

ZMIANY PARAMETRÓW GEOTECHNICZNYCH WAŁÓW PRZECIWPOWODZIOWYCH POPRZECZ ZABUDOWĘ PRZESŁON HYDROIZOLACYJNYCH WYKONANYCH Z ZASTOSOWANIEM SPOIW IŁOWO-CEMENTOWYCH

KUŚ R.¹, SŁOWIKOWSKI D.¹

¹ Przedsiębiorstwo Robót Geologiczno-Wiertniczych G. Janik R. Kuś s.j., ul. Nowopogońska 4, 41-200 Sosnowiec
e-mail : roman_k@prgw.com.pl ; d.slowikowski@prgw.com.pl

Streszczenie: Od kilkunastu lat w Polsce intensywnie prowadzone są remonty i budowy obiektów hydrotechnicznych, a w tym zabezpieczeń przeciwpowodziowych. Ważnym ich elementem konstrukcyjnym są przesłony (bariery) hydroizolacyjne. Konstrukcje te, w zależności od warunków lokalnych, wykonywane są w różnych technologiach i zagłębione są na różne głębokości. Podstawowe oczekiwania w stosunku do przesłon hydroizolacyjnych, można określić w sposób następujący :

- wysokie własności izolacyjne,
- zachowanie długoletniej funkcjonalności,
- odporność na ciśnienie hydrostatyczne,
- odporność na deformacje wywierane przez czynniki zewnętrzne;
- wysoka odporność na korozję powodowaną przez wody o różnych typach mineralizacji ;
- spoiwo budujące przesłonę nie powinno wywierać negatywnego wpływu na otaczające środowisko .

Wymagania te spełniają bariery hydroizolacyjne wykonywane przy zastosowaniu spoiw na bazie modyfikowanych ilów (technologia PRGW).

Artykuł przedstawia porównanie wyników badań wybranych parametrów geotechnicznych wałów przeciwpowodziowych, przed oraz po zabudowie przesłon hydroizolacyjnych.

Słowa kluczowe: bariery hydroizolacyjne, zabezpieczenia przeciwpowodziowe

Abstract: For several years in Poland are intensively repairs and construction of hydro-technical objects, including flood protection. An important element of the works are hydroinsulation barrier. Depending on local conditions, the barrier are made in different technologies and to various depths. The basic expectations for waterproofing barriers, can be determined as follows:

- high insulating properties,
- long-term functionality,
- resistance to hydrostatic pressure,
- resistance to deformation,
- high resistance to corrosion caused,
- no impact on the environment.

These requirements carry out of waterproofing barrier made using binders based on modified clays (PRGW technology).

The article show the results of a comparison of selected geotechnical parameters, before and after the construction of waterproofing barriers.

Keywords : hydroisulation barrier, flood protection

Wstęp

Doświadczenia ubiegłych lat, a w szczególności doświadczenia związane z powodzią lat 1997 oraz 2010 uwiadamiają w sposób jednoznaczny konieczność podjęcia na dużą skalę inwestycji zmierzających do poprawy jakości zabezpieczeń przeciwpowodziowych w Polsce. Sytuacja ta jest związana z problemami w finansowaniu utrzymania infrastruktury oraz uszkodzeniami nadmierną eksploatacją w trakcie przejścia fal powodziowych w roku 2010.

Powszechnie projektowanym i stosowanym elementem napraw i remontów obwałowań są przesłony hydroizolacyjne. Ich konstrukcja i technologia wykonania jest optymalizowana dla

potrzeb rozwiązania konkretnych problemów hydrotechnicznych. Najczęściej projektowanym rozwiązaniem konstrukcyjnym przesłon hydroizolacyjnych są przesłony dogłębione do naturalnej nieprzepuszczalnej warstwy gruntów, tworzące zupełne zamknięcie drogi filtracji wód gruntowych pomiędzy strefą międzywał a zawalą oraz zawieszane, wydłużające drogę filtracji filtracji pod obwałowaniem. Ze względu na lokalizację przesłon najczęściej spotykanymi rozwiązaniami w Polsce są przesłony wykonywane z korony wału i zabudowywane w korpusie wału i/lub w jego podłożu oraz przesłony zabudowywane u podstawy wału od strony odwodnej. Konstrukcje przesłon zabudowanych u podstawy wału, w zależności od potrzeb mogą być uzupełniane doszczelnieniem skarpy bentomata, dowiązaną u podstawy do przesłony. Wszystkie te zabiegi modernizacyjne modyfikują sposób funkcjonowania obwałowania w trakcie przejścia fali powodziowej, zmieniają układ filtracji wód przez obwałowania oraz podłoże i zmieniają układ naprężeń wewnątrz korpusu wału.

