

**Paweł FALACIŃSKI<sup>1</sup>, Kazimierz GARBULEWSKI<sup>2</sup>,  
Zbigniew KLEDYŃSKI<sup>1</sup>, Zdzisław SKUTNIK<sup>2</sup>, Katarzyna ZIARKOWSKA<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego, Politechnika Warszawska  
Institute of Water Supply and Hydraulic Engineering, Warsaw University of Technology

<sup>2</sup>Katedra Geoinżynierii SGGW  
Department of Geotechnical Engineering WAU

<sup>3</sup>WARTUR Sp. z o.o., Warszawa  
WARTUR Ltd., Warsaw

## **Badania barier hydraulicznych z zawiesin cementowo-bentonitowych z dodatkiem popiołów fluidalnych Fluidised fly-ash cement-bentonite cut-off walls in flood protection**

**Słowa kluczowe:** bariera hydrauliczna, popioły fluidalne, badania kontrolne

**Key words:** cut-off wall, fluidised fly-ashes, control tests

### **Wprowadzenie**

Zawiesiny twarde, stosowane w budowie barier hydraulicznych, są najczęściej mieszaninami spoiwa cementowego, bentonitu i wody, co przy właściwych proporcjach składników pozwala uzyskać wymagane właściwości zarówno zawiesiny płynnej, jak i stwardniałej. Oprócz wymienionych składników do zawiesin dodaje się także: dodatkowe spoiwo, wypełniacze mineralne, domieszki chemiczne, które poprawiają właściwości tworzywa i ułatwiają osiągnięcie zakładanych parametrów. Dodatkiem do zawiesin

twardniejących mogą być odpady paleniskowe, przede wszystkim popioły lotne. Materiały te mają charakter mineralny i wykazują właściwości wiążące. Mogą więc pełnić nie tylko rolę wypełniacza, ale także dodatkowego spoiwa. Znane są korzystne właściwości antykorozyjne dodatku popiołów do zawiesin twardniejących (Kledyński 2004). Ma to szczególne znaczenie, gdy bariery hydrauliczne służą do izolacji wód podziemnych od źródeł zanieczyszczenia.

Energetyka w Polsce, bazując na spalaniu węgla, jest zmuszona do poszukiwania bezpiecznych dla środowiska technologii spalania, oczyszczania spalin oraz zagospodarowania odpadów paleniskowych. Jedną z takich nowoczesnych technologii jest spalanie fluidalne. Odpady ze spalania fluidalnego różnią się od odpadów z kotłów kon-

wencjonalnych (Jarema-Suchorowska 2002), a cechami wyróżniającymi produkty spalania fluidalnego, w porównaniu do popiołów i żużli z palenisk tradycyjnych, są:

- zwiększona zawartość związków wapnia, oznaczanych jako CaO, wynosząca dla popiołów ze spalania węgla kamiennego od kilku do prawie 30%, w tym wolny tlenek wapnia stanowi kilka procent,
- zwiększona ilość związków siarki, w postaci siarczanów, stanowiących kilkanaście procent masy; czasami towarzyszą im niewielkie ilości siarczynów,
- zwiększona wartość zmiany masy przy prażeniu, wynosząca od kilku do prawie 30%, wywołana obecnością węgla i nadmiaru sorbentu,
- odpowiednio mniejsza zawartość pozostałych składników charakterystycznych dla składu chemicznego popiołów i żużli ze spalania węgla kamiennego, niższe stężenie naturalnych pierwiastków promieniotwórczych,
- odmienna budowa krystalograficzna – brak spieków i faz szklistych,
- mniejsza gęstość nasypowa i rozbudowana powierzchnia właściwa popiołu lotnego.

Wzrost ilości odpadów ze spalania fluidalnego wymusza podejmowanie badań pod kątem wykorzystania ich w technologii materiałów budowlanych i geotechnice. Trudności związane z aplikacją surowych popiołów fluidalnych zmusiły do poszukiwania sposobu ich uzdatniania. Jednym ze sposobów przetwarzania lotnych popiołów fluidalnych jest aktywacja mechaniczna metodą EMDC (Patent nr 180380), bez

żadnych domieszek chemicznych. Aktywacja tą metodą powoduje zmiany fizyczne ziaren popiołu, co zapobiega np. niszczeniu struktury betonu wykonanego z dodatkiem popiołu fluidalnego i tym samym stwarza możliwość gospodarczego wykorzystania tego odpadu. Lotny popiół fluidalny aktywowany metodą EMDC nosi nazwę handlową Flubet<sup>®</sup>. Jedną z przyczyn podjęcia badań nad wykorzystaniem Flubetu<sup>®</sup> w geotechnice i hydrotechnice jest rosnące zapotrzebowanie na zawiesziny twardniejące, wykorzystywane do tworzenia barier hydraulicznych przy modernizacji i remontach wałów przeciwpowodziowych, a także w obiektach ochrony środowiska (uszczelnienia składowisk odpadów).

W artykule przedstawiono realizację próbnego odcinka pionowej bariery hydraulicznej w podłożu modernizowanego wału przeciwpowodziowego i wyniki badań kontrolnych wykorzystanej zawiesziny twardniejącej z dodatkiem aktywowanych popiołów fluidalnych z węgla kamiennego.

