

## FILTRACJA I STATECZNOŚĆ JAKO GŁÓWNE PARAMETRY OCENY STANU WAŁU PRZECIWPOWODZIOWEGO

### WATER FILTRATION AND SLOPE STABILITY IS AS THE PRIME PARAMETERS OF FLOOD BANKS

URSZULA KOŁODZIEJCZYK<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Od czasu powodzi tysiąclecia, która miała miejsce w dorzeczu Odry w 1997 r., prowadzi się intensywną modernizację wałów przeciwpowodziowych. Wykorzystuje się tutaj szereg nowoczesnych technologii. Artykuł przedstawia skuteczność modernizacji wałów przeciwpowodziowych za pomocą mat bentonitowych. Zagadnienie to scharakteryzowano na podstawie obliczeń filtracji i stateczności korpusu wału przeciwpowodziowego, który jest projektowany na lewym brzegu lubuskiego odcinka Odry, wzdłuż 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. Wykonane obliczenia filtracji sugerują, że zastosowanie ekranów przeciwfiltracyjnych w postaci mat bentonitowych może obniżyć filtrację nawet o 99%.

**Słowa kluczowe:** wały przeciwpowodziowe, filtracja, stateczność skarp.

**Abstract.** Since the millennium flooding, which happened in Odra basin in 1997, intensive modernization of flood banks has been carried out. The catastrophic flood in 1997, called the flood of the century, had the greatest range. Many different types of sealing materials are used during modernization of the flood banks of Odra River. This article shows the effectiveness of flood banks modernization with the usage of bentomat which is produced by CETCO Poland. This problem has been described on the basis of filtration and stability calculations of the flood banks body localized on left bank of Odra River in Lubuskie voivodship. The described section is located along 528,6–532,0 km of the course of the river. In calculations two cases were taken into consideration: (a) flood bank without filtration barrier and (b) flood bank sealed with bentomat. The calculations showed that the usage of waterproof screens made of bentonite mats can reduce filtration by 99%.

**Key words:** flood banks, water filtration, slope stability.

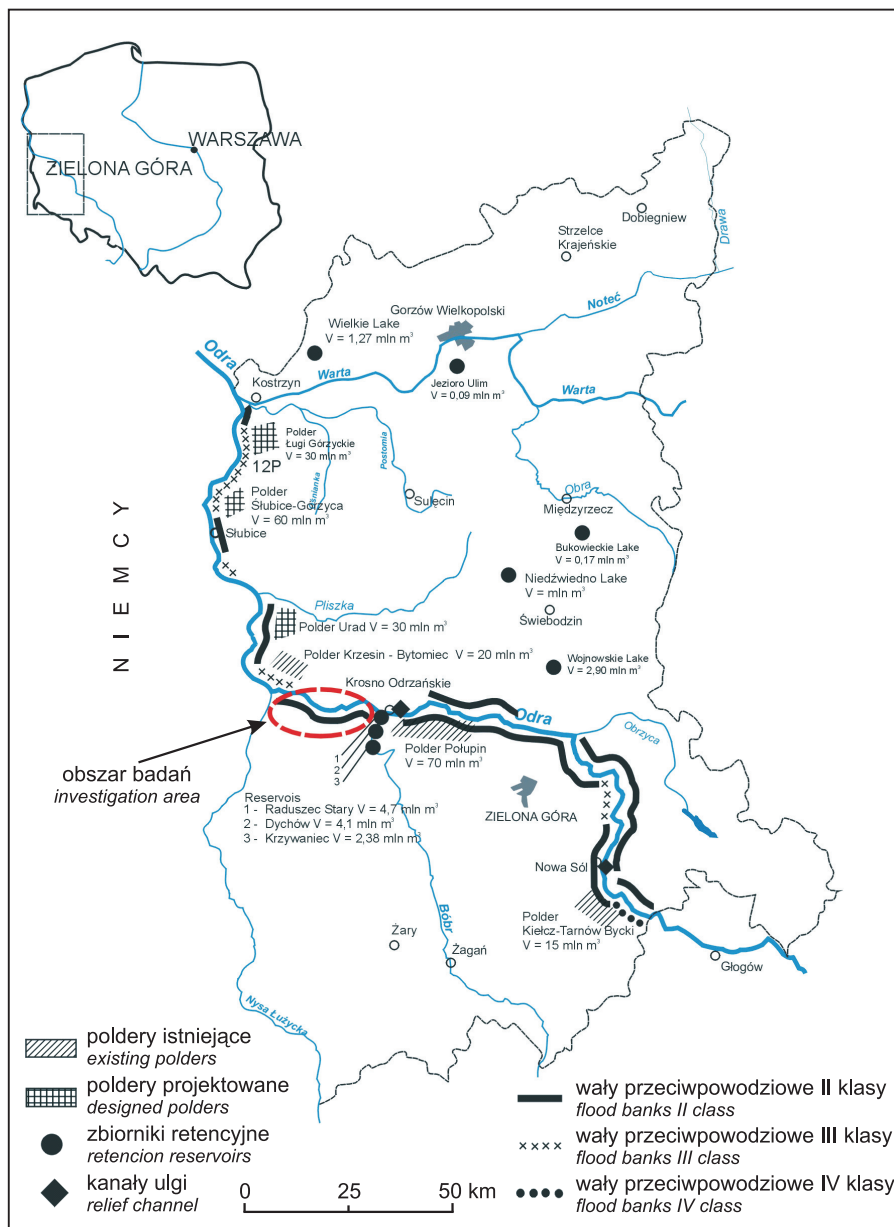
### WSTĘP

Wały przeciwpowodziowe stanowią podstawową formę ochrony przeciwpowodziowej. Są to proste budowle ziemne, zabezpieczające przed zalaniem zagospodarowane tereny doliny rzecznej. W praktyce inżynierskiej obiekty te dzieli się na klasy, różnicujące je pod względem wielkości obszaru chronionego, prawdopodobieństwa pojawienia się przepływów miarodajnych i kontrolnych oraz wyniesienia korony ponad poziom wód miarodajnych i maksymalnych (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie wa-

runków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie; Dz.U. Nr 86, poz. 579).

