

NIEPEWNOŚĆ SZACOWANIA ROCZNEGO DOPŁYWU RUMOWISKA DO ZBIORNIKA STARE MIASTO NA PODSTAWIE WZORÓW EMPIRYCZNYCH

Joanna Wicher-Dysarz, Tomasz Dysarz

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. W artykule analizowana jest niepewność w szacowaniu wielkości rocznych dopływów rumowiska do zbiornika Stare Miasto. Obiekt wybrano ze względu na jego specyficzną konstrukcję. Jest to zbiorniki dwustopniowy. Górna część zbiornika jest oddzielona od głównego zbiornika przegrodą z przelewem zastawkowym. Część górna jest mniejsza i stanowi tzw. zbiornik wstępny działający jak osadnik. Dzięki takiemu układowi w górnej części tworzą się warunki dogodne do odkładania rumowiska. W badaniach posłużono się zgromadzonymi materiałami obejmującymi geometrię czaszy zbiornika, wymiary uwzględnionych budowli, hydrologię oraz zakres piętrzeń na zaporze. W pracy wykorzystano wzory empiryczne do oszacowania dopływu rumowiska do zbiornika tj. Ackersa-White, MPM, van Rijna, Engelunda-Hansena, Yanga, Toffaletiego i Wilcocka-Crowa. Wykonane obliczenia zweryfikowano na podstawie aktualnych pomiarów batymetrii i oszacowanej wielkości rzeczywistego odkładu. Uzyskane wyniki cechuje duża rozbieżność, co wskazuje na istotność niepewności strukturalnej w analizach zamulania zbiornika.

Słowa kluczowe: zamulanie zbiorników, natężenie transportu rumowiska, niepewność, zbiorniki dwustopniowe

WSTĘP

Głównym celem prezentowanych analiz jest określenie niepewności szacowania za pomocą formuł empirycznych rocznego dopływu rumowiska do zbiornika Stare Miasto. Badanym obiektem jest zbiornik Stare Miasto położony na rzece Powie. W pracy skorzystano z 8 formuł empirycznych wykorzystywanych do określenia transportu rumowiska wlezonego w rzekach nizinnych. Wyniki porównano z symulacjami transportu rumowiska wykonanymi za pomocą programu HEC-RAS 5.0 beta.

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Joanna Wicher-Dysarz, dr inż. Tomasz Dysarz, Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań, e-mail: jwicher@up.poznan.pl, dysarz@up.poznan.pl.

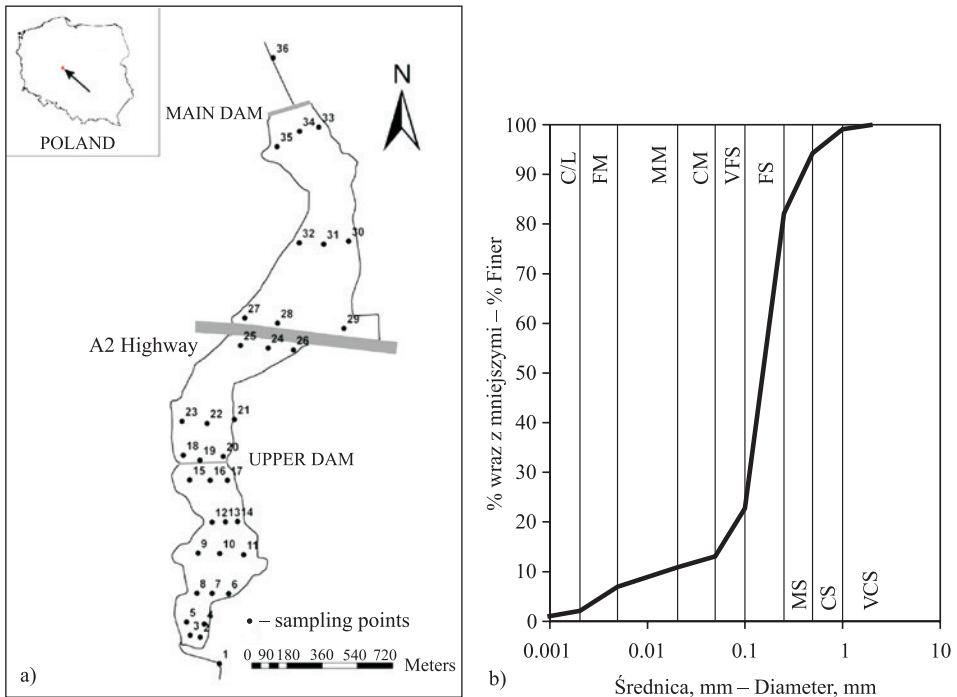
© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2015

Zjawisko transportu rumowiska nie jest tak dobrze rozpoznane i opisane jak zjawisko przepływu wody. Istnieje szereg teorii i podejść umożliwiających określenie ilości materiału transportowanego przez rzekę oraz materiału odkładanego i pobieranego w trakcie wymiany z dnem. Parametry transportu są ściśle związane z parametrami przepływu wody, tzn. prędkością i głębokością oraz właściwościami materiału, takimi jak średnice charakterystyczne, współczynnik kształtu, ciężar właściwy, porowatość itp. Istotne znaczenie ma również intensywność fluktuacji burzliwych przepływu, ale rolę tego czynnika trudno ocenić. Stosowane formuły określające natężenie transportu rumowiska są efektem badań terenowych i laboratoryjnych oraz subiektywnej oceny relacji między parametrami przepływu wody i transportu materiału. Stąd ich dokładność i stosowalność jest często ograniczona.

