

*Bogusław Michalec, Karol Pęczek, Bartosz Leksander*

## **ROZKŁAD PRZESTRZENNY OSADÓW DENNYCH W MAŁYM ZBIORNIKU WODNYM W ZESŁAWICACH**

### ***SPATIAL DISTRIBUTION OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE SMALL WATER RESERVOIR AT ZESŁAWICE***

#### **Streszczenie**

Poznanie i określenie rozmieszczenia przestrzennego akumulowanych osadów w małych zbiornikach jest istotnie nie tylko na etapie projektowania, lecz również w trakcie eksploatacji. Większość prac badawczych dotyczy rozmieszczenia odkładów rumowiska w średnich i dużych zbiornikach wodnych. W pracy przedstawiono i opisano za pomocą metody Dendy'ego przestrzenny rozkład odkładów rumowiska w głównym zbiorniku wodnym w Zesławicach w okresie przed i po jego odmuleniu. Ze względu na wybudowanie zbiornika bocznego, przejmującego funkcje zbiornika głównego w okresie jego odmulenia i przebudowy, zmianie uległy warunki przepływu wody i rumowiska, które miały wpływ na dystrybucję osadów rumowiska w zbiorniku głównym.

W pracy wykazano na podstawie wykonanych pomiarów zamulania i określonego stopnia zamulenia zbiornika głównego, że w wyniku rozdziału wody i rumowiska nastąpiło zmniejszenie intensywności zamulania badanego zbiornika, jak również wpłynęło to na zmianę rozkładu przestrzennego osadów rumowiska. Stwierdzono na podstawie analizy pionowego rozmieszczenia osadów, że w okresie po odmuleniu w części środkowej zbiornika głównego, charakteryzującej się głębokościami względnymi mieszczącymi się w przedziale 0,41-0,65 nastąpiło zwiększenie się względnego zamulenia o 10-20%. Zmiana warunków dopływu wody i rumowiska do badanego zbiornika spowodowała redukcję intensywności zamulania. Średni roczny stopień zamulenia zbiornika przed odmuleniem wynosił 3,0%, natomiast po odmuleniu jest równy 1,61%.

**Słowa kluczowe:** mały zbiornik wodny, rumowisko, stopień zamulenia, pionowe rozmieszczenie osadów dennych

### Summary

*The study and the qualification of the spatial distribution of accumulated bottom sediments in small reservoirs is considerably not only on the design stage, but also during the of operation. The majority of investigative papers concerns to the distributions of the accumulated sediments in average and large water reservoirs. In this work was introduced and describes for the help of the Dendy's method the spatial distribution of the accumulated sediments in the main water reservoir at Zesławice in the period before and after his desilting.*

*In consideration of building the side reservoir, which to take of the functions of the main reservoir in the period its desilting and reconstruction, the conditions of the flow of the water and the sediment was change. It is had the impact on the distribution of the bottom sediments in the main reservoir.*

*It was showed in this work, on the basis of the executed measurements of silting and the determined the silting degree of the main reservoir, that the decrease the intensity of silting studied reservoir had taken place in the result of the split of water and sediment and it also influenced on the change of the spatial distribution of the sediment deposited. It was statement, that in period after desilting in the central part of the main reservoir, being characterizing relative depths in the range 0,41-0,65 the relative silting of this part of reservoir was increases about 10-20 %. The change of the conditions of the water and sediment flow to the studied reservoir caused the reduction of the intensity of silting. The mean annual silting degree of the reservoir before desilting carried out 3,0 %, however after desilting it is equal to 1,61 %.*

**Key word:** *small water reservoir, sediment, silting degree, vertical sediment distribution*

### WSTĘP

Prognozując proces zamulania zbiornika wodnego określa się nie tylko objętość osadów rumowiska w poszczególnych latach eksploatacji, lecz także rozmieszczenie osadów rumowiska w czasie zbiornika. Prognozę ilości rumowiska zgromadzonego w zbiorniku zaporowym można opracować za pomocą metod empirycznych lub teoretycznych. Metody empiryczne powstają na podstawie badań fizycznych realizowanych w terenie lub w laboratorium. Stosowane powszechnie metody empiryczne Ortha [Dąbkowski i in. 1982], Šamova [Dąbkowski i in. 1982], Gončarova [Wiśniewski, Kutrowski 1973] i Łapszenkova [Batuca, Jordaan 2000], umożliwiają prognozowanie objętości zgromadzonego rumowiska w zbiorniku wodnym. Natomiast metody teoretyczne prognozowania zamulenia zbiorników wodnych to metody matematyczne, które można podzielić na analityczne i numeryczne. Metody te zostały szczegółowo przedstawione w pracy Michalca [2010]. Walidacja tych metod prognozowania zamulania zbiorników wodnych dokonywana jest na podstawie wyników badań terenowych lub laboratoryjnych. Stąd tak istotne jest realizowanie prac terenowych, umożliwiających uzyskanie danych do weryfikacji modeli teoretycznych.