1. Wymagania stawiane spoiwom hydroizolacyjnym

Proces zastosowania spoiw iłowo-cementowych obejmuje trzy etapy, w których spoiwo powinno charakteryzować się odmiennymi własnościami, pozwalającymi na:

- aplikację spoiwa do gruntu,
- twardnienie spoiwa w gruncie,
- wieloletnie funkcjonowanie w formie przesłony hydroizolacyjnej.

Podstawowym składnikiem spoiw są naturalne iły występujące w złożach, które w procesie przygotowania są doprowadzane do roztworu wodnego raz odpowiednio modyfikowane. Głównymi parametrami jakimi powinny się one charakteryzować są: udział frakcji ziaren $<5\mu\text{m}$ na poziomie powyżej 60% oraz dominujący udział minerałów z grupy kaolinitu przy możliwie jak najmniejszym udziale minerałów z grupy montmorylonitu. Skład granulometryczny jest podstawowym parametrem surowca, który gwarantuje, na drodze modyfikacji, uzyskanie udziału najdrobniejszej frakcji ziaren gotowego spoiwa na poziomie powyżej 80%. Jest to wskaźnik uziarnienia nieosiągalny dla większości roztworów cementowych, przez co przydatność spoiwa na bazie modyfikowanych glin do zastosowania szczególnie w technologii iniekcji niskociśnieniowej znacznie przewyższa spoiwa cementowe [2]. Dzięki swym parametrom spoiwo na bazie modyfikowanych glin uzyskuje wysoką zdolność penetracji gruntów i skał w czasie prac geoinżynierskich, poprawiając ich parametry geotechniczne oraz szczelność.

1.1 Własności spoiw w stanie płynnym

Przygotowanie spoiwa polega na: 1) przeprowadzeniu iłu lub gliny do stanu roztworu wodnego, 2) usunięciu grubszej frakcji ziaren oraz 3) dodaniu określonych reagentów chemicznych. Reagenty dodawane są w celu optymalizacji własności tiksotropowych i reologicznych oraz stymulacji procesu twardnienia spoiwa. Udział poszczególnych reagentów zależy od oczekiwanych własności wytrzymałościowych i dostosowane jest do oczekiwań projektowych. Ogólnie można przyjąć, że spoiwo w stanie roztworu koloidalnego powinno charakteryzować się następującymi podstawowymi parametrami [1]:

gęstość objętościowa	$\gamma = 1180-1350 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
rozlewność	$R = 8-20 \text{ [cm]}$
statyczne naprężenie ścinające	$\Theta = 20-160 \text{ [Pa]}$
odstój dobowy	$O_d = 0 \text{ [%]}$

1.2 Własności zestalonych spoiw

Spoiwa iłowo-cementowe spełniają wymagania stawiane samotwardniejących spoiw w środowisku wodno-gruntowym. Proces wiązania (hydratacji i rekrytalizacji minerałów ilastych)

stymulowany jest przez odpowiednie reagenty chemiczne, oraz opcjonalnie uboczne produkty spalania, gdzie wykorzystywane są ich własności pucolanowe. Udział określonych reagentów decyduje o czasie po jakim roztwór nabiera własności ciała stałego. Możliwość kontroli tego procesu jest szczególnie istotna w przypadku wykonywania przesłony w warunkach saturacji przy dużym gradiencie hydraulicznym wymuszającym intensywną filtrację wód w rejonie wykonywania przesłony.

