



**OCENA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA METODY  
BRUNE’A I JEJ MODYFIKACJI DO OKREŚLENIA  
ZDOLNOŚCI MAŁYCH ZBIORNIKÓW WODNYCH DO  
ZATRZYMANIA RUMOWISKA**

***Bogusław Michalec***

*Uniwersytet Rolniczy im. H. Kollątaja w Krakowie*

***APPRAISAL OF THE POSSIBILITY OF THE USE OF THE  
BRUNE METHOD AND ITS MODIFICATION FOR THE  
ASSESSMENT OF THE SEDIMENT TRAP EFFICIENCY  
OF SMALL RESERVOIRS***

***Streszczenie***

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymania rumowiska ( $\beta$ ). Do analiz wytypowano dziewięć małych zbiorników wodnych znajdujących się w dorzeczu górnej Wisły. Zdolność ta została określona na podstawie bilansu rumowiska i porównana z wynikami obliczeń metodą Brune’a i jej modyfikacjami, opracowanymi przez Gilla, Heinemanna oraz Jothiprakasha i Garga. Stwierdzono, że istnieje możliwość zastosowania tych metod do wyznaczenia początkowej zdolności małych zbiorników do zatrzymywania rumowiska. Metody te mogą mieć zastosowanie w przypadku małych zbiorników, których współczynnik pojemności jest większy od 1%. Stwierdzono również, że wyniki obliczeń zdolności do zatrzymywania rumowiska w kolejnych latach eksploatacji małych zbiorników wodnych wykonane za pomocą metody Brune’a i wzorów Gilla, Heinemanna oraz Jothiprakasha i Garga nie odpowiadają rzeczywistej zdolności, oznaczonej symbolem  $\beta_{rz}$  i określonej na podstawie bilansu rumowiska. Poddane ocenie metody

nie mogą być wykorzystane do określenia zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymania rumowiska w kolejnych latach eksploatacji.

**Słowa kluczowe:** rumowisko, mały zbiornik wodny, zamulanie, zdolność do zatrzymania rumowiska

### *Summary*

*The results of the calculations of the sediment trap efficiency of small reservoirs were introduced in the work. The sediment trap efficiency was appointed the symbol  $\beta$ . Nine small reservoirs located in the Upper Vistula river basin were chosen to analyses. This efficiency became determined on the basis of the sediment balance and compared with the results of applied Brune's method and its modification, worked out by Gill, Heinemann and Jothiprakash and Garg. It was stated that the possibility of the use of these methods to delimitation of the initial sediment trap efficiency of small reservoirs existed. The initial  $\beta$  concerns to the beginning of operation. These methods can have the use in the case of the small reservoirs the whose capacity-inflow ratio is larger from 1%. Also it was stated, that the results of the calculations of the sediment trap efficiency in the successive years of the operation of small reservoirs executed using Brune's method and Gill's, Heinemann's and Jothiprakash's and Garg's formulae they do not represent real value of  $\beta$ , determined on the basis of the sediment balance. Estimated methods can not be used to the qualification of the sediment trap efficiency of small reservoirs in the successive years of operation.*

**Key words:** *sediment, small reservoir, silting, sediment trap efficiency*

### WSTĘP

Zapewnienie optymalnej gospodarki wodnej w Polsce wymaga podjęcia wielu działań związanych ze zwiększeniem dyspozycyjnych zasobów wodnych, zmniejszeniem ryzyka powodziowego, przeciwdziałaniem przyczynom i skutkom suszy. Spośród tych działań można wyróżnić zadania związane z zapewnieniem ochrony przeciwpowodziowej biernej i czynnej, a także zadania związane z realizacją programu małej retencji. Jednym z głównych zadań, zapewniających zwiększenie możliwości retencjonowania wody i tym samym wydłużenie czasu jej spływu, jest budowa zbiorników wodnych. W ramach programu małej retencji funkcję magazynowania wody mogą pełnić wszelkiego rodzaju budowle hydrotechniczne służące piętrzeniu wody, w tym istniejące i planowane małe zbiorniki wodne. Zgodnie z definicją podaną w „Porozumieniu...” (1995), jak

