

**Bogusław MICHAŁEC**

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki  
al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków  
e-mail: rmmichbo@cyf-kr.edu.pl

## Określenie rozmieszczenia osadów dennych w małym zbiorniku wodnym za pomocą funkcji względnego kształtu dna

Praca dotyczy określenia rozmieszczenia osadów dennych w małym zbiorniku wodnym Zesławice. Zbiornik ten zlokalizowany jest na rzece Dłubni w okolicach Krakowa i charakteryzuje się wysoką intensywnością zamulania. Obliczony średni roczny stopień zamulenia przed odmuleniem wynosił 3,0%, a po odmuleniu 2,0%. W celu prognozy rozmieszczenia osadów w zbiorniku wodnym wykorzystano metodę Rahmaniana i Banihashemiego polegającą na założeniu, że rozmieszczenie odkładów rumowiska w zbiorniku wodnym określa się po tzw. długim okresie eksploatacji. Do określenia długiego okresu eksploatacji posłużono się charakterystyką zamulania, tj. stopniem zamulenia, i wykazano, że gdy stopień zamulenia osiągnie co najmniej 50%, rozmieszczenie osadów w zbiorniku można opisać za pomocą krzywej odłożonego osadu, określoną jako funkcja względnego kształtu dna (Relative Depth Shape Function - RDSF).

Na podstawie wstępnej oceny stwierdzono, że metoda określenia rozmieszczenia osadów w zbiorniku wodnym za pomocą RDSF umożliwia uzyskanie wyników zbliżonych do określonych na podstawie pomiarów. Określenie możliwości zastosowania metody wymaga jej weryfikacji w oparciu o wyniki pomiarów zamulania dla różnej wielkości zbiorników.

**Słowa kluczowe:** mały zbiornik wodny, zamulanie, prognoza rozmieszczenia osadów

### Wstęp

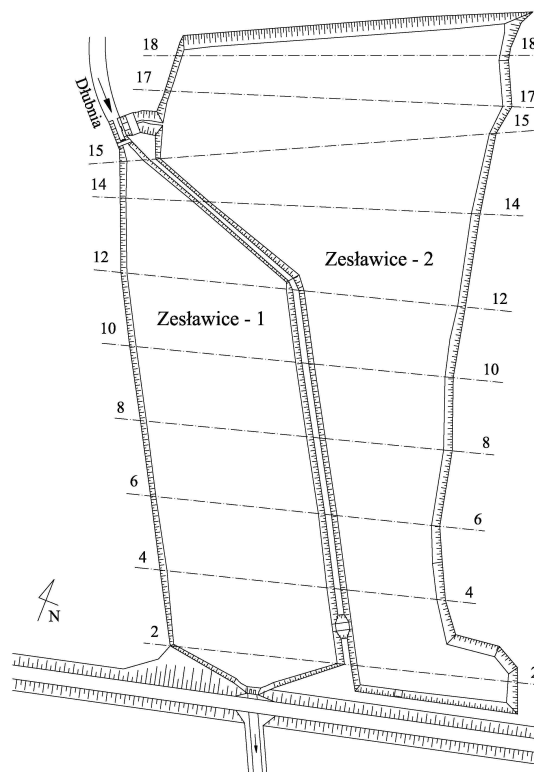
Zamulanie zaporowych zbiorników wodnych jest nieuniknionym procesem, powodującym różne skutki, między innymi zmniejszenie pojemności zbiornika utrudniające realizację funkcji zbiornika, zamulenie ujęć wodnych, podniesienie się zwierciadła wód wezbraniowych w zamulonej części zbiornika oraz w rzece w strefie oddziaływania spiętrzenia. Prognoza zamulania zbiornika wodnego, w tym prognoza rozmieszczenia odkładów rumowiska, ma szczególne znaczenie w zapewnieniu prawidłowej eksploatacji ujęć wodnych, poprzez przyjęcie na etapie projektowania prawidłowej ich lokalizacji, a także lokalizacji i typu urządzeń spustowych. Przede wszystkim umożliwia określenie czasu eksploatacji, po którego upływie konieczne jest usunięcie osadów rumowiska. Prognoza rozmieszczenia odkładów rumowiska może być również pomocna przy podjęciu decyzji o metodzie usunięcia rumowiska zdeponowanego w zbiorniku wodnym. Oceniając ilość osadów, ważne jest również określenie jego jakości ze względu na zawartość substancji szkodliwych, w tym metali ciężkich [1, 2].

