

*Bogusław Michalec, Karol Pęczek, Mateusz Strutyński*

## **WSKAŹNIK DENUDACJI MECHANICZNEJ ZLEWNI MAŁEGO ZBIORNIKA WODNEGO**

### ***MECHANICAL DENUDATION COEFFICIENT IN CATCHMENT OF SMALL WATER RESERVOIR***

#### **Streszczenie**

Wieloletnie pomiary zamulania małego zbiornika wodnego, zamykającą zlewnię pokrytą glebami lessowymi, zezwoliły na określenie zmiany stopnia zamulenia w czasie eksploatacji. W pracy porównano archiwalne dane z pomiarów zamulania zbiornika wodnego w Zesławicach, wykonanych w okresie przed jego odmuleniem, z wynikami pomiarów wykonanych po odmuleniu i wybudowaniu bocznego zbiornika remontowego. Zbiorniki wodne w Zesławicach charakteryzują się wysoką intensywnością zamulania. Średni roczny stopień zamulenia zbiorników wynosi: 3,0% – zbiornik główny przed odmuleniem, 1,87% – zbiornik główny po odmuleniu i 1,0% – boczny zbiornik remontowy.

Dysponując objętością rumowiska zatrzymanego w zbiornikach, obliczono wskaźnik denudacji mechanicznej, określony przez Wiśniewskiego jako stosunek objętości rumowiska osadzonego w zbiorniku do powierzchni zlewni. Określona przybliżona wartość denudacji odpływowej, za pomocą tego wskaźnika, okazała się znacznie zróżnicowana w poszczególnych latach, w których wykonano pomiary zamulania. Wskaźnik denudacji mechanicznej obliczono dla okresów przed odmuleniem i po odmuleniu zbiornika głównego. Wyniki obliczeń transportu rumowiska unoszonego, określonego na podstawie pomiarów batometrycznych, stanowiły podstawowy materiał badawczy, na podstawie którego określono jednostkową denudację odpływową. Stwierdzono, że wartość wskaźnika denudacji mechanicznej, nie uwzględniającej ilości rumowiska unoszonego odpływającego ze zbiornika, jest około trzykrotnie niższa od jednostkowej denudacji odpływowej, wynoszącej  $91,7 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Jednostkowa denudacja odpływowa ze zlewni rzeki Dłubni określona na podstawie siedemnastoletniego ciągu danych hydrologicznych jest ponad dwukrotnie mniejsza od jednostkowej denudacji odpływowej określonej na podstawie obliczeń metodami Reniger-Dębskiego i Brańskiego.

**Słowa kluczowe:** mały zbiornik wodny, zamulanie, denudacja odpływowa

### Summary

*The many years' measurements of silting the small water reservoir, closing the catchment covered loesses soils, allowed on the change qualification of the silting degree during operation. In this work was compared the archival data from the measurements of silting the water reservoir in Zestawice, executed in the period before his desilting, with the results of measurements executed after desilting and building the side assistant reservoir. Water reservoirs in Zestawice are characterize the high intensity of silting. The Annual mean of silting ratio of reservoirs carries out: 3,0 % – the main reservoir before desilting, 1,87 % – the main reservoir after desilting and 1,00 % – the side assistant reservoir.*

*Disposing the volume of sediment stopped in reservoirs the coefficient of the mechanical denudation was counted, definite by Wiśniewski as the relation of the volume of sediment deposited in the reservoir to the catchment area. The definite approximate value of the denudation, for the help of this coefficient, proved considerably diverse in the individual years in which the measurements of silting were made. The mechanical denudation coefficient was counted for periods before and after desilting of the main reservoir. The results of the calculations of the transportation of suspended sediment, definite on the basis of bathometric measurements establish the basic research material, on the basis which the unitary denudation was qualified. Affirm, that the value of the mechanical denudation coefficient, the not taking into account quantity of suspended sediment flowing out from the reservoir, is about three the times lower than the unitary denudation, carrying out  $91,7 t \cdot km^2 \cdot rok^{-1}$ . Unitary denudation from the Dłubnia catchment definite on the basis of the seventeen - year - old sequence of the hydrological data is above twice smaller than the unitary denudation definite on the basis of calculations methods Reniger-Dębski and Brański.*