również przytaczaną w „Programie małej retencji...”, (2004) w Polsce przyjęto, że mały zbiornik wodny charakteryzuje się całkowitą pojemnością mieszczącą się w przedziale od 20 tys. m<sup>3</sup> do 5 mln m<sup>3</sup>. Jako dolną granicę kryterium przyjęto wysokość piętrzenia, która nie może być mniejsza od 1,5 m. Małe zbiorniki wodne mogą w istotny sposób poprawić lokalną gospodarkę wodną, lecz warunkiem jej zapewnienia jest utrzymanie ich we właściwym stanie technicznym. Główną czynnikami ograniczającym prawidłową eksploatację zbiorników jest zamulanie. Określenie tzw. żywotności zbiornika wodnego wymaga opracowania prognozy zamulania. Stosując empiryczne metody prognozowania niezbędne jest określenie zdolności zbiornika do zatrzymywania rumowiska. Prawidłowe ustalenie tego parametru jest podstawą trafnej oceny średniej rocznej ilości materiału unoszonego jaka zostanie zatrzymana w zbiorniku. Na tej podstawie można oszacować żywotność zbiornika, którą np. według kryterium Hartunga (1959) określa się jako okres eksploatacji do chwili osiągnięcia zamulenia wynoszącego 80% jego pojemności pierwotnej.

Zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska określa jaka część dostarczonego do zbiornika materiału unoszonego zostanie trwale zatrzymana w zbiorniku. Można ją wyznaczyć ze stosunku objętości rumowiska zatrzymanego w zbiorniku wodnym w danym okresie do sumy objętości rumowiska dopływającego w rozpatrywanym okresie. Zdolność zbiornika wodnego do zatrzymywania rumowiska unoszonego, nazywana jest również zdolnością retencyjną lub akumulacyjną materiału unoszonego. W polskiej literaturze oznaczana jest przeważnie symbolem  $\beta$ , natomiast w publikacjach anglojęzycznych za pomocą skrótu STE (sediment trap efficiency). Zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska zależy od wielu czynników, które można pogrupować według charakterystyk opisujących cechy rumowiska dopływającego do zbiornika i za pomocą charakterystyk opisujących retencję wody i rumowiska w zbiorniku (Verstraten, Poesen 2000). Charakterystykami rumowiska dopływającego do zbiornika są prędkości opadania poszczególnych ziaren rumowiska, lub prędkości opadania flokułów, natomiast charakterystyki opisujące retencję wody i rumowiska w zbiorniku można podzielić na opisujące charakterystyki opisujące dopływ do zbiornika (objętość dopływu wody, maksymalne natężenie dopływu wody w fali, przepływ miarodajny) i charakterystyki zbiornika (topologia zbiornika, powierzchnia zbiornika, kształt zbiornika, pojemność początkowa, typ, wielkość i lokalizacja urządzeń upustowych, właściwości dna zbiornika – obecność lub brak roślinności). Dotychczas opracowano zależności opisujące zdolność zbiornika do trwałego zatrzymania rumowiska w funkcji różnych wskaźników. Wskaźnikami tymi są głównie współczynnik zlewniowy, będący stosunkiem pojemności zbiornika do powierzchni zlewni (capacity–watershed ratio), wskaźnik sedymentacji (sedimentation index), oraz najczęściej wykorzystywany współczynnik pojemności zbiornika (capacity–inflow ratio).

Zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska w zależności od współczynnika zlewniowego została określona przez Brune'a i Allena, Browna, Gottschalka (Heinemann 1984, Michalec 2008). Churchill (1948) uzależnił zdolność do trwałej retencji rumowiska od współczynnika określanego jako stosunek czasu zatrzymania wody w zbiorniku do średniej prędkości przepływu wody w zbiorniku. Współczynnik pojemności zbiornika (capacity–inflow ratio), będący stosunkiem pojemności zbiornika do sumy średniego rocznego dopływu wody, został zastosowany w metodach najczęściej wykorzystywanych do wyznaczenia wartości  $\beta$ . W polskiej praktyce inżynierskiej stosuje się głównie nomogram Łopatina, zalecany przez wytyczne Wiśniewskiego i Kutrowskiego (1973). Natomiast najpowszechniej stosowaną metodą w innych krajach jest metoda Brune'a (1953). Współczynnik pojemności zbiornika znalazł również zastosowanie w metodzie Drozda (1961), który przedstawił zależność zdolności akumulacyjnej zbiornika w funkcji współczynnika pojemności z uwzględnieniem wielkości ziaren rumowiska dostarczanego do zbiorników. Metoda Drozda została opracowana na podstawie badań zbiorników typu jeziorowego obszarów równinnych Ukrainy. Spośród metod opisujących zależność  $\beta$  od innych wskaźników, czy też parametrów należy wymienić metodę Karauševa (1966). W tej metodzie zdolność akumulacyjna zbiornika została scharakteryzowana w zależności od uziarnienia i charakterystyki rumowiska unoszonego dostarczanego do zbiornika. Gay, jak podaje Heinemann (1984), przedstawił  $\beta$  w funkcji prędkości opadania ziaren rumowiska i czasu zatrzymania wody w zbiorniku. Kolejne prace badawcze nad zdolnością akumulacyjną zbiornika wprowadzają dodatkowe wskaźniki, coraz częściej uwzględniając jeden z zasadniczych jakim jest wielkość ziaren dostarczanego rumowiska. Przykładem są opracowania Dendyego (1974), Chena (1975), Curtisa i McCuena (1977), Rauscha i Heinemanna (1984), Warda, Haana i Barfielda (Heinemann 1984) dotyczące zdolności zbiorników do zatrzymania rumowiska, w których uwzględniony zostaje wpływ wielkości dopływu wody do zbiornika, jego pojemności zbiornika, jak i wielkości odpływu.

Jak już wspomniano wcześniej metoda Brune'a jest najczęściej stosowaną i przytaczaną w literaturze światowej (m. in. Vincent et al. 2001, Aspelund, Madsen 2004, Garg, Jothiprakash, 2010, Sahay 2011, Abdu Rahiman et al., 2011, Tebbi et al., 2012). Zastosowanie metody Brune'a do określenia zdolności dużych zbiorników w Polsce do zatrzymywania rumowiska zostało przedstawione w pracach Łajczaka [1995, 1998]. Natomiast określona za pomocą tej metody wartość  $\beta$  małych zbiorników wodnych niejednokrotnie jest niższa od wyznaczonej na podstawie bilansu rumowiska dopływającego i zatrzymanego (Michalec, 2008). Brune'a (1953) na podstawie wyników badań 44 zbiorników wodnych Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej opracował graficzną zależność zdolności zbiornika do zatrzymywania rumowiska w funkcji współczynnika pojemności. Dendy (1974), dodając wyniki swoich badań do nomogramu

Brune'a, opracował równanie krzywej wartości środkowych, opisanej przez Brune'a nawią „median curve”, w następującej postaci:

$$\beta = 100 \cdot \left( 0,97^{0,19^{\log \alpha}} \right) \quad (1)$$

gdzie  $\alpha$  jest współczynnikiem pojemności zbiornika, obliczanym jako iloraz pojemności początkowej i sumy średniego rocznego dopływu wody do zbiornika.

Metoda Brune'a często była modyfikowana. Modyfikacje zaproponowane przez Morrisa w 1963 roku (Heinemann 1981) i Linsley et al. (1986) nie mają jednak zastosowania do wyznaczenia zdolności małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły (Michalec 2008). Poza tymi modyfikacjami równania Brune'a opracowane zostały również równania przez Gilla (1979), Heinemanna (1981), Jothiprakasha i Garga (2008).

