

Badania przelewowe na wale eksperymentalnym DREDGDIKES w Gdańsku – wytrzymałość powierzchni wału na erozję

Dr inż. Remigiusz Duszyński¹, dr inż. Rafał Ossowski¹, mgr inż. Jan Olschewski², dr inż. Stefan Cantré²

¹Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

²Universität Rostock, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences

W ramach projektu DredgDikes [6] zbudowano dwa stanowiska badawcze (w skali naturalnej) w celu zbadania przydatności drobnoziarnistych materiałów czerpalnych oraz kompozytów popiołowo-piaskowych do budowy wałów przeciwpowodziowych. W Polsce większość energii elektrycznej jest ciągle produkowana z węgla kamiennego, stąd też mamy w kraju wiele składowisk popiołów oraz żużli, klasyfikowanych jako tzw. uboczne produkty spalania (UPS). Korpus wału badawczego w Gdańsku zaprojektowano jako kompozyt piasku bagrowanego z dna Martwej Wisły oraz materiału UPS, będąc w zamyśle prototypem konstrukcji mogącej znaleźć zastosowanie w dużej skali na remontowanych i nowo budowanych wałach w Polsce.

Różne materiały tworzące kompozyt były badane w laboratorium – zarówno na etapie projektowania, jak też konstrukcji wału [2]. Celem badań była optymalizacja materiału w sensie właściwości hydraulicznych (przepuszczalność, wymywanie substancji toksycznych) oraz stateczności konstrukcji na długotrwałe parcie wody i odporność na erozję w przypadku przelania przez koronę. Korpus zbudowany z kompozytu popiołowo-piaskowego był pokryty dwoma rodzajami materiału okrywowego oraz okrywą roślinną.

Eksperymenty przelewowe wykonano, instalując po stronie odpowietrznej wału dwa identyczne kanały, służące do badań odporności na erozję okrywy roślinnej oraz warstw okrywowych zbudowanych z gliny, a także kompozytów na bazie UPS. Kanały zaprojektowano zgodnie z normą ASTM D 6460 [1], stosując identyczne wymiary i opomiarowanie jak w eksperymentach na niemieckim wale badawczym DredgDikes [7]. W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań przelewowych prowadzonych na wale badawczym w Gdańsku (na powierzchniach z okrywą roślinną i bez okrywy) przeprowadzonych we wrześniu 2014, wraz z oceną podatności na erozję powierzchniową.

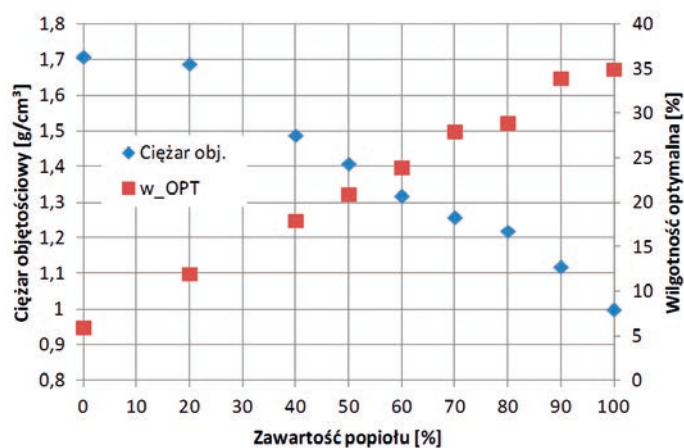
BADANIA MATERIAŁÓW

W projekcie DredgDikes do budowy polskiego wału badawczego wykorzystano dwa rodzaje materiałów UPS: popiołozużle z elektrocieplowni EC2 w Gdyni do budowy rdzenia wału (po zmieszaniu z piaskiem czerpalnym z dna Martwej Wisły) oraz popioły lotne w postaci spoiwa hydraulicznego (Tefra®) jako warstwa okrywowa wału, w części zastąpiona gliną.

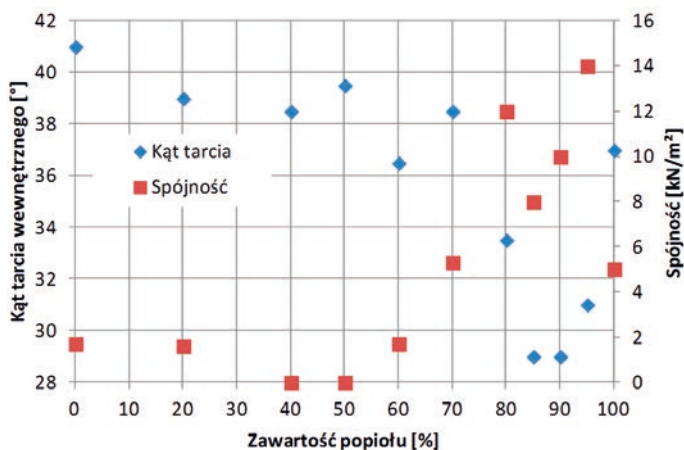
Wstępne badania laboratoryjne miały na celu wyznaczenie optymalnych proporcji popiołów i piasku do stworzenia kompozytu gruntowego, stanowiącego rdzeń wału. Określono w nich właściwości mechaniczne kompozytu, m.in. ściśliwość, parametry wytrzymałościowe, a także zagęszczalność i wodoprzepuszczalność. Badane parametry określano dla czystych materiałów (piasek, popiół), jak również wymienionych wyżej mieszanek w odpowiednich proporcjach. W tabl. 1 przedstawiono wybrane parametry badanych materiałów.

Proporcje składników w kompozycie gruntowym dobrano na podstawie badań wstępnych, określających wpływ zwiększającej się zawartości popiołu na badane właściwości mechaniczne. Kolejne próbki miały zawartość popiołów od 0% do 100% zwiększających się co 10%. Na rys. 1 przedstawiono zależność maksymalnej gęstości objętościowej oraz wilgotności optymalnej w funkcji zwiększającej się zawartości popiołu w kompozycie.

Zaobserwowano wzrost wskaźnika porowatości e wraz z wzrostem zawartości popiołów w kompozycie. Efektywny kąt tarcia wewnętrzznego oraz spójność efektywną wyznaczono w aparacie skrzynkowym. Wartość spójności rośnie znacząco powyżej 60% zawartości popiołu, podczas gdy kąt tarcia maleje z wzrostem zawartości popiołu (rys. 2).



