

PROGNOZA REDUKCJI POJEMNOŚCI I ROZMIESZCZENIA OSADÓW RUMOWISKA W MAŁYM ZBIORNIKU WODNYM – STUDIUM PRZYPADKU

Bogusław Michalec  0000-0002-0402-3416

Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

ABSTRACT

Cel pracy

Celem pracy było 1) porównanie i ocena dokładności wyników obliczeń odkładów rumowiska wykonanych na podstawie wyznaczonych izobat i przekrojów poprzecznych oraz 2) opracowanie prognozy redukcji pojemności małego zbiornika zaporowego wraz z prognozą rozmieszczenia osadów rumowiska.

Materiał i metody

Pomiar geodezyjny zamulenia małego zbiornika wodnego Niedźwiadek o pojemności początkowej wynoszącej 124,5 tysięcy m³ wykonano metodą punktów rozproszonych po 25 latach eksploatacji. Objętość zgromadzonego rumowiska została obliczona na podstawie opracowanych przekrojów poprzecznych i izobat. Porównano wyniki obliczeń z prognozowaną objętością odkładów rumowiska, obliczoną formułą Gončarova. Opracowano również rozmieszczenie rumowiska w zbiorniku na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych i porównano z prognozowanym rozmieszczeniem rumowiska opracowanym według metody Annandale'a i modyfikacją tej metody zaproponowaną przez Michalca.

Wyniki i wnioski

Objętość osadów rumowiska zatrzymanego w zbiorniku, obliczona metodą izobat na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych, wynosi 15205 m³. Jest ona obciążona najmniejszym błędem w stosunku do wyniku uzyskanego z prognozy opracowanej według wzoru Gončarova. Błąd ten wynosi zaledwie –0,4%. Obliczenia objętości zamulonej metodą przekrojów poprzecznych obarczone są błędem wynoszącym –3,6%. Zaproponowana przez Michalca modyfikacja metody Annandale'a, opracowana na podstawie wyników badań ośmiu małych zbiorników wodnych, umożliwiła prawidłowe określenie prognozowanego rozmieszczenia osadów rumowiska w zbiorniku Niedźwiadek. Prognozowane rozmieszczenie tych osadów odpowiadało ich rozmieszczeniu określone na podstawie pomiarów. Różnica wyników oceniona na podstawie obliczonych wartości RMSE i MAE dla prognozowanego rozmieszczenia stanowi średnio 500 m³, natomiast średni błąd procentowy, wyrażony za pomocą współczynnika zmienności VRMSE i współczynnika zmienności VMAE, wynosi odpowiednio 7,7% i 5,8%.

Słowa kluczowe: metoda przekrojów poprzecznych, metoda izobat, stopień zamulenia, prognoza zamulenia

WSTĘP

W małych zbiornikach wodnych zachodzi szybki proces redukcji pojemności, który powoduje ograniczenie ich funkcji. Przebieg procesu zamulania małego zbiornika można określić na podstawie prognozy opracowanej na etapie jego projektowania. Weryfikacja poprawności opracowania prognozy, a także jej walidacja, sprawdzająca prawidłowość wyniku tej prognozy wymaga określenia objętości osadów rumowiska w trakcie jego eksploatacji. Objętość rumowiska zgromadzonego w zbiorniku określa się na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych. Pomiary te mogą dotyczyć bezpośredniego określenia objętości osadów rumowiska, które wykonuje się za pomocą sondowania dna w celu zbadania miąższości osadów rumowiska. Jest to pracochłonna i kosztowna metoda, co zostało stwierdzone ponad 50 lat temu w pracy Wiśniewskiego (1975). Objętość osadów rumowiska w zbiornikach najczęściej obliczana jest jako różnica pojemności zbiornika wyznaczonych w dwóch pomiarach wykonanych w danym okresie eksploatacji. Pomiar objętości, polegający na określeniu głębokości zbiornika przy danym poziomie zwierciadła wody, wykonywany jest przeważnie w przekrojach poprzecznych (Rausch i Heinemann, 1968; Wicher Dysarz i Dysarz, 2015; Wang i in., 2018; Nyikadzino i Gwate, 2021; Juško i in., 2022). W takich pomiarach przekroje poprzeczne wyznaczane są w przekrojach projektowych lub powykonawczych zbiorników (Michalec, 2008), a pomiar głębokości w płytkich zbiornikach może być wykonany za pomocą sondy drążkowej. Pomiary geodezyjne głębokości można również wykonać tzw. metodą punktów rozporoszonych (Childs i in., 2003). Uzyskane wyniki pomiarów głębokości umożliwiają, w zależności od sposobu pomiaru, obliczenie pojemności zbiornika jedną z dwóch metod (Rausch i Heinemann, 1968; Wiśniewski, 1975): 1) z mapy warstwicznej czaszy zbiornika poprzez planimetrywanie powierzchni zamkniętych wyznaczonymi izobatami; 2) z przekrojów poprzecznych metodą analogiczną do sposobu obliczenia kubatury robót zmiennych.

Metodę pierwszą można stosować dla wyników pomiarów pojemności zbiornika wykonanych metodą punktów rozporoszonych. Na podstawie pomiarów punktów rozporoszonych można opracować przekroje poprzeczne do zastosowania w drugiej metodzie. Ob-

liczenie pojemności zbiornika i objętości osadów rumowiska na podstawie pomiarów w przekrojach poprzecznych, pomimo prostoty i łatwości zastosowania tej metody, obarczone jest błędami wynikającymi z nieprecyzyjnego określenia kształtu dna zbiornika między przekrojami, zwłaszcza przy niedostatecznej liczbie przekrojów. Uzyskanie dobrego odzwierciedlenia morfologii dna zbiornika za pomocą izobat wymaga wykonania pomiarów na całej powierzchni zbiornika. Wykonanie dużej liczby pomiarów punktowych umożliwiają techniki GPS w połączeniu z sonarami głębinowymi. Mogą to być pomiary głębokości wody przy użyciu echosondy jedno- lub wielowiązkowej (Gołuch i in., 2010). Zastosowanie echosondy wielowiązkowej umożliwia uzyskanie pełnego obrazu morfologii dna zbiornika, tj. rzędnych dna zbiornika w każdym punkcie (Martellotta i in., 2024). Zebrane punkty głębokości wody i odpowiadające im współrzędne GPS mogą być przetwarzane przez: system informacji geograficznej (np. ArcView, ArcGIS) lub oprogramowanie graficzne oparte na siatce (np. Surfera) (Brunner, 2012; Oke i in., 2019).

Prognoza redukcji pojemności i prognoza rozmieszczenia osadów rumowiska w zbiorniku zaporowym stanowią dwa etapy prognozy zamulania (Wiśniewski i Kutrowski, 1973). Większość formuł empirycznych określających zmianę pojemności zbiornika wodnego z upływem czasu powstało z rozwinięcia równania Ortha z 1934 roku (Bogárdi, 1974). Wśród nich wymienienia się wzory Šamova, Łapszenkova (Dąbkowski i in., 1982) i Gončarova (Wiśniewski i Kutrowski, 1973). Formuła Gončarova ma postać:

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

gdzie:

- Z_t – objętość osadów po upływie t lat [m^3],
- V_p – początkowa pojemność zbiornika wodnego [m^3],
- t – lata eksploatacji,
- R_1 – objętość osadów po pierwszym roku eksploatacji [m^3].

