

**Bogusław MICHAŁEC<sup>1</sup>**  
**Marek TARNAWSKI<sup>2</sup>**  
**Tomasz KONIARZ<sup>3</sup>**

## **ZAMULENIE JAKO CZYNNIK OGRANICZAJĄCY ZASOBY WODNE ZBIORNIKÓW MAŁEJ RETENCJI**

Zarządzanie zasobami wodnymi w małych zlewniach opierać się musi na informacjach hydrologicznych a także eksploatacyjnych obiektów hydrotechnicznych. Informacja o stanie zamulenia zbiorników wodnych a często i rozmieszczenia osadów w ich czaszy jest istotna dla właściwego funkcjonowania obiektów. Pomiarami zamulenia objęto dwa zbiorniki: zbiornik Cierpisz, na rzece Tuszymce i zbiornik Brzózka Królewska na potoku Tarlaka. Obydwa zbiorniki zlokalizowane są w małych zlewniach rolniczych. Przedstawione w pracy wyniki pomiarów zamulania, umożliwiły podjęcie próby oceny zastosowania metod Christofano, Ortha-Šamova i Roseboom-Annandale i opracowania prognozy zamulania. Obliczona na podstawie przeprowadzonych pomiarów objętość sedymentu zdeponowana w zbiorniku wodnym Cierpisz w latach 2009 i 2011 wynosiła odpowiednio 8,75 i 9,47 tys. m<sup>3</sup>, a w zbiorniku Brzózka Królewska w latach 2010 i 2012 jest odpowiednio równa 3,36 i 3,55 tys. m<sup>3</sup>. Przyrost odкладów między pomiarami w zbiornikach wyniósł 2,1% w Cierpiszu i 0,35% w Brzózce Królewskiej. Obliczona prognoza wykazała zmniejszenie pojemności zbiorników Cierpisz i Brzózka Królewska o 50% co nastąpi odpowiednio po upływie 40 i 110 lat. Stwierdzono, że metoda Christofano umożliwia jedynie określenie ogólnego trendu rozmieszczenia rumowiska w małym zbiorniku wodnym, a rozbieżności wyników wykluczają stosowanie metody Ortha-Shamova. Wykazano, że istnieje możliwość zastosowania metody Roseboom-Annadale'a do prognozowania rozmieszczenia osadów w małych zbiornikach wodnych, lecz określenie warunków jej stosowania wymaga dodatkowych badań.

**Słowa kluczowe:** mały zbiornik wodny, osad denny, rozmieszczenie osadów, stopnia zamulenia

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Bogusław Michalec, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, al. A. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, tel.: 12 662 40 52, rmmichbo@cyf-kr.edu.pl

<sup>2</sup> Marek Tarnawski, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. A. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, tel.: 12 662 41 05, rmtarnaw@cyf-kr.edu.pl

<sup>3</sup> Tomasz Koniarz, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. A. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków.

## 1. Wprowadzenie

Właściwe zarządzanie zasobami wodnymi małych zbiorników wodnych wymaga dysponowania nie tylko informacją o ilości wody dopływającej do zbiornika, lecz również danych o jego aktualnej pojemności. Ze względu na intensywne tempo zamulania małych zbiorników wodnych ich pojemność ulega szybkiej redukcji. Według Hartunga [4] średnia roczna strata pojemności w przypadku dużych zbiorników wynosi 0,25%, średnich zbiorników 0,5%, a małych 3,0%. Według Lary i Pemberton [5] pojemność średnich zbiorników wodnych na świecie przekracza 100 mln m<sup>3</sup>, a dużych zbiorników wodnych jest większa od 1 mld m<sup>3</sup>. W Polsce pojemność zbiorników zaporowych nie przekracza 0,5 mld m<sup>3</sup>, a większość z nich charakteryzuje się znacznie mniejszymi pojemnościami, stąd też stosowany jest w Polsce bardziej szczegółowy podział zbiorników o małych pojemnościach. Według Mioduszewskiego [9] duże zbiorniki zaporowe charakteryzują się pojemnością większą od 1 mln m<sup>3</sup>, a ich wysokość piętrzenia nie jest mniejsza niż 5,0 m. Najczęściej jednak przyjmuje się, że małe zbiorniki wodne to obiekty, których pojemność nie jest większa od 5 mln m<sup>3</sup>. To kryterium zostało ustalone i obowiązuje w programie małej retencji w myśl „Porozumienia” zawartego w dniu 21 grudnia 1995 roku między Ministrem Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej a Ministrem Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa [11].

