

URSZULA KOŁODZIEJCZYK*

ZASTOSOWANIE MAT BENTONITOWYCH W MODERNIZACJI WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH

Streszczenie

Od czasu powodzi tysiąclecia, jaka miała miejsce w dorzeczu Odry w 1997r., prowadzi się intensywną modernizację wałów przeciwpowodziowych. Artykuł przedstawia skuteczność modernizacji wałów przeciwpowodziowych za pomocą mat bentonitowych produkowanych przez CETCO Poland. Zagadnienie to scharakteryzowano w oparciu o obliczenia filtracji i stateczności korpusu wału przeciwpowodziowego, zlokalizowanego na lewym brzegu lubuskiego odcinka Odry, na odcinku 528,6÷532,0 km biegu rzeki. W obliczeniach uwzględniono dwa przypadki: a) wał bez przegrody filtracyjnej oraz b) wał uszczelniony przesłoną z mat bentonitowych.

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

Wstęp

Bilans powodzi tysiąclecia, jaka miała miejsce w 1997 r. na lubuskim odcinku Odry (obejmującym odcinek od 408,0 do 620,0 km biegu rzeki) wyzwolił szereg inicjatyw służących poprawie ochrony przeciwpowodziowej. Mimo awaryjnych napraw wałów wykonanych bezpośrednio po powodzi, oraz kolejnych prac modernizacyjnych dokonanych w latach 1997-2009, nadal tylko około 35,4% wałów lubuskich znajduje się w dobrym stanie technicznym, natomiast 37,8% wałów pozostaje w stanie średnim, a 26,8% – w stanie złym [Kołodziejczyk 2002].

Pomimo oczywistego faktu, że o skuteczności wałów decyduje przede wszystkim ich lokalizacja oraz przepuszczalność podłoża – zatem czynniki niemożliwe do usunięcia wskutek modernizacji wałów – prowadzi się nadal różnorodne działania wspomagające skuteczność zabezpieczeń przeciwpowodziowych. Przykładem są opisane w tej pracy rozwiązania, polegające na zasto-

* Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Środowiska

sowaniu mat bentonitowych (zwanymi Bentomatem), które po uwodnieniu tworzą spójną i jednorodną barierę hydrauliczną. Zastosowano je na odcinku wałów Wężyska-Chlebowo o długości 3,4 km (528,6÷532,0 km biegu Odry).

Metodyka badań

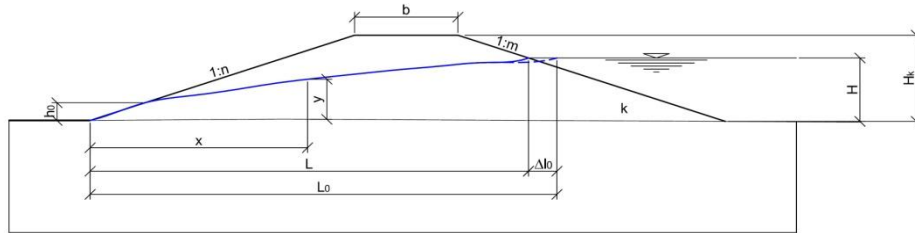
Do oceny skuteczności rozwiązań polegających na uszczelnieniu wałów matą bentonitową wykorzystano obliczenia natężeń przepływu wody przez wały przeciwpowodziowe oraz stateczności skarp wałów. W obliczeniach tych przyjęto pewne uproszczenia, zakładające poziome linie prądu i gradienty równe nachyleniu linii depresji. W zależności od warunków miejscowych, tj. rodzaju podłoża i jego przepuszczalności oraz sposobu uszczelnienia korpusu wału, uwzględniono następujące przypadki: 1. wał bez uszczelnienia oraz 2. wał uszczelniony Bentomatem, a także – parametry geotechniczne gruntu wbudowanego w wał oraz właściwości Bentomatu.

