

Jerzy Flisiak, Sebastian Olesiak**

ANALIZA STATECZNOŚCI OBWAŁOWAŃ PRZECIWPOWODZIOWYCH RZEKI KANAŁ STRUMIEŃ

1. Wstęp

W ostatnich latach na terenie powiatu Staszów w województwie świętokrzyskim ma miejsce modernizacja infrastruktury rzeki Kanał Strumień w ramach programu zabezpieczenia przeciwpowodziowego doliny tej rzeki. Kanał Strumień to lewobrzeżny dopływ Wisły, który płynie doliną o łagodnych stokach w układzie równoleżnikowym, w kierunku z zachodu na wschód (rys. 1). Tereny bezpośrednio przylegające do rzeki nie są zabudowane, w większości stanowią łąki, które powyżej dna doliny przechodzą w pola uprawne.



Rys. 1. Przebieg Kanału Strumień w rejonie I zadania

* Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

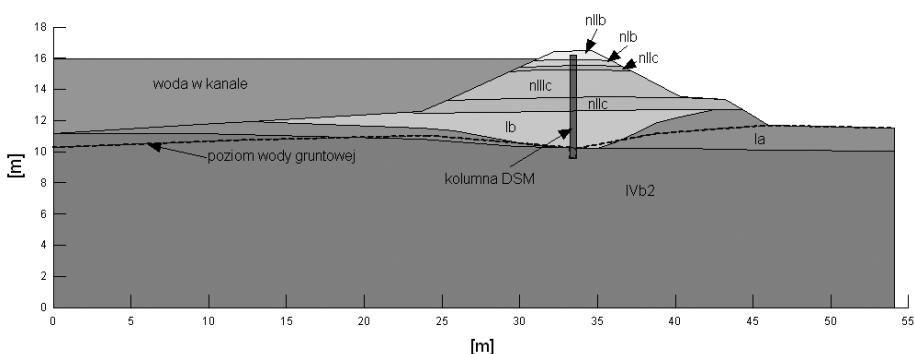
W ramach zadania I na odcinku 0+000–12+980, mierzonego od ujścia Kanału Strumień do Wisły, przewidziano w zależności od stanu wałów przeciwpowodziowych następujące roboty modernizacyjne: wyrównanie, poszerzenie i dogęszczenie korony wałów, uzupełnienie i poszerzenie skarpy odwodnej i odpowietrznej, doszczelnienie wału przeciwpowodziowego na całej długości oraz budowa nowych odcinków wałów przeciwpowodziowych w miejscu ich braku. Roboty remontowe obejmują także naprawę bądź wymianę wszelkich urządzeń hydrotechnicznych oraz odmulenie dna kanału.

W celu doszczelnienia wałów przeciwpowodziowych zaproponowano wykonanie szczelnej, pionowej przesłony z kolumn gruntowych DSM (*Deep Soil Mixing*), wykonywanej z korony wału do głębokości około 8 m. Technologia DSM polega na wgłębnym mieszaniu gruntu z cementem przy użyciu specjalnych wiertnic. Wiercenie odbywa się bez wstrząsów a wspomagane jest wypływem zaczynu cementowego. Po osiągnięciu żądanej głębokości następuje formowanie kolumn o średnicy od 60 do 120 cm, poprzez powolne podciąganie wiertła z równoczesnym mieszaniem zaczynu cementowego z gruntem. Ilość mieszanego zaczynu cementowego dostosowywana jest do rodzaju gruntu, w którym formowana jest kolumna. Kolumny formowane powinny być na zakładkę, aby palisada posiadała odpowiednią szczelność.

Jednym z elementów projektu modernizacyjnego wałów przeciwpowodziowych było przeprowadzenie analizy stateczności obwałowań po wykonaniu przesłony z kolumn DSM, z uwzględnieniem zmian poziomu wody w kanale. Analiza stateczności obejmowała dwa przekroje, lewo i prawobrzeżny zarówno od strony odwodnej jak i odpowietrznej. W ramach niniejszego artykułu ograniczono się do przedstawienia wyników analizy stateczności dla strony lewobrzeżnej.