W porównaniu średnich i dużych zbiorników wodnych proces zamulania małych zbiorników w Polsce jest stosunkowo słabo rozpoznany. W latach 1996-2008 autorzy przeprowadzili badania dwunastu małych zbiorników wodnych dorzecza górnej Wisły. Badania te pozwoliły określić średni roczny stopień zamulenia, wynoszące od 0,06 do 6,38% [6, 8]. Określony średni roczny stopień zamulenia ( $S_z$ ), jako stosunek objętości odkładów rumowiska do pojemności pierwotnej zbiorników, umożliwił opracowanie zależności ( $S_z$ ) w funkcji intensywność zamulania  $S_i$ , określanej jako stosunek początkowej pojemności zbiornika wodnego ( $V_p$ ), do średniej rocznej objętości rumowiska dopływającego do zbiornika ( $R_u$ ) [7]. Zależność ta umożliwia jedynie w sposób szacunkowy określenie średniej rocznej redukcji pojemności zbiornika projektowanego lub eksploatowanego. Prognoza szczegółowa, opracowana według wytycznych instruktarzowych [13], może stanowić podstawę do określenia zmiany pojemności zbiornika w czasie jego eksploatacji, pod warunkiem prawidłowego określenia ilości rumowiska dopływającego do zbiornika i zdolności zbiornika do zatrzymywania rumowiska. Według wytycznych instruktarzowych zdolność tę wyznaczać należy z nomogramu Łopatina. Nomogram ten ze względu na ograniczenia nie może być stosowany w przypadku prognozowania zamulania małych zbiorników wodnych. Jak wykazały badania Michalca [8], zdolność małego zbiornika wodnego do zatrzymywania rumowiska lepiej odzwierciedla wartość wyznaczona z nomogramu Churchilla.

Tematyka związana z określeniem redukcji pojemności małych zbiorników wodnych okazuje się coraz bardziej aktualnym zagadnieniem. Związane jest to z rozpoczętą realizacją budowy zbiorników wodnych w ramach programu małej retencji. Poza określeniem dyspozycyjnej pojemności zbiornika wodnego i określeniem jej redukcji w czasie eksploatacji ważne jest również posiadanie informacji o sposobie rozmieszczenia osadów w czaszy zbiornika wodnego. Wyznaczenie w projektowanym małym zbiorniku wodnym stref intensywnego odkładania się rumowiska umożliwi m.in. wskazanie właściwego miejsca do lokalizacji ujęć wody, czy też opracowanie sposobu usunięcia osadów. Istotne znaczenie poznania procesu rozmieszczenia osadów w czaszy małego zbiornika wodnego może być pomocne w pracach projektowych, związanych z przyjęciem kształtu zbiornika, czy też przyjęcia metod lub rozwiązań technicznych zabudowy części wlotowej zbiornika, powodujących zmniejszenie dopływu rumowiska.

Empiryczne metody służące prognozowaniu rozmieszczenia osadów zostały opracowane w wyniku badań procesu zamulania dużych zbiorników wodnych. Spośród tych metod można wyróżnić metodę Area – Increment Method (AIM), opracowaną przez Christofano w 1953 roku [2], Borlanda-Millera (Empirical Area-Reduction Method – EARM) z 1958 roku [3], semi-empiryczną metodę Ortha-Šamova opracowaną w 1954 roku [2], a także metodę Rooseboom-Annandale [1]. Zastosowanie tych metod do określenia rozmieszczenia odkładów rumowiska w małych zbiornikach wodnych może być ograniczone lub niemożliwe, czego przykładem jest metoda Borlanda-Millera opracowana na podstawie wyników pomiarów zamulenia 30 dużych zbiorników wodnych o pojemnościach od 49 mln m<sup>3</sup> do 37 mld m<sup>3</sup>.

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów zamulenia dwóch małych zbiorników wodnych i podjęto próbę oceny możliwości zastosowania metod Christofano, Ortha-Šamova i Rooseboom-Annandale. Ponadto wykazano, że pojemność badanych małych zbiorników wodnych zostanie znacznie zmniejszona w krótkim okresie eksploatacji.

## 2. Metodyka badań

Pomiary objętości odkładów rumowiska wykonano w dwóch zbiornikach wodnych, to jest w zbiorniku Cierpisz, na rzece Tuszymce i w zbiorniku Brzózka Królewska na potoku Tarlaka, których zapory zamykają małe zlewnie rolnicze. Zapora zbiornika Cierpisz znajduje się w km 23+700 biegu rzeki Tuszymki. Powierzchnia zlewni rzeki Tuszymki wynosi 54,5 km<sup>2</sup>. Lasy stanowią ponad 43% powierzchni zlewni. Zlewnia potoku Tarlak, której powierzchnia jest równa 30,4 km<sup>2</sup>, jest w ponad 62% użytkowana rolniczo. Zbiornik wodny Cierpisz, o pojemności 34,50 tys. m<sup>3</sup>, został oddany do eksploatacji w 1956 roku. Rzędna piętrzenia wody w tym zbiorniku wynosi 198,90 m n.p.m. Na przełomie lat 1990-1991 zostały wykonane prace odmuleniowe polegające na wydobyciu ok.

15 tys m<sup>3</sup> sedymentu, przywracając tym samym zbiornikowi jego pierwotną pojemność. Stopień zamulenia determinujący podjęcie renowacji obiektu wynosił 43,5%.

Pojemność zbiornika Brzózka Królewska, wybudowanego w 1978 roku, wynosi 48,97 tys. m<sup>3</sup>. Zapora zbiornika znajduje się w 6+110 km potoku Tarlak [8]. Powyżej tego zbiornika w km 10+800 potoku Tarlaka znajduje się zbiornik Brzózka Stadnicka. W 1996 roku wykonano prace mające na celu odmulenie zbiornika Brzózka Królewska [10]. Piętrzenie normalne uzyskuje się przy rzędnej 195,00 m n.p.m. Szczegółowy opis zbiorników i ich zlewni zamieszczono w pracach Madeyski i in.[6] i Michalca[8]. Pomiar zamulenia zbiornika Cierpisz wykonano w 2009 i 2011 roku, a zbiornika Brzózka Królewska w 2010 i 2012 roku w ramach realizowanego projektu N N305 295037.

