

ANALIZA ZMIAN PARAMETRÓW HYDRAULICZNYCH W RZECE NIZINNEJ PRZY ZASTOSOWANIU MODELOWANIA NUMERYCZNEGO

Szymon Wojak[✉], Andrzej Strużyński, Maciej Wyrębek

Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków

ABSTRAKT

Cel pracy

Koryta rzeczne są strukturami dynamicznymi, a zachodzące w nich procesy fluwialne mają na celu wytworzenie stanu równowagi pomiędzy energią wody a stabilnością materiału budującego koryto. Dynamika zmian struktur korytowych jest trudna do uchwycenia za pomocą sieci monitoringu, lecz odzwierciedlenie parametrów ruchu wody możliwe jest za pomocą modelowania fizycznego lub numerycznego. Celem pracy jest analiza zmienności parametrów hydraulicznych i ich wpływu na zmiany morfologiczne przy zastosowaniu dwuwymiarowego modelowania numerycznego na przykładzie odcinka uregulowanego rzeki Nidy.

Materiał i metody

Na podstawie pomiarów terenowych zbudowano i następnie przeprowadzono proces kalibracji numerycznego modelu uregulowanego odcinka Nidy. W odcinku tym koryto nie jest umocnione, co umożliwia występowanie procesu jej renaturyzacji. Modelowanie numeryczne zostało przeprowadzone dla zakresu przepływów od niskich, poprzez średnie, przepływ brzegowy, do przepływu występującego z koryta. Wielkość przepływu brzegowego określono przy zastosowaniu metody Riley'a. Obliczenia wybranych parametrów hydraulicznych pozwoliły na przeprowadzenie analizy ich wpływu na dynamikę i kierunki zmian dna Nidy.

Wyniki i wnioski

Wskutek przeprowadzonych symulacji otrzymano przestrzenną informację o zmianach następujących parametrów: prędkość średnia, naprężenia styczne przy dnie oraz napelnienie dla każdego z wyżej wymienionych przepływów. Na podstawie uzyskanych danych przeprowadzono analizy rozkładu prędkości dynamicznej, liczby Reynoldsa, liczby Reynoldsa dla ziaren i prędkości opadania. Brak wyraźnych trendów zmian poszczególnych parametrów przy rosnących przepływach świadczy o istnieniu zmian interakcji pomiędzy przepływającą wodą a korytem rzeczny. Zmiana przepływu wody wywołuje nie tylko zmiany intensywności procesów fluwialnych, lecz także zmianę ich lokalizacji. Wytworzona podczas przepływów niskich morfologia dna zostaje całkowicie zmieniona przy przejściu wezbrania, na co wskazują pomiary i symulacje badanego odcinka rzeki Nidy.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, parametry hydrauliczne, rzeki nizinne

WSTĘP

Działania polegające na poprawie gospodarki wodnej, nawet gdy zastosowano przy nich dobre praktyki inżynierskie, wiążą się z ingerencją w środowisko natural-

ne. Z tego powodu przy projektowaniu tras regulacyjnych należy mieć na uwadze zachowanie równowagi hydrodynamicznej koryta, która warunkuje równowagę przyrodniczą w rzece i jej dolinie (Wierzbicki, 2003). Ekosystemy wodne związane są więc z ekosystemami

[✉]e-mail: szymon.wojak@wp.pl

ładowymi (Lenar-Matyas i in., 2010), a połączenia te lepiej funkcjonują w rzekach naturalnych lub bliskich naturze (Ramowa Dyrektywa Wodna, 2000). W zależności od wielkości przepływu w korycie rzeczonym występują procesy erozji, zrównoważonego transportu lub akumulacji rumowiska. Określony reżim rzeki płynącej w zmieniającym się podłożu prowadzi do wykształcenia odpowiedniego jej typu (Church, 1992, Rosgen, 1994), tymczasem liczne regulacje techniczne spowodowały negatywny przebieg procesów rzecznych, co w efekcie doprowadziło do obniżenia ich stanu ekologicznego (Książek i in., 2017). Badania wskazują, że równowaga hydrodynamiczna cieków może być zachowana przy niezaburzonym dostarczaniu rumowiska z brzegów rzek, dopływów i stoków dolin (Łapuszek 2013, Górczyca i in., 2018,). W wielu rzekach dochodzi do utraty równowagi hydrodynamicznej przejawiającej się zakłóceniami procesów fluwialnych (Strużyński, 2013). Są one związane przeważnie z działalnością człowieka (Czoch i in., 2013). Regulacje rzek w XIX i XX wieku przeprowadzone były m.in. w celu ochrony ludności przed powodzią, jednak przy ich planowaniu nie uwzględniano strat środowiskowych będących odpowiedzią na zawężenie korytarza migracji czy koncentrację przepływu w osi rzeki (Łapuszek, Lenar-Matyas, 2013). Obecnie w wielu odcinkach uregulowanych rzek pojawia się możliwość ich samoistnej renaturyzacji. Dzieje się tak z powodu zmian zagospodarowania terenu i wprowadzania polityki prośrodowiskowej. Ważne jest więc pytanie o bezpieczeństwo ludności zamieszkującej doliny rzeczne. Z tego powodu istnieje potrzeba ciągłego poszerzania wiedzy o tempie i naturze procesów korytotwórczych. Przeglądu technik opisujących te procesy na podstawie analizy parametrów geometrycznych i hydraulicznych występujących w rzekach naturalnych przedstawił na przykład Gleason (2015), a stosowane metody określania szorstkości przepływu zebrane zostały przez Michalca i in. dla uziarnienia dennego oraz ziaren ponadwymiarowych (Michalec i Strużyński, 2010, Michalec i Zwolnik, 2019, 2020). Obecnie prowadzone są prace mające na celu określenie parametrów związanych z charakterystyką dynamiki koryt rzek płynących w warunkach zbliżonych do naturalnych (Stewardson, 2004, Papanicolaou i in., 2007, Buffington i Montgomery, 2013, Yuce i in., 2015). Budowane są liczne modele numeryczne, mające na celu określenie parametrów

