

URSZULA KOŁODZIEJCZYK \*

**OCENA STATECZNOŚCI WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH WZMOCNIONYCH RÓŻNYMI PRZEGRODAMI HYDROIZOLACYJNYMI**

**Słowa kluczowe:** ochrona przeciwpowodziowa, wały przeciwpowodziowe, materiały uszczelniające, stateczność skarp

*Streszczenie*

W prezentowanej pracy zanalizowano zagadnienie stateczności skarp na przykładzie wałów przeciwpowodziowych. Obliczenia stateczności przeprowadzono dla wybranego odcinka wałów zlokalizowanych w dolinie środkowej Odry. Wykorzystując metodę obliczania stateczności warstwy gruntu przykrywającej ekran zainstalowany w skarpie odwodnej, obliczono wskaźnik stateczności dla czterech odcinków wałów przeciwpowodziowych, uszczelnionych różnymi metodami: a) folią PCV (geomembraną, b) folią PCV (geomembraną) uszczelniającą korpus wału i ścianką szczelną C-LOC uszczelniającą podłoże wału, c) matą bentonitową (geotkaniną) uszczelniającą korpus wału oraz d) matą bentonitową (geotkaniną) uszczelniającą korpus wału i ścianką ilastą uszczelniającą podłoże wału. Uwzględniono przy tym układ warstw geologicznych, przebieg powierzchni poślizgu oraz parametry gruntu. Uzyskane wyniki pokazały, że w każdym przypadku wartość uzyskanego wskaźnika stateczności jest wyższa od wymaganego minimum. Jednak najwyższy wskaźnik, czyli największą gwarancję stateczności, uzyskano w odcinkach wałów uszczelnionych matą bentonitową i ścianką ilastą. Podjęty temat odgrywa znaczącą rolę przy projektowaniu wałów przeciwpowodziowych, a w konsekwencji - zapewnieniu skutecznej ochrony przeciwpowodziowej.

**Wstęp**

Obiektami, gdzie stateczność skarp odgrywa istotną rolę są wały przeciwpowodziowe. Ocenę stateczności wałów przeciwpowodziowych i ich zagrożenia osuwiskowego można wykonać poprzez analizę wskaźnika stateczności (współczynnika stanu równowagi)  $F$ , obliczanego ze stosunku  $F=U_i/Z_i$ , gdzie:

---

\* Uniwersytet Zielonogórski; Instytut Inżynierii Środowiska; Zakład Hydrologii i Geologii Stosowanej

$U_i$  – uogólnione siły utrzymujące wywołane tarcie i spójnością materiału, a  $Z_i$  – uogólnione siły zsuwające wywołane siłami grawitacji, filtracją oraz obciążeniem [Glazer 1977].

W zależności od wartości wskaźnika stateczności  $F$  utworzenie osuwiska w wale można uznać za: bardzo mało prawdopodobne ( $F > 1,5$ ), mało prawdopodobne ( $1,3 < F \leq 1,5$ ), prawdopodobne ( $1,0 < F \leq 1,3$ ) lub bardzo prawdopodobne ( $F < 1,0$ ). Obliczenia wskaźnika stateczności  $F$  są zawsze obarczone błędami, zależnymi m.in. od przyjętej metody obliczeń. W stabilnym zboczu wartość  $F$  nie powinna być jednak mniejsza od 1,3, a wskazane jest wręcz, aby była ona nawet większa od 1,5 [Czyżewski i in. 1973, Adamski i in. 1986].

Wskaźnik stateczności zboczy i skarp można obliczać różnymi metodami [Morgenstern i Price 1965, Wysokiński 1991, Borys i Mosiej 2003]. Stateczność ogólną obwałowań zbudowanych z gruntów jednorodnych oblicza się najczęściej wykorzystując metody zakładające poślizg po powierzchni cylindrycznej (metoda Felleniusa lub Bishopa). Jeżeli natomiast zakładamy, że poślizg może nastąpić po płaszczyźnie odbiegającej od powierzchni cylindrycznej, czyli np. po płaskiej powierzchni rozciągającej się wzdłuż zainstalowanego uszczelnienia wału, obliczenia stateczności wykonuje się z zastosowaniem metod zakładających poślizg po powierzchni o dowolnym kształcie (metoda dużych brył lub Berera-Masłowa).

