

**Bogusław MICHAŁEC <sup>1</sup>, Karol PĘCZEK <sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Katedra Inżynierii Wodnej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
Department of Water Engineering, University of Agriculture in Kraków

<sup>2</sup>FWK-Air Sp. z o.o., Kraków  
FWK-Air Limited Liability Company, Kraków

## **Określenie stopnia zamulenia zbiorników wodnych w Zesławicach**

### **Determination of silting degree of water reservoirs at Zesławice**

**Słowa kluczowe:** mały zbiornik wodny, zamulanie, stopień zamulenia, współczynnik pojemności zbiornika

**Key words:** small water reservoir, silting, silting degree, capacity-inflow ratio

#### **Wprowadzenie**

Zbiorniki wodne podlegają naturalnemu procesowi zamulania. Proces ten jest zjawiskiem bardzo złożonym. O przebiegu zamulania decyduje wiele czynników, m.in. ilość i rodzaj dopływającego rumowiska, reżim przepływu wód, lokalizacja urządzeń spustowych oraz zabudowa i użytkowanie zlewni. Ilość deponowanych odkładów rumowiska i miejsce, w którym zostaje odłożone, związane jest z warunkami hydrodynamicznymi panującymi w zbiorniku. Istotny wpływ na przebieg procesu zamulania mają także czynniki geomorfologiczne, które determinują rozkład przestrzenny prędkości i kierunki przepływu strug wodnych

oraz zastoisk mas wody, ułatwiających sedimentację cząstek unoszonych.

Zasadniczym ograniczeniem w prawidłowej eksploatacji zbiorników wodnych jest zmniejszenie się ich objętości użytkowej. Jak wykazały dotychczasowe badania, udział rumowiska wleczzonego w zamulaniu jest stosunkowo niewielki i stanowi zaledwie kilka procent całkowitego transportu rumowiska (Brański 1971, Łajczak 1995, Ratomski 1995). W prognozie zamulania zbiorników uwzględniana jest przede wszystkim ilość rumowiska unoszonego, jaka dopływa do zbiornika. Według Hartunga (1959), zbiornik wodny nie spełnia swojej funkcji, jeżeli objętość osadów stanowi ponad 80% jego pojemności. Znajomość czasu, po jakim nastąpi redukcja pojemności istniejącego lub projektowanego zbiornika, umożliwi zaplanowanie prac renowacyjnych, polegających m.in. na odmuleniu zbiornika. Czas zamulania można określić na podstawie opra-

cowanej prognozy zamulania. Według wytycznych instruktażowych dotyczących prognozy zamulenia zbiorników wodnych, w pierwszym etapie wykonuje się prognozę wstępną, traktowaną jako szacunkową. Następnie przeprowadza się prognozę szczegółową (Wiśniewski i Kutrowski 1973). Prognoza wstępna zamulania zbiorników wymaga określenia trwałej zdolności zbiornika do zatrzymania rumowiska unoszonego, nazywanej również zdolnością akumulacyjną lub współczynnikiem akumulacji. Prognozę szczegółową zamulania zbiornika wodnego wykonuje się, stosując wzór Gončarova zgodnie z „Wytycznymi instruktażowymi...” (Wiśniewski i Kutrowski 1973). Poprawność obliczeń według tej formuły zależy od dokładności ustalenia objętości odkładów rumowiska ( $R_1$ ) po pierwszym roku eksploatacji zbiornika. Jest to zadanie trudne, zwłaszcza na etapie projektowania, gdy nie ma możliwości wykonania takich pomiarów. Często w praktyce przeprowadza się obliczenia, posługując się wartością  $R_1$ , określoną na podstawie pomiarów w zbiorniku, będącym tzw. analogiem. Może to jednak spowodować znaczne rozbieżności wyników obliczeń wielkości zamulenia w poszczególnych latach eksploatacji w porównaniu z rzeczywistym zamulaniem (Michalec 2004).