MATERIAŁY BADAWCZE

Ogólna charakterystyka obiektu

Zbiornik Stare Miasto położony jest na rzece Powie, został oddany do użytku w 2006 r. (ryc. 1a). Długość zbiornika wynosi 4,5 km, a powierzchnia zalewu przy NPP = 93,50 m n.p.m. sięga 90,68 ha. Całkowita pojemność zbiornika to 2,159 mln m³,



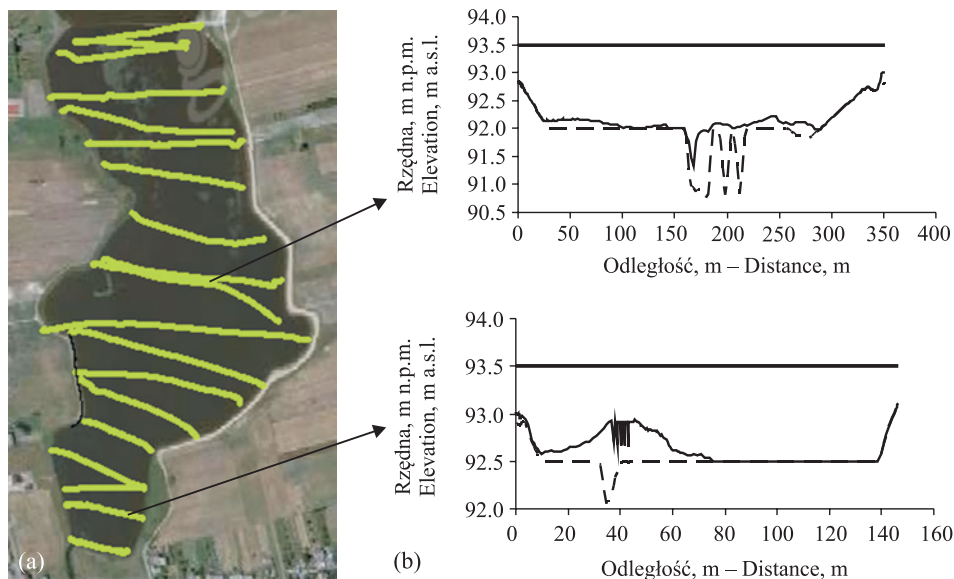
Ryc. 1. Zbiornik Stare Miasto: (a) lokalizacja miejsc poboru próbek rumowiska; (b) typowa krzywa uziarnienia rumowiska (pkt 1)

Fig. 1. The Stare Miasto reservoir: (a) location of bed sediment samples. (b) typical sediment sample (point 1)

a użytkowa 1,216 mln m³. Zbiornik przecina autostrada A2, dzieląc go na dwie części, dodatkowo górna część zbiornika przedzielona jest przegrodą z przepustem. Powierzchnia zalewu części przegrodzonej to 27 ha, a pojemność tej części wynosi 0,294 mln m³ (ryc. 1 i ryc. 2). Akwen zaliczany jest do zbiorników wielozadaniowych i pracuje w cyklu rocznym wyrównawczym. Na zbiorniku prowadzona jest gospodarka wodna, dlatego zmiany poziomów wody w zbiornikach zmieniają się od rzędnej 92,70 m n.p.m. (MinPP) do rzędnej 94,00 m n.p.m. (MaxPP). Podstawowym celem zbiornika jest zapewnienie wody do nawodnień gruntów ornych i użytków zielonych oraz zagwarantowanie odpowiedniego przepływu nienaruszalnego poniżej oraz wyrównywanie deficytów wody w okresach suszy. Niemniej jednak istotnym celem gospodarki wodnej prowadzonej na zbiorniku jest ochrona przeciwpowodziowa miejscowości położonych poniżej zbiornika, w tym miasta Konin.

Batymetria zbiornika

W pracy wykorzystano mapy sytuacyjno-wysokościowe, które posłużyły do odtworzenia batymetrii zbiornika sprzed jego zalania. Na podstawie rzędnych i warstwicy z map stworzono Numeryczny Model Terenu (NMT) zbiornika Stare Miasto. Kolejnym krokiem były pomiary przeprowadzone w 2013 r. za pomocą urządzenia GPS oraz echosondy Echotrak CVM. Zostało wykonanych 98 przekrojów porzecznych zbiornika, z czego 19 znajduje się w części wstępnej (ryc. 2a i 2b), w odległościach od 50 do 100 m. Wyniki z pomiarów z 2013 r. zostały naniesione na wcześniej wykonany NMT zbiornika i porównane (ryc. 2b). Ponieważ celem pracy była analiza zamulenia części wstępnej, dlatego na ryc. 2a zamieszczono NMT tylko części wstępnej zbiornika.

