

ALBERT MALINGER¹, TOMASZ KALUŻA², BEATA GRZONKA¹, TOMASZ GRZELKA¹

¹Institut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie
Oddział w Poznaniu

²Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA DANYCH LIDAROWYCH DO BUDOWY HYDRODYNAMICZNEGO MODELU PRZEPIYU NA PRZYKŁADZIE ODCINKA RZEKI WARTY

POSSIBILITIES OF USING LIDAR DATA IN BUILDING A HYDRODYNAMIC
FLOW MODEL ON THE EXAMPLE OF THE WARTA RIVER SECTION

Streszczenie. W pracy podjęto próbę wykorzystania danych pochodzących z lotniczego skaningu laserowego do opracowania 2-D hydrodynamicznego modelu przepływu wody w rzece Warcie na odcinku Nowe Miasto nad Wartą – Solec. Dane lidarowe wykorzystano również do oszacowania wartości współczynników szorstkości charakteryzujących opory przepływu. Wyniki obliczeń maksymalnych rzędnych zwierciadła wody w rzece zestawiono z maksymalnymi rzędnymi zwierciadła wody pochodzącymi z niwelacji śladów wielkiej wody pozostawionymi na korze drzew. Na tej podstawie wykonano wstępną analizę możliwości wykorzystania danych z lotniczego skaningu laserowego do budowy modelu i oceny współczynników szorstkości terenów zalewowych.

Słowa kluczowe: lotniczy skaning laserowy, współczynniki szorstkości, przepustowość koryta, rzeka Warta

Wstęp

Opracowanie precyzyjnych matematycznych modeli hydraulicznych związane jest z koniecznością pozyskania wiarygodnych danych stanowiących ich podstawę. W przypadku gdy obliczenia są prowadzone z wykorzystaniem dwuwymiarowego modelu przepływu, uśrednionego względem głębokości, prócz danych z zakresu hydrologii niezbędne są dane dotyczące ukształtowania terenu, tj. numeryczny model terenu, dane o istniejących budowach hydrotechnicznych, mostowych oraz dane o oporach przepływu

w korycie i wywoływanych przez roślinność porastającą teren zalewowy i brzegi koryta głównego.

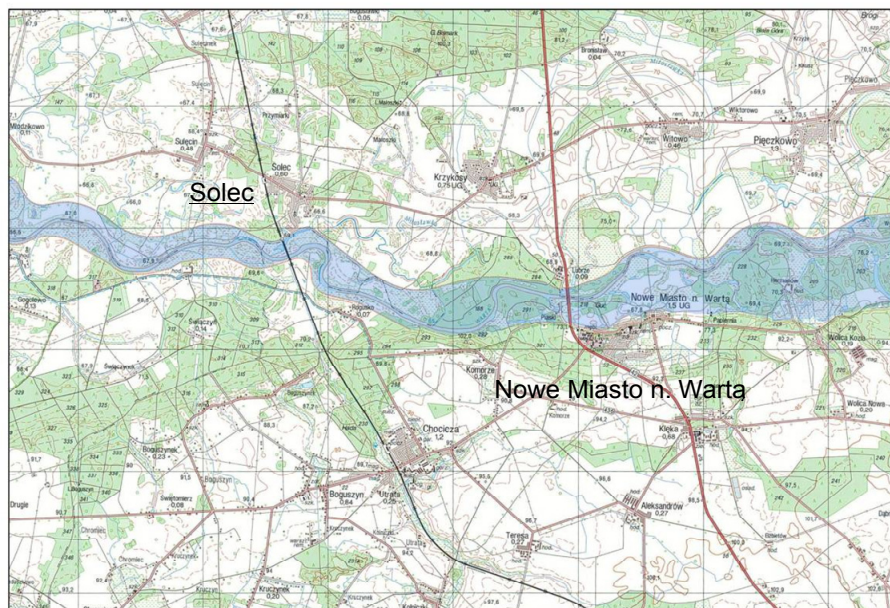
Analiza przepustowości koryt otwartych w warunkach występowania różnorodnych skupisk roślinności wiąże się z badaniem struktury i parametrów geometrycznych roślin. Istotną cechą jest tu także wysokość roślin. Metody oszacowania parametrów roślinnych zależą przede wszystkim od rodzaju i jakości źródeł informacji oraz charakterystyki roślin. Wykorzystać tu można interpretację danych o szacie roślinnej uzyskaną na podstawie: dzienników pomiarów terenowych, opisów taksacyjnych, operatów urzędzeniowych nadleśnictw, map gospodarczo-przeładowych nadleśnictw czy wreszcie zdjęć lotniczych, satelitarnych lub ortofotomapy (MALINGER 2001).