**Key words:** *small water reservoir, silting, denudation*

### WSTĘP

Procesy erozji w zlewniach są głównym źródłem transportowanej zawiesiny mineralnej w rzekach. Produkty erozji, w postaci drobnoziarnistego rumowiska unoszonego, przyczyniają się zmniejszaniu pojemności użytecznej zbiorników wodnych. Zbiorniki wodne, przegradzając koryto rzeczne i dolinę, przechwytyją całkowicie rumowisko wleczone wraz ze znaczną częścią rumowiska unoszonego, zmniejszając tym samym ilość materiału klastycznego dostarczanego do zbiorników zlokalizowanych na ciekach wyższego rzędu. Projektując zbiorniki wodne należy uwzględnić natężenie transportu rumowiska rzecznoego. Natężenie procesów erozyjnych może zostać określone poprzez ustalenie wielkości erozji wyrażonej poprzez wartość średniej z wielolecia rocznej masy wyerodowanej gleby z jednostki powierzchni. Wielkość tą może ustalić wykorzystując uniwersalne równanie strat glebowych (Universal Soil Loss Equation – USLE) opracowane w USA przez Wischmeiera i Smitha [1965, 1978]. Natężenie procesów erozyjnych określa się na podstawie wielkości denudacji odpływowej najczęściej posługując się metodą Reniger-Dębskiego [Reniger 1959, Dębski 1959]

czy też metodą Brańskiego [1968]. Bolesta [1966] stwierdza, iż stosunek objętości rumowiska osadzonego w zbiorniku do powierzchni zlewni określa przybliżony wskaźnik erozji dorzecza. Ustalony w ten sposób wskaźnik denudacji odpływowej, określony przez Wiśniewskiego [1967] jako „wskaźnik denudacji mechanicznej”, nie uwzględnia ilości rumowiska unoszonego odpływającego ze zbiornika. Pomimo tego Wiśniewski [1975] podkreśla, że pomiary zamulania zbiorników są najdokładniejszą metodą określenia ilości rumowiska odpływającego ze zlewni.

Wyznaczenie wskaźnika denudacji mechanicznej wymaga określenia objętości rumowiska zatrzymanego w zbiorniku wodnym. Objętość osadów rumowiska w zbiorniku wodnym można określić z mapy warstwicznej czaszy zbiornika poprzez planimetrywanie warstwicy lub z przekrojów poprzecznych metodą analogiczną do sposobu obliczenia kubatury robót ziemnych [Wiśniewski 1975]. Inną metodą określenia objętości zamulonej zbiornika, krytycznie ocenioną przez Brańskiego [1975], jest określenie objętości namulów na podstawie dwóch kolejnych pomiarów objętości zbiornika. Wyczerpującą analizę metod obliczenia objętości osadów rumowiska można znaleźć w pracy Lipki i in. [2006].

W pracy przedstawiono wyniki wieloletnich pomiarów zamulania zbiorników głównego i remontowego w Zesławicach oraz określono wskaźnik denudacji mechanicznej. Celem pracy jest ocena możliwości zastosowania zaproponowanego przez Wiśniewskiego wskaźnika denudacji mechanicznej w ocenie denudacji odpływowej. W tym celu obliczony wskaźnik denudacji mechanicznej zostanie porównany z wartością jednostkowej denudacji odpływowej, określonej na podstawie obliczonego transportu rumowiska i określonej metodą Reniger-Dębskiego i metodą Brańskiego. Transport rumowiska określono dwoma metodami, tj. na podstawie wyników pomiarów przepływu wody i koncentracji rumowiska oraz metodą DR-USLE.