Prognozując zamulanie projektowanego zbiornika wodnego nie dysponuje się objętością osadów po pierwszym roku eksploatacji (R_1). Można ją ustalić na

podstawie pomiarów w zbiorniku będącym tzw. zbiornikiem analogiem lub obliczyć ze wzoru:

$$R_1 = \frac{\beta \cdot R_u}{\rho_0} \quad (2)$$

gdzie:

R_u – roczna masa rumowiska unoszonego dopływająca do zbiornika wodnego [t],

β – zdolności zbiornika do zatrzymywania rumowiska [–],

ρ_0 – gęstość objętościowa osadów [$t \cdot m^{-3}$].

Zastosowanie wzoru (2) w prognozowaniu zamulania projektowanego zbiornika stanowi pewną trudność, gdyż wymaga dysponowania wartością gęstości objętościowej osadów (ρ_0), które będą gromadzone w zbiorniku; niezbędne jest także określenie zdolności projektowanego zbiornika do zatrzymywania rumowiska. Według Wiśniewskiego i Kutrowskiego (1973) gęstość objętościową osadów można przyjąć jako wartość średnią określoną dla podobnych zbiorników, natomiast zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska należy wyznaczyć z nomogramu Łopatina. Zastosowanie wspomnianego nomogramu w przypadku małych zbiorników wodnych daje wartości zaniżone (Michalec, 2011). Zdolność zbiornika do zatrzymywania rumowiska można wyznaczyć za pomocą różnych wzorów i nomogramów, m.in. Drozda, Karauseva, Brune’a i Allena, Brune’a, Morrisa, Lisney, Warda, Browna, Gottschalka, Churchilla, Chena, Borlia, Łajczaka, Yoona, Churchilla (Michalec, 2008).

Moliono i in. (2023) zaproponowali równanie umożliwiające określenie prognozowanej objętości zamulonej rumowiska, którego zastosowanie wymaga dysponowania pomiarami zamulania zbiornika w celu określenia dwóch parametrów, tj. τ_o i σ . Parametry te określają odpowiednio charakterystyczną skalę czasu napełniania zbiornika i poziom złożoności procesu sedymentacji. Równanie zaproponowane przez Moliono i in. (2023) ma postać:

$$Z_t = V_p \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{\tau_o} \right)^\sigma \right) \right] \quad (3)$$

Autorzy równania (3) opracowali wzory do wyznaczania parametrów τ_o i σ dla dwóch przypadków ob-

liczeniowych. Pierwszy przypadek dotyczy dysponowania tylko dwoma wynikami pomiarów zamulania, a drugi ma zastosowanie w warunkach, gdy dysponuje się liczbą wyników pomiarów zamulania większą niż dwa. Skalę czasu napełniania zbiornika τ_o wyznacza się ze wzoru:

$$\tau_o = \sqrt{t_1 t_2} \exp \left(- \frac{z_1 + z_2}{2\sigma} \right) \quad (4)$$

Natomiast parametr mierzący poziom złożoności procesu sedymentacji σ wyznacza się według wzoru:

$$\sigma = \frac{z_1 - z_2}{\ln \frac{t_1}{t_2}} \quad (5)$$

Wartości parametrów Z_1 i Z_2 należy obliczyć dla dwóch pomiarów V_z i pojemności początkowej V_p zamulania ze wzoru:

$$Z = - \ln \left(1 - \frac{V_z}{V_p} \right) \quad (6)$$

Moliono i in. (2023) dokonali weryfikacji zaproponowanej metody dla danych z pomiarów zamulania kilku zbiorników wodnych z różnych regionów świata o pojemnościach od 5,2 mln m^3 do 9,87 mld m^3 . Metoda ta została zastosowana przez Martellotta i in. (2024) do prognozy zamulania zbiornika Camastra o pojemności 35,5 mln m^3 .

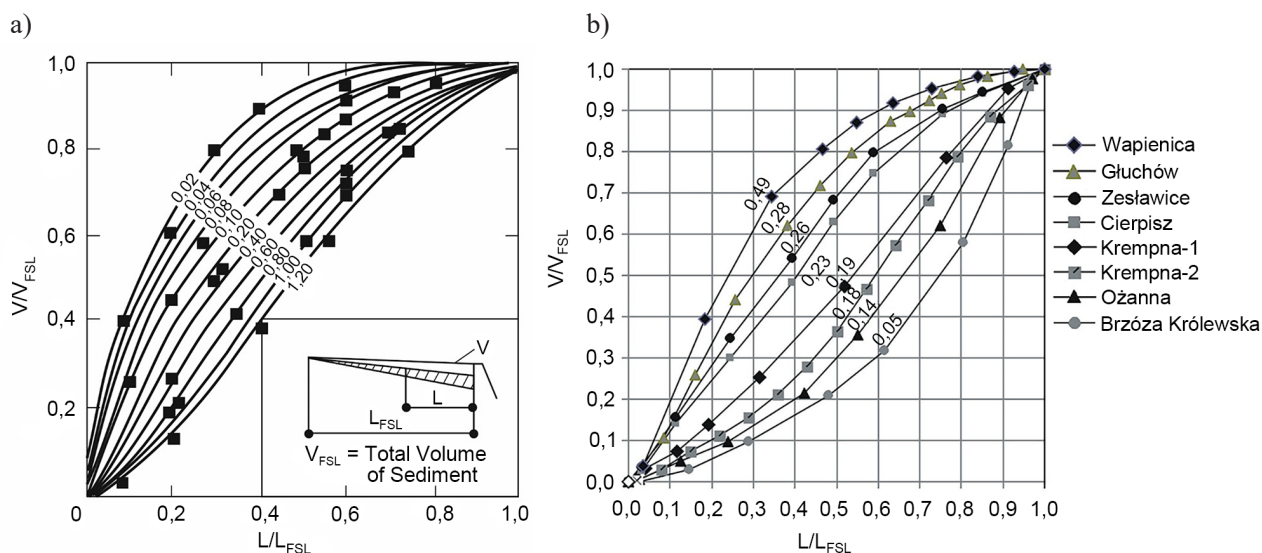
Prognozę redukcji pojemności, opracowaną dla obliczonej intensywności zamulania, będącej średnią roczną objętością rumowiska odłożonego w zbiorniku, można traktować jedynie jako przybliżone określenie zmiany pojemności w czasie. Ten sposób prognozowania może być zastosowany do oszacowania zamulania dużych zbiorników wodnych, w których proces zamulania przebiega znacznie wolniej niż w małych zbiornikach. Intensywność zamulania można obliczyć na podstawie wyników pomiarów zamulania: 1) jako iloraz objętości osadów rumowiska i czasu, po upływie którego dokonano pomiaru lub 2) formułami empirycznymi, opracowanymi m.in. przez Schotklischa i Piecinova (Michalec, 2008).