Formuła Gilla (1979) ma postać:

$$\beta_G = \frac{\alpha}{0,012 + 1,02\alpha} \quad (2)$$

Heinemann (1981), uwzględniając wyniki badań Brune'a, zaproponował formułę w której współczynnik pojemności zbiornika ( $\alpha$ ) został zamieniony parametrem K. Równanie zostało zaproponowane przez Heinemanna w następującej postaci:

$$\beta_H = 100 \cdot \left( \frac{K}{0,012 + 1,02K} \right) \quad (3)$$

w której K obliczane jest jako iloczyn wskaźnika sedymentacji (ang. sedimentation index – SI) i przyspieszenia ziemskiego. Wskaźnik sedymentacji określa się ze wzoru:

$$SI = \frac{\alpha^2}{L} \quad (4)$$

w którym L jest długością zbiornika.

Jothiprakash i Garg (2008) natomiast zaproponowali modyfikację metody Brune'a, podając następujące równanie:

$$\beta_{JG} = \frac{\alpha}{0,00013 + 0,01\alpha + 0,0000166\sqrt{\alpha}} \quad (5)$$

W powyższych wzorach stosuje się jednostki układu SI.

Są to metody, których zastosowanie w przypadku małych zbiorników wodnych nie zostało zweryfikowane. W pracy podjęto próbę oceny możliwości zastosowania modyfikacji metody Brune'a, opracowanych przez Gilla, Heinemanna, Jothiprakasha i Garga, do wyznaczenia zdolności małych zbiorników wodnych znajdujących się w dorzeczu Górnej Wisły.

## METODYKA

Do badań wytypowano 9 małych zbiorników wodnych znajdujących się w dorzeczu Górnej Wisły. Szczegółową charakterystykę tych zbiorników i ich zlewni zamieszczono w pracach Bednarczyka i in (1988, 2005), Michalca i Tarnawskiego (2006) oraz Michalca (2003, 2008). Podstawowe parametry wytypowanych zbiorników zamieszczono w tabeli 1. Zgodnie z obowiązującym w Polsce kryterium, badane zbiorniki należy zaliczyć do małych zbiorników wodnych.

Określenie możliwości zastosowania wzorów Gilla (1979), Heinemanna (1981), Jothiprakashy i Garga (2008), będących modyfikacjami metody Brunne'a do wyznaczenia zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymywania rumowiska, wymaga dysponowania rzeczywistą wartością  $\beta$ . Rzeczywista zdolność wytypowanych małych zbiorników wodnych do zatrzymania rumowiska, oznaczona symbolem  $\beta_{rz}$ , została określona na podstawie bilansu rumowiska dopływającego i zatrzymanego w tych zbiornikach. Wyniki tych obliczeń zaczerpnięto z pracy Michalca (2008), w której opisano metodykę określenia objętości rumowiska dopływającego do zbiorników i odłożonego w zbiornikach. Zdolność do zatrzymania rumowiska w wytypowanych zbiornikach obliczono w poszczególnych latach ich eksploatacji, tj. w tych, w których wykonane zostały pomiary zamulania.

**Tabela 1.** Podstawowe parametry badanych małych zbiorników wodnych

**Table 1.** Basic parameters of studied small reservoirs

Zbiornik wodny / ciek Reservoir / water-course	Pojemność Capacity V [tys. m <sup>3</sup> ]	Powierzchnia zalewu Surface area [ha]	Długość zbiornika Reservoir length L [m]	Przepływ średni roczny Mean annual flow SQ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
Krempna / rz. Wisłoka	112,0	3,7	400	2,030
Zesławice / rz. Dłubnia	228,0	9,5	600	1,090
Maziarnia / rz. Łęg	3 860,0	160,0	6510	1,270
Głuchów / pot. Graniczny	22,6	1,5	640	0,567
Niedźwiadek / pot. Górno	124,5	8,1	550	0,166
Narożniki / rz. Dęba	283,0	28,0	2000	0,155
Cierpisz / rz. Tuszymka	34,5	2,3	340	0,393
Cedzyna / rz. Lubrzanka	1 554,0	64,0	2200	1,105
Wapienica / rz. Wapienica	1 100,0	17,5	1000	0,120

