



CHARAKTERYSTYKA ZAMULANIA MAŁYCH ZBIORNIKÓW WODNYCH W UKŁADZIE KASKADOWYM I RÓWNOLEGLYM ZA POMOCĄ WSKAŹNIKA SEDYMENTACJI

Bogusław Michalec

Uniwersytet Rolniczy im. H. Kollątaja w Krakowie

SILTING CHARACTERISTICS OF SMALL RESERVOIRS IN CASCADING AND PARALLEL CONFIGURATION USING SEDIMENTATION INDEX

Streszczenie

Wskaźnik sedymentacji został wprowadzony i zdefiniowany przez Churchilla. Wskaźnik ten jest ilorazem czasu zatrzymania wody w zbiorniku i średniej prędkości przepływu wody przez zbiornik. Churchill opracował zależność zdolności zbiornika do zatrzymania rumowiska w funkcji wskaźnika sedymentacji. Możliwość zastosowania wskaźnika sedymentacji do scharakteryzowania procesu zamulania małych zbiorników wodnych, a także ocena możliwości zastosowania metody Churchilla została wykonana na podstawie wyników badań czterech małych zbiorników wodnych. Do badań wytypowano dwa zbiorniki wodne w układzie kaskadowym i dwa zbiorniki wodne w układzie równoległym. Stwierdzono, że istnieje możliwość zastosowania wskaźnika sedymentacji do wyznaczenia początkowej zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymywania rumowiska niezależnie od ich wzajemnego usytuowania na danym cieku wodnym. Nie jest natomiast możliwe określenie za pomocą formuły Churchilla redukcji tej zdolności w poszczególnych latach eksploatacji zbiorników. Wykazano, że w zbiornikach w układzie równoległym zdolność do zatrzymania rumowiska zredukowana jest z jednakową intensywnością, natomiast w zbiornikach w układzie kaskadowym w zbiorniku górnym zdolność do

zatrzymania rumowiska ulega szybszej redukcji niż w zbiorniku dolnym kaskady. Opracowano również zależność intensywności zamulania od wskaźnika sedymentacji stwierdzając, że w przypadku zbiorników charakteryzujących się niższymi wartościami wskaźnika sedymentacji intensywność zamulania jest większa, jak również większy jest stopień zamulenia.

Słowa kluczowe: mały zbiornik wodny, zamulanie, wskaźnik sedymentacji, metoda Churchilla

Summary

The sedimentation index was introduced and defined by Churchill. This index is the ratio of the water retention time in the reservoir and the average flow velocity of water through the reservoir. Churchill developed sediment trap efficiency (STE) of reservoir in the function of sedimentation index. The ability to use the sedimentation index to characterize the silting process of small reservoirs, as well as the possibility of using the Churchill's method was made on the basis of the results of four small reservoirs. For testing two reservoirs in cascade and two reservoirs parallel configuration were chosen. It has been found that it is possible to use the sedimentation index to determine the initial sediment trap efficiency of small reservoirs, regardless of their relative position on the watercourse. It is not possible to determine reduce the STE of the individual years of operation using the Churchill's formula. It has been shown that in the reservoirs in parallel configuration the sediment trap efficiency is reduced with the same intensity, but in the reservoirs in cascade in the upper reservoir sediment trap efficiency is faster reduced than in the lower reservoir of the cascade. Also elaborated silting intensity dependence of the sedimentation rate by stating that in the case of reservoirs with a lower sedimentation rate values the silting intensity is greater, as well as higher is the silting degree.

Key words: *small reservoir, silting, sedimentation rate, Churchill's method*

WSTĘP

Małe zbiorniki wodne, o pojemności nie przekraczającej 5 mln m³, pełnią różne funkcje gospodarcze i przyrodnicze na obszarach wiejskich. Zapory tych zbiorników zamykają stosunkowo niewielkie zlewnie, użytkowane głównie rolniczo. Znaczenie małych zbiorników wodnych w kształtowaniu obiegu wody było i jest nadal aktualnym tematem opracowań, spośród których można wymienić między innymi prace Radczuk (1997), Radczuk i Olearczyk (2002), Mioduszewskiego (2006a, 2006b). W opracowaniach dotyczących programu