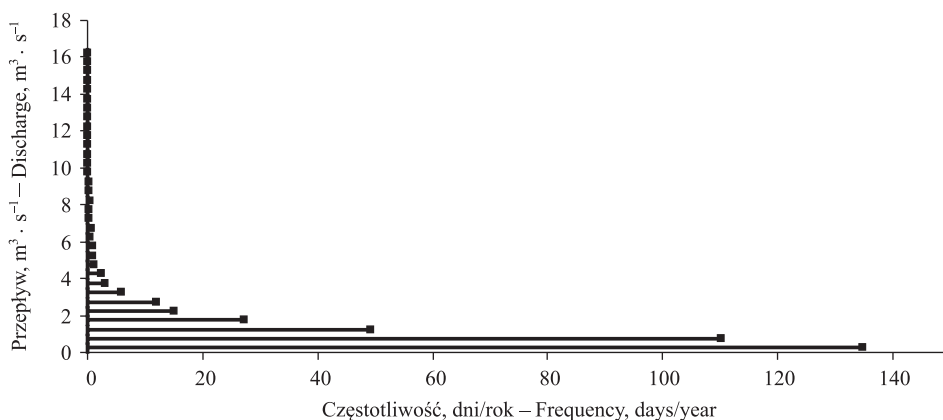


Ryc. 2. Pomiary batymetrii w roku 2013: (a) lokalizacja przekrojów w części wstępnej zbiornika, (b) porównanie batymetrii pierwotnej i aktualnej dla wybranych przekrojów

Fig. 2. Measurement of the bathymetry in 2013: (a) location of sections in the upper part of the reservoir, (b) comparison of past and current bathymetry for selected cross-sections

Charakterystyka hydrologiczna

Na rzece Powie znajduje się jeden wodowskaz usytuowany poniżej zbiornika. Natężenie przepływu rzeki Powy w profilu Posoka ($A = 332 \text{ km}^2$), poniżej zbiornika w latach 1971–2009 wynosiło od $NNQ = 0,012 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $WWQ = 42,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a średni roczny przepływ (SSQ) rzeki wyniósł $1,17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Średni roczny przepływ w półroczu zimowym ($SSQ = 1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) był o ok. 65% wyższy niż wartości w półroczu letnim [Matuszewski 2012]. W badanym okresie średni roczny odpływ wyniósł 36,9 mln m^3 , a średni roczny odpływ jednostkowy z badanej zlewni $3,52 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Na ryc. 3 przedstawiono krzywą częstości przepływów wody. Słupki reprezentują przedział wyników odpowiadający przepływowi z okresu 1971–2009. Wyznaczone przedziały przepływów i odpowiadające im częstości wyrażone w liczbie dni na rok zostały wykorzystane w dalszych obliczeniach.



Ryc. 3. Krzywa częstości przepływów dla wodowskazu Posoka na rzece Powie, okres 1971–2009
Fig. 3. Discharge frequency curve for gauge station Posoka at the Powa river, period 1971–2009

Granulometria dna zbiornika

W analizach przeprowadzonych w artykule zostały wykorzystane próbki osadów dennych pobrane ze zbiornika retencyjnego Stare Miasto na rzece Powie w listopadzie 2011 r. Osady dennie ze zbiornika pobierano sondą typu „Nurek” wyposażoną w szklany zagłębnik oraz chwytaczem rurowym typu „Czapla”. Łącznie pobrano 35 próbek osadów dennych z całego zbiornika, w tym 16 z części wstępnej. Lokalizację miejsc pobierania próbek zaznaczono na ryc. 1a. Na podstawie pobranych próbek została przeprowadzona analiza składu granulometrycznego osadów dennych zgodnie z normą PN-R-04032:1998 (ryc. 1b).

Analiza składu granulometrycznego materiału dennego została wykonana metodą areometryczną Casagrande’a w modyfikacji Prószyńskiego. Następnie przeprowadzono analizę sitową. Dla poszczególnych próbek, wykorzystując trójkąt Fereta, określono grupy i podgrupy granulometryczne. Analiza składu granulometrycznego osadów dennych zbiornika Stare Miasto pokazała, że w obrębie części wstępnej zbiornika występuje zróżnicowanie uziarnienia (ryc. 1b). Najdrobniejszy materiał (piaski) znajdują się w począt-

kowej części zbiornika (wlot do zbiornika). Zauważono także, że w pobliżu okna przepływowego występowały również grubsze frakcje rumowiska (żwiry). Drobniejsze frakcje zaobserwowano w środkowej części zbiornika.