**Tabela 2.** Zestawienie wyników obliczeń zdolności do zatrzymywania rumowiska badanych małych zbiorników wodnych

**Table 2.** The comparison of the calculations results of the sediment trap efficiency of studied small reservoirs

Zbiornik Reservoir	Rok Year	t [lata]	$\alpha$ [-]	SI [-]	$\beta_{rz}$ [%]	$\beta$ [%]	$\beta_G$ [%]	$\beta_H$ [%]	$\beta_{JG}$ [%]
Krempna	1988	0	0,00350	0,000306	77,1	16,5	22,5	19,9	21,2
	1996	9	0,00265	0,000176	58,2	11,1	18,0	12,5	16,9
	1997	10	0,00255	0,000163	59,9	10,4	17,5	11,7	16,4
	1998	11	0,00242	0,000146	65,2	9,6	16,7	10,7	15,7
	1999	12	0,00231	0,000133	62,0	8,8	16,1	9,8	15,1
	2000	13	0,00224	0,000125	60,0	8,4	15,7	9,3	14,7
	2002	15	0,00212	0,000112	55,6	7,6	15,0	8,4	14,0
	2003	16	0,00210	0,000110	53,4	7,4	14,8	8,3	13,9
	2005	18	0,00207	0,000107	49,9	7,2	14,7	8,0	13,7
Zesławice	1969	0	0,00663	0,000676	82,4	32,1	35,3	35,4	33,8
	1968	2	0,00585	0,000527	66,7	28,9	32,6	29,9	31,0
	1969	3	0,00458	0,000323	37,7	22,7	27,5	20,8	26,1
	1970	4	0,00443	0,000302	38,5	21,9	26,8	19,7	25,4
	1971	5	0,00441	0,000299	36,2	21,8	26,7	19,6	25,3
	1974	8	0,00413	0,000262	37,5	20,3	25,5	17,6	24,1
	1983	17	0,00326	0,000164	35,2	15,1	21,3	11,8	20,0
Głuchów	1995	0	0,00126	0,000025	91,8	2,3	9,5	2,0	8,8
	2002	7	0,00103	0,000017	84,6	1,3	7,9	1,3	7,3
Cierpisz	1956	0	0,00278	0,000227	99,0	12,0	18,7	15,6	17,6
	1990	34	0,00157	0,000072	78,0	4,0	11,5	5,6	10,8
	1991	0	0,00278	0,000227	99,0	12,0	18,7	15,6	17,6
	2001	11	0,00229	0,000154	98,1	8,7	16,0	11,2	15,0
	2003	13	0,00224	0,000148	91,8	8,4	15,7	10,7	14,7
Maziarnia	1989	0	0,09638	0,014269	86,9	84,8	87,4	90,4	88,1
	1999	10	0,08377	0,010779	74,4	83,3	86,0	88,2	86,6
	2002	13	0,08116	0,010118	70,7	83,0	85,6	87,7	86,2
	2003	14	0,08039	0,009927	69,9	82,9	85,5	87,5	86,1
Niedźwiadek	1998	0	0,02378	0,010282	98,1	63,7	65,6	87,8	64,7
	2003	5	0,02317	0,009761	96,9	63,1	65,0	87,3	64,1

Zbiornik Reservoir	Rok Year	t [lata]	$\alpha$ [-]	SI [-]	$\beta_{rz}$ [%]	$\beta$ [%]	$\beta_G$ [%]	$\beta_H$ [%]	$\beta_{JG}$ [%]
Narożniki	2001	0	0,05810	0,016878	79,0	78,9	81,5	91,5	81,7
	2005	4	0,05770	0,016646	57,2	78,8	81,4	91,5	81,6
Cedzyna	1973	0	0,04448	0,008993	93,7	75,0	77,5	86,5	77,4
	1999	26	0,04032	0,007390	88,1	73,4	75,9	84,3	75,6
	2003	30	0,03964	0,007142	88,7	73,2	75,6	83,9	75,3
Wapienica	1932	0	0,02907	0,008451	95,6	67,7	69,8	85,9	69,1
	1967	36	0,02843	0,008083	94,6	67,2	69,3	85,4	68,6
	2003	71	0,02783	0,007745	92,6	66,8	68,9	84,9	68,2