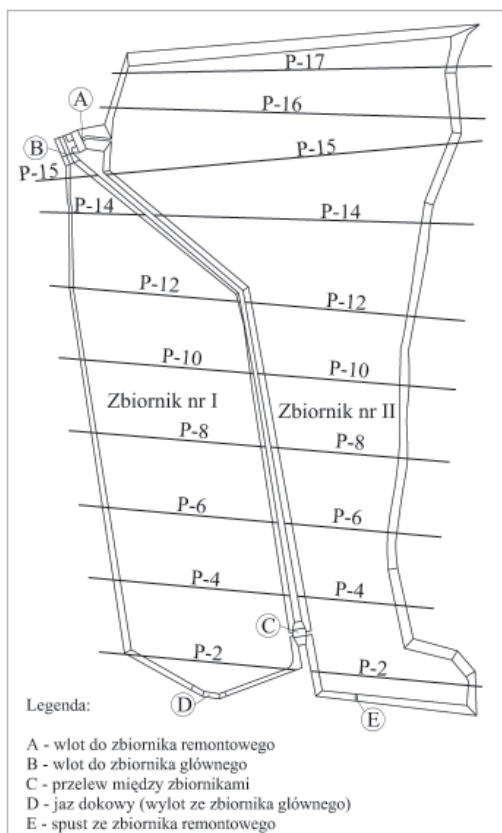
Szczególnie istotnym aspektem analizy i oceny procesu zamulania jest określenie rozmieszczenia osadów w czaszy zbiornika. Określenie rozmieszczenia osadów w dnie zbiorników ma szczególne znaczenie w zapewnieniu prawidłowej eksploatacji ujęć wodnych. Znajomość dystrybucji osadów umożliwia właściwą ocenę efektywności inwestycji, prawidłową lokalizację urządzeń spustowych, ujęć wodnych, jak również decyduje o metodach ich usunięcia. Opracowano wiele empirycznych metod określenia rozmieszczenia przestrzennego osadów w zbiornikach wodnych, spośród których najważniejsze to metody Cristofano [1953], Borlanda i Millera [1958], Lary [1962], Hobbs'a [1969], Borlanda [1970], Roosebooma i Annandale'a [1983]. Metody te zostały opracowane na podstawie analizy rozmieszczenia osadów w średnich i dużych zbiornikach wodnych. Zastosowanie tych metod w prognozowaniu rozmieszczenia rumowiska w małych zbiornikach wodnych wymaga weryfikacji. Wstępna ocena zastosowania metody Roosebooma i Annandale'a [1983] do prognozowania rozmieszczenia osadów rumowiska w małym zbiorniku wodnym została przedstawiona w pracy Michalca i Tarnawskiego [2006]. Szczegółową ocenę tej metody, opracowaną na podstawie badań procesu zamulania dwunastu małych zbiorników wodnych zamieszczono w pracy Michalca [2008].

Interesującą metodę opisu rozmieszczenia osadów w zbiorniku wodnym przedstawił Dendy [1974, 1982]. Jednakże za pomocą tej metody nie można prognozować rozmieszczenia osadów w zbiorniku wodnym, a uzyskany za jej pomocą opis ich rozmieszczenia może być pomocny w analizie warunków dystrybucji osadu w czaszy zbiornika. Taką analizę opracowali Tarnawski i Słowik-Opoka [2002]. Została ona opracowana na podstawie danych archiwalnych, obejmujących wyniki pomiarów zamulenia zbiornika w Zesławicach, wykonanych w latach 1968-1983. Pomiary te zostały wykonane przed odmuleniem zbiornika. Po jego odmuleniu i wybudowaniu zbiornika bocznego, zasilanego wodami Dłubni ze wspólnego węzła wodnego, wykonano kolejne pomiary zamulenia w latach 1999-2010. Celem pracy było opisanie rozkładu przestrzennego odkładów rumowiska w zbiorniku głównym w Zesławicach po jego odmuleniu i określenie zmian dystrybucji osadów w wyniku redukcji dopływu wody i rumowiska, spowodowanej skierowaniem części dopływającej wody do zbiornika bocznego (remontowego). W tym celu opracowano pionowy rozkład rumowiska w badanym zbiorniku wodnym zgodnie z metodyką podaną przez Dendy'ego.