### **CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW BADAŃ**

Zbiornik główny w Zesławicach został oddany do eksploatacji w 1966 roku. Zapora zbiornika zlokalizowana jest w km 8+700 rzeki Dłubni i zamyka zlewnię o powierzchni 218,1 km<sup>2</sup>. W 1983 roku, po siedemnastu latach eksploatacji, stwierdzono, że zamulenie wynosi ponad 50%. Zanim przystąpiono do odmulenia zbiornika głównego wykonano zbiornik remontowy. Do budowy zbiornika remontowego przystąpiono w 1986 roku, w 1987 roku został on oddany do eksploatacji. Zadaniem zbiornika remontowego było przejęcie funkcji zbiornika głównego podczas gdy ten był odmulany. Odmulenie zbiornika głównego wykonano w 1989 roku.

Pojemność zbiorników głównego i remontowego wynosi odpowiednio 228 tys. m<sup>3</sup> i 198 tys. m<sup>3</sup>. Powierzchnia zalewu przy normalnym poziomie piętrzenia wody zbiornika głównego wynosi 9,5 ha, a zbiornika remontowego 11,3 ha.

Szczegółową charakterystykę zlewni i zbiorników wodnych w Zesławicach przedstawiono między innymi w pracach Bednarczyka [1994], Michalca [2001 i 2008] Michalca i Pęczka [2008].

## **METODYKA BADAŃ**

Wskaźnik denudacji mechanicznej określono zarówno na podstawie danych archiwalnych z pomiarów zbiornika głównego w Zesławicach wykonanych w okresie 1969–1983 przez pracowników ówczesnego Zakładu Budownictwa Wodnego Akademii Rolniczej w Krakowie. Pomiary zamulania zbiorników głównego i remontowego wykonano w latach 2005–2008. Pomiary głębokości wykonano sondą drażkową z łodzi w przekrojach poprzecznych oraz metodą punktów rozproszonych z geodezyjnym dowiązaniem do lokalnej osnowy geodezyjnej. Ze względu na odkłady rumowiska w zbiorniku głównym, tworzące wyspę, w pomiarach wykorzystano tachimetr elektroniczny typu Topcon GTS 226. Za pomocą tachimetru stworzono również osnowę geodezyjną wokół zbiorników i wyznaczono przekroje poprzeczne. Wyniki pomiarów głębokości w zbiornikach zostały naniesione na powykonawcze przekroje poprzeczne. Następnie określono powierzchnie odkładów rumowiska w przekrojach i obliczono objętość odkładów w zbiornikach.

Wskaźnik denudacji mechanicznej określono na podstawie wyników pomiarów zamulania zbiornika głównego w Zesławicach przed odmuleniem, tj. dla okresu 1968–1983. Po odmuleniu zbiornika głównego, w wyniku skierowania części dopływu wody i rumowiska do zbiornika remontowego, obliczając wskaźnik denudacji mechanicznej uwzględniono sumę masy rumowiska zatrzymanego zarówno w zbiorniku głównym, jak i w zbiorniku remontowym. W celu czytelniejszego przedstawienia wyników badań zbiornik główny w Zesławicach oznaczono jako zbiornik wodny Zesławice-I, a zbiornik remontowy jako Zesławice-II.

## **WYNIKI**

Określoną objętość odkładów rumowiska zatrzymanego w badanych zbiornikach wodnych przedstawiono w tabeli 1. Zamulanie jest zasadniczym czynnikiem ograniczającym wykorzystanie gospodarcze zbiorników. Według Hartunga [1959] stopień zamulenia wynoszący 80% jest wartością, powyżej której zbiornik wodny nie spełnia swojej funkcji. Stopień zamulenia zbiornika głównego Zesławice-I przed odmuleniem w siedemnastym roku eksploatacji wynosił ponad 50%. Po odmuleniu, ze względu na rozdział wody do zbiorników głównego i remontowego, stopień zamulenia zbiornika Zesławice-I po szesnastu latach eksploatacji wynosił 33%.

