

dr hab. inż. Danuta Leśniewska*

Mechanizm wewnętrznej erozji wałów przeciwpowodziowych w trakcie intensywnych powodzi

Mechanism of flood embankments' internal erosion during intensive flooding

Grunty mineralne, stosowane od bardzo dawna jako materiał w budownictwie (a szczególnie w budownictwie ziemnym) nadal są przedmiotem badań naukowych. Wiąże się to zarówno z naturą materiałów sypkich, których zachowanie pod wpływem obciążeń wciąż nie jest dostatecznie zbadane, jak i ze złożonością warunków środowiskowych, którym są poddawane jako elementy budowli inżynierskich. Budowlami ziemnymi o szczególnym znaczeniu są wały przeciwpowodziowe, których na terenie Polski mamy ok. 8,5 tys. km [1].

Typowy ziemny wał przeciwpowodziowy przez większą część okresu eksploatacji nie ma bezpośredniego kontaktu z wodą i, pomijając okresy intensywnych opadów, pozostaje w stanie powietrzno-suchym. Wilgotność materiałów wbudowanych w wały przeciwpowodziowe zależy od ich rodzaju, ale na ogół jest niewielka. Sytuacja zmienia się podczas intensywnych i długotrwałych opadów lub wezbrania powodziowego, kiedy woda gwałtownie się podnosi i w ciągu doby może osiągnąć poziom bliski korony. Wiele wałów przeciwpowodziowych, szczególnie na północy Polski i Europy, zbudowanych jest w znacznej części z materiałów niespoistych. Seria powodzi w Europie, która rozpoczęła się pod koniec XX wieku i trwa praktycznie do dziś, wykazała niezadowalający stan wałów nie tylko w Polsce, ale i w całej Europie (projekt FLOODsite 2006 – 2009, www.floodsite.net). Zaobserwowano m.in. trudne do wyjaśnienia gwałtowne tempo powstawa-

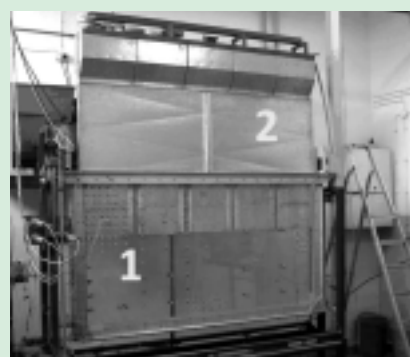
nia przerwań wałów w trakcie krótkotrwałych, ale wysokich wezbrań powodziowych na terenie Niemiec (wały rzeczne) i Holandii (wały odmorskie [2 – 4]).

Obserwacja w naturze zjawisk zachodzących w korpusie wału przeciwpowodziowego w trakcie jego gwałtownego nawadniania jest praktycznie niemożliwa. Jedynym sposobem wyjaśnienia fizycznych przyczyn przyspieszonej degradacji wałów pozostają badania modelowe. Takie badania na modelu szczelinowym wału przeciwpowodziowego wykonano w latach 2010 – 2013 w ramach grantu NCN nr NN 506 31 70 39 *Badanie zmian mikrostruktury gruntu i jej wpływ na procesy przepływu wody i transportu zanieczyszczeń w wałach powodziowych*, realizowanego w Instytucie Budownictwa Wodnego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku. Zasadniczym celem badań i ich analizy było wskazanie prawdopodobnych, nierozpoznanych jeszcze przyczyn przyspieszonej degradacji wałów przeciwpowodziowych.

Badania przeprowadzono na modelu fizycznym w skali ~1:4 – 1:15 (rzeczywista wysokość wałów przeciwpowodziowych wynosi od kilku do kilkunastu metrów). Spadek skarpy w modelu wynosił ok. 1:2 (w rzeczywistych obwałowaniach od 1:2 do 1:2,5). Badania prowadzono w zakresie niskich naprężeń.

