

## **ZASTOSOWANIE JEDNOWYMIAROWEGO MODELU NUMERYCZNEGO MORMO DO OBLICZEŃ ZMIAN RZĘDNYCH DŃA MAŁEGO ZBIORNIKA WODNEGO**

Bogusław Michalec

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

**Streszczenie.** Parametry hydrauliczne przepływu wody i rumowiska przy założeniu równomiernego przepływu oraz zmian geometrii przekrojów poprzecznych określane są standardowymi metodami matematycznymi za pomocą jednowymiarowych modeli. Przykładem takiego modelu jest jednowymiarowy model MORMO (MORphologisches MOdel), opracowany przez Schillinga i Hunzikera [1995] w Laboratorium Hydrotechnicznym Politechniki w Zurychu. Na podstawie trzynastoletniego ciągu hydrologicznego, obejmującego średnie dobowe przepływy wody i odpowiadające im koncentracje rumowiska unoszonego, wykonano za pomocą programu MORMO obliczenia numeryczne zamulania zbiornika wodnego w Rzeszowie. Wyniki obliczeń zostały porównane z wynikami pomiarów zamulania. Stwierdzono, że uzyskany za pomocą jednowymiarowego modelu MORMO profil podłużny zbiornika wodnego w Rzeszowie, przedstawiający zmianę dna w wyniku zamulenia, odpowiada rzeczywistemu przebiegowi zmian dna. Nie uzyskano rzeczywistego przebiegu zamulania, gdyż czas zamulania określony według symulacji okazał się krótszy od rzeczywistego czasu zamulania, wynoszącego 13 lat.

**Słowa kluczowe:** mały zbiornik wodny, zamulanie, prognoza, model jednowymiarowy

### **WSTĘP**

Metody prognozowania zamulenia zbiorników wodnych można podzielić na empiryczne i teoretyczne. Metody empiryczne opierają się na badaniach fizycznych realizowanych w terenie lub w laboratorium. Stosowane powszechnie metody empiryczne Ortha z 1934 roku [Dąbkowski i in. 1982], Šamova z 1959 roku [Dąbkowski i in. 1982], Gončarova z 1962 roku [Wiśniewski i Kutrowski 1973] i Łapszenkova z 1957 roku [Batuca i Jordaan 2000] zostały opracowane w wyniku badań zamulania zbiorników wodnych położonych w różnych regionach geograficznych. Miarodajne wyniki obliczeń redukcji pojemności zbiornika wodnego można uzyskać za pomocą tych metod, zachowując podobieństwo warunków hydrologicznych zlewni lub hydraulicznych i hydrodynamicznych panujących w zbiorniku do warunków, dla jakich zostały one opracowane.

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr hab. inż. Bogusław Michalec, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. A. Mickiewicza 24–28, 30-059 Kraków, e-mail: rmmichbo@cyf-kr.edu.pl.

Metody teoretyczne prognozowania zamulenia zbiorników wodnych to metody matematyczne, które można podzielić na analityczne i numeryczne. Wraz z rozwojem technik komputerowych matematyczny opis modelu dla ustalonych warunków początkowych i granicznych ruchu wody oraz rumowiska, w zależności od przyjętego ruchu ustalonego lub nieustalonego, rozwiązywany jest numerycznie [Morris i Fan 1998]. Walidacja metod prognozowania zamulania zbiorników wodnych, które to metody opracowuje się na drodze modelowania analitycznego lub numerycznego, dokonywana jest na podstawie wyników badań terenowych lub laboratoryjnych. W pracach badawczych nad modelami teoretycznymi niezbędne są badania modelowe. Modelowanie fizyczne opiera się na badaniu danego zjawiska poprzez odtwarzanie go w różnych skalach i analizowaniu wpływu cech fizycznych, a także jego rozmiarów oraz odzwierciedleniu naturalnych procesów. Doświadczenia modelowe dotyczą bezpośrednio badanego procesu fizycznego i sprowadzają się do zachowania stałości kryteriów podobieństwa określających model i obiekt. Modele fizyczne są stosowane zazwyczaj do modelowania zjawisk zbyt skomplikowanych dla modelu matematycznego [Morris i Fan 1998]. Równie często stosuje się połączenie obu metod dla lepszego zobrazowania przebiegu danego zjawiska.