małej retencji zbiorniki te stanowią jeden z głównych elementów tzw. niesterowanej retencyjnej gospodarki wodnej (Program mała retencja 2004), przy czym podkreśla się, że oddziaływanie pojedynczego małego zbiornika na przepływy i zasoby wodne jest stosunkowo niewielkie, ale przy dużej liczbie zbiorników oddziaływanie to może być znaczące. Budowa wielu małych zbiorników wodnych wymaga nie tylko nakładów finansowych związanych z realizacją inwestycji, lecz również wymaga uwzględnienia wydatków związanych z ich eksploatacją. Jest to tym bardziej istotne gdyż koszt retencjonowania wody w małych zbiornikach wodnych, w odniesieniu do kosztów jednostkowych, tj. na metr sześcienny wody, jest znacząco większy niż w średnich i dużych zbiornikach. Ponadto zasadniczym czynnikiem utrudniającym eksploatację małych zbiorników wodnych jest proces zamulania, który w tych zbiornikach jest bardzo intensywny i przyczynia się do ich szybkiego zamulenia. Niewątpliwie na proces wypływania zbiorników ma ich rozmieszczenie w zlewni, czy też usytuowanie względem siebie. Uwzględniając lokalizację zbiorników na danym cieku mogą one tworzyć układ kaskadowy, charakteryzujący się usytuowaniem zbiorników wzdłuż cieku, czy też mogą tworzyć układ równoległy, składający dwóch lub więcej zbiorników zasilanych ze wspólnego węzła zlokalizowanego w danym przekroju cieku.

Przystępując do prac związanych z planowaniem budowy nowych małych zbiorników wodnych istotnym zagadnieniem jest określenie tzw. żywotności zbiornika. Żywotność małych zbiorników wodnych wynosi od kilkunastu do kilkudziesięciu lat, po upływie których konieczne jest podjęcie prac renowacyjnych mających na celu odmulenie. Określenie żywotności małych zbiorników wodnych jest możliwe m. in. za pomocą metod empirycznych, opracowanych na podstawie badań zamulania dużych zbiorników wodnych. Spośród tych metod należy wymienić metodą Gončarova, która jest zalecana przez wytyczne opracowane przez Wiśniewskiego i Kutrowskiego (1973). Zastosowanie metody Gončarova wymaga określenia tzw. objętości rumowiska odłożonego w zbiorniku wodnym po upływie jednego roku eksploatacji. Ze względu na brak danych dotyczących tego parametru w odniesieniu do małych zbiorników wodnych, co jest związane między innymi z brakiem danych z pomiarów, objętość ta obliczana jest ze wzoru, zapisanego w postaci stosunku iloczynu zdolności zbiornika do zatrzymania rumowiska i masy rumowiska dopływającego do zbiornika do gęstości objętościowej rumowiska. Zasadnicza trudność zastosowania tego wzoru wynika z braku możliwości poprawnego wyznaczenia zdolności małego zbiornika wodnego do zatrzymania rumowiska. Zdolność zbiornika do zatrzymania rumowiska (β) określa jaka część dostarczonego do zbiornika materiału unoszonego zostanie trwale zatrzymana w zbiorniku. Według wytycznych Wiśniewskiego i Kutrowskiego (1973) należy wyznaczyć ją z nomogramu Łopatina. Nomogram ten ze względu na ograniczenia zastosowania nie może być stosowany dla zbiorników, których współczynnik pojemności jest mniejszy

od 1,5% i których wysokości zapory jest mniejsza od 10 m. Zdolność zbiorników do zatrzymania rumowiska można wyznaczyć za pomocą różnych wzorów i nomogramów, m.in. Drozda, Karauseva, Brune'a i Allena, Brune'a, Morrisa, Lisney, Ward, Browna, Gottschalka, Churchilla, Chena, Borlanda, Łajczaka oraz Yoona (Michalec 2008). Na podstawie wyników badań zamulania 12 małych zbiorników wodnych znajdujących się w dorzeczu górnej Wisły wykazano brak możliwości zastosowania nomogramów i wzorów wymienionych autorów do wyznaczenia zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymania rumowiska (Michalec 2008). Określona za ich pomocą wartość β różniła się znacząco od określonej na podstawie bilansu rumowiska, z wyjątkiem metody Churchilla (Michalec 2008). Churchill opracował zależność zdolności do zatrzymania rumowiska (β_{Ch}) od zaproponowanego parametru, będącego ilorzem czasu zatrzymania wody w zbiorniku (T_R) i średniej prędkości przepływu wody przez zbiornik (V_S). Parametr ten został określony jako wskaźnik sedymentacji SI (ang. sedimentation index), a równanie Churchilla ma postać:

$$\beta_{Ch} = 100 - (800 \cdot SI^{-0,2} - 12) \quad (1)$$

Wskaźnik sedymentacji w tym wzorze został wyrażony jest w $s^2 \cdot \text{feet}^{-1}$. Ze względu na brak danych dotyczących średniej prędkości przepływu wody przez zbiornik (V_S), wskaźnik sedymentacji można obliczyć ze wzoru

$$SI = \frac{T_R}{V_S} = \frac{V^2}{SQ^2 \cdot L} \quad (2)$$

gdzie:

V – pojemność zbiornika [$\text{ft}^3 = 0,0283 \text{ m}^3$],

SQ – przepływ średni [$\text{ft}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 0,0283 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

L – długość zbiornika [$\text{ft} = 0,3048 \text{ m}$].