Pomiary zamulenia badanych zbiorników wodnych polegały na określeniu zmiany rzędnych dna zbiorników w przekrojach poprzecznych i w punktach poza przekrojami, stosując tzw. metodę punktów rozproszonych. Wyniki pomiarów naniesiono na przekroje poprzeczne, zamieszczone w dokumentacji powykonawczej zbiorników, a następnie określono zmiany pól powierzchni w przekrojach poprzecznych.

Rozmieszczenie odkładów rumowiska opracowano na podstawie wyników pomiarów, obliczając objętości odkładów rumowiska w poszczególnych segmentach, ograniczonych sąsiednimi przekrojami poprzecznymi. Określone procentowe objętości rumowiska w segmencie, jako stosunek objętości odkładów w danym segmencie do jego pojemności, będąca zarazem stopniem zamulenia segmentu, stanowiły podstawę określenia rozmieszczenia rumowiska w funkcji odległości od zapory.

Teoretyczne rozmieszczenie rumowiska w badanych zbiornikach określono za pomocą metody Christofano [2], Ortha-Šamova [2] i Rooseboom-Annandale [1].

Christofano założył, że rumowisko odkłada się jedynie w martwej strefie pojemności zbiornika i że dystrybucja osadu, może zostać ograniczona przez zmniejszenie powierzchni zbiornika, opisana jest przez „czynnik skorygowania powierzchni”. Obliczenia według metody AIM przeprowadza się według równania:

$$V_s = V_0 + A_0(H - h_0) \quad (1)$$

gdzie:  $V_s$  – objętość osadu jaka została rozprowadzona w czaszy zbiornika,

$H$  – głębokość zbiornika przy ścianie zapory, przy poziomie normalnego piętrzenia,

$h_0$  – przyjęta głębokość osadu przy ścianie zapory,

$V_0$  – objętość osadu przy przyjętej wartości  $h_0$ ,

$A_0$  – czynnik skorygowania powierzchni zdefiniowany, jako powierzchnia przy głębokości osadu  $h_0$ .

Według metody Ortha-Šamova określa się trzy stadia dystrybucji osadu w zbiorniku [2]:

1. Stadium początkowej depozycji – po czasie  $t$  można określić objętość zdeponowanego rumowiska w postaci stożka usypowego odkładów o długości  $L_{\text{deposit}}$ , dla średniej szerokości zbiornika ( $B_{\text{med}}$ ), przyjmując maksymalną wysokość osadów w zbiorniku –  $Z_m$  według następującego wzoru:

$$V_t = 0,5 \cdot L_{\text{deposit}} \cdot Z_m \cdot B_{\text{med}} \quad (2)$$

2. Stadium przejściowej depozycji – w tym stadium następuje przyrost odkładów rumowiska.
3. Stadium końcowe depozycji – zbiornik całkowicie wypełniony rumowiskiem, wytwarza się koryto tranzytowe o głębokości stanowiącej stosunek jednostkowego natężenia przepływu do prędkości krytycznej.

Według teorii energii strumienia, strumień dąży do stabilizacji warunków hydraulicznych w zbiorniku wodnym jak i w rzece gdy jego energia zbliża się do minimum. Bazując na tym założeniu i pracach Roosebooma [12], Annandale [1] określił dla warunków minimalnej energii strumienia zależność między wzdłużną dystrybucją rumowiska w zbiorniku, a zmianą długości obwodu zwilżonego.

Wyniki badań wielkości zamulenia jedenastu dużych zbiorników wodnych w Republice Południowej Afryki umożliwiły opracowanie zależności bezwymiarowej sumowej objętości deponowanego w zbiorniku osadu od względnej odległości od zapory ( $x$ ), dla różnych wartości obwodu zwilżonego ( $P$ ) i średniego nachylenia krzywej  $P/x$ . Zależność tę można zapisać w postaci:

$$\sum \frac{V_z}{V_{\text{FSL}}} = f\left(\frac{L'}{L_{\text{FSL}}}, \frac{dP}{dx}\right) \quad (3)$$

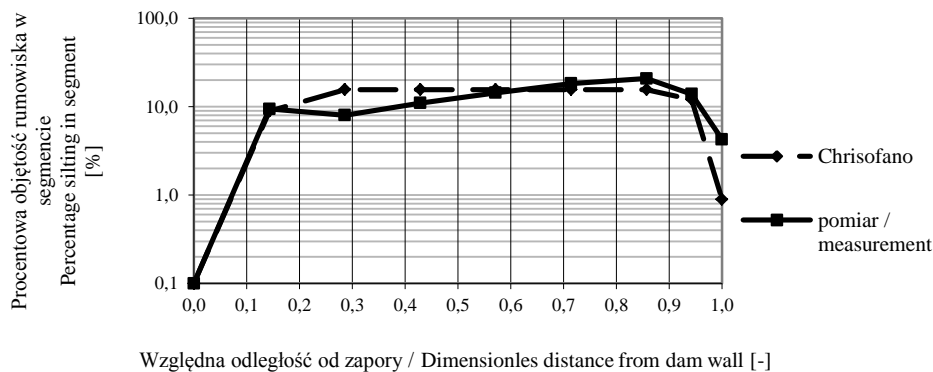
Redukcję pojemności zbiorników w czasie ich eksploatacji określono na podstawie zmiany stopnia zamulenia. W tym celu wykorzystano wyniki pomiarów zamulania zbiorników Cierpisz i Brzoza Stadnicka przed okresem 2009-2012. Stopień zamulenia zbiornika wodnego określono jako stosunek objętości rumowiska zatrzymanego w zbiorniku  $V_z$  do jego pojemności początkowej  $V_p$ .