2. Geologia i własności gruntów budujących obwałowanie

Analizę stateczności przeprowadzono dla przekroju geologicznego 14L, sporządzonego na podstawie prac geologicznych i geodezyjnych w 4+764 kilometrażu wału i dostarczonego przez projektanta. W ramach prac geologicznych w rejonie tego przekroju wykonano trzy wiercenia: jedno w koronie wału i dwa u jego podstawy od strony odwodnej i odpowietrznej o głębokości od 2 do 6,3 m.



Rys. 2. Model obliczeniowy dla przekroju 14L

Z korony wału wykonano również sondowanie sondą dynamiczną SD-10 do głębokości 6,3 m. Na podstawie badań polowych i laboratoryjnych określono budowę geologiczną i podstawowe parametry fizyczno-mechaniczne gruntów budujących obwałowanie. Parametry gruntów wykorzystywane w dalszych obliczeniach stateczności zebrano w tabeli 1, a model obliczeniowy wykonany na podstawie przekroju 14L przedstawiono na rysunku 2.

TABELA 1

Własności fizyczno-mechaniczne gruntów przyjęte do obliczeń stateczności

| Warstwa geotechniczna | Litologia – rodzaj gruntu | Gęstość objętościowa ρ [g/cm ³] | Kohezja c_u [kPa] | Kat tarcia wewnętrzznego φ_u [deg] |
|-----------------------|---|--|---------------------|--|
| nIIb | Grunty nasypowe — G, G π , Gp, Pg/Gp, π , π p, G+Ps, PgH, GH, GpH, G π H, Gz/Pd, Nm, Pg | 1,85 | 17,0 | 15,0 |
| nIb | Grunty nasypowe — G, Gz, G π , Gp, G/Ps, DH, GzH, GzI | 1,70 | 17,0 | 15,0 |
| nIIc | Grunty nasypowe — G, G π , Gp, Pg/Gp, π , π p, G+Ps, PgH, GH, G π H, GpH, Gz/Pd, Nm, Pg | 1,90 | 28,0 | 17,5 |
| nIIIc | Grunty nasypowe — Pd, Pg, PH, Ps/Pg, PS/G, Ps/Gp, Ps+H | 1,70 | — | 30,5 |
| Ib | Zastoiskowe grunty organiczne — Nm, GH, GpH, PgH | 1,60 | 7,5 | 8,0 |
| Ia | Zastoiskowe grunty organiczne — Nm, T, Nm/P, GH, GzH, π H, π pH, Pd/Nm | 1,50 | 5,0 | 6,0 |
| IVb ₂ | Grunty sypkie akumulacji rzecznej — Ps, Pr | 1,95 | — | 33,0 |
| DSM | Mieszanina gruntu z cementem | 2,20 | 300,0 | 40,0 |

3. Analiza stateczności

W obliczeniach wykorzystano program SLOPE/W przeznaczony do oceny stateczności metodami równowagi granicznej. Do określenia minimalnej wartości wskaźnika stateczności w każdym przypadku wykorzystano dwie metody oferowane przez program: klasyczną metodę „grid and radius” i metodę „autolocate” [1].

Sprawdzenie stateczności zbocza lub skarpy polega na obliczeniu minimalnej wartości wskaźnika stateczności przy zastosowaniu odpowiedniej metody obliczeniowej, z uwzględnieniem budowy geologicznej, położenia zwierciadła wód gruntowych oraz odpowiednich parametrów gruntowych. Tak wyznaczony wskaźnik stateczności powinien być większy niż dopuszczalny dla danej metody obliczeniowej i ważności obiektu geotechnicznego $FS_{min} > FS_{dop}$ [2, 3].