Zastosowanie metody obliczenia objętości odkładów rumowiska z przekrojów poprzecznych umożliwia także opracowanie różnych charakterystyk procesu zamulania zbiorników opisujących rozmieszczenie

osadów w zbiorniku, czego przykładem jest metoda Dendy’ego (1974, 1982) lub umożliwiających opracowanie prognozy rozmieszczenia osadów – metoda Annandale’a (1984), której modyfikację opracował Michalec (2014). Annandale (1984) do opracowania metody opisującej rozmieszczenie osadów w zbiorniku wodnym przyjął założenie dotyczące teorii energii strumienia w odniesieniu do wartości energii strumienia zbliżającej się do minimum. W myśl zasady teorii energii strumienia, kiedy energia strumienia zbliża się do minimum, to w zbiorniku, jak i w rzece, strumień dąży do stabilizacji warunków hydraulicznych. Zatem w warunkach minimalnej energii strumienia istnieje zależność między wzdłużną dystrybucją osadu w zbiorniku a zmianą długości obwodu zwilżonego. Na podstawie opracowanej zależności regresyjnej w postaci funkcji liniowej, w której zmienną niezależną jest długość obwodu zwilżonego (P), a zmienną zależną – odległość (L) od zapory zbiornika, oblicza się współczynnik kierunkowy prostej. Dla tego współczynnika z krzywej dystrybucji sedymentu określa

się rozmieszczenie rumowiska w zbiorniku (V/V_{FSL}) w zależności od względnej odległości od zapory danego przekroju poprzecznego zbiornika (L/L_{FSL}), przy czym V_{FSL} oznacza całkowitą objętość zgromadzonego rumowiska dla pełnej pojemności zbiornika (ang. *full supply level* – FSL). Na rycinie 1a) przedstawiono krzywe dystrybucji rumowiska opracowane przez Annandale’a (1984) dla jedenastu dużych zbiorników wodnych. Modyfikacja metody Annandale’a została opracowana przez Michalca (2014) dla ośmiu małych zbiorników wodnych (ryc. 1b).

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń odkładów rumowiska na podstawie pomiarów pojemności małego zbiornika wodnego. Celem wykonanych obliczeń było 1) porównanie i ocena dokładności wyników obliczeń odkładów rumowiska wykonanych na podstawie wyznaczonych izobat i przekrojów poprzecznych oraz 2) opracowanie prognozy redukcji pojemności małego zbiornika zaporowego wraz z prognozą rozmieszczenia osadów rumowiska. Prognozę zamulania, obejmującą obliczenie prognozowanej objętości zamulonej, opracowano zalecaną przez Wytyczne



Ryc. 1. Krzywe dystrybucji sedymentu opracowane przez: a) Annandale’a (1984) dla dużych zbiorników wodnych, b) Michalca (2014) dla małych zbiorników wodnych; gdzie: FSL – Full Supply Level, czyli maksymalny poziom piętrzenia, V_{FSL} i L_{FSL} – odpowiednio objętość i długość zbiornika dla maksymalnego poziomu piętrzenia (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 1. Sediment distribution curves developed by: a) Annandale (1984) for large water reservoirs, b) Michalec (2014) for small water reservoirs; where: FSL – Full Supply Level, V_{FSL} and L_{FSL} – volume (V) and length (L) of the reservoir for Full Supply Level (FSL), respectively (Source: author’s own elaboration)

(Wiśniewski i Kutrowski, 1973) formułą Gončarova, a także metodą Moliono i in. (2023). Prognozę замуłania, obejmującą rozmieszczenie osadów w czasie małego zbiornika, opracowano metodą Annandale'a (1984), a także modyfikacją tej metody, zaproponowaną przez Michalca (2014). Wyniki przedstawionych badań powinny przyczynić się do opracowania metody prognozowania замуłania i depozycji osadów rumowiska w zbiorniku, gdyż jak podają Zawadzki i in. (2017), w celu przewidywania ograniczeń w funkcjonowaniu zbiornika wodnego spowodowanego замуłaniem i czasu eksploatacji, po upływie którego wystąpią te ograniczenia oraz w celu dobrania odpowiednich metod (strategii) zaradczych wymagana jest znajomość zarówno tempa, jak i wzorca depozycji osadów w zbiorniku.

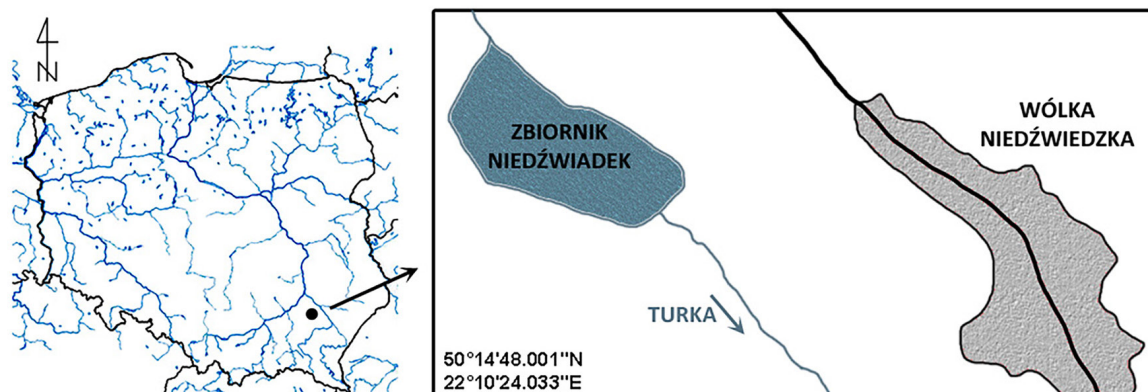
MATERIAŁ I METODY

Do badań wytypowano mały zbiornik wodny Niedźwiadek (ryc. 2) znajdujący się w południowo-wschodniej Polsce, w województwie podkarpackim, w powiecie rzeszowskim, na terenie gminy Sokołów Małopolski. Zapora zbiornika znajduje się w km 2+425 potoku Turka, będącym dopływem rzeki Trzebośnicy dopływającej do Sanu. Powierzchnia zlewni zbiornika wynosi 18,74 km² (Michalec, 2008; Madeyski i in., 2008). Gleba w zlewni potoku składa się głównie z gliny, piasków oraz lessów, które są podatne na erozję, szczególnie w miejscach o większym nachyleniu terenu. Grunty orne stanowią ponad 40%,

użytki zielone 35%, a lasy nieco powyżej 20% (Michalec, 2008).

