

## ZASTOSOWANIE METODY CHURCHILLA W OKREŚLENIU ZDOLNOŚCI ZBIORNIKA WODNEGO W ZESŁAWICACH DO ZATRZYMYWANIA RUMOWISKA

Bogusław Michalec

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki obliczeń zdolności małego zbiornika wodnego do zatrzymywania rumowiska  $\beta$  w kolejnych latach eksploatacji. Celem pracy było określenie możliwości wyznaczenia zdolności zbiornika wodnego w Zesławicach na rzece Dłubni do zatrzymywania rumowiska za pomocą metody Churchilla. Zdolność ta została określona na podstawie kilku pomiarów zamulania przed odmuleniem i po odmuleniu zbiornika oraz obliczeń transportu rumowiska unoszonego. Pomiary zamulania zbiornika wodnego w Zesławicach wykonano sondą drążkową z łodzi w przekrojach poprzecznych oraz metodą punktów rozproszonych. Ilość rumowiska unoszonego dopływającego do tego zbiornika określono metodą bezpośrednią, zgodnie z instrukcją IMGW, oraz metodą DR-USLE.

Zdolność zbiornika w Zesławicach do zatrzymywania rumowiska w pierwszym roku eksploatacji przed odmuleniem i po nim ustalona na podstawie pomiarów wynosi odpowiednio 82 i 84% i jest bliska wartościom określonym według wzoru Churchilla, wynoszącym odpowiednio 84,4 i 88,8%. Wzór Churchilla może służyć wyznaczeniu w sposób przybliżony wartości początkowej  $\beta$  zbiornika wodnego w Zesławicach. Wartość rzeczywistej zdolności zbiornika do zatrzymywania rumowiska zmniejszyła się ponadtrzykrotnie w okresie przed odmuleniem i ponaddwukrotnie w okresie po odmuleniu. Natomiast zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska określona według metody Churchilla  $\beta_{Ch}$  ulegnie zmniejszeniu w porównywalnych okresach zaledwie o 20% i 5%. Zależności regresyjne w postaci  $\beta = 25,3\ln(SI) - 359,1$  i  $\beta = 56,4\ln(SI) - 915,2$  umożliwiają określenie zmiany zdolności zbiornika w Zesławicach do zatrzymania rumowiska w kolejnych latach eksploatacji przed i po odmuleniu.

Wprowadzony przez Churchilla wskaźnik sedymentacji może zostać wykorzystany do opracowania zależności umożliwiającej wyznaczenie zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymywania rumowiska.

**Słowa kluczowe:** mały zbiornik wodny, rumowisko, wskaźnik sedymentacji, zdolność zbiornika do zatrzymania rumowiska

## WSTĘP

Wiele spośród małych zbiorników wodnych nie może spełniać swoich funkcji określonych na etapie projektowania ze względu na znaczną redukcję ich pojemności. Dochodzi do tego w wyniku sedymentacji rumowiska dopływającego do zbiorników. Dominującą rolę w transporcie rzeczonym rumowiska odgrywa rumowisko unoszone, a rumowisko wleczone stanowi kilka procent całkowitego transportu [Mikulski 1961]. Według Brańskiego [1971] udział rumowiska wleczonego wynosi 8% tego transportu, z kolei według Wiśniewskiego [1972] jest to 8–12%. W zbiornikach wodnych zatrzymywane jest głównie rumowisko drobnoziarniste, o uziarnieniu mniejszym od 0,2 mm [Wiśniewski 1972, Okada i Baba 1982, Sloff 1991, Michalec 2008]. Rumowisko o większym uziarnieniu zatrzymywane jest w części wlotowej i w korycie cieku dopływającego do zbiornika, w strefie oddziaływania piętrzenia wody w zbiorniku.

Na proces zamulania zbiorników ma wpływ wielu czynników będących wynikiem złożonych relacji pomiędzy klimatem, parametrami zlewni, systemem fluwialnym i działalnością człowieka. Oddziałują one na procesy erozyjne w zlewni, na wielkość denudacji odpływowej rumowiska, a ostatecznie na ilość materiału mineralnego dopływającego do zbiornika wodnego. Proces zamulania zależy głównie od natężenia transportu rumowiska rzeczniego, przede wszystkim unoszonego, i zdolności zbiornika wodnego do zatrzymywania rumowiska.

Natężenie procesów erozyjnych może zostać określone poprzez ustalenie wielkości erozji wyrażonej za pomocą średniej z wielolecia rocznych mas gleby wyerodowanej z jednostki powierzchni. Do najczęściej stosowanych metod określenia transportu rumowiska unoszonego na podstawie ustalonej masy erodowanej gleby w zlewni oraz ilości materiału dostarczanego do koryta rzeczniego należy zaliczyć metody oparte na klasyfikacji intensywności denudacji – np. metodę Reniger-Dębskiego [Reniger 1959, Dębski 1959] i metody wykorzystujące uniwersalne równanie strat glebowych USLE (Universal Soil Loss Equation), opracowane przez Wischmeiera i Smitha [1965], spośród których warto wymienić metody DR-USLE, MUSLE i RUSLE [Michalec 2009]. Jak wykazały badania transportu rumowiska Michalca i Tarnawskiego [2004], stosując metodę DR-USLE, można uzyskać wyniki obliczeń transportu rumowiska zbliżone do wyników obliczeń według metody batometrycznej. Oceny możliwości zastosowania metody USLE do wyznaczenia ilości rumowiska unoszonego odpływającego z małych zlewni w Polsce dokonali między innymi Banasik i Górski [1992] oraz Banasik [1994], a próbę wykorzystania metody MUSLE podjęli Banasik i Madeyski [1990].