Rys. 1. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego oraz wilgotność optymalna w funkcji zawartości popiołu w kompozycie



Rys. 2. Efektywny kąt tarcia wewnętrzznego i spójność efektywna w funkcji zawartości popiołu w kompozycie

Po serii badań wstępnych wybrano optymalny kompozyt 70/30 (popiół/piasek) jako podstawowy materiał do budowy wału. Co prawda taka mieszanka ma stosunkowo wysoki współczynnik filtracji (tabl. 1), jednakże stwierdzono doświadczalnie zmniejszanie się przewodności hydraulicznej na skutek osiadania korpusu wału oraz cementacji ze względu na właściwości pucolanowe popiołów. Badania na próbkach pobranych z wału badawczego wykazały spadek współczynnika filtracji o 40% w czasie 180 dni.

WAŁ BADAWCZY

Latem 2012 roku ukończono budowę stanowiska eksperymentalnego w postaci wału badawczego o wysokości 3 m zlokalizowanego w miejscowości Wiślinka/Trzcińsko koło Gdańska [8]. Nachylenie skarp wynosi 1:2, zaś szerokość korony to 3 m. Właściwe stanowisko badawcze to segment o szerokości 4 m wydzielony z wału za pomocą ścianek szczelnych, tworzący płaski stan przepływu w celu prowadzenia doświadczeń filtracji oraz badań przelewowych przy kontrolowanym stanie wody (rys. 3).

Wał badawczy jest zbudowany zasadniczo z trzech różnych materiałów (tabl. 1):

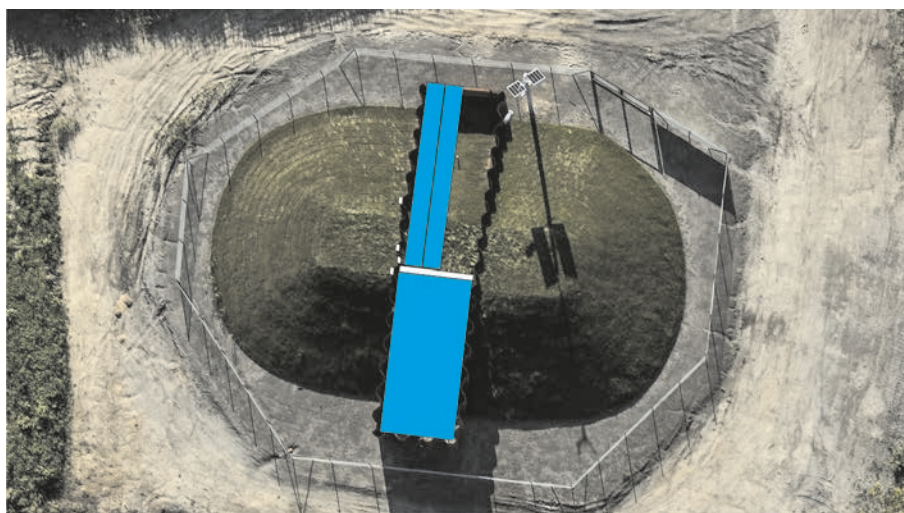
- rdzeń wału składa się z kompozytu złożonego z 70% popiołużużli i 30% piasku (określany w skrócie jako kompozyt 70/30);

Tabl. 1. Wybrane parametry geotechniczne materiałów użytych do budowy wału badawczego w Gdańsku

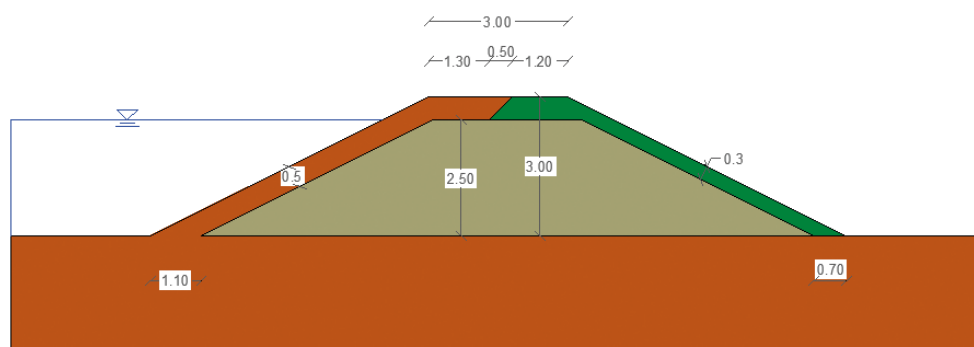
	głina	ash/silt	kompozyt 70/30
Ciężar objętościowy γ [kN/m ³]	18	16	13
Ciężar objętościowy przy pełnym nasyceniu porów wodą g_{sat} [kN/m ³]	21	20	16,3
Współczynnik filtracji k [m/s]	1E-7	1E-7	1E-5
Wskaźnik porowatości e [–]	0,79	0,64	0,69
Spójność efektywna c' [kN/m ²]	30	50	5
Efektywny kąt tarcia wewnętrznego ϕ' [°]	25	20	37
Moduł odkształcenia [kN/m ²]	1,5E4	3E4	2,3E4
Współczynnik Poissona [–]	0,35	0,3	0,25

- glina stanowi 50 cm warstwę wierzchnią na części odwodnej;
- mieszanina złożona z pyłów oraz spoiwa Tefra® (spoiwo na bazie popiołów lotnych) stanowi trzydziestocentymetrową warstwę wierzchnią na skarpie odpowietrznej.

Na rys. 4 przedstawiono projektowany przekrój wału z zaznaczeniem różnych materiałów budowlanych. W trakcie badań



Rys. 3. Gdański wał badawczy. W sekcji eksperymentalnej wydzielonej ściankami szczelnymi zaznaczono prostokątami lokalizację kanałów przelewowych



Rys. 4. Przekrój poprzeczny wału badawczego z podziałem na materiał konstrukcyjny: glinę (dół i lewa strona) kompozyt popiołowo-piaskowy (rdzeń wału) oraz pokrycie z Tefry (prawa strona)

okazało się, że warstwa gliny sięga również 1/3 wysokości skarpy odpowietrznej.

Aby stworzyć zamknięty obieg wody stanowisko odizolowano od podłoża półmetrową warstwą gliny. Dzięki temu można stworzyć spiętrzenie rzędu 2,5m w celu badania filtracji przez korpus wału. Zainstalowano w nim m. in. 24 czujniki do wyznaczenia profilów wilgotności i ustalenia zmian lustra wody w wale. Gęsta siatka pomiarowa pozwala na porównanie wyników badań z symulacjami numerycznymi [5]. Do weryfikacji pomiarów wilgotności służą cztery czujniki piezometryczne.