### 3. Wyniki

Obliczona na podstawie wyników pomiarów objętość odkładów rumowiska w zbiorniku wodnym Cierpisz w latach 2009 i 2011 wynosi odpowiednio 8,75 i 9,47 tys.  $\text{m}^3$ , a w zbiorniku Brzoza Królewska w latach 2010 i 2012 jest odpowiednio równa 3,36 i 3,55 tys.  $\text{m}^3$ .

Stosując metodę Christofano należy określić miąższość osadów  $h_0$ . Została ona obliczona tzw. metodą prób i błędów. Dla określonego czynnika skorygo-

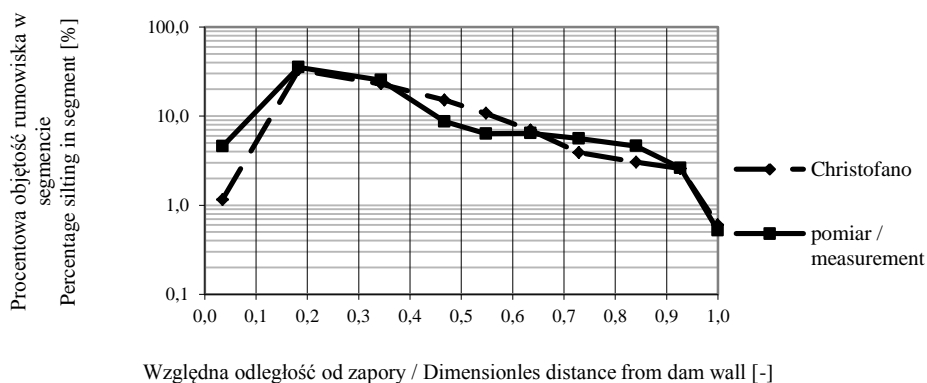
wania powierzchni  $A_0$  zbiornika Cierpisz, równej 3991 m przy wysokości  $H=2,5$  m, miąższość osadów  $h_0$  wynosi 0,30 m. Obliczona objętość osadu  $V_0$  dla przyjętej wartości  $h_0 = 0,30$  m jest równa  $599 \text{ m}^3$ . Jest to objętość rumowiska zgromadzona w dnie zbiornika na długości 59 m od zapory poniżej rzędnej 196,66 m n.p.m. – rzędna ta stanowi sumę wartości  $h_0$  i rzędnej najniższego punktu dna przy zaporze według projektu powykonawczego zbiornika. Powyżej rzędnej 196,66 m n.p.m. rumowisko odkładane jest proporcjonalnie w dnie. W wyniku opracowania krzywej pojemności i powierzchni zalewu określono w poszczególnych przekrojach powierzchnie odkładów rumowiska i obliczono zamulenie w segmentach. Na rycinie 1 przedstawiono rozmieszczenie odkładów rumowiska w zbiorniku Cierpisz, opracowane dla danych z pomiarów wykonanych w 2009 roku.



**Ryc. 1. Rozmieszczenie odkładów rumowiska w zbiorniku Cierpisz według metody Christofano i według pomiarów zamulania wykonanych w 2009 roku**

Fig. 1. Sediment distribution in the water reservoir Cierpisz according to the Christofano method and according to the measurements worked out in the year 2009

Miąższość osadów  $h_0$  w zbiorniku Brzóza Królewska wynosi 0,04 m. Została ona obliczona dla czynnika skorygowania powierzchni  $A_0$  równego 2051 m i wysokości  $H=1,75$  m. Obliczona objętość osadu  $V_0$  przy przyjętej wartości  $h_0 = 0,04$  m wynosi  $41 \text{ m}^3$ . Jest to objętość rumowiska zgromadzona w dnie zbiornika na długości 17,4 m od zapory poniżej rzędnej 196,66 m n.p.m. – rzędna ta stanowi sumę wartości  $h_0$  i rzędnej najniższego punktu dna przy zaporze według projektu powykonawczego zbiornika. Powyżej rzędnej 196,66 m n.p.m. rumowisko odkładane jest proporcjonalnie w dnie. Rycina 2 przedstawia rozmieszczenie odkładów rumowiska w zbiorniku Brzóza Królewska, opracowane dla danych z pomiarów wykonanych w 2010 roku.



**Ryc. 2. Rozmieszczenie odkładów rumowiska w zbiorniku Brzózka Królewska według metody Christofano i według pomiarów zamulania wykonanych w 2010 roku**

Fig. 2. Sediment distribution in the water reservoir Brzózka Królewska according to the Christofano method and according to the measurements worked out in the year 2010

Według tej metody poza strefą skorygowanej powierzchni  $A_0$  rumowisko odkłada się równomierną warstwą we wszystkich przekrojach (tab. 1 i 2).

