

Paweł ZAWADZKI, Mateusz HÄMMERLING

Katedra Budownictwa Wodnego, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Department of Hydraulic Engineering, University of Life Sciences in Poznań

Zmiany uziarnienia na dnie poniżej budowli piętrzącej Changes of bed grain size distribution below hydraulic structure

Słowa kluczowe: rozmycie lokalne, grunt różnoziarnisty, sortowanie

Key words: local scour, non-uniform bed material, grain sorting

Wprowadzenie

Rozmycie lokalne powstaje zazwyczaj na wskutek zwiększonego jednostkowego natężenia przepływu oraz wzrastającej burzliwości strumienia, które mogą być związane z gwałtowną zmianą przekroju czynnego koryta, odskokiem hydraulicznym poniżej piętrzenia, zaburzeniami przepływu wywołanego elementami budowli hydrotechnicznych. Szczególny przypadek rozmycia lokalnego jest związany z zachwianiem równowagi dynamicznej między przepływem wody i transportem rumowiska. Zjawisko takie obserwuje się najczęściej poniżej zbiorników wodnych, w których w górnej części rumowisko jest akumulowane, a z których poprzez urządzenia zrzutowe do dolnego stanowiska wypływa woda ze stosunkowo dużą prędkością.

Opis procesu erozji, szczególnie zachodzącego na dnie zbudowanym z gruntów różnoziarnistych, jest złożony z uwagi na strukturę kinematyczną przepływu w dole rozmycia, jak również z powodu selektywnego wymywania ziaren o różnej średnicy i zmian składu uziarnienia. Skład wierzchniej warstwy zmienia się zarówno wraz z odległością od końca umocnienia, jak i z czasem upływającym od początku eksploatacji budowli piętrzącej.

Poznanie tych procesów możliwe jest dzięki pomiarom terenowym, jak również doświadczeniom laboratoryjnym. Wiele doświadczeń z powstawaniem rozmycia lokalnego w gruntach różnoziarnistych przeprowadzono w Laboratorium Wodnym Katedry Budownictwa Wodnego Akademii Rolniczej w Poznaniu. Wyniki pozwoliły na opracowanie modeli matematycznych – prognozowania wielkości rozmyć (Zawadzki i Błażejewski 2001) oraz rozkładu prędkości poniżej końca umocnienia (Hämmerling i in. 2007). Nie analizowano dotychczas zmian uziarnienia wierzchniej warstwy

dna zachodzących w trakcie selektywnego wymywania ziaren.

Metodyka badań

Materiał badawczy

Doświadczenia były przeprowadzane w korycie laboratoryjnym długości 13 m i szerokości 0,50 m. Koryto miało przekrój prostokątny, a szklane ściany boczne pozwalały na obserwacje powierzchni dna. W korycie, 27,4 cm ponad jego dnem, wykonano poziome, betonowe umocnienie długości 330 cm, za którym na długości 300 cm znajdował się rozmywany grunt (rys. 1).

W badaniach użyto pięciu rodzajów specjalnie przygotowanych gruntów różnoziarnistych, oznaczonych symbolami A, B, C, D i E. Grunty te utworzono z kilku zabarwionych frakcji o średni-

cach od 0,25 do 10 mm. Charakterystykę gruntów użytych do badań przedstawiono w tabeli 1. W ostatniej kolumnie tabeli 1 umieszczono wartość geometrycznego odchylenia standardowe średnicy ziaren, obliczoną z zależności:

$$\sigma_g = \sqrt{D_{84,1}/D_{15,9}} \quad (1)$$

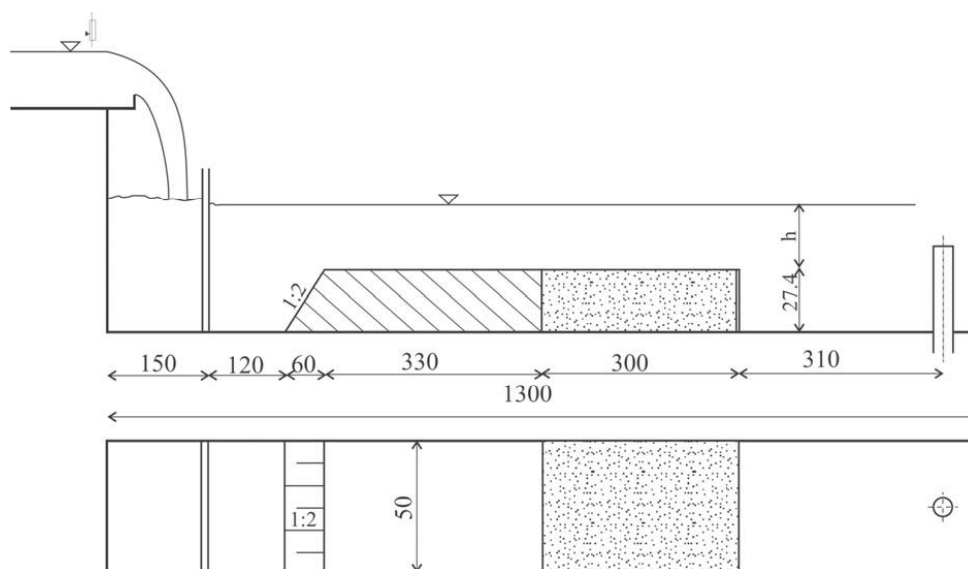
gdzie:

σ_g – geometryczne odchylenie standardowe średnicy ziaren,

$D_{84,1}$, $D_{15,9}$ – procentowa wagowa zawartość ziaren, których wraz z wyższymi jest odpowiednio 84,1 i 15,9%.

Jako kryterium różnoziarnistości przyjęto $\sigma_g > 1,35$ (Breusers i Raudkivi 1991).

Przed każdym doświadczeniem grunt na odcinku romywalnym był układany warstwami o miąższości 10 cm, zagęszczany ubijakiem i wyrównywany do poziomu umocnienia. W każdym powtó-



RYSUNEK 1. Przekrój podłużny i widok modelu hydraulicznego
FIGURE 1. Longitudinal section and view of hydraulic model

TABELA 1. Charakterystyczne parametry badanych gruntów
TABLE 1. Basic parameters of investigated soils

Grunt / Soil	D_5 [mm]	D_{50} [mm]	D_{95} [mm]	D_{100} [mm]	σ_g [-]
A	0,50	0,90	1,25	1,25	1,44
B	0,50	0,95	3,00	4,00	1,66
C	0,50	0,95	4,00	6,30	1,92
D	0,50	0,95	6,30	10,00	2,50
E	0,50	1,00	8,50	10,00	2,95

rzeniu, po upływie 15, 30, 60 120, 240, 360 i 480 minut od początku doświadczenia, zatrzymywano przepływ wody, mierzono w trzech przekrojach profil dna oraz fotografowano jego powierzchnię. Wszystkie doświadczenia prowadzono przy ustalonym przepływie równym $Q = 0,055 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i przy dwóch głębokościach wody mierzonych na końcu umocnienia: $h = 20 \text{ cm}$ i $h = 17 \text{ cm}$. W tabeli 2 przedstawiono podstawowe parametry przeprowadzonych doświadczeń.

Metodyka badań zmian uziarnienia

Jak wspomniano wcześniej, grunty użyte w badaniach utworzono, mieszając kilka frakcji, zabarwionych na następują-

ce kolory: zielony – średnice ziaren 6,3–10,0 mm, czerwony – 4,0–6,3 mm, biały – 2,5–4,0 mm, czarny – 1,25–2,5 mm, natomiast ziarna o średnicach 0,5–1,25 mm miały naturalną barwę. Założono, że zabarwienie frakcji pozwoli określić procentową zawartość ziaren o określonej średnicy bez zniszczenia wierzchniej, wysortowanej warstwy dna, a po zakończeniu pomiarów będzie można kontynuować doświadczenie. Przyjęto również, że w warunkach rozmycia czystą wodą oraz braku akumulacji selektywne wymywanie ziaren zachodzi tylko w wierzchniej warstwie o miąższości nie większej niż średnica największych ziaren. W każdym etapie doświadczenia, po zatrzymaniu przepływu wody, fotogra-