Warstwę okrywową wału stanowi darń – w tym przypadku zainstalowana z gotowych segmentów (limity czasowe na placu budowy). Takiego rozwiązania nie można zalecić na rzeczywistym wale ze względu na koszty oraz niską podaż nawozów w warstwie podścielającej.

BADANIA PRZELEWOWE

Przygotowanie eksperymentu i techniki pomiarowe

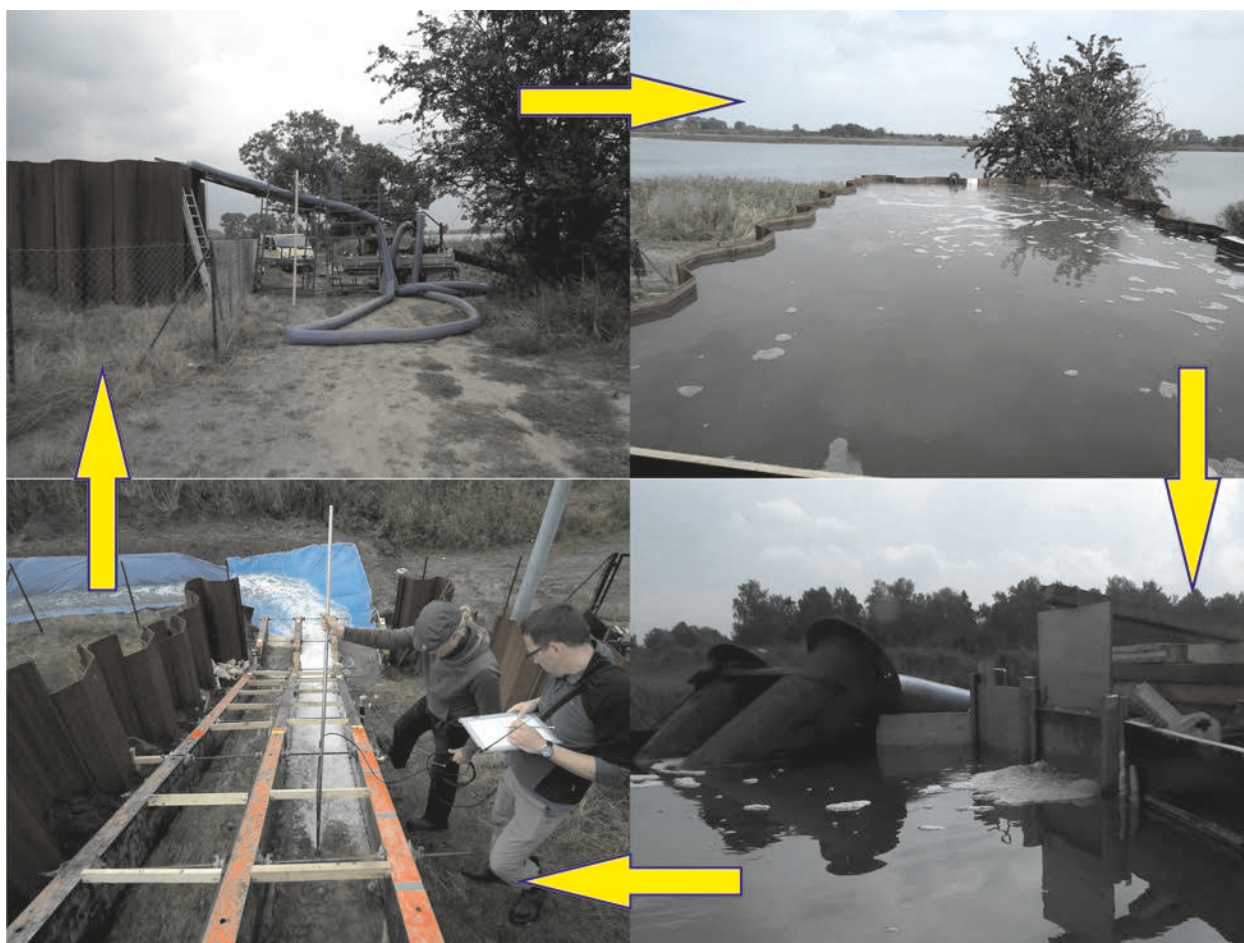
Na wale doświadczalnym zbudowano dwa kanały pomiarowe według wytycznych NTPEP (*National Transportation Product Evaluation Programme of the US American AASHTO*) [3]. Na rys. 5 pokazano stanowisko przygotowane do badań. Każdy z kanałów ma szerokość wewnętrzną 0,6 m oraz 10 sekcji

pomiarowych. Kanały zbudowano z wodoodpornej sklejki oraz elementów szalunkowych i przytwierdzone do podłoża oraz uszczelnione za pomocą pianki montażowej. Drewniane poprzeczki służyły jako markery sekcji pomiarowych [4].

Na koronie wału umieszczono urządzenia spustowe – zasuwę, regulujące wydatek wody. Przepływ wody odbywał się w obiegu: Martwa Wisła (zasilanie), zespół pomp z węzłami, zbiornik ze ścianek szczelnych, zasuwę na koronie wału oraz kanał odpływowy (rys. 6).



Rys. 5. Wał badawczy z widocznymi kanałami – przygotowanie do eksperymentów przelewowych



Rys. 6. Obieg wody w badaniu przelewowym: pompy, zbiornik, zasuwę i kanały

Wydatek wody w eksperymentach przelewowych był kontrolowany za pomocą stalowych zasuw umieszczonych na koronie wału. Wartość tę dobierano poprzez odpowiednie napełnienie zbiornika oraz wielkości otwarcia zasuw. Maksymalny wydatek był uzależniony od szczytowej wydajności pompy, tj. $750 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.

W czasie trwania eksperymentu mierzono prędkości przepływu oraz głębokość w ustalonych punktach kanału. Prędkość mierzono za pomocą przenośnego miernika indukcyjnego. Głębokość przepływu mierzono za pomocą łąty z podziałką milimetrową.

Wielkość erozji na skarpie odpowietrznej wyznaczano za pomocą profilera szpilkowego [4].

Dodatkowo każda z sekcji pomiarowych była oceniana pod względem uszkodzeń w skali 1 do 4 po każdej serii pomiarowej, zgodnie z procedurą według Van der Meer i in. [10].