Według Trimble'a i Wilsona (2012) wskaźnik sedymentacji jest lepszym parametrem opisującym energię kinetyczną w zbiorniku niż współczynnik pojemności zbiornika zaproponowany przez Brune'a, a tym samym lepiej charakteryzuje zdolność zbiornika do zatrzymania rumowiska przedstawianą w funkcji energii kinetycznej i rodzaju rumowiska. Wprowadzony przez Brune'a współczynnik pojemności (α) jest ilorzem pojemności zbiornika i sumy średniego rocznego dopływu wody do zbiornika. Wskaźnik sedymentacji został wymieniony przez Batucę i Jordaana (2000) jako jedna z charakterystyk opisujących proces zamulania zbiorników, wymieniana wraz ze stopniem zamulenia, współczynnikiem zamulenia, intensywnością zamulania, a także zdolnością do zatrzymania rumowiska.

Wskaźnik sedymentacji (SI) zastosowany w metodzie Churchilla umożliwił określenie początkowej zdolności do zatrzymania rumowiska badanych dwunastu małych zbiorników w dorzeczu górnej Wisły, co zostało wykazane w pracy Michalca (2008). Ze względu na brak opracowań weryfikujących

możliwość zastosowania metody Churchilla do wyznaczania β małych zbiorników wodnych, zwłaszcza, że wyniki zastosowania innych metod nie odpowiadają wartościom rzeczywistym β , ustalonym na podstawie bilansu rumowiska, istotne jest zweryfikowanie możliwości zastosowania metody Churchilla. W pracy przedstawiono możliwość wykorzystania wskaźnika sedymentacji do scharakteryzowania procesu zamulania małych zbiorników wodnych w układzie kaskadowym i równoległym. Ponadto oceniono możliwość zastosowania metody Churchilla do wyznaczenia zdolności do zatrzymywania rumowiska małych zbiorników wodnych na początku ich eksploatacji (początkowej wartości β), jak również w trakcie ich eksploatacji. Do badań wytypowano zbiorniki Brzoza Stadnicka i Brzoza Królewska usytuowane w zabudowie kaskadowej na potoku Tarlaka i dwa zbiorniki w Zesławicach w układzie równoległym na rzece Dłubni.

Tabela 1. Podstawowe parametry badanych małych zbiorników wodnych
Table 1. Basic parameters of studied small reservoirs

Ciek Water-course	Zbiornik wodny Reservoir	Pojemność początkowa Origin capacity V [tys. m ³]	Powierzchnia zalewu Surface area [ha]	Długość zbiornika Reservoir length L [m]	Przeływ średni roczny Mean annual flow SQ [m ³ ·s ⁻¹]
Dłubnia	Zesławice I	228,0	9,50	600	1,090 / 0,709
	Zesławice II	198,0	11,30	710	0,381
Tarlaka	Brzoza Stadnicka	10,9	1,15	210	0,224
	Brzoza Królewska	48,9	4,45	440	0,053

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW BADAŃ

Zbiornik Brzoza Stadnicka jest zbiornikiem górnym kaskady zbiorników na potoku Tarlaka. Jest on zlokalizowanym w kilometrze 10+800 potoku Tarlaka, natomiast zbiornik dolny Brzoza Królewska znajduje się w kilometrze 6+110 tego ciek. Zbiornik Brzoza Stadnicka został oddany do eksploatacji w 1995 roku i położony jest na terenie gminy Żołyńca w powiecie łańcuckim. Zbiornik ten powstał w celach gospodarczych, rekreacyjnych, przeciwpożarowych oraz w celu poprawy parametrów retencyjności potoku Tarlaka oraz odcinkowej redukcji spadku jego dna (Instrukcja eksploatacji... 1995). Powierzchnia zlewni tego zbiornika wynosi 7,6 km². Zbiornik Brzoza Królewska, znajdujący się na terenie gminy Leżajsk, został oddany do eksploatacji w 1978 roku. W 1996 roku zbiornik został odmulony (Operat wodno-prawny... 1996). Zbiornik po-