### **Wymagania i badania kontrolne barier hydraulicznych**

W zasadzie nie ma powszechnie obowiązujących wymagań co do zakresu i rodzaju badań kontrolnych barier pionowych, co wynika między innymi z ciągłego rozwoju tej technologii i wprowadzaniu do praktyki ciągle nowych materiałów (Evans 1993, Sharma i Lewis 1994, Daniel i Koerner 1995, Evans i Dawson 1999). Jednakże w celu udokumentowania, że bariera została wykonana zgodnie z projektem i będzie

konstrukcją skutecznie przeciwdziałającą rozprzestrzenianiu poziomemu zanieczyszczeń w środowisku gruntowo-wodnym, zarówno inwestor, jak i wykonawca są zobowiązani do kontrolowania barier pionowych. W zakres badań kontrolnych wchodzi najczęściej parametry geometryczne wykopu wąskoprzestrzennego (szczeliny), takie jak głębokość, szerokość i pionowość, oraz właściwości zawiesiny, zwykle grunto-bentonitowej (GB) lub cementowo-bentonitowej (CB). Bariery z zawiesiną GB, bardziej rozpowszechnione w USA niż w UE, wykonywane są przy zastosowaniu technologii dwufazowej. W pierwszej fazie wykonywany jest wykop wąskoprzestrzenny szerokości 0,5–1,5 m, którego pionowe ściany są stateczne w wyniku działania parcia zawiesiny składającej się głównie z bentonitu (ok. 5%) i wody (ok. 95%), której gęstość według zaleceń TC 8 (Specification for construction... 1999) nie powinna być większa niż  $1,3 \text{ Mg/m}^3$ . Po wykonaniu wykopu o wymaganej głębokości najczęściej dno wykopu jest zagłębione od 1,0 do 1,5 m w warstwę słabo przepuszczalnego gruntu, zawiesina jest wypierana przez znacznie cięższą zawiesinę GB; wymagana minimalna gęstość zawiesiny po stwardnieniu wynosi  $1,8 \text{ Mg/m}^3$ . Bariery pionowe z zawiesiną CB (ok. 80% wody i 20% cementu portlandzkiego z dodatkami żużłowymi) wykonywane są jako jednofazowe. W tej technologii zawiesina powinna charakteryzować się takimi właściwościami, aby można było wykonać wykop o statecznych pionowych ścianach i później, po stwardnieniu, aby można było ją uznać za przesłone filtracyjną. Przykładowy skład  $1 \text{ m}^3$

zawiesiny CB jest następujący: bentonit sodowy lub uzdatniony wapienny – 35 kg, cement portlandzki – 30 kg, żużel lub granulowany popiół – 120 kg, woda – 9341 kg (Barker i in. 1997).

Wykop wąskoprzestrzenny powinien być wykonywany bez przerw za pomocą sprzętu umożliwiającego osiągnięcie projektowanej głębokości; do głębokości 15–20 m zwykle wystarczy koparka podsiębierna, głębiej lub w niekorzystnych warunkach gruntowych koparka chwyதாகowa, koparka włókowa i ładowarka są konieczne. Szerokość wykopu nie może być mniejsza od wyszczególnionej w projekcie, zwykle minimalna szerokość wynosi 600 mm, jednakże dla barier o większych niż 10 m głębokościach szerokość szczeliny zależy od zastosowanego sprzętu i może wynosić 750 mm lub więcej. Wykop powinien być wykonany w planie z dokładnością  $\pm 150 \text{ mm}$  kontrolowaną pomiarami geodezyjnymi w osi wykopu. Wykop powinien być zasadniczo pionowy; dopuszcza się odchylenie płaszczyzny w osi wykopu do 1 : 60. W czasie wykonywania wykopu wydobywane grunty powinny być kontrolowane (głębokość, miąższość warstwy, rodzaj i makroskopowo określone właściwości) w celu sprawdzenia zgodności z warunkami przyjętymi w projekcie. Inżynier nadzorujący wykonywanie wykopu powinien zwracać szczególną uwagę na stateczność ścian i objętość zawiesiny w wykopie. W przypadku stwierdzenia osuwisk ścian wykopu wąskoprzestrzennego i nagłej niekontrolowanej „ucieczki” zawiesiny w podłoże należy natychmiast podjąć środki zabezpieczające. Szczególnie niebezpieczny wpływ na

stateczność ścian wykopu ma woda gruntowa, której poziom powinien być na głębokości większej co najmniej o 1,5 m od położenia powierzchni bariery. W przypadku zbyt wysokiego położenia zwierciadła wody gruntowej lub jego napiętego charakteru konieczne jest wykonanie systemu drenażowego. Na stateczność ścian wykopu może również wpływać gaz wydostający się ze składowisk odpadów lub występujący w złożach materiałów organicznych (torfy, gytie, namuły itp.). W przypadku gruntów organicznych innym również niebezpiecznym czynnikiem jest kwaśny odczyn środowiska wodnego, co może mieć negatywny wpływ na jakość zawiesiny CB; należy wówczas kontrolować wartość pH i ocenić agresywność wody w stosunku do zawiesiny.

Zawiesiny GB i CB to substancje żelowe, które mogą na skutek różnicy ciśnień wnikać w grunty, zwłaszcza dobrze przepuszczalne, znajdujące się w ścianach wykopu. Głębokość wnicania zawiesin można określić, korzystając z równania (Evans i Dawson 1999):

$$L = 0,15 DP/\tau \quad (1)$$

gdzie:

$L$  – głębokość wnicania zawiesiny,

$D$  – efektywna średnica cząstek gruntu,

$P$  – nadwyżka ciśnienia hydrostatycznego zawiesiny,

$\tau$  – wytrzymałość żelowa zawiesiny.

Jeżeli wytrzymałość żelowa zawiesiny wynosi 10 Pa, to może ona wnikać w grunt o średnicy efektywnej cząstek 10 mm na głębokość 1,5 m na każdy jeden metr różnicy ciśnień zawiesiny i wody gruntowej.