Metody numeryczne obliczeń transportu rumowiska dają możliwości symulacji przepływu w jednym, dwóch i trzech wymiarach. Większość starszych modeli opiera się na jednowymiarowym modelu obliczeniowym i niektóre z nich działają sprawniej niż ich dwu- lub trójwymiarowe odpowiedniki [Morris i Fan 1998]. Najdokładniejszymi modelami, ze względu na opis zależności przestrzennych, są modele trójwymiarowe i to właśnie je stosuje się najczęściej do opisu wieloskalowych reżimów przepływu wód. Modele dwuwymiarowe, opisujące zmiany przepływu wody i sedimentów wraz z głębokością i wzdłuż średniego kierunku przepływu, są stosowane do opisu przepływu wody i rumowiska w przypadku znacznej zmienności danych hydraulicznych i morfologicznych koryta oraz brzegów cieku. Modelowanie przepływu wody i rumowiska w skomplikowanych systemach rzecznych, w systemach rzecznych wraz z terenami zalewowymi i w zbiornikach wodnych wymagają najczęściej zastosowania modeli dwu- i trójwymiarowych dla właściwego opisu przestrzennej niejednorodności analizowanych obszarów. Modele jednowymiarowe opisują przepływ w ośrodkach wodnych, uśredniony po powierzchni poprzecznej tego przepływu. Modele jednowymiarowe można stosować również do obliczeń małych, głębokich zbiorników wodnych, w których zmienność temperatury i innych parametrów wraz z głębokością może być przedstawiona w postaci połączonych jednorodnych warstw lub elementów objętościowych [Borysiewicz i in. 1999]. Wśród wielu jednowymiarowych modeli numerycznych najczęściej stosowanych wyróżnić można modele HEC-6 [Thomas i Prashum 1977], MIKE11, FLUVIAL [Chang 1988] i MORMO [Schilling, i Hunziker 1995]. Najpopularniejsze modele dwuwymiarowe to MIKE21, TABS-MD, CCHED2, HSCTM2D i GSTARS [Morris i Fan 1998]. Spośród modeli trójwymiarowych należy wymienić m.in. SSIIM, ECOMSED, CCHED3, Delft-3D [Batuca i Jordaan 2000].

Badania Molinas i Yanga [1986] dowodzą, że dwu- i trójwymiarowe modele potrzebują zbyt dużej liczby danych wejściowych wprowadzanych do komputera oraz niezbędnego czasu kalibracji, które mimo to mogą w sposób niedokładny opisywać modelowany proces. Z inżynierskiego punktu widzenia model jednowymiarowy jest równie dobry pomimo uproszczeń stosowanych w nim podczas kalibracji i wprowadzania danych,

a wyniki obliczeń są porównywalne z pozostałymi modelami. Cel niniejszej pracy stanowi określenie możliwości zastosowania jednowymiarowego modelu MORMO do obliczeń zmian rzędnych dna małego zbiornika wodnego. Wyniki pomiarów zamulenia zbiornika wodnego w Rzeszowie przeprowadzonych w 1986 roku zostały porównane z wynikami obliczeń numerycznych wykonanych w Laboratorium Hydrotechnicznym Politechniki w Zurychu.

## MATERIAŁ I METODY

Model MORMO (MORphologisches MOdell) opracowany przez Schillinga i Hunzikera [1995] umożliwia obliczenie zmiany rzędnych dna w profilu podłużnym cieków, kanałów i zbiorników wodnych. Przeprowadzenie symulacji zmian rzędnych dna zbiornika wodnego w Rzeszowie wymagało przygotowania plików wejściowych z danymi geometrycznymi, które obejmowały przekroje poprzeczne i profil podłużny, a także plików z danymi hydrologicznymi i granulometrycznymi rumowiska. Prognozę zamulenia, określoną na podstawie zmiany dna zbiornika wodnego opracowano, opierając się na danych archiwalnych z okresu 1972–1986, obejmującego lata od roku oddania obiektu do eksploatacji do roku, w którym wykonano pomiar zamulenia.

Matematyczną podstawą opisu transportu sedymentów modelu MORMO są równania hydrauliczne St. Venanta [Hunziker 1995]:

– równanie ciągłości przepływu wody:

$$B_w \frac{\partial z_w}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

– równanie zachowania pędu:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( B_v \cdot \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left( \frac{\partial z_w}{\partial x} + J_e \right) = qv \quad (2)$$

– równanie spadku linii energii:

$$J_e = \left( \frac{Q/A}{kR^{1.5}} \right)^2 \quad (3)$$

i równania dotyczące warunków sedymentacji opisanych równaniami Exnera [Hunziker 1995]:

– równanie ciągłości przepływu sedymentów:

$$B \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial (q_b B)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

– równanie transportu sedymentów w postaci ogólnej:

$$q_b = f(R_b, J, d) \quad (5)$$

gdzie:

- $A$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego,
- $B$  – szerokość pasa przepływu wody,
- $d$  – średnica ziaren rumowiska,
- $J$  – spadek zwierciadła wody,
- $J_e$  – spadek linii energii,
- $k$  – chropowatość absolutna dna,
- $Q$  – przepływ całkowity wody,
- $q$  – przepływ jednostkowy wody,
- $q_B$  – przepływ jednostkowy sedimentów,
- $R$  – promień hydrauliczny,
- $R_b$  – promień hydrauliczny, określony dla wydzielonej warstwy przydennej,
- $t$  – czas,
- $v$  – prędkość przepływu wody,
- $z_b$  – wysokość warstwy transportowanych sedimentów,
- $z_w$  – wysokość napelnienia w korycie cieku.

