

**Bogusław Michalec, Marek Tarnawski, Anna Kupiec**

## **PROGNOZA ZAMULANIA MAŁEGO ZBIORNIKA WODNEGO**

### **Streszczenie**

Opracowano prognozę zamulania małego zbiornika wodnego znajdującego się na cieku nieobjętym obserwacjami hydrologicznymi. Brak danych o wielkości przepływów i koncentracji rumowiska unoszonego oraz wielkości transportu rumowiska wleczonego, skłania do zastosowania metod pośrednich. Umożliwiają one określenie ilości rumowiska dopływającego do zbiornika.

Badaniami wielkości zamulania objęto zbiornik w Narożnikach, znajdujący się na potoku Dęba. W obliczeniach dostawy rumowiska do zbiornika zastosowano metody Reniger-Dębskiego, Brańskiego i DR-USLE. Przeprowadzono badania terenowe w celu określenia sposobu zagospodarowania zlewni badanego zbiornika. Określono rodzaj gruntu i jego skład z obszarów użytkowanych rolniczo i z terenów leśnych. Wyniki prac terenowych umożliwiły wyznaczenie parametrów równania strat glebowych, stanowiącego podstawę obliczeń metodą DR-USLE. Obliczony stopień zamulania, na podstawie pomiarów wielkości zamulania zbiornika, wynosi 0,58%. Obliczono wzorem Gončarova zamulanie zbiornika w kolejnych latach eksploatacji. Wyniki prognozy wielkości zamulania po 4 latach eksploatacji porównano z wynikami pomiarów. Najwyższą zgodność wyników prognozy zamulania opracowanej na podstawie wyników pomiarów uzyskano z wynikami prognozy, w której średni roczny transport rumowiska obliczono metodą DR-USLE. Stwierdzono, że wyłącznie zbiornika z eksploatacji, w wyniku zamulania stanowiącego 80% jego pojemności pierwotnej, nastąpi po ponad 1100 latach.

**Słowa kluczowe:** mały zbiornik wodny, zamulanie, prognoza zamulania

## WSTĘP

W ramach „Programu małej retencji województwa małopolskiego” przewiduje się wstępnie budowę 143 małych zbiorników wodnych o łącznej pojemności około 72 mln m<sup>3</sup>. Budowa małych zbiorników wodnych ma na celu złagodzenia deficytu wody w rejonie dorzecza górnej Wisły. Program ten znalazł poparcie rządu Polski w konieczności podjęcia starań mających na celu złagodzenie deficytu wody, w „Porozumieniu” zawartym w dniu 21 grudnia 1995 roku między Ministrem Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej a Ministrem Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa. W „Porozumieniu” przyjmuje się, że małe zbiorniki wodne charakteryzuje pojemność całkowita nieprzekraczająca 5 mln m<sup>3</sup>.