## Realizacja i badania próbnego odcinka bariery hydraulicznej

Wymagania wobec zawiesiny twardniejącej podane w projekcie modernizacji wału przeciwpowodziowego były następujące:

- wytrzymałość na ścislenie jednokierunkowe po 28 dniach dojrzewania – nie mniej niż 0,3 MPa,
- przepuszczalność hydrauliczna po 28 dniach dojrzewania – nie więcej niż  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s,
- gęstość płynnej zawiesiny – nie mniej niż 1,12 g/cm<sup>3</sup>.

Na podstawie badań laboratoryjnych zaprojektowano zawiesinę o następującym składzie: woda – 1000 kg, bentonit Zębica – 40 kg, Flubet<sup>®</sup> – 260 kg, cement CEM I 32,5 – 140 kg, i właściwościach pokazanych w tabeli 1.

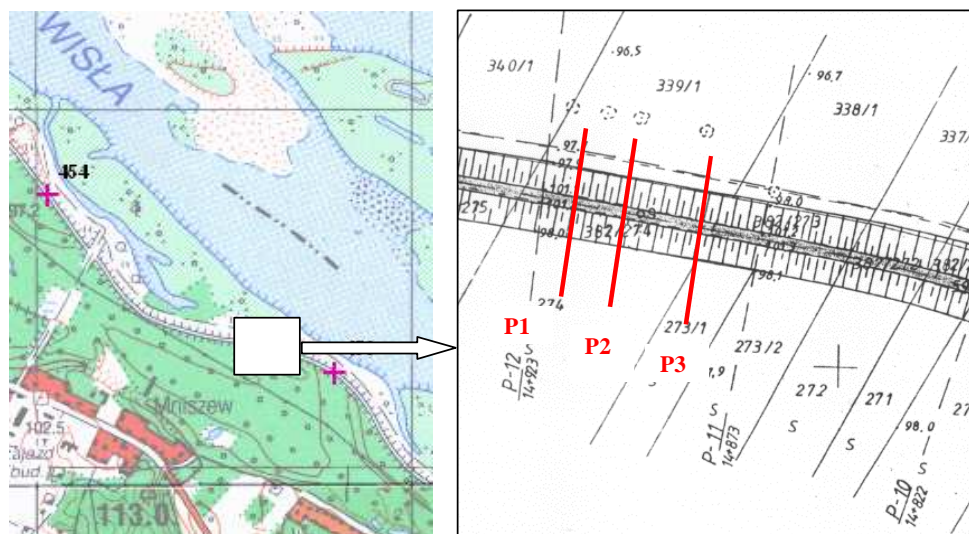
Lokalizację doświadczalnego odcinka bariery pokazano na rysunku 1. Umieszczenie odcinka próbnego wynikało z aktualnego postępu robót przy realizacji kilkukilometrowego fragmentu uszczelnienia podłoża lewobrzeżnego wału przeciwpowodziowego rzeki Wiśły. Odcinek doświadczalny wypadł w miejscu niezwykle trudnym dla próbnej aplikacji, ponieważ był położony w bezpośrednim sąsiedztwie rzeki, w miejscu gdzie brzeg i wypukły na tym odcinku wał przeciwpowodziowy (rys. 2) zbliżają się do siebie na zaledwie kilkadziesiąt metrów. Bariera była więc głębiona w trudnych warunkach gruntowo-wodnych, przy intensywnym oddziaływaniu wód podziemnych.

Lokalizacja odcinka wypadła w odległości około 400 metrów od stacji wytwarzania zawiesiny, co wobec

TABELA 1. Parametry zawiesiny twardniejącej, z dodatkiem aktywowanego lotnego popiołu flu-  
idalnego z węgla kamiennego

TABLE 1. Parameters of hardening slurry with admixture of activated volatile fluid ashes from hard coal

Parametr Parameter	Wartość Value	
Gęstość zawiesiny płynnej Density of fluid slurry	$\rho_c$	1,28 g/cm <sup>3</sup>
Lepkość umowna Viscosity	$L$	39 s
Odstój dobowy wody 24h water settling	od	4,0%
Gęstość zawiesiny płynnej Density of hardened slurry	$\rho_c$	1,21 g/cm <sup>3</sup>
Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe Unconfined compression strength	$R_c$	po 14 dniach after 14 days 1,51 MPa
Przepuszczalność hydrauliczna Permeability	$k_{10}$	$7,23 \cdot 10^{-9}$ m/s



RYSUNEK 1. Lokalizacja odcinka doświadczalnego bariery

FIGURE 1. Location of the experimental section of the cut-off wall



RYSUNEK 2. Widok odcinka doświadczalnego bariery  
FIGURE 2. The view of the experimental section of barrier

zastosowania do jej przetłaczania rurociągów parcianych o średnicy 75 mm i bez pompy pośredniej stanowiło istotne utrudnienie i ograniczenie lepkości tworzywa możliwego do zastosowania. Wytwarzanie zawiesiny polegało na napełnieniu kontenera wodą w ilości  $20 \text{ m}^3$ , jej przepompowywaniu w układzie obiegowym i stopniowym dodawaniu stałych składników przez lej zasypowy umieszczony na odcinku tłocznym rurociągu obiegowego. Oprócz mieszania wywołanego pracą pompy, w kontenerze pracowały dwa mieszadła o osiach pionowych, obracające się z prędkością stu kilkudziesięciu obrotów na minutę. Bentonit dozowano wagowo (workowany), cement, Flubet<sup>®</sup> i wodę – objętościowo. Dozowanie było najsłabszym elementem wytwarzania, a jego poprawność była w znacznej mierze uwarunkowana doświadczeniem obsługi i wyczuciem nadzoru technologicznego. Najpierw dozowano bentonit,