Inspekcję fotograficzną każdej sekcji wykonywano przed i po każdym etapie eksperymentu. Służyły one do oceny stanu skarpy, m.in. uszkodzeń roślinności.

Procedura pomiarowa i analiza wyników pomiarowych

Eksperymenty przelewowe prowadzono według następującej procedury:

- rejestracja stanu początkowego skarpy (pomiar stopnia erozji, dokumentacja fotograficzna, opis słowny),

Tabl. 2. Średni wydatek jednostkowy q , pomierzone i wyliczone wartości hydrauliczne (prędkość przepływu v , głębokość strumienia h , składowa styczna naprężenia τ), liczby Froude'a i Reynoldsa – kanał porośnięty

Etap	$\bar{Q} q$ [$\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$]	$\bar{Q} v$ [ms^{-1}]	$\bar{Q} h$ [m]	$\bar{Q} \tau$ [Pa]	$Fr^{(1)}$ [–]	$Re^{(2)}$ [–]
1	52	1,3	0,041	199	2,05	40,653
2/3	97	1,86	0,053	260	2,57	73,255
4	200	2,9	0,071	350	3,46	146,736
5	233	3,38	0,076	373	3,91	180,234

⁽¹⁾ $Fr < 1$: subcritical, $Fr > 1$: supercritical

⁽²⁾ $Re \leq 2320$: laminar, $Re \geq 2320$: turbulent

Tabl. 3. Średni wydatek jednostkowy q , pomierzone i wyliczone wartości hydrauliczne (prędkość przepływu v , głębokość strumienia h , składowa styczna naprężenia τ), liczby Froude'a i Reynoldsa – kanał nieporośnięty

Etap	$\bar{Q} q$ [$\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$]	$\bar{Q} v$ [ms^{-1}]	$\bar{Q} h$ [m]	$\bar{Q} \tau$ [Pa]	$Fr^{(2)}$ [–]	$Re^{(3)}$ [–]
1	41	n.m. ⁽¹⁾	0,020	98	n.w. ⁽¹⁾	n.w. ⁽¹⁾
2	116	n.m. ⁽¹⁾	0,050	245	n.w. ⁽¹⁾	n.w. ⁽¹⁾
3	153	n.m. ⁽¹⁾	0,053	261	n.w. ⁽¹⁾	n.w. ⁽¹⁾
4	172	2,89	0,051	250	4,08	110,868
5	204	n.m. ⁽¹⁾	0,066	321	n.w. ⁽¹⁾	n.w. ⁽¹⁾
6	500	6,67	0,077	378	7,66	359,417

⁽¹⁾ niemierzalne / niewyznaczalne

⁽²⁾ $Fr < 1$: r. podkrytyczny, $Fr > 1$: r. nadkrytyczny

⁽³⁾ $Re \leq 2320$: r. laminarny, $Re \geq 2320$: r. turbulentny

- stopniowe zwiększanie wydatku poprzez otwieranie zasuw w czasie około 5 minut w celu zminimalizowania wpływu warunków nieustalonych na erozję,
- przepływ ustalony z docelowym wydatkiem; w czasie 45 minut (skarpa z roślinnością) lub 6 do 10 minut (skarpa bez roślinności),
- pomiar prędkości oraz głębokości strumienia w każdej sekcji pomiarowej oraz na koronie wału,
- zamknięcie zasuw, odpływ pozostałej wody,
- rejestracja stanu końcowego skarpy z użyciem profilera szpilkowego, ocena stopnia erozji, dokumentacja fotograficzna, opis słowny (jednocześnie użyta jako stan początkowy do kolejnego eksperymentu),
- zapis danych pomiarowych w odpowiednim arkuszu.

Docelowy wydatek (TD) był ustalany przed rozpoczęciem serii badań. Czynniki ograniczające jego wartość była wydajność pomp oraz wysokość ścianek szczelnych ponad rzędną korony wału. W tabl. 2 i 3 przedstawiono zestawienie średnich wydatków hydraulicznych wraz z mierzonymi i obliczonymi zmiennymi.

WYNIKI I OBLICZENIA

We wrześniu 2014 przeprowadzono cztery serie pomiarowe na wale badawczym w Gdańsku, na które składało się 18 pojedynczych eksperymentów: 10 na skarpie z okrywą roślinną oraz 8 na skarpie bez okrywy roślinnej. Wyniki badań zestawiono syntetycznie w tabl. od 2 do 7. W trakcie eksperymentów zaobserwowano, że wykonawca zainstalował pokrycie z gliny także na części skarpy odpowietrznej, co pociągnęło za sobą znaczące różnice w wartości skumulowanej erozji gruntu *CSL* (*Cumulated Soil Loss*) pomiędzy górnymi (oznaczone numerami 1 ÷ 3) i dolnymi (numery 4 ÷ 9) sekcjami kanałów przelewowych (tabl. 6 i 7).

Wielkość erozji porównano ze składowymi ścinającymi naprężeniami oraz prędkością przepływu. Na rys. 8, 10, 11 i 12 przedstawiono wyniki ze skarpy pokrytej roślinnością, natomiast

Tabl. 4. Maksymalna skumulowana erozja gruntu *CSL* i siły hydrauliczne, serie badań krótkookresowych – kanał porośnięty

Kanał	Max. <i>CSL</i> [cm]	Max. q [$\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$]	Max. v [ms^{-1}]	Max. h [m]	Max. τ [Pa]
1	7,9	249	3,27	0,079	386
2	1,6	217	3,49	0,073	359

Tabl. 5. Maksymalna skumulowana erozja gruntu *CSL* i siły hydrauliczne, serie badań krótkookresowych – kanał nieporośnięty

Kanał	Max. <i>CSL</i> [cm]	Max. q [$\text{ls}^{-1}\text{m}^{-1}$]	Max. v [ms^{-1}]	Max. h [m]	Max. τ [Pa]
1 ⁽¹⁾	3,3	115	n.m. ⁽²⁾	0,050	245
2	3,0	500	6,67	0,077	378

⁽¹⁾ Dwa poziomy wydatku

⁽²⁾ Niemierzalne

na rys. 9, 13, 14 i 15 wyniki ze skarpy bez okrywy roślinnej. Uwzględniono w nich obliczenia z podziałem na górną i dolną sekcję kanałów oraz wyniki całościowe. Na rys.14 zaprezentowano przykład dokumentacji fotograficznej zmian powierzchni skarpy w kanale nr 1. Ze względu na fluktuacyjny charakter