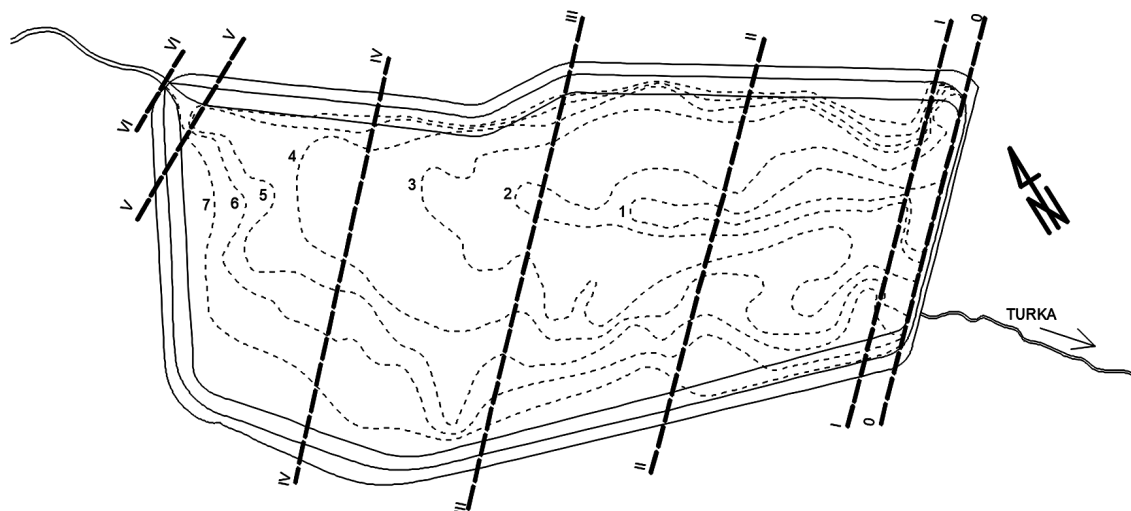
Zbiornik Niedźwiadek został oddany do użytku w 1998 roku, a jego początkowa pojemność wynosiła 124 500 m³. Powierzchnia zbiornika wynosi 8,1 ha dla rzędnej normalnego poziomu piętrzenia wynoszącej 196,20 m n.p.m. W zaporze zbiornika znajduje się upust wieżowy o długości korony 15 metrów, z maksymalną wysokością piętrzenia wynoszącą 2,9 metra. Dwa upusty dennie leżaka wieży, każdy o średnicy 600 mm, zamykane są za pomocą zasuw klinowych (Michalec, 2008).

Pomiary замуłania zbiornika Niedźwiadek (ryc. 3) przeprowadzono w latach 2003, 2009, 2011, 2023, wykonując pomiary rzędnych dna. Pomiary wykonano za pomocą dwóch niwelatorów Topcon At G7, a w pomiarach w 2023 wykorzystano dwa niwelatory CST/Berger 32X. W pomiarach wykorzystywano dwa niwelatory ustawione na przeciwległych brzegach z dowiązaniem do lokalnej osnowy geodezyjnej. Pomiary rzędnych dna wykonano z pontonu tzw. metodą punktów rozporoszonych. Ze względu na niewielkie głębokości zbiornika pomiary dna wykonano za pomocą łąty geodezyjnej, do której dolnego końca zainstalowano stopkę o wymiarach 0,2 × 0,2 m w celu uniknięcia wbicia łąty w osady dennie zgromadzone w zbiorniku. Objętość osadów zgromadzonych w zbiorniku obliczono dla wszystkich pomiarów metodą przekrojów poprzecznych. W tym celu na podstawie rzędnych dna określonych w różnych punktach zbiornika dokonano interpolacji wartości rzędnych osadów w prze-



Ryc. 2. Lokalizacja zbiornika Niedźwiadek (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 2. Location of Niedźwiadek reservoir (Source: author's own elaboration)



Ryc. 3. Zbiornik Niedźwiadek – przekroje pomiarowe i wyznaczone izobaty, gdzie: I, II, III, IV, V i VI – przekroje poprzeczne, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – izobaty (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 3. Niedźwiadek reservoir – cross-sections and designated isobaths, where: I, II, III, IV, V i VI – cross-sections, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – isobaths (Source: author's own elaboration)

krojach poprzecznych, odpowiadających przekrojom projektowym. Tylko dla pomiaru wykonanego w 2023 roku opracowano izobaty i na ich podstawie określono pojemność badanego zbiornika (ryc. 3).

Do interpolacji wykorzystano narzędzie Arc-GIS 10.8 Geostatistical Analysis, stosując metodę kiringu do estymacji nieobciążonego szacowania wartości izobat. Wyznaczono siedem izobat o rzędnych: 194,30, 194,50, 194,65, 194,80, 194,95, 195,10 195,35 m n.p.m. oznaczonych na rycinie 3 odpowiednio liczbami od 1 do 7. Metoda ta według Endalewa i Mulu (2022) odznacza się najmniejszą wartością RMSE i największą wartością R^2 spośród pięciu różnych metod, których wyniki estymacji poddano walidacji, porównując do określonych w przekrojach poprzecznych. Do dalszych analiz przyjęto wyniki interpolacji z metody, która charakteryzowała się najmniejszą wartością RMSE i największą wartością R^2 . Dla opracowanych izobat obliczono objętość zbiornika po 25 latach eksploatacji, a następnie obliczono objętość osadów rumowiska jako różnice pojemności początkowej i obliczonej objętości zbiornika po 25 latach eksploatacji. Wyniki wspomnianych obliczeń objętości zbiornika przyjęto do porównania z wynikami obliczeń metodą przekrojów poprzecznych, opracowanych dla danych z pomiaru wykonanego w 2023 roku.

Objętość rumowiska zatrzymanego w zbiorniku Niedźwiadek w 2023 roku, czyli po 25 latach eksploatacji, obliczono wzorem Gončarova (Wiśniewski i Kutrowski, 1973). Objętość osadów rumowiska po pierwszym roku eksploatacji (R_1) została obliczona z przekształconego wzoru Gončarova (1), dla danych z pomiarów zamulania wykonanych w 2003 roku, czyli po pięciu latach eksploatacji. Dla tak wyznaczonej wartości R_1 obliczono objętość osadów po upływie 25 lat i porównano z objętością osadów obliczoną na podstawie pomiarów dwiema metodami, tj. metodą przekrojów poprzecznych i metodą izobat. Objętość rumowiska zatrzymanego w zbiorniku Niedźwiadek w 2023 roku obliczono również metodą Moliono i in. (2023). Prognozę zamulania, obejmującą rozmieszczenie osadów w czaszy małego zbiornika, opracowano według metody Annandale'a (1984), a także modyfikacji tej metody, zaproponowanej przez Michalca (2014).

WYNIKI

Objętość rumowiska zgromadzonego w zbiorniku Niedźwiadek po 25 latach eksploatacji, obliczona metodą przekrojów poprzecznych, wynosi 14709 m³. Objętość ta została obliczona dla sześciu przekrojów

pomiarowych, odpowiadających przekrojom projektowym (ryc. 3). Objętość zamulona obliczona metodą izobat wynosi 15205 m^3 i jest o 496 m^3 większa od analogicznej wielkości obliczonej metodą przekrojów. Zatem różnica objętości rumowiska obliczonego tymi metodami wynosi 3,4%. Wielkość zamulenia, wyrażona stopniem zamulenia, stanowiącym iloraz objętości zamulonej do objętości początkowej zbiornika, wynosi 11,8% i 12,2% odpowiednio dla wyników obliczeń metodą przekrojów poprzecznych i metodą izobat.