Największy problem w analizie stateczności związany był z brakiem szczegółowych informacji dotyczących zmian poziomu wody w Kanale Strumień i czasu utrzymywania się

jej na danym poziomie. Dysponowano tylko ogólnymi informacjami o maksymalnym i minimalnym poziomie wody w rzece. Dla uwzględnienia najbardziej niekorzystnych sytuacji konieczne było więc przeprowadzenie analizy dla różnych poziomów wody w rzece i towarzyszących im zmian poziomu wód gruntowych w obwałowaniu. Obliczenia przeprowadzono dla trzech wariantów:

- **Wariant 1.** Zmiana poziomu wody w Kanale Strumień jest na tyle powolna, że nasycanie wału i co za tym idzie podnoszenie się (opadanie) zwierciadła wód gruntowych w wale przebiega niemal równocześnie z podnoszeniem się (opadaniem) wody w rzece.
- **Wariant 2.** Po utrzymującym się przez długi czas, wysokim poziomie wody w Kanale Strumień, następuje szybkie, gwałtowne obniżenie się poziomu wody w rzece, za którym „nie nadąża” obniżanie się wody gruntowej w wale.
- **Wariant 3.** Szybki, gwałtowny przybór wody w Kanale Strumień, bez podniesienia się poziomu wód gruntowych w wale. Sytuacja taka może wystąpić przy przejściu fali powodziowej, bez intensywnych opadów w analizowanym miejscu.

Obliczenia stateczności wału przeprowadzono dla różnych poziomów wody w rzece, zmieniających co 0,8 m. Równocześnie przyjęto identyczne zmiany poziomu wód gruntowych w wale przeciwpowodziowym.

W analizie stateczności nie uwzględniono zjawisk związanych z przepływem wody w ośrodku gruntowym, zjawisk filtracji i zmiany parametrów fizyko-mechanicznych gruntów znajdujących się poniżej i powyżej zwierciadła wody gruntowej. Dodatkowo przyjęto niekorzystne założenie, że grunty, z których wykonany jest wał, są przepuszczalne.

Dla czytelności wykonanych obliczeń stateczności, analiza prowadzona była zawsze dla dwóch przypadków: wał przeciwpowodziowy bez kolumn gruntowych DSM i z kolumnami gruntowymi DSM, zarówno dla strony odwodnej, jak i odpowietrznej.

3.1. Wariant 1

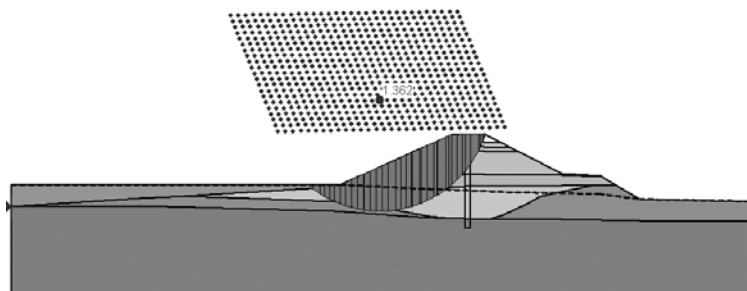
Analiza przeprowadzona została dla kilku położen poziomu wody w Kanale Strumień, począwszy od poziomu maksymalnego. W kolejnych obliczeniach obniżano (podwyższano) poziom wody w rzece o 0,8 m. Powolnemu obniżaniu (podwyższaniu) poziomu wody w rzece towarzyszy równoczesne podwyższanie się (obniżanie się) poziomu wody gruntowej w wale przeciwpowodziowym. Zatem poniższa analiza stateczności odnosi się zarówno do sytuacji powolnego opadania, jak i powolnego podnoszenia się poziomu wody w rzece. Wyniki analizy dla metody Bishopa przedstawiono w tabeli 2 oraz, dla wybranych przypadków, na rysunkach od 3 do 6.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że najbardziej niekorzystne warunki stateczności skarpy odwodnej wystąpić mogą, gdy poziom wody w rzece obniży się o 3,2 m od poziomu maksymalnego. Spowodowane jest to głównie parciem wody na powierzchnię skarpy. Woda na zewnątrz skarpy działa w tym przypadku jako swoista przypora. Uzyskane, większe od 1,3 wartości wskaźników stateczności wskazują jednak, że niezależnie od poziomu wody w rzece wystąpienie procesów osuwiskowych tej skarpy jest mało prawdopodobne.