Tabl. 6. Maksymalna skumulowana erozja gruntu CSL i siły hydrauliczne, serie badań krótkookresowych z podziałem na sekcje górne „1-3” i dolne „4-9” – kanał porośnięty

Kanał	Max. CSL [cm]	Max. q [ls ⁻¹ m ⁻¹]	Max. v [ms ⁻¹]	Max. h [m]	Max. τ [Pa]
1:1-3	1,0	249	2,74	0,097	474
1:4-9	11,1	249	3,49	0,070	343
2:1-3	1,2	217	2,61	0,093	457
2:4-9	1,8	217	3,64	0,064	313

Tabl. 7. Maksymalna skumulowana erozja gruntu CSL i siły hydrauliczne, serie badań krótkookresowych z podziałem na sekcje górne „1-3” i dolne „4-9” – kanał nieporośnięty

Kanał	Max. CSL [cm]	Max. q [ls ⁻¹ m ⁻¹]	Max. v [ms ⁻¹]	Max. h [m]	Max. τ [Pa]
1:1-3	6,8	115	n.m. ⁽¹⁾	0,050	245
1:4-9	1,8	115	n.m. ⁽¹⁾	0,050	245
2:1-3	3,5	500	6,92	0,098	482
2:4-9	2,7	500	7,00	0,068	333

⁽¹⁾ Niemierzalne

pomiarów zrezygnowano z wyznaczania krzywej interpolacyjnej na rzecz aproksymacji funkcją liniową. Nachylenie funkcji aproksymacyjnej określa prędkość erozji.

Wyniki badań przeprowadzonych na skarpie pokrytej roślinnością wskazują na niską wartość skumulowanej erozji CSL w etapach 3 i 4 ($q_{max} \approx 200$ ls⁻¹m⁻¹). Wartość na poziomie $CSL \approx 2$ mm w kanale 1 przy składowych stycznych naprężeniach $\tau \approx 350$ Pa jest stosunkowo dobrym rezultatem. Przy najwyższym wydatku (etap 5) powierzchnia trawiasta skarpy uległa awarii: cała roślinność wraz z humusem w sekcjach 4 ÷ 9 została zmyta ze skarpy umocnionej mieszanką z popiołów lotnych (rys. 7). Wyjaśnia to skokową zmianę linii aproksymacyjnych na rys. 8, 10 i 12. Nasuwa się również przypuszczenie o niewystarczającym związaniu warstwy wegetacyjnej z podłożem.

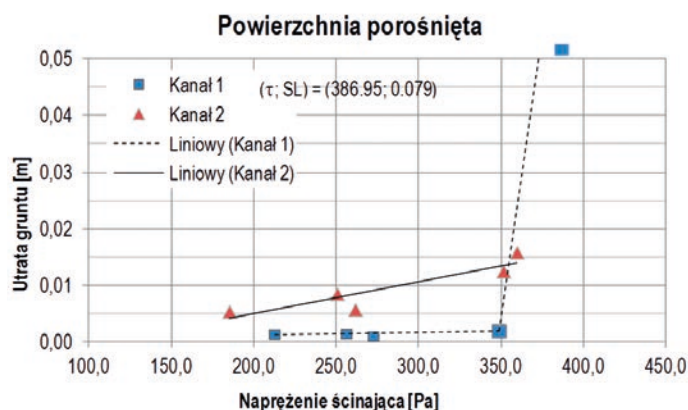
Powierzchnia skarpy w kanale 2 wykazała większą odporność na erozję; wartość $CSL \approx 1,6$ cm uzyskano przy składowych stycznych naprężeniach $\tau \approx 360$ Pa. Mimo to wielkość ta przekracza wartości zalecane przez normę ASTM D 6460 ($CSL_{max} = 1,27$ cm). Badania przeprowadzone w obu kanałach wykazały inicjację erozji przy składowych stycznych naprężeniach $\tau \approx 200$ Pa.

Po awarii w kanale 1 usunięto warstwę darni wewnątrz kanału i badanie prowadzono na powierzchni gliny (sekcje 1 do 3) oraz mieszanki piasku i Tefry (sekcje 4 do 9). W obu kanałach proces erozji zapoczątkowano przy wartości składowej stycznej naprężenia około $\tau \approx 100$ Pa (rys. 8). Po badaniu dwóch poziomów wydatku w kanale 1 znaczna część warstwy gliny została zmyta, co spowodowało przerwanie tego badania. Przyczyną dużego ubytku gruntu była zlokalizowana w tym rejonie aparatura

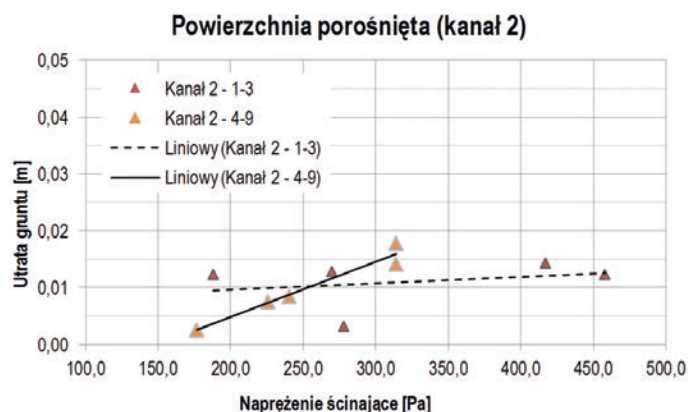


Rys. 7. Degradacja okrywy roślinnej na kanale 1, w sekcjach 4 i 5.

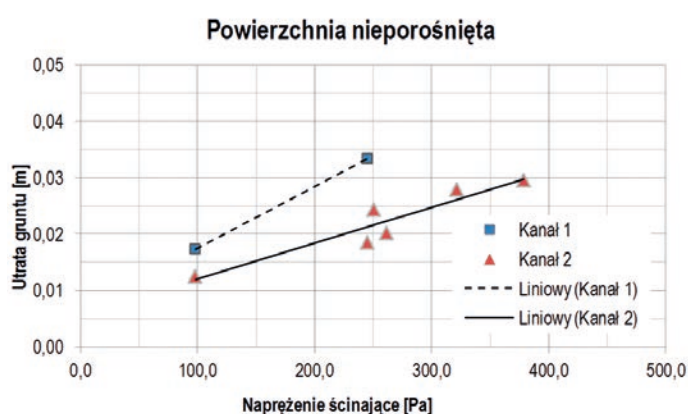
Od lewej: stan początkowy, w środku: stan po eksperymencie 3, z prawej: stan po eksperymencie 5. Kierunek przepływu: z góry do dołu zdjęcia



