

Marlena ŻELAZOWSKA, Dorota MIROŚLAW-ŚWIĄTEK

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW w Warszawie
Department Hydraulic Engineering and Environmental Restoration WULS – SGGW

Model hydrodynamiczny przepływu wielkich wód rzecznych w Basenie Dolnym Biebrzy

Hydrodynamic model of a flood wave propagation in the Lower Biebrza Basin

Słowa kluczowe: model hydrodynamiczny, UNET HEC-RAS, Numeryczny Model Terenu, Basen Dolnej Biebrzy

Key words: hydrodynamic model, UNET HEC-RAS, Digital Elevation Model, the Lower Biebrza Basin

Wprowadzenie

Stan ekosystemów fluwiogenicznych uzależniony jest głównie od warunków zasilania ich wodami wezbraniowymi. Możliwość występowania na tych terenach określonego typu roślinności bagiennej związana jest z występowaniem na danym obszarze corocznych wezbrań o określonym czasie trwania i głębokości. Istnieje zatem silny związek między skupiskami roślinności a warunkami hydrologicznymi sprzyjającymi ich rozwojowi. Najważniejsze charakterystyki warunkujące wzrost i rozwój roślinności (Oświt 1991, Hooijer 1996, Żalewski i in. 1997) to przede wszystkim powierzchnia zalewu, średnia głębokość zalewu i czę-

stotliwości występowania oraz długości trwania zalewów. Modele hydrodynamiczne w połączeniu z technikami GIS (Świątek i Chormański 2007, Świątek i in. 2008) pozwalają na uzyskiwanie niezbędnych danych do wyznaczenia powyższych charakterystyk hydrologicznych. Są także narzędziem pozwalającym poprawnie ocenić wpływ różnego sposobu zagospodarowania doliny rzecznej na hydrauliczne warunki przepływu. Mogą być stosowane w procesie wspomagania decyzji projektowych, inwestycyjnych i operacyjnych w zakresie ochrony przeciwpowodziowej oraz ocen oddziaływania na środowisko.

Dolina Biebrzy, a w szczególności jej basen dolny jest niezwykle cennym obiektem przyrodniczym, a występujące tu coroczne zalewy są istotnym czynnikiem kształtującym specyficzne warunki siedliskowe, wpływające na unikatowy charakter tego terenu. Model hydrodynamiczny, umożliwiający poprawny opis przepływu wód wezbraniowych w tym obszarze, może być wykorzystywany

jako narzędzie badawcze dla prowadzenia efektywnej polityki ochrony walorów przyrodniczych na terenie Biebrzańskiego Parku Narodowego.

Obszar badań

Dolina Biebrzy położona jest w północno-wschodniej części Polski. Badania dotyczyły Basenu Dolnej Biebrzy, który zajmuje południową część doliny, od miejscowości Osowiec po ujście do Narwi. Długość południowego basenu wynosi 30 km, a szerokość waha się od 12 do 15 km. Największą powierzchnię na tym terenie zajmuje taras zalewowy, który obejmuje płaskie, rozległe torfowiska oraz nieznacznie sfalowaną mułową strefę przykorytową o szerokości do 1–2 km (Żurek 1991). Koryto rzeki na tym odcinku ma kręty przebieg, tworzy liczne meandry, boczne odnogi i starorzecza, przez które woda przepływa podczas wezbrań. Szerokość koryta waha się od około 20 do 35 m. Koryto jest wyraźnie wyodrębnione, a w południowej części, w rejonie ujścia do Narwi, mocno wcięte w dno doliny (Okruszek i in. 2003). Najważniejsze dopływy Biebrzy w dolnym odcinku to prawobrzeżna Klimaszewnica i Wissa oraz lewobrzeżna Kosódka. Dolina Dolnej Biebrzy ma charakterystyczny strefowy układ zbiorowisk roślinnych, który w pełni odzwierciedla warunki wodne panujące na analizowanym terenie. Zgodnie z wcześniejszym rozpoznaniem Oświt (1968, 1973) wyróżnia pięć stref roślinnych: zbiorowiska szuwarowe *Phragmition*, zbiorowiska szuwarów turzycowych *Magnocari-cion*, zbiorowiska turzycowo-mszyste *Scheuchzeria caricetea fuscae*, zakrze-