Geometria modelu i materiały

Stanowisko pomiarowe do badania modelu wału przeciwpowodziowego składało się ze skrzyni o wymiarach wewnętrznych 200 x 100 x 4,5 cm (fotografia 1), a więc umożliwiało budo-

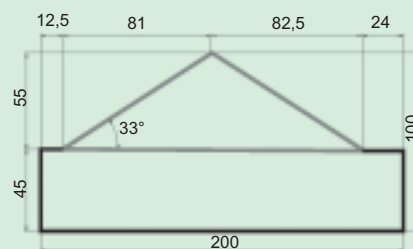


Fot. 1. Stanowisko do badań modelowych: 1 – skrzynia doświadczalna; 2 – urządzenie do formowania modelu metodą deszczu piaskowego

wę tzw. modelu szczelinowego, czyli modelu, którego jeden z wymiarów (głębokość w kierunku prostopadłym do przekroju poprzecznego) jest znacznie mniejszy od pozostałych dwóch. Taka konfiguracja miała zapewnić warunki płaskiego stanu odkształcenia.

Kształt modelu oraz jego wymiary przedstawia rysunek 1. Model wału był formowany przez sypanie suchego piasku przy użyciu jednej ze środkowych sekcji urządzenia widocznego na fotografii 1. Taki sposób przygotowania modelu dawał nachylenie jego skarp bliskie kątowi stoku naturalnego.

Podłoże wału przeciwpowodziowego w trakcie badań, w których było



Rys. 1. Geometria modelu wału przeciwpowodziowego (wymiarzy podane w mm) [5]

* Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Katedra Geotechniki

uwzględniane, formowano metodą deszczu piaskowego z naturalnego piasku morskiego, pobranego w Lubiatowie w województwie pomorskim (tabela 1). Modele wału zbudowano w większości przypadków z drobnego piasku kwarcowego o podstawowych parametrach podanych w tabeli 2 [5].

Tabela 1. Charakterystyka piasku Lubiatowo użytego jako podłoże dla modeli wału przeciwpowodziowego

Zmienna	Wartość
Mediana d_{50}	0,25 mm
Współczynnik filtracji k_s	0,016 cm/s
Wilgotność początkowa	ok. 0,1%
Ciężar objętościowy	17,0 kN/m ³
Kąt tarcia wewnętrznego w stanie zagęszczonym	37°

Tabela 2. Charakterystyka drobnego piasku kwarcowego użytego do formowania

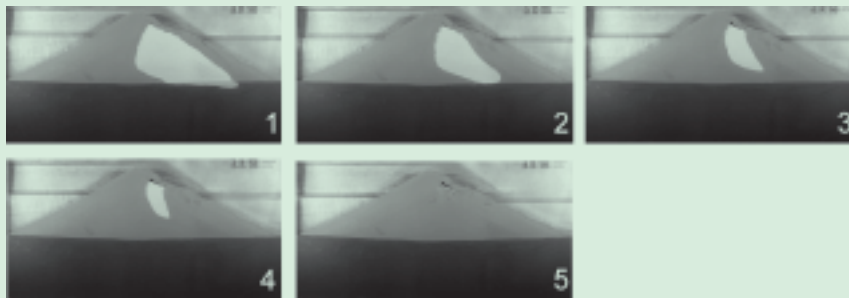
Zmienna	Wartość
Mediana d_{50}	0,125 mm
Współczynnik filtracji k_s	0,009 cm/s
Wilgotność początkowa	powietrzno suchy
Ciężar objętościowy	15,6 kN/m ³
Kąt tarcia wewnętrznego w stanie zagęszczonym	34°