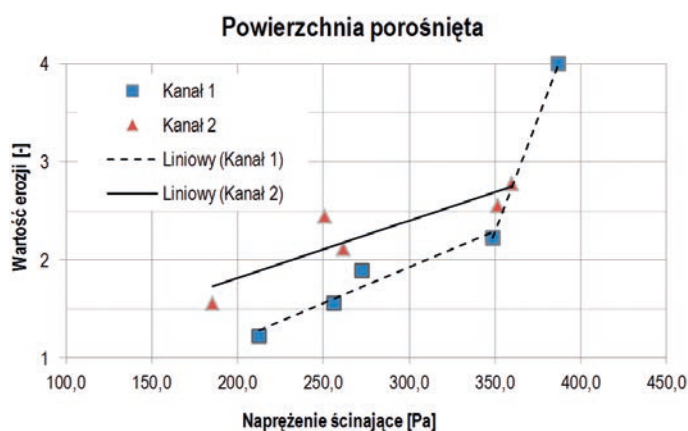
Rys. 8. Wielkość erozji – kanał 1 i 2 (z okrywą roślinną); utrata gruntu i składowa styczna naprężenia, pochylenie linii trendu = wysoki przyrost erozji



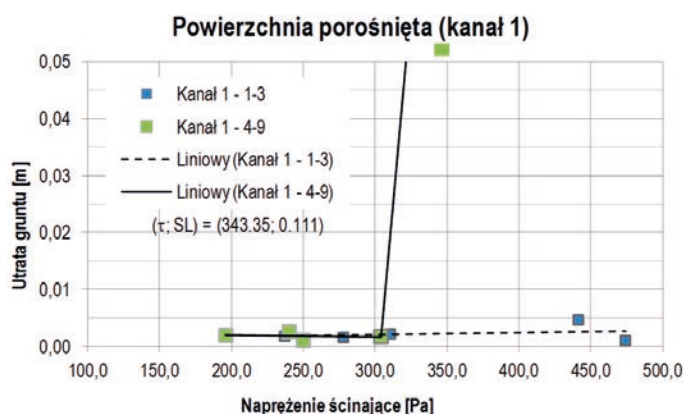
Rys. 11. Wielkość erozji – kanał 2 (porośnięty); utrata gruntu i składowe styczne naprężenia, pochylenie linii trendu = wysoki przyrost erozji – podział na sekcje górne „1-3” i dolne „4-9”



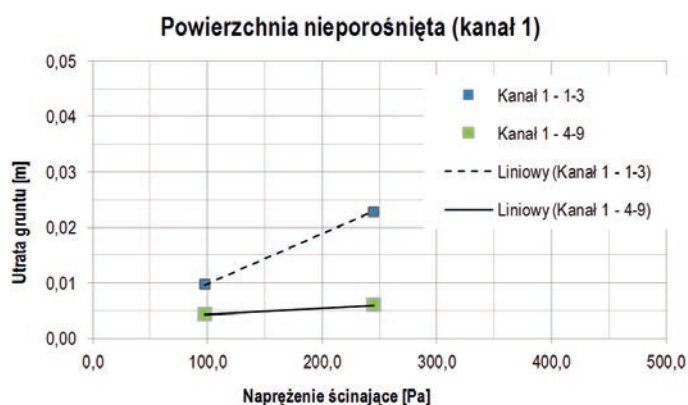
Rys. 9. Wielkość erozji – kanał 1 i 2 (nieporośnięty); utrata gruntu i naprężenie ścinające, pochylenie linii trendu = wysoki przyrost erozji



Rys. 12. Wartość erozji – kanał 1 i 2 (porośnięty); pochylenie linii trendu = wysoki przyrost erozji



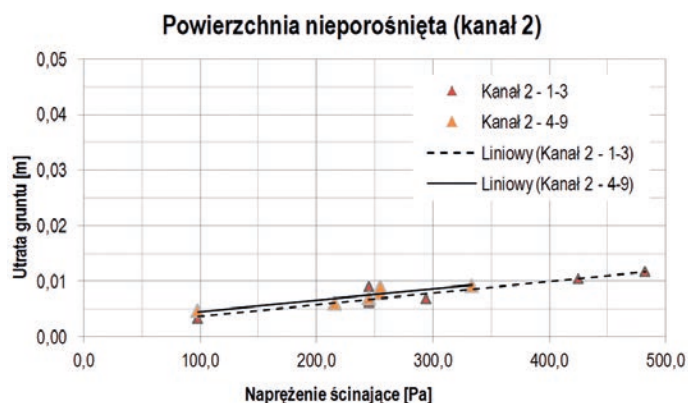
Rys. 10. Wielkość erozji – kanał 1 (porośnięty); utrata gruntu i składowa styczna naprężenia, pochylenie linii trendu = wysoki przyrost erozji – podział na sekcje górne „1-3” i dolne „4-9”



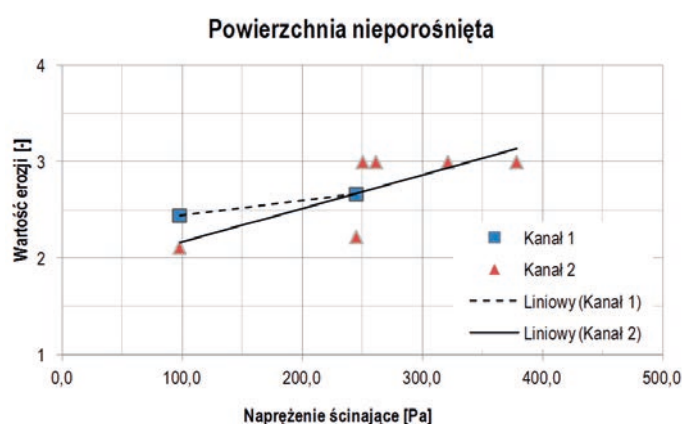
Rys. 13. Wielkość erozji – kanał 1 (nieporośnięty); utrata gruntu i składowa styczna naprężenia, pochylenie linii trendu = wysoki przyrost erozji – podział na sekcje górne „1-3” i dolne „4-9”

do pomiaru filtracji, jej okablowanie oraz słabsze zagęszczenie powierzchni na tym obszarze. Powierzchnia wału w kanale 2 wytrzymała 6 poziomów wydatku, uzyskując $CSL \approx 3$ cm, co stanowi wartość większą od zaleceń ASTM. W trakcie badań

w kanale 2 zaobserwowano znaczny ubytek gruntu po pierwszym etapie oraz umiarkowaną wartość CSL po zadaniu kolejnych stopni wydatku. Rezultat ten obrazuje nieznaczne pochylenie linii regresji na rys. 9 i 14.