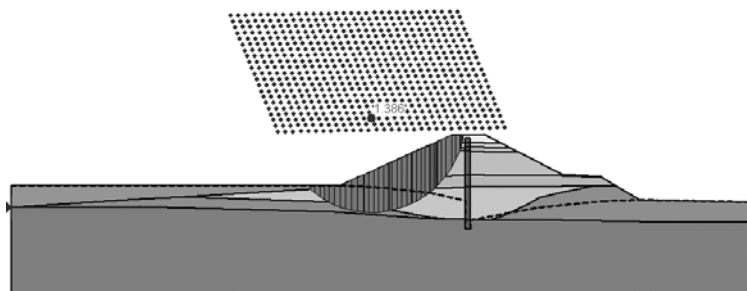
TABELA 2

Wyniki analizy stateczności metodą Bishopa dla wariantu 1

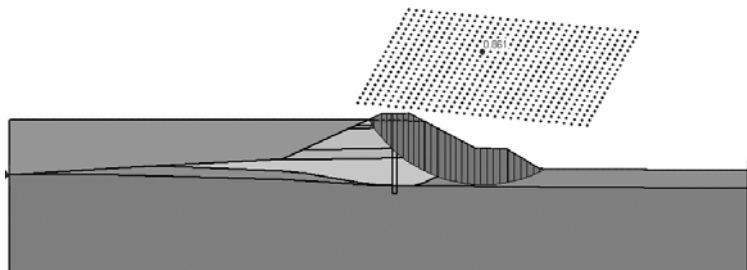
| Analizowany przypadek | | Zmiany poziomu wody w rzece | | | | | | |
|-----------------------|---|-----------------------------|--------|--------|--------|--------------|--------|-------|
| | | max | -0,8 m | -1,6 m | -2,4 m | -3,2 m | -4,0 m | min |
| Skarpa odwodna | | | | | | | | |
| Bez DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 2,162 | 1,804 | 1,552 | 1,428 | 1,362 | 1,429 | 1,431 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 1,919 | 1,591 | 1,376 | 1,391 | 1,346 | 1,342 | 1,418 |
| Z DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 2,363 | 2,027 | 1,734 | 1,507 | 1,386 | 1,452 | 1,464 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 2,239 | 1,899 | 1,589 | 1,480 | 1,335 | 1,442 | 1,385 |
| Skarpa odpowietrzna | | | | | | | | |
| Bez DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 0,861 | 0,911 | 1,007 | 1,124 | 1,185 | 1,201 | 1,210 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 0,760 | 0,834 | 0,887 | 0,988 | 1,017 | 1,071 | 1,056 |
| Z DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 1,291 | 1,271 | 1,225 | 1,253 | 1,213 | 1,253 | 1,207 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 1,456 | 1,491 | 1,597 | 1,573 | 1,625 | 1,549 | 1,571 |



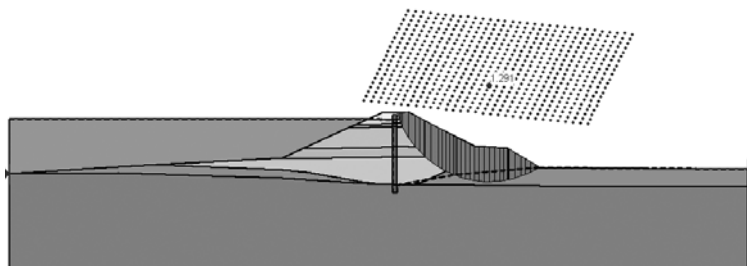
Rys. 3. Wyniki obliczeń metodą Bishopa skarpy odwodnej bez kolumn DSM — wariant 1



