

# PROGNOZA ZAMULANIA I OCENA ZASOBÓW WODNYCH PLANOWANYCH ZBIORNIKÓW MAŁEJ RETENCJI WODNEJ

**Bogusław MICHAŁEC**

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Wodnej

*Słowa kluczowe: mały zbiornik wodny, prognoza zamulania, stopień zamulenia, zasoby wodne*

## Streszczenie

Podjęto próbę określenia tempa zamulania małych zbiorników wodnych w zależności od wielkości uwzględniającej ich pojemność i powierzchnię zlewni. W wyniku badań zamulania dziewięciu małych zbiorników wodnych w dorzeczu górnej Wisły określono średni roczny stopień zamulenia  $S_z$  każdego ze zbiorników oraz wyznaczono tzw. współczynniki zlewniowe  $V/A$ , będące ilorzem pojemności zbiornika  $V$  i powierzchni jego zlewni  $A$ . Opracowaną zależność w postaci:  $S_z = 1355(V/A)^{-0,96}$  przyjęto za podstawę oceny średniego rocznego zamulenia małego zbiornika wodnego. Następnie określono stopień zamulenia każdego z 65 zbiorników wodnych proponowanych do budowy w „Programie małej retencji...” [2004] dla wybranych dekad stuletniego okresu eksploatacji tych zbiorników. Stanowił on podstawę wstępnej prognozy zamulania i oceny dyspozycyjnych zasobów wodnych. Otrzymane wyniki obliczeń potwierdzają właściwą lokalizację zbiorników, zapewniającą zachowanie zasobów wody w warunkach nieznacznego zmniejszenia pojemności zbiorników. Stwierdzono, że po stu latach eksploatacji ponad 44% zbiorników będzie charakteryzować się niskim stopniem zamulenia, a zmniejszenie ich pojemności nie przekroczy 5%. Jedynie 10% projektowanych zbiorników po stu latach eksploatacji straci 50% swojej pojemności.

## WSTĘP

Wstępnie proponowane lokalizacje małych zbiorników wodnych, w ramach zwiększenia retencji, były w większości wynikiem prac studialnych, realizowanych w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX w. w występujących wówczas uwarunkowaniach

przestrzennych i z uwzględnieniem ówczesnych ocen przewidywanych potrzeb w zakresie zapotrzebowania na wodę oraz ochrony przed powodzią. W ramach „Programu małej retencji...” [2004] ustalono lokalizację 65 zbiorników i 4 polderów w województwie małopolskim. Ich łączna pojemność całkowita umożliwi retencjonowanie ok. 38 hm<sup>3</sup> wody, a szacowany w 2000 r. koszt ich budowy ma wynosić 1,03 mld zł. Lokalizację tych zbiorników zaplanowano w przekrojach zamykających zlewnie wielkości od kilku do kilkunastu kilometrów kwadratowych, co jak zostało podkreślone, wynika z samej idei małej retencji. W „Programie małej retencji...” [2004] stwierdzono, że „... zbiorniki małej retencji lokalizowane na większych zlewniach mają z reguły niezbyt korzystne wskaźniki techniczne, głównie w wyniku spodziewanego krótkiego czasu ich zamulania ...”. Określenie czasu zamulania formułą Gončarova [WIŚNIEWSKI, KUTROWSKI, 1973] wymaga przeprowadzenia szczegółowych prac studialnych, obejmujących między innymi obliczenie natężenia transportu rumowiska, określenie charakterystyk rumowiska i zdolności zbiorników do jego zatrzymywania. Zasadnicze utrudnienie w określeniu intensywności zamulania małych zbiorników wodnych wynika z braku danych hydrologicznych oraz wytycznych, wskazujących właściwą metodę prognozowania zamulania małych zbiorników wodnych. Trudność ta wynika również z lokalizacji tych zbiorników w małych zlewniach, które nie są kontrolowane hydrologicznie. Dlatego zastosowanie metod bezpośrednich, ze względu na brak pomiarów hydrometrycznych, uniemożliwia określenie transportu rumowiska unoszonego. W związku z tym określenie ilości rumowiska, dopływającego do małych zbiorników jest możliwe jedynie za pomocą metod pośrednich.

Zasadniczą trudność w prognozowaniu zamulania małych zbiorników wodnych według wytycznych instruktażowych [WIŚNIEWSKI, KUTROWSKI, 1973] stanowi określenie zdolności zbiornika do zatrzymywania rumowiska, która jest niezbędna zarówno na etapie opracowywania prognozy wstępnej, jak i szczegółowej. Zdolność małego zbiornika do zatrzymywania rumowiska, określona metodami Łopatina, Drozda, Karauševa [DĄBKOWSKI, SKIBIŃSKI, ŻBIKOWSKI, 1982], Bruna, Browna, Bruna i Allena [HEINEMANN, 1984], odbiega od wartości rzeczywistej, określonej na podstawie pomiarów [MICHALEC, TARNAWSKI, 2004]. Wykazano, że – stosując metodę Churchilla [BATUCA, JORDAAN, 2000] – uzyskuje się wartości zbliżone do rzeczywistych. Metoda ta wymaga jednak określenia przepływu średniego rocznego oraz czasu zatrzymania wody w zbiorniku. Niewłaściwie określona zdolność zbiornika wodnego do zatrzymywania rumowiska prowadzi do niepoprawnej prognozy zamulania i tym samym błędnego określenia jego żywotności.

W przypadku realizacji programu małej retencji i budowy kilkunastu małych zbiorników wodnych wydaje się nieodzowna prognoza zamulania, a tym samym ocena dyspozycyjnych zasobów wodnych. Już na etapie określenia lokalizacji należy ocenić warunki zamulania zbiornika. W wielu opracowaniach stwierdza się ogólnie, że zbiorniki zamykające zlewnie o większej powierzchni z reguły charakteryzują się niezbyt korzystnymi wskaźnikami technicznymi, głównie ze względu na szybkie zamulanie, jak również na małe możliwości zbiorników w zakresie redukcji maksymalnych przepływów. Opracowanie metody, umożliwiającej wstępną ocenę intensywności zamulania projektowanego małego zbiornika, bez konieczności szczegółowej analizy parametrów zlewni, niezbędnych do określenia transportu rumowiska metodą pośrednią, oraz określenia zdolności zbiornika do zatrzymywania rumowiska i obliczeń zamulania formułą Gončarova, stanowi istotny temat badawczy.