Gdzie:  $\alpha$  – współczynnik pojemności zbiornika, SI – wskaźnik sedymentacji,  $\beta_{rz}$  – rzeczywista zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska,  $\beta_G$  – zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska wg Gilla,  $\beta_H$  – zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska wg Heinemanna,  $\beta_{JG}$  – zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska wg Jothiprakasha i Garga

Where:  $\alpha$  – capacity-inflow ratio, SI – sedimentation index,  $\beta_{rz}$  – real sediment trap efficiency,  $\beta_G$  – sediment trap efficiency acc. to Gill,  $\beta_H$  – sediment trap efficiency acc. to Heinemann,  $\beta_{JG}$  – sediment trap efficiency acc. to Jothiprakash and Garg

## WYNIKI I DYSKUSJA

Badane małe zbiorniki wodne charakteryzują się wysoką wartością początkową rzeczywistej zdolności do zatrzymywania rumowiska ( $\beta_{rz}$ ), czyli na początku eksploatacji ( $t=0$  w tab. 2) i wynoszącą od 77 do 98%. Zdolność początkowa badanych zbiorników do zatrzymywania rumowiska, tzn. zdolność określona na początku eksploatacji zbiornika, wyznaczona za pomocą metody Brune'a i modyfikacji tej metody jest znacząco mniejsza od wartości  $\beta_{rz}$  obliczonej na podstawie bilansu rumowiska jedynie w przypadku zbiorników, których wartość współczynnika pojemności ( $\alpha$ ) jest mniejszy od 1%. Przykładem są zbiorniki Krempna, Ześlawice, Głuchów, Cierpisz, których współczynnik pojemności początkowej wynosi odpowiednio: 0,35%, 663%, 0,126% i 0,278 (tab. 2). Natomiast gdy współczynnik pojemności jest większy od 1% to początkowa zdolność małego zbiornika do zatrzymywania rumowiska określona za pomocą metody Brune'a i jej modyfikacji jest zbliżona do wartości  $\beta_{rz}$ . Przykładem są wyniki uzyskane dla zbiorników Maziarnia, Niedźwiadek, Narożniki, Cedzyna i Wapienica, dla których określona wartość początkowa  $\alpha$  wynosi odpowiednio: 9,638%, 2,378%, 5,81%, 4,448% i 2,907% (tab. 2). Najbardziej zbliżone wyniki obliczeń metodą Brune' i jej modyfikacjami do wartości  $\beta_{rz}$  uzyskano dla zbiornika Maziarnia, a także dla zbiornika Narożniki. W przypadku zbiorników Niedźwiadek, Cedzyna i Wapienica określona za pomocą metody Brune' i jej modyfikacji początkowa zdolność tych zbiorników do zatrzymywania rumowiska może być traktowana jedynie jako przybliżona i nie powinna być



przyjmowana do dalszych obliczeń służących określeniu wielkości zamulania i żywotności zbiorników.

Uzyskane wyniki obliczeń wskazują na możliwość zastosowania metody Brune' i jej modyfikacji do wyznaczenia zdolności początkowej małych zbiorników wodnych do zatrzymywania rumowiska, jednakże z zastrzeżeniem, że zbiorniki te powinny charakteryzować się współczynnikiem pojemności większym od 1%. To ograniczenie stosowalności tych metod w odniesieniu do małych zbiorników wodnych jest istotne ze względów praktycznych. Pomimo stwierdzenia przez Heinemanna, że jego formuła została opracowana na podstawie danych dotyczących małych zbiorników wodnych, zastosowanie tej metody wymaga jednak uwzględnienia wartości współczynnika pojemności.