wstał w celu powstrzymania erozji dennej i bocznej potoku Tarlaka i Tartaczyny, przywrócenia do eksploatacji rolniczej terenów przyległych oraz poprawy ich warunków wilgotnościowych. Ponadto stanowi on zabezpieczenie przeciwpożarowe, zapewnia rozwój gospodarki rybacko – wędkarskiej i jest miejscem wypoczynku (Operat wodno-prawny... 1996). Powierzchnia zlewni zbiornika Brzoza Królewska wynosi 30,4 km² i zawiera zlewnię zbiornika Brzoza Stadnicka. Podstawowe parametry tych zbiorników w kaskadzie potoku Tarlaka zamieszczono w tabeli 1.

Zbiorniki wodne w Zesławicach zamykają zlewnię rzeki Dłubni w km 8+700. Powierzchnia zlewni zbiorników wynosi 218,1 km² (Instrukcja gospodarowania wodą... 2003). Główny zbiornik wodny w Zesławicach, oznaczony nazwą Zesławice I (tab. 1), został oddany do eksploatacji w 1966 roku. Jego zadaniem było zaopatrzenie w wodę przemysłową ówczesną Hutę im Lenina oraz w wodę pitną dla Krakowa. W 1983 roku, po siedemnastu latach eksploatacji, stwierdzono, że jego zamulenie wynosi ponad 50% (Odmulenie zbiornika... 1989). Zanim przystąpiono do odmulenia zbiornika Zesławice I wykonano boczny zbiornik remontowy – Zesławice II (tab. 1). Do budowy remontowego zbiornika wodnego przystąpiono w 1986 roku, w 1987 roku został on oddany do eksploatacji. Zadaniem bocznego zbiornika remontowego było przejęcie funkcje zbiornika głównego podczas gdy ten był odmulany [Michalec, Pęczek 2008]. Po wybudowaniu zbiornika Zesławice II i skierowaniu części przepływu wody ze wspólnego węzła wodnego na rzece Dłubni średni roczny przepływ (SQ) dla zbiornika Zesławice I uległ zmniejszeniu z wartości 1,09 do 0,709 m³·s⁻¹ (tab. 1).

METODYKA

Metodyka i wyniki pomiarów objętości osadów rumowiska w badanych zbiornikach wodnych, a także metodyka i wyniki obliczeń natężenia transportu rumowiska dopływającego do zbiorników została szczegółowo przedstawiona w pracach Michalca (2008), Michalca i Pęczka (2008), Majerczyk i in (2012). Wyniki pomiarów objętości rumowiska odłożonego w zbiornikach i rumowiska dopływającego do zbiorników umożliwiły określenie początkowej zdolności do zatrzymania rumowiska, jak również tej zdolności w kolejnych latach eksploatacji zbiorników, w których wykonano pomiary zamulania.

Wskaźnik sedymentacji został obliczony według wzoru 2, zarówno dla pojemności początkowej danego zbiornika, jak również dla jego zmniejszonych pojemności w wyniku odkładania rumowiska. Na podstawie tak wyznaczonych wskaźników sedymentacji określono zdolność początkową badanych zbiorników do zatrzymania rumowiska według wzoru Churchilla (wzór 1), a także zredukowaną wartość tej zdolności w poszczególnych latach, w których wykonano

pomiary zamulania. Wyniki tych obliczeń wartości β_{ch} porównano z wartościami β obliczonymi na podstawie bilansu rumowiska.

Wskaźnik sedymentacji został obliczony również w jednostce układu metrycznego, tj. w $s^2 \cdot m^{-1}$. Wskaźnik ten został poddany analizie korelacyjnej z dwoma miarami opisującymi proces zamulania, tj. ze stopniem zamulenia (S_z) i intensywnością zamulania (S_i). Stopień zamulenia (S_z) badanych zbiorników wodnych obliczono jako stosunek objętości rumowiska zatrzymanego do pojemności początkowej zbiornika. Jest on wyrażony w procentach. Intensywność zamulania (S_i) określono jako iloraz objętości rumowiska zatrzymanego w zbiorniku po upływie danego okresu i czasu, wyrażonego w latach. W niniejszej pracy do obliczenia stopnia zamulenia i intensywności zamulania wykorzystano wyniki badań zamieszczone w opracowaniach Michalca (2008), Michalca i Pęczka (2008), Majerczyk i in. (2012) oraz Tarnawski (2012).