przy czym czas namakania bentonitu był różny (od kilku do kilkunastu godzin). Powodowało to, że lepkość zawiesiny bentonitowej w momencie rozpoczęcia dozowania cementu była za każdym razem różna. Nie chcąc doprowadzić do kłopotów z przepompowaniem zawiesiny do wykopu, ograniczono ilość cementu i popiołu tak, aby maksymalna lepkość nie była nadmierna (starano się nie przekroczyć lepkości umownej 60–70 s). Dwukrotnie, z powodu nadmiernej lepkości zawiesiny bentonitowej, trzeba było redukować ilość bentonitu w zawieszynie, dodając do niej wodę.

W kolejnych dniach realizacji próbnego odcinka bariery wyprodukowano odpowiednio: 2, 3 i 3 zaroby zawiesiny o objętości dwudziestukilku metrów sześciennych każdy, wykonując łącznie około 55-metrowy doświadczalny odcinek bariery. W trakcie wytwarzania kolejnych zarobów wykonywano kon-

trolne pomiary lepkości umownej i gęstości zawiesiny, korygując dozowanie składników w zależności od uzyskiwanych wyników pomiarów. Za wyjątkiem pierwszego odcinka bariery, gdzie świadomie ograniczono dozowanie popiołu mniej więcej o 75 kg/1000 kg wody, w pozostałych przypadkach dozowanie cementu i popiołu zrealizowano z dokładnością do 10% wartości projektowanych. Po zakończeniu mieszania i uznaniu, że parametry tworzywa są właściwe, rozpoczynano głębienie wykopu i jednocześnie przepompowywanie zawiesiny.

Wykop głębiono koparką podsiębierną, na pełną projektowaną głębokość. Wynosiła ona około 6,15 m od powierzchni terenu, przy czym dążono do tego, aby górny poziom zawiesiny po stwardnieniu ustalał się około 1,15 m poniżej powierzchni gruntu, co wynikało z projektu łączenia bariery z bentomatą na skarpie odwodnej wału. Tym samym konstrukcyjna, ostateczna głębokość bariery powinna wynosić około 5 m. Szerokość czepaka koparki wynosiła 34 cm. W czasie głębienia wykopu jego głębokość była systematycznie kontrolowana sondą ciężarkową. Po zakończeniu dnia pracy napełniano wykop zawiesiną z pewnym naddatkiem względem projektowanego poziomu górnej powierzchni bariery, ponieważ zawiesina do momentu stężenia infiltrowała w otaczający grunt i jej poziom w wykopie spadał. Nie zaobserwowano znaczącego wydzielania wody z zawiesiny na jej powierzchni. Zawiesina ulegała silnemu zapiaszczeniu, do około 25% (wagowo). Analiza sitowa gruntu pobranego z wykopu wykazała, że wykop głębiono w silnie nawodnionych

piaskach średnich z przewarstwieniem gliny (mada). Niezależnie od operacyjnych badań parametrów zawiesiny płynnej, po ustaleniu składu zarobu formowano z niej próbki do późniejszych badań laboratoryjnych. Próbki formowano z zawiesiny pobieranej w punkcie jej wytwarzania oraz z wykopu, w trakcie jego głębienia. Te ostatnie próbki identyfikowano według przekrojów i głębokości pobrania. Sposób realizacji odcinka upoważnia do wyodrębnienia na jego długości trzech mniejszych fragmentów, wykonanych w kolejnych dniach, ponieważ w czasie zmiany roboczej zaroby w wykopie w znacznej mierze mieszały się ze sobą. W przerwie nocnej zawiesina tężała i jej mieszanie się z zawiesiną wbudowywaną następnego dnia było niemożliwe.

### **Badania w czasie budowy**

Podczas przygotowywania zawiesiny kontrolowano jej lepkość i gęstość. Gdy parametry te osiągały zakładane wartości, pobierano próbki zawiesiny (w wytwórni) do dalszych badań laboratoryjnych. Na próbkach uformowanych na budowie i przewiezionych do laboratorium, po 28 dniach ich dojrzewania w wodzie, wykonano badania gęstości, wytrzymałości na ścislenie i współczynnika filtracji. Współczynnik filtracji badano przy zmiennym, rosnącym skokowo początkowym spadku hydraulicznym (od 5 do 45), przyjmując za wartość miarodajną współczynnik kierunkowy prostej aproksymowanej w układzie: początkowy spadek hydrauliczny – prędkość filtracji. Wszystkie oznaczane parametry i właściwości

uśredniono dla trzech fragmentów (pododcinków) odcinka próbnego, realizowanych w kolejnych dniach robót, co wynikało z mieszania się (uśredniania) zarobów zawiesiny wbudowywanych w barierę w ciągu zmiany roboczej (dnia roboczego). W tabeli 2 podano wyniki badań właściwości zawiesiny płynnej (gęstość, lepkość umowna i odstęp dobowy wody) oraz stwardniałej, po 28 dniach dojrzewania w wodzie, w warunkach laboratoryjnych (gęstość, wytrzymałość na ściskanie i współczynnik filtracji,  $k_{10}$ ). Badania zestawione w tej tabeli dotyczą próbek pobranych w wytwórni zawiesiny. W tabeli 3 zestawiono wyniki takich samych

badania, ale wykonanych na próbkach zawiesiny pobranych z wykopu w czasie jego głębienia.