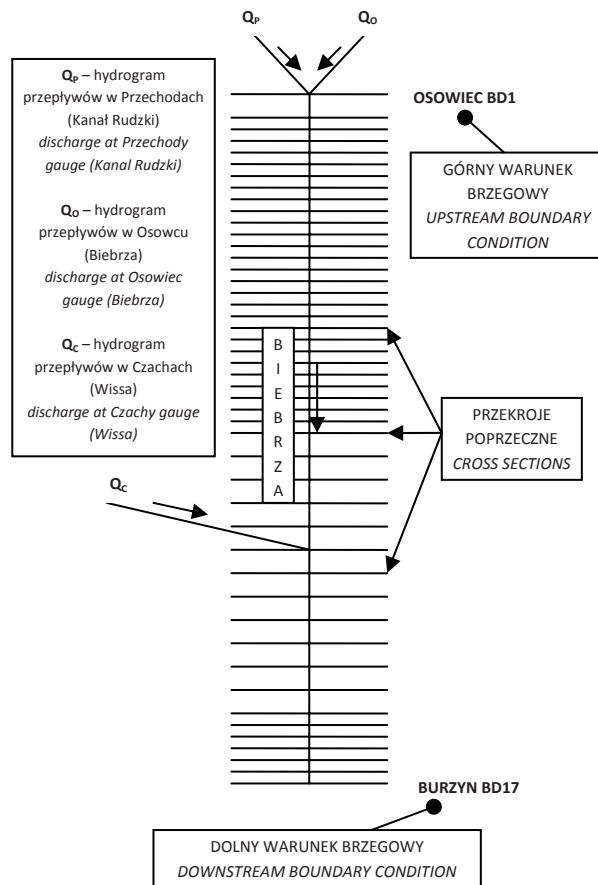
wienia wierzb i brzozy oraz zbiorowiska lasów olchowych i brzożowo-olchowych *Alnetea glutinosae*.

Model hydrodynamiczny UNET dla Basenu Dolnej Biebrzy

W obliczeniach symulacyjnych wykorzystano model UNET (One-Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels – Barkau 1982), wbudowany w pakiet obliczeniowy programu HEC-RAS. Program UNET realizuje numeryczne rozwiązanie matematycznego modelu przepływu wody w korytach otwartych, bazując na układzie równań Saint-Venanta (HEC 2000). Dla Basenu Dolnej Biebrzy opracowano model przepływu wód rzecznych na odcinku BD1 – Burzyn (rys. 1). Obszar przepływu opisany jest przez 47 przekrojów obejmujących koryto rzeki i teren zalewowy (rys. 3).

Górny warunek brzegowy zdefiniowano w postaci hydrogramu przepływów w przekroju BD1, który stanowiła suma przepływów dla wodowskazu w Osowcu na rzece Biebrza i dla wodowskazu Przechody na Kanale Rudzkim. Dolny warunek brzegowy opisano za pomocą krzywej przepływu dla wodowskazu w Burzynie (przekrój BD17). Zasilanie ze strony głównego dopływu Wissa opisano jako punktowy dopływ boczny zlokalizowany w przekroju BD11, wykorzystując dane dla wodowskazu Czachy.

Dostępne dane hydrologiczne z wodowskazów: Osowiec, Przechody, Czachy oraz Burzyn, wykazują, że w okresie corocznych zalewów wiosennych odpływ z badanego obszaru (wodowskaz Burzyn) jest znacznie większy niż suma



RYSUNEK 1. Schemat topologiczny przyjęty w modelu UNET
 FIGURE 1. Topological model representation (UNET)

dopływów z wodowskazów Osowiec, Przechody i Czachy, co wskazuje na silne zasilanie ze zlewni różnicowej (Mirosław-Świątek i in. 2007) – rysunek 2. W opracowanym modelu hydrodynamicznym, ze względu na słabe rozpoznanie zasilania pochodzącego ze strony wód gruntowych i roztopowych, dopływ ze zlewni różnicowej opisano za pomocą następującego uproszczonego wzoru:

$$Q_{lateral}(t) = Q_{out}(t) - Q_{in}(t) - Q_{Wissa}(t)$$

gdzie:

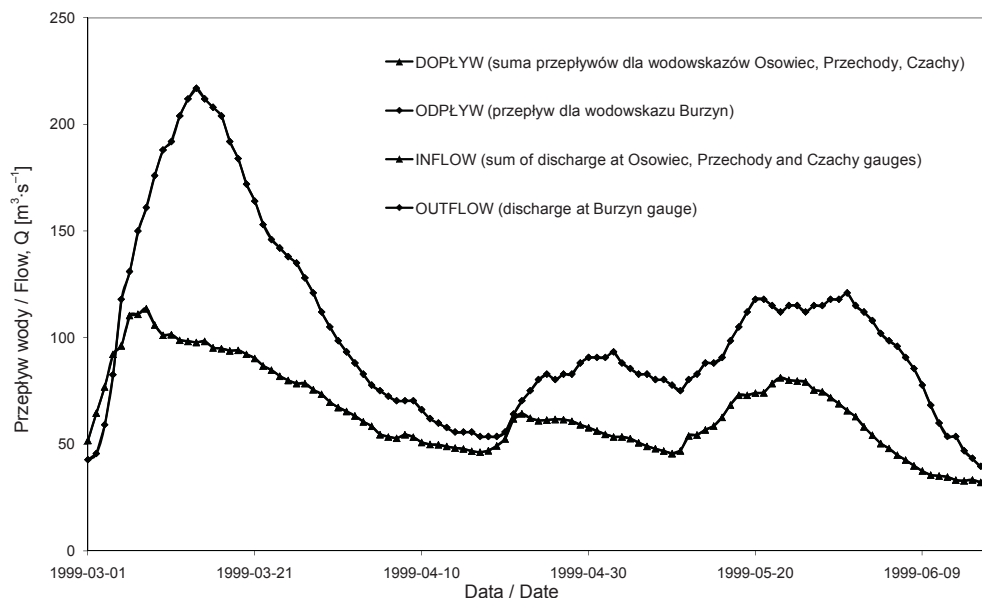
$Q_{lateral}(t)$ – przepływ ze zlewni różnicowej w czasie t [$m^3 \cdot s^{-1}$],

$Q_{out}(t)$ – przepływ w Burzynie w czasie t [$m^3 \cdot s^{-1}$],

$Q_{in}(t)$ – przepływ w przekroju BD1 w czasie t [$m^3 \cdot s^{-1}$],

$Q_{Wissa}(t)$ – przepływ w Czachach w czasie t [$m^3 \cdot s^{-1}$].