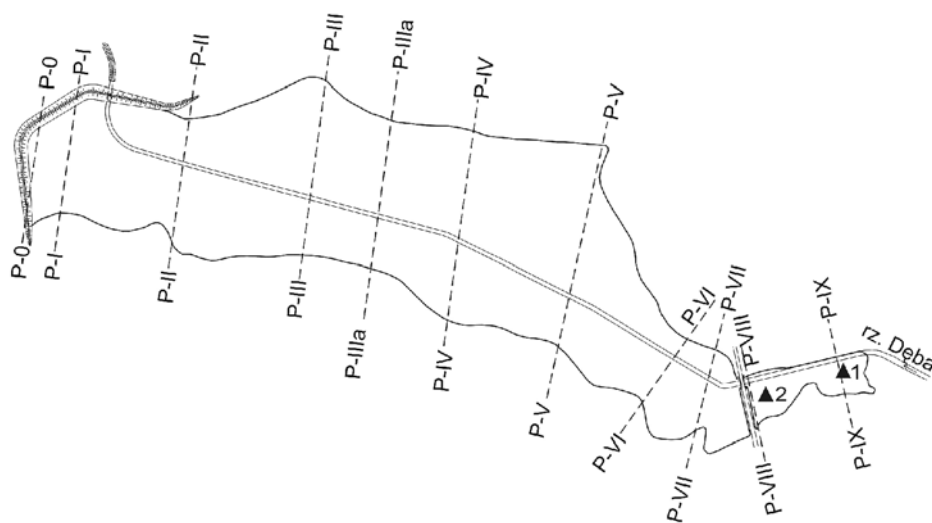
Zamulenie zbiornika, wynoszące zgodnie z kryterium Hartunga 80% jego pojemności pierwotnej, powoduje wyłączenie zbiornika z eksploatacji [Batuca, Jordaan 2000]. Jak podaje Łajczak [1995], określenie tzw. długowieczności zbiornika, czy też „żywności” zbiornika, wymaga określenia ilości rumowiska dopływającego do zbiornika. Dysponując danymi o wielkości transportu rumowiska rzeczno, można opracować prognozę zamulania projektowanego zbiornika. Umożliwi ona zaplanowanie prac renowacyjnych polegających m.in. na odmuleniu zbiornika, zapewniające racjonalną eksploatację obiektu. Małe zbiorniki wodne lokalizuje się najczęściej na ciekach wodnych trzeciego lub wyższego rzędu, które w większości nie posiadają obserwacji hydrologicznych. Brak danych dotyczących wielkości przepływów, koncentracji rumowiska unoszonego, wielkości transportu rumowiska wleczzonego, skłania do zastosowania metod pośrednich, służących wyznaczeniu wielkości dostawy rumowiska do zbiornika. W pracy przedstawiono wyniki prognozy zamulania małego zbiornika wodnego znajdującego się na cieku niekontrolowanym hydrologicznie. Wytypowano zbiornik w Narożnikach o pojemności 283,8 tys. m<sup>3</sup>. Ilość rumowiska dopływającego do zbiornika obliczono według metod Reniger-Dębskiego, Brańskiego i DR-USLE. Zgodnie z wytycznymi inżynierskimi z zakresu prognozowania zamulania [Wiśniewski, Kutrowski 1973] obliczono ilość rumowiska zatrzymanego w zbiorniku, w kolejnych latach eksploatacji. Uzyskane wyniki prognozy zamulania porównano z wynikami pomiarów zamulania. Analiza porównawcza wyników umożliwi ocenę możliwości zastosowania metod Reniger-Dębskiego, Brańskiego i DR-USLE w prognozowaniu zamulania zbiornika w Narożnikach.

## CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

Zbiornik wodny w Narożnikach zlokalizowany jest na potoku Dęba. Miejscowość Narożniki należy do gminy Radgoszcz w powiecie Dąbrowskim. Powierzchnia zlewni do zapory zbiornika wynosi 25 km<sup>2</sup>. Zlewnia położona jest na obszarze Płaskowyżu Tarnowskiego stanowiącego część Kotliny Sandomierskiej. Utwory geologiczne, budujące ten rejon zapadliska przedkarpackiego, to miocenijskie iły serii krakowieckich, zwięzłych i częściowo łupkowatych o znacznej miąższości, sięgającej nawet kilkaset metrów [Dynowska, Maciejewski 1991]. Na tych utworach wykształciły się gleby łatwo przepuszczalne, stanowiące gleby bielcowe i brunatne oraz średnio przepuszczalne brunatne i płowe mady lub rędziny.

Zlewnia potoku nie jest silnie zagospodarowana. Znaczną część zlewni (50%) pokrywają tereny zalesione, grunty użytkowane rolniczo zajmują ok. 35% powierzchni zlewni, a pozostałą powierzchnie, tj. ok. 15% zajmują użytki zielone i tereny zabudowane.

Zbiornik w Narożnikach (rys. 1) oddano do eksploatacji w 2001 roku. Pojemność zbiornika wynosi 283,8 tys. m<sup>3</sup>, przy zachowaniu normalnego poziomu piętrzenia.