Poniżej zestawiono podstawowe własności zestalonego spoiwa [4]:

- duża odporność zestalonego spoiwa na rozmakanie,
- spoiwo nie wykazuje skurczu w czasie twardnienia,
- współczynnik filtracji $k < 10^{-8}$ m/s,
- wartość wskaźnika nośności CBRd > 20% ,
- max. naprężenia ścinające (badane aparatem bezpośredniego ścinania)
~105 kPa (przy naprężeniach pionowych 25kPa)
~135 kPa (przy naprężeniach pionowych 50kPa)
~190 kPa (przy naprężeniach pionowych 100kPa)
- wytrzymałość na zginanie > 400 kPa,
- wytrzymałość na ściskanie > 500 kPa (po przekroczeniu granicznej wytrzymałości próbka odkształca się plastycznie, zachowując szczelność),
- brak podatności na działanie niskich temperatur (zgodnie z procedurą Transport and Road Research Lab. TRRL – UK),
- kąt tarcia wewnętrznego > 40 st.

2. Wybrane cechy wałów przeciwpowodziowych zmodyfikowanych poprzez zabudowę przesłon hydroizolacyjnych

W zależności od rodzaju stosowanego spoiwa, sposobu i technologii wykonania przesłony jak i konstrukcji samej przesłony zmienia się struktura wewnętrzna budowli, a własności geotechniczne spoiw przekładają się na zmiany własności geotechnicznych budowli. Ze względu na charakter budowli jakimi są wały przeciwpowodziowe, najważniejszymi są: wodoprzepuszczalność oraz 2) parametry geotechniczne, decydujące o przenoszeniu obciążeń przez wał zarówno w czasie wezbrania jak i opadania fali powodziowej.

2.1 Wodoprzepuszczalność

Podstawowym celem projektowania i wykonywania robót uszczelniających jest ograniczenie filtracji wód w podłożu lub w korpusie obiektu. W zależności od rodzaju i konstrukcji obiektu hydrotechnicznego, jego przeznaczeniu (np. obiekt stale piętrzący wodę lub przeciwpowodziowy) wymagane są zróżnicowane parametry techniczne zabezpieczenia przeciwfiltracyjnego. Podstawową formą zabezpieczeń przeciwfiltracyjnych są pionowe przesłony hydroizolacyjne. W zależności od przeznaczenia wykonywane są jako przesłony dogłębione do naturalnej warstwy nieprzepuszczalnej (zupełne) lub zawieszone (niezupełne), wydłużające drogę filtracji wód podziemnych.

Kluczowe znaczenie w poprawie szczelności gruntu jest stopień wysycenia spoiwem hydroizolacyjnym. W zależności od technologii wykonania przesłony osiągane jest zróżnicowane wysycenie gruntu spoiwem, począwszy od 100% wysycenia (np. szczelina kopana) do kilkuprocentowego. Poniżej przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych zmian współczynnika filtracji wraz z zmianami udziału spoiwa wykonywanego na bazie modyfikowanych ilów (Clayfill).

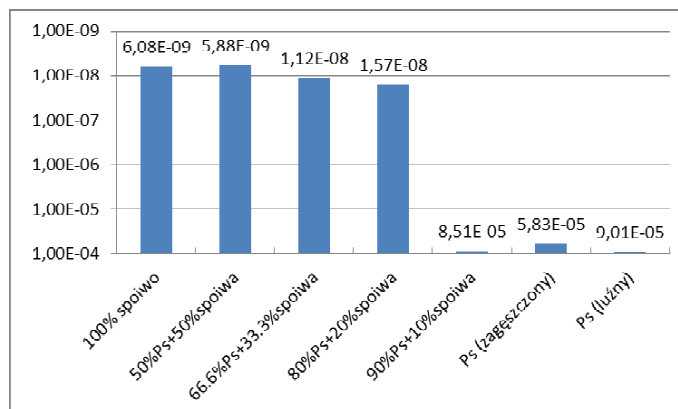


Fig.1 Porównanie zmian współczynnika filtracji (m/sec) w zależności od wysycenia gruntu spoiwem Clayfill. [4]

Uzyskane wyniki wskazują, iż mieszanina piasku średniego z 10% wag. dodatkiem spoiva nie wpływają znacząco na zmianę współczynnika filtracji. Okazuje się, iż zagęszczony piasek średni ma niższą wartość współczynnika filtracji niż mieszanina piasku średniego z 10% wag. dodatkiem spoiva. Wyraźną zmianę można zaobserwować dopiero przy ~20%wag. dodatku spoiva. Dalszy wzrost udziału spoiva w modyfikowanym gruncie nie powoduje już znacznego spadku współczynnika filtracji, z zatem można przyjąć, że jest to minimalny wymagany próg wysycenia spoiwem gruntu zapewniający osiągnięcie wymaganej szczelności modyfikowanego korpusu wału, gwarantujący optymalny wskaźnik kosztów zużycia materiału. Badania przeprowadzone dla piasku średniego potwierdzają się również dla innych rodzajów gruntów.