**Tabela 1. Różnice wyników obliczeń ( $\Delta$ ) rozmieszczenia rumowiska w zbiorniku Cierpisz według pomiarów zamulania w 2011 r. i obliczeń metodą Christofano**

Table 1. Difference in results of calculations ( $\Delta$ ) of sediment deposition in the Cierpisz reservoir according to silting measurements in 2011 and to the Christofano method calculations

Segmenty Segments	Procentowy udział odkładów rumowiska w poszczególnych segmentach obliczony według Percentage of sediment deposition in particular segments calculated according to		$\Delta$ [%]
	pomiary	Christofano	
1	2	3	4
1	0,00	0,00	0
2	10,42	8,90	14
3	9,80	15,60	-59
4	10,18	15,60	-53
5	14,34	15,60	-9
6	17,25	15,60	9
7	20,84	15,60	25
8	12,89	12,10	7
9	4,27	0,90	79

**Tabela 2. Różnice wyników obliczeń ( $\Delta$ ) rozmieszczenia rumowiska w zbiorniku Brzóza Królewska według pomiarów zamulania w 2012 r. i obliczeń metodą Christofano**

Table 2. Difference in results of calculations ( $\Delta$ ) of sediment deposition in the Brzóza Królewska reservoir according to silting measurements in 2012 and to the Christofano method calculations

Segmenty Segments	Procentowy udział osadów rumowiska w poszczególnych segmentach obliczony według Percentage of sediment deposition in particular segments calculated according to		$\Delta$ [%]
	pomiary	Christofano	
1	2	3	4
<b>1</b>	0,00	0,00	0
<b>2</b>	3,66	1,16	68
<b>3</b>	33,52	33,01	2
<b>4</b>	25,46	22,94	10
<b>5</b>	11,67	15,09	-29
<b>6</b>	6,35	10,71	-69
<b>7</b>	6,25	6,95	-11
<b>8</b>	6,23	3,89	38
<b>9</b>	3,77	3,04	20
<b>10</b>	2,56	2,57	0
<b>11</b>	0,51	0,60	-18

W tabeli 3 zamieszczono wyniki obliczeń prognozowanej objętości osadów rumowiska ( $V_t$ ) w badanych zbiornikach wodnych metodą Ortha–Shamova (wzór 2), dla rzeczywistej wysokości osadów w zbiorniku –  $Z_{m \text{ real}}$ . Wartość  $Z_{m \text{ real}}$  została określona jako maksymalna z wartości średnich wysokości osadów z przekrojów pomiarowych każdego zbiornika, przyjmując  $L_{\text{deposit}}$  równą długości zbiornika.

Przekształcając wzór (2) obliczono teoretyczną wysokość osadów w zbiorniku –  $Z_{m \text{ teoret.}}$ , odpowiadającą rzeczywistej objętości rumowiska zatrzymanego w zbiorniku (tab. 3). Jest ona znacznie niższa od rzeczywistej wysokości osadów w zbiorniku –  $Z_{m \text{ real}}$ .

Zastosowanie metody Roseboom–Annadale’a wymaga opracowania zależności regresyjnej obwodu zwilżonego (P) w poszczególnych przekrojach poprzecznych zbiorników, od odległości od zapory (x). Współczynniki kierunkowe równań regresji stanowią średnie nachylenie krzywej regresji, będące wartością  $dP/dx$ . Wartości te wynoszą: 0,10 - zbiornik Cierpisz (ryc. 3A) i 042 - zbiornik Brzóza Królewska (ryc. 3B).



**Tabela 3. Wyniki obliczeń wg metody Ortha-Shamova**

Table 3. Results of calculations according to Ortha-Shamov method

Zbiornik wodny Water reservoir	t [lata]	B <sub>med</sub> [m]	L <sub>deposit</sub> [m]	Z <sub>m</sub> teoret. [m]	Z <sub>m</sub> real [m]	V <sub>t</sub> [tys. m <sup>3</sup> ]	Δ [%]
1	2	3	4	5	6	7	8
Brzoza Królewska	16	117,9	520	0,12	1,72	52,72	1385
Cierpisz	20	67,6	340	0,82	1,52	17,48	85

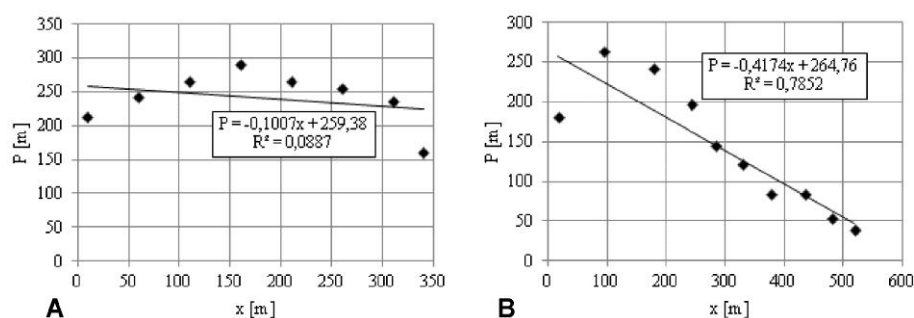
**Ryc. 3. Zależność obwodu zwilżonego (P) od odległości od zapory (x) ustalona dla zbiornika wodnego Cierpisz (A) i Brzoza Królewska (B)**

Fig. 3. Dependence of the wetted parameter (P) on distance from the wall of the dam (x) established for the water reservoir Cierpisz (A) and Brzoza Królewska (B)

Dla wartości  $dP/dx$  danego zbiornika, z odpowiedniej krzywej wykresu Roseboom'a [1976], odczytano wartości bezwymiarowe sumowych objętości odkładów rumowiska ( $\Sigma(V_Z/V_{FSL})$ ) dla względnych odległości od ściany zapory zbiornika ( $L'/L_{FSL}$ ) – tabela 4.