Zdolność zbiornika wodnego do zatrzymywania rumowiska unoszonego  $\beta$  (ang. *sediment trap efficiency*), nazywana również zdolnością retencyjną lub akumulacyjną materiału unoszonego, określa, jaka część dostarczonego do zbiornika materiału unoszonego ( $\Sigma V_R$ ) zostanie trwale zatrzymana w zbiorniku ( $V_Z$ ). Wartość  $\beta$  wyznacza się ze wzoru:

$$\beta = \frac{V_Z}{\Sigma V_R} \cdot 100 \quad (1)$$

W przypadku projektowanego zbiornika wodnego określenie objętości osadów rumowiska zatrzymanego w zbiorniku jest niemożliwe. Można ją wprawdzie oszaco-

wać na podstawie wyników pomiarów zamulania tzw. zbiornika analoga, ale uzyskany rezultat obarczony będzie znacznym błędem; niejednokrotnie jest to zresztą niemożliwie, ze względu na brak takiego zbiornika. Zdolność zbiornika wodnego do zatrzymywania rumowiska można wyznaczyć z nomogramów lub wzorów. W przypadku małych zbiorników wodnych stwarza to znaczne trudności, gdyż większość istniejących wzorów i nomogramów służących wyznaczeniu wspomnianej zdolności została opracowana w wyniku badań dużych i średnich zbiorników wodnych. Poprawne wyznaczenie wartości  $\beta$  małych zbiorników wodnych, zgodnie z wytycznymi instruktażowymi [Wiśniewski i Kutrowski 1973], jest niemożliwe [Michalec 2008]. Zdolność małych zbiorników wodnych do zatrzymywania rumowiska wyznacza się głównie z nomogramu Brune'a. Nomogram Brune'a został opracowany w rezultacie badań małych zbiorników wodnych w Stanach Zjednoczonych. Przy próbie zastosowania tego nomogramu do wyznaczenia zdolności do zatrzymania rumowiska małych zbiorników wodnych w Polsce południowej pojawiły się różnice między wynikiem otrzymanym z tego nomogramu a wartością rzeczywistą [Bednarczyk i Michalec 2002]. Zdolność zbiorników wodnych do zatrzymania rumowiska, przedstawiona w postaci nomogramów lub wzorów określana jest w zależności do wskaźników, którymi najczęściej są: współczynnik pojemności zbiornika (ang. *capacity-inflow ratio* – C/I) i współczynnik zlewniowy (ang. *capacity-watershed ratio* – C/W). Stosując wzory i nomogramy Łopatina, Drozda i Karauševa [Dąbkowski i in. 1982], Brune'a [1953], Morrisa i Warda [Michalec 2008], wartość  $\beta$  wyznacza się w funkcji współczynnika pojemności  $\alpha$ . Współczynnik ten [Wiśniewski i Kutrowski 1973] określa stosunek pojemności zbiornika wodnego i sumy średniego rocznego dopływu wody. Stosując metody Brune'a-Allena, Browna i Gottschalka [Heinemann 1984], wartość  $\beta$  wyznacza się w funkcji współczynnika zlewniowego C/W, będącego stosunkiem pojemności zbiornika do powierzchni zlewni.

Churchill [Batuca i Jordaan 2000], badając dwa zbiorniki o podobnej wielkości, uzależnił zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska od wskaźnika sedymentacji – *SI* (ang. *sedimentation index*), podając równanie w postaci:

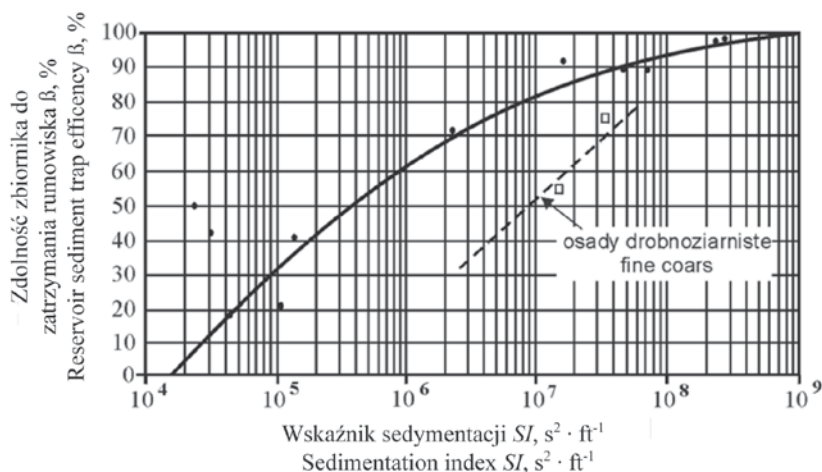
$$\beta = 100 - (800 \cdot SI^{-0.2} - 12) \quad (2)$$

W równaniu tym wskaźnik sedymentacji *SI* jest stosunkiem czasu zatrzymania wody w zbiorniku ( $T_R$ ) do średniej prędkości przepływu wody przez zbiornik ( $V_R$ ):

$$SI = \frac{T_R}{V_R} \quad (3)$$

Wskaźnik sedymentacji *SI* obliczany jest w jednostkach anglosaskiego systemu miar w  $s^2 \cdot ft^{-1}$ , a średnia prędkość przepływu wody przez zbiornik określana jest w  $ft \cdot s^{-1}$ , gdzie  $ft \cdot s^{-1} = 0,3048 \text{ m} \cdot s^{-1}$ . Zależność opisaną wzorem Churchilla (2) można przedstawić w postaci nomogramu (rys. 1).

Prowadzone przez Michalca i Tarnawskiego [2004] badania transportu rumowiska i zamulania ośmiu małych zbiorników wodnych wykazały, że największą zgodność wyników oznaczeń wartości  $\beta$  określonej na podstawie bilansu rumowiska dopływającego i zatrzymanego w zbiornikach oraz wyznaczonej z nomogramów i formuł empirycznych uzyskano, stosując metodę Churchilla. Zostało to potwierdzone wynikami badań dwunastu małych zbiorników wodnych dorzecza górnej Wisły [Michalec 2008].