Analizując wyniki obliczeń wartości  $\beta$  zamieszczonych w tabeli 2 stwierdzono, że wyznaczona metodą Brune'a, Gilla, Heinemanna oraz Jothiprakasha i Garga zdolność zbiorników do zatrzymywania rumowiska w kolejnych latach eksploatacji nie odpowiada wielkości redukcji wartości  $\beta_{rz}$ . Po siedemnastu latach eksploatacji zbiornika Maziarnia, tj. w okresie 1989-2003, wartość  $\beta_{rz}$  uległa redukcji o 17%, natomiast redukcja wartości  $\beta$ , określonej według wzorów Brune'a, Gilla, Heinemanna oraz Jothiprakasha i Garga wynosi odpowiednio: 1,93%, 1,85%, 2,97% i 2,0%. Oznacza to, że redukcja wartości  $\beta$  zbiornika Maziarnia, wyznaczonej tymi wzorami, jest od ponad pięć do ponad dziewięć razy mniejsza od redukcji wartości  $\beta_{rz}$ . Również w przypadku pozostałych zbiorników, dla których wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 3, różnice wielkości redukcji są podobne, a największe stwierdzono w przypadku zbiornika Narożniki. Obliczona redukcja wartości  $\beta$  tego zbiornika, wyznaczonej wzorami Brune'a, Gilla, Heinemanna oraz Jothiprakasha i Garga, jest od ponad 211 do ponad 233 razy mniejsza od redukcji wartości  $\beta_r$ .

## WNIOSKI

Zastosowanie metody Brune'a i modyfikacji tej metody do wyznaczania zdolności małych zbiorników do zatrzymania rumowiska jest możliwe, jednakże z wyjątkiem takich zbiorników, których współczynnik pojemności jest mniejszy od 1%. Zarówno metoda Brune'a i wzory Gilla, Heinemanna oraz Jothiprakasha i Garga mogą służyć wyznaczeniu początkowej wartości  $\beta$  małych zbiorników wodnych.

Małe zbiorniki wodne charakteryzują się intensywnym zamulaniem i szybką redukcją zdolności do zatrzymania rumowiska, a uzyskane za pomocą metody Brune'a i wzorów Gilla, Heinemanna oraz Jothiprakasha i Garga wartości  $\beta$  w kolejnych latach eksploatacji badanych zbiorników wodnych znacząco różnią się od wartości rzeczywistej zdolności do zatrzymania rumowiska ( $\beta_{rz}$ ). Poddane ocenie metody nie mogą być wykorzystane do określenia

zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymania rumowiska w kolejnych latach eksploatacji.

## LITERATURA

- Abdu Rahiman, K.U., Dwarakish, G.S., Babita, M., Kawal, M. (2009). *Changes in hydrology and coastal sedimentation by dams – a case study*. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 15:3, 51-64,
- Aspelund, A., Madsen, S. (2004). *Baker river project*. Hydrology and Geomorphology of Baker and middle Skaigt River. Part 2: Sediment transport and channel response. Final draft report, R2 Resource Consultants, Inc., Washington, 111.
- Bednarczyk, T., Michalec, B., Tarnawski, M. (2005). *Forecast of water reservoir silting on a water course excluded from hydrological monitoring*. 10th International Scientific Conference “Enviro”, Nitra, 39-48.
- Bednarczyk, T., Lipski, Cz., Madeyski, M. (1988). *Ocena stopnia zamulenia małego zbiornika wodnego na tle procesów denudacyjnych w zlewni lessowej*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. Nr 375, Kraków, 45-46.
- Brune, G. M. (1953). *Trap efficiency of reservoirs*. Transactions, American Geophysical Union, No 34, 407-418.
- Chen, C-N. (1975). *Design of sediment retention basins*. Proceedings of the National Symposium on Urban Hydrology and Sediment Control, Lexington, Kentucky, 285-298.
- Churchill, M. A. (1948): *Discussion of ‘Analysis and use of reservoir sedimentation data’ by L.C. Gottschalk*. Proceedings of Conference “Federal Inter-Agency Sedimentation”, Denver, Colorado.
- Curtis, D.C., Mc Cuen R.H. (1977). *Design efficiency of stormwater detention basins*. Proceedings, American Society of Civil Engineers. Journal of Water Resources Planning and Management Division, 103, 125-140.
- Dendy, F. E. (1974). *Sediment trap efficiency of small reservoirs*. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol.17, No.5, 898 – 908.
- Drozd, N. J. (1961). *Intensivnost vodnoj erozji i zailenija vodochranilišč na malych riekach USSR*. Malyje vodojomy ravinnyvh oblastiej SSSR I ich ispolzovanije. Izdat. ANSSSR, Moskva-Leningrad.
- Garg, V., Jothiprakash, V. (2010). *Trap efficiency estimation of a large reservoir*. ISH Journal of Hydraulic Engineering 14:2, 88-101.
- Gill, M.A. ( 1979). *Sedimentation and useful life of reservoirs*. Journal of Hydrology, Vol. 44, 89-95.
- Hartung, F. (1959). *Ursache und Verhuetung der Staumraumverlandung bei Talsperren*. Wasserwirtschaft, 1, 3-13.
- Heinemann, H. G. (1981). *A new sediment trap efficiency curve for small reservoirs*. Water Resources Bulletin, Vol. 17, No.5, 825-830.
- Heinemann, H.G. (1984). *Reservoir trap efficiency*. In: „Erosion and Sediment Yield“, Geo Books, Norwich, 201-218.