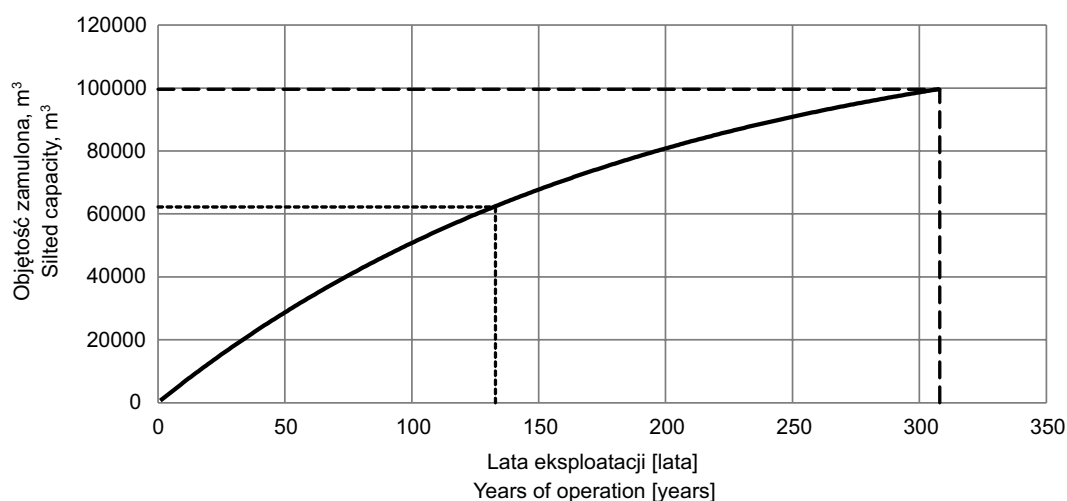
Prognozę zamulania zbiornika wykonano dla obliczonej wartości objętości odkładów rumowiska po pierwszym roku eksploatacji (R_1). Wartość ta wynosi $649,55 \text{ m}^3$ i została obliczona z przekształconego wzoru Gončarova (1), w którym przyjęto $Z_t = 3214 \text{ m}^3$, czyli objętość odkładów po upływie $t = 5$ lat. Na rycinie 4 przedstawiono przebieg zamulania badanego zbiornika, zaznaczając czas, po upływie którego zbiornik zostanie zamulony w 50% i 80%. Zamulenie wynoszące 50% lub 80% stanowi kryterium wyłączenia zbiornika z użytkowania – według kryteriów podanych odpowiednio przez Morrisa (1995) i przez Hartunga (1959). Zamulenie powodujące wyłączenie zbiornika z użytkowania według kryterium Morrisa (1995), wynoszące 50% pojemności (w tym przypad-

ku równe 62250 m^3), zostanie osiągnięte po niespełna 133 latach, natomiast według kryterium Hartunga (1959) zbiornik zostanie zamulony w 80% po 308 latach, a objętość rumowiska zatrzymanego w zbiorniku będzie wynosić 99600 m^3 .

Obliczona prognozowana objętość rumowiska zatrzymanego w zbiorniku po 25 latach eksploatacji, wynosząca 15262 m^3 , została porównana z obliczoną z pomiarów metodami przekrojów poprzecznych i izobat (tab. 1). Objętość zamulona obliczona na podstawie wyników pomiarów metodą izobat (tab. 1) charakteryzuje się znacznie mniejszym błędem względnym (Δi) niż analogiczna wielkość obliczona metodą przekrojów poprzecznych (Δpp).

Objętość rumowiska zatrzymanego w zbiorniku po 25 latach eksploatacji, obliczona za pomocą równania (3) opracowanego przez Moliono i in. (2023), wynosi 84444 m^3 i jest 4,7-krotnie większa od pomierzonej. Obliczone parametry równania (3): Z_1 dla pomiaru z 2003 i Z_2 dla pomiaru z 2023 wynoszą odpowiednio 0,03 i 0,13, zaś parametry σ i τ_0 wynoszą odpowiednio 0,06 i 3,27.

Dane z obliczeń objętości zamulonej metodą przekrojów poprzecznych umożliwiły opracowanie rozmieszczenia poziomego osadów w zbiorniku. Dla każdego z przekrojów projektowych obliczono obwód



Ryc. 4. Krzywa zamulania zbiornika Niedźwiadek opracowana na podstawie wyników prognozy wg Gončarova, gdzie: V – pojemność zbiornika, t – czas eksploatacji (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 4. The silting curve of Niedźwiadek reservoir developed on the basis of the forecast results according to Goncharov, where: V – reservoir capacity, t – operation time (Source: author's own elaboration)

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń objętości rumowiska zatrzymanego w zbiorniku Niedźwiadek po 25 latach eksploatacji (Źródło: opracowanie własne)

Table 1. Summary of the results of calculations of the volume of sediment retained in Niedźwiadek reservoir after 25 years of operation (Source: author's own elaboration)

Objętość rumowiska zatrzymanego [m ³] w zbiorniku obliczona wg: The volume of retained sediment [m ³] in the reservoir calculated according to:			Błąd [%] Error [%]	
Wzór Gončarova (1) Goncharov's formula (1)	Metoda przekrojów poprzecznych Cross-section method	Metoda izobat Isobath method	Δp	Δi
15262	14709	15205	–3,6	–0,4

zwilżony (P), a następnie opracowano zależność obrotu zwilżonego (P) od odległości od ściany zapory (L) oraz wyznaczono średnie nachylenie krzywej P/L, będące współczynnikiem kierunkowego równania regresji (ryc. 5a). Wartość bezwzględna tego współczynnika wynosi 0,15. Dla wartości P/L = 0,15 z nomogramu Annandale'a (ryc. 1a) odczytano wartości bezwymiarowych sum objętości odkładów rumowiska z krzywej interpolowanej pomiędzy krzywymi, których P/L wynosi 0,10 i 0,20. Z nomogramu Michalca (ryc. 1b), dokonując interpolacji dla wartości P/L = 0,15 pomiędzy krzywymi, których P/L wynosi 0,14 i 0,18, określone zostały wartości względnego rozmieszczenia osadu (tab. 2).