Celem prezentowanych badań było opracowanie metody umożliwiającej w sposób przybliżony prognozowanie zamulania małych zbiorników wodnych i określenie wielkości dyspozycyjnych zasobów wodnych projektowanych zbiorników. Opracowano zależność umożliwiającą określenie średniego rocznego zamulenia małego zbiornika wodnego w funkcji powierzchni jego zlewni. Zależność ta umożliwi dokonanie oceny lokalizacji małych zbiorników wodnych przyjętej w „Programie małej retencji województwa małopolskiego” [2004] ze względu na intensywność zamulania. W wyniku wieloletnich badań zamulania dziewięciu małych zbiorników wodnych w dorzeczu górnej Wisły określono średni roczny stopień zamulenia  $S_z$  każdego ze zbiorników oraz współczynniki zlewniowe  $V/A$ , będące ilorzem pojemności zbiornika i powierzchni jego zlewni.

## METODY BADAŃ

Badaniami zamulania i transportu rumowiska unoszonego objęto dziewięć zbiorników wodnych zlokalizowanych w dorzeczu górnej Wisły (tab. 1).

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

**Table 1.** Basic initial parameters of the studied water reservoirs

Zbiornik/ciek Reservoir/water-course	Pojemność pierwotna zbiornika $V$ Initial reservoir's capacity $V$ tys. m <sup>3</sup>	Powierzchnia zalewu Surface area ha	Średnia głębokość zbiornika Mean depth of reservoirs m	Długość zbiornika Length of reservoir m
Krempna-1, Krempna-2/ Wisłoka	119,1 <sup>1)</sup> 112,0 <sup>2)</sup>	3,20	3,72 <sup>1)</sup> 3,50 <sup>2)</sup>	400
Zesławice/Dłubnia	228,0	9,50	2,40	650
Rzeszów/Wisłok	1 800,0	68,20	2,64	6 700
Ożanna/Złota	252,0	18,00	1,40	950
Niedźwiadek/Górno	124,5	8,10	1,54	550
Narożniki/Dęba	283,0	28,00	1,01	2 000
Cierpisz/Tuszymka	34,5	2,30	1,50	340
Cedzyna/Lubrzanka	1 554,0	64,00	2,43	2 200
Wapienica/Wapienica	1 100,0	17,50	6,29	1 000

<sup>1)</sup> Krempna-1. <sup>2)</sup> Krempna-2.

Po odmuleniu i przebudowie pojemność zbiornika wodnego w Krempnej uległa zmniejszeniu. Zmianie uległ również kształt zbiornika w części wlotowej. Z tego względu zbiornik ten potraktowano jako nowy obiekt, nadając mu oznaczenie Krempna-2. Oznaczenie Krempna-1 dotyczy zbiornika przed przebudową (tab. 1).

Omawiane zbiorniki są zlokalizowane na zlewniach zróżnicowanych pod względem geomorfologicznym, geologicznym, hydrologicznym oraz sposobu użytkowania i zagospodarowania. Dominującym rodzajem rumowiska, dopływającego do zbiorników, jest rumowisko unoszone, które stanowi ponad 90% [BEDNARCZYK, MICHAŁEC, 1997; MICHAŁEC,

2003a], co potwierdza wyniki badań zamieszczone w m.in. pracach BRAŃSKIEGO [1975] i WIŚNIEWSKIEGO [1972], według których udział rumowiska wleczonego stanowi odpowiednio 8 i 8–12% całkowitego transportu w rzekach południowej Polski.

Zróżnicowany jest również transport rumowiska unoszonego, określony metodą DR-USLE (tab. 2). Szczegółowy opis badanych zbiorników i zlewni oraz wyniki obliczeń transportu rumowiska unoszonego zamieszczone w pracach BEDNARCZYKA [1994], BEDNARCZYKA i MICHALCA [1996a, b; 1997; 2002] oraz MICHALCA [2003a, b; 2004].

Na podstawie analizy granulometrycznej prób osadów zdeponowanych w badanych zbiornikach wodnych stwierdzono, że zbiorniki te są zamulone materiałem mineralnym drobnoziarnistym, którego średnica zastępcza jest mniejsza od 2 mm. Rumowisko o większych średnicach zostaje zatrzymane w części wlotowej zbiorników. Próby pobierano standardowym próbnikiem Beekera firmy Eijkelkamp, zgodnie z metodyką opracowaną przez MADEYSKIEGO [1998]. Stosowanie rur z PCV o średnicy 5 cm i długości 100 cm umożliwia pobranie prób nie tylko z wierzchnich warstw osadu, ale także z głębszych. Próby osadów pobierano w częściach wlotowych, środkowych i wylotowych zbiorników, w każdym punkcie z warstwy powierzchniowej (warstwa górna), tj. na głębokości 0–15 cm, i z głębokości 40–55 cm pod powierzchnią osadów (warstwa dolna). Próby te poddano analizie składu granulometrycznego i zawartości części organicznych. Średnią gęstość objętościową rumowiska odłożonego w badanych zbiornikach podano w tabeli 2.

Pomiary zamulania zbiorników wodnych Krempna, Zesławice, Ożanna, Niedźwiadek, Narożniki i Cierpisz wykonano sondą drążkową z łodzi. Ze względu na znaczne głębokości zbiorników Wapienica i Cedzyna w pomiarach posłużono się echosondą. Pomiary we wszystkich zbiornikach wykonywano w przekrojach poprzecznych oraz metodą punktów rozproszonych. W badaniach wykorzystano dane archiwalne pomiarów zbiornika Zesławice, wykonanych przez pracowników Katedry Inżynierii Wodnej Akademii Rolniczej w Krakowie w okresie 1969–1983. Wyniki pomiarów głębokości w zbiornikach zostały naniesione na powykonawcze przekroje poprzeczne. Następnie określono powierzchnię odkładów rumowiska w poszczególnych przekrojach i obliczono objętość odkładów w zbiornikach.

Wyniki pomiarów zamulenia umożliwiły określenie średniego rocznego stopnia zamulenia  $S_z$  każdego zbiornika. Stopień zamulenia określono jako iloczyn objętości odkładów rumowiska i pojemności pierwotnej zbiornika. Wyznaczono również tzw. współczynniki zlewniowe  $V/A$ , będące ilorazem pojemności zbiornika i powierzchni jego zlewni. Współczynnik zlewniowy przyjęto według prac Bruna i Allena (za: HEINEMANN [1984]), BROWNA [1950] oraz GOTTSCHALKA [1965].