Rys. 1. Zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska ( $\beta_{CH}$ ) według Churchilla [Batuca i Jordaan 2000]

Fig. 1. Reservoir sediment trap efficiency ( $\beta_{CH}$ ) according to Churchill [Batuca and Jordaan 2000]

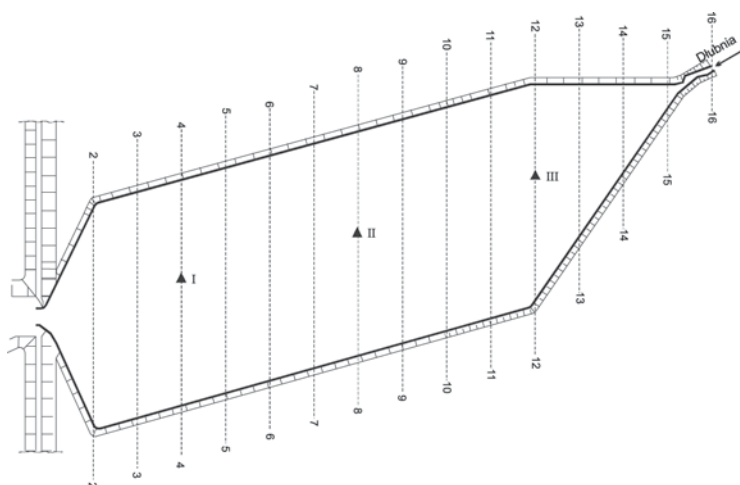
W pracy przedstawiono wyniki obliczeń rzeczywistej zdolności małego zbiornika wodnego do zatrzymywania rumowiska  $\beta$  w kolejnych latach eksploatacji. Zdolność ta została określona na podstawie kilku pomiarów zamulania i obliczeń ilości rumowiska unoszonego dopływającego do zbiornika wodnego. Celem pracy było określenie możliwości wyznaczenia zdolności zbiornika wodnego w Zesławicach na rzece Dłubni wytypowanego do badań nad zatrzymywaniem rumowiska za pomocą metody Churchilla. Otrzymane wartości  $\beta$  porównano z wartościami  $\beta_{CH}$  określonymi formułą Churchilla, umożliwiając tym samym ocenę możliwości zastosowania tego nomogramu w badanym małym zbiorniku wodnym. Ocena taka możliwa jest w przypadku dysponowania danymi z cyklicznych pomiarów zamulania.

## METODA

Pomiary zamulania zbiornika wodnego w Zesławicach wykonano sondą drążkową z łodzi w przekrojach poprzecznych oraz metodą punktów rozproszonych. Lokalizację przekrojów poprzecznych przedstawiono na rys. 2. Pobrane zostały również próby osadów dennych zbiornika w celu określenia gęstości objętościowej osadów, która umożliwiła porównanie objętości rumowiska zgromadzonego w zbiorniku z masą rumowiska dopływającego do zbiornika. Miejsca poboru prób zaznaczono na rys. 2.

Zapora ziemna zbiornika wodnego w Zesławicach (rys. 2) znajduje się w km 8+700 rzeki Dłubni. Powierzchnia zlewni do profilu Zesławice wynosi 218 km<sup>2</sup>. Zbiornik o pojemności 228 tys. m<sup>3</sup> został oddany do użytku w 1966 roku. Przeznaczenie zbiornika to ochrona przeciwpowodziowa i zaopatrzenie w wodę pitną.

Badania zamulania zbiornika wodnego w Zesławicach od 1968 roku do 1983 roku były prowadzone przez prof. Tadeusza Bednarczyka. W 1983 roku, po siedemnastu latach



Rys. 2. Zbiornik wodny w Zesławicach. Na rysunku zaznaczono przekroje pomiarowe i miejsca poboru prób osadów dennych (I–III)

Fig. 2. Water reservoir in Zesławice with marked measuring cross-sections and points of the bottom sediment sampling (I–III)

eksploatacji, stwierdzono, że zamulenie wynosi ponad 50%. Przed przystąpieniem do odmulnienia zbiornika w latach 1986–1987 wykonano boczny zbiornik remontowy. W 1989 odmulono zbiornik główny – usunięto wówczas około 140 tys. m<sup>3</sup> osadu. Zamulenie zbiornika wodnego po 23 latach eksploatacji stanowiło około 70% jego pojemności.

Powierzchnia zlewni jest w znacznej części przeznaczona pod uprawy rolne. Ponad 90% powierzchni zlewni stanowią grunty orne, a łąki zaledwie około 3%. Lasy zajmują stosunkowo niewielką powierzchnię – jest to niespełna 7% powierzchni zlewni [Bednarczyk 1994]. Najczęściej występującym na obszarze dorzecza Dłubni typem gleb są gleby wytworzone na lessach. Większość z nich to gleby lessowe całkowite ze znakami brunatnymi. Ze względu na znaczny udział gruntów użytkowanych rolniczo oraz rodzaj gleb podatnych na sploty powierzchniowe zamulenie zbiornika głównego ma charakter intensywny. Szczegółowe informacje o zlewni zbiornika Zesławice zawierają m.in. prace Dynowskiej [1964] i Bednarczyka [1994].

Ilość rumowiska unoszonego dopływającego do zbiornika wodnego w Zesławicach wyznaczono metodą bezpośrednią, zgodnie z instrukcją IMGW [Brański 1966]. Metoda ta według Łajczaka [1989] umożliwia uzyskanie wyników zbliżonych do wartości rzeczywistych. Masę rumowiska dopływającego do zbiornika w Krepnej obliczono na podstawie danych hydrologicznych, takich jak przepływ średni dobowy i odpowiadająca mu koncentracja rumowiska unoszonego. Przepływy średnie dobowe z okresu 1966–1988 zostały określone przez służby hydrologiczne IMGW w posterunku wodowskazowym w Zesławicach w km 6+300 rzeki Dłubni. Wodowskaz został zlikwidowany w 1992 roku. Obliczenia transportu zostały przeprowadzone według metodyki przedstawionej przez Brańskiego [1966]. Brakujące dane koncentracji rumowiska uzupełniono za pomocą

zależności koncentracji rumowiska unoszonego w funkcji przepływu, opracowanych na podstawie wyników pomiarów. Na podstawie uzyskanych wartości unoszenia  $U_i$  [ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ], będących iloczynem przepływu i koncentracji rumowiska, obliczono transport dobowy, miesięczny i roczny w rozpatrywanym okresie obserwacyjnym. Wyniki obliczeń zostały skorygowane za pomocą współczynnika korekcyjnego  $k$ , będącego ilorazem średniej koncentracji rumowiska unoszonego w profilu poprzecznym rzeki i koncentracji rumowiska unoszonego w miejscu stałego poboru próby. Ze względu na likwidację w 1992 roku posterunku wodowskazowego w Zesławicach na rzece Dłubni ilość rumowiska dopływającego do zbiornika wodnego określono za pomocą metody DR-USLE. W przeprowadzonej analizie posłużono się wynikami obliczeń transportu rumowiska przedstawionymi w pracach Bednarczyka [1994], Madeyskiego i in. [2008] oraz Michalca [2008].