TABELA 2. Zestawienie parametrów wyjściowych doświadczeń
TABLE 2. Basic parameters of tests

Doświadczenie Test	Grunt Soil	Głębokość wody h [m] Water depth	Prędkość średnia u [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] Mean velocity	Odchylenie standardowe prędkości σ_u [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] Standard deviation	Czas trwania doświadczenia t [h] Test duration	Liczba powtórzeń Number of replicates
I	A	0,20	0,55	0,05	8	3
II	B	0,20	0,55	0,05	8	3
III	C	0,20	0,55	0,05	8–10	3
IV	D	0,20	0,55	0,05	8–60	3
V	E	0,20	0,55	0,05	8	3
VI	E	0,17	0,60	0,07	8–60	8

fowano dno rozmywane na odcinku 120 cm poniżej zakończenia umocnienia. Długość fotografowanego odcinka została dobrana tak, aby uchwycić przekrój z największą głębokością rozmycia.

Do analizy wybrano ziarna wyraźne, z dobrym kontrastem. Było to konieczne m.in. dlatego, że część zdjęć wykonywana była przez warstwę wody. Analizę przeprowadzono dla zdjęć wykonanych podczas doświadczeń IV, V i VI.

Metoda 1. W metodzie tej fotografia układana była pod przezroczystą siatką o wymiarach 1×1 mm. Na podstawie obrazu dna powierzchni 1 mm^2 przypisywana była barwa widocznego ziarna. Fotografie analizowane były w przekrojach co 5 cm od końca umocnienia, na całej szerokości dna, z wyłączeniem stref bezpośrednio przy ścianach bocznych koryta. W sąsiedztwie ścian na fotografiach widoczny był wpływ łączenia szklanych segmentów koryta na układ ziaren.

Metoda 2. W metodzie tej wykorzystano zeskanowane i przetworzone negatywy zdjęć w programie Adobe Photoshop. Komputerowa analiza uziarnienia wykonana przez Szulc (2007) po-

zwiała na zautomatyzowane obliczenie powierzchni zajmowanej przez zabarwiony materiał denny wskazanego koloru. W programie autorka wykorzystwała szeroko stosowaną metodę wyznaczenia obszarów uznawanych za jednakowe kolorystycznie poprzez porównanie wartości składowych koloru w przestrzeni barw RGB. Każda składowa koloru porównywana była oddzielnie z ustalonym przez użytkownika progiem czułości. Wyniki uzyskane z programu komputerowego przeniesiono do programu Microsoft Excel.

Wyniki

Analiza zmiany głębokości i profilu wyboju

Maksymalne głębokości rozmycia po 480 minutach doświadczenia zestawiono w tabeli 3. Jako maksymalną głębokość przejęto wartość uśrednioną z trzech powtórzeń oraz odchylenie standardowe mierzonej wielkości.

Maksymalna głębokość rozmycia wraz ze wzrostem zróżnicowania uziarnienia w gruncie początkowo nieznacznie rosła (doświadczenie I i II), a na-

TABELA 3. Maksymalne głębokości wyboju po 480 minutach doświadczenia
TABLE 3. Scour depth's maximum after 480 minutes of tests