**Tabela 1.** Objętość osadów rumowiska i stopień zamulenia zbiorników w Żesławicach w poszczególnych latach eksploatacji  
**Table 1.** Volume of deposited sediment and silting degree of the reservoirs at Żesławice during each year of their operation

Zbiornik Reservoir	Rok Year	Lata eksploatacji Years of operation	Objętość osadów rumowiska Volume of deposited sediment $V_z$ [m <sup>3</sup> ]	Stopień zamulenia Siltting ratio $S_z$ [%]	Średni roczny stopień zamulenia Annual mean of siltting ratio $\bar{S}_z$ [%]
Żesławice-I	1968	2	26 968	11,8	5,92
	1969	3	70 425	30,9	10,30
	1970	4	75 780	33,2	8,31
	1971	5	76 251	33,4	6,69
	1974	8	86 192	37,8	4,73
	1983	17	116 091	50,9	3,00
Żesławice-I	2005	16	75 315	33,0	2,06
	2006	17	77 232	33,9	1,99
	2008	19	80 861	35,5	1,87
Żesławice-II	2005	18	37 175	18,8	1,04
	2006	19	38 290	19,3	1,02
	2008	21	41 492	21,0	1,00

Na podstawie analiz laboratoryjnych pobranych prób osadów dennych określono gęstość objętościową rumowiska zatrzymanego w zbiorniku głównym. Oznaczenia wykonano dla każdej próby pobranej w stanie nienaruszonym. Próby pobierano w części przyzaporowej, środkowej i wlotowej do zbiornika. W każdym z punktów pobierano próbę z warstwy powierzchniowej i warstwy około 0,4 m pod powierzchnią osadów. Średnia gęstość objętościowa ( $\rho_o$ ) rumowiska dostarczonego do zbiornika Żesławicach, określona z sześciu pobranych prób, wynosi 1,025 t·m<sup>-3</sup>.

Średnia gęstość objętościowa rumowiska posłużyła ustaleniu masy rumowiska odłożonego w zbiorniku [Michalec 2001]. Na podstawie obliczonej masy osadów rumowiska określono wskaźnik denudacji mechanicznej (tab. 2).

Obliczony średni roczny transport rumowiska dopływającego do zbiornika głównego w Żesławicach (Żesławice-I) w okresie 1966-1983 wynosił 19980 t·rok<sup>-1</sup> [Michalec 2008]. Wskaźnik jednostkowej denudacji odpływowej, określony na podstawie obliczonego transportu rumowiska unoszonego i powierzchni zlewni, wynosi 91,7 t·km<sup>-2</sup>·rok<sup>-1</sup>. Według metody DR-USLE średnia roczna masa rumowiska przepływającego w rzece Dłubni przez profil Żesławice wynosi 15 077 t rok<sup>-1</sup> [Michalec 2001], a wskaźnik jednostkowej denudacji mechanicznej wynosi od 110,4 do 32,1 t·km<sup>-2</sup>·rok<sup>-1</sup>. Wartość jednostkowej denudacji mechanicznej maleje w kolejnych latach eksploatacji zbiornika. Denudacja w zlew-

ni rzeki Dłubni, określona metodą Reniger-Dębskiego i według mapy rozkładu wskaźników denudacji odpływowej Brańskiego, wynosi odpowiednio 48 684 i 43 620 t·rok<sup>-1</sup> [Michalec 2001]. Uwzględniając powierzchnię zlewni rzeki Dłubni obliczona denudacja jednostkowa wynosi 223,3 t·km<sup>-2</sup>·rok<sup>-1</sup> – według metody Reniger-Dębskiego i 200,1 t·km<sup>-2</sup>·rok<sup>-1</sup> - według metody Brańskiego.

**Tabela 2.** Wskaźnik denudacji mechanicznej zlewni badanych zbiorników wyznaczony w poszczególnych latach ich eksploatacji

**Table 2.** Mechanical denudation coefficient referring to catchments of reservoirs investigated; each indicator was determined with regard to each individual year of the reservoirs' operation period

Zbiornik Reservoir	Rok eksploatacji Year of operation	Rok Year	Masa odłożonego rumowiska Mass of deposited sediment [t]	Wskaźnik denudacji mechanicznej Mechanical denudation coefficient [t·km <sup>-2</sup> ·rok <sup>-1</sup> ]
Zesławice-I	2	1968	27 642	63,4
	3	1969	72 186	110,4
	4	1970	77 675	89,0
	5	1971	78 157	71,7
	8	1974	88 347	50,7
	17	1983	118 993	32,1
Zesławice-I	16	2005	77 198	22,1*
	17	2006	79 163	21,4*
	19	2008	82 883	20,0*
Zesławice-II	18	2005	38 104	9,7*
	19	2006	39 247	9,5*
	21	2008	42 529	9,3*