**Rysunek 1.** Zbiornik w Narożnikach z zaznaczonymi przekrojami poprzecznymi (I-IX) i miejscami poboru prób osadów dennych (1-2)  
**Figure 1.** Reservoir at Narożniki with marked cross sections (I-IX) and three sites of bed sediment sampling (1-2)

Zapora zbiornika, zaliczana do IV klasy budowli hydrotechnicznych, zlokalizowana jest w km 5+500 potoku Dęba. Długość zbiornika wynosi 1030 m, a średnia głębokość to 1,2 m. Powierzchni zalewu wynosi 24 ha. Regulacja odpływu ze zbiornika możliwa jest dzięki upustowi wieżowemu ze spustami dennymi. Przelew powierzchniowy stanowi wieża o formie sześciokąta foremnego o bokach długości 3,0 m z zaokrągloną koroną. Podstawowym celem zbiornika jest retencjonowanie wody, wyrównanie przepływów w celu regulacji stosunków wodnych i redukcowanie fali powodziowej. Dodatkowo zbiornik pełni funkcję rekreacyjną.

### METODYKA BADAŃ

Obliczenie ilości odkładów rumowiska w zbiorniku wodnym według wzoru Gončarova (1) wymaga określenia objętości odkładów po pierwszym roku eksploatacji, oznaczonej symbolem  $R_1$  [Wiśniewski, Kutrowski 1973].

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

gdzie :

$Z_t$  – objętość odkładów [ $m^3$ ] po upływie „ $t$ ” lat,

$V_p$  – początkowa pojemność zbiornika [ $m^3$ ],

$R_1$  – objętość odkładów po pierwszym roku eksploatacji [ $m^3$ ],

$t$  – lata eksploatacji.

Objętość tę można określić na podstawie pomiarów. W przypadku braku danych pomiarowych, jak również w przypadku projektowania zbiornika wodnego, objętość odkładów po pierwszym roku eksploatacji ( $R_1$ ) oblicza się jako iloczyn zdolności zbiornika do trwałego zatrzymania rumowiska ( $\beta$ ) i średniej rocznej objętości rumowiska dopływającego do zbiornika. Zgodnie z zaleceniami podanymi w wyciecznych instruktażowych z zakresu prognozowania zamulenia [Wiśniewski, Kutrowski 1973] zdolność akumulacyjną zbiornika ( $\beta$ ) zbiornika wodnego w Narożnikach należy określić z nomogramu Łopatina. Jak wykazały badania [Bednarczyk, Michalec 2002] parametr  $\beta$  wyznaczony z nomogramu Łopatina w przypadku małych zbiorników wodnych jest znacznie niższy od wartości ustalonej na podstawie pomiarów i nomogramów Brune’a, Brune’a i Allena, Browna i Drozda. W

tym celu określono zdolność akumulacyjną zbiornika z nomogramów opracowanych przez Brune'a, Brune'a i Allena, Browna i Drozda [Batuca, Jordaan 2000] i porównano ją z parametrem  $\beta$  wyznaczonym z nomogramu Łopatina. Wyznaczenie zdolności zbiornika do trwałego zatrzymania rumowiska z nomogramów Łopatina, Brune'a, Brune'a i Allena, Browna i Drozda wymaga obliczenia współczynnika pojemności zbiornika. Współczynnik ten określa czas zatrzymywania wody w zbiorniku i jest obliczany jako iloraz pojemności zbiornika i średniej rocznej objętości dopływu wody do zbiornika. Średni roczny dopływ wody do zbiorników na ciekach niekontrolowanych hydrologicznie obliczono według wzoru Iszkowskiego w modyfikacji Byczkowskiego.