Zmienne zależne w nieliniowych równaniach różnicowych (1), (2) i (3) stanowią wartości  $z_w(x, t)$ ,  $Q(x, t)$  i  $z_b(x, t)$ . W jednowymiarowym modelu zmiennymi niezależnymi są  $x$  i  $t$ . Pierwotnie rozwiązanie układu równań wymagało znacznych uproszczeń, zwłaszcza równań (1) i (2) [Hunziker 1995]. Z końcem lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku powstały nowe generacje modeli numerycznych, które pozwoliły rozwiązać równania różnicowe (1), (2) i (3) [Holly i Rachuel 1989].

Program MORMO został napisany w języku Fortran. Bazowym programem modelu MORMO jest program FUNCT przetwarzający dane dotyczące geometrii profili i przekrojów poprzecznych. Drugim podprogramem jest moduł obliczeniowy WAPROF, który służy do obliczeń przepływu ustalonego i niejednostajnego w korytach otwartych. Dane do modułu FUNCT wprowadzono za pośrednictwem pliku FUNIN, w którym zdefiniowano geometrię koryta, tj. przekroje poprzeczne i odległości między nimi, szorstkość dna i brzegów. W programie FUNCT ustalono na podstawie wprowadzonego hydrografu m.in. szerokość zwierciadła wody, napelnienie, promień hydrauliczny i przepustowość przekrojów poprzecznych. Zgromadzone i stabelaryzowane dane opracowane zostały w podprogramie pomocniczym FUNGEO. W programie WAPROF obliczono zmiany poziomu zwierciadła wody w kolejnych krokach czasowych wynikające z charakterystyki przepływów przedstawionej za pomocą hydrogramu oraz zmiany parametrów geomorfologicznych koryta, w tym te, które stanowiły rezultat spiętrzenia wody na skutek odkładania się rumowiska. W podprogramie pomocniczym GRAINTAB zostały przygotowane dane obejmujące skład granulometryczny rumowiska pobranego z rzeki Wisłoki w przekrojach powyżej zbiornika, a także skład granulometryczny osadów dennych. Transport rumowiska obliczono zgodnie z formułami tzw. modelu wieloziarnowego (*das Mehrkornmodell*) stanowiącego kombinację formuł Meyer-Petera i Müllera lub Smarta i Jaeggi, których wyniki każdorazowo porównywane były automatycznie w programie FUNCT z obliczeniami wg formuł podanych przez Ashida i Michiue lub Hunzikera. Założenia teoretyczne odnaleźć można w pracach Schillinga i Hunzikera [1995] oraz Hunzikera [1995].

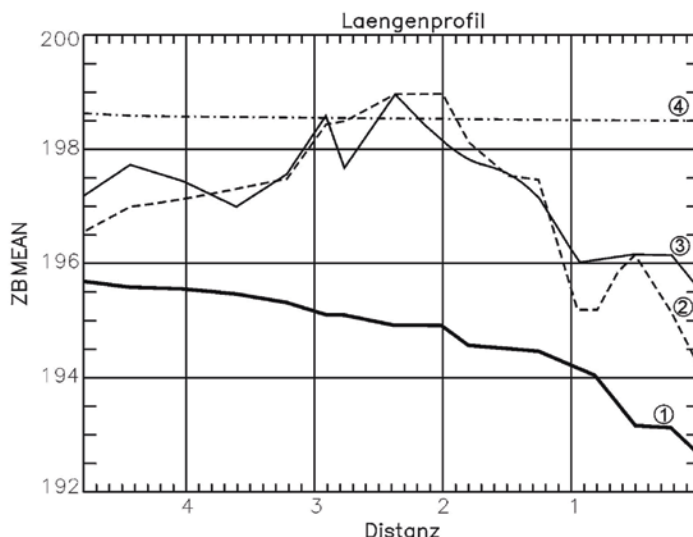
Objętość osadów rumowiska w zbiorniku wodnym w Rzeszowie została określona w dniu 10 lipca 1986 roku przez Podkarpacki Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych w Rzeszowie. Pomiary zamulenia polegały na ustaleniu zmiany rzędnych dna zbiornika w przekrojach poprzecznych. Pomiary te wykonano sondą drążkową z łodzi. Na podstawie wyników pomiarów określono zmiany pól powierzchni w przekrojach poprzecznych.