wpływających na intensywność procesów fluwialnych (Crosato, 2008, Pittaluga i in., 2009, Strużyński i in., 2011, Njenga i in., 2013, Shaheed i in., 2021). Także w niniejszej pracy przedstawiono analizę parametrów geometrycznych i hydraulicznych uzyskanych przy zastosowaniu modelowania dwuwymiarowego wykonanego dla różnych przepływów, by ocenić ich wpływ na rozkład energii w korycie rzeczonym. Na przykładzie wybranego odcinka rzeki Nidy podjęto próbę wskazania zmian lokalizacji obszarów dna o wzmożonej aktywności podczas przyborów i opadania wody w jej korycie.

OBSZAR BADAŃ

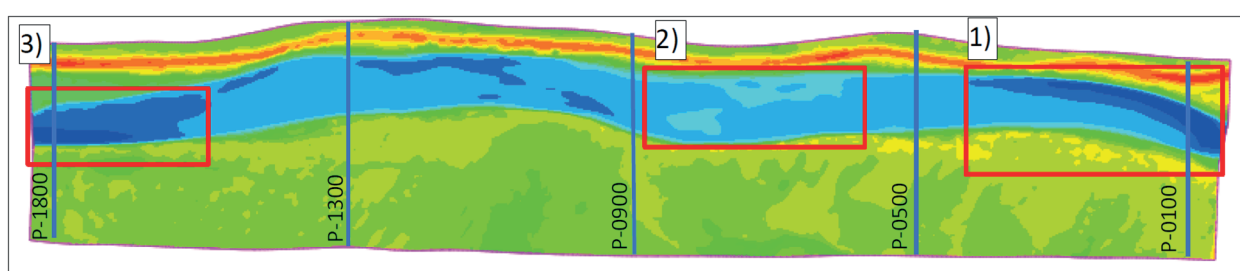
Miejsce badań zostało zlokalizowane na obszarze miejscowości Stawy w gminie Imielno, w powiecie pińczowskim, w województwie świętokrzyskim (ryc. 1). Obiektem badawczym jest nizinna rzeka Nida, będąca lewobrzeżnym dopływem Wisły. Pomiary wykonywane były na odcinku o długości 490 m. Odcinek ten został w latach 60. ubiegłego wieku poddany pracom regulacyjno-melioracyjnym, których głównym celem było zmniejszenie ryzyka powodziowego na tym obszarze, przyspieszenie odpływu wód po wezbraniach, a przez to adaptacja doliny Nidy do celów rolniczych. Analizowany odcinek charakteryzuje się prostym korytem z obwałowaniami znajdującymi się na jego prawym brzegu. Są one obecnie zaniedbane, ponieważ były usypane jako zagospodarowanie urobku poregulacyjnego (Strużyński, 2006).

Badany odcinek Nidy znajduje się poniżej odcinka bliskiego naturze, w którym wykształconych jest kilka meandrów. Będący obiektem badań odcinek prosty charakteryzuje się niewielką poprzeczną składową prędkości, występująca w nim erozja denna związana jest więc przede wszystkim z parametrami granicznymi transportu rumowiska (ryc. 2). W układzie morfologicznym badanego odcinka Nidy można wyróżnić trzy miejsca charakterystyczne, które warunkują zachodzące w nim procesy: 1) to odcinek znajdujący się bezpośrednio poniżej mostu, czyli miejsca, w którym przekrój koryta został zawężony przez umocnienia przyczółków. Zmniejszenie przekroju spowodowało zmiany pola prędkości prowadzącego do pogłębienia dna na odcinku około 40 m; 2) w tym miejscu następuje depozycja materiału erodowanego w rejonie mostu.



Ryc. 1. Lokalizacja obiektu badań (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 1. Location of the research object (Source: own study)



Ryc. 2. Miejsca charakterystyczne pod względem morfologicznym w korycie na badanym odcinku rzeki Nidy oraz przekroje wybrane do obliczeń przepływu brzegowego (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 2. Morphologically characteristic places in the bed on the studied section of the Nida River and cross-sections selected for the calculation of the bankfull flow (Source: own study)

Formujące się odsypisko sprzyja rozwojowi roślinności dennej i brzegowej, zwiększając opory ruchu, co prowadzi do przesunięcia się głównej strugi nurtu ku lewemu brzegowi; 3) przegłębienie utworzone przez nurt wody przechodzący z brzegu prawego na lewy. Wszystkie trzy charakterystyczne miejsca w korycie mają znaczący wpływ na zmienność parametrów przepływu oraz lokalizację siedlisk roślinności.

METODYKA POMIAROWA

Pomiary terenowe

Prace wykonano w dniu 31 marca 2020 roku. Pomiar konfiguracji dna rzeki przeprowadzono za pomocą sondy akustycznej ADCP. Pomiar obejmował wykonanie 63 przekrojów poprzecznych w odstępach co 7–8 m. Równolegle prowadzony był pomiar rzędnych zwierciadła wody w korycie przy użyciu urządzenia GPS RTK. Z analizowanego obszaru pobrano także próbki sedymentu. W efekcie uzyskano krzywe granulometryczne rumowiska dennego. Dokonano pomiaru temperatury oraz wyznaczono lokalizacje występowania kęp roślinności podwodnej.