W tabeli 1 przedstawiono dla porównania wyniki badań polowych zmiany wartości współczynnika filtracji w miejscu zabudowy przesłony w różnych technologiach. W przypadku zabudowy przesłony wykonanej przy zastosowaniu spoiva na bazie modyfikowanych ilów należy spodziewać się obniżenia współczynnika filtracji o kilka rzędów.

Tab 1. Zmiany współczynnika filtracji k gruntu przed oraz po zabudowie przesłony - prawy wał rzeki Warty w Kostrzynie n Odrą [4].

typ przesłony	współczynnik filtracji k (badania polowe sondą GeoN) [m/sek]	
	grunt pierwotny	po zabudowie przesłony
DSM	1.60 e-05	4.03 e-08
WIPS	8.43 e-06	6.03 e-10
INI – iniekcja (w osi przesłony)	3.01 e-06	7.48 e-10

W zależności od konstrukcji i geometrii przesłony parametry filtracyjne przekładają się na jej cechy funkcjonalne. Poniżej przedstawiono symulację filtracji przez wał w trakcie wezbrania fali powodziowej dla 2 wariantów zabudowy przesłony: dogłębionej i zawieszanej.

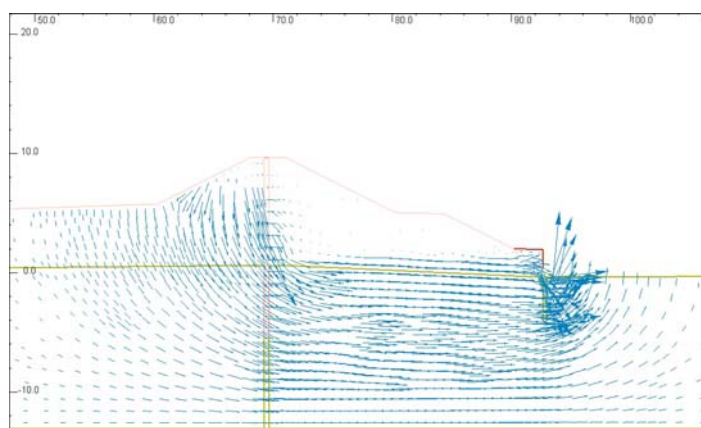


Fig. 2 Przykład rozkładu pola filtracji dla przesłony zupełnej. Wał przeciwpowodziowy ujęcia wód Miasta Stołecznego Warszawy. Skala wektora prędkości 1:1000 [5].

Zabudowa przesłony do warstwy nieprzepuszczalnej istotnie stabilizuje zjawisko filtracji w wale. Prędkości filtracji w przekroju wałowym są kilkudziesięciokrotnie mniejsze niż w przypadku przesłon zawieszonych [Fig. 3].

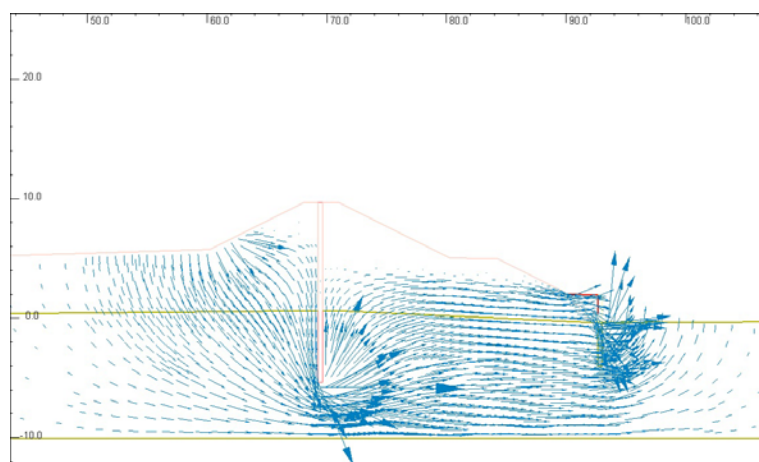


Fig. 3 Przykład rozkładu pola filtracji dla przesłony niezupełnej. Wał przeciwpowodziowy ujęcia wód Miasta Stołecznego Warszawy. Skala wektora prędkości 1:10 [5].