Prognozę zmian dna zbiornika wodnego wykonano, wprowadzając do modelu wartości przepływu średniego dobowego i odpowiadającej mu koncentracji rumowiska unoszonego. Rezultaty numerycznej symulacji przedstawione zostały w postaci profilu podłużnego, na którym wykazano zmiany rzędnych dna, przy zdefiniowanym kroku czasowym równym jednej dobie.

## WYNIKI

Rezultaty obliczeń dokonanych za pomocą jednowymiarowego modelu MORMO dowiodły, że ten model dobrze opisuje zmiany dna w zbiorniku w Rzeszowie. Wyniki pomiarów zamulenia z 1986 roku, po 13 latach eksploatacji zbiornika wodnego, wykazały, że zgromadzone drobnoziarniste rumowisko utworzyło osady wyłaniające się ponad lustro wody normalnego poziomu piętrzenia (krzywa 2 na rys.). Osady te znajdowały się w odległości od 1900 do 2600 m od zapory. Całkowita objętość rumowiska zatrzymanego w zbiorniku wodnym wynosiła 1188 tys. m<sup>3</sup>, stanowiąc 66% jego objętości pierwotnej [Michalec 2008]. Obliczone za pomocą programu MORMO rzędne dna zbiornika w Rzeszowie, odpowiadające zamuleniowi stanowiącemu 66% jego objętości pierwotnej, przedstawia krzywa 3 na rysunku. Uzyskany w wyniku obliczeń profil podłużny dna zbiornika wskazuje na tworzenie się ponad lustrem zwierciadła wody osadów rumowiska, którego oszacowana objętość jest mniejsza od objętości pomierzonej. Według obliczeń ilość osadów rumowiska będzie większa w części wlotowej do zbiornika, czyli w odległości od 3800 do 5000 m od zapory, oraz w części przyczaporowej, tj. w odległości do 1200 metrów od zapory. Ze względu na wydłużony kształt zbiornika w Rzeszowie uzyskane wyniki symulacji zmian rzędnych dna są zbliżone do rzeczywistego przebiegu procesu wypłycania zbiornika. Rozbieżności wynikają z przeznaczenia tego typu modeli do obliczeń transportu rumowiska rzeczno-ego i zmian rzędnych dna w wyniku erozji lub odkładania się materiału mineralnego w korytach rzek i potoków albo korytowych zbiorników wodnych o zwartych przekrojach poprzecznych, co potwierdzają wyniki prac m.in. Hunzikera i Zarna [2001] oraz Rickenmanna [2005].

Nie można natomiast odnieść wyników symulacji do czasu rzeczywistego. Trudność polega na tym, że według obliczeń programem MORMO zamulenie zbiorników przebiegało w krótszym czasie, niż wynikało to z badań i pomiarów terenowych. Rezultaty numerycznej symulacji zostały przedstawione w postaci profilu podłużnego, na którym wykazano zmiany rzędnych dna, przy zdefiniowanym kroku czasowym równym jednej dobie. Zmiany dna zbiornika po 13 latach eksploatacji, określone na podstawie pomiarów zamulenia, przedstawia krzywa 2 na rysunku. Krzywa 3 obrazuje wyniki obliczeń wykonanych programem MORMO, wykonane dla 4113 kroku czasowego, równego jednej dobie, co odpowiada ponad 11 latom eksploatacji.



Rys. Profil podłużny zmian dna w osi zbiornika wodnego Rzeszów, wydruk wyniku symulacji programem MORMO: 1 – rzędne dna według projektu, 2 – rzędne dna według pomiarów zamulenia, 3 – rzędne dna według programu MORMO, 4 – zwierciadło wody, Distanz – odległość w kilometrach od zapory zbiornika, ZBMEAN – rzędne w m n.p.m.

Fig. Longitudinal profile of river-bed changes on the axle of the Rzeszów water reservoir, the printout of the results of the simulation with the software MORMO: 1 – river-bed ordinates acc. to design, 2 – river-bed ordinates acc. to measurement, 3 – river-bed ordinates acc. to MORMO programme, 4 – water level, Distanz – distance from a dam of the reservoir in kilometers, ZBMEAN – ordinates in m a.s.l.

