

Bogusław Michalec

**OKREŚLENIE STOPNIA ZAMULENIA ZBIORNIKA
WODNEGO W KREMPNEJ I OCENA WPŁYWU JEGO
PRZEBUDOWY NA PROCES ZAMULANIA**

***APPRAISAL OF SILTING RATIO OF WATER RESERVOIR
IN KREMPNA AND APPRECIATION OF THE IMPACT
OF HIS REDEVELOPMENT ON THE SILTING PROCESS***

Streszczenie

Małe zbiorniki wodne zamulane są w znacznie krótszym czasie w porównaniu do zbiorników średnich i dużych. Z tego względu co kilkanaście lub kilkadziesiąt lat przeprowadzane są prace odmuleniowe. Odmulenie małych zbiorników wodnych następuje po upływie znacznie krótszego czasu eksploatacji niż wynikałoby z kryterium Hartunga [1959], według którego zbiornik nie pełni swojej funkcji ze względu na zamulenie stanowiące 80% jego pojemności pierwotnej. Przykładem jest zbiornik w Krempnej, który został odmulony po osiemnastu latach eksploatacji, gdy jego zamulenie, określone za pomocą stopnia zamulenia, wynosiło 41%. W trakcie prac odmuleniowych w 2006 roku dokonano również przebudowy zbiornika, zmniejszając jego pojemność ze 112 tys. m³ do 96,3 tys. m³. W 2009 roku wykonano pomiary zamulania i stwierdzono, że stopień zamulenia wynosi 7,0%. Opracowano zależność stopnia zamulenia od czasu eksploatacji zbiornika wodnego w Krempnej, określoną na podstawie obliczonych stopni zamulenia zbiornika w poszczególnych latach przed i po odmuleniu. Na jej podstawie stwierdzono, że przebieg procesu zamulania, po przebudowie zbiornika wodnego będzie przebiegał mniej intensywnie jak przed przebudową, co potwierdziły wyniki prognozy zamulania. Wykazano, że wpływ przebudowy zbiornika na zmianę warunków zamulania okazał się istotny, a pełna żywotność zbiornika zostanie wydłużona o ponad 20%.

Słowa kluczowe: mały zbiornik wodny, zamulenie, stopień zamulenia, prognoza zamulania

Summary

Small water reservoirs are silted in the considerably shorter time in the comparison with average and large reservoirs. Considering the silting process desilting work every dozen or years are carried out. Desilting of small water reservoirs follows after the lapse of the considerably shorter time of operation than it to result can from the Hartung's criterion, according to whose reservoir not fulfils one's the function because of silting making up 80% of his origin capacity. The example is the reservoir in Krempna, which was desilted after eighteen years of operation, when his silting, determined for the help of the degree of silting, 41% carried out. The redevelopments of the reservoir were also executed during of desilting works in 2006, reducing his capacity from 112 thousands m³ to 96,3 thousands m³. Execute the silting measurements in 2009 and stated that the degree ratio is equal 7,0 %. It was worked out the relationship between silting ratio and the time operation of the water reservoir in Krempna, definite on the basis established silting ratios of the reservoir in individual years before and after desilting. On the basis of this relationship was stated that the course of the silting process will take place intensely after the redevelopment of the water reservoir as before his redevelopment. It was confirmed the results of the silting forecast and was stated that the impact of the redevelopment of reservoir on the change of the conditions of silting is important, and the full life of the reservoir will be lengthened about above 20%.

Key words: *small water reservoir, silting, silting ratio, silting forecast*

WSTĘP

Małe zbiorniki wodne lokalizowane są przeważnie w górnych partiach zlewni i przechwytyują znaczną część rumowiska transportowanego przez rzeki. Ze względu na intensywne zamulanie, powodujące zmianę warunków hydraulicznych przepływu wody i rumowiska przez zbiornik, w stosunkowo krótkim czasie, maleje ilość rumowiska zatrzymywanego w małych zbiornikach wodnych. Gromadzony osad powoduje podwyższanie dna, zmniejszając pojemność użyteczną zbiornika, niekorzystne zmiany jakości wody oraz pogorszenie walorów estetycznych obiektu i przyległych do niego terenów. Określenie zmniejszenia pojemności zbiornika w wyniku odkładania się rumowiska i czasu, po upływie którego nastąpi redukcja pojemności możliwe jest dzięki opracowanej prognozie zamulania. Prognoza zamulania powinna umożliwić oszacowanie tzw. żywotności użytkowej zbiornika wodnego, to jest czasu, po upływie którego zbiornik nie będzie pełnił swojej funkcji. Przyjmuje się za Hartungiem [1959], że zbiornik nie spełnia swojej funkcji jeżeli zostanie zamulony w 80%. Jak podają Batuca i Jordaan [2000] żywotność, czy też życie zbiorników wodnych lub tzw. długowieczność, może być określana w różnych kategoriach, jako tzw. żywotność użytkowa (ang. *useful life*), ekonomiczna (ang. *economic life*), stanu używalności (ang. *usable life*), projektowa (ang. *design life*) i żywotność pełna