W przypadku przesłon zawieszonych w miejscach skokowej zmiany współczynnika filtracji (spąg przesłony) w trakcie wezbrania fali powodziowej występują strefy silnego wzrostu filtracji wód, co może determinować powstawanie zjawisk sufozyjnych. Konstrukcja przesłony dowiązanej ma jednak też wady, wynikające z utrudnionego powrotu wód gruntowych do strefy koryta po przejściu fali powodziowej oraz utrudnia wymianę wód gruntowych pomiędzy korytem rzeki a terenami przyległymi. Ponadto należy zauważyć, że przesłony zupełne, w trakcie przejścia fali powodziowej wywołują znaczne różnice ciśnień porowych po stronie odwodnej i odpowietrznej co może negatywnie wpływać na stateczność wału.

2.2 Zmiany parametrów mechanicznych

Jednym z parametreów jaki ulega zmianie w wyniku modyfikacji pierwotnego gruntu spoiwem jest gęstość. Jest to naturalny wyznacznik wysycenia gruntu spoiwem. Gęstość zmodyfikowanego gruntu zależy od gęstości pierwotnego materiału, stopnia wysycenia spoiwem, zależnego od porowatości efektywnej modyfikowanego gruntu oraz gęstości samego spoiwa. Poniżej przedstawiono przykładowe wartości gęstości objętościowej gruntów przed i po modyfikacji spoiwem.

Tab.2. Zmiany gęstości objętościowej gruntu przed oraz po zabudowie przesłony - prawy wał rzeki Warty w Kostrzynie n Odrą [4].

Typ przesłony	Gęstość objętościowa [t/m ³]	
	grunt pierwotny	po zabudowie przesłony
DSM	1.65	2.05
WIPS	1.65	1.98
INI - iniekcja	1.70	1.90

Znaczna ingerencja robót inżynierskich związana z wykonaniem przesłon może powodować również zmiany w strukturze gruntu w strefie otaczającej przesłonę. Jednak w praktyce zasięg tej modyfikacji jest niewielki i nie przekracza strefy kilkunastu centymetrów od przesłony. Jedynie w przypadku technologii iniekcyjnej może dojść do kompaktacji gruntu w większym zakresie jednak zasięg kompaktacji jest uzależniony od stanu pierwotnego gruntu, lokalnych zjawisk sufozyjnych oraz od ciśnienia roboczego iniekcji. Ciśnienie robocze iniekcji w praktyce projektowane jest głównie pod kątem optymalizacji wysycenia gruntu i zasięgu migracji spoiwa a nie w celu

uzyskania kompaktacji i dogęszczenia gruntu, co jest efektem dodatkowym. Należy zatem przyjąć, że jest to efekt dodatkowy, stawiający założenia projektowe po bezpiecznej stronie.

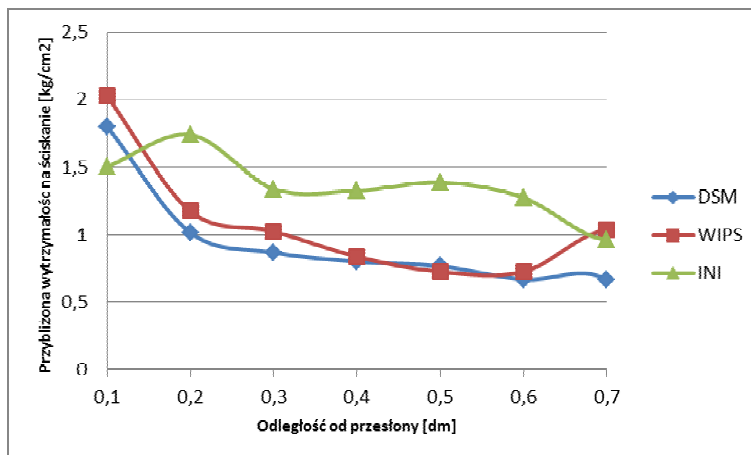


Fig. 4 Średnie zmiany zagęszczenia gruntu w funkcji odległości od zabudowanej przesłony - prawy wał rzeki Warty w Kostrzynie n Odrą [4].