Zdolność zbiornika wodnego w Zesławicach do trwałej retencji rumowiska ( $\beta$ ) w kolejnych latach eksploatacji, w których wykonano pomiary zamulania, określono jako iloraz masy odkładów rumowiska w zbiorniku i masy rumowiska do niego dopływającego. Wartości  $\beta$  porównano z wartościami  $\beta_{Ch}$ , obliczonymi według wzoru (2). Określenie  $\beta_{Ch}$  wymaga ustalenia czasu zatrzymania wody w zbiorniku ( $T_R$ ), obliczanego jako iloraz pojemności i przepływu średniego rocznego. W obliczeniach pojemności zbiornika w poszczególnych latach, w których wykonano pomiary zamulania, uwzględniono zmniejszoną pojemność zbiornika spowodowaną odkładaniem się rumowiska. Średnią prędkość przepływu wody przez zbiornik ( $V_R$ ) obliczono jako iloraz przepływu średniego rocznego i średniego pola powierzchni przekroju poprzecznego zbiornika.

## WYNIKI BADAŃ

Objętość odkładów rumowiska w zbiorniku wodnym w Zesławicach została określona na podstawie pomiarów zamulania wykonanych w okresie 1966–1983 przez zespół kierowany przez Bednarczyka [1994] i na podstawie pomiarów zamulania wykonanych w okresie 1999–2008 przez autora pracy. Wyniki pomiarów zamieszczone w tabeli 2. Określona średnia gęstość objętościowa osadów wynosi  $1,03 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$  [Michalec 2008]. Początkowa zdolność zbiornika w Zesławicach do zatrzymywania rumowiska wynosi 82% przed odmuleniem i 84% po odmuleniu. Wartości początkowe  $\beta$  zostały określone jako ilorazy masy rumowiska zatrzymanego po pierwszym roku eksploatacji i masy rumowiska, która dopłynęła do zbiornika w ciągu tego okresu.

Masę rumowiska unoszonego dopływającego w okresie 1966–1992, która została obliczona na podstawie danych obejmujących wieloletnie pomiary koncentracji rumowiska unoszonego w rzece Dłubni oraz przepływy średnie dobowe, przeliczono na objętość, uwzględniając średnią gęstość objętościową rumowiska zatrzymanego w zbiorniku. Średnia gęstość objętościowa, wynosząca  $1,03 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ , została określona na podstawie pobranych sześciu prób rumowiska w części wlotowej do zbiornika, środkowej i wylotowej ze zbiornika (rys. 1) [Michalec 2008]. W tabeli 2 zamieszczone objętości rumowiska unoszonego dostarczonego do zbiornika w Zesławicach obliczone dla okresu przed odmuleniem zbiornika.

Ilość rumowiska dopływającego w okresie 1992–2006 do zbiornika wodnego w Zesławicach określono jako sumę średniej rocznej masy rumowiska, obliczonej metodą DR-USLE:

$$Y_r = DR \cdot E \quad (4)$$

gdzie:

- $Y_r$  – roczna masa rumowiska unoszonego odpływającego ze zlewni,  $t \cdot rok^{-1}$ ,  
 $DR$  – bezwymiarowy wskaźnik dopływu rumowiska określony wg Roehla [1962],  
 $E$  – średnia roczna masa wyerodowanej gleby z jednostki powierzchni,  $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ .

Średnią roczną masę gleby wyerodowanej z jednostki powierzchni zlewni  $E$  określono za pomocą uniwersalnego równania strat glebowych USLE (*Universal Soil Loss Equation*):

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (5)$$

gdzie:

- $R$  – średnia roczna erozyjność deszczów i spływów,  $Je \cdot rok^{-1}$ , gdzie  $Je$  to skrótowa jednostka erozyjności oznaczająca  $MJ \cdot ha^{-1} \cdot cm \cdot h^{-1}$ , określona podstawie średniej rocznej sumy opadów wynoszącej 693,0 mm;  
 $K$  – podatność gleby na erozję,  $t \cdot ha^{-1} \cdot Je^{-1}$ , wyznaczona dla wyodrębnionych trzech sektorów gleb różniących się między sobą procentową zawartością frakcji 0,002–0,1 mm i 0,1–0,2 mm;  
 $L$  – bezwymiarowy współczynnik długości zbocza, i  $S$  – bezwymiarowy współczynnik spadku zbocza; iloczyn współczynników  $L$  i  $S$ , nazywany współczynnikiem topograficznym, został określony dla wyznaczonych długości wszystkich cieków w zlewni, długości zlewni i jego spadku; długość wszystkich cieków stałych i okresowych wyznaczono z mapy topograficznej w skali 1 : 10 000;  
 $C$  – bezwymiarowy współczynnik rodzaju upraw i sposobu użytkowania, określony jako wartość średnia dla obszaru całej zlewni;  
 $P$  – bezwymiarowy współczynnik zabiegów przeciwoerozyjnych; na terenie zlewni nie są stosowane zabiegi przeciwdziałające erozji; uprawy na znacznej powierzchni gruntów ornych prowadzone są prostopadle do warstw; jedynie w nielicznych przypadkach, przeważnie na większych spadkach, stosowana jest uprawa wzdłuż warstw oraz tarasowanie.