Badania

Badania polegały na ustaleniu początkowego poziomu zwierciadła wody gruntowej (w testach, w których występowało podłoże gruntowe), a następnie symulowaniu nagłego wezbrania powodziowego przez podnoszenie poziomu zwierciadła wody po stronie odwodnej modelu (strona lewa) aż do jej przełamania przez koronę (tzw. *overflow*). W większości badań przeprowadzanych w ten sposób, niezależnie od tego, czy występowała w nich warstwa przepuszczalnego podłoża gruntowego, czy też nie, zaobserwowano zjawisko zamykania powietrza porowego w obszarach, które przez pewien czas pozostały suche, mimo otoczenia ich od zewnątrz gruntem nawodnionym. To, czy dochodziło do powstania obszaru zamknięcia, zależało od tempa narastania symulowanej fali powodziowej oraz od współczynnika wodoprzepuszczalności materiału użytego do budowy modeli. W trakcie badań modelowych symulujących opady deszczu i przelew przez koronę wału (z od-

powiednio dużym wydatkiem) lub gwałtowne podnoszenie zwierciadła wody po stronie odwodnej, czyli w tych doświadczeniach, gdzie powietrze porowe zamykane było w obszarach otoczonych gruntem nawodnionym i traciło kontakt z atmosferą, w korpusie modelu obserwowano pojawienie się otwartych nieciągłości w postaci szczelin wypełnionych powietrzem (fotografia 2). Szczeliny te nazwane zostały

(fotografia 2, poz. 5) powietrze gwałtownie się uwalnia, przechodząc do atmosfery. Uwolnienie się powietrza prowadzi albo do zniknięcia makropora wraz z obszarem zasilającym, albo do znacznego zmniejszenia jego objętości. Na ogół po ucieczce powietrza struktura gruntu pozostaje naruszona – widoczne są w niej delikatne, zamknięte spękania – pozostałości po makroporach (fotografia 2, poz. 5).

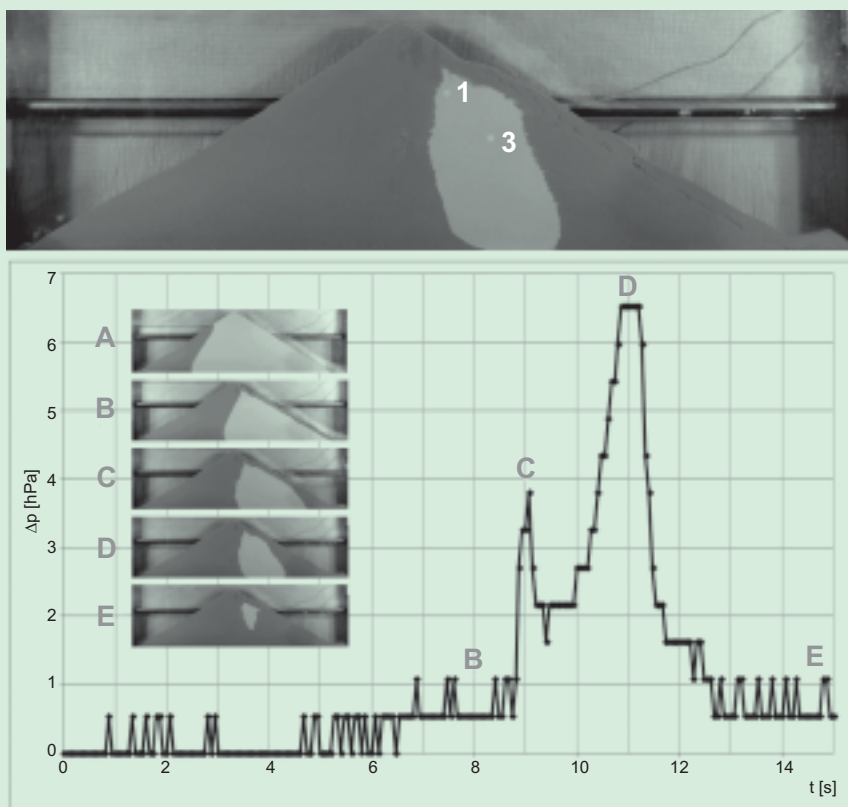


Fot. 2. Zbliżenie widoku obszaru zamknięcia powietrza porowego (kolor jaśniejszy) w trakcie testu – w górnej części obszaru widoczna ewolucja otwartej nieciągłości w strukturze gruntu (makropor). Ciemniejsze obszary modelu odpowiadają gruntem nawodnionemu