Dodatkową, ale równie ważną funkcją jaką pełnią przesłony przeciwfiltracyjne w podłożu oraz korpusie wałów i zapór ziemnych jest poprawa ich stateczności. Jest to szczególnie istotne w przypadku obiektów ochrony przeciwpowodziowej, w ostatnich latach szczególnie narażonych na wezbrania rzek przekraczających ich maksymalne parametry, dla których zostały zaprojektowane.

W ramach projektów badawczych PRGW podejmowanych przy współpracy z zewnętrznymi ośrodkami badawczymi jako wskaźnika pozwalającego na ocenę stanu gruntu w korpusie wału z zabudową przesłoną użyto wskaźnika nośności CBRd. Badania przeprowadzono na próbkach laboratoryjnych przygotowanych dla porównania wyników na wyselekcjonowanych grupach gruntu (piasek średni). Badano dwie grupy próbek: dojrzewających w wodzie (symulujących dojrzewanie w warunkach saturacji) oraz suchych (symulujących dojrzewanie w warunkach aeracji).

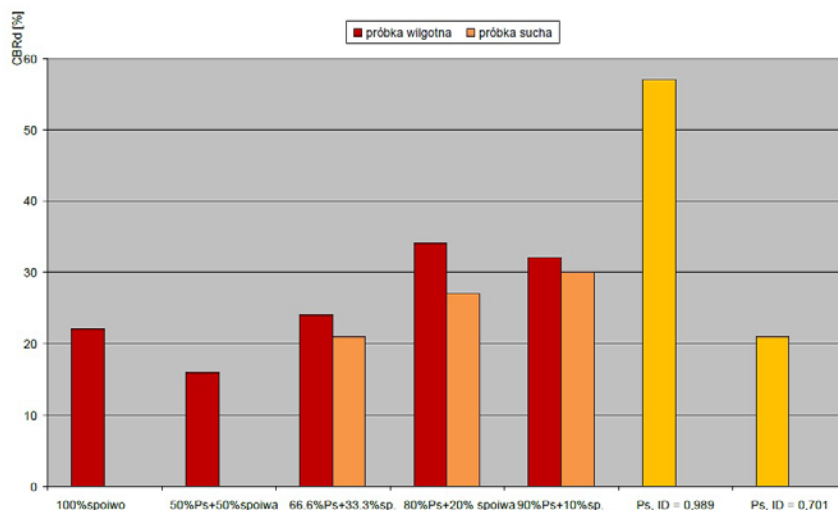


Fig. 5 Porównanie wartości wskaźnika nośności (CBRd) dla piasku średniego oraz mieszanin piasku średniego o różnym udziale wagowym spoiwa.

Spośród przebadanych próbek tylko próbki o udziale spoiwa 10 i 20%wag. wykazały wskaźnik nośności CBRd powyżej 22% i to zarówno próbki dojrzewające w wodzie jak i w powietrzu. Jest wartość wskaźnika odpowiadający piaskom średnim w stanie zagęszczonym. Próbka o udziale spoiwa do gruntu w stosunku 1:2 zbliżyła się do tej granicy, natomiast próbki z większym udziałem spoiwa wykazywały niższe wartości CBRd.

Własności geotechniczne przesłon oraz gruntów zmodyfikowanych spoiwem przekładają się na stateczność całej budowli (wału). Poniżej przedstawiono wyniki badań stateczności wału, gdzie zabudowano pionową przesłonę przeciwfiltacyjną w technologii DSM. Parametryzacji modelu dokonano na podstawie rzeczywistych danych pochodzących z badań polowych oraz laboratoryjnych próbek pobranych z miejsca wykonywania robót. Dla porównania wykonano obliczenia dla stanu pierwotnego [Fig. 6] oraz po zabudowie przesłony [Fig. 7]. Wyniki obliczeń ujawniają wysoki wskaźnik stateczności ($SF > 1,7$) wału przed zabudową przesłony co wynika z jego konstrukcji oraz stanu gruntów budujących korpus. Po zabudowie przesłony wskaźnik ten wzrasta dwukrotnie ($SF > 2,6$). W wielu przypadkach samo zabudowanie dodatkowego elementu budowli, jakim jest przesłona, bez dodatkowych wzmocnień korpusu wału lub zapory, istotnie poprawia stateczność obiektu.