WYNIKI I DYSKUSJA

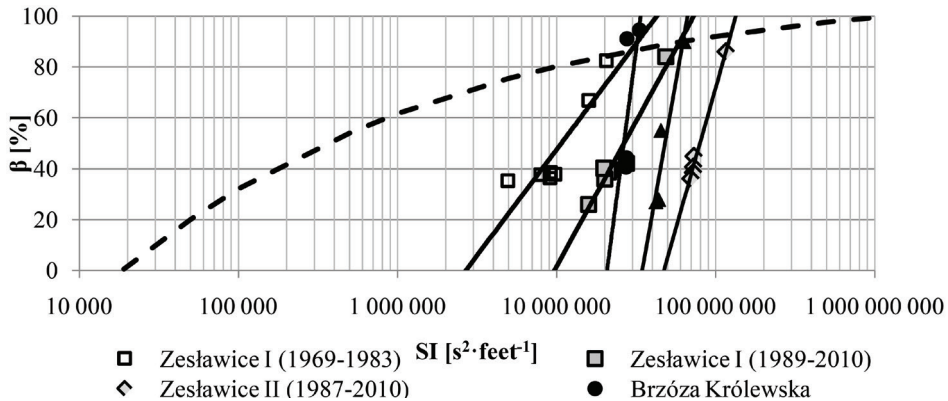
Zdolność początkowa badanych zbiorników wodnych (β_{ch}) do zatrzymania rumowiska określona według równania (1), tj. według równania Churchilla (tab. 2, wiersz dla roku eksploatacji zero), jest zbliżona do początkowej wartości β_{rz} , wyznaczonej z bilansu rumowiska zatrzymanego i dopływającego do zbiorników. Niewielki różnice wyników wynoszące 2,45% – zbiornik Zesławice I przed wybudowaniem zbiornika bocznego, 5,81% – zbiornik Zesławice I po wybudowaniu zbiornika bocznego, 7,55% – zbiornik Zesławice II, 8,01% – zbiornik Brzoza Królewska i 0,06% – zbiornik Brzoza Stadnicka, wskazują na możliwość zastosowania metody Churchilla do wyznaczenia początkowej zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymywania rumowiska. Określenie zredukowanej wartości β za pomocą równania (1) okazało się niemożliwe.

Wartości β_{ch} (tab. 2) dla zbiornika Zesławice I przed wybudowaniem zbiornika bocznego po siedemnastu latach eksploatacji wynosi 75,3%, a wartość β_{rz} jest równa 35,2%. Natomiast po wybudowaniu zbiornika bocznego wartość β_{ch} po dwudziestu jeden latach wynosi 83,0% dla zbiornika Zesławice I, a wartość β_{rz} jest równa 26,0%. Wartość β_{ch} dla zbiornika Zesławice II po dwudziestu trzech latach wynosi 90,4%, natomiast wartość β_{rz} jest równa 31,6%. Również w przypadku zbiornika Brzoza Królewska wartość β_{ch} po szesnastu latach wynosi 85,9%, a wartość β_{rz} jest równa 40,7%. Wartość β_{ch} po siedemnastu latach eksploatacji zbiornika Brzoza Stadnicka wynosi 88,1%, natomiast wartość β_{rz} jest równa 27,0%. Wyniki te wskazują na brak możliwości zastosowania wskaźnika SI w metodzie Churchilla do określenia zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymywania rumowiska w kolejnych latach ich eksploatacji. W celu zobrazowania wyników obliczeń na rycinie 1 przedstawiono wartości β_{rz} badanych zbiorników wodnych na tle krzywej Churchilla, wyznaczonej według równania (1).

Tabela 2. Wskaźnik sedymentacji (SI) oraz zdolność do zatrzymania rumowiska badanych zbiorników określona na podstawie bilansu rumowiska (β_{rz}) i według Churchilla (β_{Ch}), a także stopień zamulenia (S_z) i intensywność zamulania (S_i)

Table 2. Sedimentation index (SI) and sediment trap efficiency of investigated reservoirs established acc. to sediment balance (β_{rz}) and acc. to Churchill (β_{Ch}), and also silting ratio (S_z) i silting intensity (S_i)