Rys. 14. Wielkość erozji – kanał 2 (nieporośnięty); utrata gruntu i składowa styczna naprężenia, pochylenie linii trendu = wysoki przyrost erozji – podział na sekcje górne „1-3” i dolne „4-9”



Rys. 15. Wartość erozji – kanał 1 i 2 (nieporośnięty); pochylenie linii trendu = wysoki przyrost erozji

Istotną wadą pomiarów erozji za pomocą stosowanego przyrządu (profilator szpilkowy) jest pomiar erozji jedynie w kilku punktach (tutaj pięciu) w górnej części sekcji pomiarowej oraz wykorzystania tych pomiarów do wyliczenia wartości średniej dla całej sekcji. W celu ograniczenia tej wady każdą sekcję oceniano dodatkowo, przed i po każdym badaniu, liczbą od 1 do 4 wskazującą na wielkość erozji. Metoda ta nie daje ilościowej oceny erozji, ale jej zaletą jest możliwość oceny stanu całej powierzchni danej sekcji. Wielkość erozji określona liczbą porównano z wielkością składową styczną naprężenia ścinających na powierzchni skarpy porośniętej oraz nieporośniętej roślinnością (rys. 12 i 15).

ANALIZA WYNIKÓW

Wyniki uzyskane dla kanału 1 i 2 różnią się znacząco przede wszystkim dlatego, że powierzchnia wału w kanale 1 była osłabiona za sprawą występujących tam czujników wilgotności, ich okablowania, a w konsekwencji słabszego lokalnie zagęszczenia powierzchni. Z tego względu wyniki odnośnie poszczególnych kanałów omówiono oddzielnie.

W kanale 1 warstwa darni uległa uszkodzeniu dużo wcześniej niż w kanale 2 ze względu na występujące w rejonie zamontowanych czujników wilgotności, słabsze zagęszczenie powierzchni wału. Uszkodzenia w kanale 1 przedstawiono na rys. 7. Właściwe zagęszczenie mieszaniny piasku i popiołu jest szczególnie istotne w określeniu bezpieczeństwa konstrukcji. Badania wykazały, że po zniszczeniu warstwy roślinnej zewnętrzna warstwa wału wykonana z mieszaniny piasku i popiołu jest bardziej stabilna od warstwy wykonanej z gliny.

W kanale 2 oba materiały zastosowane do wykonania warstwy wierzchniej wału były właściwie zagęszczone, dzięki czemu warstwa darni pozostała stabilna w dłuższym okresie czasu, przy wyższych poziomach zadawanego wydatku. Po usunięciu darni powierzchnie obu materiałów nie wykazywały znaczących różnic (rys. 14).



Rys. 16. Penetracja korzeni w nieporośniętej powierzchni skarpy. Korzenie zaklinowane w gruncie (warstwa gliny po lewej), brak ukorzenienia (mieszanina piasku i popiołu po prawej). Kanał 2, sekcja 1 i 4 (nieporośnięty)



Rys. 17. Stopa wału na warstwie gliny – powierzchnia poślizgu pomiędzy gliną i mieszaniną piasku i popiołu. Sekcja 9 kanału 1 (po prawej) i kanału 2 (po lewej) po piątym etapie badań (porośnięty)

Poczynione obserwacje prowadzą do wniosku, że w przypadku przelania się wody przez wał, oba materiały zapewniają taki sam poziom bezpieczeństwa pod warunkiem odpowiedniego zagęszczenia powierzchni. W sytuacji, gdy występują lokalne niejednorodności zagęszczenia powierzchni wału, zdecydowanie większą odporność na erozję wykazuje mieszanina piasku i popiołu.

Kolejnym ważnym zagadnieniem jest zastosowanie na powierzchni wału darni w pasach zamiast obsiewu. Połączenie warstwy darni z podłożem gliniastym było zdecydowanie lepsze (dzięki penetracji korzeni oraz wyższej adhezji) niż połączenie darni z mieszaniną piasku i popiołu, w głąb której nie penetrowały korzenie (rys. 16). Z tego powodu nie zaleca się pokrywania powierzchni wałów wykonanych z mieszaniny piasku i popiołu warstwą darni w rolkach. Zastosowane w wierzchniej warstwie wału różne materiały spowodowały odmienne warunki wegetacji wynikające z różnej wilgotności – średniej dla gliny i niskiej dla mieszaniny popiołu i piasku.

Niepowodzenie ukorzenia się darni, a co za tym idzie jej rozwoju, było szczególnie zauważalne na południowej skarpie wału, gdzie niewielkiej grubości warstwa humusu nie zapewniła w lecie odpowiednich warunków wegetacyjnych, nawet w miejscu występowania warstwy gliny. Z tego względu zaleca się pokrycie wierzchniej warstwy wału wykonanej z mieszaniny popiołu i piasku warstwą ziemi uprawnej o grubości $20 \div 40$ cm. Zapewnienie stabilności tej warstwy wymaga układania jej z wykorzystaniem techniki schodkowania powierzchni skarp wału wykonanego z mieszaniny popiołu i piasku lub zastosowania geosyntetycznych mat przeciwoerozyjnych.

Istotnym zagadnieniem są także warunki panujące w podłożu wału. W przypadku wału badawczego w podłożu zastosowano warstwę nieprzepuszczalną wykonaną z gliny. W miejscu styku tej warstwy ze stopą wału wykonaną z mieszaniny piasku i popiołu pojawiła się uprzywilejowana powierzchnia poślizgu, która w trakcie badań przelewowych spowodowała szybkie uszkodzenie w tym rejonie (rys. 17). Zjawisku temu można przeciwdziałać przez odpowiednie zagłębienie stopy wału w podłożu lub poprzez zastosowanie przeciwoerozyjnych mat geosyntetycznych, względnie zbrojenia geosyntetycznego.

Ogólny wniosek wynikający z badań wskazuje na konieczność właściwego zagęszczenia powierzchni wału przed ułożeniem warstwy gleby urodzajnej oraz posianiem roślinności.