W taki sposób opisany dopływ ze zlewni różnicowej rozłożono równomiernie wzdłuż rzeki.



RYSUNEK 2. Hydrogramy dopływu i odpływu (Q) dla Biebrzy Dolnej w okresie 01.03.1999 – 17.06.1999

FIGURE 2. The comparison inflow with outflow for Biebrza River lower basin in time period 01.03.1999 – 17.06.1999

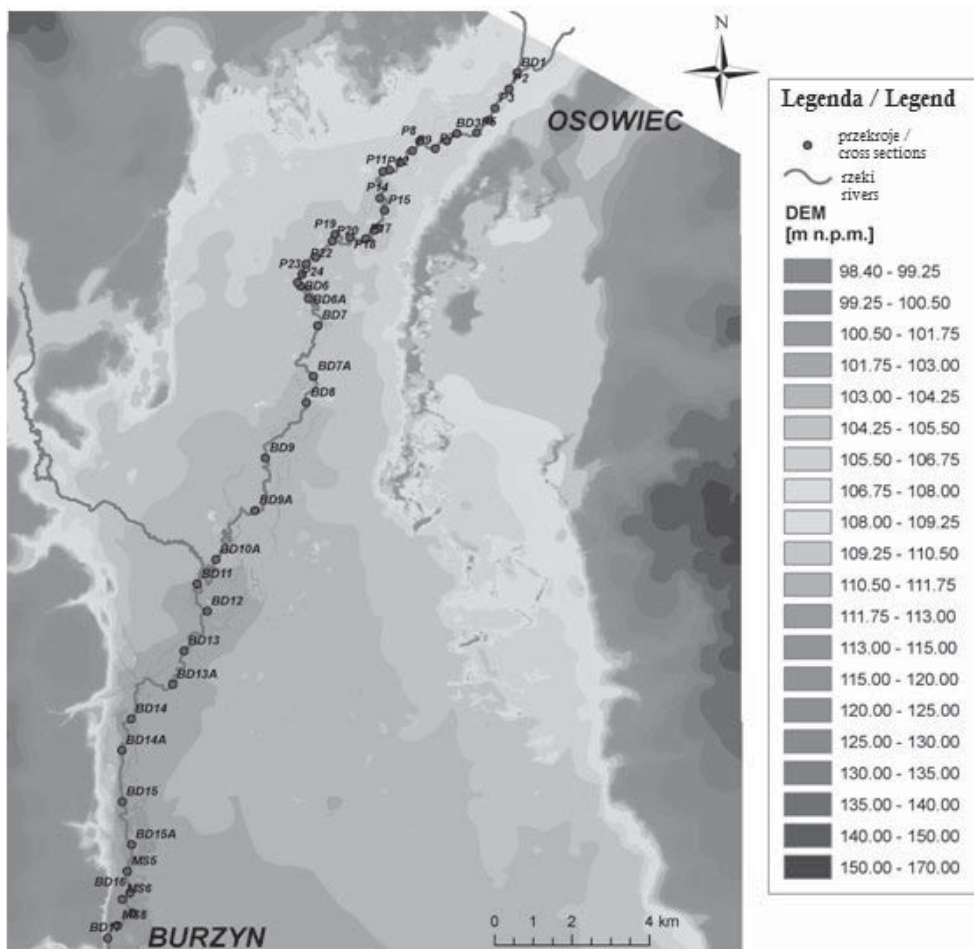
Kształt koryta i terenów zalewowych opisano za pomocą 47 przekrojów na odcinku od BD1 do Burzyna. Analizowany odcinek rzeki Biebrzy ma długość 41,5 km. Kanał Rudzki uchodzi do rzeki Biebrzy około 8 km powyżej przekroju otwierającego BD1, natomiast na około 14,5 kilometrze uchodzi prawy dopływ – Wissa.

Kształt koryta Biebrzy uzyskano w wyniku sondowania rzeki w ramach prac badawczych wykonanych w Katedrze Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW. Topografię terenów zalewowych określono na podstawie analizy istniejącego Numerycznego Modelu Terenu (Świątek i Chormański 2007) – rysunek 3. NMT opracowano przy użyciu programu ArcGIS, wykorzystując procedurę interpolacyjną TOPO, bazującą na algorytmie ANUDEM (Hutchinson

1996). Model przedstawia kształt doliny w postaci mapy rastrowej o rozdzielczości 25 m. Głównym źródłem danych do stworzenia NMT były zdigitalizowane warstwy z mapy topograficznej w skali 1 : 25 000 oraz wysokościowe punkty pomierzone na transektach prostopadłych do rzeki za pomocą techniki GPS. Opracowany model wysokościowy terenu charakteryzuje się błędem średnim kwadratowym o wartości nieprzekraczającej 0,35 m (Chormański 2003).