Wały lubuskiego odcinka Odry w przeważającej części stanowią obiekty II klasy (np. wały chroniące tereny zabudowane Nowej Soli i Słubie) oraz III i IV klasy (zabezpieczające m.in. fragmenty dorzecza użytkowane rolniczo). Oprócz polderów i naturalnych zbiorników retencyjnych są one zasadniczym elementem ochrony przeciwpowodziowej regionu lubuskiego (fig. 1).

<sup>1</sup> Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Środowiska, ul. Prof. Szafrana 15, 65-516 Zielona Góra; u.kolodziejczyk@iis.uz.zgora.pl



**Fig. 1. Sposoby ochrony przeciwpowodziowej na lubuskim odcinku Odry**

Methods of flood control in the section of Odra River in Lubuskie voivodship

Po wielkiej powodzi, która miała miejsce w dorzeczu Odry w lipcu 1997 r., przystąpiono intensywnie do usuwania doraźnych uszkodzeń, a następnie gruntownej modernizacji wałów (Kołodziejczyk, 2002, 2007). Wykorzystano szereg nowoczesnych materiałów uszczelniających, w tym: biowłókniny, geosyntetyki, bentomaty, geowłókniny, ścianki szczelne C-LOC oraz folię PCV.

Przykładem tych działań jest projektowana modernizacja odcinka wału zlokalizowanego na lewym brzegu Odry, wzdłuż 528,6–532,0 km biegu rzeki (fig. 1), gdzie zakłada się zastosowanie ekranów przeciwfiltracyjnych w postaci mat bentonitowych (Kołodziejczyk, 2009). Oczekuje się, że to rozwiązanie znacznie obniży filtrację wody przez korpus wału oraz wzmocni jego stateczność.

Projektowany wał będzie miał wysokość 4,10–4,81 m, zróżnicowaną lokalnie ze względu na hipsometrię terenu. Nachylenie skarp nasypu, zarówno od strony rzeki, jak i zawala, wyniesie 1:3, co można uznać za właściwe i bezpieczne dla stateczności obiektu. Szerokość wału w koronie osiągnie 5 m, a w podstawie do 10 m. Projektowane rzędne korony wału wahać się będą od 40,45 m n.p.m. w początkowym odcinku wału do 39,38 m n.p.m. w odcinku końcowym. Wysokość korony w stosunku do poziomu międzywała wyniesie od 4,31 do 4,81 m, a zawala od 4,29 do 4,97 m.

Obliczenia filtracji i stateczności korpusu projektowanego wału przeciwpowodziowego przeprowadzono w kilkunastu przekrojach poprzecznych, uwzględniając każdorazowo dwa warianty: (a) wał bez przegrody filtracyjnej oraz (b) wał

uszczelniony przesłoną z bentomatu. Bentomat wykazuje bardzo dobry efekt uszczelniania; wysokie ciśnienie pęcznienia powoduje, że mata bentonitowa tworzy po uwodnieniu spójną i jednorodną barierę hydrauliczną, niewątpliwie skuteczniejszą, niż warstwa gruntu rodzimego (ilastego), w której zawsze może dojść do spekania lub ścięcia z powodu wysychania

i obecności słabych wiązań strukturalnych, albo warstwa folii PCV, ulegająca często rozerwaniu. Mata bentonitowa wykazuje ponadto większą odporność na nierównomierne osiadanie podłoża, a dodatkowo nie występują w niej perforacje, których nie sposób uniknąć podczas montażu innych przegród hydroizolacyjnych, np. folii (CETCO Poland, 2007).

## METODYKA I WYNIKI BADAŃ

Do obliczeń **filtracji** przyjęto powszechną zasadę, że objętościowe natężenie przepływu filtracyjnego, czyli ilość wody przechodzącej w danej jednostce czasu przez środowisko porowate (skałę, grunt), jest proporcjonalna do spadku hydraulicznego, poprzecznego przekroju środowiska filtrującego i współczynnika filtracji (Adamski i in., 1986). Obliczenia natężenia przepływu wody przez wał przeciwpowodziowy oparto na parametrach geotechnicznych gruntu wbudowanego w wał oraz parametrach technicznych materiału uszczelniającego (Bażyński i in., 1999; Pisarczyk, 2005). Założono, że obiekt będzie zbudowany z gruntów niespoistych, reprezentowanych przez piaski grube ze żwirem (Pr+Ż) oraz piaski grube, przewarstwione piaskami średnioziarnistymi ze żwirem (Pr/Ps+Ż), o średniej przepuszczalności  $k_k = 55,0$  m/d (GEOBUD i EKOPROJEKT, 2010). Ponadto przyjęto, że maksymalny słupek wody przed uszczelnieniem (od strony odwodnej) odpowiadać będzie poziomowi wody stuletniej ( $Q_{1\%}$ ) i trzy-stuletniej ( $Q_{3\%}$ ), a ekran przeciwfiltracyjny będzie zainstalowany od strony odwodnej wału. Jako materiał uszczelniający przewidziano bentomat o następujących parametrach: grubość (zhydrowanego bentomatu)  $d = 0,01$  m, przepuszczalność  $k_e \leq 4,5 \cdot 10^{-11}$  m/s, zawartość bentonitu  $m \geq 3000$  g na  $1$  m<sup>2</sup> maty (przy wilgotności bentonitu 12%), masa powierzchniowa  $\rho \geq 3300$  g/m<sup>2</sup>, kąt tarcia wewnętrznego (przy pełnym nasyceniu wodą)  $\Phi_b \geq 26$ .