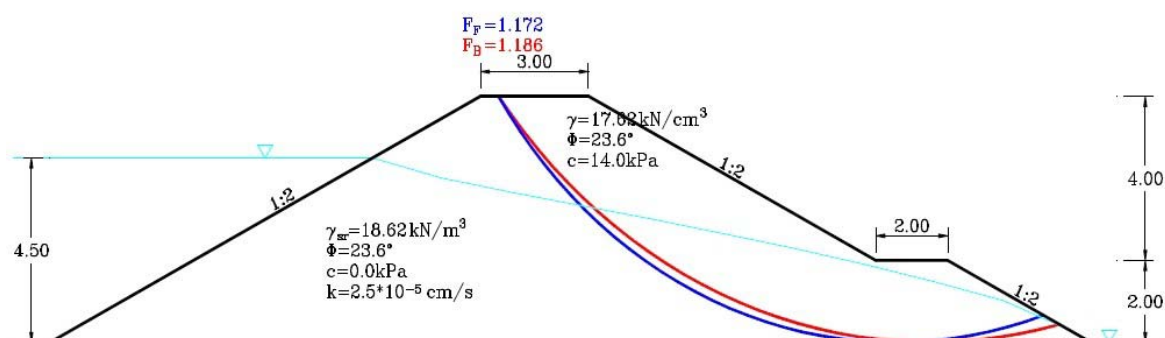


Fig. 6 Przykładowa analiza stateczności wału rzeki Wisły w Samocicach. Kołowe krzywe poślizgu o najmniejszych współczynnikach stateczności wyznaczonych metodą szwedzką (Felleniusa) FF i Metodą Bishopa FB. Stan przed zabudową przesłony hydroizolacyjnej [4].

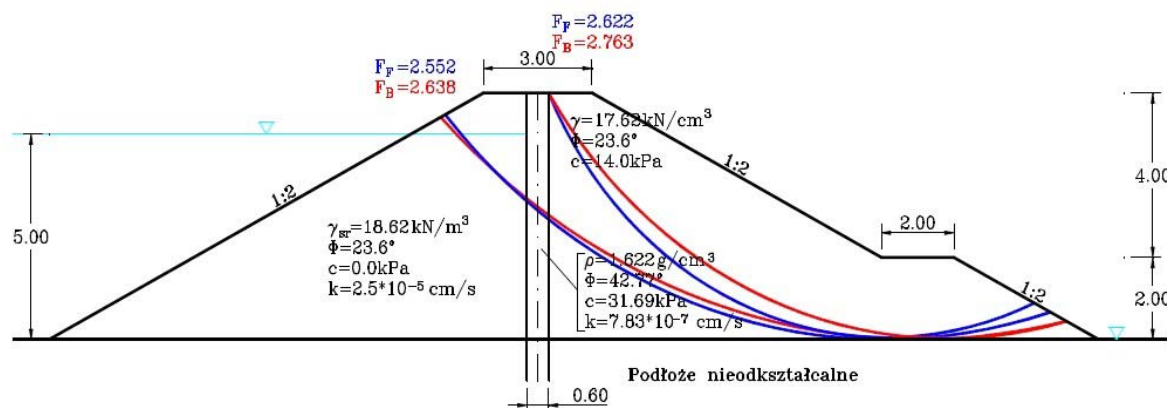


Fig. 7 Przykładowa analiza stateczności wału rzeki Wisły w Samocicach po wprowadzeniu przesłony hydroizolacyjnej (DSM, spoiwo CLAYFILL). Kołowe krzywe poślizgu o najmniejszych współczynnikach stateczności ($FF = 2,552$ i $FB = 2,638$) wyznaczone w przekroju z przesłoną hydroizolacyjną i po stronie odpowietrznej w obszarze poza przesłoną hydroizolacyjną ($FF = 2,622$ i $FB = 2,763$) [4].