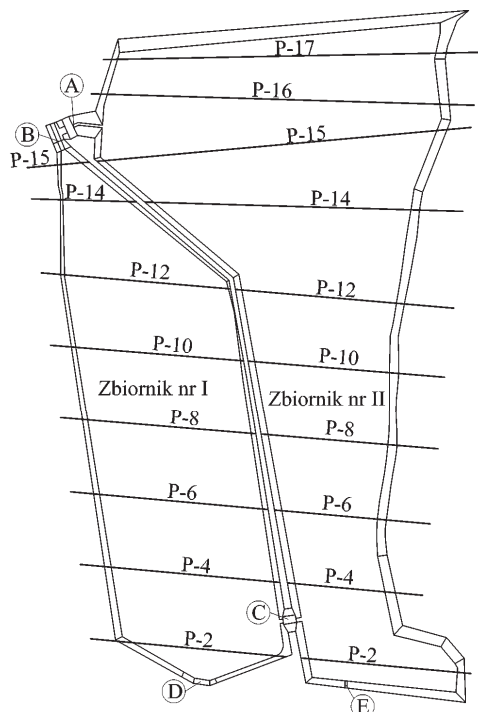
Wykonane pomiary zamulania zbiorników głównego i bocznego w Zesławicach przed odmuleniem i po odmuleniu umożliwiły obliczenie stopnia zamulania i określenie jego zmiany w czasie eksploatacji.

Celem pracy jest ocena intensywności zamulania badanych zbiorników na podstawie ustalonego średniego rocznego stopnia zamulania.

## Material i metody

Zbiorniki wodne w Zesławicach zamykają zlewnię rzeki Dłubni w km 8+700. Powierzchnia zlewni zbiorników wynosi 218,1 km<sup>2</sup> i w znacznej części jest przeznaczona pod uprawy rolne. Ponad 90% powierzchni zlewni stanowią grunty orne, a łąki zajmują zaledwie około 3% powierzchni. Lasy natomiast stanowią niespełna 7% powierzchni zlewni (Bednarczyk 1994). Najczęściej występującym na obszarze dorzecza Dłubni typem gleb są gleby wytworzone na lessach. Ze względu na znaczny udział gruntów użytkowanych rolniczo oraz rodzaj gleb podatnych na spływy powierzchniowe, zamulanie zbiorników ma charakter intensywny. Szczegółowe informacje o zlewni zbiorników wodnych w Zesławicach zawierają m.in. prace Dynowskiej (1964) i Bednarczyka (1994).

Główny zbiornik wodny w Zesławicach został oddany do eksploatacji w 1966 roku. Jego zadaniem było zaopatrzenie w wodę przemysłową ówczesną Hutę im Lenina oraz w wodę pitną Kraków. W 1983 roku, po siedemnastu latach eksploatacji, stwierdzono, że jego zamulenie wynosi ponad 50%. Zanim przystąpiono do odmulenia zbiornika głównego wykonano boczny zbiornik remontowy. Do budowy remontowego zbiornika wodnego przystąpiono w 1986 roku, a w 1987 roku został on oddany do eksploatacji. Zadaniem bocznego zbiornika remontowego było przejęcie funkcji zbiornika głównego, podczas gdy ten był odmulany. Na rysunku 1 przedstawiono zbiorniki główny i remontowy. Dopływ wody do zbiornika remontowego kierowany jest w węźle wodnym



RYSUNEK 1. Zbiorniki wodne w Ześlawicach: główny (nr I) i remontowy (nr II), zaznaczono przekroje pomiarowe od P-2 do P-17: A – wlot do zbiornika remontowego, B – wlot do zbiornika głównego, C – przelew między zbiornikami, D – jaz dokowy (wylot ze zbiornika głównego), E – spust ze zbiornika remontowego

FIGURE 1. Water reservoirs at Ześlawice: main (No I) and assistant (No II), measuring sections were marked from P-2 to P-17: A – inlet to assistant reservoir, B – inlet to main reservoir, C – spillway between reservoirs, D – dock weir (outlet from main reservoir), E – bottom outlet from assistant reservoir

(A) za pomocą przelewu i spustu. Do zbiornika głównego woda prowadzona jest głównym korytem rzeki Dłubni (B). Odprowadzenie wody ze zbiornika remontowego odbywa się za pomocą przelewu trapezowego i upustu dennego (C). W zaporze zbiorników znajduje się jaz dokowy trzyprzęsłowy (D), stanowiący urządzenie spustowe zbiornika głów-

nego. Woda ze zbiornika remontowego jest prowadzona do zbiornika głównego za pomocą przelewu trapezowego i upustu dennego (C), które znajdują się w grobli dzielącej oba zbiorniki. Istnieje również możliwość bezpośredniego zrzutu wód ze zbiornika remontowego za pomocą spustów dennych w zaporze czołowej zbiorników wodnych (E).