Obliczenia wartości przepływu brzegowego

W ramach obliczeń hydraulicznych wyznaczono wartość przepływu brzegowego, korzystając z metody Riley. Wyniki zestawiono w tabeli 1. Metoda ta jest zmodyfikowanym wzorem Wollmana i opiera się na

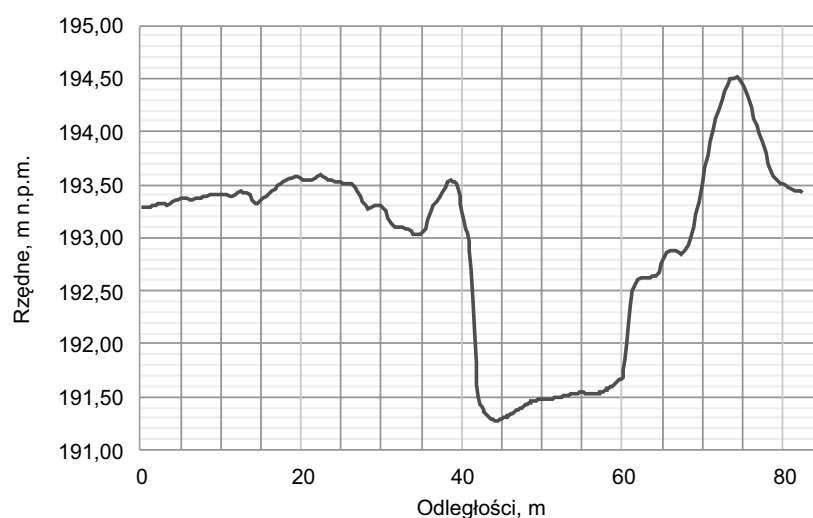
tz. indeksie tarasowym, który bazuje na występujących naturalnie tarasach koryta rzeki (Riley, 1972):

$$BI = \frac{W_i - W_{i+1}}{D_i - D_{i+1}} [-] \quad (1)$$

gdzie:

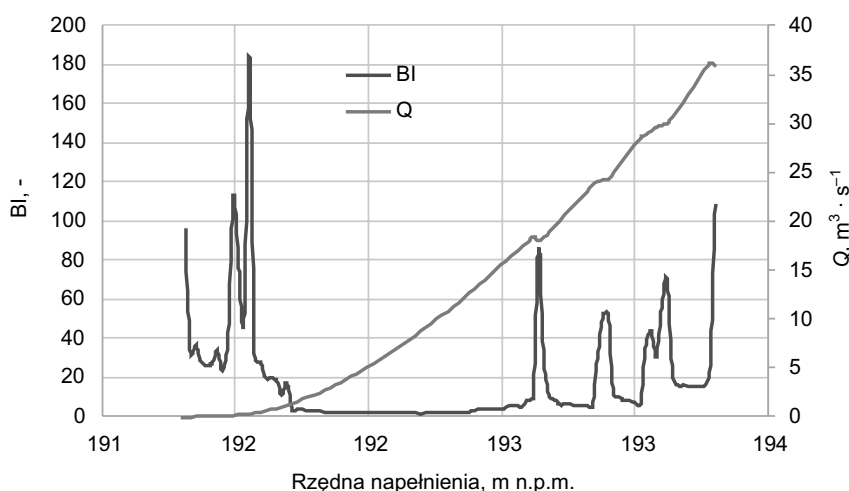
- BI – wartość indeksu tarasowego Riley'a [–],
- W_i – szerokość koryta cieku na określonym poziomie odpowiadająca danej głębokości przepływu [m],
- D_i – głębokość wody na określonym poziomie [m],
- W_{i+1} – szerokość koryta na poziomie przy głębokości mniejszej o wartość przyjętą jako skok ciągu [m],
- D_{i+1} – głębokość wody pomniejszona o wartość skoku [m].

Według Riley'a przepływ brzegowy wyznaczany jest do rzędnej zwierciadła wody, dla której ciąg liczbowy indeksu tarasowego osiągnie pierwsze wyraźne maksimum. W analizowanym przypadku pierwsze maksima pojawiające się przy najmniejszych przepływach zostały pominięte ze względu na urozmaicone dno oraz porost roślinności na brzegach rzeki. Przepływ brzegowy wyznaczony został w pięciu przekrojach rozmieszczonych na długości całego odcinka. Na rycinach 3 i 4 przedstawiono przekrój poprzeczny



Ryc. 3. Przekrój poprzeczny koryta Nidy P-1800 (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 3. Cross-section P-1800 of the Nida river (Source: own study)



Ryc. 4. Wyznaczenie przepływu brzegowego w przekroju P-1800 (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 4. Determination of the bankfull flow in the P-1800 section (Source: own study)

oraz wykresy zmian indeksu tarasowego i przepływu w funkcji rzędnej zwierciadła wody.

MODELOWANIE NUMERYCZNE

Modelowanie numeryczne zostało przeprowadzone z wykorzystaniem programu CCHE2D. Program ten został stworzony w Stanowym Uniwersytecie Mississippi. Jest to model dwuwymiarowy, dzięki któremu następuje uśrednienie wielkości hydraulicznych w pionie. Obliczenia modelu CCHE2D bazują na dwóch równaniach: równaniu ciągłości oraz równaniu zachowania pędu (Zhang, 2006).

gdzie:

- u, v – uśrednione prędkości w kierunku x i y [$m \cdot s^{-1}$],
- g – siła przyciągania ziemskiego [$m \cdot s^{-2}$],
- Z – poziom zwierciadła wody [m n.p.m.],
- H – lokalna głębokość wody [$m \cdot s^{-1}$],
- f_{Cor} – parametr Coriolisa [$rad \cdot s^{-1}$],
- $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ – uśrednione na głębokości naprężenia Reynoldsa [$N \cdot m^{-2}$],
- τ_{bx}, τ_{by} – naprężenia styczne na powierzchni dna [$N \cdot m^{-2}$].