Średnia roczna ilość rumowiska dopływającego do zbiornika wodnego w Zesławicach wynosi  $15077,3 t \cdot rok^{-1}$ . Wyniki obliczeń metodą DR-USLE zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości parametrów i wynik obliczeń transportu rumowiska metodą DR-USLE  
 Table 1. Value of parameters and calculations result of sediment transportation after USLE method

| Parametr – Parameter  | Wartość – Value |
|---|-----------------|
| $R, Je \cdot rok^{-1} - Je \cdot year^{-1}$                           | 86,994          |
| $K, t \cdot ha^{-1} \cdot Je^{-1}$                                    | 0,539           |
| $L \cdot S$   | 1,129           |
| $C$   | 0,152           |
| $P$   | 0,851           |
| $W, km^2$   | 218             |
| $E, t \cdot km^{-2} \cdot rok^{-1} - t \cdot km^{-2} \cdot year^{-1}$ | 149280          |
| DR  | 0,101           |
| $R_s, t \cdot rok^{-1} - t \cdot year^{-1}$                           | 15077,3         |

W obliczeniach zdolności do zatrzymywania rumowiska zbiornika w Zesławicach, przy określaniu ilości rumowiska dopływającego do tego zbiornika nie uwzględniono ilości rumowiska wlezonego, gdyż jego udział w całkowitym transporcie stanowi zaledwie 4,8%. Udział rumowiska wlezonego w całkowitym transporcie materiału mineralnego w rzece Dłubni w okresie 1966–1983 został określony za pomocą równia Meyer-Petera i Müllera w modyfikacji Bartnika [1992]. Wyniki obliczeń zostały przedstawione w pracy Michalca [2008].

W ciągu dwudziestu trzech lat eksploatacji zbiornika przed odmuleniem  $\beta$  uległa redukcji o ponad 56% do poziomu ponad 58%, a po 16 latach eksploatacji po odmuleniu zmniejszyła się o 46%, uzyskując wartość ponad 37% (tab. 2).

Tabela 2. Zdolność zbiornika w Zesławicach do zatrzymywania rumowiska  $\beta$  ustalona na podstawie objętości zamulenia i objętości rumowiska dostarczonego

Table 2. Sediment trap efficiency of the reservoir at Zesławcie  $\beta$  established on the basis of silting volume and volume of delivered sediment

| Rok pomiaru<br>Year of<br>measurement | Rok eksploatacji<br>Year of operation | Objętość<br>odkładów rumowiska<br>Volume of deposited<br>sediment<br>m <sup>3</sup> | Objętość rumowiska<br>dostarczonego<br>Volume of delivered<br>sediment<br>m <sup>3</sup> | $\beta$<br>% |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---|--|--------------|
| Przed odmuleniem – Before desilting   |                                       |   |  |              |
| 1968                                  | 2                                     | 26968   | 40432  | 66,7         |
| 1969                                  | 3                                     | 70425   | 186804   | 37,7         |
| 1970                                  | 4                                     | 75780   | 196831   | 38,5         |
| 1971                                  | 5                                     | 76251   | 210638   | 36,2         |
| 1974                                  | 8                                     | 86192   | 229845   | 37,5         |
| 1983                                  | 17                                    | 116091  | 329804   | 35,2         |
| 1989                                  | 23                                    | 146000  | 519573   | 28,1         |
| Po odmuleniem – After desilting       |                                       |   |  |              |
| 1999                                  | 9                                     | 56162   | 124252   | 45,2         |
| 2005                                  | 15                                    | 75315   | 194111   | 38,8         |
| 2006                                  | 16                                    | 77232   | 205404   | 37,6         |

Przeływ średni roczny w analizowanym okresie 1966–1992 w przekroju wodowskazowym w Zesławicach na rzece Dłubni wynosił  $1,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Po wybudowaniu zbiornika bocznego część wody dopływającej do zbiornika głównego zostaje skierowana do zbiornika bocznego i tylko część przepływu średniego rocznego, wynosząca  $0,71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , wprowadzana jest do zbiornika głównego [Michalec 2008]. Obliczony czas zatrzymania wody w zbiorniku i średnią prędkość przepływu wody w poszczególnych latach, w których wykonano pomiary zamulenia, oraz wartości  $\beta_{ch}$  określone według formuły Churchilla zamieszczono w tabeli 3.

Określona według formuły Churchilla (tab. 3) zdolność zbiornika wodnego w Zesławicach do zatrzymywania rumowiska w pierwszym roku eksploatacji przed odmuleniem i po nim, wynosząca odpowiednio 84,4% i 88,8% jest zbliżona do wartości  $\beta$ , wynoszącej 82% przed odmuleniem i 84% po odmuleniu.