Na rycinie 5b. porównano krzywe rozmieszczenia rumowiska zatrzymanego w zbiorniku Niedźwiadek

określone na podstawie bezwymiarowych sum objętości odkładu $\Sigma(V/V_{FSL})$, obliczonych według metod Annandale'a i Michalca, z rozmieszczeniem rumowiska zatrzymanego w tym zbiorniku opracowanym na podstawie wyników pomiarów terenowych. Metoda Annandale'a wskazuje, że w odległości od zapory stanowiącej 25% długości zbiornika zgromadzi się 50% rumowiska, zaś w odległości względnej wynoszącej 67% od zapory odkłady będą stanowiły 91%. Z kolei według prognozy opracowanej zmodyfikowaną metodą Michalca odkłady rumowiska w analogicznych odległościach będą stanowiły odpowiednio 13% i 54% (tab. 2). Odpowiada to rzeczywistemu rozmieszczeniu osadów przedstawionemu na rycinie 5b. Skuteczność predykcyjną rozmieszczenia osadów w badanym zbiorniku wyznaczonego za pomocą metody Annandale'a

Tabela 2. Bezwymiarowe sumy objętości odkładu rumowiska w zbiorniku Niedźwiadek określone metodą Annandale'a (1984) i wg modyfikacji tej metody opracowanej przez Michalca (2014) (Źródło: opracowanie własne)

Table 2. Dimensionless sums of the sediment volume in Niedźwiadek reservoir determined using Annandale's method (1984) and according to the modification of this method developed by Michalec (2014) (Source: author's own elaboration)

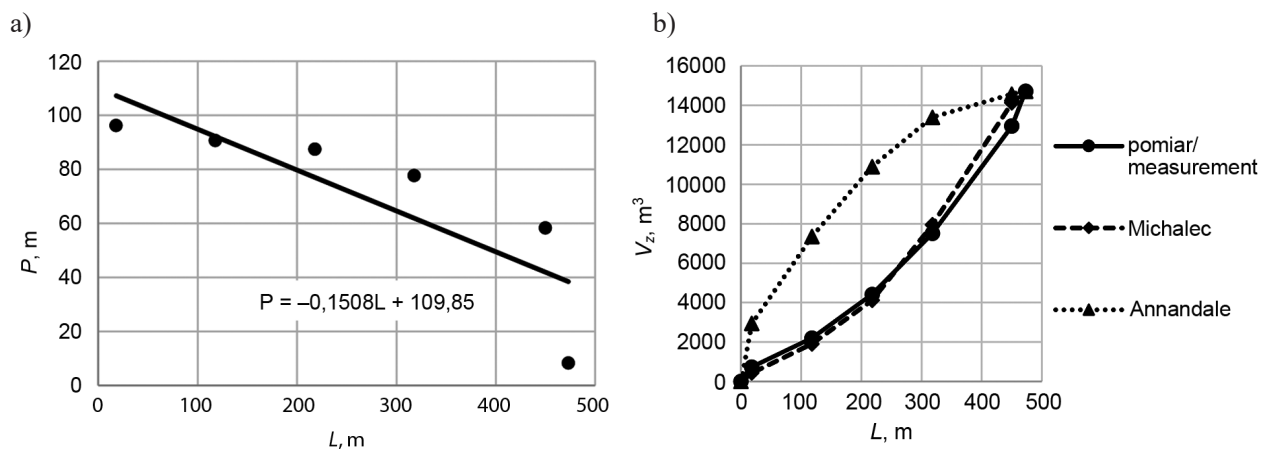
Odległość Length L [m]	Względna odległość Relative length L/L _{FSL}	Bezwymiarowe sumy objętości odkładu rumowiska $\Sigma(V/V_{FSL})$ wg: Dimensionless sums of the sediment deposition volume $\Sigma(V/V_{FSL})$ according to:	
		Annandale	Michalec
0	0,00	0,00	0,00
18	0,04	0,20	0,03
118	0,25	0,50	0,13
218	0,46	0,74	0,28
318	0,67	0,91	0,54
450	0,95	0,99	0,96
473	1,00	1,00	1,00

w modyfikacji zaproponowanej przez Michalca – w porównaniu do rozmieszczenia osadów określonego na podstawie pomiarów (ryc. 5a) – oceniono obliczając miary statystyczne: RMSE (ang. *root mean square error*) i MAE (ang. *mean absolute error*). Wartości RMSE i MAE wynoszą odpowiednio 553,6 i 416,8 m³ i są to miary bezwzględne w analizie błędów, dające różnicę między wartością zmierzoną a wartością przewidywaną. Natomiast w celu dokonania oceny średniego błędu procentowego obliczono współczynnik zmienności RMSE i współczynnik zmienności MAE, czyli VRMSE i VMAE. Współczynniki te stanowią stosunek odpowiednio RMSE i MAE do średniej wartości przewidywanej, tj. uzyskanej z pomiarów, która jest obliczana jako średnia arytmetyczna. Wartości VRMSE i VMAE wynoszą odpowiednio 7,7% i 5,8%.

DYSKUSJA

Objętość zamulona zbiornika wodnego Niedźwiadek, obliczona metodą przekrojów poprzecznych na podstawie wyników pomiarów, wynosi 14709 m³. Natomiast objętość rumowiska zatrzymanego w badanym zbiorniku, obliczona metodą izobat, wynosi 15205 m³.

Kiedy porównamy wyniki obliczeń zamulenia uzyskane na podstawie pomiarów z wynikiem prognozy opracowanej według wzoru Gončarova (1), okazuje się, że obliczona metodą izobat objętość rumowiska zgromadzonego w badanym zbiorniku obciążona jest najmniejszym błędem w stosunku do wyniku uzyskanego z prognozy (tab. 1), wynoszącym zaledwie –0,4%. Obliczenia objętości zamulonej metodą przekrojów poprzecznych obciążone są błędem wynoszącym –3,6%. Natomiast różnica wyników obliczeń wielkości zamulania pomiędzy metodami izobat i metodą przekrojów poprzecznych wynosi 3,4%. Jest to wartość nieznaczna i mieszcząca się w zakresie podobnie ocenianym przez Wiśniewskiego (1975), który podał, że różnica wyników uzyskanych dla zbiornika w Lubachowie na Bystrzycy o pojemności 8 mln m³ wynosiła 4%, a dla zbiornika w Rożnowie o pojemności 167 mln m³ była równa 2%. Znacznie większe błędy, wynoszące od 10% do 30%, uzyskuje się przy pomiarach pojemności dużych zbiorników wodnych, jak podają Morris i Fan (1997); Dunbar i in. (1999). Różnica wyników obliczeń odkładów rumowiska za pomocą metody izobat i przekrojów poprzecznych nie ma istotnego wpływu na długoterminowy wynik



Ryc. 5. Rozmieszczenie osadów rumowiska w zbiorniku Niedźwiadek: a) zależność obwodu zwilżonego (P) od odległości od ściany zapory (L), b) dystrybucja rumowiska w zbiorniku (V_z) według: pomiarów (linia ciągła), obliczeń przy użyciu metody Annandale’a (1984) (linia kropkowana) i modyfikacji tej metody opracowanej przez Michalca (2014) (linia przerywana) (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 5. Distribution of sediment deposits in Niedźwiadek reservoir: a) dependence of the wetted perimeter (P) on the distance from the dam wall (L), b) distribution of sediment in the reservoir (V_z) according to: measurements (continuous line), calculations using Annandale’s method (1984) (dotted line), and a modification of this method developed by Michalec (2014) (dashed line) (Source: author’s own elaboration)

prognozy zamulania opracowanej za pomocą wzoru Gončarova (1).