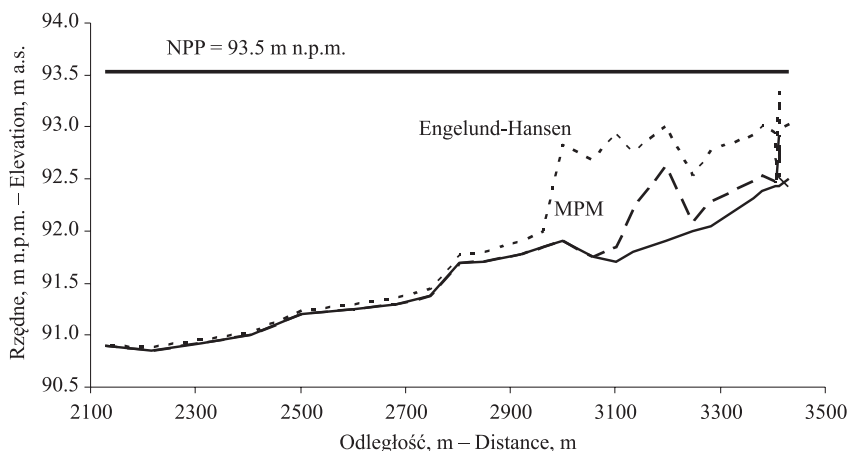
Procesy sedymentacyjne w zbiorniku

W zbiorniku Stare Miasto zaobserwowano szereg niekorzystnych zjawisk związanych z transportem rumowiska. W poprzednich artykułach poruszono problem erozji poniżej mostu dzielącego główną część zbiornika oraz opisano możliwe zagrożenia stabilności przegrody górnej [Dysarz i in. 2013, 2014, Dysarz i Wicher-Dysarz 2013]. Jednak największą intensywność mają procesy sedymentacji we wstępnej części, które analizowane są w niniejszym artykule.

Pomiary batymetrii zbiornika przeprowadzone w 2013 r. dostarczają dodatkowych informacji o intensywności procesów akumulacji materiału. Na ryc. 2b przedstawiono porównanie przekrojów pomierzonych (ciągła linia) z przekrojami przed wybudowaniem zbiornika (linia przerywana). Wyraźnie widać tworzące się usypiska, tym większe im dany przekrój znajduje się bliżej przekroju dopływu do zbiornika.

W pracy Dysarz i in. [2014] do analiz problemu wykorzystano standardowy model ruchu rumowiska oraz nową procedurę SIAM (ang. *Sediment Impact Assessment Method*). Jednak zauważone rozbieżności wcześniejszych wyników sugerują konieczność wykonania bardziej zaawansowanych analiz przydatności formuł empirycznych. Stanowią one jeden z najistotniejszych elementów modeli symulacyjnych. Przykład uzyskanych wyników zamieszczono na ryc. 4. Na profilu dna wyraźnie widać różnicę między efektem symulacji z wykorzystaniem formuł Engelunda-Hansena oraz Meyera-Petera i Mullera (MPM).

Pomiary batymetrii wykonane w 2013 r. umożliwiają przybliżoną weryfikację wskaźników formuł transportu rumowiska.



Ryc. 4. Przykład symulacji zmian dna wstępnej części zbiornika Stare Miasto: HEC-RAS 5.0.0, formuły Engelunda-Hansena oraz MPM

Fig. 4. Example of bottom elevation changes in the upper part of the Stare Miasto reservoir: HEC-RAS 5.0.0, Engelund-Hansen and MPM formulae

METODYKA OBLICZEŃ

Szacowanie wielkości odkładu

Wielkość odkładu rumowiska w części wstępnej zbiornika została oszacowana poprzez porównanie batymetrii pierwotnej z 2006 r. z batymetrią z aktualnych pomiarów z 2013 r. Sposób oszacowania jest ściśle powiązany z faktem, że pomiary batymetrii wykonano w układzie przekrojów poprzecznych (ryc. 2a). W każdym przekroju, w którym zaobserwowano podniesienie rzędnych dna (np. ryc. 2b), wyznaczono wielkość pola przekroju przepływu przykrytego odłożonym rumowiskiem. Następnie przeliczono wielkość odkładu między przekrojami, przyjmując liniowy rozkład odkładu na długości.

Suma obliczeń daje wielkość 0,026 mln m³ rumowiska po 7 latach użytkowania zbiornika. Daje to średnią szybkość zamulania $3,6 \cdot 10^{-3}$ mln m³ na rok. Przy takiej prędkości część wstępna zbiornika powinna ulec całkowitemu zamulaniu po ok. 80 latach.

Formuły opisujące natężenie transportu rumowiska

W następnych obliczeniach posłużono się szeregiem formuł empirycznych stosowanych w celu wyznaczenia natężenia transportu rumowiska. Większość formuł przedstawionych poniżej są to typowe i bardzo powszechne wzory stosowane w licznych publikacjach. Wykorzystano przede wszystkim implementowane w popularnych programach do symulacji transportu rumowiska, np. HEC-RAS 5.0.0, SRH-1D 3.0. Relacje określone w tych wzorach wiążą średnie natężenie przepływu rumowiska w przekroju z parametrami przepływu wody, takimi jak średnia prędkość przepływu $u(x, t)$ i średnia głębokość $h(x, t)$. W przypadku stosowania formuł empirycznych istotny jest podział transportowanego materiału na rumowisko unoszone i wleczone.