Jednostkowe natężenie przepływu przez korpus wału (podłoże słabo przepuszczalne, bez drenażu) wyznaczono ze wzoru Michajłowa (Borys, Mosiej, 2003, 2008):

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

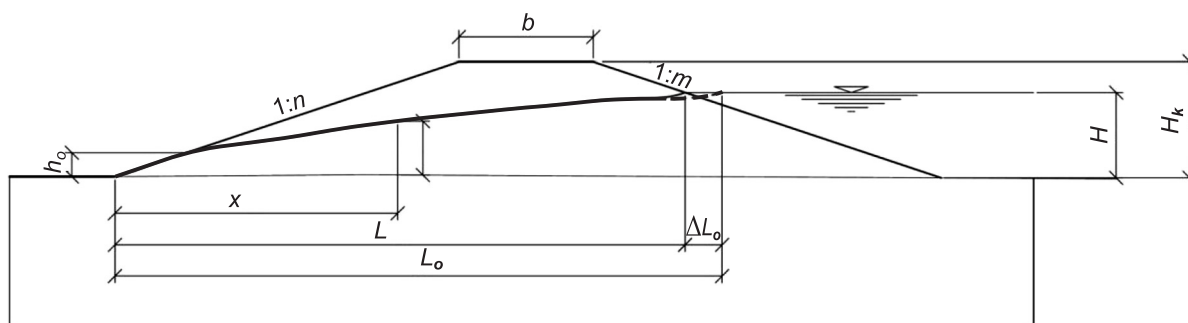


Fig. 2. Schemat do wyznaczania filtracji przez wał przeciwpowodziowy

Objaśnienia w tekście

The scheme for determining the filtration through flood bank

Explanations in the text

gdzie:

$k$  – współczynnik filtracji gruntu w korpusie wału [m/s],  
 $L_o = nH_k + b + (H_k - H)m + \Delta L_o$  [m], przy czym:  $\Delta L_o = \beta H$ ;

$$\beta = \frac{1}{2 + \frac{1}{m}}$$

$b$  – szerokość korony wału: 5 m,

$H$  – głębokość wody przy stopie wału przy  $Q_{1\%}$  oraz  $Q_{3\%}$  [m],

$H_k$  – wysokość wału [m],

$m$  – nachylenie skarpy odwodnej; zgodnie z założeniem projektu  $m = 3$  [-],

$n$  – nachylenie skarpy odpowietrznej; zgodnie z założeniem projektu  $n = 3$  [-],

$\Delta L_o$  – oznaczenia według [figury 2](#).

Wysokość wyciągnięcia wody  $h_o$  na skarpie odpowietrznej w metrach oraz rzędne linii depresji  $y$  wyznaczono z zależności:

$$y = \sqrt{\frac{2q(x - nh_o) + h_o^2}{k}}$$

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

gdzie:

$\alpha$  – współczynnik;  $\alpha = 4$  dla  $n \geq 1$ ,

$q$  – jednostkowe natężenie przepływu wody przez korpus wału [m<sup>3</sup>/dobę],

$k$  – współczynnik filtracji gruntu w korpusie wału [m/dobę],

$n$  – nachylenie skarpy odpowietrznej; zgodnie z założeniem projektu  $n = 3$  [-],

$h_o$  – wysokość wyciągnięcia na skarpie odpowietrznej [m],

$x$  – odcięta punktu obliczeniowego według [figury 2](#).

Przykładowe wyniki obliczeń filtracji wody przez nieuszczelniony wał przeciwpowodziowy podano w tabeli 1. Z kolei graficzny obraz tych wyników, w tym: analizę filtracji przy prawdopodobieństwie przepływu  $Q_{1\%}$  oraz  $Q_{3\%}$ , położenie linii depresji  $y$  i wysokość wysączenia wody  $h_o$  na skarpie odpowietrznej wału bez drenażu, zaprezentowano na figurze 3.

Natężenie przepływu wody przez korpus i podłoże wału obliczono ze wzoru:

$$q_c = q_k + q_p,$$

gdzie:

- $q_c$  – całkowity przepływ przez korpus wału i podłoże [ $\text{m}^3/\text{dobe}$ ],
- $q_k$  – przepływ jednostkowy przez korpus wału na odcinku 1 m [ $\text{m}^3/\text{dobe}$ ],
- $q_p$  – przepływ jednostkowy przez podłoże na odcinku 1 m [ $\text{m}^3/\text{dobe}$ ].

Natężenie przepływu jednostkowego przez korpus wału  $q_k$  wyznaczono ze wzoru Michajłowa, zakładając że podłoże jest nieprzepuszczalne, natomiast natężenie przepływu jednostkowego przez podłoże  $q_p$  określono z zależności:

$$q_p = k_p \frac{HT}{\alpha L},$$

gdzie:

- $k_p$  – współczynnik filtracji gruntu w podłożu [ $\text{m}/\text{dobe}$ ],
- $H$  – głębokość wody przy stopie wału przy  $Q_{1\%}$  oraz  $Q_{3\%}$  [m],
- $L$  – szerokość stopy wału [m],
- $T$  – miąższość warstwy przepuszczalnej w podłożu [m],
- $\alpha$  – współczynnik zależny od stosunku  $L/T$  (tab. 2).

Biorąc pod uwagę specyfikę budowy wału, w tym warstwowo układany i zagęszczany grunt o jednorodnej przepuszczalności ( $k = 55,0 \text{ m}/\text{dobe}$ ), i wyznaczając dla każdego z analizowanych przekrojów położenie linii depresji, obliczono jednostkowy przepływ wody przez nieuszczelniony wał przeciwpowodziowy. Wyniki tych obliczeń, w warunkach wody stuletniej ( $Q_{1\%}$ ) i trzystuletniej ( $Q_{3\%}$ ), zestawiono w tabelach 2–4 oraz na figurze 4.