W powyższych równaniach naprężenia Reynoldsa aproksymowane są z wykorzystaniem założenia Boussinesq:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = & -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right] - \\ & - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor} v \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (6)$$

$$\tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = & -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right] - \\ & - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{Cor} u \end{aligned} \quad (4)$$

Obliczenia naprężeń stycznych wykonano na podstawie równania turbulentnego współczynnika lepkości według równania (8):

$$\nu_t = \frac{A_{xy}}{6} \kappa U^* h \quad (8)$$

gdzie:

- A_{xy} – zmienny turbulentny współczynnik lepkości [Pa · s],
- κ – stała von Karmana [–],
- U^* – prędkość dynamiczna [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
- h – napełnienie [m].

Parametry i kalibracja modelu

W celu przeprowadzenia symulacji przepływu wody wykonano model reprezentujący rzekę o długości 490 m i szerokości 72,75 m. Liczba utworzonych węzłów przy wielkości siatki 0,25 m jest równa 570 651. Symulacje przeprowadzono dla 5 przepływów zestawionych w tabeli 2. Czas potrzebny do ustabilizowania modelu wyniósł 10 minut. W symulacji zastosowany został Parabolic Eddy Viscosity Model. Dla każdej symulacji dno koryta było nieruchome, to znaczy nie uruchomiono modułu uwzględniającego możliwość erozji dna.

Kalibracja modelu została wykonana dla przepływu $9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, który miał miejsce w dniu pomiarów. Polegała ona na doborze wartości współczynnika szorstkości w węzłach obliczeniowych w sposób

umożliwiający uzyskanie zgodności pomiędzy zmierzonym i symulowanym układem zwierciadła wody na poziomie dokładności pomiarowej urządzenia GPS RTK ($\pm 0,02 \text{ m}$). Krok czasowy został dobrany w taki sposób, aby liczba Couranta osiągnęła wartości mniejsze od 1. Ze względu na występowanie obszarów o prędkości mniejszej niż $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ryc. 5a) obliczono krok czasowy o wielkości 0,25 sekundy. Na ryc. 5b przedstawiono zróżnicowanie współczynnika szorstkości, natomiast ryc. 5c przedstawia różnice rzędnych zwierciadła wody pomiędzy danymi pomiarowymi a wynikami modelu po procesie kalibracji. Tabela 3 przedstawia zakresy zmian wartości współczynników szorstkości.

ZASTOSOWANE RÓWNANIA EMPIRYCZNE

Wyniki modelowania numerycznego poddano głębszej analizie. Obliczono zmiany takich wartości, jak: prędkość dynamiczna, liczba Reynoldsa, liczba Reynoldsa dla ziaren, prędkość opadania. Dwa ostatnie parametry obliczono, przyjmując istnienie równomiernego uziarnienia na całej powierzchni dna analizowanego

Tabela 1. Zestawienie obliczeń przepływu brzegowego w poszczególnych przekrojach badanego odcinka (Źródło: opracowanie własne)

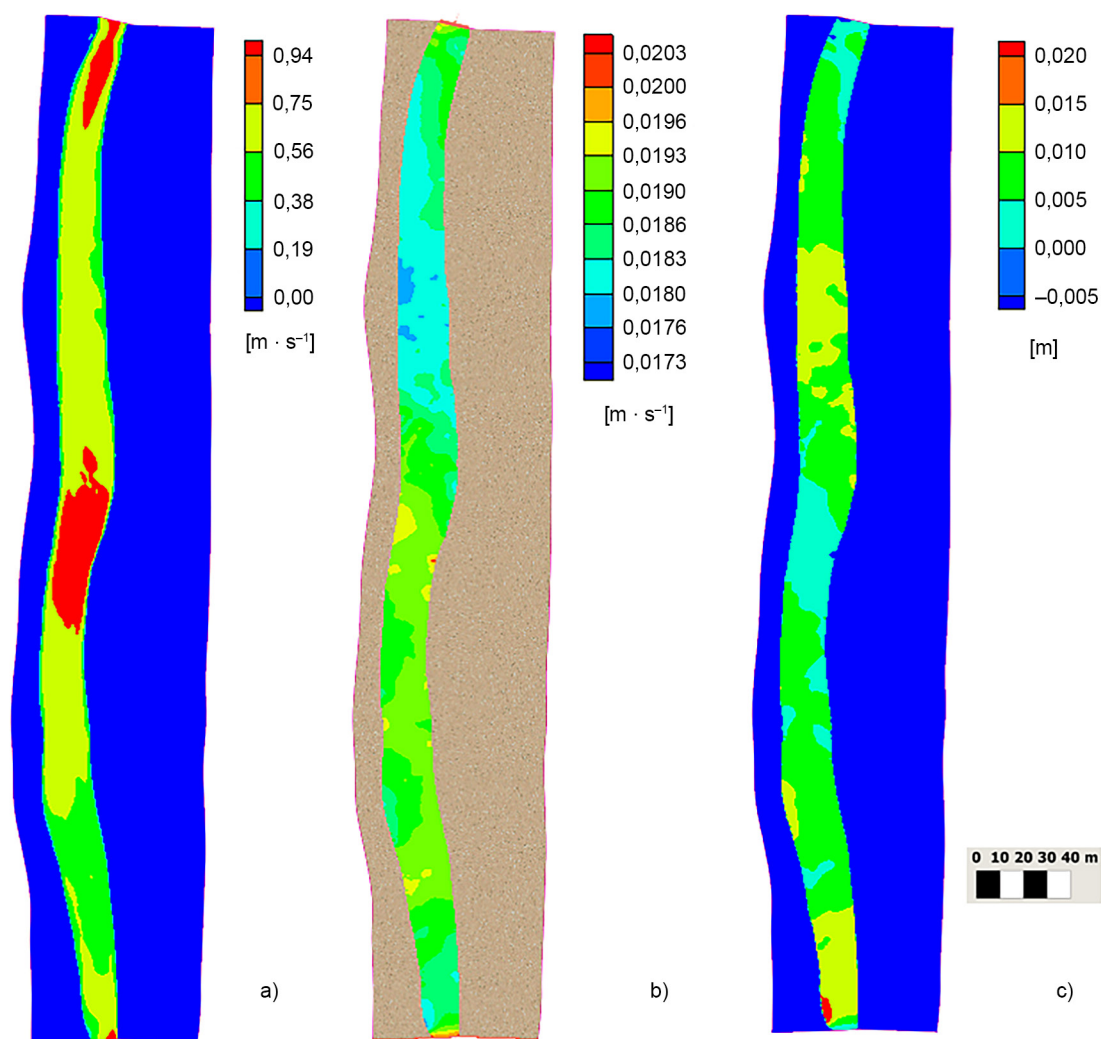
Table 1. Comparison of calculations of the bankfull flow in individual cross-sections of the tested section (Source: own study)