(ang. *full life*). Żywotność ekonomiczna określa okres eksploatacji, podczas którego koszty utrzymania zbiornika nie przekraczają korzyści ekonomicznych uzyskanych w wyniku eksploatacji zbiornika. Żywotność stanu używalności określa okres eksploatacji, podczas którego zbiornik spełnia niektóre funkcje przewidziane w projekcie, po upływie żywotności ekonomicznej. Natomiast żywotność pełna określa okres eksploatacji, po upływie którego jego pojemność zostanie całkowicie zredukowana w wyniku sedymentacji materiału mineralnego.

Małe zbiorniki wodne charakteryzują się intensywnym tempem zamulania [Dąbkowski i in. 1982]. Średni roczny stopień zamulenia małych zbiorników w dorzeczu górnej Wisły, określony na podstawie badań dwunastu zbiorników, wynosi 2,36% [Michalec 2008]. Ze względu na sposób użytkowania zlewni, reżim hydrologiczny i warunki przepływu wody małe zbiorniki wodne, już po kilkunastu latach eksploatacji, zostają zamulone w kilkudziesięciu procentach. Jak podaje Michalec [2008a], przykładem takich zbiorników wodnych są zbiorniki Zesławice na rzece Dłubni, Krempna na rzece Wisłoce, Rzeszów na rzece Wisłok. Stopień zamulenia tych zbiorników wodnych, określane jako stosunek objętości osadów rumowiska do początkowej pojemności, wynosi odpowiednio 40,1% po osiemnastu latach eksploatacji oraz 50,9% po siedemnastu latach eksploatacji i 66,0% po trzynastu latach eksploatacji [Michalec 2008a]. Z tego względu, aby małe zbiorniki wodne mogły spełniać swoje funkcje, muszą być odmulane co kilkanaście, bądź kilkadziesiąt lat. Często w trakcie prac odmuleniowych ulega zmianie kształt zbiornika, jego pojemność początkowa, czy też ze względu na wybudowanie nowego zbiornika, zasilanego wodami z dopływu zbiornika głównego, zmieniają warunki dopływu i przepływu wody przez zbiornik. Przykładem takiego zbiornika wodnego jest zbiornik w Zesławicach. Przed wykonaniem prac odmuleniowych tego zbiornika, zrealizowanych w 1989 roku, w latach 1986–1987 wykonano tzw. zbiornik remontowy, który na czas prowadzenia prac miał przejąć funkcję odmulanego zbiornika. Po wykonaniu remontu zbiornika w Zesławicach, zbiornik remontowy został włączony do wspólnej eksploatacji, a rozdział wody w węźle wodnym przyczynił się do zmiany warunków zamulania zbiornika w Zesławicach [Michalec 2008b]. Według opracowanej prognozy zamulania zbiornika w Zesławicach, jego żywotność wydłuży się z 38 do 66 lat [Michalec 2008b].

Wpływ zmiany kształtu zbiornika wodnego i jego pojemności początkowej na proces zamulania można prześledzić na przykładzie zbiornika wodnego w Krempnej. Zbiornik ten został w 2006 roku po raz drugi odmulony. W trakcie prac renowacyjnych, ze względu na znaczne koszty, część rumowiska zatrzymanego w zbiorniku została przemieszczona na jego lewobrzeżną część w celu poszerzenia nasypów lewobrzeżnych. Spowodowało to zmniejszenie pojemności całkowitej zbiornika i wpłynęło na zmianę warunków przepływu wody oraz sedymentacji rumowiska drobnoziarnistego. Przebudowa zbiornika i zmieszenie jego pojemności niewątpliwie wpłynęło na przebieg zamulania. Celem przeprowadzonych badań było określenie objętości osadów rumowiska po odmuleniu

wykonanym w 2006 roku i opracowanie prognozy zamulania, na podstawie której możliwe będzie określenie żywotności zbiornika. Wpływ przebudowy małego zbiornika wodnego w Krempej na jego żywotność użytkową zostanie oceniony na podstawie porównania wyników prognozy zamulania przed odmuleniem i po odmuleniu.