## **CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ**

W latach 1964-1966 został wybudowany mały zbiornik retencyjny w Zesławicach koło Krakowa na rzece Dłubni (rys. 1). Pojemność początkowa zbiornika wynosiła 228 tys. m<sup>3</sup>. Elementem piętrzącym jest zapora ziemna zbiornika,

zlokalizowana w km 8+700 Dłubni i zamyka zlewnię o powierzchni 218,1 km<sup>2</sup> [Dokumentacja techniczna jednostadiowa... 1984].



**Rysunek 1.** Zbiorniki wodne w Zesławicach: główny zbiornik wodny (nr I) i zbiornik remontowy (nr II). Na rysunkach zaznaczono przekroje pomiarowe od P-2 do P-17  
**Figure 1.** Water reservoirs at Zesławice: main (No I) and assistant (No II). Measuring sections were marked from P-2 to P-17, where: 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

Z biegiem lat zbiornik ten ulegał intensywnemu zamulaniu, a jego pojemność użyteczna, określona na podstawie pomiarów wykonanych w 1983 roku wynosiła niespełna 50% pojemności pierwotnej, stanowiąc podstawę do podjęcia prac odmuleniowych. Przed przystąpieniem do odmulenia głównego zbiornika wodnego wykonano boczny zbiornik remontowy. Budowę remontowego zbiornika wodnego rozpoczęto w 1986 roku, a w 1987 roku został on oddany do

eksploatacji (rys. 1). Normalny poziom piętrzenia obu zbiorników wodnych wynosi 215,00 m npm. Powierzchnia zalewu zbiorników przy tym poziomie piętrzenia jest równa 9,50 ha i 11,3 ha odpowiednio zbiornika głównego i zbiornika bocznego [„Operat wodno-prawny...” 2003].

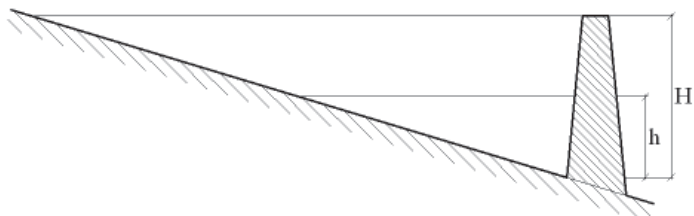
Zadaniem bocznego zbiornika remontowego było przejęcie funkcji zbiornika głównego w okresie jego odmulania i przebudowy. Pojemność zbiornika remontowego wynosiła wówczas 198 tys. m<sup>3</sup>. Zbiornik wykonano na lewym brzegu rzeki. Główny zbiornik wodny oznaczono jako zbiornik nr I, a zbiornik remontowy jako zbiornik nr II. W 1989 odmulono zbiornik główny. Usunięto wówczas około 140 tys. m<sup>3</sup> osadu, co stanowiło około 70% jego pojemności [Odmulenie zbiornika...1989].

## METODYKA

Pomiary objętości odkładów rumowiska w głównym zbiorniku wodnych w Zesławicach, wykonane w latach 1999-2010 polegały na określeniu zmiany rzędnych dna w przekrojach poprzecznych i w punktach poza przekrojami, stosując tzw. metodę punktów rozproszonych. Pomiary te wykonano sondą drążkową z łodzi. Wyniki pomiarów zostały naniesione na przekroje poprzeczne, a następnie określono zmiany pól powierzchni w tych przekrojach. Zmiana pola powierzchni przekroju poprzecznego odpowiadała depozycji lub erozji materiału dennego. Następnie określono powierzchnie odkładów w przekrojach i obliczono objętość odkładów w zbiorniku.