Lp.	Nr przekroju	Rzędna brzegu [m n.p.m.]	Przepływ brzegowy [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
1	P-0100	192,90	26,28
2	P-0500	192,65	16,99
3	P-0900	192,89	24,12
4	P-1300	192,71	18,23
5	P-1800	192,64	18,07

Tabela 2. Zestawienie wartości przepływów, dla których wykonano symulacje (Źródło: opracowanie własne)

Table 2. Comparison of flow values for which simulations were performed (Source: own study)

Lp.	Przepływ	Wartość	Jednostka
1	Q_1	2,00	[$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
2	Q_2	4,00	
3	Q_3	9,15	
4	Q_4	18,00	
5	Q_5	24,00	



Ryc. 5. Wyniki kalibracji a) prędkości, b) dobór współczynnika szorstkości, c) różnica pomiędzy zwierciadłem wody pomierzonym a skalibrowanym (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 5. Calibration results a) velocities, b) selection of the roughness coefficient, c) the difference between the measured and calibrated water surface (Source: own study)

Tabela 3. Zestawienie liczby węzłów poddanych korekcie współczynnika szorstkości z podanych zakresów (Źródło: opracowanie własne)

Table 3. Comparison of the number of nodes subjected to correction of the roughness coefficient from the given ranges (Source: own study)

Lp.	Korekta współczynnika szorstkości	Liczba węzłów poddanych korekcie	Procent węzłów poddanych korekcie
1	0,000–0,005	10 814	5%
2	0,005–0,010	102 600	47%
3	0,010–0,015	93 427	43%
4	0,015–0,020	9 783	5%

odcinka rzeki. Przyjęta do obliczeń wielkość uziarnienia jest równa $d_{50} = 0,55$ mm. Wartość lepkości kinematycznej obliczono dla wody czystej o temperaturze 18°C. Wartości współczynników C_1 i C_2 (równanie (9)) wyznaczone zostały dla rumowiska określonego jako naturalne i wielofrakcyjne. Wszystkie obliczenia zostały wykonane w tzw. węzłach mokrych modelu. Prędkość dynamiczna, podobnie jak naprężenia styczne, odzwierciedla zmiany spadku rzeki i napełnienia wody w jej korycie. W niniejszym artykule za jej pomocą zobrazowano zmiany rozkładu energii związanej z przyływem wody. Podczas gdy za pomocą liczby Reynoldsa opisane są turbulencje przepływającej wody, liczba Reynoldsa dla ziaren opisuje dwufazowe warunki przepływu w korycie rzeki. Warunki te mogą być hydraulicznie szorstkie, przejściowe i gładkie. Zwykle warunki szorstkie obserwujemy w rzekach górskich dla wartości Re^* większych od zakresu 68–70, natomiast warunki gładkie przepływu występują przeważnie w rzekach nizinnych ($Re^* < 3,63$ –5). Porównanie prędkości opadania ziaren w wodzie z aktualną wartością liczby U^* pozwala na zakwalifikowanie ruchu rumowiska jako wleczonego, unoszonego lub zawieszonego. Dzięki zastosowaniu modelowania numerycznego możliwe jest opisanie, w których rejonach koryta rzeczno i przy jakich przepływach możemy spodziewać się skłonności rzeki do przemodelowania swojego dna. Poszczególne parametry hydrauliczne i ich wzory zamieszczono poniżej.

Prędkość opadania ziaren została przedstawiona jako funkcja średnicy ziaren (Ferguson i Church, 2004):

$$w_s = \frac{Re^* g D^2}{C_1 v + (0,75 C_2 Re^* g D^3)^{0,5}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (9)$$

gdzie:

- Re^* – liczba Reynoldsa dla ziaren [–],
- g – przyspieszenie ziemskie [$m \cdot s^{-2}$],
- D – średnia średnica rumowiska [m],
- C_1, C_2 – stałe opisujące wpływ szorstkości i kształtu ziaren [–],
- v – lepkość kinematyczna [$m^2 \cdot s^{-1}$].