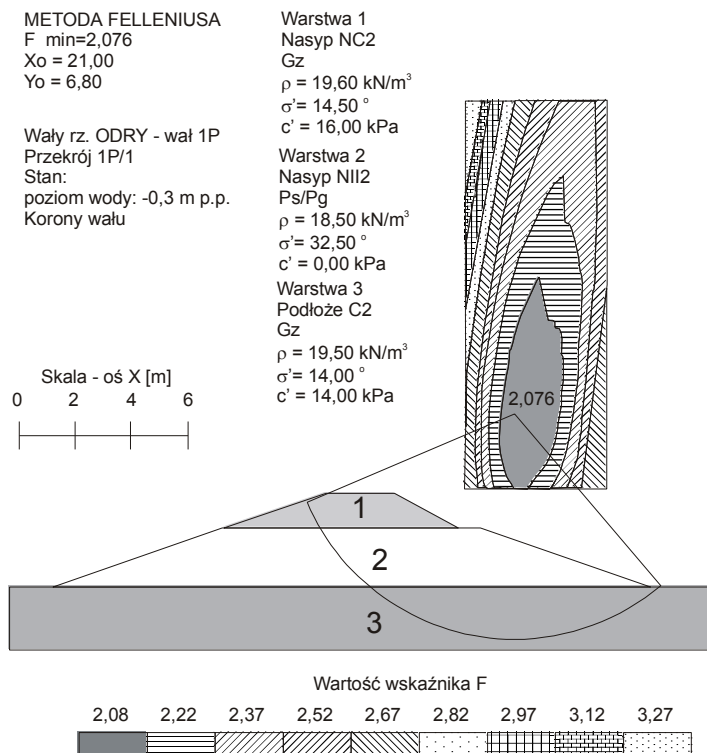
Podczas badań stanu wałów przeciwpowodziowych lubuskiego odcinka Odry, jakie przeprowadzono po wielkiej powodzi w dorzeczu Odry (1997r.), za jedno z głównych zagrożeń geotechnicznych wałów przeciwpowodziowych uznano utratę stateczności skarp [Kołodziejczyk 2002]. W ramach wykonanych wówczas badań przeprowadzono analizę stateczności wałów. Obliczenia wskaźnika stateczności  $F$  przeprowadzono metodą szwedzką (Felleniusa), uwzględniającą efekty przepływu wody przez korpus wału przy kołowo-cylindrycznych powierzchniach poślizgu [Batog i Hawrysz 1997]. Na podstawie analizy statystycznej wykazano, że 38,9% wałów lubuskich znajduje się w stanie dobrym, 37,8% – w stanie średnim, a 23,3% – w stanie złym, co w znacznej mierze wynikało z niskiego wskaźnika stateczności wałów.

Po wielkiej powodzi podjęto na szeroką skalę prace modernizacyjne lubuskich wałów przeciwpowodziowych. Polegały one na: podniesieniu korony wałów do zmodyfikowanych rzędnych, uwzględniających ich minimalne przewyższenie o 0,5-1,0 m ponad wodę 100-letnią, zagęszczeniu korpusu wałów, uszczelnieniu podłoża i korpusu wałów oraz zmianie geometrii wałów poprawiającej ich stateczność. Do uszczelnienia wałów wykorzystano szereg nowoczesnych technologii, w tym m.in.: wbijanie ścianek szczelnych typu C-LOC, wtlaczanie (iniekcje) roztworów uszczelniających do gruntu oraz wykonanie ekranów uszczelniających z folii PEHD, gliny uformowanej w kształcie cegieł oraz mat bentonitowych.