W przeprowadzonej analizie rozmieszczenia osadów wykorzystano materiały archiwalne dotyczące pomiarów objętości zamulenia wykonanych w zbiorniku głównym przed 1989 rokiem oraz wyniki pomiarów wykonanych przez autorów tego artykułu. Wykonane pomiary wielkości zamulenia, a na ich podstawie opracowane przekroje poprzeczne umożliwiły obliczenie objętości odłożonego rumowiska w zbiorniku głównym. Rozmieszczenie przestrzenne osadów określono metodę przedstawioną w pracach Dendy'ego [1974, 1982]. Według tej metody można określić poziome i pionowe rozmieszczenie osadów w zbiorniku wodnym. W pracy określono pionowe rozmieszczenie osadów w badanym zbiorniku wodnym. Pionowe rozmieszczenie osadów (rys. 2) przedstawiono jako zależność względnej objętości odkładów rumowiska ( $S_v/S$ ) od względnej głębokości zbiornika ( $h/H$ ).

Względna objętość odkładów rumowiska została określona jako stosunek objętości odkładów ( $S_v$ ) znajdujących się w poniżej określonego poziomu warstwy osadów do całkowitej objętości osadów ( $S$ ), natomiast względną głębokość zbiornika określono jako stosunek głębokości ( $h$ ) poniżej danego poziomu do maksymalnej głębokości zbiornika ( $H$ ).



**Rysunek 2.** Określenie względnej głębokości zbiornika wodnego według Dendy’ego  
**Figure 2.** Qualification of the relative depth of the water reservoir according to Dendy

## WYNIKI BADAŃ

Wyniki pomiarów objętości odłożonego rumowiska w głównym zbiorniku wodnym w Zesławicach, w okresach przed i po odmuleniu, zamieszczono w tabeli 1.

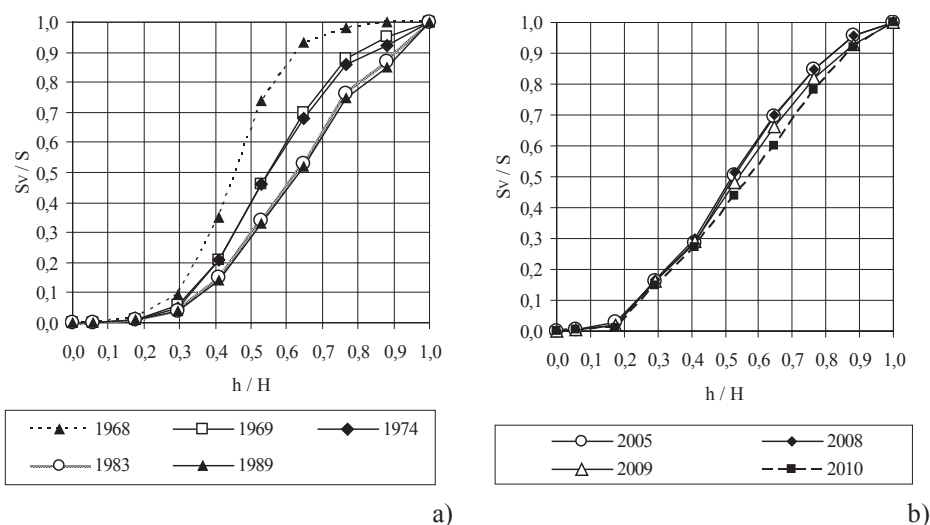
**Tabela 1.** Objętość zgromadzonego rumowiska w głównym zbiorniku wodnym w Zesławicach

**Table 1.** Volume of sediments deposited in main water reservoirs at Zesławice

Zbiornik główny Main water reservoirs	Rok Year	Lata eksploatacji Years of operations	Objętość zgromadzonego rumowiska Volume of deposited sediment $V [10^3 \text{ m}^3]$	Stopień zamulenia Siltting ratio $S_z [\%]$
Przed odmuleniem Before desilting	1968	2	6,97	11.8
	1969	3	70,43	30.9
	1970	4	75,78	33.2
	1971	5	76,25	33.4
	1974	8	86,19	37.8
	1983	17	116,09	50.9
	1989	23	140,20	61.5
Po odmuleniu After desilting	1999	10	56,16	24.6
	2005	16	75,32	33.0
	2008	19	81,49	35.7
	2009	20	82,57	36.2
	2010	21	97,57	42.8