Identyfikacja i weryfikacja modelu

Głównym zadaniem modelu jest odwzorowanie przepływu wezbrań w Basenie Dolnym Biebrzy. Prawidłowo opracowany model powinien także odwzorowywać przepływy nieprzekraczające



RYSUNEK 3. Model wysokościowy terenu Basenu Dolnej Biebrzy oraz lokalizacja przekrojów obliczeniowych

FIGURE 3. Digital Elevation Model of the Lower Biebrza Basin with location of the cross – sections used for development of the DEM and hydraulic model

wody brzegowej. W tym celu model hydrodynamiczny został zidentyfikowany i zweryfikowany dla stanu ustalonego i nieustalonego.

Współczynniki oporów przepływu na terenie doliny opisano za pomocą współczynnika Manninga. Wartości współczynnika Manninga w korycie wyznaczono dla każdego przekroju w wyniku eksperymentów numerycznych, kalibrując model

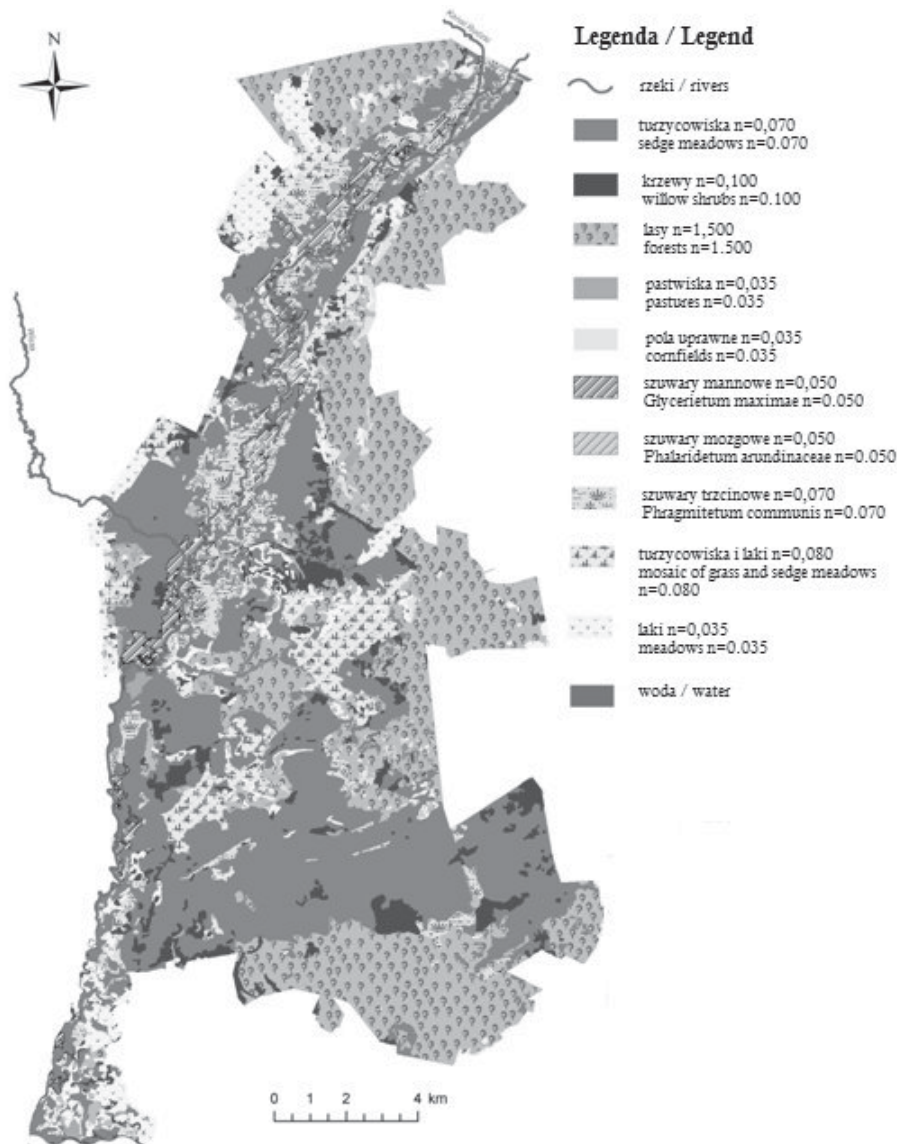
zgodnie z położeniem zwierciadła wody we wrześniu 2007 roku. Wartość współczynnika Manninga wahała się w korycie od 0,025 do 0,040.