Pierwszym testowanym wzorem jest formuła Meyera-Petera i Müllera [Meyer-Peter i Müller 1948] określana popularnie skrótem MPM. Jest to jedno z najwcześniejszych konstruowanych równań. Celem podstawowym jest określenie natężenia transportu wleczonego. Podstawą konstrukcji jest analiza wymiarowa. Natężenie transportu jest ściśle zależne od wielkości naprężeń dennych, a dokładniej od ich nadwyżki w stosunku do naprężeń krytycznych, inicjujących ruch rumowiska. Weryfikacja wiarygodności tego wzoru odbyła się na podstawie badań w kanałach laboratoryjnych. Materiał wleczony stanowiły głównie piaski i żwiry. Jednak od tego czasu formuła ta wielokrotnie była testowana w warunkach terenowych, także polskich [np. Bartnik i in. 1988, Radecki-Pawlik 2011].

Równie znany wzorem jest formuła Ackersa-White'a [Ackers i White 1973]. Służy ona do określania całkowitego transportu rumowiska. W pierwszej kolejności była testowana na danych laboratoryjnych przy założeniu konfiguracji dna obejmujących także formy denne, takie jak zmarszczki i fałdy. Analizowano względnie jednorodne rumowisko w zakresie frakcji od piasków do żwirów. Jest rzeczą powszechnie wiadomą, że oryginalna formuła Ackersa-White'a przeszacowuje natężenie transportu dla rumowiska o średnicach mniejszych od 2 mm [np. Brunner 2010, Huang i Greimann 2012]. Dlatego w licznych zastosowaniach wykorzystuje się jej wersję skorygowaną opracowaną w roku

1990 [HR Wallingford 1990]. W niniejszym artykule testowano obie wersje, oznaczając je jako Ackers-White 1973 oraz Ackers-White 1990.

Formuła Engelunda-Hansena [Engelund-Hansen 1966, 1972] służy do wyznaczania natężenia całkowitego transportu rumowiska. Była testowana na danych laboratoryjnych ze względnie jednorodnym rumowiskiem w zakresie średnic od 0,19 do 0,93 mm. W praktyce jest stosowana dla rzek o dnie piaszczystym. Dużą zaletą tej formuły jest jej prostota.

Drugą formułą dla rzek o dnie piaszczystym jest wzór Yanga [Yang 1973]. Podstawą tego wzoru jest tzw. moc strumienia (ang. *Stream Power*), koncepcja szeroko testowana przez Bagnolda [1966], a później również m.in. przez Yanga [1973, 1979, 1984, 1996]. Moc strumienia jest wyznaczana jako iloczyn prędkości i naprężeń dennych. Formuła była testowana na danych laboratoryjnych zanim zaczęto ją stosować na obiektach rzeczywistych. Wersja formuły Yanga dla piasków jest zalecana do stosowania dla średnic rumowiska poniżej 2 mm.

Z kolei Van Rijn [1984a, 1984b] rozpatrywał transport rumowiska unoszonego i wleczonego rozdzielnie. Podane formuły znajdują szerokie zastosowanie głównie ze względu na dużą ilość badań terenowych wykorzystanych przy ich formułowaniu. Podstawowe elementy analizowane przy konstruowaniu wzorów to koncentracja cząstek i ich prędkość, a także wysokość saltacji. Jednak w ostatecznej formie natężenie transportu jest zależne od parametrów hydraulicznych, takich jak prędkość przepływu i głębokość oraz charakterystyk rumowiska w postaci średnic d_{50} i d_{90} .

Formuła Toffaletiego [1968] jest niekiedy przyrównywana z wzorem Engelunda-Hansena [Brunner 2010]. Jest to funkcja opisująca całkowity transport rumowiska. Na świecie ma zastosowanie raczej do dużych rzek o odpowiednio wysokiej ilości materiału zawieszzonego.

Ostania testowana formuła to wzór zaproponowany przez Wilcocka [Wilcock 2001, Wilcock i Crowe 2003], którego uogólniona forma jest znana pod nazwiskami Wilcock i Crowe. Jest to funkcja mająca zastosowanie dla przypadków rumowiska niejednorodnego z zawartością piasków i żwirów. Została wyprowadzona na podstawie badań laboratoryjnych i dość skomplikowanych analiz uwzględniających kontakt ziaren i płynącej wody oraz częściowe „ukrycie” jednych ziaren przez inne.

Szacowanie rocznego odkładu rumowiska i tempa zamulania

Obliczenia przebiegały w kilku krokach. W pierwszej kolejności dla każdego przepływu Q_i z krzywej częstości przedstawionej na ryc. 3 wyznaczano parametry hydrauliczne dla przekroju dopływowego zbiornika (i jest numerem danego przedziału przepływu, któremu odpowiada częstość f_i wyrażona w dniach na rok). Wyznaczane parametry hydrauliczne to pole przekroju przepływu, promień hydrauliczny, szerokość zwierciadła wody i inne dane wymagane do obliczeń transportu rumowiska. Dla uproszczenia posłużono się w tym celu odpowiednio skonfigurowanym programem obliczeniowym HEC-RASa 5.0.0 Beta. Następnie dla każdej frakcji materiału dennego (ryc. 1b) wyznaczano natężenie przepływu rumowiska s_j za pomocą odpowiedniej formuły transportu. Niezależnie od zastosowanej formuły wyniki sprowadzano do jednostki tony na dobę. Następnie całkowity transport wyznaczano jako sumę ważoną liczoną po wszystkich frakcjach

$$S_i = \frac{1}{100} \sum_j s_j p_j$$

gdzie:

p_j – procentowy udział j -tej frakcji w próbce.