Obliczenia filtracji przez wał uszczelniony bentomatem przeprowadzono przy następujących założeniach: zawartość bentonitu w  $1 \text{ m}^2$  maty (przy wilgotności bentonitu 12%)  $m \geq 3000 \text{ g}$ , masa powierzchniowa bentomatu  $\rho \geq 3300 \text{ g}/\text{m}^2$ , typowa grubość nasyczonego bentomatu  $d = 0,01 \text{ m}$ , wodoprzepuszczalność  $k_e = 4,5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ . Wyniki obliczeń zestawiono w tabelach 5–7, a schematy filtracji na figurach 5–7.

Porównując otrzymane wyniki można wnioskować, iż instalacja zabezpieczeń przeciwfiltracyjnych w postaci bentomatu wpłynie jednoznacznie na kształtowanie się filtracji wody w obrębie wału przeciwpowodziowego (fig. 8–9). Wykonane obliczenia wskazują, że przy założeniu poziomu słupa wody stuletniej ( $Q_{1\%}$ ) wskutek uszczelnienia wału filtracja zostanie diametralnie ograniczona. Przykładowo, na 3+600 km wału filtracja przez nieuszczelniony wał wyniesie  $10,15 \text{ m}^3/\text{dobe}$ , a po uszczelnieniu skarpy wału bentomatem osiągnie zaledwie  $0,0017 \text{ m}^3/\text{dobe}$ , czyli zmniejszy się o 99,9%.

Tendencję znacznego obniżenia filtracji stwierdzono również w przypadku analizy poziomu słupa wody odpowiadającego wodzie trzystuletniej ( $Q_{3\%}$ ). Przeprowadzone przy tym założeniu obliczenia dla przekrojów jednostkowych

Tabela 1

**Wyniki obliczeń filtracji wody przez nieuszczelniony wał przeciwpowodziowy posadowiony na podłożu słabo przepuszczalnym**

The results of calculations for water filtration through unsealed flood bank built on low permeable ground

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

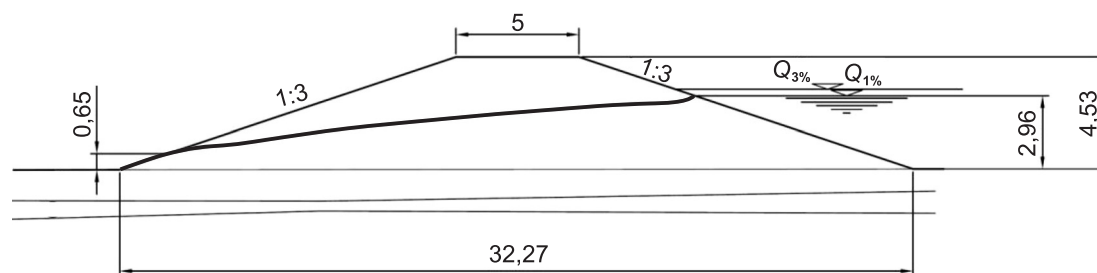


Fig. 3. Schemat filtracji przez nieuszczelniony wał przeciwpowodziowy; przekrój 3+600 km

The scheme of the filtration through unsealed flood bank; cross-section at 3+600 km

Tabela 2

## Wyniki obliczeń filtracji wody przez nieuszczelniony wał przeciwpowodziowy posadowiony na podłożu przepuszczalnym

The results of calculations for water filtration through unsealed flood bank built on permeable ground

Kilometraż wału	Filtracja przy wysokości słupa wody odpowiadającej $Q_{1\%}$ [m <sup>3</sup> /dobę]	Filtracja przy wysokości słupa wody odpowiadającej $Q_{3\%}$ [m <sup>3</sup> /dobę]	Wysokość wysączenia się wody w skarpie odpowietrznej $h_o$ przy $Q_{1\%}$ [m]	Wysokość wysączenia się wody w skarpie odpowietrznej $h_o$ przy $Q_{3\%}$ [m]
1+350	11,91	13,98	0,76	0,89
1+500	12,32	15,44	0,78	0,98
3+255	10,08	12,60	0,64	0,80
3+675	8,53	10,66	0,54	0,68
3+825	11,85	14,30	0,75	0,91

Tabela 3

Zestawienie rzędnych linii depresji w korpusie nieuszczelnionego wału przeciwpowodziowego przy  $Q_{1\%}$ Summary of the depression lines formed in the body of unsealed flood bank at  $Q_{1\%}$ 

Kilometraż wału	Rzędna	$x = 5$ m	$x = 7$ m	$x = 9$ m	$x = 11$ m	$x = 13$ m	$x = 15$ m	$x = 17$ m	$x = 19$ m	$x = 21$ m	$x = 23$ m	$x = 25$ m	$x = 27$ m	$x = 29$ m
1+350	y	1,09	1,43	1,71	1,95	2,16	2,35	2,53	2,69	2,85	3,00	3,14	3,27	3,40
1+500	y	1,09	1,45	1,73	1,97	2,19	2,38	2,56	2,73	2,89	3,04	3,19	3,33	3,46
3+255	y	1,07	1,37	1,61	1,83	2,02	2,19	2,35	2,50	2,65	2,78	2,91	3,03	3,15
3+600	y	1,07	1,37	1,62	1,83	2,02	2,20	2,36	2,51	2,65	2,79	2,92	3,04	3,16
3+675	y	1,03	1,29	1,51	1,71	1,88	2,04	2,19	2,32	2,45	2,58	2,69	2,81	2,92
3+825	y	1,09	1,43	1,71	1,94	2,15	2,34	2,52	2,69	2,84	2,99	3,13	3,27	3,40
5+100	y	1,08	1,41	1,68	1,90	2,11	2,29	2,46	2,63	2,78	2,92	3,06	3,19	3,31

x i y – oznaczenia w tekście i na fig. 2

x and y – explanations in the text and Fig. 2

Tabela 4

Zestawienie rzędnych linii depresji w korpusie nieuszczelnionego wału przeciwpowodziowego przy  $Q_{3\%}$ Summary of the depression lines formed in the body of unsealed flood bank at  $Q_{3\%}$ 