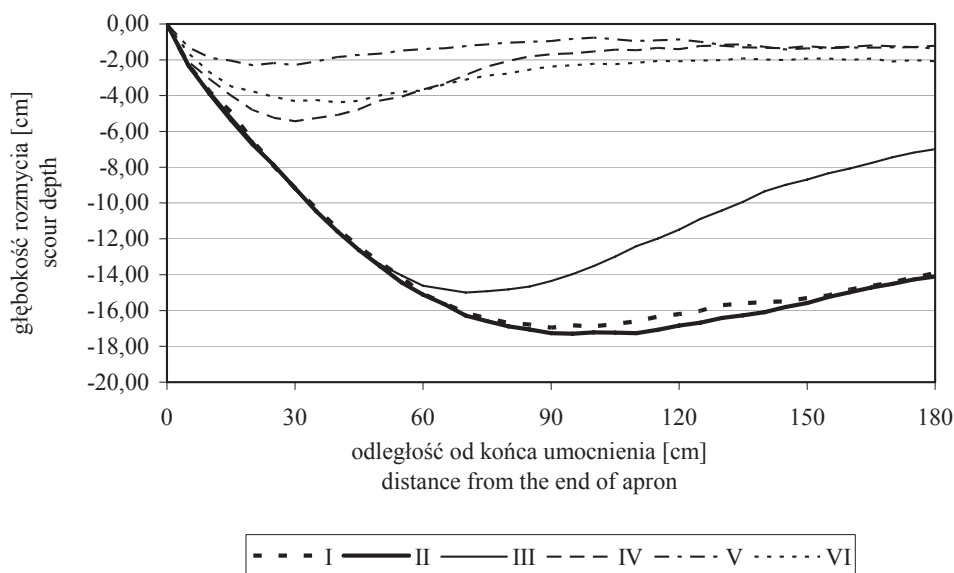
Doświadczenie Test	Maksymalna głębokość rozmycia Scour depth's maximum	Średnica, D_{\max} [mm] Diameter	σ_g wzór/equation (1)
I	17,4 \pm 0,3	0,2	1,44
II	18,1 \pm 0,6	0,4	1,66
III	14,7 \pm 0,5	0,6	1,92
IV	6,2 \pm 1,1	1,0	2,50
V	2,7 \pm 0,7	1,0	2,95
VI	4,7 \pm 0,7	1,0	2,95

stępnie wyraźnie malała. Zmniejszenie głębokości wody (doświadczenia VI) spowodowało zwiększenie głębokości rozmycia. Wartości odchylenia standardowego uśrednionej maksymalnej głębokości rozmycia rosły proporcjonalnie do wzrostu średnicy największego ziarna w rozmywanym gruncie i stopnia różnoziarnistości.

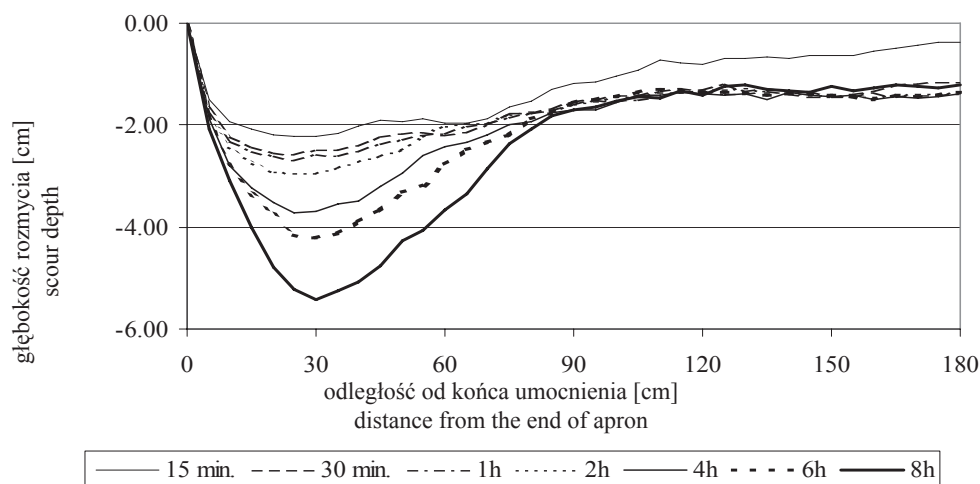
Na rysunku 2 pokazano profile podłużne dna na odcinku 180 cm wszystkich doświadczeń po 480 minutach. W żadnym z doświadczeń nie zaobserwowano rozmycia krawędziowego. Wybój rozpoczynał się bezpośrednio za umocnieniem łagodnym stokiem o niewielkiej krzywiźnie, wypukłością skierowaną w dół. Za najgłębszym miejscem wyboju dno stopniowo łagodnie podnosiło się, a dalej było prawie płaskie. Nachylenie przeciwstoku, a tym samym rozmiar wyboju, zależało wyraźnie od