Zgodnie z projektem modernizacji wału, opracowanym przez EKOPROJEKT Zielona Góra [2010] przyjęto, że:

- obiekt będzie zbudowany z gruntów niespoistych, reprezentowanych przez: piaski grube ze żwirem (Pr+Ż), piaski grube przewarstwione piaskami średnioziarnistymi ze żwirem (Pr/Ps+Ż) oraz piaski grube ze żwirem przewarstwione pospółką (Pr+Ż/Po), o średniej przepuszczalności $k_k = 55,0$ m/d,
- maksymalny słup wody przed uszczelnieniem (od strony odwodnej) odpowiadać będzie poziomowi wody stułetniej ($Q_{1\%}$) i trzystuletniej ($Q_{0,3\%}$),
- wykładziny przeciwfiltracyjne z Bentomatu zastosowane będą jako uszczelnienie odwodnej strony wału,
- parametry maty bentonitowej [CETCO Poland 2009] będą wynosić: grubość zhydratyzowanego Bentomatu $d = 0,01$ m, przepuszczalność $k_e \leq 4,510^{-11}$ m/s, zawartość bentonitu $m \geq 3000$ g na 1m^2 maty (przy wilgotności bentonitu 12%), masa powierzchniowa $\rho \geq 3300$ g/m², kąt tarcia wewnętrznego $\Phi_b \geq 26$ (przy pełnym nasyceniu wodą).

Jednostkowe natężenie przepływu przez korpus wału o szerokości 1 m (w wale bez drenażu, posadowionym na podłożu słabo przepuszczalnym) wyznaczono ze wzoru Michajłowa [Borys i Mosiej 2003], gdzie k oznacza współczynnik filtracji gruntu w korpusie wału [m/s], a pozostałe oznaczenia jak na rys. 1:

$$q = k \frac{H^2}{L_o + \sqrt{L_o^2 - (mH)^2}}$$



Rys. 1. Schemat wyznaczania filtracji wody przez korpus wału
 Fig. 1. Diagram of water filtration designation through the corpus of the embankment

Wysokość wysączenia h_o na skarpie odpowietrznej wyznaczono korzystając z zależności:

$$h_o = \frac{q(n\alpha + 6 - \alpha)}{4k}$$

gdzie: h_o - wysokość wysączenia na skarpie odpowietrznej [m],
 q – jednostkowe natężenie przepływu wody przez korpus wału [$\text{m}^3/\text{dobę}$],
 n – nachylenie skarpy odpowietrznej (zgodnie z założeniem projektu: $n=3$ [-]),
 α – współczynnik ($\alpha = 4$ dla $n \geq 1$),
 k - współczynnik filtracji gruntu w korpusie wału [$\text{m}/\text{dobę}$].

Wyniki badań

Wyniki badań, obejmujących: analizę **filtracji** przez nieuszczelniony wał posadowiony na podłożu słabo przepuszczalnym, przy przepływie $Q_{1\%}$ oraz $Q_{0,3\%}$ zaprezentowano w tab. 1.

Tab. 1. Wyniki obliczeń filtracji wody przez nieuszczelniony wał przeciwpowodziowy
 Tab. 1. The results of water filtration calculations through the unsealed flood bank

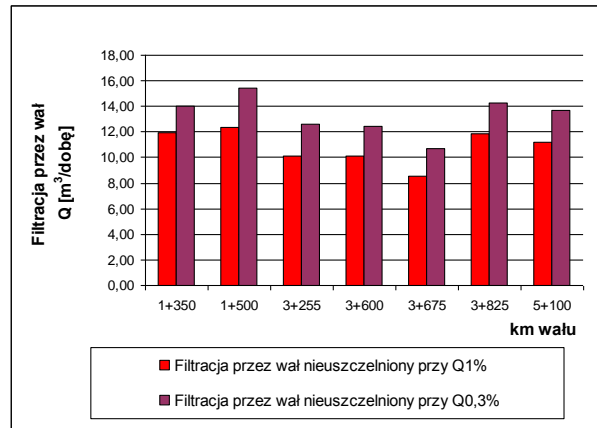
Kilometraż wału	Filtracja w przekroju wału przy wysokości słupa wody odpowiadającego $Q_{1\%}$ [$\text{m}^3/\text{dobę}$]	Filtracja w przekroju wału przy wysokości słupa wody odpowiadającego $Q_{0,3\%}$ [$\text{m}^3/\text{dobę}$]	Wysokość wysączenia wody na skarpie odpowietrznej przy $Q_{1\%}$ h_o [m]	Wysokość wysączenia wody na skarpie odpowietrznej przy $Q_{0,3\%}$ h_o [m]
3+600	10,15	12,46	0,65	0,79
5+100	11,23	13,71	0,71	0,87

Obliczenia filtracji w wale uszczelnionym ograniczono do samego materiału uszczelniającego (Bentomatu) przyjmując, że strumień wody, który przedostanie się przez warstwę Bentomatu i będzie filtrował w grunt będzie na tyle znikomy, że nie wpłynie to znacząco na ostateczną wartość filtracji wody przez wał. Wyniki tych obliczeń podano w tab. 2.