makroporami [5], ponieważ ich wymiary odpowiadają o wiele większej (rzędu kilku tysięcy) liczbie ziaren gruntu, niż to, co przyjął np. Wheeler [6], definiując w swoich badaniach szczeliny jako duże pęcherze gazowe (rozmiar 20 – 30 ziaren). Typowy makropor przez większość swojego czasu trwania (niektóre są bardzo stabilne i nie znikają do końca badania) powstaje na górnej granicy obszaru zamknięcia, jednak po stronie gruntu suchego. Podczas nawadniania modelu objętość makropora zwiększa się kosztem kurczenia się obszaru zasilającego, z którego woda wypycha do góry powietrze zamknięte w porach gruntu. Powierzchnia obszaru zasilającego (obszaru zamknięcia powietrza) zmniejsza się od momentu utraty kontaktu z powietrzem atmosferycznym, co musi oznaczać sprężanie powietrza w coraz mniejszej objętości. Po przekroczeniu wartości progowej ciśnienia powietrze uwalnia się z porów gruntu i tworzy makropor, którego objętość początkowo się zwiększa, a następnie stabilizuje. Ciśnienie w ustabilizowanym pod względem objętości makroporze musi nadal wzrastać, ponieważ po osiągnięciu kolejnej wartości progowej (lub zmniejszeniu ciężaru gruntu nad makroporem na skutek zaobserwowanej lokalnej utraty stateczności skarpy

Pomiar ciśnienia powietrza w obszarze zamknięcia

Sposób powstawania i ewolucji makroporów potwierdzają wyniki pomiarów ciśnienia powietrza porowego w obszarach zamknięcia, wykonane w trakcie niektórych badań. Na rysunku 2 przedstawiono wykres zmiany ciśnienia powietrza porowego ponad wartość ciśnienia atmosferycznego (Δp) w trakcie badania, którego przebieg pokazano na fotografiach A-E. Rysunek 2 odpowiada wskazaniom czujnika nr 3, którego położenie zaznaczono na zdjęciu u góry (sąsiedni czujnik nr 1 uległ awarii). Wykres obejmuje okres od rozpoczęcia testu, kiedy całe powietrze w porach gruntu miało swobodny kontakt z atmosferą ($\Delta p = 0$), do momentu zalania czujnika przez wodę w piętnastej minucie testu. W ósmej minucie testu (rysunek 2, fotografia B) doszło do przelania wody przez koronę modelu, czemu towarzyszyło powstanie dużego obszaru zamknięcia powietrza i niewielki wzrost jego ciśnienia. Dalsze wnikanie wody do korpusu modelu spowodowało zmniejszenie objętości obszaru zamknięcia oraz zauważalny wzrost ciśnienia (okres między fotografią B i C na rysunku 2), które osiągnęło maksimum ok. dziewiątej minuty testu (rys-



Rys. 2. Przebieg zmian ciśnienia powietrza w obszarze zamknięcia: A – stan badania przed przelaniem się wody przez koronę modelu; B – stan badania tuż po przelaniu się wody przez koronę; D – stan odpowiadający maksymalnej wartości ciśnienia powietrza w obszarze zamknięcia, tuż przed powstaniem makropora; D-E – okres spadku ciśnienia spowodowany zwiększaniem się objętości makropora