uziarnienia gruntu rozmywalnego. Dla doświadczeń I, II i III jego nachylenie było bardzo niewielkie, co powodowało, że powstawał rozległy dół rozmycia o znacznych głębokościach w dużej odległości od końca umocnienia. Proces ich rozmycia był zbliżony do rozmywania gruntów równoziarnistych. Duże nachylenie przeciwstoku wyboju powstającego w doświadczenie IV znacznie ograniczyło zasięg dołu rozmycia, nawet przy jego dużej głębokości.

Na rysunku 3 przedstawiono rozwój dołu rozmycia w czasie trwania doświadczenia IV. Charakterystyczną cechą tego i kolejnych doświadczeń (V i VI) było to, że powierzchnia dna wyboju poniżej przekroju o największej głębokości osłaniana była przez ziarna największych frakcji, co ograniczyło głębokość rozmycia.



RYSUNEK 2. Profile podłużne wyboju po 8 godzinach
 FIGURE 2. Longitudinal profiles of scour hole after 8 hours



RYSUNEK 3. Profile wyboju w doświadczeniu IV
 FIGURE 3. Longitudinal profiles of scour hole in test IV

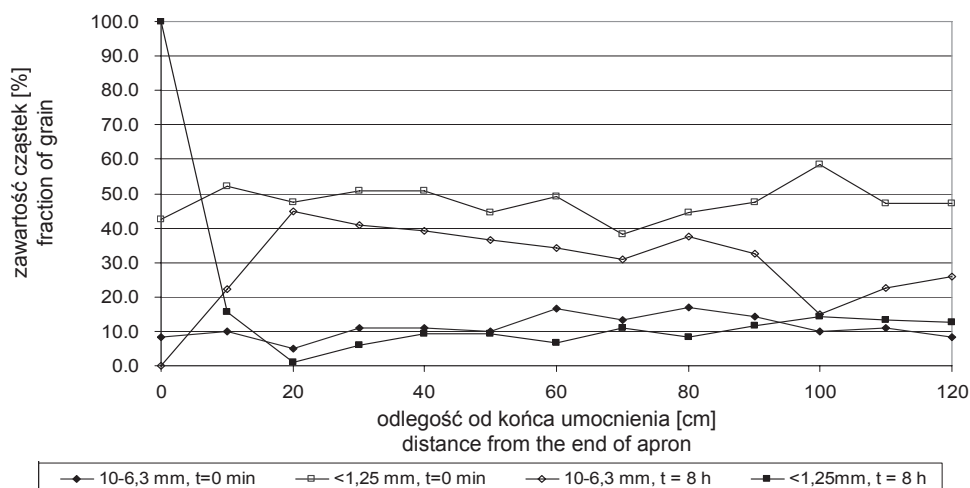
Analiza zamian uziarnienia na dnie

We wszystkich doświadczeniach obserwowano podobne zmiany uziarnienia na powierzchni dna w wyboju i poniżej niego. Zmiany te związane były ze strukturą kinematyczną przepływającej przez wybój wody i powstającym poniżej umocnienia walcem dennym. Walec ten pojawia się wskutek oderwania warstwy przyściennej i charakteryzuje się występowaniem minimalnych prędkości pulsacyjnych skierowanych przeciwnie do kierunku przepływu wody.