Kilometraż wału	Rzędna	$x = 5$ m	$x = 7$ m	$x = 9$ m	$x = 11$ m	$x = 13$ m	$x = 15$ m	$x = 17$ m	$x = 19$ m	$x = 21$ m	$x = 23$ m	$x = 25$ m	$x = 27$ m	$x = 29$ m
1+350	y	1,10	1,49	1,80	2,06	2,29	2,51	2,70	2,88	3,05	3,22	3,37	3,52	3,66
1+500	y	1,08	1,51	1,85	2,13	2,38	2,60	2,81	3,01	3,19	3,36	3,52	3,68	3,83
3+255	y	1,10	1,45	1,74	1,99	2,21	2,40	2,59	2,76	2,92	3,07	3,22	3,36	3,49
3+600	y	1,10	1,45	1,74	1,98	2,20	2,39	2,58	2,75	2,91	3,06	3,20	3,34	3,47
3+675	y	1,08	1,39	1,65	1,87	2,06	2,24	2,41	2,57	2,71	2,85	2,99	3,11	3,23
3+825	y	1,09	1,50	1,81	2,08	2,31	2,53	2,73	2,91	3,09	3,25	3,41	3,56	3,70
5+100	y	1,10	1,48	1,79	2,05	2,28	2,49	2,68	2,86	3,03	3,19	3,34	3,49	3,63

x i y – oznaczenia w tekście i na fig. 2

x and y – explanations in the text and Fig. 2

Tabela 5

## Wyniki obliczeń filtracji wody przez wał przeciwpowodziowy uszczelniony bentomatem

The results of calculations for filtration through the flood bank sealed with benthomat

Kilometraż wału	Filtracja w przekroju wału przy wysokości słupa wody odpowiadającej $Q_{1\%}$ [m <sup>3</sup> /dobę]	Filtracja w przekroju wału przy wysokości słupa wody odpowiadającej $Q_{3\%}$ [m <sup>3</sup> /dobę]	Wysokość wysączenia wody w skarpie odpowietrznej $h_o$ przy $Q_{1\%}$ [m]	Wysokość wysączenia wody w skarpie odpowietrznej $h_o$ przy $Q_{3\%}$ [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

Tabela 6

Zestawienie rzędnych linii depresji w korpusie wału przeciwpowodziowego uszczelnionego bentomatem przy  $Q_{1\%}$ Summary of the depression lines formed in the body of the flood bank sealed with benthomat at  $Q_{1\%}$ 

Kilometraż wału	Rzędna	$x = 5$ m	$x = 7$ m	$x = 9$ m	$x = 11$ m	$x = 13$ m	$x = 15$ m	$x = 17$ m	$x = 19$ m	$x = 21$ m	$x = 23$ m	$x = 25$ m	$x = 27$ m	$x = 29$ m	$x = 31$ m
1+350	y	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	
1+500	y	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06
3+255	y	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	
3+600	y	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
3+675	y	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	
3+825	y	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10
5+100	y	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	

x i y – oznaczenia w tekście i na fig. 2

x and y – explanations in the text and Fig. 2

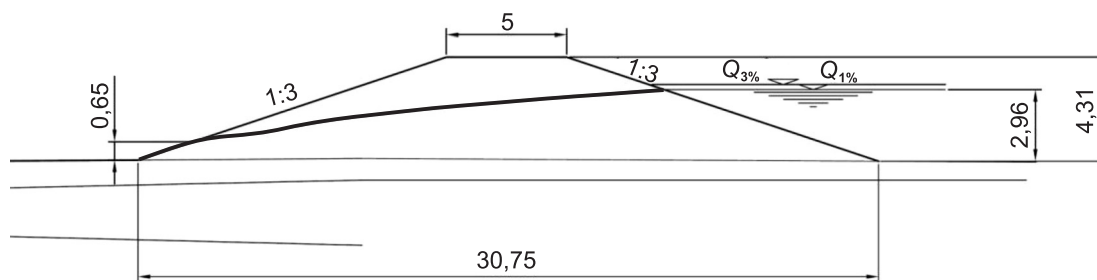
Tabela 7

Zestawienie rzędnych linii depresji w korpusie wału przeciwpowodziowego uszczelnionego bentomatem przy  $Q_{3\%}$ Summary of the depression lines formed in the body of the flood bank sealed with benthomat at  $Q_{3\%}$ 

Kilometraż wału	Rzędna	$x = 5$ m	$x = 7$ m	$x = 9$ m	$x = 11$ m	$x = 13$ m	$x = 15$ m	$x = 17$ m	$x = 19$ m	$x = 21$ m	$x = 23$ m	$x = 25$ m	$x = 27$ m	$x = 29$ m	$x = 31$ m
1+350	y	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	
1+500	y	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	
3+255	y	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	
3+600	y	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	
3+675	y	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	
3+825	y	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
5+100	y	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	