Normalny poziom piętrzenia wody w zbiornikach wodnych w Ześlawicach wynosi 215 m n.p.m. Pojemność maksymalna głównego zbiornika wodnego wynosi 228 tys. m<sup>3</sup>, a bocznego zbiornika remontowego – 198 tys. m<sup>3</sup>. Powierzchnia zalewu przy normalnym poziomie piętrzenia wody w zbiornikach głównym i bocznym wynosi odpowiednio 9,5 i 11,3 ha. Średnia głębokość zbiornika głównego jest równa 2,40 m, a remontowego – 1,72 m.

Wielkość zamulenia badanych zbiorników została określona na podstawie bezpośrednich pomiarów, wykonanych w latach 1968–2006, w przekrojach poprzecznych za pomocą sondy drążkowej (łaty ze stopką). Pomiaru zamulenia wszystkich zbiorników zostały wykonane z łodzi z geodezyjnym dowiązaniem do lokalnej osnowy geodezyjnej. Wyniki pomiarów umożliwiły wyznaczenie stopnia zamulenia ( $S_z$ ) badanych zbiorników, który wyrażono jako stosunek objętości odkładów rumowiska do pojemności pierwotnej zbiornika. Dysponując objętością odkładów rumowiska w poszczególnych latach eksploatacji, wyznaczono współczynniki pojemności ( $\alpha$ ) badanych zbiorników. Współczynniki te obliczono jako iloraz pojemności zbiornika w danym roku, w którym wykonano pomiar zamulenia i średniej rocznej objętości dopływającej do niego

wody. Współczynnik pojemności w kolejnych latach pracy zbiorników wyznaczono, uwzględniając redukcję ich pojemności spowodowaną deponowaniem rumowiska. Natomiast sumę dopływu wody w ciągu roku określono na podstawie przepływu średniego rocznego wyznaczonego z wielolecia.

Wyniki szczegółowej prognozy zamulenia badanych zbiorników wodnych formułą Gončarova (Wiśniewski i Kutrowski 1973) zostały przedstawione w pracy Michalca (2007). W przeprowadzonej prognozie określono tzw. długowieczność (lub żywotność) zbiorników, którą zgodnie z kryterium Hartunga (1959) przyjęto jako czas, po którego upływie zbiornik nie spełnia swojej funkcji ze względu na zamulenie, wynoszące 80%.

## Wyniki

Wyniki pomiarów zamulania zbiorników wodnych w Zesławicach w okresach przed odmuleniem i po odmuleniu zamieszczono w tabeli 1. Na podstawie określonej objętości zamulenia obliczono stopień zamulenia. Średni roczny przepływ ( $SSQ$ ) dla przekroju wodowskazowego w Zesławicach wynosi  $1,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , zatem współczynnik pojemności początkowej ( $\alpha_0$ ) zbiornika wodnego w Zesławicach przed wybudowaniem zbiornika bocznego wynosił 0,66%. Ze względu na redukcję pojemności, w wyniku odkładania się coraz większej ilości rumowiska, współczynnik ten ulega redukcji do wartości 0,33% w siedemnastym roku eksploatacji. W wyniku wybudowania bocznego zbiornika remontowe-

TABELA 1. Stopień zamulenia, współczynnik pojemności i objętość rumowiska odłożonego w zbiornikach wodnych w Zesławicach głównym i remontowym określona według pomiarów oraz stopień zamulenia

TABLE 1. Silting ratio, capacity-inflow ratio and volume of sediments deposited in water reservoirs at Zesławice: main and assistant definite according to measurements

Zbiornik wodny w Zesławicach Water reservoir at Zesławice	Rok Year	Lata eksploatacji Years of operations	Objętość rumowiska [m <sup>3</sup> ] Sediment volume	Współczynnik pojemności [%] Capacity-inflow ratio	Stopień zamulenia [%] Silting ratio	
Główny Main	przed odmuleniem before desilting	1968	2	26 968	0,585	11,8
		1969	3	70 425	0,458	30,9
		1970	4	75 780	0,443	33,2
		1971	5	76 251	0,441	33,4
		1974	8	86 192	0,413	37,8
		1983	17	116 091	0,326	50,9
	po odmuleniu after desilting	1999	10	56 162	0,786	24,6
		2005	16	75 315	0,682	33,0
		2006	17	77 232	0,673	33,9
Zbiornik remontowy Assistant reservoir	2005	18	37 175	1,342	18,8	
	2006	19	38 290	1,333	19,3	