Na terenach zalewowych współczynniki szorstkości oszacowano według tablic Chowa (1959), uwzględniając przestrzenne zróżnicowanie roślinności w przekrojach obliczeniowych, określone na podstawie mapy roślinności spo-

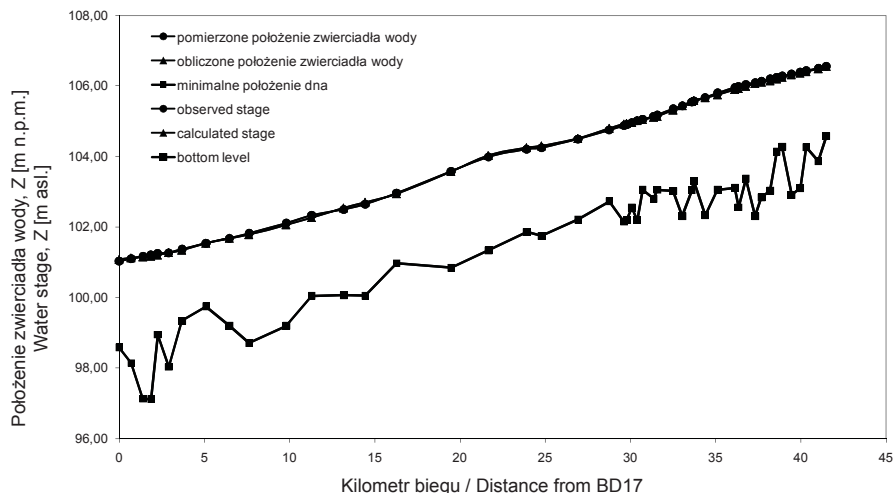
rzędzonej przez Matuszkiewicz i innych (2000) – rysunek 4.

Stan ustalony analizowano na podstawie danych pomiarowych dotyczących położenia zwierciadła wody w korycie z września 2007 roku. Przepływ

w przekroju BD1 wynosił $21,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a dopływ boczny z Wissy równy był $1,70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Błąd średni kwadratowy dla stanu ustalonego wynosił $0,03 \text{ m}$ (rys. 5). Największą różnicę między stanem pomierzonym a obliczonym stwierdzono



RYSUNEK 4. Przestrzenny rozkład współczynnika Manninga (n) w Basenie Dolnej Biebrzy
FIGURE 4. Spatial hydraulic roughness described by Manning's coefficient (n value) in the Lower Biebrza Basin



RYSUNEK 5. Pomierzone i obliczone położenie zwierciadła wody na odcinku Osowiec – Burzyn (stan ustalony, 2007)

FIGURE 5. Observed and calculated water stage profile from Osowiec to Burzyn gauge (steady state, 2007)

w przypadku przekroju BD13, wynosiła ona 0,07 m, co w stosunku do maksymalnej głębokości w danym przekroju stanowi błąd równy około 3%. Wykonanie obliczeń dla stanu ustalonego miało na celu identyfikację współczynnika Manninga w przekrojach obliczeniowych koryta głównego rzeki. Wyznaczone współczynniki szorstkości zostały następnie wykorzystane do weryfikacji modelu dla stanu nieustalonego obejmującego okres od 12.09.2005 roku do 31.10.2005 roku. Dla tego okresu dysponowano pomiarami ciągłymi wykonanymi za pomocą automatycznych rejestratorów położenia zwierciadła wody w korycie rzeki. Czujniki zostały zlokalizowane w pięciu miejscach wzdłuż rzeki. Pomiar położenia zwierciadła wody prowadzony był w odstępie czasowym równym 6 godzin. Maksymalny błąd średni kwadratowy (BSK) wynosił w tym przypadku 0,14 m (tab. 1), co stanowi 5% głębokości rzeki.

TABELA 1. Wartości błędów obliczone dla położenia rzędnej zwierciadła wody – diversy

TABLE 1. Variation of the mean square error (RMSE) for water stage – divers

Nazwa divera Divers' name	BSK Mean square error (RMSE) [m]
D1 Pale	0,06
D2 Klimaszewnica	0,05
D3 Okrasin	0,10
D4 Kosódka	0,04
D5 Chyliny	0,14

Opracowany model zidentyfikowano dla wezbrania wiosennego, w okresie od 1.03.1999 roku do 17.06.1999 roku (rys. 2), opierając się na danych pomiarowych dotyczących stanów wody oraz przepływów wody. Ponieważ wezbranie to charakteryzuje się dużą wartością przepływu maksymalnego ($217 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), więc wybrano je do identyfikacji modelu. W procesie identyfikacji modelu określano rozmiar stref aktywnych na

terenie zalewowym, które biorą udział w przepływie wody.