## WYNIKI BADAŃ

Obliczono stopień zamulenia badanych zbiorników w dorzeczu górnej Wisły w latach pomiarów oraz obliczono średni roczny stopień zamulenia na podstawie objętości odkładów rumowiska, określonej według ostatniego pomiaru danego zbiornika (tab. 3).

Zamulenie zbiorników Krempna–2 i Zesławice zwiększyło się w analizowanym okresie, przy czym jego intensywność malała w czasie. Szczegółową analizę zmiany tempa zamulania badanych zbiorników i jego wpływ na warunki przepływu rumowiska oraz ich

**Tabela 2.** Powierzchnia zlewni, średni roczny transport rumowiska unoszonego, denudacja jednostkowa i średnia gęstość objętościowa rumowiska badanych zbiorników wodnych

**Table 2.** Catchment area, mean annual transport of suspension, specific denudation and mean bulk density of sediments in studied water reservoirs

Zlewnia zbiornika wodnego Catchment of the water reservoir	Powierzchnia zlewni Catchment area $A \text{ km}^2$	Obliczony średni roczny transport rumowiska unoszonego $R_u \text{ Mg}\cdot\text{rok}^{-1}$ Calculated mean annual transport of suspended sediment $R_u \text{ Mg}\cdot\text{year}^{-1}$	Średnia gęstość objętościowa rumowiska odłożonego w zbiorniku Mean bulk density of sediment deposited in the reservoir $\rho_0 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$	Denudacja jednostkowa $D_0 \text{ Mg}\cdot\text{rok}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ Specific denudation $D_0 \text{ Mg}\cdot\text{year}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$
Krempna-1, Krempna-2	165,30	41 017,0	1,23	248,1
Zesławice	218,00	17 022,3	1,03	78,1
Rzeszów	2 060,70	294 311,0	1,19	142,8
Ożanna	136,30	1 644,0	1,19	12,1
Niedźwiadek	18,75	736,5	1,11	39,3
Narożniki	25,00	720,3	1,07	28,8
Cierpisz	54,50	743,6	1,32	13,6
Cedzyna	140,00	7 091,8	1,12	50,7
Wapienica	55,53	919,1	1,29	16,6

**Tabela 3.** Objętość osadów rumowiska, stopień zamulenia i współczynnik zlewniowy badanych zbiorników w poszczególnych latach eksploatacji

**Table 3.** Volume of deposited sediment, silting degree and the watershed coefficient of studied reservoirs in particular years of operation

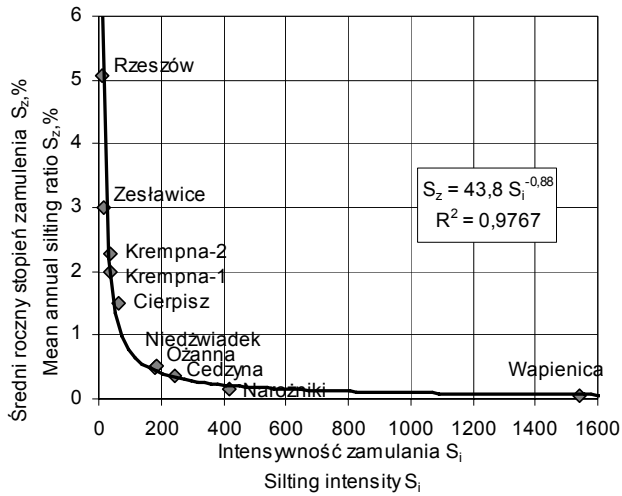
Zbiornik wodny Water reservoir	Współczynnik zlewniowy Watershed coefficient $V/A$ $m^3 \cdot km^{-2}$	Rok pomiaru Year of measurement	Lata eksploatacji Years of exploitation	Objętość osadów rumowiska Volume of sediment $10^3 m^3$	Stopień zamulenia w roku pomiaru, % Silting degree in the year of measurement, % $S_{z,t}$	Średni roczny stopień zamulenia, % Mean annual silting degree, % $S_z$
Krempna-1	721	1986	15	35,7	23,0	2,00
Krempna-2	678	1996	9	27,0	24,1	2,27
		1997	10	30,5	27,2	
		1998	11	34,5	30,9	
		1999	12	38,0	33,9	
		2000	13	40,2	35,8	
		2002	15	44,2	39,5	
		2003	16	44,9	40,1	
		2005	18	45,8	40,9	
Zesławice	1 046	1968	2	27,0	11,8	3,00
		1969	3	70,4	30,9	
		1970	4	75,8	33,3	
		1971	5	76,3	33,4	
		1974	8	86,2	37,8	
		1983	17	116,1	50,9	
Rzeszów	873	1986	13	1 188,0	66,0	5,08
Ożanna	1 849	1998	20	26,0	10,3	0,48
		2003	25	30,2	12,0	
Niedźwiadek	6 640	2003	5	3,2	2,6	0,52
Narożniki	11 352	2005	4	1,6	0,6	0,15
Cierpisz	633	2001	11	6,1	17,7	1,50
		2003	13	6,7	19,6	
Cedzyna	11 100	1999	26	145,0	9,6	0,36
		2003	30	168,5	10,9	
Wapienica	19 809	1967	36	24,3	2,2	0,06

zdolności do zatrzymywania rumowiska unoszonego zawierają prace BEDNARCZYKA i MICHALCA [2002], MICHALCA [2003b] oraz MICHALCA i TARNAWSKIEGO [2004].

Obliczone stopnie zamulenia zbiorników: Krempna-1, Krempna-2, Rzeszów, Zesławice po kilkunastu latach wynoszą kilkadziesiąt procent i wskazują na duże tempo zamulania. Średni roczny stopień zamulenia tych zbiorników wynosi kilka procent, a współczynniki zlewniowe wynoszą odpowiednio 721, 678, 1046 i 873  $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ . Wartości tych współczynników są kilkunastokrotnie niższe w porównaniu ze współczynnikami zlewniowymi zbiorników Narożniki, Cedzyna i Wapienica, których średni roczny stopień zamulenia wynosi niewiele ponad 0,5%. Porównując średni roczny stopień zamulenia i współczynniki zlewniowe, można stwierdzić, że wyższym średnim rocznym stopniem zamulenia charakteryzują się zbiorniki o mniejszych wartościach współczynników zlewniowych.