Tak wyznaczone całkowite natężenia transportu rumowiska S_i odpowiadające przepływowi Q_i przeliczono na całkowity transport w ciągu roku, stosując sumę ważoną po częstościach przepływu

$$S_{rok} = \sum_i S_i f_i$$

Ta wielkość, wyrażona w tonach na rok, była przeliczana na potencjalną wielkość odkładu w ciągu roku w m^3 poprzez podzielenie przez gęstość szkieletu gruntowego

$$R_{rok} = \frac{S_{rok}}{\rho_s}$$

gdzie ρ_s przyjmowano jak dla piasku równe 1489 kg m^{-3} . Potencjalną wielkość odkładu przeliczano na mln m^3 w celu porównania z pojemnością części wstępnej zbiornika $V_s = 0,294 \text{ mln m}^3$. Liczbę lat do całkowitego zamulenia części wstępnej wyznaczano przy założeniu, że sprawność zatrzymywania rumowiska wynosi 100%.

WYNIKI OBLICZEŃ

Uzyskane wyniki przedstawiono w tab. 1 oraz na ryc. 5. W tabeli zestawiono wartości liczbowe w postaci objętości sedymentującego materiału przeliczonego na rok oraz oszacowanego czasu zamulenia wstępnej części zbiornika. Średnie wartości wynoszą odpowiednio $0,061 \text{ mln m}^3 \text{ rok}^{-1}$ oraz 62 lat. Jednak rozrzut w uzyskanych wynikach jest bardzo duży. Objętości materiału odłożonego wahają się od $0,001 \text{ mln m}^3 \text{ rok}^{-1}$ [Ackers-White 1973] do $0,180 \text{ mln m}^3 \text{ rok}^{-1}$ [Toffaletti 1968]. Daje to odpowiednio 365 lata oraz 2 lata. Rozrzut ten jest bardzo duży. Wyznaczone odchylenia standardowe wynoszą $0.075 \text{ mln m}^3 \text{ rok}^{-1}$ dla objętości materiału oraz 119 lat dla czasu zamulenia.

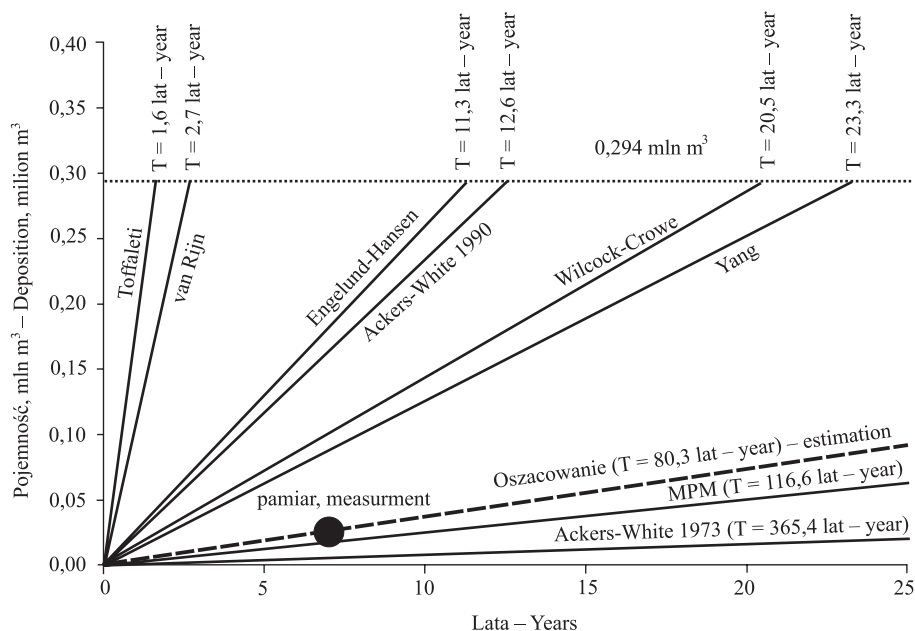
Uzyskane wyniki porównano z odkładem obliczonym na podstawie map i pomiarów batymetrii w roku 2013. Na ryc. 5 naniesiono funkcje narastania wielkości odkładu w kolejnych latach przy założeniu, że przyrost ten będzie następował w sposób liniowy. Kolejne linie odpowiadają różnym funkcjom transportu rumowiska. Przedstawione oszacowania ilustrują rozbieżność uzyskanych wyników. Duży punkt zaznaczony na wykresie reprezentuje wielkość odkładu obliczoną na podstawie pomiarów batymetrii. Przerywana linia pokazuje oszacowanie zmian wielkości odkładu przy tym samym liniowym założeniu jak w przypadku formuł empirycznych.