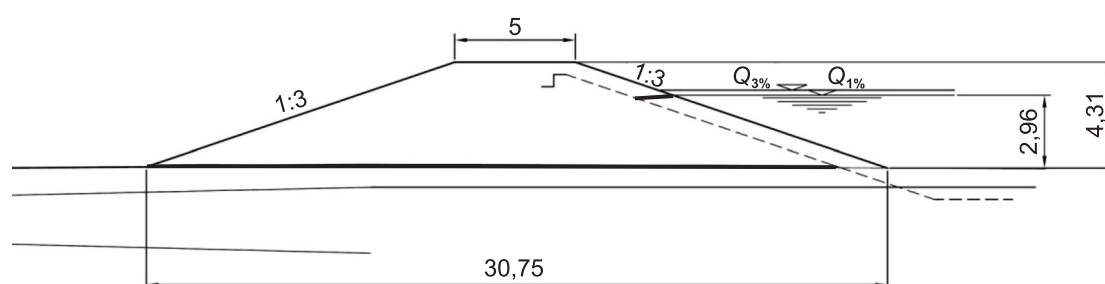
x i y – oznaczenia w tekście i na fig. 2

x and y – explanations in the text and Fig. 2



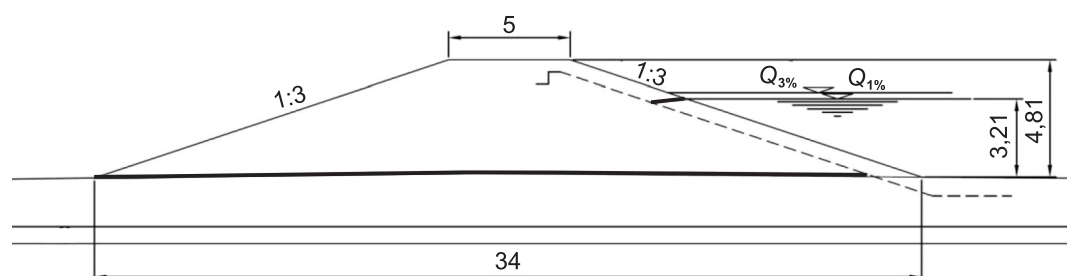
**Fig. 4. Schemat filtracji przez nieuszczelniony wał przeciwpowodziowy; przekrój 1+350 km**

The scheme of the filtration through unsealed flood bank; cross-section at 1+350 km



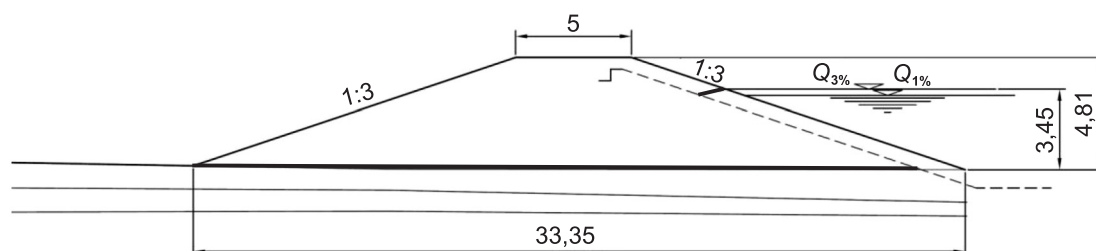
**Fig. 5. Schemat filtracji przez wał uszczelniony bentomatem; przekrój 1+350 km**

The scheme of the filtration through the flood bank sealed with bentomat; cross-section at 1+350 km



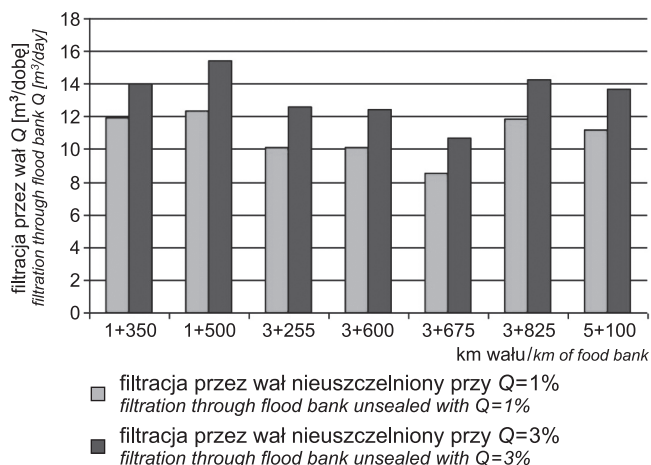
**Fig. 6. Schemat filtracji przez wał uszczelniony bentomatem; przekrój 3+825 km**

The scheme of the filtration through the flood bank sealed with bentomat; cross-section at 3+825 km



**Fig. 7. Schemat filtracji przez wał uszczelniony bentomatem; przekrój 5+100 km**

The scheme of the filtration through the flood bank sealed with bentomat; cross-section at 5+100 km



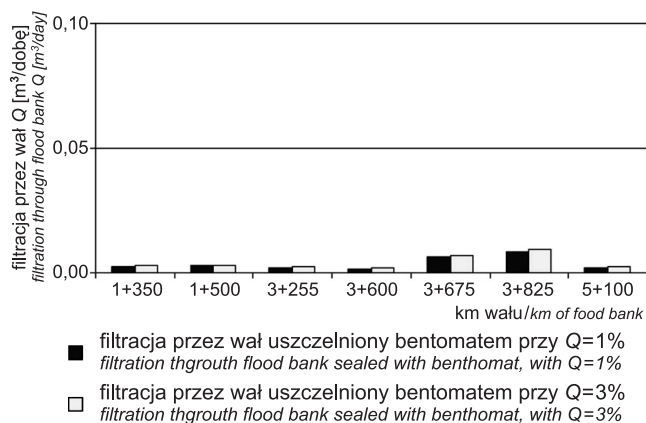
**Fig. 8. Zestawienie obliczeń filtracji przez nieuszczelniony wał przeciwpowodziowy**

Summary calculations of filtration through unsealed flood bank

projektowanego wału wykazały obniżenie filtracji wskutek uszczelnienia bentomatem o 99,93–99,98%. Przykładowo, w przekroju zlokalizowanym na 3+600 km wału filtracja przez wał bez uszczelnienia wyniesie w tym przypadku 12,46 m<sup>3</sup>/dobę, a po zastosowaniu bentomatu ruch wody zmniejszy się do 0,002 m<sup>3</sup>/dobę, czyli spadnie o 99,9%.