Wyznaczenie parametrów roślinnych warunkuje możliwości poprawnego oszacowania oporów przepływu wody w rzece. Niestety, metody oparte na pomiarach bezpośrednich są czasochłonne i mało precyzyjne, wymagają również uprzedniego zdefiniowania i wyodrębnienia wszystkich obszarów odpowiadających poszczególnym typom pokrycia terenu oraz przypisania im odpowiednich wartości współczynników szorstkości, np. na podstawie tablic CHOWA (1959). Obecnie wraz z rozwojem nowych technik geomatycznych wybór źródeł informacji uległ jeszcze rozszerzeniu o wykorzystanie zdjęć hemisferycznych, pomiarów urządzeniem LAI-2000 oraz danych ze skaningu laserowego. W literaturze napotkać można prace, w których proponuje się np. teledetekcyjną analizę struktury roślinności terenów zalewowych, pozwalającą na automatyczną klasyfikację obrazów (GOŁUCH i IN. 2004), czy też automatyczną estymację wartości współczynników oporu przepływu wód na podstawie danych uzyskanych za pośrednictwem zdjęć lotniczych i skaningu laserowego (TYMKÓW i IN. 2006). Rozwój metod opartych na zintegrowanej analizie optycznej wskazuje szansę na bardziej wiarygodne i precyzyjne pomiary parametrów roślinnych, które będzie można wykorzystać w obliczeniach hydraulicznych.

Celem przeprowadzonych badań była próba wykorzystania informacji pochodzących z lotniczego skaningu laserowego do opracowania wiarygodnej, a przy tym możliwie prostej metody uzyskania danych charakteryzujących opory wywołane obecnością roślinności podczas przepływów wielkiej wody.

Materiały i metody

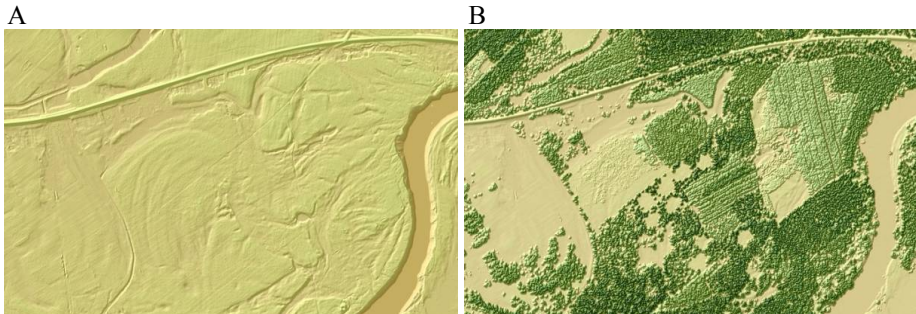
Analizie poddano informacje uzyskane z lotniczego skaningu laserowego dla odcinka rzeki Warty zlokalizowanego między mostem drogowym w Nowym Mieście nad Wartą a mostem kolejowym zlokalizowanym w miejscowości Solec (rys. 1). Tereny zalewowe koryta wielkiej wody są tu ograniczone wałami przeciwpowodziowymi (w pobliżu Solca) lub też naturalnym, wysokim brzegiem doliny (w pobliżu Nowego Miasta). Międzywał, szczególnie w pobliżu Nowego Miasta nad Wartą, charakteryzuje się dodatkowo zwartymi kompleksami leśnymi, które objęte są intensywną gospodarką leśną (KAŁUŻA i JESSE 1997). Przeciętna lesistość na tym terenie sięga 72%, choć w przypadku przekrojów km 321+982 i km 323+328 przekracza 80%. Źródłem informacji o drzewostanach na tym terenie są mapy gospodarczo-przeładowe Leśnictwa Nowe Miasto (Nadleśnictwo Jarocin) w skali 1 : 10 000 oraz dane zawarte w operatach leśnych. Tereny zalewowe w pobliżu Solca stanowią łąki i nieużytki, na których rozwijają się zarośla i zakrzaczenia wierzbowe.