Obliczono ilość rumowiska dopływającego ze zlewni potoku Dęba metodami Reniger-Dębskiego i Brańskiego. Pierwsza służąca określeniu natężenia procesów erozyjnych w zlewni, oparta jest na dziewięciostopniowej skali zmywalności gleb zlewni rzek Polski opracowanej przez Reniger [1959] i ilościowych wskaźnikach denudacji odpowiadających poszczególnym klasom. Wskaźniki denudacji zostały ustalone przez Dębskiego [1959]. Metoda Brańskiego [1975], w przeciwieństwie do mapy intensywności denudacji na terenie Polski opracowanej przez Reniger na podstawie charakterystyki wielu czynników wpływających na erozję, mapa opracowana przez Brańskiego oparta została na wynikach pomiarów transportu materiału unoszonego. Na mapie wskaźników denudacji Brański wydzielił osiem typów zlewni w zależności od nasilenia procesów denudacji.

Średnią roczną masę rumowiska dopływającego do zbiornika w Narożnikach obliczono na podstawie metody DR-USLE, w której podstawę stanowi uniwersalne równanie strat glebowych. Ilość rumowiska wynoszonego ze zlewni, będąca częścią całkowitej masy wyerodowanej gleby w zlewni, określa wskaźnik dostawy (DR) [Roehl 1962; Wischmeier, Smith 1978]. Adaptację metody USLE przeprowadził Banasik i Madeyski [1989]. Ocenę przydatności metody DR-USLE do określenia średniej rocznej ilości rumowiska transportowanego w rzekach karpaccich przeprowadzili Bednarczyk, Madeyski i Michalec [2000].

We wrześniu 2005 roku wykonano pomiary wielkości zamulania zbiornika w Narożnikach. Pomiary głębokości dna zbiornika zostały wykonane z łodzi. Sondowanie wykonano metodą punktów rozproszonych. Uzyskane wyniki pomiarów naniesiono na poprzeczne przekroje powykonawcze. Obliczono pola powierzchni odkładów w poszczególnych przekrojach i uwzględniając odległości między przekrojami określono

objętość osadów w zbiorniku. W październiku pobrano dwie próby warstwy górnej osadów dennych. Próby pobrano w części cofkowej zbiornika (rys. 1). Na podstawie analizy laboratoryjnej określona została gęstość objętościową osadów dennych ( $\rho_o$ ).

## WYNIKI

Obliczona według metody DR-USLE średnia roczna ilość rumowiska dopływającego do zbiornika wynosi 720,3 t·rok<sup>-1</sup>. Wyniki obliczeń metodą DR-USLE zamieszczono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Wyniki obliczeń wg metody DR-USLE  
**Table 1.** Results of calculations according to DR-USLE method

Parametr równania / Equation parameter	Wartość / The value
Średnia roczna erozyjność deszczów i spływów – R [Je·rok <sup>-1</sup> ] <i>The rainfall factor, is the number of erosion-index units in a normal year's rain [Je · annum<sup>-1</sup>]</i>	73,9
Współczynnik podatności gleb na erozję – K [t · ha <sup>-1</sup> · Je <sup>-1</sup> ] <i>Soil erodibility factor [t · ha<sup>-1</sup> · Je<sup>-1</sup>]</i>	0,831
Współczynnik topograficzny – LS [-] <i>The slope-length factor– LS [-]</i>	0,190
Współczynnik rodzaju upraw i sposobu użytkowania – C [-] <i>The cropping-management factor – C [-]</i>	0,179
Współczynnik zabiegów przeciwdziałających erozji – P [-] <i>The erosion-control practice factor – P [-]</i>	0,750
Uzyskane wyniki obliczeń / The results of calculations	Wartość / The value
Średnia z wielolecia roczna masa erodowanej gleby z jednostki powierzchni – E [t · km <sup>-2</sup> · rok <sup>-1</sup> ] <i>Perennial average of the eroded soil mass from an area unit – E [t·ha<sup>-1</sup> · annum<sup>-1</sup>]</i>	156,0
Średnia z wielolecia roczna masa erodowanej gleby w całej zlewni [t·rok <sup>-1</sup> ] <i>Perennial average of the eroded soil mass from an water shed – E [t · annum<sup>-1</sup>]</i>	8899,7
Wskaźnik dopływu rumowiska – DR [-] <i>Delivery ratio – DR [-]</i>	0,185
Średnia roczna masa rumowiska odprowadzana przez rzekę ze zlewni [t·rok <sup>-1</sup> ] <i>Perennial average of the suspended load mass from an water shed – E [t · annum<sup>-1</sup>]</i>	720,3