\* – wskaźnik denudacji mechanicznej nie uwzględniający masy rumowiska zatrzymanej w drugim zbiorniku

\* – mechanical denudation indicator not taking into account the mass of sediment deposited in second reservoir

Ze względu na nierównoczesne włączenia do eksploatacji zbiorników Zesławice-I i Zesławice-II po odmuleniu zbiornika Zesławice-I, wskaźnik denudacji mechanicznej zlewni rzeki Dłubni do profilu Zesławice obliczono po dziewiętnastu latach eksploatacji, jako sumę wskaźników denudacji mechanicznej obu zbiorników. Tak obliczony wskaźnik wynosi 29,5 t·km<sup>-2</sup>·rok<sup>-1</sup> i jest niższy od wskaźnika denudacji mechanicznej obliczonej dla zbiornika Zesławice-I po siedemnastu latach eksploatacji.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Obliczony stopień zamulenia zbiornika głównego w Zesławicach dla okresu przed odmuleniem wskazuje na intensywny przebieg redukcji pojemności. Po, siedemnastu latach eksploatacji stopień zamulenia tego zbiornika wynosił ponad 50%. Po odmuleniu intensywność zamulania zbiornika głównego uległa zmniejszeniu. W siedemnastym eksploatacji stopień zamulenia wynosi 33%, a jego przyrost w kolejnych latach jest niewielki. Spowodował to rozdział wody dopływającej do zbiornika głównego i zbiornika remontowego. Część dopływającego rumowiska zostaje również odkładana w zbiorniku remontowym. Łączna ilość rumowiska zatrzymanego w obu zbiornikach w dziewiętnastym roku eksploatacji każdego z nich, tj. w Zesławice-I w 2008 roku i w zbiorniku Zesławice-II w 2006 roku, wynosi 122 130 t i jest większa od ilości rumowiska zatrzymanej w zbiorniku Zesławice-I w siedemnastym roku eksploatacji przed odmuleniem.

Średni roczny stopień zamulenia zbiorników, obliczony na podstawie wyników ostatniego pomiaru zamulania, wynosi: 3,0% – zbiornik główny przed odmuleniem, 1,87% – zbiornik główny po odmuleniu i 1,00% – boczny zbiornik remontowy. Według kryterium Hartunga [1959] intensywność zamulania zbiornika głównego przed odmuleniem jest typowa dla małych zbiorników wodnych, a po odmuleniu intensywność zamulania zbiornika głównego i remontowego jest zbliżona do intensywności zamulania zbiorników średniej wielkości.

Wartość wskaźnika denudacji mechanicznej, nie uwzględniającej ilości rumowiska unoszonego odpływającego ze zbiornika, jest mniejsza do jednostkowej denudacji odpływowej, wynoszącej  $91,7 \text{ t} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{rok}^{-1}$ . Badane małe zbiorniki wodne charakteryzują się szybkim tempem zamulania. Dla tego też można stwierdzić, że denudacja w zlewni określona na podstawie wyników pomiarów zamulenia małych zbiorników obciążona jest znacznym błędem i nie powinna być traktowana nawet jako wartość szacunkowa. Jednostkowa denudacja mechaniczna, określona po 17 latach eksploatacji zbiornika głównego przed odmuleniem jest ok. trzykrotnie niższa od jednostkowej denudacji odpływowej określonej na podstawie pomiarów batymetrycznych. Uzyskana wartość jednostkowej denudacji mechanicznej zależy od pomierzonej objętości odkładów rumowiska w zbiorniku wodnym. W przypadku badanych małych zbiorników wodnych w Zesławicach jednostkowa denudacja mechaniczna, określona na podstawie pomiarów po 2–4 latach eksploatacji zbiornika głównego przed odmuleniem jest zbliżona do jednostkowej denudacji odpływowej określonej na podstawie pomiarów batymetrycznych. Jednakże w kolejnych latach intensywność zatrzymywania rumowiska zatrzymywanego w zbiornikach ulega zmniejszeniu, coraz większa ilość rumowiska przepływające przez zbiorniki odpływa ze zbiorników, zatem wartość jednostkowej denudacji mechanicznej zmniejsza się.