Celem niniejszej pracy jest ocena stateczności wałów zmodernizowanych (uszczelnionych) przy pomocy czterech różnych technologii: a) folii PCV (geomembrany) uszczelniającej korpus wału, b) folii PCV (geomembrany) uszczelniającej korpus wału i jednocześnie ścianki szczelnej C-LOC uszczelniającej podłoże wału, c) maty bentonitowej (geotkaniny) uszczelniającej korpus wału oraz d) maty bentonitowej (geotkaniny) uszczelniającej korpus wału i jednocześnie ścianki ilastej uszczelniającej podłoże wału, a także - porównanie aktualnego stanu wałów z sytuacją sprzed modernizacji.

### Badania stateczności wałów po powodzi w 1997 r.

Bezpośrednio po wielkiej powodzi w 1997 r., ale jeszcze przed modernizacją wałów, wykonano badania ich stateczności metodą Felleniusa [Kołodziejczyk 2002]. Obliczenia wskaźnika stateczności  $F$  uwzględniały wówczas geometrię wału oraz parametry inżyniersko-geologiczne korpusu wału (rys. 1).



Rys. 1. Schemat obliczeń wskaźnika stateczności wałów metodą Felleniusa

Za podstawę oceny zagrożenia stateczności wału przyjęto skorygowaną wartość wskaźnika stateczności  $F_1$ , uzyskaną z wymnożenia wskaźnika stateczności  $F$  przez współczynnik konsekwencji zniszczenia budowli hydrotechnicznej  $\gamma_n$ , wymagany dla danej klasy wałów. Pozwoliło to na wydzielenie trzech kategorii wałów (A, B, C) pod względem zagrożenia utraty ich stateczności – tab. 1.

Tab. 1. Kategorie zagrożenia utraty stateczności wałów przeciwpowodziowych

Klasa wału	Kategoria zagrożenia utratą stateczności		
	Kat. A: $F_1 \geq 1,1\gamma_n$	Kat. B: $0,9\gamma_n < F_1 < 1,1\gamma_n$	Kat. C: $F_1 \leq 0,9\gamma_n$
I	$F_1 \geq 1,43$	$1,17 < F_1 < 1,43$	$F_1 \leq 1,17$
II	$F_1 \geq 1,32$	$1,08 < F_1 < 1,32$	$F_1 \leq 1,08$
III	$F_1 \geq 1,26$	$1,03 < F_1 < 1,26$	$F_1 \leq 1,03$
IV	$F_1 \geq 1,21$	$1,00 < F_1 < 1,21$	$F_1 \leq 1,00$

Z przeprowadzonych obliczeń wskaźnika stateczności wynikało, że na wielu odcinkach był on wyższy od wymaganego minimum, ale mimo to nie zapewniał odpowiedniego zapasu bezpieczeństwa, jaki jest wymagany dla danej klasy ważności budowli hydrotechnicznych. Biorąc pod uwagę dominujący udział wałów zaliczanych do II i III klasy, stwierdzono, że można oczekiwać rozwoju procesów osuwiskowych w strefach, gdzie wskaźnik stateczności osiąga wartość  $F_1 < 1,08$  lub nawet  $F_1 < 1,03$ . Wskazano również, że osuwiska będą szczególnie łatwo powstawać na odcinkach pozbawionych zadarnienia oraz wszędzie tam, gdzie kąt nachylenia skarp jest zbliżony do wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu wbudowanego w korpus wałów.