Średnia roczna wartość wskaźników denudacji wg mapy Brańskiego określona dla zlewni zbiornika mieści się w przedziale 30–50 t · km<sup>-2</sup> · rok<sup>-1</sup>. Denudacja odpływowa ze zlewni o powierzchni 25 km<sup>2</sup> wynosi 750–1250 t · rok<sup>-1</sup>. W dalszych analizach przyjęto wartość średnią wynoszącą 1000 t · rok<sup>-1</sup>.

Ustalono, na podstawie mapy Reniger-Dębskiego, że 60% powierzchni zlewni zaliczane jest do VI klasy zmywalności, której odpowiada wskaźnik denudacji wynoszący 123 t · km<sup>-2</sup> · rok<sup>-1</sup>, a 40% powierzchni zlewni zaliczane jest do I klasy zmywalności o wskaźniku denudacji wynoszącym 1,32 t · km<sup>-2</sup> · rok<sup>-1</sup>. Obliczona, według metody Reniger-Dębskiego, ilość rumowiska odpływającego ze zlewni zbiornika w Narożnikach wynosi 1249,8 t · rok<sup>-1</sup>.

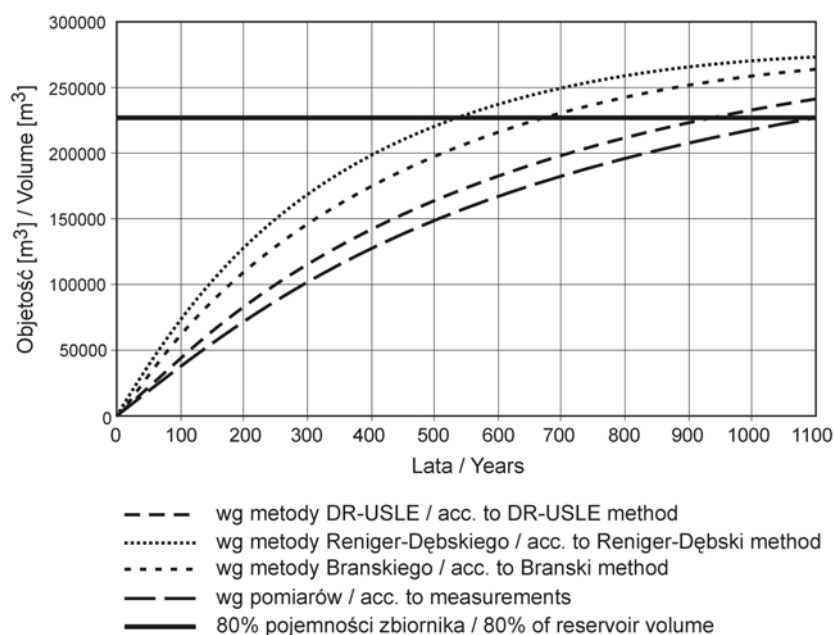
Na podstawie pobranych prób określono średnią gęstość objętościową osadów dennych  $\rho_o = 1,07 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ . Objętość odkładów po czterech latach eksploatacji zbiornika, ustalona na podstawie pomiarów terenowych, wynosi 1645,7 m<sup>3</sup>.