Stok wyboju od krawędzi umocnienia do przekroju maksymalnego rozmycia pokrywały ziarna najdrobniejszych frakcji. W miarę pogłębiania i odsuwania się maksymalnej głębokości rozmycia od umocnienia chwilowe prędkości przepływu przy dnie skierowane były przeciwnie do kierunku przepływu i transportowały drobne ziarna do krawędzi umocnienia. W wyniku takiego przemieszczania się ziaren o mniejszych średnicach przykry-

wały one ziarna największych frakcji, znajdujące się na dnie wyboju. Udział drobnych frakcji zmniejszał się wraz z oddalaniem się od krawędzi umocnienia i był najmniejszy w przekroju największej głębokości rozmycia. W materiale rozmywanym przygotowanym do doświadczeń V i VI ziaren o średnicy 0,5–1,25 mm było około 48%. W wyniku ich wymywania w przekrojach najgłębiej rozmytych ich udział małał do około 10%.

W przekroju o największej głębokości rozmycia największy udział w uziarnieniu wierzchniej warstwy dna miały ziarna największej frakcji, najtrudniejsze do transportowania. Na przykład po 480 minutach doświadczenia V procentowa zawartość ziaren o średnicy 6,3–10,0 mm wzrosła z 10 do 30%, a ziaren 4,0–6,3 mm z 15 do 34%. Lokalnie w przekrojach w pobliżu największej głębokości rozmycia udział tych frakcji w uziarnieniu wierzchniej warstwy wynosił odpowiednio 40 i 35% (rys. 4).



RYSUNEK 4. Uziarnienie dna wyboju – doświadczenie V
 FIGURE 4. Grain size distribution of scour hole bed's – test V

Poniżej przekrojów o największych głębokościach rozmycia (w odległości większej niż 80–100 cm od końca umocnienia) procentowy udział największych ziaren malał. Ziarna drobniejszych frakcji osłaniane były przed bezpośrednim oddziaływaniem płynącej wody. Skład uziarnienia wierzchniej warstwy nie ulega większym zmianom. Ułożeniu ziaren na dnie sprzyjało to, że chwilowe prędkości przydenne miały zawsze ten sam kierunek. Na powierzchni dna tworzyła

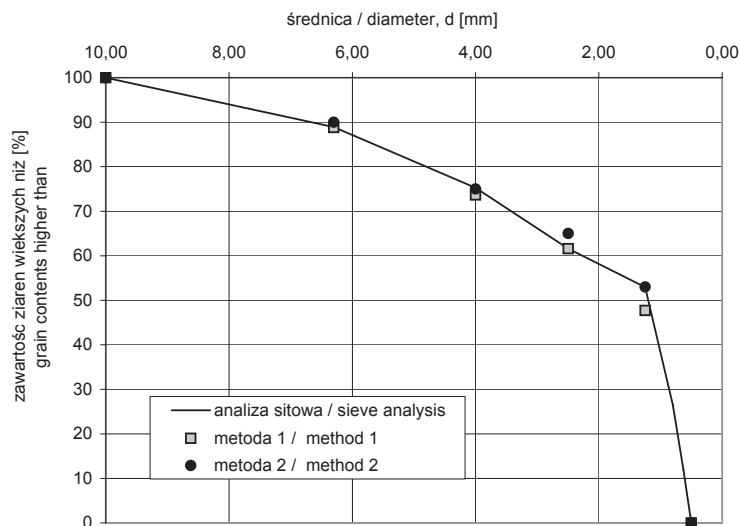
się charakterystyczna warstwa, którą można była uznać jako bruk.

Analizowana wierzchnia warstwa ma inne charakterystyki niż materiał pierwotny dna, w większości analizowanych przypadków średnice charakterystyczne rosną, a powstała warstwa jest bardziej odporna na rozmycie. W wyniku sortowania średnica d_{50} wzrasta cztero-, sześciokrotnie (tab. 4).