- Jothiprakash, V., Garg, V. (2008). *Re-took to conventional techniques for trapping efficiency estimation of a reservoir*. International Journal of Sediment Research, Vol. 23, No. 1, 76-84.
- Karaušev, A.V. (1966). *Teorija i metod račota zailenija vodočhranilišč i prudov*. Trudy GGI, 132.
- Linsley, R. K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H. (1986). *Hydrology for engineers*. McGraw-Hill Inc., San Francisco.
- Łajczak, A. (1995). *Studium nad zamulaniem wybranych zbiorników zaporowych w dorzeczu Wisły*. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, Z. 8, PWN, Warszawa, 108.
- Łajczak, A. (1998). *Prognoza zamulania zbiornika Świnna Poręba na Skawie*. IX Konferencja Sozologiczna „Sozologia na obszarze antropopresji na przykładzie zbiornika Świnna Poręba. AGH Kraków.
- Michalec, B. (2003). *Analiza procesu zamulania małych zbiorników wodnych*. Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus, Z. 2(2), 2003, 35-46.
- Michalec, B. (2008). *Ocena intensywności procesu zamulania małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły*. Zesz. Nauk. Uniw. Roln. w Krakowie nr 451, Seria rozprawy, z. 328.
- Michalec, B., Tarnawski, M. (2006). *Assessment of sediment supplied to a small water reservoir at Krempna*. Proc. of XXIII Conference on the Danubian Countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management. Serbia, Belgrade.
- Porozumienie z dnia 21.12.1995 roku 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.
- Program małej retencji województwa małopolskiego. 2004. Projekt Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego i Małopolskiego Zarządu Melioracji i Urządzeń Wodnych w Krakowie, Kraków, wersja na CD, 47.
- Rausch, D.L., Heinemann, H.G. (1984). *Measurement of reservoir sedimentation*. In Erosion and Sediment Yields: Some Methods of Measurement and Modelling, Hadley RF, Walling DE (eds). Geo: Norwich, 179–200.
- Sahay, R.R. (2011). *Life forecasting of Getalsud Reservoir in India based on its sedimentation behaviour*. Lakes & Reservoirs: Research and Management, No 16, 287–292.
- Tebbi, F.Z., Dridi, H., Morris, G.L. (2012). *Optimization of cumulative trapped sediment curve for an arid zone reservoir: Foum El Kherza (Biskra, Algeria)*. Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques, 57(7).
- Verstraeten, G, Poesen J. (2000). *Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield*. Progress in Physical Geography 24, 219–251.
- Vincent, R., Dębski, D., Green, T. (2001). *Sedimentation in storage reservoirs*. Final Report. Department of Environment, Transport and the Regions. Halcrow Water, Burderop Park Swindon Wiltshire, 167.

Wiśniewski, B., Kutrowski, M. (1973). *Budownictwo specjalne w zakresie gospodarki wodnej*. Zbiorniki wodne. Prognozowanie zamulania. Wytyczne instruktażowe. Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego „Hydroprojekt”, Warszawa, 55.

dr hab. inż. Bogusław Michalec, prof. UR  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki  
30-059 Kraków, al. A. Mickiewicza 24/28  
[rmmichbo@cyf-kr.edu.pl](mailto:rmmichbo@cyf-kr.edu.pl)