nek 2, fotografia C). W tym momencie zaobserwowano pierwszy epizod częściowej ucieczki powietrza z obszaru zamknięcia do atmosfery przez system kanalików wydrążonych przez powietrze w stosunkowo cienkiej warstwie nawodnionego gruntu, ograniczającego dostęp powietrza porowego do atmosfery (pozostałości takich kanalików widoczne są na odpowietrznej skarpie modelu, rysunek 2, górne zdjęcie). Na skutek otwarcia kanalików ciśnienie powietrza spadło, nie osiągnęło jednak wartości ciśnienia atmosferycznego. W dalszym przebiegu testu, na skutek ciągłej infiltracji wody do korpusu modelu (czemu towarzyszyły zjawiska kapilarne), doszło do zamknięcia kanalików i kolejnego wzrostu ciśnienia powietrza, wywołanego kurczeniem się obszaru zamknięcia. Ten wzrost osiągnął swoje maksimum w jedenastej minucie testu (rysunek 2, fotografia D). Dokładna inspekcja fotografii wykonanych w trakcie badania ujawniła, że w tym momencie nastąpiła utrata ciągłości ośrodka w formie wąskiego pęknięcia, którego objętość wyraźnie ro-

sła przy spadającej wartości ciśnienia powietrza odnotowanej w obszarze zamknięcia (okres między fotografią D i E).

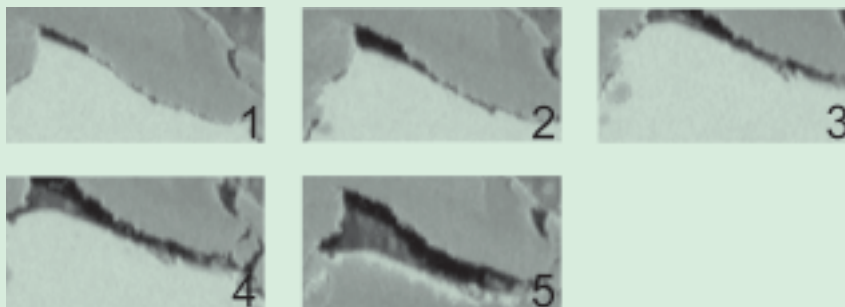
Makropory są specyficznym rodzajem spękań, nieodnotowanym dotychczas w literaturze [5]. Nie są one tworami liniowymi, jak np. spękania opisane przez Shina i Santamarinę [7], nie mają też jednego wyróżnionego kierunku. Charakter liniowego spękania można im przypisać tylko na początku ewolucji (fotografia 3, poz. 1), jednak w trakcie dalszego napełniania powie-

trzem pod ciśnieniem mogą przybrać kształt owalny lub na przykład kształt trójkąta krzywoliniowego (fotografia 3, poz. 5). Pierwsze spękania zapowiadające utworzenie się makropora mają na ogół kierunek styczny do lokalnego frontu zamakania. Jest to często kierunek zbliżony do poziomego, a więc nie pokrywa się z kierunkiem normalnym do mniejszego z naprężeń głównych, jak przyjmuje się w przypadku spękań opisanych przez Shina i Santamarinę.