### Badania stateczności wałów po ich modernizacji

W latach 1998-2004 dokonano modernizacji wałów przeciwpowodziowych. Prace polegały na podniesieniu korony wałów, zagęszczeniu korpusu wałów, uszczelnieniu podłoża i korpusu wałów oraz zmianie geometrii wałów poprawiającej ich stateczność. Do uszczelnienia wałów wykorzystano szereg nowoczesnych technologii, w tym m.in.: wbijanie ścianek szczelnych typu C-LOC, wtłaczanie (iniekcje) roztworów uszczelniających do gruntu oraz wykonanie ekranów uszczelniających z folii PEHD, gliny uformowanej w kształcie cegieł oraz mat bentonitowych.

Po wykonaniu tych robót wykonano obliczenia stateczności skarpi zmodernizowanych wałów przeciwpowodziowych. Obliczenia te wykonano metodą dużych brył, w której dodatkowo uwzględniono przegrodę hydroizolacyjną wbu-

dowaną w korpus obwałowania. Metoda ta polegała na porównaniu kąta tarcia wewnętrznego najsłabszej warstwy w elemencie uszczelniającym z kątem nachylenia przegrody hydroizolacyjnej. Wskaźnik stateczności  $F$  ustalono tym razem z zależności:

$$F = \frac{(\gamma H \cos^2 \beta - \gamma_w d \cos^2 \beta) \operatorname{tg} \phi}{\gamma H \sin \beta \cos \beta}$$

gdzie:

$\gamma$  - ciężar objętościowy gruntu w warstwie przypowierzchniowej,

$\gamma_w$  - ciężar właściwy wody,

$\beta$  - kąt nachylenia przegrody,

$H$  - miąższość warstwy powierzchniowej gruntu,

$d$  - miąższość warstwy drenażowej,

$\phi$  - kąt tarcia najsłabszej warstwy lub styku warstw.

W obliczeniach uwzględniono również siły działające w skarpie, gdzie nie zastosowano ekranu uszczelniającego. Uznano je za składową ciężaru gruntu  $S$ , która dąży do przesunięcia bloku po ewentualnej powierzchni poślizgu i wynosi:

$$S = W \cdot \sin \alpha$$

gdzie:

$W$  - ciężar bloku,

$\alpha$  - kąt nachylenia siły składowej  $S$  do poziomu.

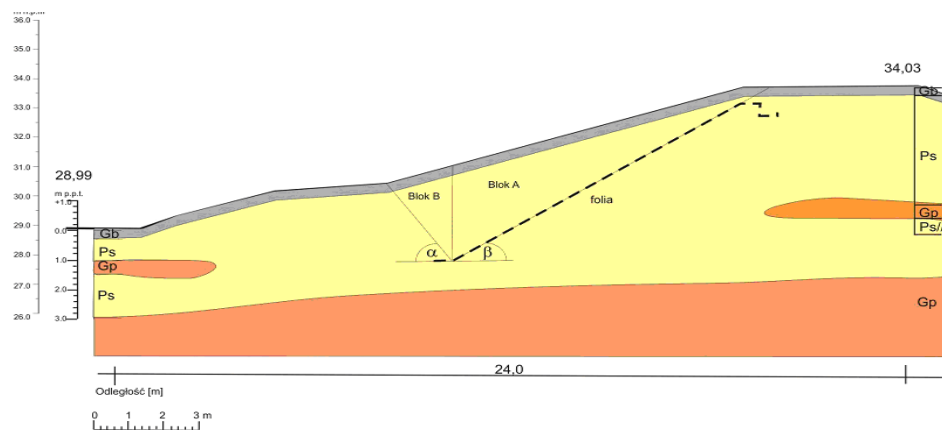
W obliczeniach przyjęto, że siłę działającą na część skarpy bez uszczelnienia hamuje siła dążąca do przesunięcia warstwy gruntu nad przegrodą hydroizolacyjną. W związku z tym uznano, że siłę hamującą należy odjąć od sił przesuwających, a wzór na współczynnik pewności w tym przypadku przybierze postać:

$$F_p = \frac{(W_A \cdot H \cdot \cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg} \phi)}{(W_A \cdot H \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta) - S}$$

W celu wykonania obliczeń stateczności skarpy podzielono na bloki: blok A obejmował część skarpy z ekranem uszczelniającym, a bloki B i C - części skarpy bez uszczelnienia. Podział uwzględniał geometrię warstw geologicznych

i przebieg powierzchni poślizgu. W bloku A za powierzchnię poślizgu przyjęto powierzchnię gruntu łączącą koronę skarpy z ekranem uszczelniającym, natomiast w blokach B i C – powierzchnię łączącą skłon skarpy z uszczelnieniem.