Zarówno wyniki przedstawione w tab. 1, jak i wykres na ryc. 5 pokazują, że najlepsze oszacowanie daje najbardziej podstawowy wzór Meyera-Petera i Müllera (MPM).

W oszacowaniu czasu całkowitego zamulenia części wstępnej różnica między MPM a pomiarami batymetrii wynosi ok. 45%. Jednak jest to zdecydowanie lepszy wynik niż w przypadku pozostałych formuł.

Tabela 1. Wyniki obliczeń
Table 1. Results of computation

Formuła Formulae	Sedymentacja Sedimentations mln m ³ · rok ⁻¹	Czas zamulenia Sedimentation time lata – years
Ackers-White 1973	0,001	365,44
Ackers-White 1990	0,023	12,57
MPM	0,003	116,56
Engelund-Hansen	0,026	11,30
Yang sand 1973	0,013	23,32
Van Rijn	0,109	2,71
Toffaleti	0,180	1,63
Wilcock-Crowe	0,014	20,54



Ryc. 5. Ilustracja szacowanej szybkości zamulania wstępnej części zbiornika Stare Miasto
Fig. 5. Graphical presentation of sedimentation speed assessment in the Stare Miasto reservoir

WNIOSKI

W pracy przedstawiono próbę oszacowania rocznego dopływu rumowiska do zbiornika nizinnego Stare Miasto na rzece Powie. Rozszerzeniem analizy jest przybliżona prognoza czasu zamulenia części wstępnej zbiornika. Posłużono się szeregiem formuł empirycznych, których parametry określono na podstawie obliczeń hydraulicznych i charakterystyk materiału dennego. Do weryfikacji wykorzystano pomiary batymetrii zbiornika z roku 2013. Na podstawie map i aktualnych pomiarów dna oszacowano rzeczywistą wielkość odkładu i szybkość zamulania części wstępnej zbiornika.

Przedstawione analizy cechują się dużym rozrzutem, co oznacza również znaczny poziom niepewności przedstawionych oszacowań. Stwierdzenie to dotyczy zarówno szybkości zamulania przedstawionej w postaci objętości odkładu na rok, jak i szacowanego czasu całkowitego zamulenia. Wartości skrajne, minimalne i maksymalne, znacznie odbiegają od wartości średnich. Także odchylenia standartowe obu wskaźników znacznie przekraczają akceptowalne wartości.

Zaskoczenie budzą wyniki uzyskane za pomocą formuł przystosowanych do liczenia natężenia transportu rumowiska w rzekach o piaszczystym dnie. Są to formuła Engelunda-Hansena, formuła Yanga, wzór Toffaletiego czy formuła Van Rijna. Również zmodyfikowana wersja wzoru Ackersa-White powinna sprawdzić się lepiej. Uzyskana rozbieżność wskazuje, że problem praktycznego wykorzystania formuł określających natężenie transportu rumowiska do szacowania szybkości zamulania zbiornika wymaga bardziej szczegółowych analiz.

Najbliższe rzeczywiste wyniki uzyskano za pomocą formuły Meyera-Petera i Müllera (MPM). jest to wzór stosowany najczęściej w przypadku rzek górskich. Jednak jego geneza nie ogranicza zastosowania do takich przypadków. Generalnie jest to formuła przystosowana do wyznaczania natężenia transportu rumowiska wlezonego. Jej solidne podstawy teoretyczne i duża ilość materiału wykorzystanego do weryfikacji wzoru MPM mogą tłumaczyć jej największą zgodność w analizowanym przypadku.

Przedstawione wnioski mogą być przydatne przy konstruowaniu bardziej złożonego modelu zamulania zbiornika. Niezależnie od konstrukcji algorytmu symulacyjnego, jego wyniki będą zależały od jakości formuły opisującej natężenie transportu rumowiska. W przedstawionym przypadku powinna być to formuła MPM. Jednak spostrzeżenie to nie odsuwa konieczności dalszych analiz i weryfikacji.

PIŚMIENNICTWO

- Ackers, P., White, W.R. (1973). Sediment transport: new approach and analysis. *J. Hydraulic Divis., ASCE*, 99(11), 2041–2060.
- Bagnold, R. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. *US Geological Survey, Prof. Paper 422-I*
- Bartnik, W., Michalik, A., Bednarczyk, T. (1988). Równanie transportu rumowiska dla rzek Podkarpacia. *Gosp. Wodna*, 7, 151–153.
- Brunner, G.W. (2010). HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, Computer Documentation Report. Report no. CPD-69. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC).