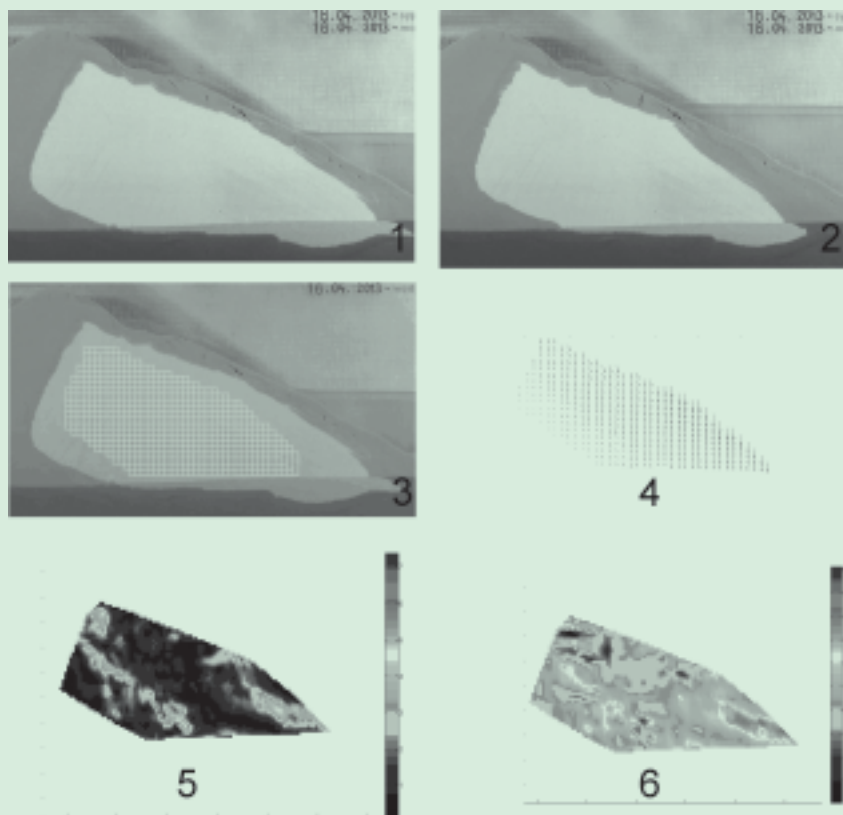
Analiza deformacji modeli metodą PIV

W celu określenia, jaki wpływ na deformację i stateczność modelu ma zamknięcie powietrza w jego korpusie, zastosowano analizę obrazu metodą PIV (lub DIC). PIV (Particle Image Velocimetry), nazywana także anemometrią obrazową, to metoda, która została stworzona i była wykorzystywana początkowo w mechanice płynów [8]. Jest techniką pełnego pola, która umożliwia pomiar przemieszczeń jednocześnie w całym obszarze modelu przez porównanie pary zdjęć, odpowiadających kolejnym stadiom deformacji.

Przykład analizy deformacji modelu wału przeciwpowodziowego pokazano na fotografii 4. W obliczeniach posłużono się programem geoPIV [5, 9, 10]. Fotografia 4, poz. 1 i 2 stanowią parę obrazów poddanych analizie i odpowiadają dwóm bliskim etapom tego samego badania, na których można zaobserwować obszar zamknięcia powietrza, obejmujący znaczną część korpusu modelu wału przeciwpowodziowego. Celem analizy było przede wszystkim stwierdzenie, czy za pomocą metody PIV można określić pole przemieszczeń, wynikające ze zmiany



Fot. 3. Dokładny widok ewolucji makropora zaobserwowanego w trakcie badania – widoczne jest jego położenie na granicy obszaru suchego i nawodnionego (od strony gruntu suchego) oraz fakt, że powstał on na całej szerokości modelu



Fot. 4. Analiza PIV dla obszaru zamknięcia powietrza: 1, 2 – analizowana para zdjęć; 3 – siatka do analizy obszaru zamknięcia; 4 – pole przemieszczeń odpowiadające tej siatce; 5 – pole odkształceń postaciowych otrzymane na podstawie pola przemieszczeń; 6 – pole odkształceń objętościowych, otrzymane na podstawie pola przemieszczeń