Zbiornik Reservoir	Rok Year	Rok eksploatacji Year of operation	SI [s ² ·feet ⁻¹]	SI [s ² ·m ⁻¹]	β_{rz} [%]	β_{Ch} [%]	S_z [%]	S_i [m ³ ·rok ⁻¹]
Zesławice-I	1969	0	2,052·10 ⁷	6,731·10 ⁷	82,4	84,4	–	–
	1968	2	1,595·10 ⁷	5,233·10 ⁷	66,7	83,0	11,8	13484
	1969	3	9,800·10 ⁶	3,215·10 ⁷	37,7	80,0	30,9	23475
	1970	4	9,145·10 ⁶	3,000·10 ⁷	38,5	79,6	33,2	18945
	1971	5	9,089·10 ⁶	2,982·10 ⁷	36,2	79,5	33,4	15250
	1974	8	7,937·10 ⁶	2,604·10 ⁷	37,5	78,6	37,8	10774
	1983	17	4,943·10 ⁶	1,622·10 ⁷	35,2	75,3	50,9	6829
Zesławice-I	1989	0	4,849·10 ⁷	1,591·10 ⁸	83,9	88,8	–	–
	1999	10	2,755·10 ⁷	9,037·10 ⁷	42,2	86,0	24,6	5616
	2005	16	2,175·10 ⁷	7,135·10 ⁷	39,6	84,7	33,0	4707
	2006	17	2,120·10 ⁷	6,957·10 ⁷	38,7	84,6	33,9	4543
	2008	19	2,002·10 ⁷	6,569·10 ⁷	35,9	84,3	35,7	4289
	2009	20	1,973·10 ⁷	6,473·10 ⁷	40,2	84,2	36,2	4129
	2010	21	1,587·10 ⁷	5,207·10 ⁷	26,0	83,0	42,8	4646
Zesławice-II	1987	0	1,159·10 ⁸	3,804·10 ⁸	86,0	92,5	–	–
	2006	19	9,193·10 ⁷	2,391·10 ⁸	44,9	90,6	20,7	2159
	2008	21	9,165·10 ⁷	2,377·10 ⁸	40,7	90,6	21,0	1976
	2009	22	9,156·10 ⁷	2,372·10 ⁸	38,5	90,6	21,0	1892
	2010	23	8,986·10 ⁷	2,285·10 ⁸	36,1	90,4	22,5	1937
B. Stadnicka	1995	0	6,280·10 ⁷	2,060·10 ⁸	90,0	89,9	–	–
	2002	7	4,507·10 ⁷	1,479·10 ⁸	55,1	88,4	15,3	238
	2010	15	4,367·10 ⁷	1,433·10 ⁸	27,9	88,3	16,6	121
	2012	17	4,199·10 ⁷	1,378·10 ⁸	27,0	88,1	18,2	117
B. Królewska	1996	0	3,311·10 ⁷	1,086·10 ⁸	94,5	86,9	–	–
	2002	6	2,769·10 ⁷	9,085·10 ⁷	91,1	86,0	8,5	697
	2010	14	2,747·10 ⁷	9,013·10 ⁷	44,3	86,0	8,9	312
	2012	16	2,724·10 ⁷	8,937·10 ⁷	40,7	85,9	9,3	284



Rysunek 1. Zdolność badanych zbiorników wodnych do zatrzymania rumowiska na tle krzywej Churchilla

Figure 1. Sediment trap efficiency of investigated reservoirs on the background of Churchill's curve

Zdolność badanych zbiorników do zatrzymania rumowiska (β_{rz}) po kilku lub kilkunastu latach eksploatacji wynosi ok. 40% (tab. 1). Wartości β_{rz} przedstawione na tle krzywej Churchilla, wyznaczonej z równania (1) można skorelować ze wskaźnikiem sedymentacji (ryc. 1). Zależności korelacyjne zamieszczono w tabeli 3. Współczynniki korelacji zależności regresyjnych wskazują na bardzo silny związek zmiennych β i SI z wyjątkiem zbiornika Zesławice I przed wybudowaniem zbiornika Zesławice II i zbiornika Brzóza Królewska, dla których opracowane równania korelacji mają odpowiednio silny i słaby związek.