METODYKA

Pomiary zamulania zbiornika wodnego w Krempej, przed i po odmuleniu oraz przebudowie w 2006 roku, wykonano w przekrojach poprzecznych. Pomiarzy zamulenia wykonano z łodzi i polegały na określeniu zmiany rzędnych dna zbiorników za pomocą sondy drążkowej. Dysponując projektami powykonawczymi badanych zbiorników wodnych, określono zmiany pól powierzchni w przekrojach poprzecznych za pomocą programu AutoCad. Zmiana pola powierzchni przekroju poprzecznego odpowiadała depozycji lub erozji materiału dennego. Pomierzona objętość osadów rumowiska umożliwiła określenie stopnia zamulenia (S_z), będącego stosunkiem objętości rumowiska zatrzymanego do pojemności początkowej zbiornika:

$$S_z = \frac{V_z}{V_p} \cdot 100 \% \quad (1)$$

gdzie:

V_z – objętość rumowiska zatrzymanego w zbiorniku wodnym [m^3],

V_p – pojemność pierwotna (początkowa) zbiornika wodnego [m^3].

Zbiornik wodny w Krempej został wykonany w latach 1970–1972, jako zbiornik o charakterze rekreacyjnym. Jest on zlokalizowany w górnym odcinku rzeki Wisłoki w km 145+023. Pojemność całkowita wynosiła 119,1 tys. m^3 , a powierzchnia zalewu była równa 3,2 ha przy długości zbiornika wynoszącej 400 m. W 1988 roku na zlecenie Urzędu Gminy w Krempej wykonano pierwsze prace odmuleniowe zbiornika. W wyniku odmulenia i wykonanej przebudowy brzegu lewego w części wlotowej do zbiornika zmiana uległa pojemność pierwotna zbiornika – wynosiła ona 112 tys. m^3 . Wykonane w 2005 roku pomiary zamulania wykazały, że w osiemnastym roku eksploatacji objętość osadów rumowiska w zbiorniku wynosiła ponad 48,8 tys. m^3 , a stopień zamulenia wynosił niespełna 41% [Michalec 2008b]. W 2006 roku dokonano ponownego odmulenia i przebudowy zbiornika. Ze względu na poszerzenie nasypów lewobrzeżnego brzegu zmniejszono pojemność pierwotną, która wynosiła 96,3 tys. m^3 .

Prognozę zamulania, umożliwiającą określenie pełnej żywotności zbiornika przed i po odmuleniu wykonanym w 2006 roku, opracowano według formuły Gončarova (wzór 2), zgodnie z wytycznymi instruktażowymi autorstwa Wiśniewskiego i Kutrowskiego [1973]. Wyniki prognozy umożliwiły porównanie objętości osadów w tych samych latach eksploatacji zbiornika głównego przed

i po odmuleniu, a także określenie czasu, po upływie którego zbiorniki zostaną zamulone w 80%, na podstawie którego określono żywotność zbiornika.

$$Z_t = V_p \left[1 - \left(1 - \frac{R_1}{V_p} \right)^t \right] \quad (2)$$

gdzie:

- Z_t – objętość odkładów [m^3] po upływie „t” lat,
- V_p – pojemność pierwotna (początkowa) zbiornika wodnego [m^3],
- R_1 – objętość odkładów po pierwszym roku eksploatacji [m^3],
- t – lata eksploatacji.

Określenie żywotności zbiornika na podstawie prognozy według formuły Gončarova wymaga dysponowania objętością odkładów po pierwszym roku eksploatacji – R_1 . Nie wykonano pomiarów zamulania po pierwszym roku eksploatacji zarówno przed jak i po odmuleniu. Z tego względu objętość tę określono z przekształconego równania (2) do postaci umożliwiającej obliczenie wielkości R_1 na podstawie wyników pomiarów zamulania wykonanych w kolejnych latach.

WYNIKI BADAŃ

Objętość odkładów rumowiska w zbiorniku wodnym w Krempnej, określona na podstawie pomiarów zamulania wykonanych wiosną 2009 roku, wynosi ponad 6,7 tys. m^3 (tab. 1), a stopień zamulenia wynosi 7,0%.