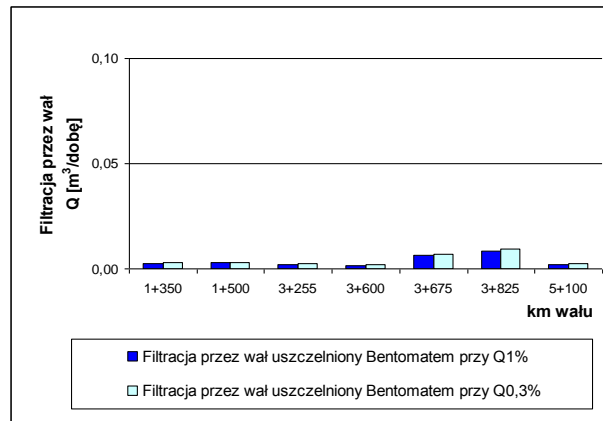
Tab. 2. Wyniki obliczeń filtracji przez wał przeciwpowodziowy wzmocniony Bentomatem
Tab. 2. The results of filtration calculations across anti-flood embankment enforced with Bentomat

Kilometraż wału	Filtracja w przekroju wału przy wysokości słupa wody odpowiadającego $Q_{1\%}$ [m ³ /dobę]	Filtracja w przekroju wału przy wysokości słupa wody odpowiadającego $Q_{0,3\%}$ [m ³ /dobę]	Wysokość wysączenia wody na skarpie odpowietrznej przy $Q_{1\%}$ h_o [m]	Wysokość wysączenia wody na skarpie odpowietrznej przy $Q_{0,3\%}$ h_o [m]
1+350	0,0026	0,0029	0,0002	0,0002
1+500	0,0028	0,0032	0,0002	0,0002
3+255	0,0020	0,0024	0,0001	0,0002
3+600	0,0017	0,0020	0,0001	0,0001
3+675	0,0063	0,0071	0,0004	0,0005
3+825	0,0085	0,0093	0,0005	0,0006
5+100	0,0020	0,0023	0,0001	0,0001

Porównując otrzymane wyniki filtracji przez wał nieuszczelniony (rys. 2) oraz uszczelniony (rys. 3) można wnioskować, iż instalacja zabezpieczeń przeciwnfiltracyjnych w postaci Bentomatu wpływa jednoznacznie na ograniczenie intensywności filtracji wody w obrębie wału przeciwpowodziowego. Przykładowo, przy słupie wody odpowiadającemu wodzie 100-letniej ($Q_{1\%}$), na 3+600 km wału filtracja przez nieuszczelniony wał wyniosła 10,15 m³/dobę, a po uszczelnieniu skarpy wału Bentomatem - zaledwie 0,0017 m³/dobę (zmniejszyła się o 99,98%). Tendencję znacznego obniżenia filtracji stwierdzono również w przypadku analizy poziomu słupa wody odpowiadającego wodzie 300-letniej ($Q_{0,3\%}$). Przykładowo, w przekroju zlokalizowanym na 3+600 km wału filtracja wody przez wał bez uszczelnienia wyniosła 12,46 m³/dobę, a po zastosowaniu Bentomatu ruch wody zmniejszył się do 0,002 m³/dobę, czyli spadł o 99,98%.