Rys. 1. Lokalizacja analizowanego odcinka Warty
 Fig. 1. Location of the analysed section of the Warta River

Dane pochodzące z lotniczego skaningu laserowego dla badanego terenu pozyskano ze zdjęć lidarowych wykonanych w ramach projektu ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju) w 2011 roku. Podstawowym celem projektu jest utworzenie systemu poprawiającego osłonę społeczeństwa, gospodarki i środowiska przed skutkami powodzi oraz innymi nadzwyczajnymi zagrożeniami. Cel ten ma zostać osiągnięty m.in. poprzez opracowanie map zagrożenia powodziowego, map ryzyka powodziowego. Z uwagi na cel i charakter projektu ISOK kluczowymi danymi przestrzennymi niezbędnymi do przeprowadzenia pracochłonnego i skomplikowanego procesu modelowania hydrodynamicznego stref zalewowych, a także opracowania map zagrożenia i ryzyka powodziowego, są Numeryczny Model Terenu (NMT) oraz Numeryczny Model Pokrycia Terenu (NMPT). Produkty te są opracowywane na podstawie lotniczego skaningu laserowego (ang. *Airborne Laser Scanning* – ALS), nowoczesnej technologii gromadzenia danych wysokościowych charakteryzujących się bardzo dużą dokładnością pomiaru, rzędu kilku centymetrów. Wykonany w ramach projektu skaningu laserowego dolin głównych rzek Polski stanowi nową jakość w pozyskaniu precyzyjnych danych umożliwiających budowę modeli hydrodynamicznych rzek.

W ramach realizowanych badań na podstawie zdjęć lidarowych oraz zdjęć lotniczych doliny Warty opracowano Numeryczny Model Terenu (rys. 2 A) oraz Numeryczny Model Pokrycia Terenu (rys. 2 B). Modele wykonano na podstawie chmury punktów o gęstości minimalnej 6 punktów na 1 m², charakteryzującej się dokładnością wysokościową (błędem średnim) punktów laserowych po wyrównaniu $m_h \leq 0,15$ m oraz dokładnością sytuacyjną $m_p \leq 0,50$ m.



Rys. 2. Fragment Numerycznego Modelu Terenu (A) i Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu (B) terenów zalewowych Warty

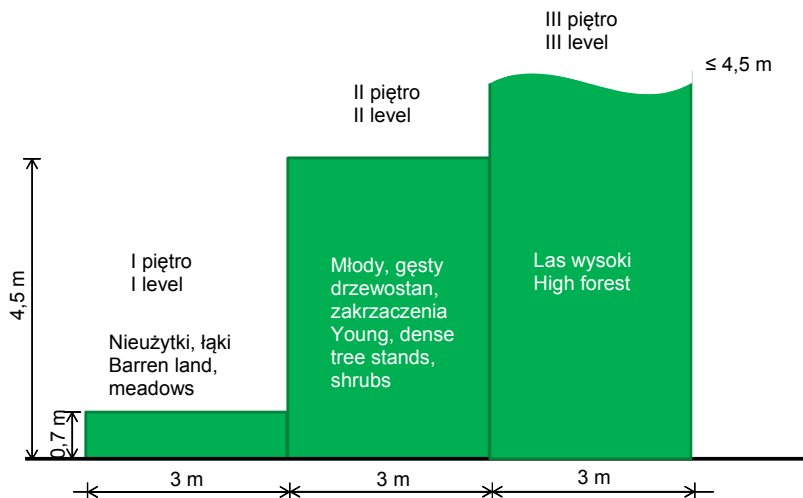
Fig. 2. Fragment of a Digital Terrain Model (A) and a Digital Land Cover Model (B) of the Warta River floodplain