Prędkość dynamiczna:

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (10)$$

gdzie:

- τ_0 – naprężenia styczne przy dnie [Pa],
- ρ – gęstość właściwa wody [$kg \cdot m^{-3}$].

Liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{U h}{\nu} \quad (11)$$

gdzie:

- U – prędkość średnia [$m \cdot s^{-1}$],
- h – napełnienie [m],
- ν – lepkość kinematyczna [$m^2 \cdot s^{-1}$].

Liczba Reynoldsa dla ziaren:

$$Re^* = \frac{U^* d}{\nu} \quad (12)$$

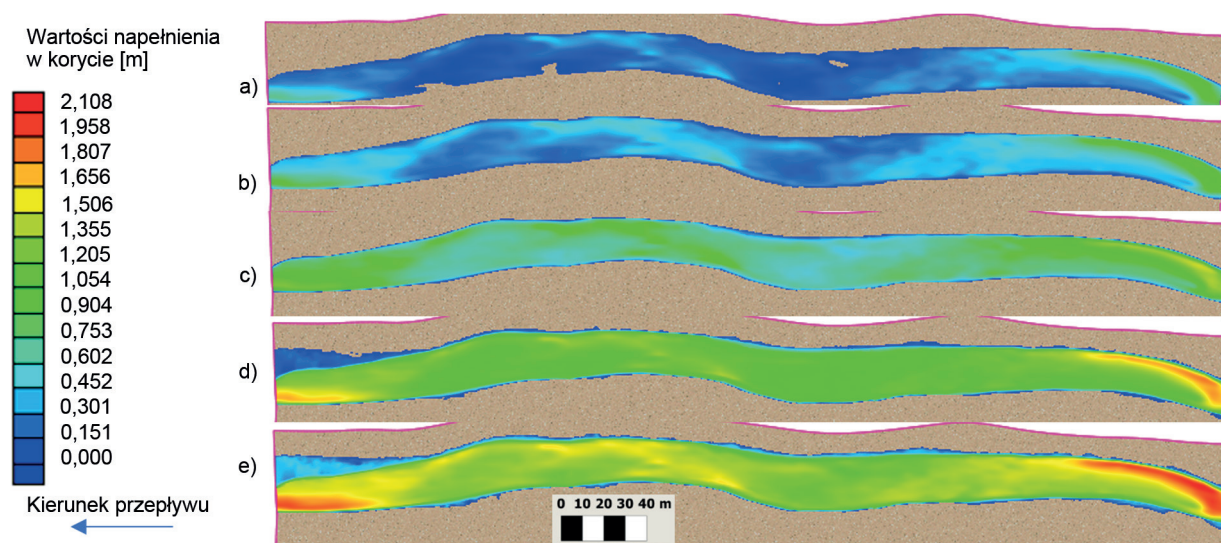
gdzie:

- U^* – prędkość dynamiczna [$m \cdot s^{-1}$],
- d – średnica rumowiska [m],
- ν – lepkość kinematyczna [$m^2 \cdot s^{-1}$].

WYNIKI MODELOWANIA

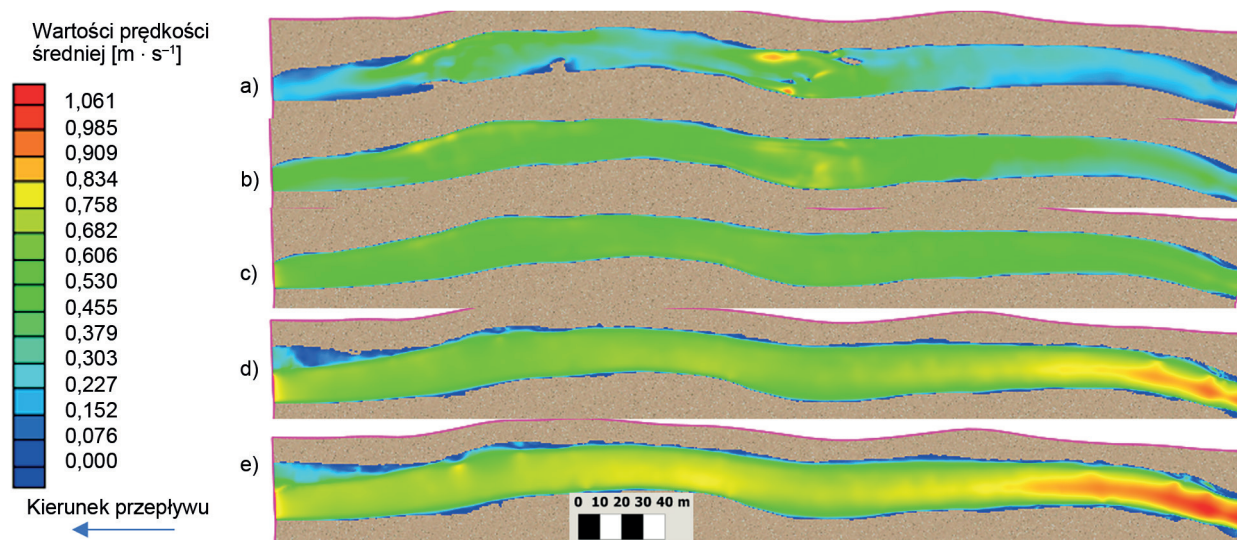
Na ryc. 6 przedstawiono napełnienie wody w korycie Nidy. Przepływ $2 m^3 \cdot s^{-1}$ jest na tyle mały, że w Nidzie pojawiają się wyspy oraz występuje rozbudowana strefa brzegowa. Przepływy 18 i $24 m^3 \cdot s^{-1}$ prowadzą do przekroczenia stanów brzegowych w korycie Nidy.