Rys. 2. Zestawienie obliczeń filtracji przez wał nieuszczelniony
 Fig. 2. Summary filtration calculations through the unsealed embankment



Rys. 3. Zestawienie obliczeń filtracji przez wał uszczelniony Bentomatem
 Fig. 3. Summary of calculations through the embankment sealed with Bentomat

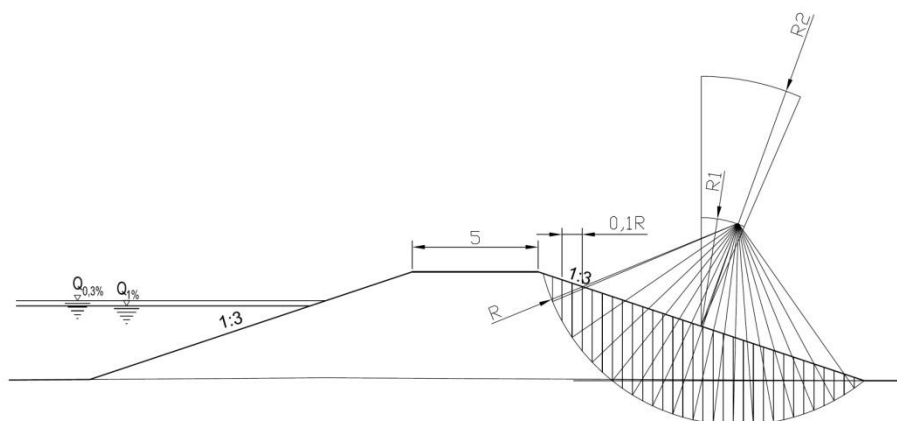
Ocenę **stateczności** wałów przeciwpowodziowych i ich zagrożenia osuwiskowego wykonano poprzez analizę wskaźnika stateczności (współczynnika stanu równowagi) F , obliczonego ze stosunku $F=U_i/Z_i$, gdzie: U_i – uogólnione siły utrzymujące wywołane tarcieniem i spójnością materiału, a Z_i – uogólnione siły zsuwające wywołane siłami grawitacji oraz filtracją i obciążeniem [Glazer 1977, Kołodziejczyk 2007, 2009]. Wykorzystano tutaj metodę Felleniusa [Borys i Mosiej 2008, Madej 1981, Pisarczyk 2005].

Obliczenia stateczności korpusu wału przeciwpowodziowego przeprowadzono w tych samych przekrojach poprzecznych analizowanego odcinka wału Wężyska – Chlebowo”, co powyższe obliczenia filtracji, porównując jednocze-

śnie stateczność wału uszczelnionego Bentomatem ze statecznością wału nieuszczelnionego. Uwzględniono w nich zarówno geometrię wału jak i parametry inżyniersko-geologiczne korpusu i podłoża wału, przyjmując że:

- wał ma wysokość 4,10 – 4,81 m, zróżnicowaną lokalnie ze względu na hipsometrię terenu,
- skarpy nasypu mają nachylenie 1:3 (zarówno od strony rzeki jak i zawala),
- szerokość wału w koronie wynosi 5 m,
- wysokość korony w stosunku do poziomu międzywala wynosi od 4,31 m w początkowym odcinku wału (km 1+350), poprzez 4,10 m (km 3+675), aż do 4,81 m w końcowej części wału (km 5+100),
- wysokość korony w stosunku do zawala osiąga wartość od 4,29 m (km 3+675) do 4,97 m (km 3+825).

Ocenę stateczności nieuszczelnionych wałów przeciwpowodziowych przeprowadzono poprzez obliczenie wskaźnika stateczności F skarpy odpowietrzej wałów, wykorzystując metodę szwedzką (Falleniusa). Obliczenia wskaźnika stateczności F przeprowadzono dla siedmiu wyznaczonych przekrojów badawczych, uwzględniając geometrię wału oraz parametry inżyniersko-geologiczne korpusu i podłoża wału (rys. 4).



Rys. 4. Schemat obliczeń wskaźnika stateczności wałów F metodą Falleniusa
 Fig. 4. Schema of the embankments stability index (F) calculation
 with the Fallenius method

Za podstawę ustalenia kategorii zagrożenia utratą stateczności wału przyjęto wartość wskaźnika F_{1min} , uwzględniającą wymagany współczynnik konsekwencji zniszczenia budowli hydrotechnicznej γ_n dla danej klasy wału.