Na podstawie wizji terenowych oraz analizy zdjęć lotniczych rozróżniano kilka rodzajów pokrycia terenu. Przyjęto, iż do najczęściej występujących na całym badanym odcinku należą: lasy wysokie, młody gęsty drzewostan, nieużytki oraz grunty orne, jak również występujące rzadziej małe oczka wodne, będące najczęściej skutkiem meandrowania rzeki. W kolejnym etapie przeprowadzono analizę przestrzenną za pomocą narzędzi GIS. Wykorzystując Numeryczny Model Terenu oraz Numeryczny Model Pokrycia Terenu, otrzymano uśrednione wysokości szaty roślinnej na rozpatrywanym obszarze. Wartości te zostały przypisane do pojedynczych pikseli o wymiarach 1×1 m, utworzono w ten sposób nową, rastrową warstwę tematyczną.

Ze względu na różnorodność pokrycia analizowanego obszaru wyodrębniono trzy piętra roślinności: niską, średnią i wysoką. Zabieg ten pozwolił na zdefiniowanie danych (w odniesieniu do pojedynczego piksela) dotyczących występowania „roślinności niskiej”, nie przekraczającej 0,7 m i reprezentującej łąki oraz nieużytki, „roślinności średniej”, nie przekraczającej 4,5 m wysokości i reprezentującej młody drzewostan, oraz „roślinności wysokiej”, przekraczającej wysokość 4 m i reprezentującej lasy wysokie (rys. 3). Dodatkowo na podstawie fotointerpretacji zdjęć lotniczych zdefiniowano obszary odpowiadające gruntom ornym, oczkom wodnym i korytu rzeki. Procedura ta pozwoliła na uzyskanie warstwy rastrowej o wymiarach pojedynczego piksela 1×1 m definiującej przestrzenną lokalizację trzech pięter roślinności, gruntów ornych, oczek wodnych oraz koryta rzeki (rys. 4).

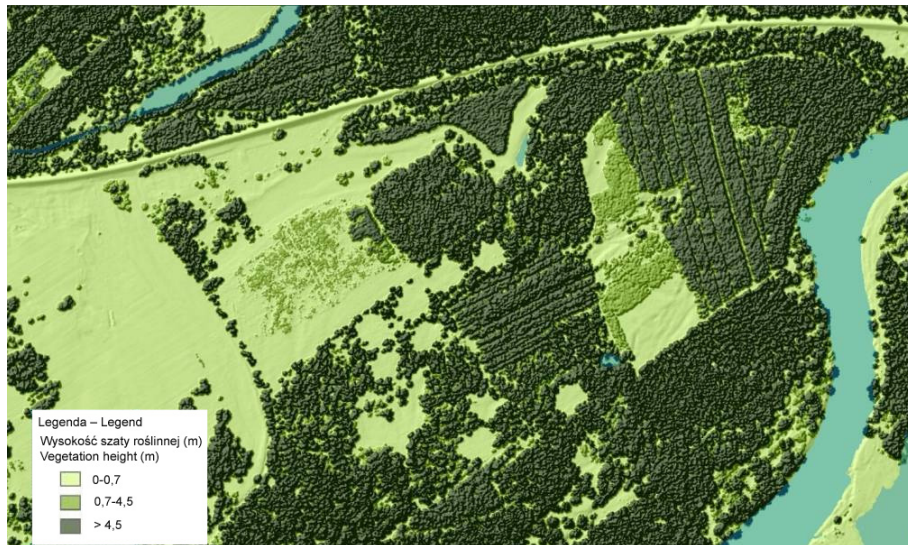
Z rastra reprezentującego przestrzenną lokalizację trzech pięter roślinności, gruntów ornych, oczek wodnych oraz koryta rzeki uzyskano informację na temat procentowego udziału poszczególnych obszarów (rys. 5). Największy udział przypadł roślinności niskiej – 38,6% i wysokiej – 32,1%. Nieco mniejszy obszar, bo 11,5% całkowitej powierzchni, zajmowała woda płynąca, a 10,2% – grunty orne. Najmniejszy udział przypadł wodzie stojącej (oczka wodne) – 4,7% oraz roślinności średniej – 2,9%.