W przypadku zestawienia prędkości średnich (ryc. 7), dla najmniejszych przepływów (2 oraz $4 m^3 \cdot s^{-1}$) uwiadamniają się dwie strefy o zwiększonej prędkości wody. Występują one w na płyciznach. Dla przepływu $9,15 m^3 \cdot s^{-1}$ wartości prędkości średnich są jednakowe praktycznie na całej długości modelu. W przypadku największych przepływów (18 i $24 m^3 \cdot s^{-1}$) istnieje skoncentrowany nurt, a także w górnej części modelu (w odniesieniu do kierunku przepływu) tworzy się strefa zwiększonych prędkości, ponadto zlokalizowano miejsca o zdecydowanie mniejszych jej wartościach. Te ostatnie znajdują się w miejscach, w których woda występuje z koryta. Charakter przepływu zmienia się od ściśle uzależnionego od konfiguracji dna (2 i $4 m^3 \cdot s^{-1}$), do przepływów, dla których znaczny wpływ na rozkład prędkości mają brzegi Nidy (Q 18 i $24 m^3 \cdot s^{-1}$).



Ryc. 6. Zestawienie wartości napęnienia wody w korycie przy różnych przepływach: a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 6. Comparison of water filling values in the bed at different flows: a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Source: own study)



Ryc. 7. Zestawienie wartości prędkości średnich w korycie przy różnych przepływach: a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Źródło: opracowanie własne)

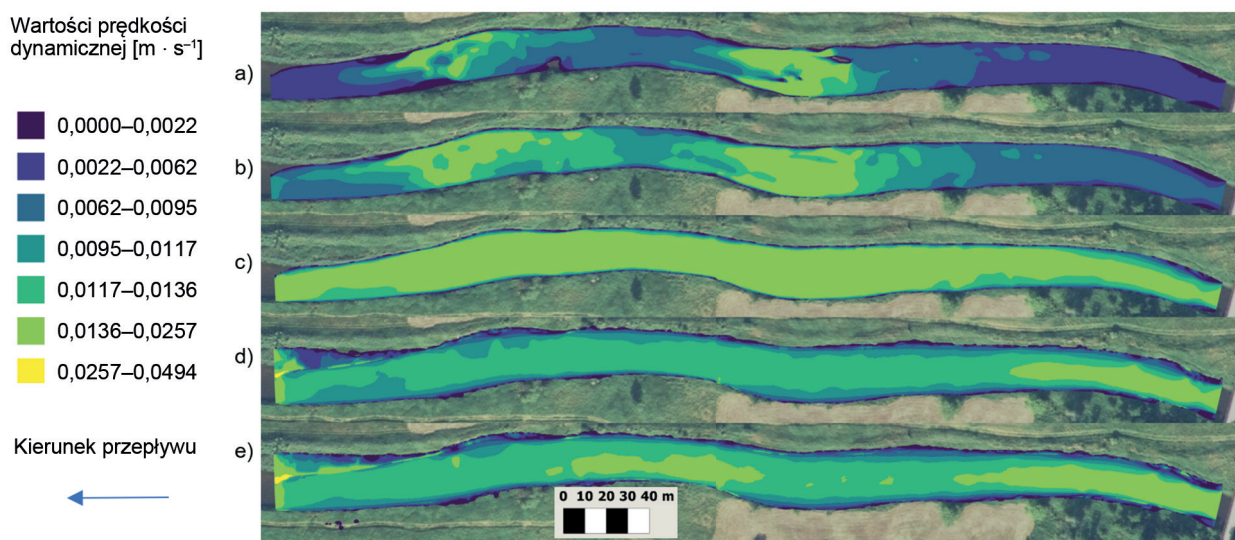
Fig. 7. Comparison of average velocities in the bed at different flows: a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Source: own study)

ANALIZA WYNIKÓW

Prędkość dynamiczna (ryc. 8) obrazuje siły erozyjne w korycie. Przy dwóch pierwszych przepływach widoczne są dwie strefy o większych wartościach prędkości dynamicznej, w pozostałych częściach koryta prędkości są zdecydowanie niższe. Również w przypadku analizy prędkości dynamicznej wykonanej dla przepływu $9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ jej wartości pozostają praktycznie niezmiennie na całej długości modelu. W przypadku dwóch największych przepływów prędkości dynamiczne oscylują wokół zbliżonych wartości w nurcie głównym ze strefą o wartościach większych na początku modelu, a dla przepływu $24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ obszary te występują w środku modelowanego odcinka. Prędkość dynamiczna przy niewielkich przepływach (2 i $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) lokalnie może dorównywać wartościom obserwowanym dla przepływu brzegowego ($Q = 18,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) oraz wód wylewających się z koryta Nidy. Jest to ściśle związane z jednej strony ze wzrostem napełnienia, a z drugiej z wyrównywaniem spadku od układu odzwierciedlającego konfigurację dna do zmierzającego do spadku doliny rzecznej. Przy wyrównanym spadku decydującą rolę zaczynają odgrywać zmiany głębokości rzeki (18 i $24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