- Dysarz, T., Wicher-Dysarz, J. (2013). Analysis of Flow Conditions in the Stare Miasto Reservoir Taking into Account Sediment Settling Properties. *Annual Set The Environment Protection*, 15(1), 584–605.
- Dysarz, T., Wicher-Dysarz, J., Sojka, M. (2013). Analysis of highway bridge impact on the sediment redistribution along the Stare Miasto reservoir, Poland. *Proceed. 2013 IAHR Congress Tsinghua University Press Beijing*.
- Dysarz, T., Wicher-Dysarz, J., Sojka, M. (2014). Two approaches to forecasting of sedimentation in the Stare Miasto reservoir, Poland. *W: Reservoir Sedimentation*. Red. A.J. Schleiss, G. de Cesare, M.J. Franca, M. Pfister. Taylor & Francis Group, London, 119–127.
- Engelund, F., Hansen, H. (1966). Hydraulic resistance in alluvial streams. *J. Hydraulics Divis., ASCE*, 92(2), 315–326.
- Engelund, F., Hansen, E. (1972). A monograph on sediment transport in alluvial streams. *Teknisk Forlag, Technical Press, Copenhagen*.
- HR Wallingford (1990). Sediment transport, the Ackers and White theory revised. Report SR237, HR Wallingford, England.
- Huang, J.V., Greimann, B. (2012). SRH-1D 3.0 User's Manual, Sedimentation and River Hydraulics Group, Numerical Model Documentation and User's Manual. Technical Service Center, Bureau of Reclamation.
- Matuszewski, Sz. (2012). Jednowymiarowe modelowanie hydrodynamiki i transportu rumowiska w zbiorniku Stare Miasto. Maszynopis pracy magisterskiej, promotor J. Wicher-Dysarz. Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań.
- Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948). Formula for bed-load transport. *Proceed. International Association for Hydraulic Research, 2nd Meeting, Stockholm*.
- PN-R-04032:1998. Gleby i utwory mineralne – Pobieranie próbek i oznaczanie składu granulometrycznego.
- Radecki-Pawlik, A. (2011). *Hydromorfologia rzek i potoków górskich. Działy wybrane*, Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego, Kraków.
- Toffaletti, F.B. (1968). A procedure for computation of total river sand discharge and detailed distribution, bed to surface. Technical Report No. 5. Committee on Channel Stabilization, U.S. Army Corps of Engineers.
- Van Rijn, L.C. (1984a). Sediment transport. Part I: Bed load transport. *J. Hydraulic Engin.*, 110(10), 1431–1456.
- Van Rijn, L.C. (1984b). Sediment transport. Part II: Suspended load transport. *J. Hydraulic Engin.*, 110(11), 1613–1641.
- Wilcock, P.R. (2001). Toward a practical method for estimating sediment-transport rates in gravel bed rivers. *Earth Surf. Proces. Landf.*, 26, 1395–1408.
- Wilcock, P.R., Crowe, J.C. (2003). Surface-based transport model for mixed size sediment. *ASCE J. Hydraulic Engin.*, 129(2), 120–128.
- Yang, C.T. (1973). Incipient motion and sediment transport. *J. Hydraulic Divis., ASCE*, 99(10), 1679–1704.
- Yang, C.T. (1979). Unit stream power equations for total load. *J. Hydrology*, 40, 123–128.
- Yang, C.T. (1984). Unit stream power equation for gravel. *J. Hydraulic Divis., ASCE*, 110(12), 1783–1797.
- Yang, C.T. (1996). *Sediment Transport: Theory and Practice*. McGraw-Hill Companies, Inc., New York.

UNCERTAINTY IN ASSESSMENT OF ANNUAL INFLOW OF SEDIMENTS TO THE STARE MIASTO RESERVOIR BASED ON EMPIRICAL FORMULAE

Abstract. In the presented paper the analysis of uncertainty in assessment of annual sediment inflows to the Stare Miasto reservoir is presented. The reservoir is chosen because of its specific structure. It is two-stage reservoir. The upper part of the reservoir is separated from the main part by small upper dam with sluice gate. Upper part is smaller and plays a role of so called pre-dam reservoir designed to collect sediments. In this part the conditions for deposition of sediments are very good, what prevents from sedimentation of the main part. In the research the several data are used. These include reservoir bathymetry, hydraulic structures documentation, hydrologic data and water heads in the main dam. In the analyses the empirical formulae for sediment transport are implemented. The formulae used are Ackersa-White, MPM, van Rijn, Engelund-Hansen, Yang, Toffalet and Wilcock-Crow. The computations are verified on the basis of current bathymetry measurements and estimated real sediment deposition. The obtained results vary significantly, what indicated importance of the structural uncertainty in analysis of reservoir sedimentation.

Key words: reservoir sedimentation, sediment transport capacity, uncertainty, two-stage reservoirs

XXXIII OGÓLNOPOLSKA SZKOŁA HYDRAULIKI – Zakopane 2014

Zorganizowana pod patronatem

Komitetu Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk

przez

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Dofinansowanie:

Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Krakowie

Wydanie publikacji zostało dofinansowane przez MGGP S.A.



Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 10.02.2015

Do cytowań – For citation: Wicher-Dysarz, J., Dysarz, T. (2015). Niepewność szacowania rocznego dopływu rumowiska do zbiornika Stare Miasto na podstawie wzorów empirycznych. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 14(1), 201–212.