**Tabela 4. Rozmieszczenie rumowiska w zbiorniku wodnym Cierpisz według metody Roosebooma-Annandale'a (R-A) i wyników pomiarów zamulenia w 2011 roku**

Table 4. Sediment distribution in the water reservoir Cierpisz according to Rooseboom-Annandale method (R-A) and according to sediment measurements in the year 2011

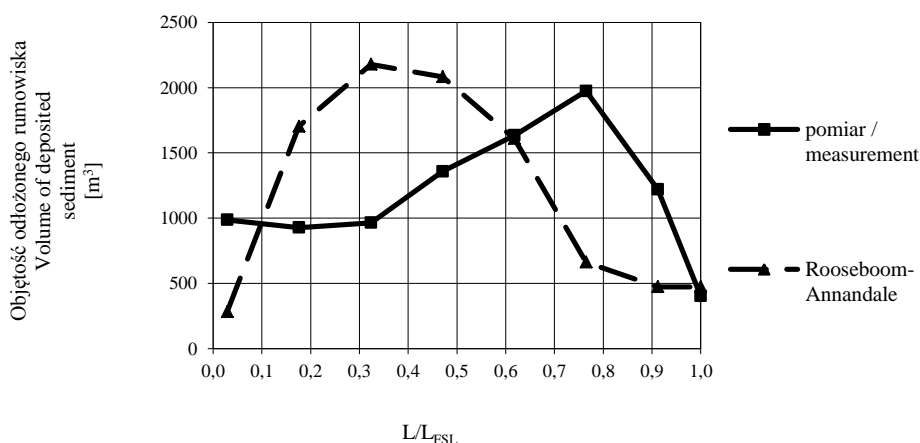
Segment Segments	L'/L <sub>FSL</sub>	$\Sigma(V_Z/V_{FSL})$	V <sub>Z</sub> /V <sub>FSL</sub>	Objętość odłożonego rumowiska w 2011 roku Volume of deposited sediment in 2011 [m <sup>3</sup> ]	
				wg metody R-A R-A method	wg pomiaru / measurement
1	2	3	4	5	6
1	0,029	0,03	0,03	284	987
2	0,176	0,21	0,18	1705	928

**Tabela 4 (cd.). Rozmieszczenie rumowiska w zbiorniku wodnym Cierpisz według metody Roosebooma-Annandale'a (R-A) i wyników pomiarów zamulenia w 2011 roku**

Table 4 (cont.). Sediment distribution in the water reservoir Cierpisz according to Rooseboom-Annandale method (R-A) and according to sediment measurements in the year 2011

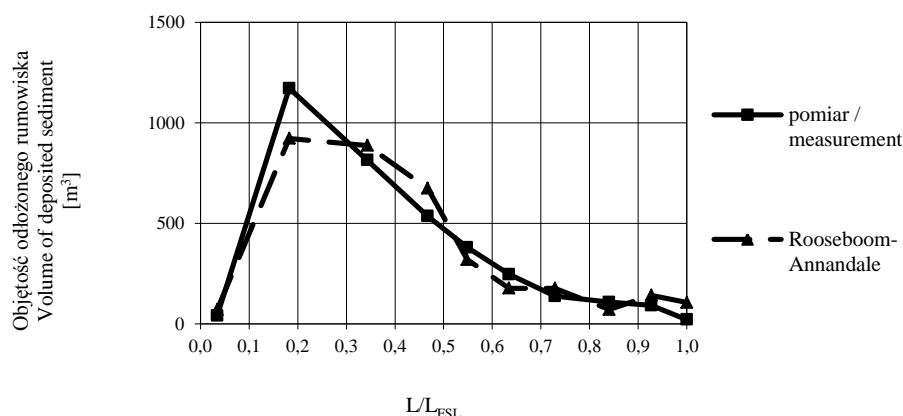
Segment Segments	$L'/L_{FSL}$	$\Sigma(V_Z/V_{FSL})$	$V_Z/V_{FSL}$	Objętość odłożonego rumowiska w 2011 roku Volume of deposited sediment in 2011 [m <sup>3</sup> ]	
				wg metody R-A R-A method	wg pomiaru / measurement
1	2	3	4	5	6
3	0,324	0,44	0,23	2178	964
4	0,471	0,66	0,22	2083	1358
5	0,618	0,83	0,17	1610	1634
6	0,765	0,9	0,07	663	1974
7	0,912	0,95	0,05	473	1221
8	1,000	1	0,05	474	404
Suma:			1,00	9470	9470

Rozmieszczenie osadów według metody Roseboom–Annadale'a w zbiorniku Cierpisz, określone na podstawie pomiarów zamulania wykonanych w 2009 roku zamieszczono na rycinie 4, a na rycinie 5 zamieszczono rozmieszczenie osadów w zbiorniku Brzoza Królewska, opracowane na podstawie pomiarów wykonanych w 2012 roku.