Spośród metod empirycznych, służących prognozowaniu zamulania, czyli objętości rumowiska odłożonego w zbiorniku po upływie określonego czasu, można wymienić metodę Ortha z 1934 roku [3], Šamova z 1959 roku [3], Gončarova z 1962 roku [4] i Łapszenkova z 1957 roku [5]. Obecnie, ze względu na rozwój technik obliczeniowych, najczęściej stosuje się metody numeryczne, które wraz z analitycznymi zaliczane są do metod teoretycznych. Metody numeryczne obliczeń transportu rumowiska dają możliwości symulacji przepływu w jednym, dwóch i trzech wymiarach. Wśród wielu jednowymiarowych modeli numerycznych najczęściej stosowanych wyróżnić można modele HEC-6 [6], MIKE11, FLUVIAL [7] i MORMO [8]. Najpopularniejsze modele dwuwymiarowe: to MIKE21, TABS-MD, CCHED2, HSCTM2D i GSTARS [9]. Spośród modeli trójwymiarowych należy wymienić między innymi: SSIIM, ECOMSED, CCHED3, Delft-3D [5].

Dystrybucję osadów rumowiska w zbiorniku wodnym można określić za pomocą metod numerycznych i empirycznych. Spośród metod empirycznych służących prognozowaniu lub umożliwiających opis rozmieszczenia przestrzennego osadów w zbiornikach wodnych można wymienić między innymi metody: Cristofano [10], Borlanda i Millera [11], Lary [12], Hobbsa [13], Borlanda [14], a także nową metodę Rahmaniana i Banhashemiego [15]. Metody te zostały opracowane na podstawie analizy rozmieszczenia osadów w średnich i dużych zbiornikach wodnych, a ich zastosowanie w prognozowaniu rozmieszczenia rumowiska w małych zbiornikach wodnych wymaga weryfikacji. Dokonanie weryfikacji tych metod wymaga natomiast dysponowania wynikami pomiarów zamulenia małych zbiorników wodnych i opracowanym na ich podstawie rozmieszczeniem osadów. Prace badawcze dotyczące rozmieszczenia osadów prowadzone są od kilku lat w Katedrze Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. W pracy Michalca i Tarnawskiego [22] przedstawiono wstępną ocenę zastosowania metody Roosebooma i Annandale'a [16]. Ocena ta dotyczyła możliwości prognozowania rozmieszczenia rumowiska w małym zbiorniku wodnym w Krempnej. Szczegółową ocenę tej metody, opracowaną na podstawie badań procesu zamulania dwunastu małych zbiorników wodnych, zamieszczono w pracy Michalca [17]. Aplikacja wyżej wymienionych metod do określenia rozmieszczenia osadów dennych w małych zbiornikach wodnych nie zawsze jest możliwa. Według metody empirycznej Area - Increment Method (AIM), opracowanej przez Christofano, przyjmuje się miąższość osadu w części przyzaporowej zbiornika wodnego i zakłada się, że rumowisko będzie odkładać się jedynie w martwej strefie pojemności zbiornika [5]. Natomiast metoda Borlanda-Millera (Empirical Area-Reduction Method - EARM) została opracowana na podstawie wyników pomiarów zamulenia 30 zbiorników wodnych o pojemnościach od 49 mln m<sup>3</sup> do 37 mld m<sup>3</sup> [5]. Z tego też względu nie znajduje ona zastosowania w przypadku małych zbiorników wodnych, podobnie jak metoda Christofano.