Mając przygotowaną warstwę rastrową, przystąpiono do kolejnego etapu pracy, tj. określenia wartości współczynników szorstkości dla typu użytków. W tym celu każdy rozpatrywany rodzaj pokrycia terenu przyporządkowano do z góry założonej wartości



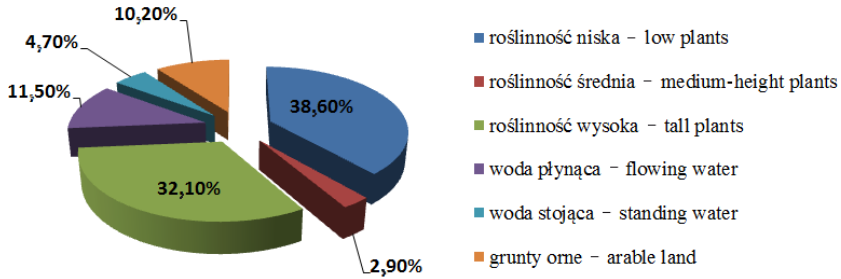
Rys. 3. Schematyczny podział szaty roślinnej

Fig. 3. Schematic vegetation distribution



Rys. 4. Fragment numerycznego modelu podziału szaty roślinnej analizowanego odcinka Warty

Fig. 4. Fragment of a digital model of vegetation distribution of the analysed section of the Warta River



Rys. 5. Procentowy udział roślinności na analizowanym odcinku Warty
 Fig. 5. Percentage share of vegetation on the analysed section of the Warta River

współczynnika. Uzyskano w ten sposób mapę współczynników szorstkości o rozdzielczości 1×1 m (rys. 6). Do ustalenia wartości współczynników szorstkości posłużono się opublikowanymi przez CHOWA (1959) ich stabilaryzowanymi wartościami. W badaniach przyjęto następujące wartości współczynników szorstkości:

- lasy wysokie – $0,045 \text{ (m}^{-1/3} \cdot \text{s)}$,
- młody drzewostan – $0,050 \text{ (m}^{-1/3} \cdot \text{s)}$,
- nieużytki – $0,040 \text{ (m}^{-1/3} \cdot \text{s)}$,
- grunty orne – $0,038 \text{ (m}^{-1/3} \cdot \text{s)}$,
- zbiorniki wodne – $0,055 \text{ (m}^{-1/3} \cdot \text{s)}$.



Rys. 6. Przypisanie współczynników szorstkości Manninga – wizualizacja rastra 1×1 m
 Fig. 6. Application of Manning's roughness coefficients – raster visualization 1×1 m



Rys. 7. Generalizacja danych. Przypisanie współczynników szorstkości Manninga – wizualizacja rastra 3×3 m

Fig. 7. Data generalization. Application of Manning's roughness coefficients – raster visualization 3×3 m

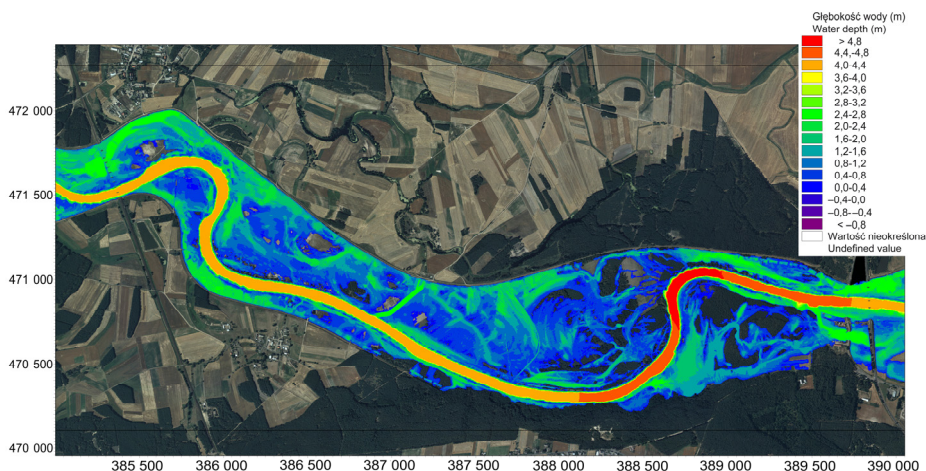
W ramach ostatniego etapu prac przeprowadzono procedurę implementacji danych do modelu matematycznego. Procedura ta polegała na generalizacji warstwy rastrowej do rozdzielczości terenowej 3×3 m (rys. 7). Zabieg ten był niezbędny ze względu na zastosowanie zgeneralizowanego numerycznego modelu terenu o wymiarach pojedynczego piksela 3×3 m.