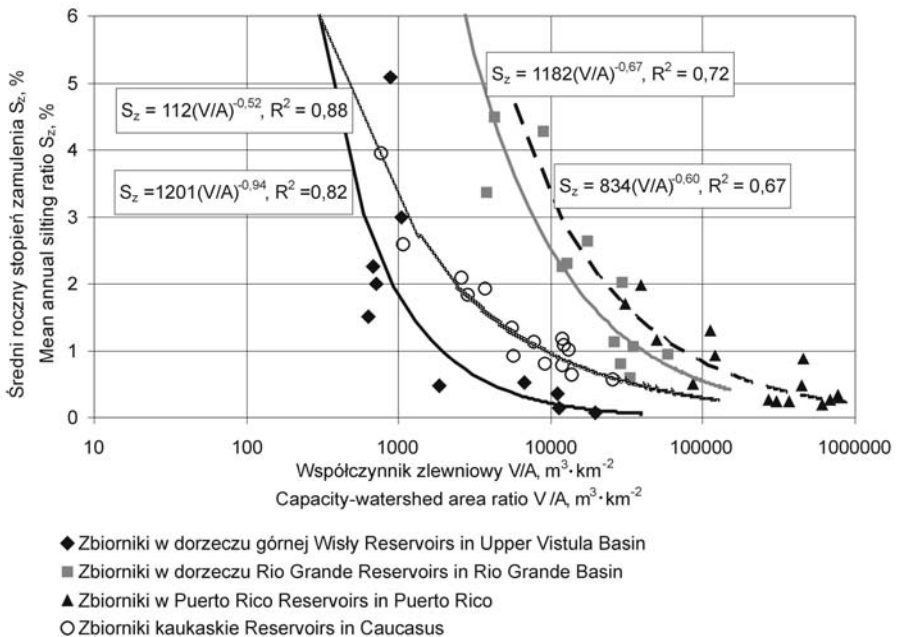
Jak podają VINCENT, DĘBSKI i GREEN [2001], w przypadku zbiorników wodnych o porównywalnych pojemnościach, znajdujących się w zlewniach o podobnym natężeniu procesów erozji, lecz zamykających zlewnie o różnych powierzchniach, większą intensywnością zamulania charakteryzuje się zbiornik, którego wartość wskaźnika zlewniowego  $V/A$  jest mniejsza. Utworzenie bazy danych dotyczącej małych zbiorników wodnych, znajdujących się w zlewniach o podobnym natężeniu procesów erozji jest praktycznie niemożliwe. Jak wynika z danych zawartych w tabeli 2., średni roczny odpływ rumowiska ze zlewni badanych zbiorników jest znacznie zróżnicowany, a zlewnie położone są w różnych rejonach wyznaczonych za pomocą metody Reniger-Dębskiego [BRAŃSKI, 1975]. Uwzględniając regionalne uwarunkowania hydrologiczne i zdolność systemu rzecznoego do transportu rumowiska, można określić intensywność zamulania zbiorników wodnych według definicji podanej przez Šamova [BATUCA, JORDAAN, 2000]. Określił on intensywność zamulania  $S_z$  jako stosunek początkowej pojemności zbiornika wodnego  $V$  do średniej rocznej objętości rumowiska dopływającego do zbiornika  $R_u$ . Ze względu na dominujący udział rumowiska unoszonego w całkowitym transporcie rumowiska średnią roczną objętość rumowiska dopływającego do badanych zbiorników wodnych obliczono na podstawie średniego rocznego transportu rumowiska unoszonego i gęstości objętościowej rumowiska odłożonego w zbiornikach (tab. 2). Zależność między intensywnością zamulania obliczoną jako stosunek pojemności badanych zbiorników wodnych (tab. 1) i średniej rocznej objętości rumowiska dopływającego do zbiorników a średnim rocznym stopniem zamulenia (tab. 3) przedstawiono na rysunku 1.

Zależność ta umożliwia określenie średniego rocznego stopnia zamulenia małego zbiornika wodnego w dorzeczu górnej Wisły, ale trzeba dysponować średnią roczną objętością rumowiska dopływającego do zbiornika i jego początkową pojemnością. Założeniem podjętej analizy jest określenie średniego rocznego stopnia zamulenia bez konieczności określenia transportu rumowiska. W tym celu przyjęto współczynnik zlewniowy  $V/A$  za zmienną niezależną, opisującą średni roczny stopień zamulenia. Wprawdzie zmienna ta nie uwzględnia czynników znacząco wpływających na intensywność procesów erozyjnych i transportu rumowiska, jednak może w sposób przybliżony i uproszczony opisać intensywność zamulania zbiorników wodnych. Przykładowe zależności średniego rocznego stopnia zamulenia  $S_z$  i współczynnika zlewniowego  $V/A$  zamieszczono na rysunku 2. Krzywą regresji małych zbiorników wodnych w dorzeczu górnej Wisły zestawiono z przykładowymi krzywymi opracowanymi na podstawie danych dotyczących zamulania małych zbiorników wodnych, znajdujących się w Ameryce Północnej w dorzeczu Rio Grande



Rys. 1. Zależność regresyjna stopnia zamulenia  $S_z$  i intensywności zamulenia  $S_i$

Fig. 1. The regression of the silting degree  $S_z$  on silting intensity  $S_i$



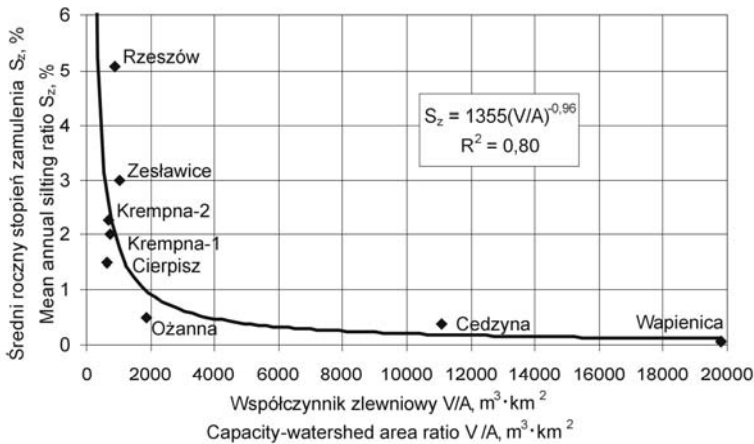
Rys. 2. Zależność średniego rocznego stopnia zamulenia  $S_z$  w funkcji współczynnika zlewniowego  $V/A$

Fig. 2. Relationship between the mean annual silting degree  $S_z$  and the watershed coefficient  $V/A$



[DENDY, 1982] i w Puerto Rico [SOLER-LÓPEZ, 2001] oraz na Północnym Kaukazie [PRYTKOVA, 1969].