Nową empiryczną metodą, służącą prognozowaniu rozmieszczenia osadów dennych w zbiorniku wodnym, jest opracowana przez Rahmaniana i Banhashemiego [15] metoda uwzględniająca funkcję kształtu zbiornika. Metoda ta została zweryfikowana przez jej autorów na podstawie wyników pomiarów zamulenia dziewięciu

irańskich zbiorników, których pojemności wynosiły od 33 mln m<sup>3</sup> do 3,48 mld m<sup>3</sup>. W niniejszej pracy podjęto próbę zastosowania tej metody do prognozowania rozmieszczenia osadów w małym zbiorniku wodnym w Zesławicach na rzece Dłubni. Do oceny możliwości zastosowania tej metody wykorzystano wyniki własnych pomiarów objętości zamulonej głównego zbiornika wodnego w Zesławicach.



Rys. 1. Zbiorniki wodne w Zesławicach - główny zbiornik wodny (nr I) i zbiornik boczny (nr II). Na rysunku zaznaczono przekroje pomiarowe od P-2 do P-18

Fig. 1. Water reservoirs at Zesławice - main water reservoir (nr I) and side water reservoir (nr II). Cross-sections (from P-2 to P-18) are marked in the figure

Mały zbiornik retencyjny w Zesławicach na rzece Dłubni, obok Krakowa, został wybudowany w latach 1964-1966. Elementem piętrzącym zbiornika jest zapora ziemna, zlokalizowana w km 8+700 rzeki Dłubni, zamykająca zlewnię o powierzchni 218,1 km<sup>2</sup> [18]. Pojemność początkowa zbiornika wynosiła 228 tys. m<sup>3</sup>. Z biegiem lat zbiornik ten ulegał nadmiernemu zamuleniu, a jego pojemność, określona na podstawie pomiarów wykonanych w 1983 roku, wynosiła niespełna 50% pojemności początkowej. Było to powodem podjęcia prac odmuleniowych. Zanim przystąpiono do odmulenia tego zbiornika wodnego, wykonano boczny zbiornik, nazywany zbiornikiem remontowym. Do budowy remontowego zbiornika wodnego przystąpiono w 1986 roku, w 1987 roku został on oddany do eksploatacji [18] (rys. 1). Zbiornik wodny wybudowany w latach sześćdziesiątych nazywano zbior-

nikiem głównym (Zesławice-1). Zadaniem bocznego zbiornika remontowego (Zesławice-2) było przejście funkcje zbiornika głównego, podczas gdy ten był odmulany.

## 1. Metoda

Pomiary objętości osadów rumowiska w głównym zbiorniku wodnym w Zesławicach wykonano w przekrojach poprzecznych, odpowiadających przekrojom z dokumentacji projektowej z lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia i powyższej z 1966 roku. Pomiary polegały na określeniu zmiany rzędnych dna zbiornika w przekrojach poprzecznych i w punktach poza przekrojami, stosując tzw. metodę punktów rozproszonych. Pomiary te wykonano sondą drążkową z łodzi. Na podstawie wyników pomiarów opracowano przekroje poprzeczne wraz z rzędnymi dna zbiornika. Przekroje poprzeczne umożliwiły określenie ilości rumowiska odłożonego w poszczególnych sektorach, ograniczonych sąsiednimi przekrojami poprzecznymi, oraz ilości rumowiska w całym zbiorniku wodnym. W przeprowadzonej analizie rozmieszczenia osadów wykorzystano materiały archiwalne dotyczące pomiarów objętości zamulenia wykonanych w zbiorniku głównym przed 1989 rokiem (tj. w latach: 1968, 1969, 1970, 1971, 1974, 1983) oraz wyniki pomiarów wykonanych przez zespół kierowany przez autora tego artykułu w następujących latach: 1989, 2005, 2008, 2009 i 2010. Wykonane pomiary wielkości zamulenia i opracowane przekroje poprzeczne umożliwiły obliczenie objętości odłożonego rumowiska w zbiornikach.