Opracowany według metodyki podanej przez Dendy’ego rozkład przestrzenny rumowiska w głównym zbiorniku wodnych przed i po odmuleniu (rys. 2) pozwala na stwierdzenie, że w okresie przed odmuleniem rozmieszczenie osadów w tym zbiorniku w poszczególnych latach było wyraźnie zróżnic-

wane. W drugim roku eksploatacji, tj. 1968, największa część rumowiska, wynosząca 63% całkowitej objętości została odłożona w części zbiornika, w której głębokości względne wynoszą od 0,41 do 0,76, co odpowiada strefie dna zbiornika znajdującej się od 2,0 do 0,8 m pod powierzchnią zwierciadła wody przy normalnym poziomie piętrzenia. W strefie zbiornika o największych głębokościach względnych, wynoszących od 0,76 do 1,0, zostało odłożone jedynie 2% rumowiska. Jest to strefa zbiornika znajdująca się w części wlotowej do zbiornika wodnego, w której napełnienia nie przekraczają 0,8 m. W kolejnych latach, tj. od 1968 do 1974 roku w tej części zbiornika zwiększa się objętość sedimentów do 14%, a od 1983 do 1989 roku następuje zwiększenie tej objętości do 25%.



**Rysunek 3.** Pionowy rozkład przestrzenny osadów dennych w głównym zbiorniku wodnym w Zesławicach

**Figure 3.** Vertical distribution of bottom sediments in the main water reservoirs at Zesławice

Porównując rozmieszczenie osadów w zbiorniku głównym przed odmuleniem i po odmuleniu należy wziąć pod uwagę nie tylko liczbę lat eksploatacji, po upływie których ocenia się zmianę dystrybucji rumowiska, lecz również zmianę stopienia zamulenia. W 1989 roku, tj. w dwudziestym trzecim roku eksploatacji, stopień zamulenia zbiornika wynosił ponad 61%. Natomiast zamulenie analizowanej części wlotowej zbiornika, o głębokościach względnych od 0,76 do 1,0 wynosiło 25%. Natomiast po odmuleniu zbiornika w okresie od szesnastego do dwudziestego pierwszego roku eksploatacji tj. w latach

2005-2010 zostało odłożone od 15 do 22% rumowiska, przy czym stopień zamulenia zbiornika w tym okresie wzrósł z 33 % do niespełna 43%.

Po wybudowaniu zbiornika bocznego i skierowaniu do niego części przepływu wody i rumowiska zmianie ulegają warunki hydrauliczne w zbiorniku głównym, powodujące bardziej równomierne rozmieszczenie odkładów na całej długości zbiornika. W części wlotowej do zbiornika, w okresie od szesnastego do dwudziestego pierwszego roku eksploatacji po jego odmuleniu, zgromadzone zostało odpowiednio od 15 do 22% całkowitej objętości osadów rumowiska. Natomiast przed odmuleniem, w porównywalnym okresie 17-23 lat eksploatacji w tej części zbiornika zostało zgromadzone odpowiednio 24-25% całkowitej objętości osadów rumowiska. W części środkowej zbiornika, w której głębokości względne wynoszą od 0,41 do 0,76, zróżnicowanie rozmieszczenia osadów w rozpatrywanych okresach przed i po odmuleniu jest bardziej wyraźne. Przykładowo od głębokości względnej 0,0 do 0,53, co odpowiada warstwie zbiornika znajdującej się pomiędzy najniższą rzędną dna, wynoszącą 211,60 m n.p.m., a wydzieloną warstwą na poziomie 213,40 m n.p.m., zostało odłożone 33-34% rumowiska w okresie 1983-1989. Po odmuleniu zbiornika, po upływie 17-23 lat eksploatacji tj. w latach 2005-2010, w tej warstwie została zatrzymana znacznie większa część rumowiska – w 2005 roku zostało zdeponowane 51%, a w 2010 roku 44 % całkowitej objętości osadów.

Zarówno w okresie przed odmuleniem jak i pod odmuleniem, w części najgłębszej zbiornika głównego, odpowiadającej głębokościom względnym od 0,0 do 0,18 odkładane są małe objętości rumowiska, stanowiące 1-2% całkowitej objętości zgromadzonych osadów.

## **WNIOSKI**

Główny zbiornik wodny w Zesławicach charakteryzuje się wysoką intensywnością zamulania. Średni roczny stopień zamulenia zbiornika przed odmuleniem wynosił 3,0%, natomiast po odmuleniu jest równy 1,61%. Zmniejszenie intensywności zamulania nastąpiło w wyniku zmniejszenia dopływu wody i rumowiska w węźle wodnym po odmuleniu zbiornika głównego i wybudowaniu zbiornika bocznego.