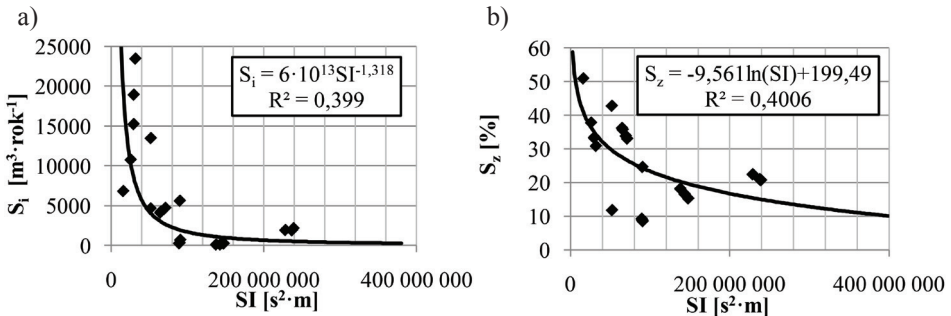
W dwóch zbiornikach w układzie równoległym w porównaniu z jednym zbiornikiem zlokalizowanym w tym samym przekroju rzeki wartość β_{rz} nie różni się znacząco. Po siedemnastu latach eksploatacji zbiornika Zesławice I zarówno w okresie przed wybudowaniem zbiornika Zesławice II, jak i po jego wybudowaniu, wartość β_{rz} wynosi odpowiednio 35,2% i 38,7% (tab. 2). Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że pojemność początkowa zbiornika Zesławice I po odmuleniu i wybudowaniu równoległego zbiornika Zesławice II nie uległa zmianie, zmniejszyło się jednak natężenie przepływu wody przez zbiornik Zesławice I, a wartość β_{rz} w tych dwóch okresach przed i po wybudowaniu zbiornika równoległego jest podobna pomimo średnio dwukrotnie zwiększonej wartości wskaźnika sedymentacji wyrażonego w jednostkach $s^2 \cdot \text{feet}^{-1}$.

W przypadku zbiorników w układzie kaskadowym redukcja wartości β_{rz} przebiega odmiennie, przy czym w zbiorniku górnym, tj. w zbiorniku Brzóza Stadnicka, w porównywalnym okresie eksploatacji jak dla zbiornika dolnego kaskady, wartość β_{rz} jest niepełna dwukrotnie niższa. Wskazuje to na fakt osią-

gnięcia w tym zbiorniku takich warunków hydraulicznych przepływu wody i rumowiska, w których coraz większa część rumowiska nie zostaje zatrzymywana w zbiorniku. Jest to wynikiem wypływania zbiornika, na co wskazują wartości stopnia zamulenia (S_z), zamieszczone w tabeli 2. Są one około dwukrotnie większe od wartości stopnia zamulenia zbiornika dolnego kaskady, tj. zbiornika Brzoza Królewska. Zbiorniki dolny kaskady charakteryzuje się średnio ponad 1,6-krotnie większą wartością wskaźnika sedymentacji wyrażonego w jednostkach $s^2 \cdot \text{feet}^{-1}$.

Tabela 3. Zależności korelacyjne zmiennych β (zdolność do zatrzymania rumowiska) i SI (wskaźnik sedymentacji) opracowane dla badanych zbiorników
Table 3. Correlation relationships of variables β (sediment trap efficiency) and SI (sedimentation index) established for investigated reservoirs

Zbiornik wodny Reservoir	Równanie Equation	Współczynnik korelacji Correlation coefficient
Zesławice I (1969-1983)	$\beta = 36,18 \ln SI - 535,7$	0,892
Zesławice I (1989-2010)	$\beta = 49,59 \ln SI - 797,8$	0,966
Zesławice II	$\beta = 96,26 \ln SI - 1701,3$	0,995
Brzoza Stadnicka	$\beta = 206,30 \ln SI - 3475,6$	0,664
Brzoza Królewska	$\beta = 151,58 \ln SI - 2630,1$	0,946



Rysunek 2. a) Intensywność zamulania (S_i) w funkcji wskaźnika sedymentacji (SI) i b) Stopień zamulenia (S_z) w funkcji wskaźnika sedymentacji (SI)
Figure 2. a) Silting intensity (S_i) in the function of sedimentation index (SI) and b) Silting ratio (S_z) in the function of sedimentation index (SI)

Określono również intensywność zamulania (S_i) badanych zbiorników (tab. 2). Jak podają Wiśniewski, Kutrowski (1973) intensywność zamulania nie jest wielkością stałą. Maleje ona w miarę zmniejszania się pojemności zbiorni-

ka wodnego i jest funkcją powierzchni zlewni, denudacji i pojemności zbiornika. Zatem, jak podają Wiśniewski, Kutrowski (1973), intensywność zamulania może zmieniać się również w wyniku zmiany zabudowy i zagospodarowania zlewni. Przedstawiając zależność intensywności zamulania od wskaźnika sedymentacji (ryc. 2a), stwierdzono, że w przypadku zbiorników charakteryzujących się niższymi wartościami wskaźnika sedymentacji intensywność zamulania jest większa, jak również większy jest stopień zamulenia (ryc. 2b).