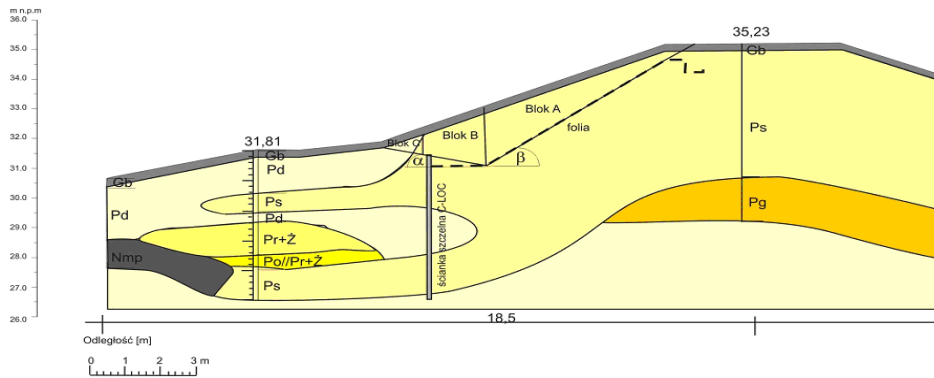
Obliczenia przeprowadzono dla fragmentów wału przeciwpowodziowego uszczelnionych czterema różnymi metodami: folią PCV (geomembraną) – rys. 2 i tab. 2, folią PCV (geomembraną) uszczelniającą korpus wału i ścianką szczelną C-LOC uszczelniającą podłoże wału – rys. 3 i tab. 3, matą bentonitową (geotkaniną) uszczelniającą korpus wału – rys. 4 i tab. 4 oraz matą bentonitową (geotkaniną) uszczelniającą korpus wału i ścianką ilastą uszczelniającą podłoże wału - rys. 5 i tab. 5.



Rys. 2. Schemat obliczeń stateczności skarpy uszczelnionej folią PCV

Tab. 2. Obliczenia wskaźnika stateczności skarpy uszczelnionej folią PCV

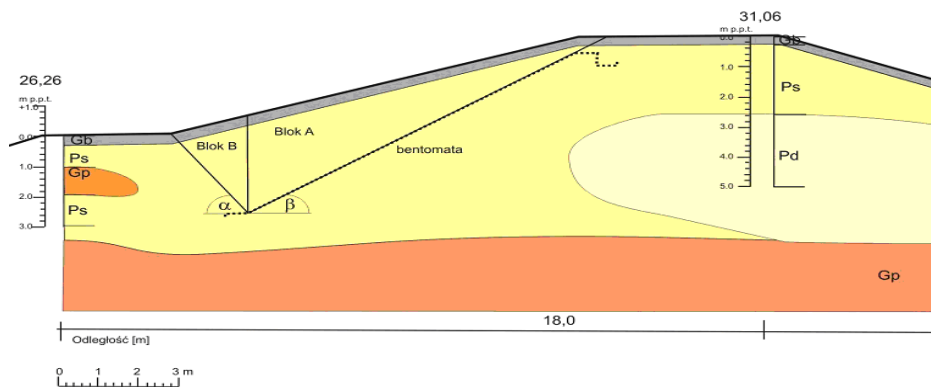
Skarpa uszczelniona folią PCV	Jednostka	Blok A	Blok B
Powierzchnia bloku obliczeniowego	[m <sup>2</sup> ]	15,6	2,7
Objętość bloku obliczeniowego	[m <sup>3</sup> ]	15,6	2,7
Ciężar gruntu	[kN]	288,9	49,9
Gęstość pozorną gruntu	[kN/m <sup>3</sup> ]	18,5	18,5
Wysokość skarpy	[m]	1,8	-
Kąt nachylenia przegrody (folii)	[°]	33,0	-
Kąt tarcia wewnętrznego gruntu	[°]	36,0	36,0
Kąt nachylenia siły hamującej do poziomu	[°]	-	36,0
Wskaźnik stateczności zbrocza	[-]	F=1,32	