Wyniki pomiarów zamulenia zostały porównane z wynikami obliczeń osadów rumowiska według metody Rahmaniana i Banihashemiego [15]. Jak podają autorzy tej metody, określenie zgromadzonego osadu w zbiorniku wodnym w długim okresie eksploatacji wymaga:

1. Wykreślenia krzywej początkowej zależności względnej głębokości zbiornika od względnej jego objętości. Krzywa ta jest funkcją  $h_i/H = f(V_i/V)$ , w której:  $h_i/H$  jest względną głębokością, a  $V_i/V$  jest względną objętością.
2. Dla długiego okresu eksploatacji iloraz względnej objętości i względnej głębokości, określony dla każdego punktu krzywej początkowej  $h_i/H = f(V_i/V)$  stanowi krzywą odłożonego osadu, określoną jako funkcja względnego kształtu dna (RDSF), w postaci:

$$(\text{RDSF})_i = \left(\frac{V_i}{V}\right) \cdot \left(\frac{H}{h_i}\right) = \left(\frac{V_i}{V}\right) \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i}\right) \quad (1)$$

$$\text{gdzie } \alpha_i = \left(\frac{h_i}{H}\right). \quad (2)$$

Rahmanian i Banihashemi [15] nie zdefiniowali, w jaki sposób określa się długi okres eksploatacji. Można przyjąć, że jest to okres, po upływie którego tempo zamulania znacznie się zmniejsza, tzn. przyrost osadów rumowiska jest coraz mniejszy [17].

## 2. Wyniki badań

Wyniki pomiarów objętości odłożonego rumowiska w zbiorniku wodnym w Zesławicach w okresie przed odmuleniem i po odmuleniu zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Objętość odkładów rumowiska w zbiorniku wodnym Zesławice-1, określona na podstawie wyników pomiarów

Table 1. The volume of sediments deposited in water reservoir at Zesławice-1, defined according to measurements

Zbiornik wody Zesławice-1	Rok	Lata eksploatacji	Objętość odkładów rumowiska $10^3 \text{ m}^3$	Stopień zamulenia $S_z, \%$
Przed odmuleniem	1968	2	6,97	11,8
	1969	3	70,43	30,9
	1970	4	75,78	33,2
	1971	5	76,25	33,4
	1974	8	86,19	37,8
	1983	17	116,09	50,9
	1989	23	140,20	61,5
Po odmuleniu	1999	10	56,16	24,6
	2005	16	75,32	33,0
	2008	19	81,49	35,7
	2009	20	82,57	36,2
	2010	21	97,57	42,8

Główny zbiornik wodny w Zesławicach przed odmuleniem charakteryzował się największą intensywnością zamulania wynoszącą średniorocznie 2,7%. Współczynnik pojemności początkowej  $\alpha_0$  zbiornika głównego przed odmuleniem wynosił 0,663%. Współczynnik ten jest ilorazem pojemności początkowej zbiornika i sumy średniego rocznego dopływu wody (SSQ) do zbiornika. Średni roczny dopływ wody, wynoszący  $1,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , został określony na podstawie danych hydrologicznych IMGW z lat 1952-1992, określonych dla posterunku wodowskazowego Zesławice na rzece Dłubni, a także na podstawie pomiarów hydrometrycznych wykonanych w latach 2005-2010 przez zespół kierowany przez autora pracy [19]. Po odmuleniu i skierowaniu części dopływającej wody do wybudowanego remontowego zbiornika bocznego zmniejszył się średni roczny dopływ wody do zbiornika głównego. Przepływ SSQ skierowany w węźle wodnym do zbiornika głównego wynosi  $0,709 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  [19]. W tak powstałych warunkach, przy wzroście współczynnika pojemności początkowej  $\alpha_0$  do wartości 1,018%, nastąpiło zmniejszenie intensywności zamulania zbiornika, a średni roczny stopień zamulenia zbiornika głównego po odmuleniu wynosi 2,0% [17, 20].

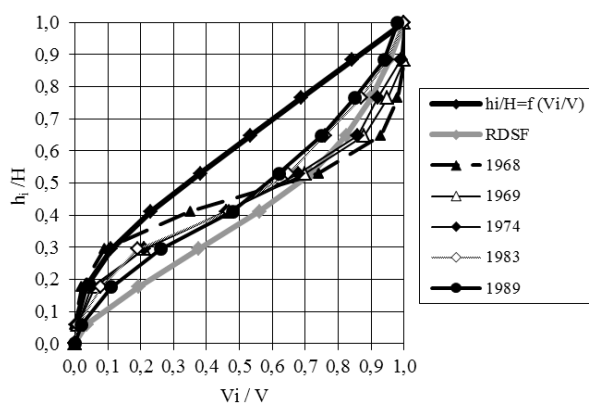
W tabeli 2 zamieszczono względne głębokości i względne pojemności zbiornika Zesławice-1, opracowane dla wydzielonych poziomów w czaszy zbiornika. Dane te umożliwiły określenie parametrów funkcji względnego kształtu dna (Relative Depth Shape Function - RDSF).