Ocenę **stateczności** nieuszczelnionych wałów przeciwpowodziowych przeprowadzono poprzez obliczenie wskaźnika stateczności  $F$  skarpy odpowietrznej wałów, wykorzystując metodę szwedzką – Felleniusa (Glazer, 1977). Obliczenia wskaźnika stateczności  $F$  przeprowadzono dla siedmiu wyznaczonych przekrojów badawczych, uwzględniając geometrię wału oraz parametry geologiczno-inżynierskie korpusu i podłoża wału (fig. 10).

Za podstawę ustalenia kategorii zagrożenia utratą stateczności wału przyjęto wartość wskaźnika  $F_{1min}$ , uwzględniającą wymagany współczynnik konsekwencji zniszczenia



**Fig. 9. Zestawienie obliczeń filtracji przez wał przeciwpowodziowy uszczelniony bentomatem**

Summary calculations of filtration through the flood bank sealed with bentomat

budowli hydrotechnicznej  $\gamma_n$  dla danej klasy wału (Madej, 1981).

Ustalenie kategorii zagrożenia stateczności przeprowadzono według następujących kryteriów:

- kat. 1 –  $F_{1min} \geq 1,1\gamma_n$ ,
- kat. 2 –  $0,9\gamma_n < F_{1min} < 1,1\gamma_n$ ,
- kat. 3 –  $F_{1min} \leq 0,9\gamma_n$ ,

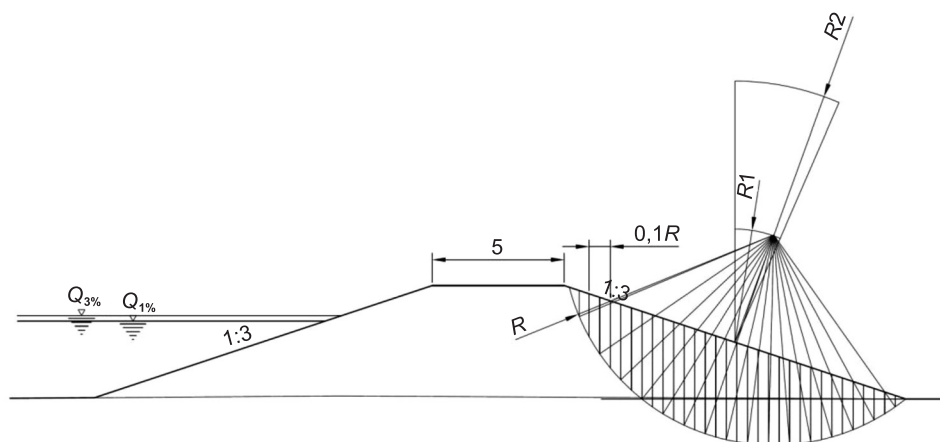
gdzie:

$F_{1min}$  – minimalna wartość wskaźnika stateczności,

1,1 lub 0,9 – współczynnik materiałowy,

$\gamma_n$  – wymagana wartość współczynnika konsekwencji zniszczenia budowli hydrotechnicznej dla danej klasy wałów.

Za podstawę oceny zagrożenia stateczności wału przyjęto skorygowaną wartość wskaźnika stateczności  $F_{1min}$ , uzyskaną z pomnożenia wskaźnika stateczności  $F$  przez współczynnik konsekwencji zniszczenia budowli hydrotechnicznej  $\gamma_n$ , wymagany dla danej klasy wałów (zgodnie



**Fig. 10. Schemat obliczeń wskaźnika stateczności wałów  $F$  metodą Felleniusa**

$R$  – promień powierzchni odlucia

The scheme of  $F$  stability index calculations of flood banks by Fellenius method

$R$  – marks the ray of surface of landslide



z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie; Dz.U. Nr 86, poz. 579). Pozwoliło to na wydzielenie trzech kategorii wałów pod względem stateczności (tab. 8).

Dla celów praktycznych, w obliczeniach stateczności przyjęto warunek  $F_{1min} = F_{dop} = 1,1-1,3$ , zależny od rodzaju (ważności) obiektu i dokładności rozpoznania właściwości mechanicznych gruntów.

Tabela 8

## Kategorie zagrożeń stateczności wału

Categories of bank slope stability threats

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

Zestawienie wyników stateczności uzyskanych dla wału nieuszczelnionego podano w tabeli 9.

Zbiorcza klasyfikacja, dokonana dla poszczególnych przekrojów badawczych w przypadku nieuszczelnionego odcinka projektowanych wałów wykazała możliwość utraty stateczności w przekrojach zlokalizowanych na: 1+350, 1+500, 3+600, 3+675 i 3+825 km wału.

Obliczenia stateczności wałów uszczelnionych bentomatem zestawiono w tabeli 10.

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

Tabela 9

## Wyniki obliczeń stateczności nieuszczelnionego wału przeciwpowodziowego

The results of calculations for stability of unsealed flood bank

Kilometraż wału	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

Tabela 10

## Wyniki obliczeń stateczności wału przeciwpowodziowego uszczelnionego bentomatem

The results of calculations of stability of the flood bank sealed with bentomat

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

## PODSUMOWANIE

Od czasu powodzi tysiąclecia, jaka miała miejsce w dorzeczu Odry w 1997 r., kiedy wyraźnie dały o sobie znać wieloletnie zaniedbania w eksploatacji obiektów przeciwpowodziowych, prowadzi się intensywną modernizację wałów przeciwpowodziowych. Wykorzystuje się tutaj szereg nowoczesnych technologii, w tym maty bentonitowe.