Prognoza zamulania zbiornika Niedźwiadek została opracowana według wzoru Gončarova (1). Objętość odkładów rumowiska po pierwszym roku eksploatacji (R_1) obliczono z przekształconego wzoru Gončarova (1) dla pomierzonej pojemności zbiornika w piątym roku eksploatacji. W pierwszym roku eksploatacji zazwyczaj nie realizuje się pomiarów zamulania, jednak obliczenie wartości R_1 (niezależnie od wielkości zbiornika) powinno być wykonane w odniesieniu do jak najwcześniej wykonanego pomiaru. Ograniczeniem realizacji takich pomiarów jest nie tylko brak środków finansowych, ale przede wszystkim brak wytycznych w tym zakresie – a więc brak jednoznacznego wymogu realizacji pomiarów. Pierwsze istotne wzmianki, z których wynika, że pierwszy pomiar powinien być wykonany nie później niż pięć lat od oddania zbiornika do eksploatacji, podano już w 1960 roku w pracy Mikuckiego i Wiśniewskiego (1960). Zdaniem tych badaczy należy również badać zamulanie minimum co 5 lat, niezależnie od intensywności zamulania.

Wynik prognozy zamulania opracowanej wzorem Moliono i in. (2023) znacząco różni się od wartości pomierzonej. Skuteczność tej metody w przypadku zbiorników o dużych pojemnościach, wynoszących kilka lub kilkadziesiąt milionów m^3 , potwierdzili Martellotta i in. (2024). Przeprowadzona wstępna ocena tej metody do prognozowania zamulenia małych zbiorników wodnych wskazuje na brak możliwości jej zastosowania. Potwierdzenie tego stwierdzenia wymaga przetestowania metody Moliono i in. (2023) na podstawie badań zamulania innych małych zbiorników wodnych.

Spośród cytowanych w literaturze empirycznych metod rozmieszczenia osadów najczęściej wymienia się metody Christofano, Ortha-Šamova, Borlanda-Millera i Annandale'a (Batuca i Jordaan, 2000; Rahmanian i Banihashemi, 2012). Metody te zostały opracowane w wyniku badań zamulania dużych zbiorników wodnych, a ich zastosowanie do prognozowania rozmieszczenia rumowiska w małych zbiornikach jest niejednokrotnie ograniczone. Przykładem takiej metody jest metoda Borlanda-Millera, opracowana na podstawie wyników pomiarów zamulenia 30 dużych zbiorników wodnych o pojemnościach od 49 mln m^3 do 37 mld m^3 . Wstępna weryfikacja zastosowania wy-

mienionych metod w prognozowaniu rozmieszczenia osadów w małych zbiornikach wodnych wykazała brak możliwości ich zastosowania (Michalec i Tarnawski, 2006; Michalec, 2008; Madeyski i in., 2008) oraz udowodniła ograniczoną przydatność metody Annandale'a (1984) w prognozowaniu rozmieszczenia osadów w małym zbiorniku wodnym. Bąk i Dąbkowski (2013) zmierzili rozmieszczenie osadów zbiornika Suchedniów o pojemności początkowej 303 tys. m^3 , a uzyskane wyniki porównali z krzywymi nomogramu Annandale'a. Bąk i Dąbkowski (2013) stwierdzili, że żadna z bezwymiarowych krzywych na tym nomogramie nie opisuje rozkładu osadów w zbiorniku Suchedniów. Natomiast zaproponowana przez Michalca (2014) modyfikacja metody Annandale'a (1984), opracowana na podstawie wyników badań ośmiu małych zbiorników wodnych, umożliwiła poprawne przewidywanie rozmieszczenia osadów rumowiska w zbiorniku Niedźwiadek. Różnica wyników oceniona na podstawie obliczonych wartości RMSE i MAE dla prognozowanego rozmieszczenia stanowi średnio 500 m^3 , natomiast średni błęd procentowy, wyrażony za pomocą współczynnika zmienności RMSE i współczynnika zmienności MAE, wynosi odpowiednio 7,7% i 5,8%.

WNIOSKI

1. Obliczenie objętości rumowiska zgromadzonego w małym zbiorniku wodnym Niedźwiadek metodą izobat jest dokładniejsze w porównaniu z wynikami obliczeń przeprowadzonych metodą przekrojów poprzecznych, a różnica wyników nie ma istotnego wpływu na wynik prognozy zamulania.
2. Prognozę zamulania małego zbiornika wodnego można opracować za pomocą wzoru Gončarova na podstawie pomiaru zamulania, który powinien być wykonany w jak najkrótszym okresie od rozpoczęcia eksploatacji zbiornika, najlepiej w ciągu 5 lat zgodnie z zaleceniem Mikuckiego i Wiśniewskiego (1960) i powinien być wykonywany systematycznie co kilka lat.
3. Prawidłowy wynik prognozy rozmieszczenia osadów rumowiska zgromadzonych w zbiorniku wodnym można uzyskać, stosując modyfikację metody Annandale'a (1984) zaproponowaną przez Michalca (2014). Pełną ocenę skuteczności tej

metody w prognozowaniu dystrybucji rumowiska w małych zbiornikach wodnych można będzie uzyskać po jej weryfikacji dla większej liczby takich zbiorników.

4. Ze względu na obowiązywanie historycznych, ponad 50-letnich, wytycznych do projektowania zamulania zbiorników wodnych, opracowanych przez Wiśniewskiego i Kutrowskiego (1973), w świetle nowych badań zamulania zbiorników o różnej pojemności konieczne wydaje się opracowanie nowych, zaktualizowanych zaleceń lub wytycznych dotyczących prognozy zamulania małych zbiorników.