Tabela 2. Parametry funkcji względnego kształtu dna (Relative Depth Shape Function RDSF), opracowane dla głównego zbiornika wodnego w Zesławicach

Table 2. Parameters of Relative Depth Shape Function (RDSF) elaborated for the main water reservoir in Zesławice

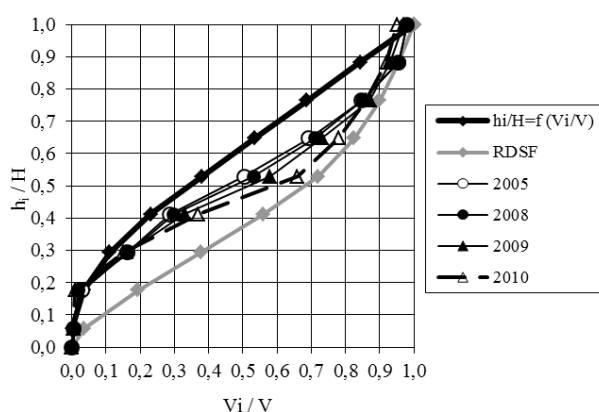
Poziom m n.p.m.	Suma pojemności m <sup>3</sup>	Względna głębokość h <sub>i</sub> /H	Względna pojemność V <sub>i</sub> /V	1/α	RDSF
211,60	0	0,00	0,00	0,00	0,00
211,80	489	0,06	0,00	17,00	0,04
212,20	7756	0,18	0,03	5,67	0,19
212,60	25 237	0,29	0,11	3,40	0,38
213,00	52 648	0,41	0,23	2,43	0,56
213,40	86 916	0,53	0,38	1,89	0,72
213,80	121 680	0,65	0,53	1,55	0,82
214,20	156 782	0,76	0,69	1,31	0,90
214,60	192 222	0,88	0,84	1,13	0,96
215,00	228 000	1,00	1,00	1,00	1,00

Funkcja względnego kształtu dna, w postaci krzywej prognozującej odłogi rumowiska, została przedstawiona na rysunkach 2a i 2b wraz z krzywymi dystrybucji osadu opracowanymi na podstawie danych uzyskanych w poszczególnych latach, w których wykonano pomiary zamulania.



Rys. 2. Krzywe dystrybucji osadów w głównym zbiorniku wodnym Zesławice-1 wraz z krzywą początkowej zależności względnej głębokości zbiornika od względnej jego objętości  $h_i/H = f(V_i/V)$  i z krzywą prognozującą rozmieszczenie osadów - krzywą RDSF

Fig. 2. Cumulative depth sediment distribution curves in main water reservoir Zesławice-1, described with function  $h_i/H = f(V_i/V)$ , with forecasted Relative Depth Shape Function - RDSF curve



Rys. 3. Krzywe dystrybucji osadów w bocznym zbiorniku wodnym Zesławice-1 wraz z krzywą początkowej zależności względnej głębokości zbiornika od względnej jego objętości  $h_i/H = f(V_i/V)$  i z krzywą prognozującą rozmieszczenie osadów - krzywą RDSF

Fig. 3. Cumulative depth sediment distribution curves in side water reservoir Zesławice-1, described with function  $h_i/H = f(V_i/V)$ , with forecasted Relative Depth Shape Function - RDSF curve