Ustalenie kategorii zagrożenia stateczności przeprowadzono według następujących kryteriów:

kategoria 1; $F_{1\min} \geq 1,1 \cdot \gamma_n$

kategoria 2; $0,9 \cdot \gamma_n < F_{1\min} < 1,1 \cdot \gamma_n$

kategoria 3; $F_{1\min} \leq 0,9 \cdot \gamma_n$

gdzie: $F_{1\min}$ – minimalna wartość wskaźnika stateczności, 1,1 lub 0,9 – współczynnik materiałowy,

γ_n – wymagana wartość współczynnika konsekwencji zniszczenia budowli hydrotechnicznej dla danej klasy wałów.

Za podstawę oceny zagrożenia stateczności wału przyjęto skorygowaną wartość wskaźnika stateczności $F_{1\min}$, uzyskaną z wymnożenia wskaźnika stateczności F przez współczynnik konsekwencji zniszczenia budowli hydrotechnicznej γ_n , wymagany dla danej klasy wałów (zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska - Dz.U. 07 nr 86, poz. 579 z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie). Pozwoliło to na wydzielenie trzech kategorii wałów pod względem stateczności. Zgodnie z przyjętym powyżej sposobem oceny zagrożenia, w ocenie stateczności wałów przyjęto kryteria podane w tab. 3.

Tab. 3. Kategorie zagrożenia stateczności wału przeciwpowodziowego

Tab. 3. Flood bank stability hazard categories

Klasa wału	Kategoria 1	Kategoria 2	Kategoria 3
I	$F_{1\min} \geq 1,43$	$1,17 < F_{1\min} < 1,43$	$F_{1\min} \leq 1,17$
II	$F_{1\min} \geq 1,32$	$1,08 < F_{1\min} < 1,32$	$F_{1\min} \leq 1,08$
III	$F_{1\min} \geq 1,26$	$1,03 < F_{1\min} < 1,26$	$F_{1\min} \leq 1,03$
IV	$F_{1\min} \geq 1,21$	$1,00 < F_{1\min} < 1,21$	$F_{1\min} \leq 1,00$

Zestawienie uzyskanych wyników podano w tab. 4, gdzie uwzględniono wskaźnik stateczności wyznaczony metodą Falleniusa. Dla celów praktycznych, w obliczeniach stateczności przyjęto warunek $F_{1\min} = F_{dop} = 1,1 \div 1,3$, zależny od rodzaju (ważności) obiektu i dokładności rozpoznania właściwości mechanicznych gruntów.

Zbiorcza klasyfikacja, dokonana dla poszczególnych przekrojów badawczych w obrębie odcinka zbadanych wałów bez uszczelnienia wykazała możliwość utraty stateczności w przekrojach zlokalizowanych na 1+350, 1+500, 3+600, 3+675 i 3+825 km wału.

Podobne obliczenia przeprowadzono dla analizowanego wału uszczelnionego przegródą hydroizolacyjną z Bentomatu (tab. 5).

Tab. 4. Wyniki obliczeń stateczności nieuszczelnionego wału przeciwpowodziowego
 Tab. 4. Results of unsealed flood bank stability calculations

Kilometraż wału [km]	Wskaźnik stateczności F [-]	Skorygowany wskaźnik stateczności F_{1min} [-]
1+350	1,04	1,20
1+500	1,08	1,24
3+255	1,11	1,28
3+600	1,00	1,15
3+675	0,76	0,87
3+825	0,68	0,79
5+100	1,15	1,32

Tab. 5. Wyniki obliczeń stateczności wału przeciwpowodziowego uszczelnionego Bentomatem

Tab. 5. Results of flood bank sealed with Bentomat stability calculations

Kilometraż wału	Wskaźnik stateczności F [-]	Skorygowany wskaźnik stateczności F_{1min} [-]
1+350	1,43	1,65
1+500	1,54	1,77
3+255	1,56	1,79
3+600	1,44	1,66
3+675	1,19	1,37
3+825	1,16	1,33
5+100	1,60	1,84

Analizując wyniki stateczności wału uszczelnionego Bentomatem można stwierdzić, że we wszystkich przekrojach stwierdzono $F > 1,1$, co gwarantuje właściwą stateczność korpusu wału. Najwyższy współczynnik stateczności ($F=1,60$) wykazał wał uszczelniony matą bentonitową w przekroju zlokalizowanym na 5+100 km wału, a w pozostałych przekrojach stateczność wahała się w granicach od $F=1,16$ (3+825 km wału) do $F=1,60$ (5+100 km wału).