Podane uprzednio wartości współczynników szorstkości uwzględniono podczas obliczeń na dwuwymiarowym matematycznym modelu hydrodynamicznym odcinka rzeki Warty. Do obliczeń wykorzystano numeryczny model terenu, który został wzbogacony o dane o ukształtowaniu dna rzeki Warty pochodzące z przekrojów poprzecznych koryta głównego tej rzeki wykonywanych metodą ADCP.

Wyniki obliczeń hydraulicznych

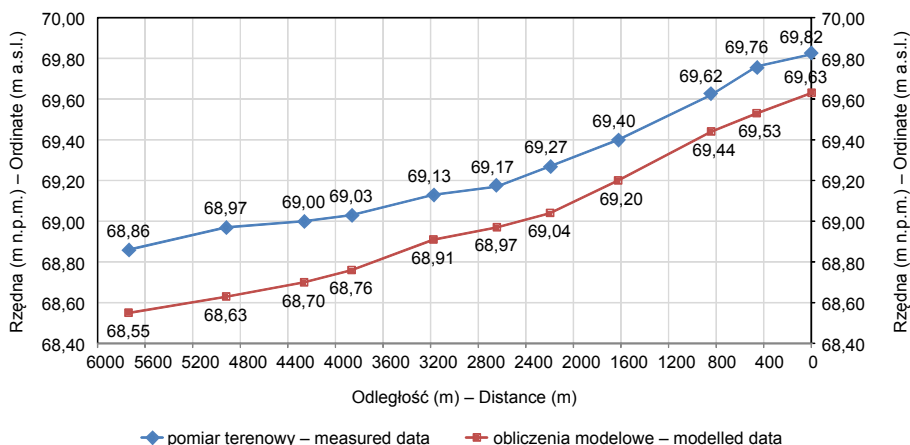
Obliczenia hydrauliczne wykonano dwuwymiarowym, uśrednionym względem głębokości, modelem przepływu MIKE 21 Duńskiego Instytutu Hydrologii (MIKE 21... 2009). Przepływ został opisany równaniami wyprowadzonymi z prawa zachowania masy i pędu. Równania te były całkowane w czasie i przestrzeni niejawną metodą naprzemiennych kierunków (ang. *Alternating Direction Implicit* – ADI). Dzięki zastosowaniu centralnych numerycznych schematów różnicowych dla wszystkich głównych członów równań i ich współczynników uzyskano rozwiązanie dokładne pod względem zachowania masy i pędu. Szczegóły metod aproksymacji równań i metod numerycznych, z jakich korzysta się w procesie rozwiązania, są dostępne w dokumentacji programu MIKE 21.