WNIOSKI

Wskaźnik sedymentacji jest charakterystyką procesu zamulania, która może dobrze opisywać proces redukcji pojemności małych zbiorników wodnych, ich zdolności do zatrzymania rumowiska, a także może być wykorzystana do opracowania zależności umożliwiających określenie intensywności zamulania i stopnia zamulenia.

Stwierdzono, że niezależnie od układu zbiorników względem siebie, istnieje możliwość wyznaczenia początkowej zdolności do zatrzymania rumowiska za pomocą metody Churchilla, zarówno w przypadku małych zbiorników wodnych układzie kaskadowym, jak również równoległym. Ze względu na intensywną redukcję zdolności do zatrzymania rumowiska badanych zbiorników wodnych nie jest możliwe określenie tej zdolności w kolejnych latach eksploatacji za pomocą metody Churchilla.

Badane zbiorniki wodne w układzie kaskadowym charakteryzują się względnie największą redukcją zdolności do zatrzymania rumowiska. W ciągu kilkunastu lat eksploatacji wartość β_{rz} zbiornika górnego kaskady (zbiornik Brzóza Stadnicka) została zredukowana z 90 do 27%, natomiast wartość β_{rz} zbiornika dolnego kaskady (zbiornik Brzóza Królewska) została w tym samym czasie zredukowana z 90 do niespełna 41%. W porównywalnym czasie eksploatacji zbiorników w układzie równoległym redukcja wartości β_{rz} wynosiła 35,9% (zbiornik Ześlawice I) i 44,9% (zbiornik Ześlawice II).

LITERATURA

- Batucu, G. D., Jordaan, M. J. Jr. (2000). *Silting and Desilting of Reservoirs*. A.A.Balkema. Rotterdam, Netherlands.
- Instrukcja eksploatacji zbiornika retencyjnego na potoku Tarlaka w Brzózce Stadnickiej. Gmina Żołyńa, Wojewódzki Zarząd Inwestycji w Rzeszowie, Rzeszów, 1995.
- Instrukcja gospodarowania wodą, utrzymania i eksploatacji zbiornika – Krakowski Związek Spółek Wodnych. Maszynopis. Kraków, 2003.

- Majerczyk, A., Michalec, B., Leksander, B. (2012). *Prognoza zamulania zbiorników wodnych Brzoza Stadnicka i Brzoza Królewska*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Kraków, Nr 2/IV, 17-27.
- 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., Pęczek, K. (2008). *Określenie stopnia zamulenia zbiorników wodnych w Zesławicach*. Przegląd Naukowy, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, Rocznik XVII, z.2 (40), Warszawa, 178-184.
- Mioduszewski, W. (2006). *Małe zbiorniki wodne*. Wydawnictwo IMUZ Falenty, 127.
- Mioduszewski, W. (2006). *Woda w krajobrazie rolniczym*. Rozprawy naukowe i monografie nr 18, Wydawnictwo IMUZ Falenty, 221.
- Odmulenie zbiornika na rz. Dłubni. Dokumentacja Jednostadiowa, Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego i Melioracji w Krakowie, 1989.
- Operat wodno-prawny na pobór wody i eksploatację zbiornika na pot. Tarlaka w km 6+110. Zbiornik Brzoza Królewska. Wojewódzki Zarząd Inwestycji Rolniczych w Rzeszowie, Rzeszów, 1996.
- 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.
- Radczuk, L. (1997). *Informacja hydrologiczna dla celów projektowania małych zbiorników retencyjnych*. Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Mała retencja wodna”, Informacje Naukowe i Techniczne nr 1.
- Radczuk, L., Olearczyk, D. (2002). *Małe zbiorniki retencyjne jako element poprawy bilansu wodnego zlewni użytkowanej rolniczo*. Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej w Krakowie, Nr 393, seria Inżynieria Środowiska, Z. 23, 139-148.
- Tarnawski, M., Baran, A., Michalec, B., (2012). *Ocena możliwości rolniczego wykorzystania zbiornikowych osadów dennych*. Raport z projektu badawczego nr N305 295037 finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, zrealizowany w latach 2009-2012.
- Trimble, S.W., Wilson, B. (2012). *Reservoir and Lake Trap Efficiency*. Encyclopedia of Earth Sciences, Series: Encyclopedia of Lakes and Reservoirs. Springer Science+Business Media B.V.
- 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