### Badania zawiesiny stwardniałej

Badania kontrolne odcinka doświadczalnego bariery hydraulicznej przeprowadzono po 30 dniach od jego wykonania (rys. 3). Badania obejmowały:

- określenie przepuszczalności hydraulicznej ( $k$ ) zawiesiny w przesłonie w trzech profilach na trzech głębokościach,
- określenie oporów wciskania stożka ( $q_c$ ) sondy statycznej CPT w trzech profilach przesłony.

TABELA 2. Zbiórce zestawienie wyników badań wytwarzanej zawiesiny  
TABLE 2. Summary properties of slurry collected in the production site

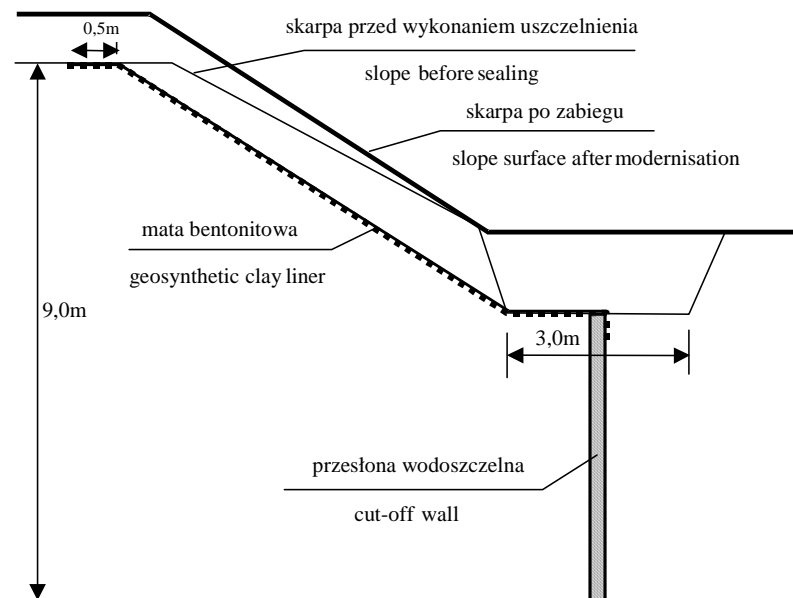
Lp. No	Pododcinek Sub-section	Właściwości zawiesiny płynnej Properties of fluid slurry			Właściwości zawiesiny stwardniałej Properties of hardened slurry		
		$\rho_c$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$L$ [s]	od [%]	$\rho_c$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$R_c$ [MPa]	$k_{10}$ [m/s]
1	I	1,26	65	2,0	1,245	0,93	$7,95 \cdot 10^{-9}$
2	II	1,27	56	2,0	1,201	0,94	$2,16 \cdot 10^{-8}$
3	III	1,24	56	3,5	1,184	0,49	$4,51 \cdot 10^{-8}$

TABELA 3. Zbiórce zestawienie wyników badań zawiesiny pobranej z wykopu w czasie realizacji przesłony

TABLE 3. Summary properties of slurry samples collected from the trench

Lp. No	Pododcinek Sub-section	Właściwości zawiesiny płynnej Properties of fluid slurry			Właściwości zawiesiny stwardniałej Properties of hardened slurry		
		$\rho_c$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$L$ [s]	od [%]	$\rho_c$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$R_c$ [MPa]	$k_{10}$ [m/s]
1	I	1,50	–	–	1,532	1,27	$1,84 \cdot 10^{-8}$
2	II	–	–	–	1,656	2,25	$3,18 \cdot 10^{-9}$
3	III	1,24	67	2,0	1,194	0,53	$2,91 \cdot 10^{-8}$





RYSUNEK 3. Przekrój poprzeczny przez podłoże i fragment wału po modernizacji  
 FIGURE 3. Cross-section through the subsoil and flood embankment after modernisation

Badania przepuszczalności hydraulicznej wykonano sondą BAT (rys. 4) natomiast sondowania – sondą CPT z mechanicznym stożkiem Begemana.

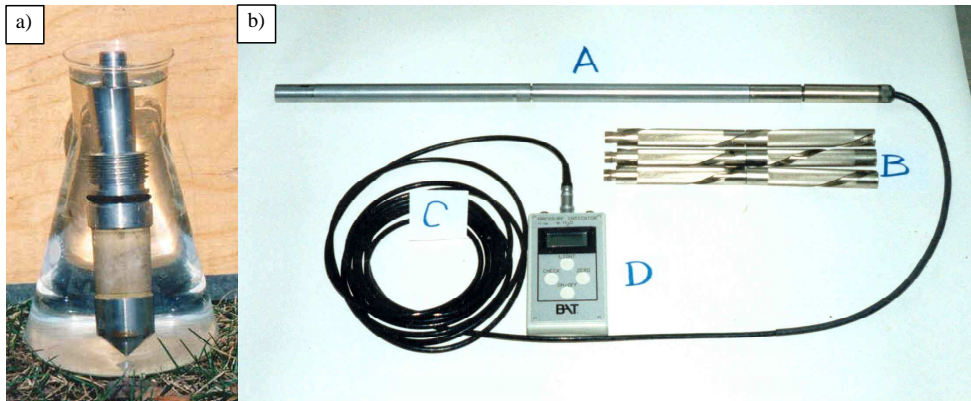
W każdym profilu badania wykonywano według następującego schematu:

- zakotwienie urządzenia HASON 25 kN, polegające na wkręceniu w grunt dwóch kotew talerzowych,
- wykonanie sondowania CPT do głębokości mniejszej o 0,1–0,2 m od głębokości, na której planowano wykonanie badania przepuszczalności sondą BAT,
- wyjęcie żerdzi ze stożkiem CPT i opuszczenie żerdzi z końcówką filtrującą sondy BAT oraz wciśnięcie jej w zawieszinę (0,1–0,2 m poniżej dna otworu wykonanego sondą CPT),
- wykonanie badania przepuszczalności za pomocą jednostki pomiarowej sondy BAT,

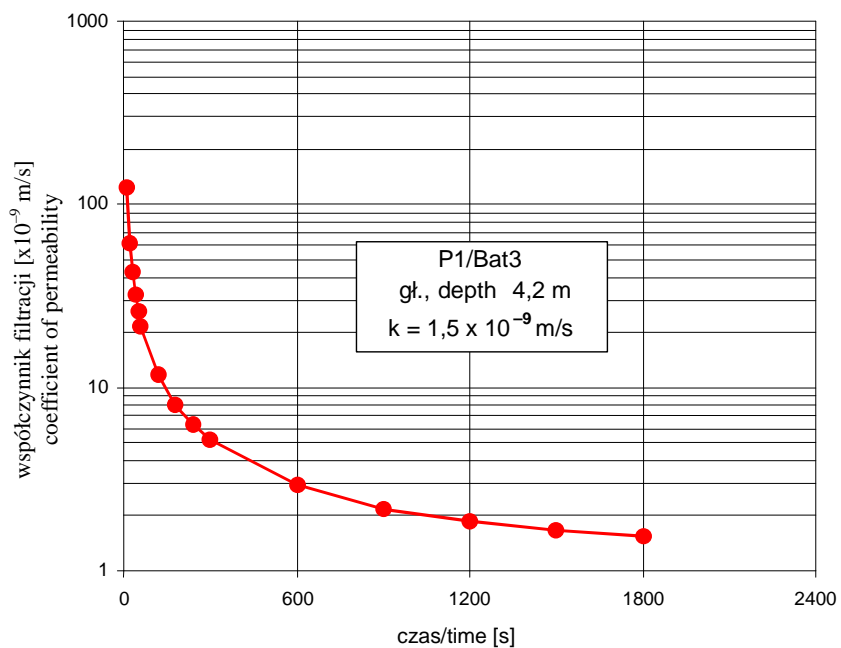
- wyjęcie żerdzi z końcówką filtrującą sondy BAT i kontynuowanie sondowania CPT do następnej głębokości, na której planowano wykonanie badania przepuszczalności w profilu badawczym.

Badania przepuszczalności hydraulicznej zawiesziny w przesłonie wykonano w profilu P1 na głębokościach: 1,5, 3,0 i 4,2 m, a w profilach P2 i P3 na głębokościach: 1,3 i 2,8 m.

Przykład wykresu przedstawiającego zmiany współczynnika przepuszczalności hydraulicznej zawiesziny w czasie badania pokazano na rysunku 5. W tabeli 4 zestawiono wartości przepuszczalności hydraulicznej dla momentu czasowego 20 minut od rozpoczęcia pomiarów; uznano je za miarodajne do oceny szczelności zawiesziny w warunkach *in situ*.



RYSUNEK 4. Widok końcówki filtrującej (a) i sondy BAT (b): A – jednostka testująca, B – ciężarki, C – kabel połączeniowy, D – jednostka odczytowa  
 FIGURE 4. The view of piezometer (a) and BAT system (b): A – testing unit, B – weights, C – connecting cable, D – readout unit



RYSUNEK 5. Wyniki badań współczynnika filtracji sondą BAT, profil P1/BAT3 – gł. 4,2 m  
 FIGURE 5. BAT permeability test results, sub-section P1/BAT3 – depth 4.2 m

TABELA 4. Wartości współczynnika przepuszczalności hydraulicznej zawiesiny w barierze, badania sondą BAT

TABLE 4. Values of permeability of the slurry in the cut-off wall, BAT tests

Lp. No	Profil badawczy / Analysed sub-section					
	P1		P2		P3	
	głębokość depth [m]	współczyn- nik przepuszc- zalności hydraulicznej permeability coefficient, $k$ [m/s]	głębokość depth [m]	współczyn- nik przepuszc- zalności hydraulicznej permeability coefficient, $k$ [m/s]	głębokość depth [m]	współczyn- nik przepuszc- zalności hydraulicznej permeability coefficient, $k$ [m/s]
1	1,5	$2,5 \cdot 10^{-9}$	1,3	$2,4 \cdot 10^{-9}$	1,3	$1,5 \cdot 10^{-9}$
2	3,0	$1,9 \cdot 10^{-9}$	2,8	$2,2 \cdot 10^{-9}$	2,8	$1,0 \cdot 10^{-9}$
3	4,2	$1,5 \cdot 10^{-9}$	–	–	–	–

Przykładowe wyniki sondowań CPT w postaci rozkładu oporów wciskania stożka ( $q_c$ ) w profilu badawczym P2 i P3 przedstawiono na rysunku 6. W profilu P1 uzyskano podobny rozkład oporów wciskania stożka jak w profilu P2, tj. około 4 MPa na głębokości 0,5 m i około 20 MPa na głębokości 4,0 m. W profilu P3 zarejestrowano mniejsze opory sondowania – od 3,5 MPa na głębokości 0,5 m do około 10 MPa na głębokości 3,0 m.