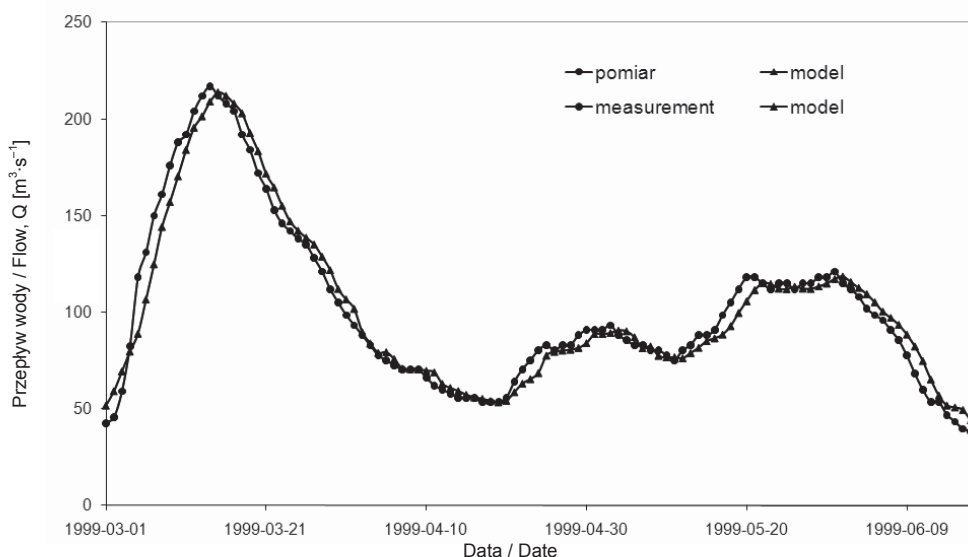
Wyniki obliczeń dla wezbrania z 1999 roku porównano ze stanem zaobserwowanym dla wodowskazu Burzyn. Błąd średni kwadratowy dla przepływu w przekroju BD17 wynosił $8,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (rys. 6). W przypadku największej wartości przepływu równej $217 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, która wystąpiła 14.03.1999 roku, różnica między pomierzoną wartością a modelem wynosi $7,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, co stanowi 3,6% odnotowanego przepływu. Błąd średni kwadratowy w odniesieniu do położenia zwierciadła wody wynosił 0,04 m (rys. 7). Przy największym odnotowanym stanie w dniu 14.03.1999 roku, wynoszącym 102,36 m n.p.m., różnica między modelem a stanem obserwowanym wynosi 0,01 m.

Opracowany model zweryfikowano dla wezbrania z 1992 roku (rys. 8), które było zdecydowanie mniejsze od wez-

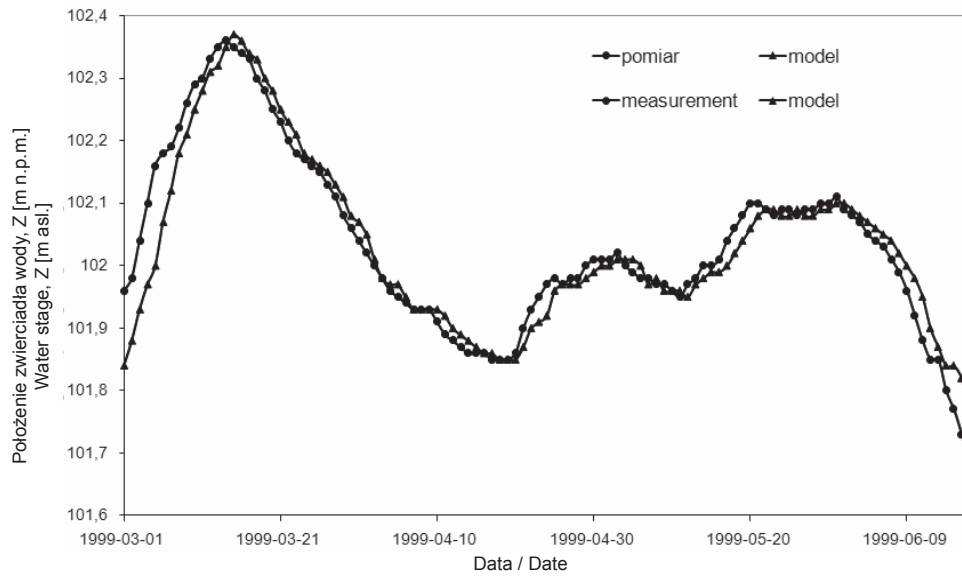
brania w 1999 roku. W tym przypadku uzyskano także zadowalające rezultaty w przekroju BD17 w odniesieniu do obserwacji wodowskazowych w Burzynie. Błąd średni kwadratowy wynosił dla przepływu $1,64 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a dla położenia zwierciadła wody 0,12 m (rys. 9).

Wnioski

Uzyskane wyniki symulacji przepływu wezbrań w Basenie Dolnym Biebrzy pokazują, że opracowany model hydrodynamiczny za pomocą modelu UNET umożliwia analizę dynamiki przepływu fal wezbraniowych w tym rejonie. Uzyskane błędy w zakresie zgodności przepływów i położenia zwierciadła wody dla wodowskazu Burzyn, pomimo że charakteryzują się małymi wartościami, nieprzekraczającymi wartości kilku metrów sześciennych na sekundę i kilkunastu