### 3. Dyskusja

W zbiorniku wodnym Zesławice-1 przed odmuleniem (rys. 2) w pierwszych latach eksploatacji (tj. w 1968, 1969 i 1974 roku) rumowisko odkłada się głównie w płytszych strefach zbiornika, znajdujących się w części wlotowej do zbiornika. W części przyzaporowej, gdzie  $h_i/H$  wynosi od 0,0 do 0,3, ilość rumowiska odkładanego jest niewielka - krzywe sumowe osadów rumowiska nieznacznie różnią się od krzywej początkowej zależności względnej głębokości zbiornika od względnej jego objętości  $h_i/H = f(V_i/V)$ . W kolejnych latach eksploatacji, tj. w 17 i 23 roku pracy zbiornika (odpowiednio krzywe dla 1983 i 1989 roku na rysunku 2), następuje coraz bardziej proporcjonalne rozmieszczenie rumowiska na każdej głębokości względnej. Przebieg krzywej dystrybucji rumowiska, określonej na podstawie pomiarów zamulania w 1989 roku, jest najbliższy krzywej prognozującej rozkład rumowiska - Relative Depth Shape Function (1), oznaczonej na rysunku 2 jako krzywa RDSF. Krzywa ta, reprezentująca pionowy rozkład rumowiska, została opracowana na podstawie danych pomiarowych odpowiadających zamulaniu zbiornika Zesławice-1, wynoszącemu ponad 61%. Można zatem stwierdzić, że po osiągnięciu zamulenia wynoszącego ponad 50%, co nastąpiło po siedemnastym roku eksploatacji zbiornika, krzywa RDSF może służyć opisowi rozmieszczenia osadów w tym zbiorniku.

Analizując krzywe dystrybucji rumowiska zamieszczone na rysunku 3, można stwierdzić, że po odmuleniu tego zbiornika dystrybucja osadów rumowiska przebiega podobnie jak przed odmuleniem, tzn. w pierwszych latach eksploatacji wrażliwe względne objętości osadów rumowiska gromadzone w części zbiornika, charakteryzujących się wysokimi wartościami głębokości względnych. Są to głębokości względne odpowiadające strefom dna zbiornika znajdującym się w części

środkowej i wlotowej do zbiornika. Ze względu na rozdział wody w węźle wodnym, kierującym część dopływu wody do zbiornika bocznego, niewielkie ilości rumowiska dopływają i są odkładane w częściach znajdujących się najbliżej zapory. Stąd na rysunku 3 układ krzywych dystrybucji rumowiska określonych na podstawie pomiarów zamulania różni się znacząco od prognozowanej dystrybucji osadów dla głębokości względnych od 0,0 do 0,5. Dystrybucja rumowiska określona na podstawie ostatniego pomiaru, tj. wykonanego w 2010 roku, przedstawiona na rysunku 3, odpowiada w znacznym stopniu prognozowanej dystrybucji rumowiska (krzywa RDSF). Różnica wyników wynosi średnio zaledwie 5%, a stopień zamulenia zbiornika wynosi ponad 42%. Należy jednak zwrócić uwagę, że zmiana warunków przepływu wody przez ten zbiornik, w wyniku rozdziału wody, spowodowała nie tylko zmniejszenie się ilości rumowiska odkładanego w częściach zbiornika znajdujących się bliżej zapory (głębokości względne od 0,0 do 0,5), lecz również przyczyniła się do intensywnego odkładania się rumowiska w części wlotowej do tego zbiornika. W tej części odkłady rumowiska spowodowały utworzenie się wyspy (odkłady ponad poziomem zwierciadła wody w zbiorniku). Stąd na rysunku 3 dla głębokości względnej wynoszącej 1,0 względne objętości odkładów wynosiły od 0,95 do 0,98. Tworzenie się odkładów rumowiska ponad zwierciadłem wody stwierdzono również w tym zbiorniku przed jego odmuleniem - krzywa dystrybucji rumowiska opracowana według pomiarów wykonanych w 1989 roku [21] (rys. 2). Tworzenie się wysp z odkładów rumowiska powoduje rozbieżności w prognozowaniu dystrybucji osadów za pomocą krzywej RDSF.