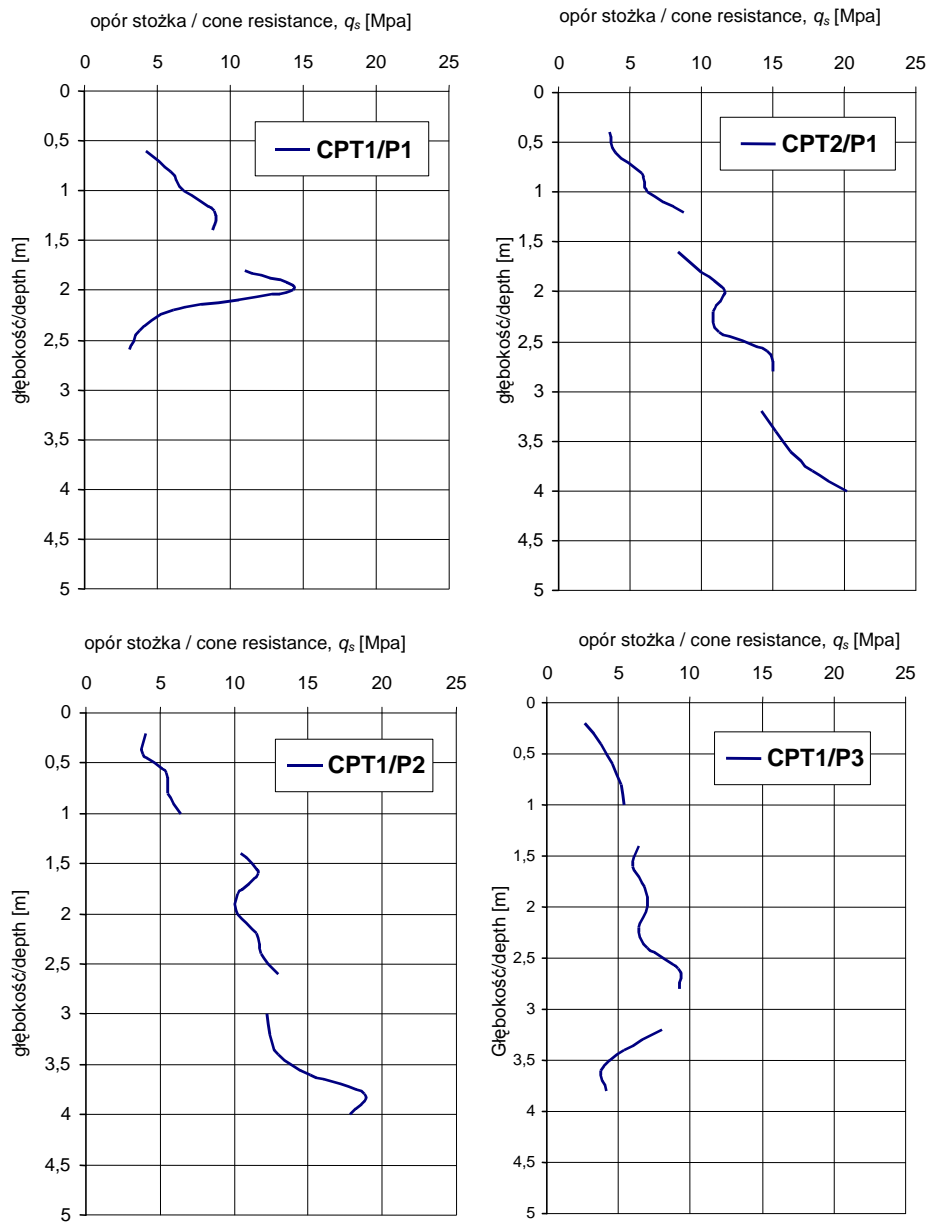
### Analiza wyników badań

Porównując wyniki uzyskane w laboratorium dla wyjściowej receptury zawiesiny twardniejącej (tab. 1) i na placu budowy (tab. 2), widać, że uzyskane parametry są do siebie bardzo zbliżone. Jedynie wartość lepkości, uzyskana podczas próby terenowej, była zdecydowanie większa. Wynika to przede wszystkim z technologii dozowania materiałów. Analizując wyniki

z badań zawiesiny produkowanej na placu budowy (tab. 2 i 3), można zauważyć, że stosunkowo najniższa była zawiesina w ostatnim fragmencie przesłony, co potwierdzają zarówno wyniki badań zawiesiny w stanie płynnym (najniższa lepkość i najwyższy odstój wody), jak również wyniki badań wytrzymałościowych na próbkach pobranych przy węźle i z wykopu. Te same relacje zachodzą między wynikami badań oporu stożka ( $q_c$ ) w badaniach zawiesiny *in situ*.

Próbki z wykopu (tab. 3) są mocniejsze od próbek pobranych przy węźle (tab. 2), co wynika z zapiaszczenia zawiesiny. Znacznie większe niż wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe są wartości oporu stożka ( $q_c$ ), co wynika z różnic w warunkach badania (swoboda odkształceń bocznych przy jednoosiowym ścisaniu próbki laboratoryjnej i złożony stan naprężenia na powierzchni stożka wciskanego w zawiesinę w przesłonie).