Rys. 3. Schemat obliczeń stateczności skarpy uszczelnionej folią PCV i ścianką szczelną C-LOC

Tab. 3. Obliczenia wskaźnika stateczności skarpy uszczelnionej folią PCV i ścianką szczelną C-LOC

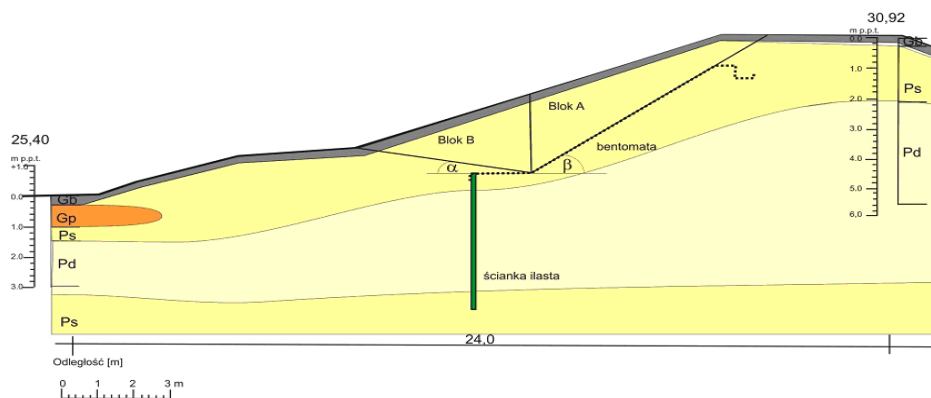
Skarpa uszczelniona folią PCV i ścianką szczelną C-LOC	Jednostka	Blok A	Blok B	Blok C
Pole powierzchni bloku obliczeniowego	[m <sup>2</sup> ]	6,3	2,8	0,4
Objętość bloku obliczeniowego	[m <sup>3</sup> ]	6,3	2,8	0,46
Ciężar gruntu	[kN]	115,8	51,1	2,7
Gęstość pozorną gruntu	[kN/m <sup>3</sup> ]	18,5	18,5	18,5
Wysokość skarpy	[m]	1,3	-	-
Kąt nachylenia uszczelnienia (folii)	[°]	35,0	-	-
Kąt tarcia wewnętrzznego	[°]	36,0	36,0	32,0
Kąt nachylenia siły hamującej do poziomu	[°]	-	15,0	32,0
Wskaźnik stateczności zbcza	[-]	F=1,28		



Rys. 4. Schemat obliczeń stateczności skarpy uszczelnionej matą bentonitową (geotkaniną)

Tab. 4. Obliczenia wskaźnika stateczności skarpy uszczelnionej matą bentonitową (geotkaniną)

Skarpa uszczelniona matą bentonitową	Jednostka	Blok A	Blok B
Pole powierzchni bloku obliczeniowego	[m <sup>2</sup> ]	15,9	2,4
Objętość bloku obliczeniowego	[m <sup>3</sup> ]	15,9	2,4
Ciężar gruntu	[kN]	295,4	44,4
Gęstość pozorna gruntu	[kN/m <sup>3</sup> ]	18,5	18,5
Wysokość skarpy	[m]	1,9	-
Kąt nachylenia uszczelnienia (bentonitu)	[°]	33,0	-
Kąt tarcia wewnętrznego	[°]	36,0	36,0
Kąt nachylenia siły hamującej do poziomu	[°]	-	36,0
Wskaźnik stateczności zbcza	[-]	F=1,34	