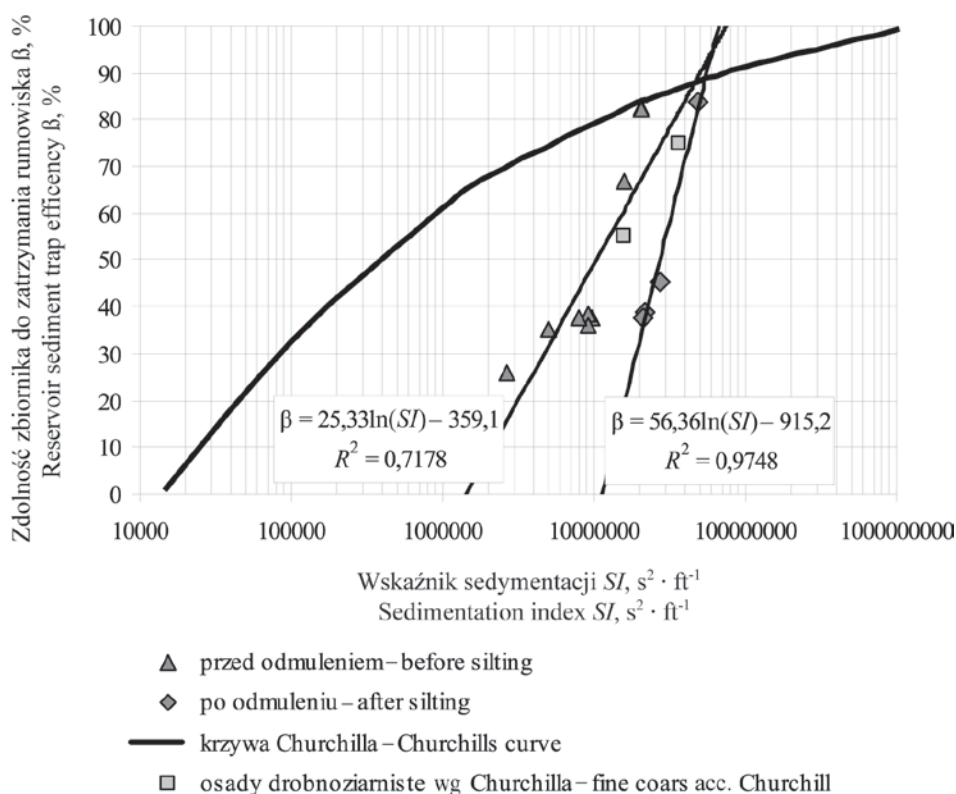
Tabela 3. Wskaźnik sedymentacji i zdolność zbiornika w Zesławicach do zatrzymywania rumowiska  $\beta_{Ch}$  ustalona według formuły ChurchillaTable 3. Sediment trap efficiency of the reservoir at Zesławice  $\beta_{Ch}$  established according to Churchill formula

| Rok pomiaru<br>Year of<br>measurement | Pojemność<br>zbiornika<br>Reservoir<br>capacity<br>$m^3$ | Czas zatrzymania wody<br>w zbiorniku<br>Time of water retention<br>in reservoir<br>$T_R, s$ | Średnią prędkość<br>przepływu wody<br>przez zbiornik<br>Mean flow velocity<br>in reservoir<br>$\bar{V}_R, m \cdot s^{-1}$ | Wskaźnik<br>sedymentacji<br>Sedimentation<br>index<br>$SI, s^2 \cdot ft^{-1}$ | $\beta_{Ch}$<br>% |
|---------------------------------------|--|---|---|---|-------------------|
| Przed odmuleniem – Before desilting   |  |   |   |   |                   |
| 1966                                  | 228000   | 209174  | 0,0031  | $2,1 \cdot 10^7$  | 84,4              |
| 1968                                  | 201030   | 184433  | 0,0035  | $1,6 \cdot 10^7$  | 83,0              |
| 1969                                  | 157580   | 144564  | 0,0045  | $9,8 \cdot 10^6$  | 80,0              |
| 1970                                  | 152220   | 139651  | 0,0047  | $9,1 \cdot 10^6$  | 79,6              |
| 1971                                  | 151750   | 139219  | 0,0047  | $9,1 \cdot 10^6$  | 79,5              |
| 1974                                  | 141810   | 130099  | 0,0050  | $7,9 \cdot 10^6$  | 78,6              |
| 1983                                  | 111910   | 102669  | 0,0063  | $4,9 \cdot 10^6$  | 75,3              |
| 1989                                  | 82000  | 75229   | 0,0086  | $2,7 \cdot 10^6$  | 70,5              |
| Po odmuleniem – After desilting       |  |   |   |   |                   |
| 1990                                  | 228000   | 321580  | 0,0020  | $4,8 \cdot 10^7$  | 88,8              |
| 1999                                  | 171840   | 242367  | 0,0027  | $2,8 \cdot 10^7$  | 86,0              |
| 2005                                  | 152690   | 215353  | 0,0030  | $2,2 \cdot 10^7$  | 84,7              |
| 2006                                  | 150770   | 212649  | 0,0031  | $2,1 \cdot 10^7$  | 84,6              |

Na rys. 3 przedstawiono wartości  $\beta$  (tab. 2) naniesione na wykres zdolności zbiornika do zatrzymania rumowiska  $\beta_{Ch}$  według Churchilla (ryc. 3).

## DYSKUSJA

Początkowa zdolność zbiornika w Zesławicach do zatrzymywania rumowiska, określona na podstawie bilansu rumowiska zatrzymanego i dopływającego do zbiornika, wynosi ponad 80%, zarówno w okresie przed odmuleniem, jak i po nim. Według badań Toniolo i Parkera [2003] dotyczących zamulania małych zbiorników wodnych Kanady wartość początkowa zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymywania rumowiska wynosi blisko 100%. Z kolei Dendy [1974] w wyniku badań siedemnastu zbiorników wodnych o pojemności od 65,3 tys.  $m^3$  do 3,99 mln  $m^3$  znajdujących się na terenie Stanów Zjednoczonych stwierdził, że zdolność tych zbiorników do zatrzymywania rumowiska, w okresie eksploatacji od 4 do 16 lat, wynosiła od 81 do 98%. W polskiej literaturze naukowej brak informacji dotyczących początkowej zdolności małych zbiorników do zatrzymywania rumowiska. Jak wynika z badań Dendy'ego [1974], wartość  $\beta$  pięciu zbiorników wodnych, których okres eksploatacji wynosił co najmniej 14 lat, nie była niższa od 84,7%. W wypadku zbiornika wodnego w Krempnej wartość  $\beta$ , określona po 17 latach eksploatacji przed odmuleniem i 15 latach po odmuleniu, była znacznie niższa



Rys. 3. Zależność regresyjna zdolności zbiornika wodnego w Zesławicach do zatrzymywania rumowiska  $\beta$  i wskaźnika sedymentacji  $SI$  oraz zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska  $\beta_{ch}$  według Churchilla

