodnej, współczynnik pewności (stateczność ogólna skarpa odpowietrzna, po 3 dniach wezbrania $FOS = 1,319$) dla wyjątkowego układu obciążeń spełnia założone warunki wg ([Rozporządzenie MŚ 2007](#)). Chcąc uzyskać wyższe wskaźniki pewności mając na uwadze, że przyjęte do modelu parametry geotechniczne są uzyskane metodą B wg normy ([PN-81/B-03020](#)) rozpatrzono dalsze warianty konstruowania kolumn, również przy skarpie odpowietrznej. Najlepsze wyniki współczynnika stateczności zaobserwowano po obliczeniu modelu w wariacie IV przy konstrukcji dwóch kolumn po obu stronach wału (stateczność ogólna skarpa odpowietrzna $FOS = 1,781$).

Wnioski

Zastosowanie kolumn gruntowych z materiału antropogenicznego spowodowało obniżenie zwierciadła wody w obwałowaniu poprzez odpływ wody do warstw bardziej przepuszczalnych (pospółki). W ten sposób stateczność konstrukcji została poprawiona, co potwierdzono wynikami obliczeń modeli piętrzenia wody powodziowej w obwałowaniu.

Zaproponowaną metodę konstruowania kolumn gruntowych można dołączyć do ogólnych metod poprawy stateczności wałów. W dalszych badaniach będą rozpatrywane kolumny gruntowe o podobnych parametrach wytrzymałościowych i jeszcze większej wodoprzepuszczalności w celu zwiększenia oddalenia zwierciadła wody od skarpy odpowietrznej.

Literatura

- Borys, M. 2006. *Metody modernizacji obwałowań przeciwpowodziowych z zastosowaniem nowych technik i technologii*. Instytut Melioracji i Użytków Zielonych. Falenty.
- Borys i in. 2006 – Borys, M., Filipowicz, P., Mosiej, K. i Wolski, J. 2006. *Opracowanie technologii robót wydobycia skały płonnej z KWK Piast w korpus przebudowywanego prawego wału rzeki Małej Wisły w miejscowości Babice, Brzezinka, województwo małopolskie*. Instytut Melioracji i Użytków Zielonych. Falenty.
- IBDiM 2006. *Aprobata techniczna IBDiM Nr AT/2006-03-2034 Dołowe kruszywo łamane – PIAST*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Warszawa.
- KZGW 2012: *Analiza Obecnego Systemu Ochrony Przeciwpowodziowej Na Potrzeby Opracowania Planów Zarządzania Rzykiem Powodziowym Dla Obszarów Dorzeczy I Regionów Wodnych*. Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej. Kraków.
- Midas GTS NX 2013: *Benchmarks&Verications*. MIDAS Information Technology Co., Tokyo.

PN-81/B – 03020: Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie, Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości.

Przedsiębiorstwo Usług Geologiczno-Laboratoryjnych CHEMKOP-LABORGEO Sp. z o.o. 2013: *Badania Geotechniczne Dla Opracowania Oceny Stanu Technicznego Obwałowań Wisły I Dopływów. Część II, Na Terenie Powiatu Oświęcimskiego*. Kraków.

IMiGW PIB 2011: *Raport z Wykonania Map Zagrożenia Powodziowego I Map Ryzyka Powodziowego*. Nr Projektu: POIG.07.01.00–00–025/09. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej PIB.

Rozporządzenie MŚ 2007. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz. U. 2007 Nr 86 poz. 579).

Wiłun, Z. 2010. *Zarys geotechniki*, Wyd. 9. Warszawa. Wyd. Komunikacji i Łączności, s. 113.