Współczynniki przepuszczalności hydraulicznej zawiesiny określone na



RYSUNEK 6. Wyniki sondowań statycznych CPT w profilu P2 i P3  
 FIGURE 6. CPT tests results in sub-sections P2 and P3

próbekach pobranych przy węźle pozostają rzędu  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  m/s i są zasadniczo takie, jak zbadane na próbkach z wykopu (mimo zapiaszczenia zawiesziny). Z kolei współczynniki zbadane *in situ* są rzędu  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  m/s. Oznacza to, że zawieszina w barierze jest nieco szczelniejsza niż doń podawana. Jednocześnie można zauważyć nieznaczne zmiany wartości przepuszczalności hydraulicznej zawiesziny na głębokości bariery. Uzyskane rezultaty świadczą o stabilności zawiesziny i jej odporności na różnorodne wpływy stosowanej technologii i warunków gruntowodnych w miejscu realizacji odcinka bariery.

## Podsumowanie

Wyniki badań potwierdzają możliwość praktycznego stosowania popiołów fluidalnych jako aktywnego dodatku do zawieszin twardniejących i użytkowania – zależnie od składu zawiesziny – pożądanych właściwości technologicznych i użytkowych tego materiału.

Stosowane w warunkach terenowych metody określania przepuszczalności hydraulicznej (metoda rozpraszania ciśnienia) zawiesziny wbudowanej w barierę hydrauliczną pozwalają na potwierdzenie jej parametrów w rzeczywistych warunkach formowania i dojrzewania materiału i po różnych okresach pracy bariery.

Porównanie wyników badań przepuszczalności hydraulicznej zawieszin uzyskanych w warunkach laboratoryjnych i *in situ* wskazuje na ich dużą zbieżność; obserwowane różnice wynikają przede wszystkim z rzeczywistych

różnic właściwości materiałów (zapiaszczenie, inne warunki dojrzewania itp.).

Wykonywanie sondowań CPT w wąskich barierach hydraulicznych (około 30 cm szerokości) jest zadaniem trudnym; niewielkie odchylenie od pionu w początkowej fazie sondowania powoduje, że na głębokości kilku metrów końcówka pomiarowa sondy BAT lub stożek sondy CPT mogą wyjść poza barierę.

## Literatura

- BARKER P.J., ESNAULT A., BRAITHWAITE P. 1997: Containment barrier at Pride Park. Derby, England. International containment technology conference, St. Petersburg, Florida.
- DANIEL D.E., CHOI H. 1999: Hydraulic conductivity evaluation of vertical barrier walls. Geotechnical Special Publication No 90 "Geoengineering for underground facilities" (ed.) G. Fernandez, R.A. Bauer. Urbana-Champaign.
- DANIEL D.E., KOERNER R.M. 1995: Waste containment facilities. Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover systems. ASCE Press, New York.
- EVANS J.C. 1993: Vertical cutoff walls. In: Geotechnical Practice for Waste Disposal (ed.) D.E. Daniel. Chapman & Hall, London.
- EVANS J.C., DAWSON A.R. 1999: Slurry walls for control of contaminant migration. A comparison of UK and US practices. Geotechnical Special Publication No 90 "Geoengineering for underground facilities" (ed.) G. Fernandez, R.A. Bauer. Urbana-Champaign.
- JAREMA-SUCHOROWSKA S. 2002: Możliwości zagospodarowania produktów spalania fluidalnego. Seminarium naukowo-techniczne, 22 lutego, Łódź.
- KLEDYŃSKI Z. 2004: Influence of fly ashes on hardening slurries resistance to sulfate at-

tack. *Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics* 51, 2: 119–133.

Operat wodnoprawny. Naprawa i odbudowa wału rz. Wisły w m. Rękowice-Mniszew w km 14+370÷18+100 i 18+400÷18+730, gm. Magnuszew BIPROMEL, sierpień 2002, Warszawa.

Patent nr 180380, na wynalazek pt.: Sposób i urządzenie do otrzymywania materiałów wiążących z popiołów kotłowych energetycznych, zwłaszcza z paleniskiem fluidalnym. Urząd Patentowy RP.

SHARMA H.D., LEWIS S.P. 1994: Vertical barriers: Slurry walls. In: Waste containment systems, waste stabilization, and landfills: Design and evaluation. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Specification for the construction of slurry trench cut-off walls as barriers to pollution migration, 1998. The Institution of Civil Engineers Construction Industry Research and Information Association Building Research Establishment. Thomas Telford, London.

XANTHAKOS P.P. 1994: Slurry walls as structural systems. McGraw Hill, New York.

composed mainly of bentonite, cementitious materials and water to maintain the trench stability and finally low permeability of barrier. This paper presents the implementation of an experimental section of cut-off wall in the subsoil of a modernised flood embankment along the Vistula River and the results of controlling analyses of the applied hardening slurry with the admixture of activated fluidal ashes from hard coal. The results of tests confirm the possibility of practical application of fluidal ashes as active components to hardening slurry and obtaining – depending on the suspension composition – favourable technological and exploitation properties of this material.

#### **Autors' addresses:**

Paweł Falaciński, Zbigniew Kledyński  
Politechnika Warszawska  
Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego  
00-653 Warszawa, ul. Nowowiejska 20  
Poland  
e-mail: zbigniew.kledynski@is.pw.edu.pl.

Kazimierz Garbulewski, Zdzisław Skutnik  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Geoinżynierii  
02-776 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159  
Poland  
e-mail: garbulewski@alpha.sggw.waw.pl,  
skutnikz@alpha.sggw.waw.pl.

Katarzyna Ziarkowska  
WARTUR Sp. z o.o.  
01-452 Warszawa, ul. Księcia Bolesława 1/3  
Poland

## **Summary**

**Fluidised fly-ash cement-bentonite cut-off walls in flood protection.** Vertical barrier walls are widely used in environmental control systems to restrict the lateral spreading of liquid or gaseous contaminants and for seepage control through and beneath a levees. The barrier walls are constructed in a single or two phases using a slurry