Średni roczny stopień zamulenia zbiorników znajdujących się w dorzeczu Rio Grande został obliczony na podstawie danych pomiarowych z okresu od sześciu do czternastu lat eksploatacji dwunastu zbiorników wodnych. Ich pojemność pierwotna wynosiła od 0,2 do 1,2 mln m<sup>3</sup> [DENDY, 1982]. Czternaście zbiorników wodnych Puerto Rico, każdy o pojemności 0,76–55,66 mln m<sup>3</sup> i powierzchni zlewni od 16 do 538 km<sup>2</sup>, charakteryzuje się najwyższymi wartościami współczynnika zlewniowego. Średni roczny stopień zamulenia tych zbiorników określono na podstawie badań zamulania przeprowadzonych w różnych okresach eksploatacji, trwających od 24 do 86 lat [SOLER-LÓPEZ, 2001]. Pojemność pierwotna zbiorników kaukaskich wynosi od 0,13 do 567 mln m<sup>3</sup> [PRYTKOVA, 1969]. Zbiorniki te zamykają niewielkie zlewnie o powierzchni od 11 do 42 km<sup>2</sup>. Przedstawione przykładowe krzywe świadczą o możliwości zastosowania współczynnika zlewniowego  $V/A$  do wyznaczenia średniego rocznego stopnia zamulenia w porównywalnych okresach eksploatacji. Umożliwi to wyeliminowanie niejednorodności analizowanych ciągów i porównanie średnich wartości  $S_z$ . Spośród zamieszczonych w tabeli 3. danych z dalszej analizy wyłączono zbiorniki wodne Niedźwiadek i Narożniki ze względu na krótki okres ich eksploatacji. Średni roczny stopień zamulenia małych zbiorników wodnych w zależności od współczynnika zlewniowego, po wyłączeniu wymienionych zbiorników, przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność średniego rocznego stopnia zamulenia  $S_z$  małych zbiorników wodnych w dorzeczu górnej Wisły w funkcji współczynnika zlewniowego  $V/A$

Fig. 3. Relationship between the mean annual silting degree  $S_z$  of small water reservoirs in the Upper Vistula Basin and the watershed coefficient  $V/A$

Wyniki obliczeń średniego rocznego stopnia zamulenia, określonego na podstawie pomiarów i zależności zamieszczonych na rysunkach 1. i 3., zestawiono w tabeli 4. Eliminując niejednorodność w zależności  $S_z = 43,8S_i^{-0,88}$  (rys. 1), poprzez wyłączenie z analizy danych dotyczących zbiorników Niedźwiadek i Narożniki, uzyskano równanie  $S_z = 1355(V/A)^{-0,96}$  (rys. 3). Różnice  $\Delta$  między średnimi wartościami  $S_z$  obliczonymi według

**Tabela 4.** Średni roczny stopień  $S_z$  zamulenia badanych zbiorników wodnych

**Table 4.** Mean annual silting degree  $S_z$  of studied water reservoirs

Zbiornik Reservoir	Średni roczny stopień zamulenia na podstawie Mean annual silting ratio established according to			Różnica wyników $\Delta$ (%) między Difference of results $\Delta$ (%) between	
	wyników pomiarów measured	zależności $S_z = 43,8S_i^{-0,88}$ calculated $S_z = 43,8S_i^{-0,88}$	zależności $S_z = 1355(V/A)^{-0,96}$ calculated $S_z = 1355(V/A)^{-0,96}$	$S_z$ w funkcji $S_i$ i $S_z$ na podstawie pomiarów $S_z$ as a function of $S_i$ and measured $S_z$	$S_z$ w funkcji $V/A$ i $S_z$ na podstawie pomiarów $S_z$ as a function $V/A$ and measured $S_z$
Krempna-1	2,00	2,45	1,83	22	-9
Krempna-2	2,27	2,59	1,92	14	-16
Zesławice	3,00	1,71	4,29	-43	43
Rzeszów	5,08	2,04	5,77	-60	14
Ożanna	0,48	0,99	0,45	106	-6
Niedźwiadek	0,52	0,29	0,44	-44	-16
Narożniki	1,15	0,17	0,22	16	44
Cierpisz	1,50	2,77	0,22	85	-86
Cedzyna	0,36	0,18	0,35	-51	-4
Wapienica	0,06	0,10	0,07	69	14

Objaśnienia:  $S_z$  – intensywność zamulania,  $V/A$  – współczynnik zlewniowy.

Explanations:  $S_z$  – silting intensity,  $V/A$  – watershed coefficient.

równania zamieszczonego na rysunku 3. a średnimi wartościami  $S_z$  obliczonymi na podstawie wyników pomiarów zamulania są mniejsze niż między średnimi wartościami  $S_z$  obliczonymi według równania podanego na rysunku 1. a wartościami empirycznymi. Mimo eliminacji niejednorodności danych, wartości  $S_z$  określone według zależności przedstawionej na rysunku 3. mogą być traktowane jedynie jako szacunkowe.

Zamieszczone w „Programie małej retencji województwa małopolskiego” [2004] dane dotyczące parametrów technicznych 65 proponowanych do budowy zbiorników umożliwiły określenie współczynnika zlewniowego tych zbiorników oraz przybliżone określenie średniego rocznego stopnia zamulenia za pomocą zależności  $S_z = 1355(V/A)^{-0,96}$  (rys. 3). W przypadku sześciu zbiorników wodnych „Programu...” [2004] niekompletność lub brak danych uniemożliwiły określenie wartości średniego rocznego stopnia zamulenia. Obliczono stopień zamulenia  $S_{z,t}$  59 zbiorników wodnych po 10, 50 i 100 latach ich eksploatacji (tab. 5) jako iloczyn średniego rocznego stopnia zamulenia  $S_z$  i czasu eksploatacji  $t$ . Należy podkreślić, że ten sposób określenia stopnia zamulenia umożliwia jedynie przybliżone określenie zamulenia małego zbiornika wodnego. Przybliżenie to wynika z uproszczonego schematu zamulania, charakteryzującego się liniowym, tj. wprost proporcjonalnym do czasu, stałym przyrostem objętości osadów rumowiska.