Wyniki analiz fotografii dna metodą 1. oraz metodą 2. są do siebie bardzo

TABELA 4. Zmiany uziarnienia dna w czasie trwania doświadczeń IV, V, VI
 TABLE 4. Changes of bed grain size distribution in period of tests IV, V, VI

Doświadczenie Test	Czas trwania [min] Test duration	$\frac{d_{50a}}{d_{50i}}$	σ_g wzór / equation (1)
IV	0	1,0	2,32
	480	1,2	3,29
V	0	1,0	2,91
	480	8,5	2,18
VI	0	1,0	2,91
	480	6,5	1,46



RYSUNEK 5. Porównanie wyników uzyskanych obu metodami i analizy sitowej – grunt E
 FIGURE 5. Comparison of results both methods and sieve analysis – soil E

zbliżone. Trudno o jednoznaczną ocenę zaproponowanych metod. Dokładność obu metod można ocenić, porównując analizę fotografii dna przygotowanego do doświadczenia (czas $t = 0$) z wynikami analizy sitowej gruntu użytego w eksperymencie. Na rysunku 5 linią ciągłą przedstawiono krzywą uziarnienia opracowaną na podstawie analizy sitowej, punktami – wyniki analizy przeprowadzonej metodą 1. lub 2.

Wnioski

1. Zaproponowana metodyka badań, polegająca na zabarwieniu ziaren różnych frakcji i fotografowaniu dna na różnym etapie rozwoju dołu rozmycia, pozwoliła na jakościowy i ilościowy opis zmian uziarnienia powierzchni. Wierzchnia warstwa dna powstająca w wyniku selektyw-

nego wymywania i sortowania ziaren nie była niszczona, co umożliwiło kontynuację doświadczenia.

2. Analiza fotografii wykonana dwiema metodami pozwoliła na opisanie zmian uziarnienia dna, zachodzących zarówno na długości rozmycia lokalnego powstającego poniżej umocnienia, jak i w czasie. W wyniku selektywnego wymycia dna wyboju, i poniżej niego, osłaniane było przez najgrubsze frakcje.
3. W porównaniu z początkiem doświadczenia średnica d_{50} wierzchniej warstwy rośnie kilkakrotnie, a stopień różnoziarnistości maleje.
4. Charakterystyczna warstwa bruku powstaje poniżej przekroju o największej głębokości rozmycia i tylko w gruntach, których wartość geometrycznego odchylenia standardowego średnicy ziaren $\sigma_g > 2$.

Literatura

- BREUSERS H.N.C., RAUDKIVI A.J. 1991: Scouring. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam/Brookfield.
- HÄMMERLING M., ZAWADZKI P., PRZEDWOJSKI B. 2007: Rozkład prędkości w dolnym stanowisku budowli piętrzącej. *Nauka Przyroda Technologie* 1, 2: 141–148.
- SZULC A. 2007: Zmiany uziarnienia na dnie wyboju powstającego poniżej umocnienia w gruntach różnoziarnistych. Maszynopis, Katedra Budownictwa Wodnego, Poznań.
- ZAWADZKI P., BŁAŻEJEWSKI R. 2001: Local Scour in Non-uniform Bed Material Below a Horizontal Solid Apron. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics* 48, 1: 3–17.

Summary

Changes of bed grain size distribution below hydraulic structure. The paper presents results of laboratory investigations of local scour in non-uniform non-cohesive bed material below a horizontal solid apron.

An experiment of local scouring conducted in a glass-sided rectangular flume under clear-water conditions with constant water discharge was performed. In this study several non-uniform soils consisted of the following coloured fractions: 0.5–1.25, 1.25–2.5, 2.5–4.0, 4.0–6.3, and 6.3–10.0 mm were used. Every scour hole had begun just below the solid apron having mild slope and downward concave shape. Similar changes in grain composition were observed in all tests; the hole bottom at the deepest section was covered by the largest grains. During the experiments it was found that bed armour coat had formed in soils with standard deviation of mean grain size $\sigma_g > 2$ and downstream of the maximum scour hole depth, only. Soils with $\sigma_g < 2$ did not create any armour coat, and single coarse grains increased turbulence behind them and accelerated erosion of finer grains.

Authors' address:

Paweł Zawadzki, Mateusz Hämmerling
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Katedra Budownictwa Wodnego
ul. Piątkowska 94A, 60-649 Poznań