wysokości poziomu wody, widocznego na obu zdjęciach. Pierwszą rzeczą, którą ustalono, był brak możliwości analizy obszaru, który na pierwszym zdjęciu był suchy, a na drugim nawodniony. Wypełnienie porów gruntu przez wodę zmienia nie tylko kolor na fotografii, ale również lokalną teksturę (schemat jasności), co uniemożliwia rozpoznanie przez program geoPIV elementów, które uległy nawodnieniu w czasie po wykonaniu pierwszego ze zdjęć. W związku z tym wykonano analizę PIV tylko dla obszaru zamknięcia i siatki pokazanej na fotografii 4, poz. 3. Fotografia 4, poz. 4 pokazuje pole przemieszczeń otrzymane dla tej siatki, którego ciągłość świadczy o wystarczającej jakości i rozdzielczości analizowanych zdjęć. Na podstawie tego pola przemieszczeń policzono odkształcenia postaciowe i objętościowe w obszarze objętym analizą (fotografia 4, poz. 5 i 6). Na obu mapach odkształceń widać ślady wyraźnej lokalizacji w postaci pasm ścinania oraz pasm zagęszczenia i rozluźnienia ma-

teriału. Otrzymane wyniki świadczą o przydatności metody analizy obrazu do dalszego badania wpływu zamykania powietrza na deformację wałów przeciwpowodziowych.

Podsumowanie i wnioski

W efekcie przeprowadzonych badań stwierdzono, że mechanizm otwierania się makroporów poprzez utworzenie się obszaru zasilającego, w którym powietrze zostaje odcięte od kontaktu z atmosferą, może być jedną z przyczyn przyspieszonej degradacji wałów przeciwpowodziowych w warunkach intensywnego wezbrania powodziowego. Tworzenie się otwartych nieciągłości w korpusie wału ma bez wątpienia negatywny wpływ na jego wytrzymałość i powinno być brane pod uwagę w analizie stateczności.

Metoda PIV pozwala na określenie pola przemieszczeń i pól odkształceń modelu wału przeciwpowodziowego, pozwalając tym samym śledzić wpływ zamykania powietrza na przepływy

w korpusie wału oraz definiować powierzchnie nieciągłości jego struktury, powstałe w wyniku deformacji.

Streszczenie

Praca dotyczy badań na modelu fizycznym wału przeciwpowodziowego w małej skali, polegających na jego obserwacji w trakcie symulowanego wezbrania powodziowego. Szczególną uwagę poświęcono utracie ciągłości materiału budującego wał, przyjmującej postać otwartych makroporów. W pracy podjęto próbę analizy deformacji modelu metodą PIV.

Słowa kluczowe: wały przeciwpowodziowe, zamykanie powietrza, analiza obrazu.

Abstract

The paper relates to the small scale physical modeling of a flood embankment subjected to a simulated flood event. Particular attention was paid to the loss of continuity of the embankment material, receiving the form of open macro-pores. An attempt to analyze an embankment's deformation by the PIV method was undertaken.

Literatura

- [1] Borys M.: Przepisy i wymogi oraz aktualny stan obwałowań przeciwpowodziowych w Polsce, Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, 2007.
- [2] Zaradny H.: Experimental setup for simulation of the flow of water and pollutants. Raport IBW PAN, Gdańsk 1992.
- [3] Zaradny H.: Physical modeling of infiltration into dikes for stability purposes. The second term – 1993, Raport IBW PAN, Gdańsk 1993.
- [4] Zaradny H.: Physical modeling of infiltration into dikes for stability purposes. The final report, Raport IBW PAN, Gdańsk 1994.
- [5] Bogacz P.: Problemy degradacji wałów przeciwpowodziowych w zmiennych warunkach nawodnienia, rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2013.
- [6] Wheeler S. J.: The stress-strain behaviour of soils containing gas bubbles, The Degree of Doctor of Philosophy, The University of Oxford, Hilary 1986.
- [7] Shin H., Santamarina J.C.: Open-mode discontinuities in soils, *Geotechnique Letters* 1, 95 – 99, 2011.
- [8] Adrian R. J.: Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 23, 261 – 304, 1991
- [9] White D. J., Take W. A.: GeoPIV: particle image velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing. Manual for GeoPIV. Cambridge University Engineering, Department Technical Report, D-SOILS-TR322, 2002.
- [10] White D. J., Take W. A., Bolton M. D.: Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, *Géotechnique* 53 (7), 619 – 631, 2003.