**Tabela 5.** Stopień zamulenia zbiorników wodnych „Programu małej retencji województwa małopolskiego” [2004]

**Table 5.** Silting degree of water reservoirs within the “Programme of small retention of Małopolska Province” [2004]

Zbiornik wodny Water reservoir	A km <sup>2</sup>	V 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	V/A m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup>	S <sub>z</sub> %	Stopień zamulenia S <sub>z,t</sub> (%) po latach Silting degree S <sub>z,t</sub> (%) after years		
					10	50	100
					6	7	8
1	2	3	4	5	6	7	8
Zlewnia Dunajca Watershed of the Dunajec River							
Grodna	4	580	145 000	0,015	0,15	0,75	1,50
Kamienica	92	21	228	7,376	73,76	100,00	100,00
Suchy	6	448	74 667	0,028	0,28	1,42	2,84
Brzeźnianka	7	130	18 571	0,108	1,08	5,41	10,81
Olszana	5	75	15 000	0,133	1,33	6,64	13,27
Skrudzina	12	36	3 000	0,622	6,22	31,11	62,22
Słopnice–Karkówka	5	108	21 600	0,094	0,94	4,68	9,35
Izwór	3	130	43 333	0,048	0,48	2,40	4,79
Milik	4	133	33 250	0,062	0,62	3,09	6,18
Szczawniczek	6	19	3 167	0,591	5,91	29,53	59,07
Słupne	4	19	4 750	0,400	4,00	20,01	40,02
Fatolszka	6	830	138 333	0,016	0,16	0,79	1,57
Polany	7	187	26 714	0,076	0,76	3,81	7,63
Banicka Góra	31	652	21 032	0,096	0,96	4,80	9,59
Czarny Potok	–	–	–	–	–	–	–
Florynka	6	450	75 000	0,028	0,28	1,42	2,83
Szczawnik	23	95	4 130	0,458	4,58	22,89	45,77

cd. tab. 5

1	2	3	4	5	6	7	8
Skrzyszów	10	1 289	128 900	0,017	0,17	0,84	1,68
Janowce – środkowy	6	299	49 833	0,042	0,42	2,10	4,19
Janowce – górny	6	110	18 333	0,109	1,09	5,47	10,95
Joniny	7	588	84 000	0,025	0,25	1,27	2,54
Bistuszoza	8	445	55 625	0,038	0,38	1,89	3,77
Unoszowa	5	543	108 600	0,020	0,20	0,99	1,98
Jurków	17	247	14 529	0,137	1,37	6,84	13,68
Zelina	7	946	135 143	0,016	0,16	0,80	1,61
Filipowice	5	183	36 600	0,056	0,56	2,82	5,64
Brzozowa II	7	187	26 714	0,076	0,76	3,81	7,63
Ciężkowice	8	216	27 000	0,075	0,75	3,77	7,55
Rzepiennik Biskupi	13	235	18 077	0,111	1,11	5,55	11,09
		Zlewnia Wisły	Watershed of the Vistula River				
Żelazowa	29	252	8 690	0,224	2,24	11,21	22,41
Pychowice	–	55	–	–	–	–	–
Bieżanów	–	68	–	–	–	–	–
Szarbia	16	551	34 438	0,060	0,60	2,99	5,98
Pasternik	3	418	139 333	0,016	0,16	0,78	1,56
Piekary	6	730	121 667	0,018	0,18	0,89	1,78
Janowice	22	440	20 000	0,101	1,01	5,03	10,07
Sułkowice	12	1 650	137 500	0,016	0,16	0,79	1,58
		Zlewnia Prądnika	Watershed of the Prądnik River				
Węgrzce	–	135	–	–	–	–	–
Tonie	–	75	–	–	–	–	–
		Zlewnia Szreniawy	Watershed of the Szreniawa River				
Pstroszyce	7	228	32 571	0,063	0,63	3,15	6,30
		Zlewnia Przemszy	Watershed of the Przemsza River				
Kobylica	140	144	1 029	1,739	17,39	86,93	100,00
		Zlewnia Dłubni	Watershed of the Dłubnia River				
Trzyciąż	4	331	82 750	0,026	0,26	1,29	2,58
		Zlewnia Uszwicy	Watershed of the Uszwica River				
Uszew-Leksandrówka	60	932	15 533	0,128	1,28	6,42	12,83
Lipnica Górna	4	441	110 250	0,020	0,20	0,98	1,96
Gosprzydowa	59	1 774	30 068	0,068	0,68	3,40	6,81
		Zlewnia Wisłoki	Watershed of the Wisłoka River				
Rozdziele II	11	357	32 455	0,063	0,63	3,16	6,33
Bratne	18	471	26 167	0,078	0,78	3,89	7,78
Sękowa	87	177	2 034	0,903	9,03	45,16	90,33
Ołpiny	9	814	90 444	0,024	0,24	1,18	2,36
Szerzyny	8	604	75 500	0,028	0,28	1,41	2,81
Czermna Olszanka	12	734	61 167	0,034	0,34	1,72	3,44

cd. tab. 5

1	2	3	4	5	6	7	8
	Zlewnia Raby		Watershed of the Raba River				
Bielanka	1	79	79 000	0,027	0,27	1,35	2,69
Polakówka	3	60	20 000	0,101	1,01	5,03	10,07
Konina	3	198	66 000	0,032	0,32	1,60	3,20
Trzciana	5	408	81 600	0,026	0,26	1,31	2,61
Kaskada Łąka	7	443	63 286	0,033	0,33	1,67	3,33
Łęzkowice	5	643	128 600	0,017	0,17	0,84	1,69
Zegartowice 2	4	420	105 000	0,020	0,20	1,02	2,05
Bojańczyce 2	13	900	69 231	0,031	0,31	1,53	3,06
Łętownia	3	234	78 000	0,027	0,27	1,36	2,73
Łętownia 2	4	12	3 000	0,622	6,22	31,11	62,22
	Zlewnia Skawy		Watershed of the Skawa River				
Andrychów	–	13 770	–	–	–	–	–
Sidzina	9	199	22 111	0,091	0,91	4,57	9,14
Bystra	6	99	16 500	0,121	1,21	6,06	12,11
Osielczyk	4	127	31 750	0,065	0,65	3,23	6,46

Objaśnienia:  $A$  – powierzchnia zlewni,  $V$  – pojemność zbiornika wodnego,  $V/A$  – współczynnik zlewniowy,  $S_z$  – średni roczny stopień zamulenia; brak danych oznaczono „–”.