W celu wykonania obliczeń niezbędne było zdefiniowanie tzw. warunków brzegowych modelu. Górny warunek brzegowy stanowił hydrogram przepływów ustalony na podstawie stanów zarejestrowanych w profilu wodowskazowym zlokalizowanym w Nowej Wsi Podgórnej w czasie powodzi w 2010 roku. Dolny warunek brzegowy stanowiła krzywa przepływu przygotowana na podstawie przeniesienia krzywej natężenia przepływu z przekroju położonego kilometr poniżej mostu kolejowego w miejscowości Solec. Łączna długość modelowanego odcinka rzeki Warty wyniosła 7500 m i była zlokalizowana na obszarze o długości boków 5085×1923 m. Model zawierał 1 086 495 węzłów obliczeniowych. W wyniku przeprowadzonych obliczeń wyznaczono rzędne zwierciadła wody, prędkości i kierunki przepływu w warunkach przejścia fali powodziowej w 2010 roku. Ze zbioru wyników obliczeń wybrano maksymalne wartości rzędnych zwierciadła wody przy przepływie fali powodziowej. W ten sposób wyznaczono maksymalne rzędne zwierciadła wody oraz głębokości w każdej komórce obliczeniowej na rozpatrywanym obszarze (rys. 8).



Rys. 8. Wizualizacja rozkładu głębokości na analizowanym odcinku Warty
 Fig. 8. Depth distribution visualization on the analysed section of the Warta River

W celu zweryfikowania wyników obliczeń porównano je z układem zwierciadła wody na tym odcinku z powodzi 2010 roku. W tym celu dokonano niwelacji śladów pozostawionych na korze drzew przez wielką wodę podczas tej powodzi. Pod uwagę wzięto drzewa znajdujące się w terenie zalewowym rzeki Warty. Niwelacja polegała na wyznaczeniu rzędnych kilkunastu punktów wybranych na całej długości badanego odcinka. Wzniesienie punktów określających ślad po wielkiej wodzie określono za pomocą dwóch niezależnych odbiorników GPS RTK. Na rysunku 9 przedstawiono rzędne zwierciadła wody na długości badanego odcinka rzeki Warty uzyskane na podstawie niwelacji w terenie oraz uzyskane z obliczeń. Z porównania wynika, że rzędne wody uzyskane z obliczeń były niższe średnio o 26 cm. Największa różnica (w przekroju mostu kolejowego w Solcu) wynosiła 34 cm. Wyniki obliczeń modelowych odzwierciedliły poprawnie lokalne spadki zwierciadła wody na tym odcinku rzeki.



Rys. 9. Porównanie rzędnych zwierciadła wody uzyskanych z niwelacji i z obliczeń modelowych na analizowanym odcinku Warty

Fig. 9. Comparison of water surface elevations from measurements and model calculations on the analysed section of the Warta River

Podsumowanie

Celem badań była ocena możliwości wykorzystania danych lidarowych do opracowania wiarygodnej metody uzyskania danych charakteryzujących opory wywołane obecnością roślinności na terenach zalewowych. Jest to szczególnie istotne przy wyznaczaniu map współczynników szorstkości w zaawansowanych modelach hydrodynamicznych. Opracowana metoda szacowania oporów podczas przepływów wielkiej wody jest stosunkowo szybka i łatwa. Dzięki wykorzystaniu narzędzi GIS i wykonaniu szeregu analiz z użyciem danych lidarowych można uzyskać informacje o rozmieszczeniu określonych skupisk roślinności. Na podstawie przygotowanej warstwy rastrowej każdego rodzajowi pokrycia terenu można przyporządkować określoną wartość współczynnika szorstkości. Uzyskano w ten sposób mapę współczynników szorstkości o określonej rozdzielczości.

Wykorzystana metoda pozwala wyznaczyć piętra roślinności. W metodach opartych tylko na zdjęciach lotniczych podstawową trudnością było wyznaczenie piętra „roślinności średniej”, w którym dominują krzewy. Stosując dane ze skaningu laserowego, wyznaczenie dowolnej warstwy wysokościowej roślinności nie stanowi już problemu.

Wykonane obliczenia hydrauliczne wykazały, że dla poprawności opisu hydraulicznego koryt otwartych z terenami zalewowymi pokrytymi roślinnością istotne jest poprawne oszacowanie wartości współczynników szorstkości. Zestawienie obliczonych maksymalnych rzędnych zwierciadła wody z rzędnymi zwierciadła wody pochodzącymi z niwelacji śladów wielkiej wody w terenie wykazało, że różnią się one między sobą. Różnica zestawionych wartości kształtowała się w przedziale od 18 do 34 cm. W wynikach obliczeń modelowych udało się poprawnie odtworzyć lokalne spadki zwierciadła wody na badanym odcinku rzeki Warty. Uzyskane różnice rzędnych zwierciadła wody

wskazują na potrzebę przeprowadzenia procedury tarowania modelu oraz rozwinięcia lub modyfikacji metody oceny współczynników szorstkości z jednoczesnym uwzględnieniem dodatkowych parametrów z zakresu danych lidarowych.