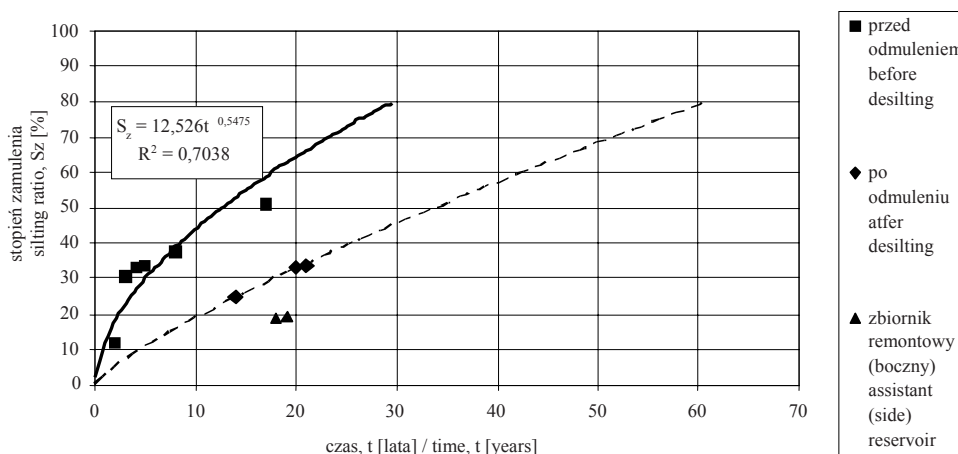
go nastąpił rozdział przepływu w węzle wodnym. Uwzględniając rozdział wody i przepływu ( $SSQ$ ), określony współczynnik pojemności początkowej ( $\alpha_0$ ) zbiornika głównego wynosił 1,018% dla  $SSQ = 0,71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a bocznego zbiornika remontowego –  $\alpha_0 = 1,652\%$  dla  $SSQ = 0,38 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Zgodnie z teorią analiz dynamiki zjawisk masowych (Volk 1973), przeprowadzanych na podstawie szeregów czasowych, określanych jako dynamiczne czy chronologiczne, podjęto próbę opisanie w czasie zmienności stopnia zamulania zbiorników wodnych w Zesławicach. W celu opracowania zależności korelacyjnej stopnia zamulania i czasowej zmiennej niezależnej należy dysponować reprezentatywnie liczebną próbą. Z tego względu opracowano zależność jedynie dla zbiornika głównego przed odmuleniem (rys. 2). Linia przerywaną wkreślono hipotetyczny przebieg krzy-

wej zależności stopnia zamulenia zbiornika głównego po odmuleniu.

## Podsumowanie i dyskusja

Główny zbiornik wodny w Zesławicach przed odmuleniem charakteryzował się dużą intensywnością zamulania, wynoszącą średnio rocznie 3,0%. Współczynnik pojemności początkowej ( $\alpha_0$ ) zbiornika głównego przed odmuleniem wynosił 1,652%. Po odmuleniu i skierowaniu części dopływającej wody do wybudowanego remontowego zbiornika bocznego zmniejszył średni roczny dopływ wody do zbiornika głównego. W tak powstałych warunkach, przy wzroście współczynnika pojemności początkowej ( $\alpha_0$ ) do wartości 1,018%, nastąpiło zmniejszenie intensywności zamulania zbiornika. Średni roczny stopień zamulania zbiornika głównego po



RYSUNEK 2. Zależność stopnia zamulenia zbiorników wodnych w Zesławicach od czasu eksploatacji  
 FIGURE 2. Relationship of silting degree of water reservoirs at Zesławice and time of operation

odmuleniu wynosi 1,61%. Najmniejszym tempem zamulania, wynoszącym średnio rocznie 1,02%, charakteryzuje się zbiornik boczny. Współczynnik pojemności początkowej ( $\alpha_0$ ) tego zbiornika wynosi 1,652%.

Określona „żywołność” zbiornika głównego w Zesławicach za pomocą zależności przedstawionej na rysunku 2 wynosi 29 lat. Według prognozy zamulania, opracowanej za pomocą wzoru Gončarova (Wiśniewski i Kutrowski 1973), zbiornik główny zostanie zamulony w 80% po 38 latach eksploatacji (Michalec 2007). Po tym okresie zamulenie wynosić będzie 182 400 m<sup>3</sup>. Według tej prognozy czas eksploatacji zbiornika głównego po odmuleniu będzie wynosił 55 lat, a zamulenie zbiornika remontowego, wynoszące 80% jego pojemności, zostanie osiągnięte po 138 latach (Michalec 2007).