Explanations:  $A$  – watershed area,  $V$  – capacity of water reservoir,  $V/A$  – watershed coefficient,  $S_z$  – mean annual silting degree; „–” means missing data.

Na podstawie określonej intensywności zamulania można dokonać wstępnej oceny lokalizacji małych zbiorników wodnych przewidzianych do budowy w „Programie małej retencji województwa małopolskiego” [2004]. Zbiorniki charakteryzujące się dużymi wartościami współczynnika zlewniowego będą zamulane wolniej, a ich zamulenie po 100 latach eksploatacji będzie wynosiło zaledwie kilka procent.

Pojemność zbiorników wodnych, proponowanych do wykonania w „Programie...” [2004], umożliwi retencjonowanie 38,17 mln m<sup>3</sup> wody. Na podstawie wstępnej prognozy zamulania dokonano próby określenia prognozowanych dyspozycyjnych zasobów wodnych. Określono całkowitą pojemność zbiorników po 10, 50 i 100 latach. Wyniki zamieszczono w tabeli 6.

**Tabela 6.** Zasoby wodne – całkowita pojemność zbiorników wodnych „Programu małej retencji województwa małopolskiego” [2004]

**Table 6.** Water resources – total volume of water reservoirs within the “Program of small retention of Małopolska Province” [2004]

Projektowana pojemność całkowita zbiorników wodnych Designed total capacity of water reservoirs $\Sigma C$ ( $10^3$ m <sup>3</sup> )	Prognozowana pojemność całkowita zbiorników wodnych $\Sigma C$ ( $10^3$ m <sup>3</sup> ) po latach Forecasted total capacity of water reservoirs $\Sigma C$ ( $10^3$ m <sup>3</sup> ) after years		
	10	50	100
	38 174	37 667	37 010

## DYSKUSJA WYNIKÓW

Na podstawie badań dziewięciu małych zbiorników wodnych wykazano, że zbiorniki o małych wartościach współczynnika zlewniowego, wynoszących kilkaset  $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ , charakteryzują się wysokim średnim rocznym stopniem zamulenia. Mała wartość wskaźnika zlewniowego oznacza, że zbiornik o stosunkowo niewielkiej pojemności zamyka zlewnie o dużej powierzchni.

Uzyskane wyniki prognozowania zamulania za pomocą opracowanej zależności średniego rocznego stopnia zamulenia w funkcji współczynnika zlewniowego należy traktować jako szacunkowe. Przybliżona ocena zamulania wskazuje, że około 10% projektowanych zbiorników będzie intensywnie zamulanych. Zmniejszenie ich pojemności po stu latach eksploatacji będzie przekraczało 50%. Dwa zbiorniki wodne spośród 65 analizowanych zostaną zamulone w stosunkowo krótkim czasie – Kamienica w zlewni Dunajca w ponad 73% już po 10 latach eksploatacji, a Kobylica w zlewni Przemszy w ponad 86% w 50. roku eksploatacji. Lokalizacja tych zbiorników ze względu na intensywność zamulania jest niekorzystna. Dużym tempem zamulania będą charakteryzowały się zbiorniki Skrudzina i Szczawniczek w zlewni Dunajca – stopień ich zamulenia po 100 latach eksploatacji będzie wynosił odpowiednio 62,2 i 59,1%, zbiornik Sękowa w zlewni Wisłoki – stopień zamulenia po stu latach eksploatacji będzie wynosił ponad 90%, a także zbiornik Łętownia 2 w zlewni Raby, którego stopień zamulenia po 100 latach eksploatacji będzie wynosił ponad 62%.

## PODSUMOWANIE

Małe zbiorniki wodne charakteryzują się intensywnym zamulaniem. Intensywność jest znacznie większa w przypadku zbiorników wodnych, których pojemność jest stosunkowo niewielka w porównaniu z powierzchnią zlewni. Zależność tę opisano za pomocą równania w postaci:  $S_2 = 1355(V/A)^{-0,96}$ . Umożliwia ono szacunkowe określenie wartości średniego rocznego stopnia zamulenia małych zbiorników wodnych w dorzeczu górnej Wisły.

Opracowana wstępna prognoza zamulania zbiorników wodnych „Programu małej retencji...” [2004], w której wykorzystano podane równanie, wskazuje na powolny proces ich zamulania. Spośród 65 analizowanych zbiorników wodnych 44% charakteryzuje się wysokimi współczynnikami zlewniowymi, wynoszącymi od 49 do 145 tys.  $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ , a ich stopień zamulenia po stu latach eksploatacji nie przekroczy 5%. Jedynie 10% projektowanych zbiorników będzie intensywnie zamulanych, a zmniejszenie ich pojemności po stu latach eksploatacji będzie przekraczało 50%.

Prognozowane dyspozycyjne zasoby wodne gwarantowane proponowanymi do budowy zbiornikami małej retencji zmniejszy się w niewielkim stopniu ze względu na zmniejszenie ich pojemności w wyniku zamulania. Stwierdzono, że po 10, 50 i 100 latach eksploatacji zbiorników ich projektowana pojemność całkowita zmniejszy się odpowiednio o 1,3, 3,1 i 4,8%. Tak niewielkie zmniejszenie pojemności nie wpłynie na warunki zarządzania zasobami wodnymi zbiorników ujętych w „Programie małej retencji województwa małopolskiego”.