Fig. 3. Regressive relationship of sediment trap efficiency  $\beta$  of the water reservoir at Zesławice and sedimentation index  $SI$  and reservoir sediment trap efficiency  $\beta_{ch}$  according to Churchill

od wartości początkowej  $\beta$  i wynosiła odpowiednio 35,2% i 38,8% (tab. 2). Zarówno przed odmuleniem, jak i po odmuleniu zbiornika wodnego w Zesławicach tempo redukcji zdolności do zatrzymywania rumowiska jest podobne, mimo że w wyniku wybudowania remontowego zbiornika wodnego nastąpił rozdział wody i rumowiska we wspólnym węźle zasilającym oba zbiorniki. Rozdział wody w węźle wodnym nie wpłynął również znacząco na zmianę początkowej zdolności zbiornika w Zesławicach do zatrzymywania rumowiska, pomimo znacznego zmniejszenia się prędkości średniej przepływu wody przez zbiornik z wartości  $0,0031 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  w 1966 roku, tj. pierwszym roku eksploatacji przed odmuleniem, do  $0,0020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  w 1990 roku, będącym pierwszym rokiem eksploatacji po odmuleniu (tab. 2). Rozdział wody w węźle wodnym miał wpływ na zmianę wartości początkowej wskaźnika sedymentacji  $SI$ , który wynosił  $2,1 \cdot 10^7 \text{ s}^2 \cdot \text{ft}^{-1}$  w 1966 roku i  $4,8 \cdot 10^7 \text{ s}^2 \cdot \text{ft}^{-1}$  w 1990 roku. Określona dla tych wartości  $SI$  początkowa zdolność zbiornika w Zesławicach do zatrzymywania rumowiska określona według równania Churchilla (wzór 2) okazała się bliska wartości  $\beta$ . Początkowa zdolność zbiornika

w Zesławicach do zatrzymywania rumowiska wynosi 82% przed odmuleniem i 84% po odmuleniu, a według formuły Churchilla odpowiednio 84,4% i 88,8%. Nie można natomiast określić za pomocą formuły Churchilla wartości  $\beta_{Ch}$  w kolejnych latach eksploatacji zbiornika. Rzeczywista wartość  $\beta$  zmniejszyła się od początku eksploatacji zbiornika do roku, w którym wykonano ostatni pomiar, ponadtrzykrotnie przed odmuleniem i ponaddwukrotnie po odmuleniu. Natomiast określona według metody Churchilla wartość  $\beta_{Ch}$  ulegnie zmniejszeniu w porównywalnych okresach zaledwie o 20 i 5%. Określone zależności regresyjne zdolności zbiornika wodnego w Zesławicach do zatrzymywania rumowiska  $\beta$ , zarówno dla okresu przed odmuleniem, jak i po nim (rys. 3), opisane odpowiednio równaniami  $\beta = 25,33\ln(SI) - 359,1$  i  $\beta = 56,36\ln(SI) - 915,2$ , charakteryzują się większym nachyleniem niż odcinek krzywej Churchilla odpowiadający zakresowi wskaźnika sedymentacji od  $1,5 \cdot 10^6$  do  $7,5 \cdot 10^7 \text{ s}^2 \cdot \text{ft}^{-1}$ . Wartości  $\beta$  znajdujące się pod krzywą opisaną równaniem Churchilla mogą stanowić uzupełnienie dwóch wartości  $\beta$  na nomogramie Churchilla (rys. 1) odpowiadających osadom drobnoziarnistym. W zbiorniku wodnym w Zesławicach zatrzymywane jest rumowisko drobnoziarniste, stanowiące w ponad 90% materiał mineralny o średnicach mniejszych od 0,1 mm [Michalec 2008]. Dysponowanie seriami wartości  $\beta$  obejmującymi dłuższy okres eksploatacji kilku lub kilkunastu zbiorników wodnych pozwoliłoby na opracowanie modyfikacji nomogramu Churchilla umożliwiającej wyznaczenie zmiany, jakiej w czasie ich eksploatacji podlega zdolność małych zbiorników wodnych do zatrzymywania rumowiska.

## WNIOSKI

Wzór Churchilla może służyć określeniu początkowej zdolności zbiornika wodnego do zatrzymywania rumowiska. Nie jest jednak możliwe wyznaczenie wartości  $\beta$  w kolejnych latach eksploatacji tego zbiornika za pomocą metody Churchilla. W okresie przed odmuleniem wartość  $\beta$  została zredukowana ponadtrzykrotnie, a po odmuleniu ponaddwukrotnie, natomiast redukcja wartości  $\beta_{Ch}$  określonej za pomocą równania Churchilla, wyniosła odpowiednio 20 i 5%. Określone zależności regresyjne na podstawie wartości  $\beta_{rz}$  z okresu przed odmuleniem, w postaci  $\beta_{rz} = 25,3\ln(SI) - 359,1$ , i po odmuleniu, w postaci  $\beta_{rz} = 56,4\ln(SI) - 915,2$ , mogą posłużyć do określenia zmiany  $\beta$  zbiornika w Zesławicach w kolejnych latach eksploatacji, a możliwość ich zastosowania do wyznaczenia zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymywania rumowiska powinna zostać zweryfikowana na podstawie wyników pomiarów zamulania i transportu rumowiska.

Wprowadzony przez Churchilla wskaźnik sedymentacji  $SI$  może zostać wykorzystany do opracowania zależności umożliwiającej wyznaczenie zdolności małych zbiorników wodnych do zatrzymywania rumowiska. Opracowanie takiej zależności wymaga prowadzenia systematycznych pomiarów zamulania oraz możliwości określenia ilości rumowiska dopływającego do zbiornika na podstawie danych hydrologicznych.

## PIŚMIENNICTWO

- Banasik K., 1994. Model sedymentogramu wezbrania opadowego w małej zlewni rolniczej. Wyd. SGGW Warszawa.
- Banasik K., Górski D., 1992. Wykorzystanie uniwersalnego równania strat glebowych USLE do oceny ilości rumowiska unoszonego odpływającego z małych zlewni. Gospod. Wod. 3.