## Wnioski

Główny zbiornik wodny w Zesławicach charakteryzuje się wysoką intensywnością zamulania. Średni roczny stopień zamulenia zbiornika wynosił 3,0% przed odmuleniem i 1,61% po odmuleniu. Ze względu na pojemność badany zbiornik klasyfikowany jest jako mały zbiornik wodny, charakteryzujący się niskimi wartościami współczynnika pojemności. Stwierdzono, że mały zbiornik wodny charakteryzujący się niższą wartością współczynnika pojemności początkowej  $\alpha_0$  ulega intensywniejszemu zamulaniu. Odpowiada to warunkom eksploatacji badanego zbiornika w okresie po jego odmuleniu.

Zmiana warunków przepływu wody w zbiorniku głównym w Zesławicach, w wyniku skierowania części przepływu wody i rumowiska do zbiornika bocznego, wpłynęła na zmianę warunków transportu i sedymentacji rumowiska oraz na rozmieszczenie odkładów sedymentów w zbiorniku. Zmiana warunków przepływu wody przez badany zbiornik spowodowała nie tylko zmniejszenie się ilości rumowiska odkładanego w części zbiornika znajdującej się bliżej zapory, lecz również przyczyniła się do intensywnego odkładania się rumowiska w części wlotowej do tego zbiornika.

Na podstawie wstępnej oceny można stwierdzić, że zaproponowana przez Rahmaniana i Banihashemiego [15] metoda określenia rozmieszczenia osadów



w zbiorniku wodnym za pomocą Relative Depth Shape Function (RDSF) umożliwia uzyskanie zbliżonych wyników do określonych na podstawie pomiarów. Określenie możliwości zastosowania tej metody wymaga przeprowadzenia jej weryfikacji na podstawie wyników pomiarów zamulania nie tylko małych, ale średnich i dużych zbiorników wodnych.

Analizując krzywe dystrybucji rumowiska w badanym zbiorniku wodnym, można stwierdzić, że gdy stopień zamulenia zbiornika wodnego przekroczy wartość 50%, rozmieszczenie osadów rumowiska w zbiorniku można opisać za pomocą krzywej RDSF. Można zatem wstępnie przyjąć, że zdefiniowany przez autorów tej metody tzw. „długi okres eksploatacji” dotyczy okresu, po upływie którego stopień zamulenia zbiornika osiąga 50%.

## Literatura

- [1] Rosińska A., Dąbrowska L., PCB i metale ciężkie w osadach dennych zbiornika zaporowego w Poraju, *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2008, 11, 4, 455-469.
- [2] Haziak T., Czaplicka-Kotas A., Ślusarczyk Z., Szalińska E., Przestrzenne zmiany stężeń cynku w osadach dennych Zbiornika Czorszyńskiego, *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2013, 16, 1, 57-68.
- [3] Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A., *Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych*, PWRiL, Warszawa 1982.
- [4] Wiśniewski B., Kutrowski M., *Budownictwo specjalne w zakresie gospodarki wodnej. Zbiorniki wodne. Prognozowanie zamulania. Wytyczne instruktażowe, Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego „Hydroprojekt”, Warszawa 1973.*
- [5] Batuca G.D., Jordaan M.J. Jr., *Silting and Desilting of Reservoirs*, A.A. Balkema, Rotterdam 2000.
- [6] Thomas W.A., Prashum A.L., *Mathematical model of scour and deposition*, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 1977, 110, HY11, 1613-1641.
- [7] Chang H.H., *Fluvial Processes in River Engineering*, John Wiley and Sons, New York 1988.
- [8] Hunziker R.P., *Fraktionsgewisser Geschiebetransport. Versuchsanstalt fuer Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zuerich* 1995, *Mitteilungen* Nr 138, 209.
- [9] Morris G.L., Fan J., *Reservoir Sedimentation Handbook. Design and Management of Dams, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use*, McGraw-Hill, New York 1998.
- [10] Cristofano E.A., *Area-Increment Method for Distributing Sediment in a Reservoir*, US Bureau of Reclamation, Albuquerque, New Mexico 1953.
- [11] Borland W.M., Miller C.R., *Distribution of sediment in large reservoirs*, *Journal Hydraulic Engineering, Div-ASCE* 1958, 84, 1-18.
- [12] Lara J.M., *Revision of the procedure to compute sediment distribution in large reservoirs*, US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado 1962.
- [13] Hobbs B.L., *Forecasting distribution of sediment deposits in large reservoirs. Appendix I, ETL 1110-2-64*, Department of the Army, Office of the Chief of Engineers, Washington 1969.
- [14] Borland W.M., *Reservoir Sedimentation*, [in:] *River Mechanics*, ed. H.W. Shen, Water Resources Publications 1970, Chapter 29, 1-38.
- [15] Rahmanian M.R., Banihashemi M.A., *Introduction of a new empirical reservoir shape function to define sediment distribution pattern in dam reservoirs*, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 2012, 36, C1.