Wnioski

Badania dotyczące obliczenia filtracji wody przez korpus wału przeciwpowodziowego Wężyska-Chlebowo wykazały, że zastosowanie ekranów przeciwpodciśnieniowych w postaci mat bentonitowych znacznie obniży filtrację wody (o ponad 99%),

Obliczenia stateczności wałów przeciwpowodziowych wykazały, że:

- w wałach nieuszczelnionych uzyskany wskaźnik stateczności skarp był jedynie w dwóch przekrojach (3+255 i 5+100 km wału) niewiele wyższy od wymaganego minimum ($F > 1,1$), a w pozostałych pięciu przekrojach (1+350, 1+150, 3+600, 3+675 i 3+825 km wału) osiągnął wartości znacznie niższe od minimalnej i wynosił od $F=0,68$ do $F=1,0$ (poniżej minimalnej wartości gwarantującej bezpieczeństwo obiektu),
- w wałach uszczelnionych Bentomatem, wartość uzyskanego wskaźnika stateczności była wyższa od wymaganego minimum ($F > 1,1$) i wynosiła od $F=1,16$ do $F=1,60$.

Metoda uszczelnienia wałów Bentomatem jest dobrym rozwiązaniem konstrukcyjnym pod względem filtracji przez wał i stateczności skarp.

Bentomat odgrywa znaczącą rolę we wzmacnianiu i uszczelnieniu wałów przeciwpowodziowych, a w konsekwencji - zapewnieniu skutecznej ochrony przeciwpowodziowej.

Literatura

1. BORYS M., MOSIEJ K.: *Wytyczne wykonywania oceny stanu technicznego i bezpieczeństwa wałów przeciwpowodziowych*. Wyd. IMUZ, Falenty 2003
2. BORYS M., MOSIEJ K.: *Ocena stanu technicznego obwałowań przeciwpowodziowych*. Wyd. IMUZ, Falenty 2008
3. CETCO Poland: *Bentomat – informacje techniczne*. Wyd. CETCO Poland Sp. z o.o., Szczytno 2009
4. EKOPROJEKT ZIELONA GÓRA: *Zestawienie uogólnionych charakterystycznych wartości parametrów geotechnicznych gruntów w korpusie projektowanego wału Wężyska-Chlebowo – wał*. [W:] Wężyska – Chlebowo - budowa lewostronnego wału przeciwpowodziowego rzeki Odry w km 528,6÷532,0, gm. Maszewo, Gubin i Krosno Odrz., Zielona Góra 2010
5. MADEJ J.: *Metody sprawdzania stateczności zboczy*. Biblioteka Drogownictwa. WKiŁ, Warszawa 1981
6. KOŁODZIEJCZYK U.: *Geologiczno-inżynierskie badania wałów przeciwpowodziowych i ich podłoża*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2002
7. KOŁODZIEJCZYK U.: *Sposoby ograniczenia filtracji wody przez wały przeciwpowodziowe na lubuskim odcinku Odry*. Przegląd Geologiczny, T. 55, nr 3, 2007, s. 247-252
8. KOŁODZIEJCZYK U.: *Ocena uszczelnienia wałów przeciwpowodziowych za pomocą mat bentonitowych*. [W:] Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych. Wydawnictwa Uczelniane UTP, Bydgoszcz 2009, s. 259-268

9. PISARCZYK S.: *Mechanika gruntów*. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
10. ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ŚRODOWISKA z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz.U. 07 nr 86, poz. 579)

APPLICATION OF BENTONIT MATS IN FLOOD BANKS MODERNIZATION

S u m m a r y

From the time of millennium flooding which happened in Odra basin in 1997, intensive modernization of flood banks is carried on. This article shows effectiveness of flood banks modernization with the use of bentomat produced by CETCO Poland. This problem has been described on the basis of filtration and stability calculations of the flood banks body localised on left bank in part of Odra in lubuskie - on 528,6-532,0 km course of the river. In calculations two cases were taken into consideration: a) flood bank without filtration partition and b) flood bank sealed with bentomat.

Key words: flood safety, flood banks, sealing materials, slope stability