W okresie przed odmuleniem zbiornika pomiary wykonywano w dziewiątym roku eksploatacji, a obliczony średni roczny stopień zamulenia dla okresu dziewięciu lat wynosił 2,7%, a po osiemnastu latach eksploatacji uległ zmniejszeniu do 2,3%, co świadczy o względnym spowolnieniu intensywności zamulania. Intensywność ta w pierwszych latach eksploatacji mogła być większa i wynosić ponad 2,7%. Średni roczny stopień zamulenia, określony na podstawie pomiaru zamulenia w trzecim roku eksploatacji, wynoszący 2,3%, jest równy średniemu rocznemu stopniowi zamulenia określonemu na podstawie pomiarów w ostatnim roku przed odmuleniem. Po przebudowie zbiornik charakteryzuje się niższą intensywnością zamulania, co mogło zostać spowodowane nadbudową lewobrzeżnych nasypów zmniejszającą szerokość zbiornika i przyczyniającą się zmianie warunków hydraulicznych przepływu wody i rumowiska przez zbiornik. Wpływ przebudowy zbiornika na proces zamulania można określić, przeprowadzając analizę zmiany stopnia zamulenia i opracowanej prognozy zamulania i oszacowanej za jej pomocą żywotności zbiornika. Potwierdzenie tego stwierdzenia będzie możliwe po wykonaniu serii pomiarów zamulania w ciągu najbliższych lat.

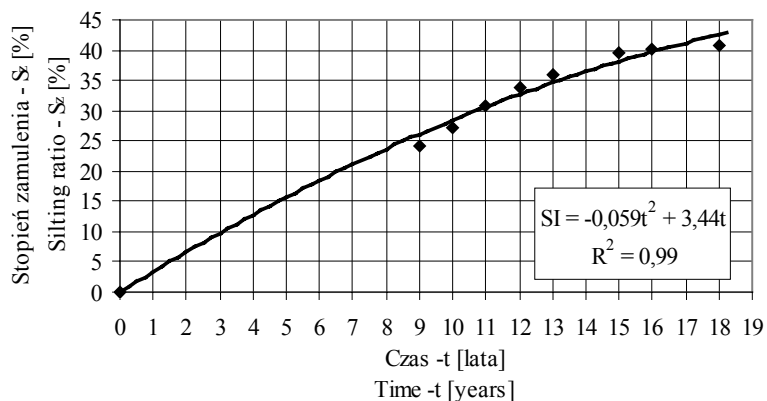
Tabela 1. Objętość osadów rumowiska i stopień zamulenia zbiornika wodnego w Krempnej**Table 1.** Volume of deposited sediment and silting ratio of reservoir in Krempna

Pojemność pierwotna Origin capacity [m ³]	Rok Year	Lata eksploatacji Years of operation	Objętość zamulenia Volume of sediment [m ³]	Stopień zamulenia S _z [%]	Średni roczny stopień zamulenia Annual mean of silting ratio \bar{S}_z [%]
112000 ¹⁾	1996	9	27041	24,1	2,7
	1997	10	30464	27,2	2,7
	1998	11	34637	30,9	2,8
	1999	12	38002	33,9	2,8
	2000	13	40144	35,8	2,8
	2002	15	44200	39,5	2,6
	2003	16	44901	40,1	2,6
96350 ²⁾	2009	3	6710	7,0	2,3

gdzie: ¹⁾ – pojemność zbiornika wodnego przed odmuleniem,²⁾ – pojemność zbiornika wodnego po odmuleniuwhere: ¹⁾ – reservoir capacity before desilting,²⁾ – reservoir capacity after desilting