**Ryc. 4. Rozmieszczenie rumowiska w zbiorniku wodnym Cierpisz w 2009 roku opracowane według pomiarów i obliczeń metodą Roosebooma-Annandale'a**

Fig. 4. Sediment distribution in the water reservoir Cierpisz in the year 2009 worked out according to measurements and the calculations the Rooseboom-Annandale method



Ryc. 5. Rozmieszczenie rumowiska w zbiorniku wodnym Brzózka Królewska w 2012 roku opracowane według pomiarów i obliczeń metodą Roosebooma-Annandale'a

Fig. 5. Sediment distribution in the water reservoir Brzózka Królewska in the year 2012 worked out according to measurements and the calculations the Rooseboom-Annandale method

Stopień zamulenia  $S_z$  badanych zbiorników, określony na podstawie wyników pomiarów wykonanych w latach 2009-2012, na tle wcześniejszych badań, zamieszczono w tabeli 5.

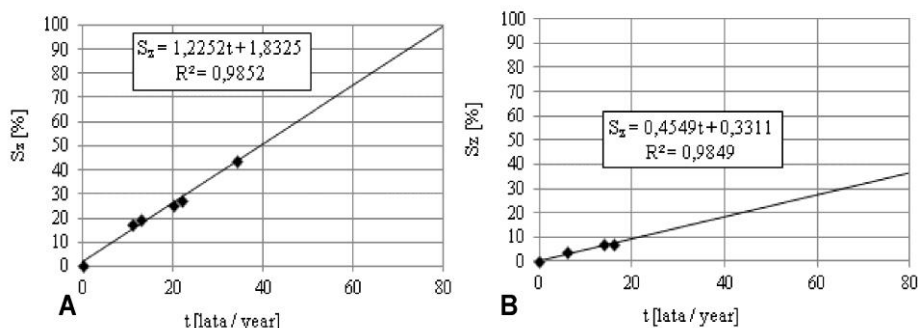
Tabela 5. Objętość osadów rumowiska w badanych zbiornikach wodnych w poszczególnych latach eksploatacji

Table 5. Volume of the deposited sediments in the studied water reservoirs in individual years of operation

Zbiornik Reservoir	Rok Year	Lata eksploatacji Years of operation t	Objętość osadów Volume of sediment [m <sup>3</sup> ]	Stopień zamulenia Silting ratio $S_z$ [%]
1	2	3	4	5
Cierpisz	1990	34	15,00	43,48
	2001	11	6,10	17,68
	2003	13	6,75	19,55
	2009	20	8,75	25,35
	2011	22	9,47	27,45
Brzózka Królewska	2002	6	1,73	3,55
	2010	14	3,36	6,90
	2012	16	3,55	7,25

Przyjmując liniową zależność stopnia zamulenia ( $S_z$ ) od czasu eksploatacji (t) zmniejszenie pojemności zbiornika wodnego Cierpisz o 50% jego pojemno-

ści nastąpi po upływie 40 lat eksploatacji (ryc. 6A). Natomiast pojemność zbiornika Brzóza Królewska zostanie zmniejszona o 50% jego pojemności po 110 latach (ryc. 6B). Jest to wynikiem oddziaływania zbiornika Brzóza Stadnicka, zlokalizowanego na potoku Tarlak powyżej zbiornika Brzóza Królewska.



Ryc. 6. Zależność stopnia zamulenia ( $S_z$ ) od czasu eksploatacji ( $t$ ); A) zbiornik Cierpisz, B) zbiornik Brzóza Królewska

Fig. 6. Dependence silting ratio ( $S_z$ ) of time of operation ( $t$ ); A) Cierpisz reservoir, B) Brzóza Królewska reservoir

#### 4. Podsumowanie

Depozycja materiału mineralnego w małych zbiornikach wodnych, powodująca ich zamulenie, przyczynia się do szybkiego zmniejszania ich pojemności. Ograniczenie pojemności małego zbiornika wodnego, wynoszące 50% jego pojemności, jak wykazano w przypadku zbiornika Cierpisz, może nastąpić po upływie 40 lat eksploatacji. Jednym ze sposobów zmniejszenia redukcji pojemności jest wykonanie zbiornika wstępnego, przechwytyjącego część płynącego rumowiska w cieku. Przykładem takim jest zbiornik Brzóza Stadnicka, znajdujący się ponad cztery kilometry powyżej zbiornika Brzóza Królewska. Zamulenie tego zbiornika, wynoszące 50% zostanie osiągnięte po ponad 110 latach eksploatacji.

Analizując proces zamulania małych zbiorników wodnych ważne jest, nie tylko określenie objętości gromadzonych w nich osadów, ale także określenie rozmieszczenia rumowiska w czaszy zbiornika. Zastosowanie metod Christofano, Ortha-Šamova i Rooseboom-Annandale do prognozowania rozmieszczenia osadów rumowiska w małych zbiornikach wodnych obarczone jest błędem.