## LITERATURA

- BATUCA G.D., JORDAAN M.J. Jr., 2000. Silting and desilting of reservoirs. Rotterdam: Balkema ss. 353.
- BEDNARCZYK T., 1994. Określenie ilości unoszonego rumowiska w przekroju małego zbiornika wodnego w Zesławicach. Zesz. Nauk. AR Krak. nr 229 Inż. Środ. z. 15 s. 7–18.
- BEDNARCZYK T., MICHAŁEC B., 1996a. Wpływ akumulacji rumowiska w małym zbiorniku wodnym na warunki eksploatacji. Zesz. Nauk. AR Wroc. nr 289 Ser. Konf. 11 s. 23–31.
- BEDNARCZYK T., MICHAŁEC B., 1996b. Appraisal of suspended load being carried into the small water reservoir. Pr. Nauk. Inst. Geotech. Hydrotech. P. Wroc. s. 167–173.
- BEDNARCZYK T., MICHAŁEC B., 1997. Sezonowość dostawy materiału unoszonego do małego zbiornika karpackiego. Monogr. Kom. Gosp. Wod. PAN z. 13 s. 15–20.
- BEDNARCZYK T., MICHAŁEC B., 2002. Reduction in sediment trap efficiency of small reservoirs during their operation. Zesz. Nauk. AR Wroc. Ser. Konf. 36 nr 438 s. 325–334.
- BRAŃSKI J., 1971. Kilka uwag o wielkości transportu rumowiska wleczonego w rzekach górskich. Gosp. Wod. nr 6 s. 204–207.
- BRAŃSKI J., 1975. Ocena denudacji dorzecza Wisły na podstawie wyników pomiarów rumowiska unoszonego. Pr. IMGW nr 6 ss. 57.
- BROWN C.B., 1950. Sediment transportation. W: Engineering hydraulics. Pr. zbior. Red. H. Rouse. New York: John Wiley & Sons s. 769–857.
- DĄBKOWSKI L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A., 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych. Warszawa: PWRiL ss. 534.
- DENDY F. E., 1982. Distribution of sediment deposits in small reservoirs. Trans. ASAE vol. 25 no 1 s. 100–104.
- GOTTSCHALK L.C., 1965. Trap-efficiency of small floodwater-retarding structures. ASCE Water Res. Eng. Conf. no. 147 Mobile, Alabama ss. 12.
- HEINEMANN H.G., 1984. Reservoir trap efficiency. W: Erosion and sediment yield. Norwich Geo Books s. 201–218.
- MADEYSKI M., 1998. Hydrauliczna i reologiczna charakterystyka procesu zamulania stawów rybnych. Zesz. Nauk. AR Krak. Rozpr. Habil. nr 236 ss. 95.
- MICHAŁEC B., 2003a. An attempt to classify of water reservoirs based on capacity inflow ratio. Acta Horticult. Regiotect. Mimoriadne číslo r. 6 s. 134–136.
- MICHAŁEC B., 2003b. Analiza procesu zamulania małych zbiorników wodnych. Acta Sci. Polon. Formatio Circumiectus z. 2(2) s. 35–46.
- MICHAŁEC B., 2004. Próba prognozy zamulenia małego zbiornika wodnego na cieku niekontrolowanym hydrologicznie. Acta Sci. Polon. Formatio Circumiectus z. 3(1) s. 63–71.
- MICHAŁEC B., TARNAWSKI M., 2004. Analysis of sediment trap efficiency of small water reservoirs. 22st Conf. Danube Countries. Brno Czech Republic (the abstracts in a volume on pages 108–109 and the full text on CD).
- Program małej retencji województwa małopolskiego. Projekt Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego i Małopolskiego Zarządu Melioracji i Urządzeń Wodnych w Krakowie, 2004. CD ss. 47.
- PRYTKOVA M., 1969. Zailenie małych wodochraniłiś stepnoj časti severnogo Kavkaza i jego rasčet. Zailenie małych wodochraniłiś Predkavkazja. Leningrad: Izd. Leningr. Univ. Trudy Laborat. Ozerowedenija r. 23 s. 130–140.
- WIŚNIEWSKI B., 1972. Ilość rumowiska unoszonego i wleczonego w rzekach polskich. Gosp. Wod. nr 10–11 s. 381–385.

- SOLER-LÓPEZ, L.R., 2001. Sedimentation survey results of the principal water supply reservoirs of Puerto Rico. Proc. 6th Caribbean Islands Water Res. Congr. Pr. zbior. Red. W.F. Sylva. Mayagüez, Puerto Rico (unpaginated CD).
- WIŚNIEWSKI B., KUTROWSKI M., 1973. Budownictwo specjalne w zakresie gospodarki wodnej. Zbiorniki wodne. Prognozowanie zamulania. Wytyczne instruktażowe. Warszawa: BSiPBW „Hydroprojekt” ss. 55.
- 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 ss. 167.

*Bogusław MICHAŁEC*

### **SILTING FORECAST AND ESTIMATION OF WATER RESOURCES IN SMALL WATER RESERVOIRS**

*Key word: silting degree, silting forecast, small water reservoir, water retention*

#### **S u m m a r y**

Within the „Programme of Rational Management of Water Resources in Małopolska Province” [„Program małej retencji...” 2004] 65 reservoirs and 4 polders were identified. The majority of these reservoirs were situated in sections closing catchment basins of an area from several to more than ten square kilometers. The programme focussed on proper location of water reservoirs within the catchment basin. An attempt was undertaken to determine the rate of silting in small water reservoirs in relation to their capacity and the size of their watershed. Mean annual silting rate  $S_z$  was determined for nine small water reservoirs in the Upper Vistula catchment basin and the so-called watershed coefficients (the ratio of reservoir's volume  $V$  to watershed area  $A$ ) were calculated. Established relationship:  $S_z = 1355(V/A)^{-0.96}$  was used to evaluate mean annual silting in a small water reservoir. The relationship was then used to calculate the degree of silting of 65 water reservoirs anticipated within the „Program małej retencji...” [2004]. Calculations were made for selected decades of the centennial exploitation period of these water bodies. Results formed a basis for preliminary silting forecasts and for evaluation of disposable water resources. Obtained results confirmed appropriate location of reservoirs that guaranteed maintenance of water resources at a slight reduction of reservoirs' volume. It was found that after 100 years of exploitation more than 44% of reservoirs would show low degree of silting. Only 10% of projected reservoirs would loose 50% of their volume after a hundred years of exploitation. Proposed formula enables to predict the useful lifetime of a reservoir based on the size of its watershed area and to appraise the location of designed water reservoir.

---

#### **Recenzenci:**

*prof. dr hab. Kazimierz Banasik*

*prof. dr hab. Szczepan L. Dąbkowski*

Praca wpłynęła do Redakcji 03.04.2008 r.