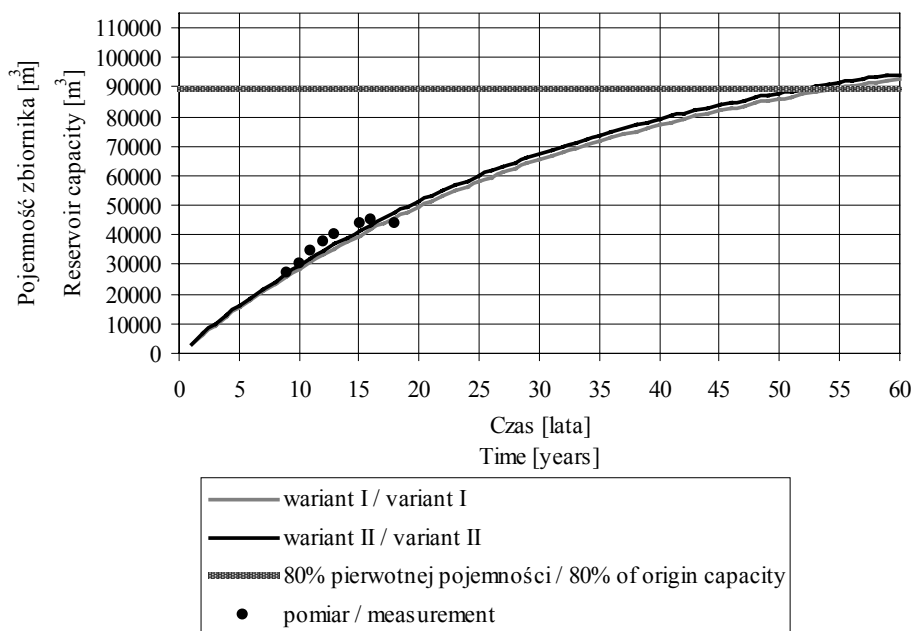
Przedstawiając w postaci graficznej wartości stopnia zamulenia S_z zbiornika wodnego w Krempnej, określonego na podstawie wykonanych pomiarów zamulania przed odmuleniem, w zależności od czasu eksploatacji wyrażonego w latach, można określić zależność stopnia zamulenia od czasu eksploatacji (rys. 1). Opracowana zależność regresyjna charakteryzuje się wysokim współczynnikiem korelacji R , wynoszącym 0,99 i wskazuje na silny związek opisany funkcją wielomianową. Z przebiegu krzywej regresji można wnioskować, że przed przebudową wykonaną w 2006 roku, stopień zamulenia w 1990 roku, tj. w trzecim roku eksploatacji, był wyższy od określonego w 2009 roku i wynosił około 10%. Można zatem wstępnie ocenić, że przebieg procesu zamulania po przebudowie zbiornika wodnego będzie przebiegał mniej intensywnie jak przed przebudową, a jego żywotność będzie wydłużona, co zostanie wykazane za pomocą określonego czasu zamulania.

Prognozę zamulania zbiornika wodnego w Krempnej przed odmuleniem opracowano, określając objętość osadów po pierwszym roku eksploatacji (R_1) w dwóch wariantach. W pierwszym wariantcie została ona określona z przekształconego równania (2) na podstawie objętości rumowiska odłożonego w dziewiątym roku eksploatacji, a w wariantcie drugim została ona określona na podstawie objętości rumowiska odłożonego w osiemnastym roku eksploatacji. Obliczona wartość R_1 w wariantcie I wynosi 3225,5 m³, a w wariantcie II – 3386,5 m³. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki prognozy zamulania, opracowanej w dwóch wariantach.



Rysunek 1. Zależność regresyjna stopnia zamulenia i czasu eksploatacji zbiornika wodnego w Krempnej

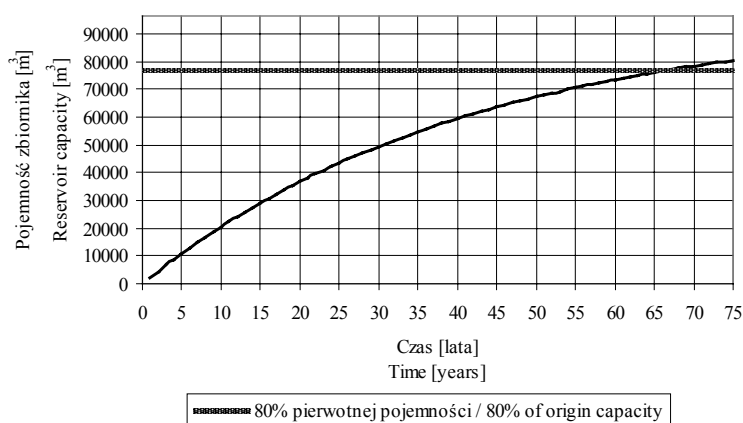
Figure 1. Regression relationship of silting ratio and time of operation of water reservoir in Krempna



Rysunek 2. Prognoza zamulania zbiornika wodnego w Krempnej przed odmuleniem w 2006 roku

Figure 2. Silting forecast of water reservoir in Krempna before silting in year 2006

Czas, po upływie którego zbiornik wodny w Krempnej zostanie zamulony w 80%, określony na podstawie prognozy zamulania, opracowanej w wariantach I i II, wynosi odpowiednio 55 i 52 lata. Natomiast po odmuleniu wykonanym w 2006 roku zamulenie zbiornika wodnego według prognozy (rys. 3) zostanie osiągnięte po 67 latach.