Rys. 5. Schemat obliczeń stateczności skarpy uszczelnionej matą bentonitową i ścianką ilastą

Tab. 5. Obliczenia wskaźnika stateczności skarpy uszczelnionej matą bentonitową i ścianką ilastą

Skarpa uszczelniona matą bentonitową i ścianką ilastą	Jednostka	Blok A	Blok B
Pole powierzchni bloku obliczeniowego	[m <sup>2</sup> ]	9,6	5,9
Objętość bloku obliczeniowego	[m <sup>3</sup> ]	9,6	5,9
Ciężar gruntu	[kN]	176,9	110,6
Gęstość pozorna gruntu	[kN/m <sup>3</sup> ]	18,5	18,5
Wysokość skarpy	[m]	1,6	-
Kąt nachylenia uszczelnienia (bentomaty)	[°]	34,0	-



Kąt tarcia wewnętrznego	[°]	36,0	36,0
Kąt nachylenia siły hamującej do poziomu	[°]	-	9,0
Wskaźnik stateczności zbocza		F=1,61	

Najwyższy współczynnik stateczności ( $F=1,61$ ) wykazały wały uszczelnione matą bentonitową w korpusie i ścianką ilastą w podłożu oraz tylko matą bentonitową w korpusie ( $F = 1,34$ ). Warto podkreślić fakt, że są to również materiały wykazujące najlepszy efekt uszczelnienia wałów. Wpływa na to wysokie ciśnienie pęcznienia bentonitu, które powoduje, że mata bentonitowa tworzy po uwodnieniu spójną i jednorodną barierę hydrauliczną, niewątpliwie skuteczniejszą, niż np.: warstwa gruntu rodzimego (ilastego), w której zawsze może dojść do spękań lub ścięcia z powodu wysychania i obecności słabych wiązań strukturalnych, albo warstwa folii PCV, która często ulega rozerwaniu. W odróżnieniu od warstw wykładanych folią PCV, mata bentonitowa wykazuje większą odporność na nierównomierne osiadanie podłoża, zachowując ciągłość struktury i funkcje hydrauliczne nawet przy znacznych jego przemieszczeniach. Ponadto, w matach bentonitowych nie występują perforacje, których nie sposób uniknąć podczas montażu innych przegród hydroizolacyjnych, np. folii. Warto tutaj zaznaczyć, że ze względu na ewentualne ścinanie gruntu, jakie często ma miejsce wzdłuż przegrody hydroizolacyjnej, maty bentonitowe można stosować do uszczelnień skarp o znacznie większym nachyleniu niż przy zastosowaniu geomembran (nawet uszorstnionych). Bentomaty przewyższają również inne metody uszczelnień prostą technologią montażu i niskimi kosztami robót.

### Podsumowanie

Badania dotyczące wskaźnika stateczności wałów przeciwpowodziowych, jakie przeprowadzono bezpośrednio po wielkiej powodzi w 1997 r. wykazały, że na wielu odcinkach wałów był on wyższy od wymaganego minimum ( $F>1,1$ ), ale mimo to nie zapewniał odpowiedniego zapasu bezpieczeństwa, wymaganego dla danej klasy ważności budowli hydrotechnicznych. Biorąc bowiem pod uwagę dominującą w regionie lubuskim klasę wałów (II i III) stwierdzono, że intensywnego rozwoju procesów osuwiskowych można oczekiwać głównie w strefach, gdzie wskaźnik stateczności osiąga wartość  $F<1,08$ , a tym bardziej -  $F_1<1,03$ .