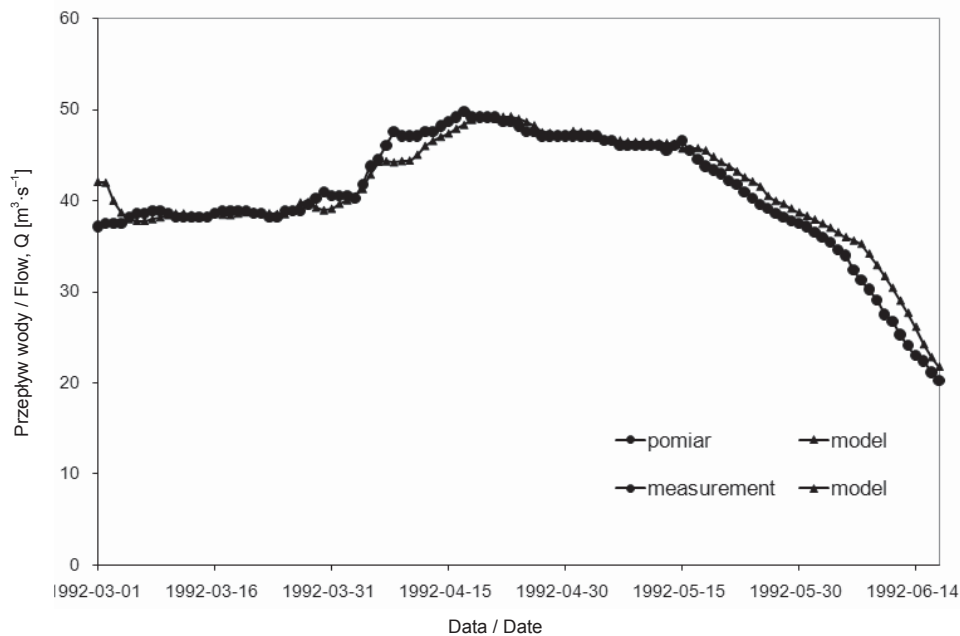


RYSUNEK 6. Pomierzone i obliczone przepływy dla wodowskazu Burzyn (01.03.1999 – 17.06.1999)
FIGURE 6. Observed and calculated flow at Burzyn gauge (01.03.1999 – 17.06.1999)



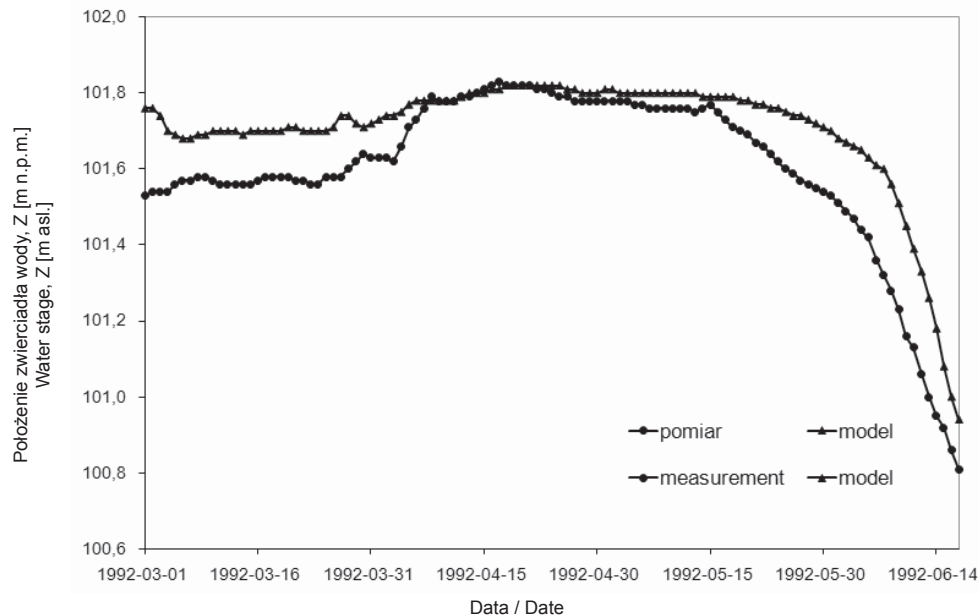
RYSUNEK 7. Pomierzone i obliczone położenie zwierciadła wody dla wodowskazu Burzyn (01.03.1999 – 17.06.1999)

FIGURE 7. Observed and calculated water stage at Burzyn gauge (01.03.1999 – 17.06.1999)



RYSUNEK 8. Pomierzone i obliczone przepływy dla wodowskazu Burzyn (01.03.1992 – 17.06.1992)

FIGURE 8. Observed and calculated flow at Burzyn gauge (01.03.1992 – 17.06.1992)



RYSUNEK 9. Pomierzone i obliczone położenie zwierciadła wody dla wodowskazu Burzyn (01.03.1992 – 17.06.1992)

FIGURE 9. Observed and calculated water stage at Burzyn gauge (01.03.1992 – 17.06.1992)

centymetrów, nie gwarantują poprawności modelu dla pozostałego obszaru doliny. Niestety brak obserwacji przebiegu wezbrań na terenach zalewowych uniemożliwia tego typu weryfikację. Dlatego też należałoby prowadzić automatyczny monitoring położenia zwierciadła wody w korycie rzeki oraz na terenach zalewowych. Tego typu dane pozwoliłyby na pełną weryfikację opracowanego modelu hydrodynamicznego.