Jednostkowa denudacja odpływowa ze zlewni rzeki Dłubni określona na podstawie siedemnastoletniego ciągu danych hydrologicznych jest ponad dwukrotnie mniejsza od jednostkowej denudacji odpływowej określonej na podstawie obliczeń metodami Reniger-Dębskiego i Brańskiego.

## BIBLIOGRAFIA

- Bednarczyk T. *Określenie ilości unoszonego rumowiska w przekroju małego zbiornika wodnego w Zesławicach*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, seria 291, Inżynieria Środowiska, 15, 1994.
- Bolesta W. *Zamulanie zbiorników zaporowych i sposoby przeciwdziałania*. Gospodarka Wodna, nr 7, Warszawa 1966.
- Brański J. *Zmącenie wody i transport rumowiska unoszonego w rzekach polskich*. Prace PIHM, z. 95, Warszawa 1968.
- Brański J. *Ocena denudacji dorzecza Wisły na podstawie wyników pomiarów rumowiska unoszonego*. Prace PIHM Nr 6, Warszawa 1975.
- Dębski K. *Próba oszacowania denudacji na obszarze Polski*. Prace i Studia KGW PAN, II, cz. I, Warszawa 1959.
- Hartung F. *Ursache und Verhuetung der Staumraumverlandung bei Talsperren*. Wasserwirtschaft, 1, 1959.
- Lipka K., Godek K., Siejka Z. *Technologia pomiaru i obliczenia objętości warstwy osadów dennych w zbiorniku wodnym Zalew Nowohucki*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, nr 431, z. 22, 2006.
- Michalec B. *Ocena stopnia zamulenia małych zbiorników karpaccich na tle natężenia transportu rumowiska unoszonego i wlezonego*. Rozprawa doktorska, maszynopis. Promotor rozprawy: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Bednarczyk, Akademia Rolnicza w Krakowie, 2001.
- Michalec B. *Sezonowe zróżnicowanie zawiesiny mineralnej w rzece Dłubni w strefie ujęcia wody*. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych nr 34/35, 2008.
- Michalec B., Pęczek K. *Określenie stopnia zamulenia zbiorników wodnych w Zesławicach*. Przegąd Naukowy, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, Rocznik XVII, z.2 (40), Warszawa 2008.
- Reniger A. *Zagadnienia erozji gleb w Polsce*. Prace i Studia KGW PAN, II, cz. I, Warszawa 1959.
- Wischmeier H. W., Smith D. D. *Predicting rainfall erosion losses-aquide from cropland east of the Rocky Mountains*. USDA, Agriculture Handbook, No. 282, 1965.
- Wischmeier H. W., Smith D. D. *Predicting rainfall erosion losses-aquide to conservation planning*. USDA-ARS, Agriculture Handbook, No. 573, 1978.
- Wiśniewski B. *Zamulenia zbiornika wodnego w Myczkowcach po 5 latach eksploatacji*. Gospodarka wodna. Rok XXVII, z 7, 1967.
- Wiśniewski B. *Dokładność pomiarów zamulania zbiorników wodnych*. Gosp. Wod., nr 3, Warszawa 1975.

Dr inż. Bogusław Michalec <sup>1)</sup>  
Mgr inż. Mateusz Strutyński <sup>2)</sup>  
Katedra Inżynierii Wodnej  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
30-059 Kraków  
Al. A.Mickiewicza 24/28  
tel. (0-48-12) 633-53-42,  
e-mail <sup>1)</sup>: rmmichbo@cyf-kr.edu.pl  
e-mail <sup>2)</sup>: lucek\_111@poczta.onet.pl  
mgr inż. Karol Pęczek  
FWK-Air Sp.z.o.o.

Recenzent: Prof. dr hab. Antoni T. Miler