## WNIOSKI

Uzyskany za pomocą jednowymiarowego modelu MORMO profil podłużny zbiornika wodnego w Rzeszowie przedstawiający zmianę dna w wyniku zamulenia odpowiada wynikom pomiarów zamulania. Nie uzyskano rzeczywistego czasu zamulania, wynoszącego 13 lat, gdyż zbieżność wyników obliczeń i wyników pomiarów zamulania uzyskano dla 4113 kroku czasowego (krok równa się jednej dobie), co odpowiada 11 latom eksploatacji zbiornika w Rzeszowie.

Model MORMO, jak każdy jednowymiarowy model opisujący przepływ rumowiska w ośrodkach wodnych, którego parametry hydrauliczne i hydrodynamiczne określone są za pomocą wartości średnich w przekroju poprzecznym, może służyć prognozowaniu zmiany dna w profilu podłużnym. Ten typ modelu może być stosowany z powodzeniem w obliczeniach symulacyjnych transportu rumowiska w systemach rzek i kanałów oraz korytowych zbiorników wodnych.

## PIŚMIENNICTWO

- Batucu G.D., Jordaan M.J. Jr., 2000. Silting and Desilting of Reservoirs. A.A.Balkema Rotterdam.  
 Borysiewicz M., Potemski S. Zheleznyak M., 1999. Programy do obliczeń transportu skażeń w ośrodkach wodnych. Raport Inst. Energii Atomowej w Świerku. IEA Warszawa.

- Chang H.H., 1988. Fluvial processes in river engineering. John Wiley & Sons New York.
- Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A., 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych. PWRiL Warszawa.
- Holly F.M., Rachuel J.L., 1989. Advances in Numerical Simulation of Alluvial-River Response to Disturbances. Proc. IAHR 23<sup>rd</sup> Congress Ottawa, 211–223.
- Hunziker R.P., 1995. Fraktionsweiser Geschiebetransport. Mitteilungen Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 138, ETH Zürich.
- Hunziker R.P., Zarn B., 2001. Morphologie und Geschiebehaushalt Alpenrhein. Zusammenfassender Bericht über die Untersuchungen zwischen 1985 und 2000. Projekt Nr. A-108, Aarau und Domat/Ems Hunziker, Zarn and Partner Ingenieurbuero für Fluss- und Wasserbau 39.
- Michalec B., 2008. Ocena intensywności procesu zamulania małych zbiorników wodnych w dorzeczu Górnej Wisły. Zesz. Nauk. UR Krak. 451, Rozprawy 328.
- Molinas A., Yang C.T., 1985. Generalized Water Surface Profile Computations. ASCE J. Hydraul. Eng. 111, 3, 381–397.
- Morris G.L., Fan J., 1998. Reservoir sedimentation handbook. Design and management of dams, reservoirs and watersheds for sustainable use. Mc Graw Hill New York.
- Rickenmann D., 2005. Geschiebetransport bei steilen Gefällen. [W:] Tagungspublikation zu VAW 75 Jahre, Festkolloquium 7. Oktober 2005. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich 190, 107–119.
- Schilling M., Hunziker R.P., 1995. Programm MORMO (MORphologisches MOdell). [W:] Mathematische Modelle offener Gerinne. Konstruktiver Wasserbau – Landschaftswasserbau 17, 91–104.
- Thomas W.A., Prashum A.L., 1977. Mathematical model of scour and deposition. J. Hydraul. Divis., ASCE 110, HY11, 1613–1641.
- 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 ONE DIMENSIONAL MODEL NUMERIC MORMO TO THE CALCULATIONS OF THE CHANGES OF THE ORDINATES OF THE BOTTOM OF THE SMALL WATER RESERVOIR

**Abstract.** The hydraulic parameters of the flow of water and sediment with the assumption of the steady flow and the changes of the geometry of cross-sections are defined standard mathematical methods for the help of one dimensional models. The one dimensional model MORMO (MORphologisches MOdell) is example of such model, worked out by Schilling and Hunziker [1995] in the Hydraulic Engineering Laboratory of Swiss Federal Institute of Technology in Zurich. The numeric calculations of silting the Rzeszów water reservoir, on the basis of the thirteen-year-old sequence of hydrological, including the average hour flows of water and the answering them concentrations of suspended sediments, executed for the help of the program MORMO, they were compared with the results of the measurements of silting. Affirm that the obtain for the help of the one dimensional model MORMO the longitudinal profile of the water reservoir in Rzeszów, representing the change of the bottom in the result of silting, its answer the real course of the bottom changes. The proceeding of the real course of silting was not obtain because the time of silting, definite according to the simulation turned out shorter until real silting time, carrying out 13 years.

**Key words:** small water reservoir, silting, forecast, one dimensional model

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.04.2010*