Obliczenia filtracji i stateczności korpusu wału przeciwpowodziowego uszczelnionego bentomatem przeprowadzono dla wybranego fragmentu, zlokalizowanego na lewym brzegu lubuskiego odcinka Odry, wzdłuż 528,6–532,0 km biegu rzeki. Wykonano je w kilku przekrojach poprzecznych projektowanego wału, uwzględniając każdorazowo

dwa warianty: (a) wał bez przegrody filtracyjnej oraz (b) wał uszczelniony przesłoną z bentomatu.

Obliczenia filtracji sugerują, że zastosowanie ekranów przeciwpowodziowych w postaci mat bentonitowych może obniżyć filtrację nawet o 99%.

Z kolei, analiza wskaźnika stateczności wskazuje, że w wałach nieuszczelnionych jest on niższy od wymaganej wartości granicznej ( $F > 1,1$ ) i wynosi  $0,68 < F < 0,1$ , podczas gdy w wałach z ekranem przeciwpowodziowym zawsze osiąga wartości wyższe i wynosi  $1,16 < F < 1,60$ .

W analizie filtracji i stateczności zawsze trzeba mieć nadzieję, że wszelka modernizacja urządzeń przeciwpowodziowych

wodziowych na Środkowym Nadodrzu zostanie skutecznie przeprowadzona zanim wymusi ją kolejna powódź. Ale również konieczna jest świadomość, że wszelkie próby walki z żywiołem powodzi będą zawsze tylko szukaniem rozwią-

zań zastępczych. Rzeka bowiem musi mieć swoją przestrzeń. Skoro człowiek zasiedlił doliny rzeczne, a tym bardziej tereny zalewowe, musi nauczyć się egzystencji w tym środowisku i skutecznej walki z tym żywiołem.

## LITERATURA

- ADAMSKI W., GORTAT J., LEŚNIAK E., ŻBIKOWSKI A., 1986 — Małe budownictwo wodne dla wsi. Arkady, Warszawa.
- BAŻYŃSKI J., DRĄGOWSKI A., FRANKOWSKI Z., KACZYŃSKI R., RYBICKI S., WYSOKIŃSKI L., 1999 — Zasady sporządzania dokumentacji geologiczno-inżynierskich. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- BORYS M., MOSIEJ K., 2003 — Wytyczne wykonywania oceny stanu technicznego i bezpieczeństwa wałów przeciwpowodziowych. Wyd. IMUZ, Falenty.
- BORYS M., MOSIEJ K., 2008 — Oceny stanu technicznego obwałowań przeciwpowodziowych. Wyd. IMUZ, Falenty.
- CETCO Poland, 2007 — Bentomat – informacje techniczne. Wyd. CETCO Poland Sp. z o.o., Szczytno.
- GEOBUD I EKOPROJEKT, 2010 — 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.
- GLAZER Z., 1977 — Mechanika gruntów. Wyd. Geol., Warszawa.
- MADEJ J., 1981 — Metody sprawdzania stateczności zboczy. Biblioteka Drogownictwa. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- KOŁODZIEJCZYK U., 2002 — Geologiczno-inżynierskie badania wałów przeciwpowodziowych i ich podłoża. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra.
- KOŁODZIEJCZYK U., 2007 — Sposoby ograniczenia filtracji wody przez wały przeciwpowodziowe na lubuskim odcinku Odry. *Prz. Geol.*, **55**, 3: 247–252.
- KOŁODZIEJCZYK U., 2009 — Ocena uszczelnienia wałów przeciwpowodziowych za pomocą mat bentonitowych. *W*: Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych: 259–268. Wyd. Uczelniane UTP, Bydgoszcz.
- PISARCZYK S., 2005 — Mechanika gruntów. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ŚRODOWISKA z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz.U. Nr 86, poz. 579).

## SUMMARY

Since the millennium flooding, which happened in Odra basin in 1997, intensive modernization of flood banks has been carried out. The catastrophic flood in 1997, called the flood of the century, had the greatest range. Many different types of sealing materials are used during modernization of the flood banks of Odra River. This article shows effectiveness of flood banks modernization with the usage of bentomat, which is produced by CETCO Poland. This problem has been described on the basis of filtration and stability calculations of the flood banks body localized on left bank of Odra River in Lubuskie voivodship. The described section is located along 528,6–532,0 km of the course of the river.

In calculations two cases were taken into consideration: (a) flood bank without filtration barrier, (b) flood bank sealed with bentomat.

The calculations of the water flow through an embankment were based on geotechnical parameters of the soil embedded in the flood embankment and the sealing material.

They were based on the following principles:

- the object is constructed of non-cohesive soil, represented by coarse sand (CSa) and gravel (Gr) with a filtration coefficient  $k_k = 55.0$  m/day,

- maximum water level before sealing was defined as the level which occurs with the frequency of one per hundred ( $Q_{1\%}$ ) and one per three hundred years ( $Q_{3\%}$ ),

- waterproof screen was installed at the water-side of the flood embankment,

- the bentomat used as sealing material has the following parameters: thickness  $d = 0.01$  m, filtration coefficient  $k_e \leq 4.5 \cdot 10^{-11}$  m/s, bentonite content  $m \geq 3000$  g per 1 m<sup>2</sup> of mat (at moisture 12%), mass per unit area  $\rho \geq 3300$  g/m<sup>2</sup>, angle of repose  $\Phi_b \geq 26^\circ$ .

The calculations showed that the usage of waterproof screens made of bentonite mats can reduce filtration by 99%.

It only remains to be hopeful that the flood protection activity in the Middle Odra Land shall be successfully carried on and shall have been completed before it is interrupted by another flooding. One has to be aware of the fact that all attempts of counteracting and fighting against floods shall always be only a sort of a search for substitutes or just a palliative. The river has to have its own space. As men settled in river valleys and flood terraces, we have to learn how to live in this environment and how to cope with floods.