- Banasik K., Madeyski M., 1990. Próba wykorzystania zmodyfikowanego równania strat glebowych do oceny ilości rumowiska unoszonego w falach wezbraniowych małych zlewni karpaczkich. *Rocz. Nauk Rol., Ser. F Melior. Użyt. Ziel.* 82(3/4).
- Bartnik W., 1992. *Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym. Początek ruchu rumowiska wlezonego.* *Zesz. Nauk. AR Krak., Rozprawy* 171.
- Batucu G.D., Jordaan M.J. Jr., 2000. *Silting and Desilting of Reservoirs.* A.A.Balkema Rotterdam.
- Bednarczyk T., 1994. Określenie ilości unoszonego rumowiska w przekroju małego zbiornika wodnego w Zesławicach. *Zesz. Nauk. AR Krak.* 229, *Inż. Środ.* 15.
- Bednarczyk T., Michalec B., 2002. Reduction in sediment trap efficiency of small reservoirs during their operation. *Zesz. Nauk. AR Wrocł.* 438, *Konferencje* 36.
- Brański J., 1966. Instrukcja oznaczania unosin metodą wagową bezpośrednią przy użyciu sączków. *Materiały PIHM do użytku wewnętrznego.*
- Brański J., 1971. Kilka uwag o wielkości transportu rumowiska wlezonego w rzekach górskich. *Gosp. Wod.* 6.
- Brune G.M., 1953. Trap efficiency of reservoirs. *Trans. Amer. Geophys. Union* 34(3), 407–418.
- 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.
- Dębski K., 1959. Próba oszacowania denudacji na obszarze Polski. *Pr. Stud. KGW PAN* 2, cz. 1, Warszawa.
- Dynowska I., 1964. Stosunki hydrograficzne oraz zagadnienia ochrony wód zachodniej części Wyżyny Miechowskiej. *Ochr. Przyr.* 29.
- Heinemann H.G., 1984. Reservoir trap efficiency. [W:] *Erosion and Sediment Yield. Some Methods of Measurement and Modelling.* Red. R.F. Hadley, D.E. Walling. Geo Books Norwich.
- Łajczak A., 1989. Wpływ metody pomiaru, obliczeń i okresu obserwacji na wartość miar transportu zawiesiny na przykładzie rzek w polskich Karpatach. *Gospod. Wod.* 6, 124–127.
- Madeyski M., Michalec B., Tarnawski M., 2008. Zamulanie małych zbiorników wodnych i jakość osadów dennych. *PAN Oddz. Krak., Infrastr. Ekol. Ter. Wiejs.* 11.
- Michalec B., 2008. Ocena intensywności procesu zamulania małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły. *Zesz. Nauk. UR Krak.* 451, *Rozprawy* 328.
- Michalec B., 2009. Wybrane metody określenia intensywności transportu rumowiska unoszonego. *Monografia. Infrastr. Ekol. Ter. Wiejs.* 8.
- Michalec B., Tarnawski M., 2004. Analysis of sediment trap efficiency of small water reservoirs. *Proc. of 22<sup>st</sup> Conf. of the Danube Countries, 30.08–2.09.2004, Brno.*
- Mikulski Z., 1961. Transport zawiesiny mineralnej w rzekach polskich. *Gosp. Wod.*, 1.
- Okada T., Baba K., 1982. Sediment release plan at Sakuma Reservoir. *Proc. 14<sup>th</sup> ICOLD Congress, Rio de Janeiro.*
- Reniger A., 1959. Zagadnienia erozji gleb w Polsce. *Pr. Stud. KGW PAN*, 2, cz. 1, Warszawa.
- Roehl J., 1962. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors. *IAHS* 59, 202–213.
- Sloff C.J., 1991. Reservoir sedimentation: A literature survey. *Comm. Hydr. Geotech. Engin., Report No. 91–2.* University of Technology, Faculty of Civil Engineering Delft.
- Toniolo H., Parker G., 2003. 1D numerical modeling of reservoir sedimentation. *Proc. of IAHR Symp. on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Barcelona.*
- Wischmeier H.W., Smith D.D., 1965. Predicting rainfall erosion losses—a guide from cropland east of the Rocky Mountains. *USDA, Agric. Handbook* 282.
- Wiśniewski B., 1972. Ilość rumowiska unoszonego i wlezonego w rzekach polskich. *Gosp. Wod.* 10–11, 381–386.

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.

## THE APPLICATION OF CHURCHILL'S METHOD IN THE QUALIFICATION OF SEDIMENT TRAP EFFICIENCY OF WATER RESERVOIR AT ZESŁAWICE

**Abstract.** The results of sediment trap efficiency of the small water reservoir  $\beta$  in the following years of operation were introduced in this work. The qualification of the possibility of determination of the sediment trap efficiency of water reservoir at Zesławicach on the river Dłubnia using of the method Churchilla was the aim of this work. Sediment trap efficiency was qualified on the basis of several the measurements of silting in periods before and after desilting of reservoir and on the basis of calculations of the suspended sediment transport. The measurements of sediment volume deposited in water reservoir in Zesławicach were executed using the rod probe from the boat in cross-sections and the method of distracted points. The quantity of sediment delivered to the water reservoir in Zesławice was qualified the direct method, according to the IMGW instruction, and was calculated according to the DR-USLE method.

The sediment trap efficiency reservoir at Zesławice in first year of operation in periods before and after desilting, definite on the basis of measurements of silting carries out 84.4 and 88.8% respectively. Churchill's formula can be used to approximate qualification of the initial value  $\beta$  of water reservoir at Zesławice. The value of sediment trap efficiency reduced above three times in the period before desilting and above twice in the period after desilting. However silting trap efficiency definite according to the Churchill's method will hardly reduce in comparable periods about 20 and 5%. Regression relationships in form  $\beta = 25.3\ln(SI) - 359.1$  and  $\beta = 56.4\ln(SI) - 915.2$  makes possible the qualification of the sediment trap efficiency of the reservoir at Zesławice in the several years of operation before and after desilting.

Introduced by Churchill sedimentation index can be used to the study of dependence enabling delimitation of the sediment trap efficiency of small water reservoirs.

**Key words:** small water reservoir, suspended sediment, sedimentation index, sediment trap efficiency of reservoir

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 16.02.2011*