Średni roczny przepływ wynosi 0,155 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>. Obliczony współczynnik pojemności zbiornika w Narożnikach wynosi 5,81 %. Wyznaczona, zgodnie z wytycznymi instruktażowymi z zakresu prognozowania zamulenia [Wiśniewski, Kutrowski 1973], zdolność akumulacyjną zbiornika określona z nomogramu Łopatina wynosi 85%. Zdolność zbiornika do trwałego zatrzymania rumowiska określono z nomogramów Brune'a ( $\beta = 83 \%$ ), Brune'a i Allena ( $\beta = 10 \%$ ), Browna ( $\beta = 72 \%$ ) i Drozda ( $\beta = 80 \%$ ).

Objętość odkładów po pierwszym roku eksploatacji ( $R_1$ ) została obliczona z iloczynu zdolności zbiornika do trwałego zatrzymania rumowiska ( $\beta$  wg Łopatina) i średniej rocznej objętości rumowiska dopływającego do zbiornika. Średnią roczną objętość rumowiska dopływającego do zbiornika ustalono jako iloczyn masy rumowiska dopływającego do zbiornika i średniej gęstości objętościowej osadów dennych. Wartość  $R_1$  obliczona na podstawie średniej rocznej dostawy rumowiska ustalonej wg metody DR-USLE wynosi 486,4 m<sup>3</sup>, wg metody Reniger-Dębskiego wynosi 843,9 m<sup>3</sup>, a według metody Brańskiego – 675,2 m<sup>3</sup>.

Obliczono wielkość zamulania wzorem Gončarova (1), w którym objętość odkładów po pierwszym roku eksploatacji ( $R_1$ ) obliczono się jako iloczyn zdolności zbiornika do trwałego zatrzymania rumowiska ( $\beta$  według Łopatina) i średniej rocznej objętości rumowiska dopływającego do zbiornika ( $\rho_o$ ). Obliczenia wykonano w trzech wariantach. W każdym z wariantów objętość rumowiska dopływającego została

określona poszczególnymi metodami, tj. DR-USLE, Reniger-Dębskiego i Brańskiego. Na rysunku 2 przedstawiono graficznie wyniki prognozy zamulania opracowanej w trzech wariantach w porównaniu do wyniku prognozy opracowanej na podstawie pomiarów zamulania. Przekształcony wzór (1) umożliwił obliczenie wartości  $R_l$  na podstawie zamulenia  $Z_t$ , dla  $t = 4$  lata i wynoszącego  $1645,7 \text{ m}^3$ . Wartość  $R_l$  ustalona w ten sposób wynosi  $412,3 \text{ m}^3$ .



**Rysunek 2.** Prognozowana objętość osadów zawieszonych w zbiorniku wodnym w Narożnikach

**Figure 2.** Forecasted volume of suspended load deposits in water reservoir at Narożniki

Obliczono wielkość zamulania stanowiącą 80 % pojemności pierwotnej zbiornika oraz czas, po upływie którego objętość ta zostanie osiągnięta. Według prognozy zamulania, bazującej na wynikach pomiarów zbiornik w Narożnikach zostanie wyłączony z eksploatacji po 1107 latach pracy, a objętość osadów po tym okresie, stanowiąca 80% jego pojemności, będzie wynosić 227,04 tys.  $\text{m}^3$ .



## WNIOSKI

Średnia roczna ilość rumowiska dopływającego do zbiornika w Narożnikach wynosi odpowiednio  $750 \div 1250 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1}$  według metody Brańskiego,  $1249,8 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1}$  według metody Reniger-Dębskiego i  $720,3 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1}$  według metody DR-USLE.

Zdolność akumulacyjna rumowiska zbiornika w Narożnikach określona z nomogramu Łopatina wynosi 85%. Wyznaczona zdolność akumulacyjna według nomogramów Brune'a, Browna i Drozda jest zbliżona do wartości ustalonej z nomogramu Łopatina. Określona z nomogramu Brune'a i Allena zdolność akumulacyjna rumowiska zbiornika w Narożnikach wynosi 10%.