Rysunek 3. Prognoza zamulania zbiornika wodnego w Krempnej po odmuleniu w 2006 roku

Figure 3. Silting forecast of water reservoir in Krempna after silting in year 2006

WNIOSKI

Zmniejszenie pojemności zbiornika wodnego, uzyskane w wyniku jego przebudowy w trakcie wykonywanych prac odmuleniowych, wpłynie istotnie na zmianę warunków zamulania, gdyż proces wypływania zbiornika po przebudowie będzie przebiegał mniej intensywnie. Wskazuje na to uzyskanie trendu zmiany stopnia zamulenia w kolejnych latach eksploatacji, określonego na podstawie obliczonych stopni zamulenia przed i po odmuleniu. Stopień zamulenia w trzecim roku eksploatacji po przebudowie wynosi 7,0%, a określony za pomocą opracowanej zależności regresyjnej mógł wynosić około 10% w porównywalnym okresie przed odmuleniem. Świadczyć to może o wydłużeniu się tzw. żywotności zbiornika, spowodowanej zmniejszeniem się tempa zamulania. Słuszność tego stwierdzenia potwierdziła opracowana prognoza zamulania, według której pełna żywotność zbiornika po przebudowie, określona jako czas, po upływie którego zbiornik zostanie zamulony w 80%, będzie o ponad 20 % wydłużona w porównaniu z żywotnością zbiornika przed przebudową. Zbiornik po

przebudowie zostanie zamulony w 80% w ciągu 67 lat. Jednak ze względu na znaczne wypłylenie jego czaszy prace odmuleniowe mogą zostać wykonane po upływie krótszego czasu eksploatacji. Rok przed odmuleniem i przebudową jego stopień zamulenia wynosił ponad 40%. Po przebudowie tak znaczne zamulenie zostanie osiągnięte po upływie około dwudziestu jeden – dwudziestu trzech lat eksploatacji. W przypadku małych zbiorników wodnych prace odmuleniowe przeprowadzane są po upływie znacznie krótszego czasu eksploatacji niż wynikać by mogło z kryterium Hartunga [1959], według którego zbiornik nie pełni swojej funkcji ze względu na zamulenie stanowiące 80% jego pojemności pierwotnej.

Poprawne określenie żywotności zbiornika wodnego, czy też czasu jego eksploatacji za pomocą wzoru Gončarova, zależy od dokładności określenia objętości odkładów rumowiska w pierwszym roku eksploatacji zbiornika.

BIBLIOGRAFIA

- Batuca G. D., Jordaan M. J. Jr. *Silting and Desilting of Reservoirs*. A.A.Balkema. Rotterdam, Netherlands, 2000.
- Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A. *Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych*. PWRiL, Warszawa 1982.
- Hartung F. *Ursache und Verhuetung der Staumraumverlandung bei Talsperren, Wasserwirtschaft*. 1959, 1.
- Kalinowski R., Organ J. *Odmulenie zbiornika wodnego w miejscowości Krempna*. Dokumentacja Techniczna Uproszczona. Maszynopis. Jasło 2006.
- Michalec B. *Analiza procesu zamulania zbiornika wodnego w Zesławicach*. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych nr 37, 2008a, 43–52.
- Michalec B. *Ocena intensywności procesu zamulania małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły*. Zesz. Nauk. Uniw. Roln. w Krakowie nr 451, Seria rozprawy, z. 328, 2008b.
- Wiśniewski B., Kutrowski M. *Budownictwo specjalne w zakresie gospodarki wodnej*. Zbiorniki wodne. Prognozowanie zamulania. Wytyczne instruktażowe. Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego „Hydroprojekt”, Warszawa 1973.

Dr hab. inż. Bogusław Michalec
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
30-059 Kraków
al. A. Mickiewicza 24/28
tel. (0-48-12) 633-53-42,
e-mail: rmmichbo@cyf-kr.edu.pl

Recenzent: Prof. dr hab. Jerzy Ratomski