Rys. 4. Wyniki obliczeń metodą Bishopa skarpy odwodnej z kolumnami DSM — wariant 1



Rys. 5. Wyniki obliczeń metodą Bishopa skarpy odpowietrznej bez kolumn DSM — wariant 1



Rys. 6. Wyniki obliczeń metodą Bishopa skarpy odpowietrznej z kolumnami DSM — wariant 1

Dla skarpy odpowietrznej z kolei najniekorzystniejsze warunki wystąpić mogą przy maksymalnym poziomie wody w rzece, kiedy to ich wartości są niższe od jedności. W przypadku tym znaczną poprawę warunków stateczności uzyskuje się po wykonaniu ścianki DSM.

3.2. Wariant 2

W wariantcie tym założono, że po długotrwałym, wysokim poziomie wody w Kanale Strumień następuje gwałtowne obniżenie jej poziomu. Powoduje to, że przez pewien czas poziom wody gruntowej w wale może być wyższy niż poziom wody w rzece. Ten wariant symuluje również sytuację, kiedy po przejściu fali powodziowej występują obfite opady deszczu, które nasycają korpus wału przeciwpowodziowego.

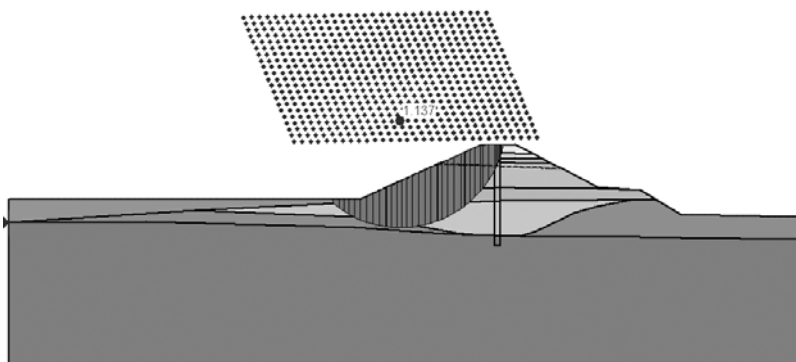
Analizę przeprowadzono dla najbardziej niekorzystnego przypadku z wariantu 1, w którym założono, że poziom wody w rzece pozostaje na poziomie o 3,2 m niższym od maksymalnego, natomiast poziom wody gruntowej w wale przeciwpowodziowym pozostaje na podwyższonym poziomie w stosunku do poziomu wody w rzece odpowiednio o: 2,4 m, 1,6 m i 0,8 m. Wyniki analizy dla metody Bishopa przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunkach od 7 do 10.

Z obliczeń dla tego wariantu wynika znaczne pogorszenie warunków stateczności skarpy odwodnej w porównaniu z wariantem 1. Dla wszystkich analizowanych przypadków wartości wskaźników stateczności są niższe niż 1,3, co wskazuje, że wystąpienie procesów osuwiskowych tej skarpy jest prawdopodobne. Wyniki dla skarpy odpowietrznej są zbliżone do uzyskanych w wariantcie 1.