Zmiana warunków przepływu wody i rumowiska przyczyniła się również zmianie rozmieszczenia rumowiska w zbiorniku głównym. W strefie zbiornika o średnich głębokościach względnych, mieszczących się w przedziale 0,41-0,65, odpowiadających środkowej części zbiornika, w której napelnienia wynoszą od 1,2 do 2,0 m, odkłada się średnio o 10-20% rumowiska więcej niż w okresie przed odmuleniem. Również w części wlotowej do zbiornika ilość odkładów rumowiska po kilkunastu latach eksploatacji po odmuleniu jest mniejsza niż w porównywalnym okresie przed odmuleniem.



Uzyskane wyniki analizy rozkładu pionowego osadów rumowiska w zbiorniku głównym w Zesławicach wskazują na bardziej równomierne rozmieszczenie odkładów na całej długości zbiornika w okresie po jego oddaniu i zmniejszeniu dopływu wody i rumowiska, spowodowanego skierowaniem części przepływu wody do zbiornika bocznego.

## BIBLIOGRAFIA

- Batua G. D., Jordaan M. J. Jr. 2000. *Silting and Desilting of Reservoirs*. A.A.Balkema. Rotterdam, Netherlands, 353.
- Borland W. M. 1970. *Reservoir Sedimentation, River Mechanics*. Water Resources publications, Chapter 29, 1-38.
- Borland W. M., Miller C. R. 1958. *Distribution of sediment in large reservoirs*. Jour. of Hydraulic Eng. Div. ASCE, 84, 1-18.
- Cristofano E. A. 1953. *Area-Increment Method for distributing sediment in a reservoir*. US Bureau of Reclamation, Albuquerque, New Mexico.
- Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A. 1982. *Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych*. PWRiL, Warszawa.
- Dendy F. E. 1974. *Sediment trap efficiency of small reservoirs*. Trans. Amer. Soc. Agric. Eng., 17, 5, 898–908.
- Dendy F. E. 1982. *Distribution of sediment deposits in small reservoirs*. Trans. Amer. Soc. Agric. Eng., 25, 1, 100–104.
- Dokumentacja techniczna jednostadiowa zbiornika retencyjnego*. Kraków 1984.
- Hobbs B. L. 1969. *Forecasting distribution of sediment deposits in large reservoirs*. Appendix I, ETL 1110-2-64, Department of the Army, Office of the Chief of Engineers, Washington, DC.
- Lara J. M. 1962. *Revision of the procedure to compute sediment distribution in large reservoirs*. US Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Michalec B. 2010. *Zastosowanie jednowymiarowego modelu numerycznego MORMO do obliczeń zmian rzędnych małego zbiornika wodnego*. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus 9 (4) 2010, 25–32.
- Michalec B., 2008. *Ocena intensywności procesu zamulania małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły*. Zesz. Nauk. UR Krak. 451, Rozprawy 328.
- Michalec B., Tarnawski T. 2006. *Analysis of sediment deposit distribution in water reservoir at Krempana*. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Vol. 9, Issue 4.
- Odmulenie zbiornika na rz. Dłubni*. Dokumentacja Jednostadiowa. Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego i Melioracji w Krakowie. 1989.
- Operat wodno-prawny na piętrzenie i retencjonowanie wody. Zbiornik wodny Zesławice na rzece Dłubni*. Archiwum Krakowskiego Związku Spółek Wodnych. Maszynopis. Kraków. 2003.
- Rooseboom A., Annandale G. W. 1983. *Reservoir sedimentation and stream power*. *Proceedings of the D.B. Simons symposium on Erosion and Sedimentation*, Colorado State University, 20 pp.
- Tarnawski M., Słowik-Opoka E. 2002. *Rozkład materiału dennego w zbiorniku w Zesławicach*. Zesz. Nauk. AR Krak. 393, 259-266.
- 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.

Dr hab. inż. Bogusław Michalec  
Mgr inż. Karol Pęczek  
Mgr inż. Bartosz Leksander  
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki  
Uniwersytet Rolniczy  
al. A.Mickiewicza 24/26  
30-059 Kraków,  
rmmichbo@cyf-kr.edu.pl  
barteklex@gmail.com

Recenzent: *Prof. dr hab. Antoni T.Miler*