Innym przykładem rozwiązań projektowych PRGW jest uszczelnienie wału przeciwpowodziowego ujęcia wód miasta Warszawy. W ramach inwestycji zaprojektowano i zabudowano przesłonę w korpusie wału oraz w mocno rozluźnionym sufozyjnie podłożu. Przesłona została zabudowana jako dogłębiona do naturalnie zalegającej warstwy izolującej w technologii iniekcji niskociśnieniowej. Na etapie projektowania wykonano symulacje filtracji i stateczności wału. Wyniki obliczeń ujawniły, że kiedy przepływ filtracyjny jest zablokowany przez przesłonę w całym interwale miąższości, po stronie odwodnej występują wyższe ciśnienia porowe w trakcie wezbrania. Po przejściu maksimum wezbrania, kiedy w gruncie skarpy odwodnej ujawnia się wysokie ciśnienie sphywowe wynikające z wysycenia gruntu wodą ponad poziomem wody

międzywała, może dojść do utraty stateczności tej skarpy. Może to skutkować, co przedstawia Fig. 8, utratą stateczności skarpy odwodnej (w omawianym przypadku wskaźnik stateczności wyniósł $SF=1,32$ co pozwala na zakwalifikowanie obiektu jako stabilny).

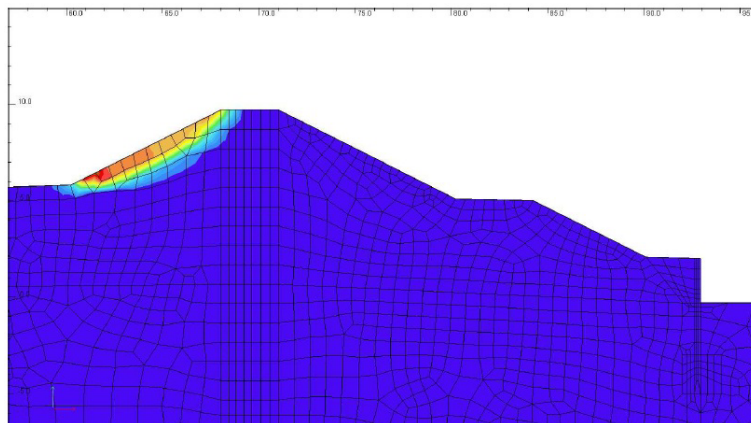


Fig. 8 Przykład utraty stabilności skarpy odwodnej w czasie przejścia maximum fali powodziowej w wariancie dogłębionej przeszłony wykonanej w technologii iniekcyjnej ($SF\ 1,32$. Max przemieszczenia $1,6e-2m$). Wał przeciwpowodziowy ujęcia wody Wodociągów miasta Warszawy przy ul Czerniakowskiej. [5]

Wnioski

- Zabudowa pionowych przesłon hydroizolacyjnych znacząco obniżają współczynnik filtracji wałów i stabilizują filtrację w trakcie wezbrań rzek.
- Zabudowa pionowych przesłon hydroizolacyjnych znacząco poprawiają stateczność wałów i skarp w trakcie wezbrań.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Aprobata Techniczna IMUZ nr AT/18-2007-0011-01 Roztwór hydroizolacyjny na bazie glin polimineralnych.
- [2] Kuś R. Popov A. [2000] - Ocena wpływu powierzchni jednostkowej fazy stałej w roztworach uszczelniających na ich właściwości migracyjne i przeciwfiltracyjne. „Stabilizacja masywów skalnych w podłożu budowli hydrotechnicznych” –materiały konferencyjne. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- [3] Kuś R., Kuś M. [2005] - [The Use of 'Polymineal Clays-Based Hydro-Insulating Solution' for Making Hydro-Insulating Screens in the DSM Technology](#); „DeepMixing '05”, The International Conference on Deep Mixing, Stockholm, May 23-25. 369-373.
- [4] PRGW G.Janik R.Kuś Sp. j [2008] – Zastosowanie ultradrobnych spoiw na bazie gliny do wykonywania przesłon hydrolizacyjnych; Projekt badawczy – SPO WKP Nr Projektu: WKP_1/1.4.1/1/2006/69/69/623/2006.
- [5] PRGW G.Janik R.Kuś Sp. j [2009] – Modernizacja wału wiślanego przeciwpowodziowego, przepustów przez wał i ścian wrót wałowych Stacji Pomp Rzecznych Zakładu Wodociągu Centralnego przy ul. Czerniakowskiej 124 w Warszawie - ETAP I
- [6] Wysokiński L. [red.] [2007] – Zasady oceny przydatności gruntów spoistych Polski do budowy mineralnych barier izolacyjnych; Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.