Istotne przy analizie wezbrań jest określenie ich zasięgu. W tym celu wyniki z jednowymiarowego modelu hydrodynamicznego powinny być za pomocą technik GIS i numerycznego modelu terenu reprezentowane w postaci map obszarów zalanych. Takie podejście może być szczególnie przydatne przy określeniu wpływu projektowanych

i wdrażanych działań ochronnych na terenie Biebrzańskiego Parku Narodowego na dynamikę wezbrań.

Literatura

- BARKAU A. 1982: Simulation of the July 1981 Flood Along the Salt River. Report for CE695BV, Special Problems in Hydraulics, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft, Collins, CO.
- CHORMAŃSKI J. 2003: Methodology for the flood extent determination in the Lower Biebrza Basin. Ph. D. thesis, Warsaw Agricultural University – SGGW.
- CHOW Ven TE 1959: Open – Chanel hydraulics. McGraw Hill Book Company, New York.
- HEC 2000: HEC-RAS River Analysis System – User’s Manual. US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center.

- HOOIJER A. 1996: Floodplain hydrology: An ecologically oriented study of the Shannon Callows, Ireland. Thesis, Virje Universiteit Amsterdam.
- HUTCHINSON M.F. 1996: A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation model. Third International Conference / Workshop of Integrating GIS and Environmental Modelling, Santa Fe, NM, 21–26.01.1996, Santa Barbara, CA, National Center for Geographic Information and Analysis.
- MATUSZKIEWICZ A.J., GŁOWACKA I., JAKUBOWSKI W., KAMIŃSKI J., MYŚLIŃSKI G., SOBCZYŃSKI L. 2000: Plan ochrony Biebrzańskiego Parku Narodowego. Operat: Ochrona lądowych ekosystemów nieleśnych. Maszynopis. NFOŚiGW, BPN, Warszawa.
- MIROSLAW-ŚWIĄTEK D., CHORMAŃSKI J., MICHAŁOWSKI R. 2007: Zastosowanie modelu hydrodynamicznego przepływu wody i techniki GIS do wyznaczania charakterystyk zalewów na obszarze łęgowej doliny rzecznej. *Zesz. Prob. Post. Nauk Rol.* 519.
- OKRUSZKO T., WASILEWICZ M., DEMBEK W., RYCHARSKI M., MATUSZKIEWICZ A. 2003: Analiza zmian warunków wodnych, szaty roślinnej i gleb bagna Ławki w dolinie Biebrzy. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie* 3, 1 (7).
- OŚWIT J. 1968: Strefowy układ zbiorowisk roślinnych jako odzwierciedlenie stosunków wodnych w dolinie dolnej Biebrzy. W: Zagospodarowanie i użytkowanie torfowisk. *Zesz. Prob. Post. Nauk Rol.* 83.
- OŚWIT J. 1973: Warunki rozwoju torfowisk w dolinie dolnej Biebrzy na tle stosunków wodnych. *Roczn. Nauk Rol.* D, 143.
- OŚWIT J. 1991: Roślinność i siedliska zabagnionych dolin rzecznych na tle warunków wodnych. [Vegetation and wetland habitats against the background of water conditions]. *Rocz. Nauk Rol.* 221.
- ŚWIĄTEK D., CHORMAŃSKI J. 2007: Verification of the numerical river flow model by use of remote sensing. Balkema – Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences. Proceedings of the International Conference W3M “Wetlands: Modelling, Monitoring, Management”. 22–25 September 2005, Wierzbica, Poland.
- ŚWIĄTEK D., SZPORAK S., CHORMAŃSKI J. 2008: Hydrodynamic model of the lower Biebrza River flow – a tool for assessing the hydrologic vulnerability of a floodplain to management practice. *Ecohydrology & Hydrobiology* 8: 2–4.
- ZALEWSKI M., JANAUER G.A., JOLANKAI G. 1997: A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources. UNESCO IHP Technical Document in Hydrology 7. IHP-V Projects 2.3/2.4, UNESCO Paris, Ecohydrology.
- ŻUREK S. 1991: Geomorfologia Pradoliny Biebrzy. W: Bagna Biebrzańskie. *Zesz. Prob. Post. Nauk Rol.* 372.

Summary

Hydrodynamic model of a flood wave propagation in the Lower Biebrza Basin.

The aim of this work is calibration of a 1D numerical model of river flow within the Lower Biebrza Basin. To simulate the flow in the Biebrza valley, a one-dimensional unsteady open – channel flow model UNET, which is a component of computer software HEC-RAS, was applied. The geometry of the river channel and floodplain are described by cross sections in the number of 47. The river cross sections were measured by manual sounding for the main channel part and topography of the floodplain was calculated from the Digital Elevation Model. Plant's map was used to define spatial hydraulic roughness, which was described by Manning's coefficient (n value) using Chow's tables, in the floodplain, and n values for the river channel were selected during calibration process of model. The hydrodynamic model was calibrated for measured and historical date for flood in 1992 and 1999.

Author's address:

Dorota Mirosław-Świątek
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warsaw
Poland
e-mail: dorota_miroslaw_swiatek@sggw.pl