W latach 1997-2006 wykonano modernizację wielu odcinków lubuskich wałów, wykorzystując szereg nowoczesnych technologii uszczelniania. Zaprezentowane w tej pracy wyniki obliczeń stateczności wałów zmodernizowanych przy pomocy czterech różnych rodzajów uszczelnienia pokazały, że w każdym przypadku wartość uzyskanego wskaźnika stateczności jest wyższa od wymaganego

minimum ( $F > 1,1$ ), jednak najwyższy wskaźnik, czyli największą gwarancję stateczności wykazują wały uszczelnione matą bentonitową w korpusie i ścianką ilastą w podłożu lub tylko matą bentonitową w korpusie. Można zatem stwierdzić, że metody uszczelnień wałów polegające na zastosowaniu bentomaty, okazały się pod względem stateczności skarp lepsze od folii PCV i ścianki szczelnej C-LOC. Na tej podstawie można stwierdzić, że bentomata odgrywa znaczącą rolę we wzmacnianiu i uszczelnianiu wałów przeciwpowodziowych, a w konsekwencji – zapewnieniu skutecznej ochrony przeciwpowodziowej.

### Literatura

1. ADAMSKI W., GORTAT J., LEŚNIAK E., ŻBIKOWSKI A.: *Małe budownictwo wodne dla wsi*. Arkady, Warszawa 1986
2. BATOG A., HAWRYSZ M.: Komputerowy system kontroli stateczności obwałowań składowisk odpadów w Zakładach Chemicznych „Rokita” w Brzegu Dolnym. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej, nr 72, s. 11-18, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1997
3. BORYS M., MOSIEJ K.: *Wytyczne wykonywania oceny stanu technicznego i bezpieczeństwa wałów przeciwpowodziowych*. Wyd. IMUZ, Falenty 2003
4. CZYŻEWSKI K., WOLSKI W., WÓJCICKI S., ŻBIKOWSKI A.: *Zapory ziemne*. Arkady, Warszawa 1973
5. GLAZER Z.: *Mechanika gruntów*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1977
6. MADEJ J.: *Metody sprawdzania stateczności zboczy*. Biblioteka Drogownictwa. WKiŁ, Warszawa 1981
7. KOŁODZIEJCZYK U.: *Geologiczno-inżynierskie badania wałów przeciwpowodziowych i ich podłoża*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2002
8. MORGENSTERN N.R., PRICE V. E.: *The analysis of the stability of general slip surfaces*. Geotechnique, vol. 15, No 3, 1965
9. WYSOKIŃSKI L.: *Posadowienie obiektów budowlanych w sąsiedztwie skarp i zboczy*. Instrukcja ITB 304, Warszawa 1991

## ASSESSMENT OF THE IMPACT OF HYDRO-INSULATING MATERIALS ON THE STABILITY OF THE FLOOD BANKS

**Key words:** flood protection, flood banks, sealing materials, slope stability

### *S u m m a r y*

*The thesis focus on analysis of stability of the slope and the impact of hydro – insulating materials on such stability on an example of flood banks. The surveys in that issue were carried out on a chosen section of flood banks localized in the middle Odra valley. In first steep there was a safety factor established. It was done using the method of calculating the soil layer that covers the sealing screen in the slope. Given factor was established for four sectors of the flood banks, each sealed with different methods: PCV foil (geomembrane) placed into body of the flood banks, PCV foil (geomembrane) installed into body of the flood banks complete with protective screen C-LOC putting into subsoil of the flood banks, bentomat (geotextiles) placed in the body of the flood banks and bentomat (geotextiles) placed in the body of the flood banks completed with loam partition set up in the subsoil of the flood banks. Not surprisingly, into the surveys geometry of the soil layers and the course of the surface slide as well as the parameters of the soil were taken into account. The surveys results indicate that the safety factor was higher in each case than the required minimum. Although he best result was obtained in the section of the flood banks where bentonite mat and silt partitions were installed. The theme plays significant role at project design of flood banks and in consequence in the matter of flood protection.*