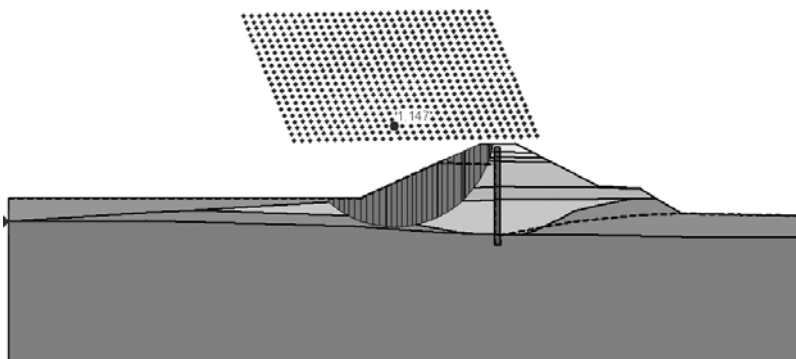
TABELA 3

Wyniki analizy stateczności metodą Bishopa dla wariantu 2

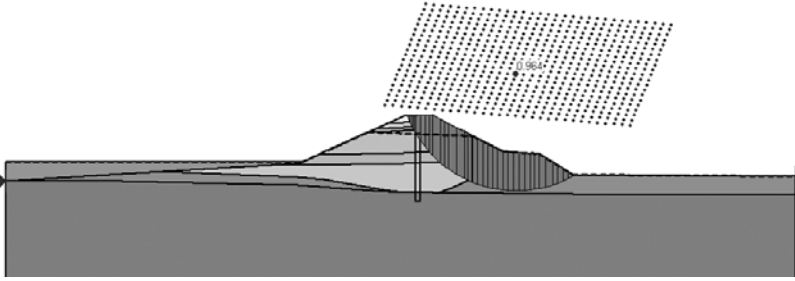
| Analizowany przypadek | | Zmiany poziomu wody w wale | | |
|-----------------------|---|----------------------------|--------|--------------|
| | | +0,8 m | +1,6 m | +2,4 m |
| Skarpa odwodna | | | | |
| Bez DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 1,302 | 1,220 | 1,137 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 1,289 | 1,203 | 1,102 |
| Z DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 1,316 | 1,232 | 1,147 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 1,289 | 1,203 | 1,118 |
| Skarpa odpowietrzna | | | | |
| Bez DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 1,112 | 1,044 | 0,964 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 0,974 | 0,888 | 0,844 |
| Z DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 1,255 | 1,279 | 1,278 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 1,577 | 1,588 | 1,515 |



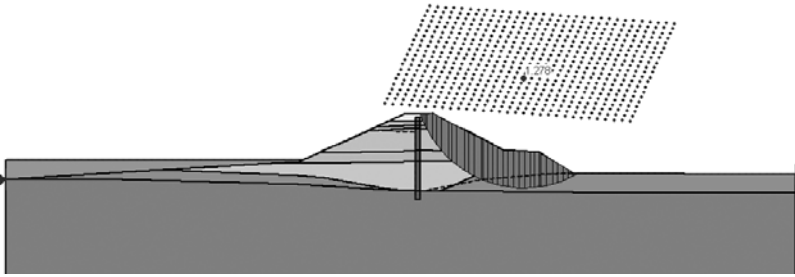
Rys. 7. Wyniki obliczeń metodą Bishopa skarpy odwodnej bez kolumn DSM — wariant 2



Rys. 8. Wyniki obliczeń metodą Bishopa skarpy odwodnej z kolumnami DSM — wariant 2



Rys. 9. Wyniki obliczeń metodą Bishopa skarpy odpowietrznej bez kolumn DSM — wariant 2



Rys. 10. Wyniki obliczeń metodą Bishopa skarpy odpowietrznej z kolumnami DSM — wariant 2

3.3. Wariant 3

Celem tej analizy jest symulacja szybkiego, gwałtownego podnoszenia się wody w Kanałie Strumień, któremu nie towarzyszy równoczesne podnoszenie się poziomu wody grunтовой w wale.