WNIOSKI

Na podstawie badań przelewowych przeprowadzonych na stanowisku badawczym DredgDikes w Wiślinie/Trzcinisku można przedstawić poniższe spostrzeżenia: (i) oprzyrządowanie pomiarowe zainstalowane w wale spowodowało szybką erozję i zniszczenie warstwy wegetacyjnej w kanale 1, (ii) połączenie darni z powierzchnią warstwy wykonanej z popiołu i piasku było niedostateczne, (iii) miejsce połączenia podłoża ze stopą wału wykonaną z popiołu i piasku wykazywało cechy uprzywilejowanej powierzchni poślizgu, (iv) precyzyjne zmierzenie głębokości wody w kanale oraz średniej prędkości przepływu było trudne, (v) pomiar erozji za pomocą profilera szpilkowego, wykonywany w pięciu punktach każdej sekcji, ogranicza dokład-

ność uzyskiwanych wyników, (vi) na stanowisku było możliwe przeprowadzenie jedynie badań krótkookresowych.

Korzyści płynące z przeprowadzonych badań przelewowych na stanowisku w skali rzeczywistej to przede wszystkim możliwość wyznaczenia odporności erozyjnej wału w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych uwzględniających: rodzaj materiału zastosowanego do budowy, rodzaj zastosowanych dodatków, rodzaj szaty roślinnej, pochylenie skarp, wielkości przepływu ponad koroną wału. Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

Odpowiednio zaprojektowana mieszanina piasku, popiołu-zużli oraz spoiw hydraulicznych może zagwarantować wysoką odporność na erozję oraz stabilność wierzchniej warstwy wału.

Właściwie zagęszczona warstwa mieszaniny zapewnia co najmniej taką funkcjonalność jak właściwie dobrana i wykonana warstwa przekrywająca z gliny.

Nadal najważniejszym czynnikiem ochrony powierzchni wału przed erozją jest odpowiednio ukorzeniona warstwa trawy (lub narzut kamienny).

Obszary powierzchni wału o słabszym zagęszczeniu mogą generować przyspieszoną erozję i zniszczenie powierzchni wału, zwłaszcza gdy zastosowana jest zbyt cienka warstwa gruntów uprawnych.

Nie zaleca się stosowania do zazielenienia powierzchni wału darni w arkuszach i rolkach.

Na warstwie przekrywającej wał, wykonanej z mieszaniny piasku i popiołu, zaleca się ułożenie gruntu urodzajnego o grubości $20 \div 40$ cm w celu zapewnienia odpowiedniej wilgotności i składników mineralnych stymulujących rozwój systemu korzeniowego.

Zapewnienie stabilności warstwy gruntu urodzajnego ułożonego na powierzchni wału wykonanego z mieszaniny popiołu i piasku wymaga układania tej warstwy z wykorzystaniem techniki schodkowania powierzchni skarp lub zastosowania geosyntetycznych mat przeciwoerozyjnych.

W przypadku uszkodzenia warstwy roślinnej, większe zalety wykazuje wierzchnia warstwa wału wykonana z mieszaniny piasku i popiołu niż warstwa wykonana z gliny, zwłaszcza w przypadku występowania miejscowych uszkodzeń w postaci niedostatecznego zagęszczenia, złego wykonawstwa, zawartości kamieni lub innych elementów prowadzących do wypłukiwania materiału.

Zarówno w przypadku wału badawczego, jak i rzeczywistych obwałowań przeciwpowodziowych, szczególnie istotne jest zapewnienie właściwego połączenia pomiędzy korpusem wału a istniejącym lub wykonywanym w trakcie budowy podłożem gruntowym (w tym przypadku warstwa gliny o grubości 50 cm), co zagwarantuje odpowiednią stateczność konstrukcji, zwłaszcza gdy jest spodziewane przelanie się wody przez wał.

Do określenia wielkości utraty gruntu w badaniach, zarówno w przypadku występowania szaty roślinnej, jak i jej braku, możliwe jest stosowanie metody zgodnej z normą ASTM D 6460 [1]. Daje ona jednak wyniki oparte na pomiarach jedynie w pięciu punktach zlokalizowanych w górnej części każdej sekcji pomiarowej. Lepsze rezultaty oceny erozji danego obszaru można uzyskać, stosując metodę van der Meer i in. [10] polegającą na ocenie każdej sekcji bezpośrednio przed i po badaniu przelewowym.

LITERATURA

1. ASTM D-6460 2008. Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in Protecting Earthen Channels from Stormwater-Induced Erosion. ASTM International. West Conshohocken, 2008.
2. Balachowski, L.; Sikora, Z.: Mechanical properties of bottom ash – dredged material mixtures in laboratory tests. *Studia Geotechnica et Mechanica* 35(3), 2013, 3-11.
3. NTPEP 2013. National Transportation Product Evaluation Program – Erosion Control products (ECP). Reports. Online: www.ntpep.org/Pages/ECP.aspx.
4. Olschewski, J.; Cantré, S.; Saathoff, F.: Overflowing tests on the Rostock DredgDikes Research Dike. Proc. of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction, Rostock 2014, 67-74.
5. Ossowski, R.; Sikora, Z.; Duszyński, R.; Sawicki, J.: Investigation on water infiltration and water content changes in a large-scale experimental test dike. Proc. of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction, Rostock 2014, 47-51.
6. Saathoff, F.; Cantré, S.; Sikora, Z.: South Baltic guideline on the application of dredged materials. Coal Combustion Products and Geosynthetics in Dike Construction, 2015.
7. Saathoff, F.; Cantré, S.; Sikora, Z.: South Baltic guideline on the application of dredged materials. Coal Combustion Products and Geosynthetics in Dike Construction – Annex II Scientific Background, 2015.
8. Sikora, Z.; Ossowski R.: Geotechnical aspects of dike construction using soil-ash composites. *Procedia Engineering* 2013, vol. 57, 1029-1035.
9. Tefra® Spoiwo hydrauliczne na bazie popiołów lotnych. Więcej informacji: <http://www.ekotech.pl/produkty>.
10. Van der Meer, J. W., Hardeman, B., Steendam, G. J., Schüttrumpf, H., Verheij H.: Flow depths and velocities at crest and inner slope of a dike, in theory and with the Wave Overtopping Simulator. 30th Int. Conference on Coastal Engineering, 2010.

PODZIĘKOWANIE: Artykuł powstał na podstawie badań wykonanych w ramach projektu DredgDikes współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Południowego Bałtyku (ERDF) w latach 2010-2015.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2011-2014 przyznanych na realizację współfinansowanego projektu międzynarodowego.