Określone rozmieszczenie rumowiska za pomocą metody Christofano w przypadku badanych zbiorników wodnych jest względnie proporcjonalne we wszystkich przekrojach do rzeczywistego rozmieszczenia rumowiska. Różnice wyników obliczeń rozmieszczenia rumowiska w zbiorniku Cierpisz według pomiarów a obliczeń wykonanych metodą Christofano osiągają niestety poziom

prawie 60%. Metoda Christofano umożliwia jedynie określenie ogólnego trendu rozmieszczenia rumowiska w małym zbiorniku wodnym.

Zastosowanie metody Ortha-Shamova, według której rumowisko odkładane jest w postaci stożka usypowego utworów, jest niemożliwe w przypadku badanych małych zbiorników wodnych. Metoda ta nie powinna być stosowana do określenia rozmieszczenia rumowiska w małych zbiornikach wodnych.

Określenie możliwości stosowania metody Roseboom–Annadale’a do prognozowania rozmieszczenia osadów w małych zbiornikach wodnych wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań, gdyż w przypadku zbiornika Brzózka Królewska uzyskano wyniki prognozy zbliżone do wyników pomiarów. Natomiast określone rozmieszczenie rumowiska metodą Roseboom–Annadale’a w zbiorniku Cierpisz odbiega znacząco od rzeczywistego rozmieszczenia. Takie rozbieżności wyników mogą się wiązać z kształtem zbiornika.

## Literatura

- [1] Annandale G.W. 1987. Reservoir sedimentation. Developments in Water Science, No 29, Amsterdam, Netherlands: Elsevier Publishers BV. 221.
- [2] Batuca G. D., Jordaan M. J. Jr. 2000. Silting and Desilting of Reservoirs. A.A.Balkema. Rotterdam, Netherlands, 353.
- [3] Dąbkowski L, Skibiński J., Żbikowski A. 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- [4] Hartung F. 1959. Ursache und Verhuetung der Staumraumverlandung bei Talsperren. Wasserwirtschaft, 1.
- [5] Lara J.M., Pemberton E.L. 1963. Initial weight of deposited sediments. Proc. Federal Interagency Sedimentation Conference. USDA-ARS, Misc. Publ., 970, 818–845.
- [6] Madeyski M., Michalec B., Tarnawski M. 2008. Zamulanie małych zbiorników wodnych i jakość osadów dennych. Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, z. 11, seria: Monografie, 76.
- [7] Michalec B. 2008a. Prognoza zamulania i ocena zasobów wodnych planowanych zbiorników małej retencji wodnej. Woda - Środowisko - Obszary Wiejskie. t. 8, z.2b (24), 81-96.
- [8] Michalec B. 2008b. Ocena intensywności procesu zamulania małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły. Zesz. Nauk. Uniw. Roln. w Krakowie nr 451, Seria rozprawy, z. 328.
- [9] Mioduszewski W. 2006. Małe zbiorniki wodne. Wydawnictwo IMUZ – Falenty.
- [10] Operat wodno-prawny na pobór wody i eksploatację zbiornika na pot. Tarlaka w km 6+110. Zbiornik Brzózka Królewska. Wojewódzki Zarząd Inwestycji Rolniczych w Rzeszowie, Rzeszów, 1996.
- [11] Porozumienie z dnia 21.12.1995 r. zawarte między Wicepremierem Rady Ministrów, Ministrem Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej a Ministrem Ochrony Środowiska Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, dotyczące współpracy w zakresie

programu małej retencji, (<http://www.mos.gov.pl/dzw/dokumenty/porozumienie.html>).

- [12] Rooseboom A. 1976. Reservoir sediment deposition rates. Proc. of 12th ICOLD Congress, Mexico City. 184-196.
- [13] Wiśniewski B., Kutrowski M. 1973. Budownictwo specjalne w zakresie gospodarki wodnej. Zbiorniki wodne. Prognozowanie zamulania. Wytoczne instruktażowe. Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego „Hydroprojekt”, Warszawa, 55.

## SILTATION AS A LIMITING FACTOR WATER RESOURCES SMALL WATER RESERVOIRS

### Summary

The management of water resources in small water reservoirs has to be based on hydrological information as well as information obtained from exploitation of hydrotechnical objects. The information concerning silting and sediment distribution is important to both the water reservoir and the hydrotechnical objects, including the way they work and are utilized. The measurements of silting were carried out in two reservoirs: Cierpisz on the Tuszynka river and Brzóza Królewska on the Tarlaka stream.

The results of silting measurements presented in the paper, enabled the attempt to evaluate the applicability of Christofano, Orth-Šamov and Rooseboom-Annandale methods and to develop silting forecasts. Based on the calculated forecast it was demonstrated that the capacity of Cierpisz and Brzóza Królewska reservoirs will be reduced by 50% after 40 and 110 years, respectively. It was found that the Christofano method enables only the identification of a general trend of sediment deposition in a small reservoir and the discrepancies between results exclude the application of the Orth-Shamov method. It has been demonstrated that it is possible to apply the Roseboom-Annadale method to forecast the sediment distribution in small reservoirs, but additional research is required to define the conditions of its application. The measurements of silting were carried out in two reservoirs: Cierpisz on the Tuszynka river and Brzóza Królewska on the Tarlaka stream. This reservoir is characterized by agricultural character of the river basin.

**Keywords:** small water reservoir, bottom sediment, sediment distribution, silting ratio

DOI: 10.7862/rb.2013.43

*Przesłano do redakcji w sierpniu 2013 r.*

*Przyjęto do druku we wrześniu 2013 r.*