Literatura

- CHOW V.T., 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- GOŁUCH P., KALUŻA T., LEŚNY J., SZOSZKIEWICZ K., 2004. Teledetekcyjna ocena struktury roślinności obszaru Wisły Środkowej na podstawie obrazów satelity Landsat 7 ETM+. W: *Materiały Seminarium: Wybrane zagadnienia hydrauliki wód śródlądowych*. Maszynopis. Katedra Budownictwa Wodnego AR, Poznań: 3-13.
- KALUŻA T., JESSE I., 1997. Analiza wpływu wieloletnich zmian parametrów porostu na wartości współczynników oporu koryta zalewowego rzeki Warty. W: *Materiały III Konferencji Naukowej: Współczesne problemy inżynierii wodnej*. Red. W. Majewski. Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej PK, Kraków: 289-298.
- KALUŻA T., STRZELIŃSKI P., 2009. Teledetekcyjne narzędzia w badaniach roślinności wysoko-piennej do oceny warunków przepływu na terenach zalewowych. W: *Zdobycze nauki i techniki dla ochrony przyrody w lasach*. Red. D. Anderwald. Stud. Mater. Cent. Eduk. Przyr.-Leśn. 11, 2 (21): 169-178.
- MALINGER A., 2001. Wykorzystanie zdjęć lotniczych do oceny przepustowości i zmian zagospodarowania terenów zalewowych. Maszynopis. Katedra Budownictwa Wodnego AR, Poznań.
- MIKE 21 flow model, hydrodynamic module. Scientific documentation. 2009. DHI, Hørsholm.
- TYMKÓW P., MOKWA M., BORKOWSKI A., GOŁUCH P., 2006. Automatyczna estymacja wartości współczynników oporów przepływu wód w dolinach rzek z wykorzystaniem danych skaningu laserowego oraz zdjęć lotniczych. W: *Problemy hydrotechniki. Modelowanie i hydroinformatyka oraz wybrane zagadnienia ochrony przeciwpowodziowej*. Red. S. Kostecki. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław: 171-178.

POSSIBILITIES OF USING LIDAR DATA IN BUILDING A HYDRODYNAMIC FLOW MODEL ON THE EXAMPLE OF THE WARTA RIVER SECTION

Summary. The work attempts to use Airborne Laser Scanning data in 2-D hydrodynamic modeling of the flow of the Warta River in Nowe Miasto on the Warta – Solec section. LIDAR data were also used to determine roughness coefficients characterizing flow resistance. The results, i.e. maximum water surface elevations, were compared with results of high water elevations determined by levelling of flood marks on trees. On that basis, a preliminary analysis of possibilities of using Airborne Laser Scanning data to build a model and to evaluate roughness coefficients for floodplains was carried out.

Key words: Airborne Laser Scanning, roughness coefficients, channel capacity, Warta River

Malinger A., Kałuża T., Grzonka B., Grzelka T., 2013. Możliwości wykorzystania danych lidarowych do budowy hydrodynamicznego modelu przepływu na przykładzie odcinka rzeki Warty. *Nauka Przyr. Technol.* 7, 1, #7.

Adres do korespondencji – Corresponding address:

Tomasz Kałuża, Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94, 60-649 Poznań, Poland, e-mail: kaltom@gmx.net

Zaakceptowano do opublikowania – Accepted for publication:

26.10.2012

Do cytowania – For citation:

*Malinger A., Kałuża T., Grzonka B., Grzelka T., 2013. Możliwości wykorzystania danych lidarowych do budowy hydrodynamicznego modelu przepływu na przykładzie odcinka rzeki Warty. *Nauka Przyr. Technol.* 7, 1, #7.*