BIBLIOGRAFIA

- Annandale, G.W. (1984). Predicting the distribution of deposited sediment in southern African reservoirs. *Challenges in African Hydrology and Water Resources*, IAHS Publ., 144, 549–558.
- Batuca, G.D., Jordaan M.J. Jr (2000). *Silting and Desilting of Reservoirs*. A.A.Balkema. Rotterdam, Netherlands.
- Bąk, Ł., Dąbkowski, Sz.L. (2013). Spatial distribution of sediments in Suchedniów reservoir. *Journal of Water and Land Development*, 19, 13–22.
- Bogárdi, J. (1974). *Sediment transport in alluvial streams*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 826.
- Brunner, A.C. (2012). Bathymetric Survey by Depth-Sonar and Lake Sediment Coring by Beaker Sampler to Identify Sediment Budgets and Siltation Rates of Small Reservoirs. *Small Reservoirs Tool Kit*, 1–6.
- Childs, J.R., Snyder, N.P., Hampton, M.A. (2003). Bathymetric and geophysical surveys of Englebright Lake, Yuba-Nevada Counties, California. USGS Report. Pacific Coastal and Marine Science Center, Santa Cruz. DOI: 10.3133/ofr03383
- Dąbkowski, L., Skibiński, J., Żbikowski, A. (1982). *Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych*. PWRiL, Warszawa.
- Dendy, F.E. (1974). Sediment Trap Efficiency of Small Reservoirs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 17, 5, 898–908.
- Dendy, F.E. (1982). Distribution of Sediment Deposits in Small Reservoirs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 25, 1, 100–104.
- Dunbar, J.A., Allen, P.M., Higley, P.D. (1999). Multifrequency acoustic profiling for water reservoir sedimentation studies. *Journal of Sedimentary Research*, 69, 2, 521–527.
- Endalew, L., Mulu, A. (2022). Estimation of reservoir sedimentation using bathymetry survey at Shumburit earth dam, East Gojjam zone Amhara region, Ethiopia. *Heliyon*, 8. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11819
- Gołuch, P., Dombek, A., Kapłon, J. (2010). Ocena dokładności danych uzyskanych z pomiaru batymetrycznego wykonanego echosondą Lowrance LMS-527C DF iGPS. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 21, 109–118.
- Hartung, F. (1959). Ursache und Verhuetung der Staumraumverliung bei Talsperren. *Wasserwirtschaft*, 1, 3–13.
- Juško, V., Sedmák, R., Kúdela, P. (2022). Siltation of Small Water Reservoir under Climate Change: A Case Study from Forested Mountain Landscape of Western Carpathians, Slovakia. *Water*, 14, 2606. DOI: 10.3390/w14172606
- Madeyski, M., Michalec, B., Tarnawski, M. (2008). Zamulanie małych zbiorników wodnych i jakość osadów dennych. *Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 11, Monografie, 76.
- Martellotta, A.M.N., Levacher, D., Gentile, F., Piccinini, A.F. (2024). Estimation of Silting Evolution in the Camastra Reservoir and Proposals for Sediment Recovery. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, 2. DOI: 10.3390/jmse12020250
- Michalec, B. (2014). The use of modified Annandale's method in the sediment distribution forecast in small water reservoirs – a case study. *Water*, 6, 2993–3011. DOI:10.3390/w6102993
- Michalec, B. (2008). Ocena intensywności procesu zamulania małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły. *Zesz. Nauk. Uniw. Roln. w Krakowie*, 451, Seria Rozprawy, 328.
- Michalec, B. (2011). Zastosowanie metody Churchilla w określeniu zdolności do zatrzymywania rumowiska zbiornika wodnego w Zesławicach. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumietus*, 10, 1, 33–46.
- Michalec, B., Tarnawski, T. (2006). Analysis of sediment deposit distribution in water reservoir at Krempna. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 9, 4, <http://www.ejpau.media.pl/volume9/issue4/art-18.html>
- Mikucki, Z., Wiśniewski B. (1960). Badania nad zamulaniem zbiornika Porąbka. *Biuletyn Instytutu Gospodarki Wodnej*, 1, 2, 557–559.
- Molino, B., De Vincenzo, A., Minó, A., Ambrosone, L. (2023). Long Term Water Management Model for Preserving Sustainable Useful Capacity of Reservoirs. *Water Resources Management* 37, 1879–1894, DOI:10.1007/s11269-023-03460-w

- Morris, G.L. (1995). Reservoir sedimentation and sustainable development in India. *Proc. Sixth Int. Symp. on River Sedimentation*, New Delhi, India, 57–61.
- Morris, G.L., Fan, J., (1997). *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. McGraw-Hill, New York.
- Nyikadzino, B., Gwate, O. (2021). Estimation of Reservoir Capacity and Sedimentation Rate Using Direct and Indirect Methods. *Int. J. Earth Sci. Geophys.*, 7, 045. DOI: 10.35840/2631-5033/1845
- Oke, A.O., Ogedengbe, K., Ajani, S.A. (2019). Comparison of different methods for Bathymetric Survey and Sedimentation Evaluation of a Small Reservoir in Nigeria for Sustainable Management. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 113 (2), 181–195. DOI: 10.12895/jaeid.20192.978
- Rahmanian, M.R., Banihashemi, M.A. (2012). Introduction of a new empirical reservoir shape function to define sediment distribution pattern in dam reservoir. *IJST, Transactions of Civil Engineering*, 36, C1, 79–92.
- Rausch, D., Heinemann, H.G. (1968). Reservoir sedimentation survey method. *Environmental Science, Geology, Research Bulletin 939*, Columbia, Missouri.
- Wang, D., Deng, A., Ji, Z., Shi, H. (2018). Siltation and Desilting Practices in A Runoff Reservoir on Heavy Sediment-Laden River. *MATEC Web of Conferences* 246, 010. DOI: 10.1051/mateconf/201824601062
- Wicher-Dysarz, J., Dysarz, T. (2015). Uncertainty in assessment of annual inflow of sediments to the Stare Miasto reservoir based on empirical formulae. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 14, 1, 201–212. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2015.14.1.201>
- Wiśniewski, B., Kutrowski, M. (1973). *Budownictwo specjalne w zakresie gospodarki wodnej. Zbiorniki wodne. Prognozowanie zamulania. Wytoczne instruktażowe. Biuro Studiów i Projektów Budownictwa Wodnego „Hydroprojekt”, Warszawa*, 55.
- Wiśniewski, B. (1975). Dokładność pomiarów zamulenia zbiorników wodnych. *Gospodarka Wodna*, 3, 84–86.
- Zawadzki, P., Błazejewski, R., Pawlak, M. (2017). Przegląd metod odmulania zbiorników wodnych. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 16 (2), 217–228.

FORECAST OF CAPACITY REDUCTION AND SEDIMENT DEPOSITS DISTRIBUTION IN A SMALL WATER RESERVOIR – A CASE STUDY

ABSTRACT

Aim of the study

The aim of the study was to 1) compare and assess the accuracy of the results of sediment deposition calculations made on the basis of the determined isobaths and cross-sections, and 2) develop a forecast of the capacity reduction of a small dam reservoir together with a forecast of the sediment deposits distribution.

Material and methods

The study was based on the results of silting measurements of a small reservoir (Niedźwiadek reservoir) with an initial capacity of 124.5 thousand m³. Surveying using the scattered point method was conducted after 25 years of the reservoir's operation. The volume of accumulated sediment was calculated based on the developed cross-sections and isobaths. The results were compared with the predicted volume of sediment deposition, calculated using Goncharov's formula. The sediment distribution in the reservoir was also developed based on the results of surveying and compared with the predicted distribution of sediment developed according to Annandale's method and the modification of this method proposed by Michalec.

Results and conclusions

The volume of sediment deposited in the reservoir, calculated using the isobath method based on the results of surveying, is 15,205 m³. It is burdened with the smallest error in relation to the result obtained from the forecast developed according to the Goncharov's formula, i.e. only –0.4%. Calculations of the silted volume using the cross-section method are burdened with an error of –3.6%. The modification of the Annandale's method proposed by Michalec, developed based on the results of studies of eight small water reservoirs, allowed for the correct determination of the predicted distribution of sediment in the

Niedźwiadek reservoir. The predicted distribution of these sediments corresponded to their distribution determined on the basis of measurements. The difference in results assessed on the basis of the calculated RMSE and MAE values for the predicted distribution is on average 500 m³, while the average percentage error, expressed using the VRMSE coefficient of variation and the VMAE coefficient of variation, is 7.7% and 5.8%, respectively.

Keywords: cross-section method, isobath method, siltating degree, siltating forecast