- [16] Rooseboom A., Annandale G.W., Reservoir sedimentation and stream power, Proceedings of the D.B. Simons symposium on Erosion and Sedimentation, Colorado State University 1983.
- [17] Michalec B., Ocena intensywności procesu zamulania małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły, Zesz. Nauk. UR Krak. 2008, 451, Rozprawy 328.
- [18] Dokumentacja techniczna jednostadiowa zbiornika retencyjnego, Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego i Melioracji w Krakowie, 1984.
- [19] Pęczek K., Warunki hydrauliczne transportu i sedymentacji rumowiska unoszonego w dwóch zbiornikach wodnych w układzie równoległym na rzece Dłubni. Rozprawa doktorska, promotor B. Michalec. Maszynopis, Archiwum Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki UR w Krakowie, 2011.
- [20] Michalec B., Wpływ rozdziału wód w węźle wodnym na intensywność zamulania dwóch zbiorników wodnych w układzie równoległym, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska 2012, 21 (3), 57, 141-150.
- [21] Bednarczyk T., Lubowiecka T., Silting of small water reservoirs, Transport and Sedimentation of Solid Particles, Praha 1995, 2-7.

### **Qualification of the Distribution of Bottom Sediments in Small Water Reservoir Using the Relative Depth Shape Function**

The attempt of the application of the new method of forecasting the sediment distribution in the water reservoir was introduced in this work. The researches of silting and the sediment distribution were conducted in the small water reservoir at Zesławice near Cracow. Reservoir came into operation in 1966. After sixteen years of exploitation it was silted in 50%. The side reservoir, which took over the functions of the main reservoir during the period of its desilting, was built in 1989. After desilting of the main reservoir the side reservoir was supplied with water from the common water knot on river Dłubnia. A change in water flow conditions in main reservoir at Zesławice, as a consequence of redirecting part of water flow and sediment to the side reservoir Zesławice alters the conditions of transport and sedimentation, and may affect the distribution of sediments in the reservoir. The quantity of sediment deposited in parts nearer dam of the reservoir being got smaller in this effect. Decrease of the water flow intensity and water flow velocity resulted in intensive layering of sediment in the inlet part of main reservoir. The examined small water reservoir at Zesławice is characterized by high silting rate. The calculated average annual silting ratio equals: 3.0% - before desilting, 2.0% - after desilting.

Having the results of long-term silting measurements of the small reservoirs at Zesławice, an attempt was made to apply the method presented by Rahmanian and Banihashemi for prediction of sediment distribution in small reservoirs. Rahmanian and Banihashemi stated that distribution of sediment deposition in water reservoir is defined for a long duration operation. Silting characteristics - i.e. silting ratios were used in order to determine the long duration operation, and it was demonstrated that when the silting ratio has reached at least 50%, the sediment deposition in the reservoir may be described by empirical reservoir Relative Depth Shape Function (RDSF). According to this method for a long duration operation, relative volume divided by relative level gives relative cumulative sediment volume concept for each point on relative curve of volume-depth, where Relative Depth Shape Function (RDSF) is related to cumulative sediment deposition in different heights from reservoir bed.

It was affirmed on the basis of the preliminary appraisal that the method of the qualification of the sediment distribution in the water reservoir using the Relative Depth Shape Function (RDSF) made possible the obtainment of approximate results to determined on the basis measurements. The qualification of the possibility of the use of this method requires execution of next verification on basis of the results of the measurements of silting of not only small, but average and large water reservoirs.

**Keywords:** small water reservoirs, silting, sediment distribution forecast