Ustalono na podstawie wyników pomiarów wielkości zamulania, że wyłącznie zbiornika z eksploatacji nastąpi po ponad 1100 latach. Zamulenie po upływie tego czasu będzie wynosić 227,04 tys. m<sup>3</sup>. Niska intensywność zamulania, gwarantująca tak długi okres tzw. żywotności zbiornika, spowodowana jest niewielkim natężeniem transportu rumowiska. Wynika to ze specyfiki lokalizacji zbiornika w górnej części zlewni o powierzchni zaledwie 25 km<sup>2</sup>, która w 50% pokryta jest lasami. Największą zgodność wyników prognozy zamulenia zbiornika w Narożnikach z wynikami pomiarów zamulenia zbiornika uzyskano, obliczając ilość rumowiska dopływającego do zbiornika metodą DR-USLE.

## BIBLIOGRAFIA

- Batuca G. D., Jordaan M. J. *Silting and Desilting of Reservoirs*. A.A.Balkema. Netherlands, Rotterdam 2000.
- Bednarczyk T., Madeyski M., Michalec B. *Ocena przydatności metody DR-USLE do określenia transportu rumowiska unoszonego*. Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu, Inżynieria Środowiska XI, 2000, nr 385.
- Bednarczyk T., Michalec B. *Reduction in sediment trap efficiency of small reservoirs during their operation*. Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej we Wrocławiu, seria Konferencje XXXVI, 2002, nr 438.
- 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.
- Dynowska I., Maciejewski M. *Dorzecze górnej Wisły*. Cześć I, PWN, Warszawa-Kraków 1991.
- Łajczak A. *Studium nad zamulaniem wybranych zbiorników zaporowych w dorzeczu Wisły*. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN Zeszyt 8, Oficyna Wydawnicza PWN, Warszawa 1995.
- Reniger A. *Zagadnienia erozji gleb w Polsce*. Prace i Studia KGW PAN, II, cz. I, Warszawa 1959.
- Roehl J. *Sediment source area, delivery rations and influencing morphological factors*. IAHS publ. 59, 1962.
- Wischmeier H. W., Smith D. D. *Predicting rainfall erosion losses-aquide to conservation planning*. USDA-ARS, Agriculture Handbook, 1978, no. 573.
- 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 inż. Bogusław Michalec, dr inż. Marek Tarnawski, Anna Kupiec  
Akademii Rolnicza w Krakowie  
Katedra Inżynierii Wodnej  
30-120 Kraków  
Al. A. Mickiewicza 24/28  
tel.: 0 12 633-53-42  
e-mail: rmmichbo@cyf-kr.edu.pl, rmtarnaw@cyf-kr.edu.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. Jerzy Ratomski*

*Bogusław Michalec, Marek Tarnawski, Anna Kupiec*

## **THE FORECAST OF SILTING FOR SMALL WATER RESERVOIR**

### **SUMMARY**

A forecast of silting was developed for a small water reservoir on a watercourse not included in hydrological observations. Lack of data on the flow volumes, sediment concentration and suspended load transport suggest the use of indirect methods. These make possible determining the amount of sediment amount supplied to the reservoir.

Studies on silting volume covered a reservoir at Narożniki situated on the Dęba stream. The methods of Reniger-Dębski, Brański and DR-USLE method were used in computations of sediment supply to the reservoir at Narożniki. Field studies were conducted to determine the way of management of the studied reservoir catchment. The kind of ground and its composition in the agriculturally used areas and forest sites were determined.

The results of field works made possible to fix the parameters of the universal soil loss equation, which is the basis for computations using DR-USLE method. The silting degree computed on the basis of the reservoir silting measurements is 0.58%. The reservoir silting in successive years of its operation was calculated using Gončarov formula. The results of silting forecast after four years of operation were compared with the results of measurements. The highest compatibility of results for silting forecast developed on the basis of measurements was obtained knowing the average annual sediment transport computed using DR-USLE method. It was found that excluding the reservoir from operation due to silting of the 80% of its initial capacity, will occur after over 1100 years.

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