TABELA 4

Wyniki analizy stateczności metodą Bishopa dla wariantu 3

| Analizowany przypadek | | Zmiany poziomu wody w rzece | | | | |
|-----------------------|---|-----------------------------|--------|--------|--------|-------|
| | | +1,6 m | +2,4 m | +3,2 m | +4,0 m | max |
| Skarpa odwodna | | | | | | |
| Bez DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 1,461 | 1,634 | 1,926 | 2,450 | 2,239 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 1,440 | 1,571 | 1,733 | 2,202 | 3,134 |
| Z DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 1,502 | 1,735 | 2,153 | 2,803 | 3,657 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 1,488 | 1,633 | 1,989 | 2,624 | 3,546 |
| Skarpa odpowietrzna | | | | | | |
| Bez DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 0,861 | 0,911 | 1,007 | 1,124 | 1,185 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 0,760 | 0,834 | 0,887 | 0,988 | 1,017 |
| Z DSM | Kołowa powierzchnia poślizgu | 1,291 | 1,271 | 1,225 | 1,253 | 1,213 |
| | Metoda autolokalizacji powierzchni poślizgu | 1,456 | 1,491 | 1,597 | 1,573 | 1,625 |

To sytuacja przypominająca przejście fali powodziowej i/lub cofania się wody z Wisły do Kanału Strumień. Założono, że gwałtownemu podnoszeniu się wody w Kanale Strumień nie towarzyszyły wcześniej obfite opady deszczu w tym rejonie, co powoduje, że wały są nasycone wodą. Dla pierwszych dwóch przypadków uzyskano wyniki identyczne jak dla dwóch ostatnich dla wariantu 1. Dlatego też w niniejszej analizie zostały one pominięte. Wyniki analizy dla metody Bishopa przedstawiono w tabeli 4.

Analizując wyniki zamieszczone w tabeli 4, można stwierdzić, że zarówno dla skarpy odwodnej, jak i odpowietrznej warunki stateczności w tym wariantcie są korzystniejsze, niż w wariantach omówionych wyżej. Wskazują one jednak na duże prawdopodobieństwo utraty stateczności skarpy odpowietrznej, szczególnie w przypadku niezastosowania kolumn DSM.

4. Podsumowanie

Z przedstawionej analizy wynika bardzo istotny wpływ warunków wodnych na stateczność skarp wałów przeciwpowodziowych. Szczególnie dotyczy to skarpy odpowietrznej, dla której uzyskano bardzo niskie wartości wskaźników stateczności, wskazujące na duże prawdopodobieństwo wystąpienia osuwisk, szczególnie przy wysokich stanach wody w rzece.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika również, że przesłona pionowa z kolumn DSM, która została zaprojektowana przede wszystkim jako element doszczelniający wał przeciwpowodziowy Kanału Strumień, spełnia również rolę stabilizacyjną. We wszystkich analizowanych wariantach i poszczególnych przypadkach zastosowanie kolumn DSM poprawia warunki stateczności.

Najbardziej niebezpieczną sytuację obrazuje wariant 2. Nasycone wały przeciwpowodziowe od strony odpowietrznej przed zastosowaniem kolumn gruntowych DSM wykazują niestateczność, a wyznaczone wskaźniki stateczności są mniejsze od jedności ($FS < 1$). Nie lepiej przedstawia się sytuacja od strony odwodnej, gdzie uzyskane wartości wskaźników stateczności tylko nieznacznie są większe od jedności ($FS > 1,1$). Zastosowanie kolumn gruntowych DSM poprawia warunki stateczności wałów przeciwpowodziowych ($FS > 1,2$), ale w stopniu niewystarczającym. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że niezbędna będzie zmiana geometrii, szczególnie skarpy odpowietrznej, polegająca na zmniejszeniu jej nachylenia, dogęszczenie korony wałów oraz odbudowa skarp odwodnej i odpowietrznej do odpowiedniej szerokości. Do odbudowy skarpy odwodnej konieczne jest użycie odpowiednich materiałów i technologii, które zabezpieczą skarpe w przyszłości przed negatywnym działaniem zwłaszcza erozji bocznej.

LITERATURA

- [1] *Krahn J.*: Stability Modeling with Slope/W. Geo-Slope/W International LTD 2004
- [2] *Nowacki J. i inni*: Instrukcja obserwacji i badań osuwisk drogowych, Kraków, Soldruk, 1999
- [3] *Wilun Z.*: Zarys Geotechniki. Warszawa, WKŁ 2001