## Wnioski

Zbiorniki wodne w Zesławicach charakteryzują się wysoką intensywnością zamulania. Średni roczny stopień zamulenia zbiorników wynosi: 3,0% – zbiornik główny przed odmuleniem, 1,61% – zbiornik główny po odmuleniu, i 1,02% – boczny zbiornik remontowy.

Ze względu na pojemność badane zbiorniki klasyfikowane są jako małe zbiorniki wodne, charakteryzujące się małymi wartościami współczynnika pojemności. Stwierdzono, że mały zbiornik wodny, charakteryzujący się mniejszą wartością współczynnika pojemności początkowej ( $\alpha_0$ ), ulega intensywniejszemu zamulaniu.

Zmiana warunków eksploatacji zbiornika głównego, spowodowana rozdziałem wody w węźle wodnym na wlocie do zbiornika i skierowanie części przepływu do zbiornika bocznego, wpłynie na zmniejszenie intensywności zamulania.

## Literatura

- BEDNARCZYK T. 1994: Określenie ilości unoszonego rumowiska w przekroju małego zbiornika wodnego w Zesławicach. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie* 229, *Inżynieria Środowiska* 15: 7–18.
- BRAŃSKI J. 1971: Kilka uwag o wielkości transportu rumowiska wleczonego w rzekach górskich. *Gospodarka Wodna* 6: 204–207.
- DYNOWSKA I. 1964: Stosunki hydrograficzne oraz zagadnienia ochrony wód zachodniej części Wyżyny Miechowskiej. *Ochrona Przyrody* 29.
- HARTUNG F. 1959: Ursache und Verhuetung der Staumraumverlandung bei Talsperren. *Wasserwirtschaft* 1: 3–13.
- ŁAJCZAKA. 1995: Studium nad zamulaniem wybranych zbiorników zaporowych w dorzeczu Wisły. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN 8, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- MICHALEC B. 2004: Próba prognozy zamulenia małego zbiornika wodnego na cieku niekontrolowanym hydrologicznie. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus* 3(1): 63–71.
- MICHALEC B. 2007: Wpływ zbiornika bocznego na redukcję intensywności zamulania zbiornika głównego. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 2: 23–33.
- RATOMSKI J. 1995: Suspended sediment transport in Carpathian Rivers. International Conference “Transport and sedimentation of solid particles”, Prague.
- VOLK W. 1973: Statystyka dla inżynierów. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.

WIŚNIEWSKI B., KUTROWSKI M. 1973: Budownictwo specjalne w zakresie gospodarki wodnej. Zbiorniki wodne. Prognozowanie zamulania. Wytoczne instruktażowe. Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego „Hydroprojekt”, Warszawa.

## Summary

**Determination of silting degree of water reservoirs at Zesławice.** With regard to a high silting rate of small water reservoirs, these reservoirs are characterized by a short life time. During an operation period of 10 to 20 years their capacity is often reduced by 50 or more percent. In consequence of intensity of the silting process these reservoirs require frequent desilting. Intensity of this process may be, however, restricted or reduced by proper location of designed small reservoir. In the case of existing water reservoirs a change of operation or water flow conditions through the reservoir may contribute to decrease of silting rate. In consequence of desilting works of the reservoir at Zesławice an side assistant reservoir supplied with the water of the river Dłubnia from a common water feeding point was built. After renova-

tion of the main water reservoir the assistant side reservoir was included into operation. On the basis of measurement results of silting a decrease of silting of the main reservoir was stated. By directing a part of water to the assistant reservoir the water conditions changed and this caused reduction of load quantity entering the main reservoir. The elaborated regression relations of the change of the silting degree during operation of these reservoirs permitted to prove reduction of silting intensity. Basing upon these relations the change of silting degree of the main and assistant reservoir was determined in particular years of operation. According to Hartung's (1959) criterion silting of a reservoir in 80% causes its exclusion from operation. It was proved that before desilting the 80% silting degree would take place after 20 years of operation.

### Authors' addresses:

Bogusław Michalec  
Akademia Rolnicza w Krakowie  
Katedra Inżynierii Wodnej  
al. A. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków  
Karol Pęczek  
FWK-Air Sp. z o.o.  
ul. Cystersów 13, 31-553 Kraków