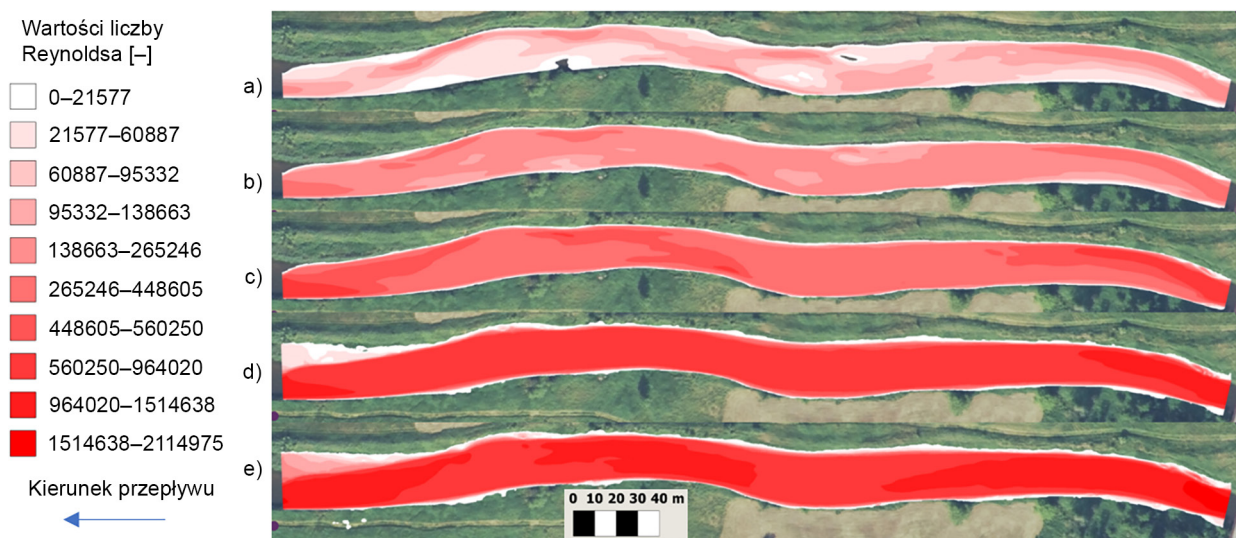
Analizując rozkład przestrzenny liczby Reynoldsa (ryc. 9) dla każdego przypadku, można stwierdzić, że jej wartości wzrastają równomiernie na całej długości modelu wraz ze zwiększaniem się przepływu. Rosnące turbulencje przepływającej wody zwiększają prawdopodobieństwo rozmywania dna. Z tego powodu można uznać, że zdolność do przemodelowania koryta Nidy na badanym odcinku stopniowo rośnie wraz ze wzrostem przepływu.

Wartości liczby Reynoldsa dla ziaren (ryc. 10) opisują szorstkość przepływu. Dla modeli odzwierciedlających przepływy 2 i $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ w pływaczach występują dwie strefy o zwiększonych wartościach tego parametru (warunki hydraulicznie przejściowe). W pozostałych częściach obu modeli wartości są mniejsze, co świadczy o gładkich warunkach przepływu. W pozostałych trzech przypadkach (przepływy $9,15$, 18 i $24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) wartości są w przybliżeniu jednakowe na całej długości modelu i charakteryzują warunki przejściowe przepływu. Wartości rzędu 20 – 25 zanotowano tylko w miejscach występowania wody z koryta. W żadnym przypadku nie występują wartości szorstkie przepływu, co jest potwierdzeniem nizinnego charakteru rzeki Nidy.



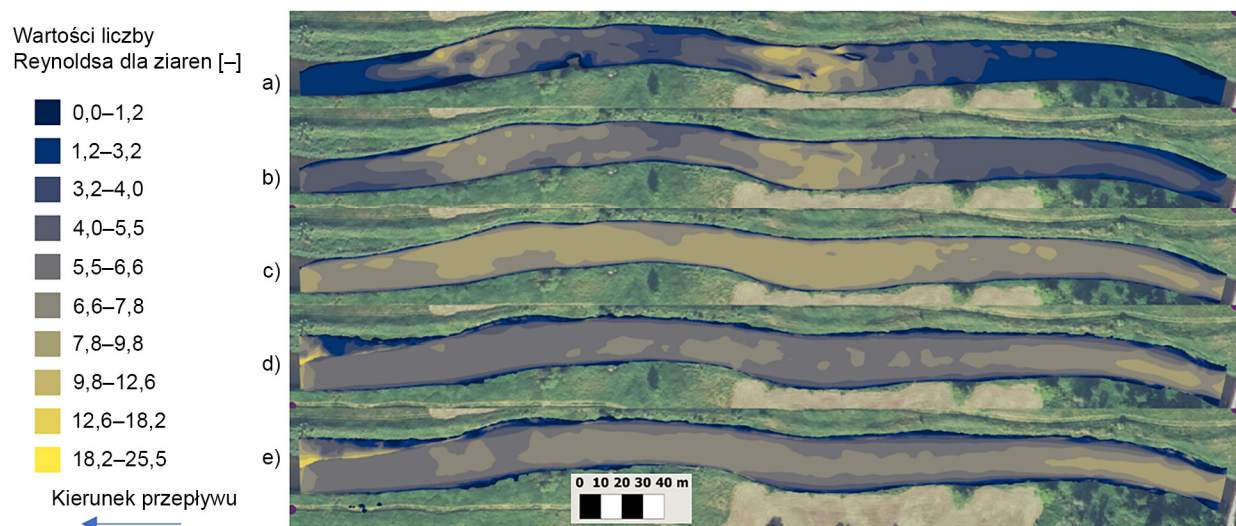
Ryc. 8. Zestawienie wartości prędkości dynamicznej w korycie przy różnych przepływach a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 8. Comparison of dynamic velocity values in the channel at different flows a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Source: own study)



Ryc. 9. Zestawienie wartości liczby Reynoldsa w korycie przy różnych przepływach: a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 9. Comparison of the Reynolds number values in the channel at different flows: a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Source: own study)



Ryc. 10. Zestawienie wartości liczby Reynoldsa dla ziaren w korycie przy różnych przepływach: a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Źródło: opracowanie własne)

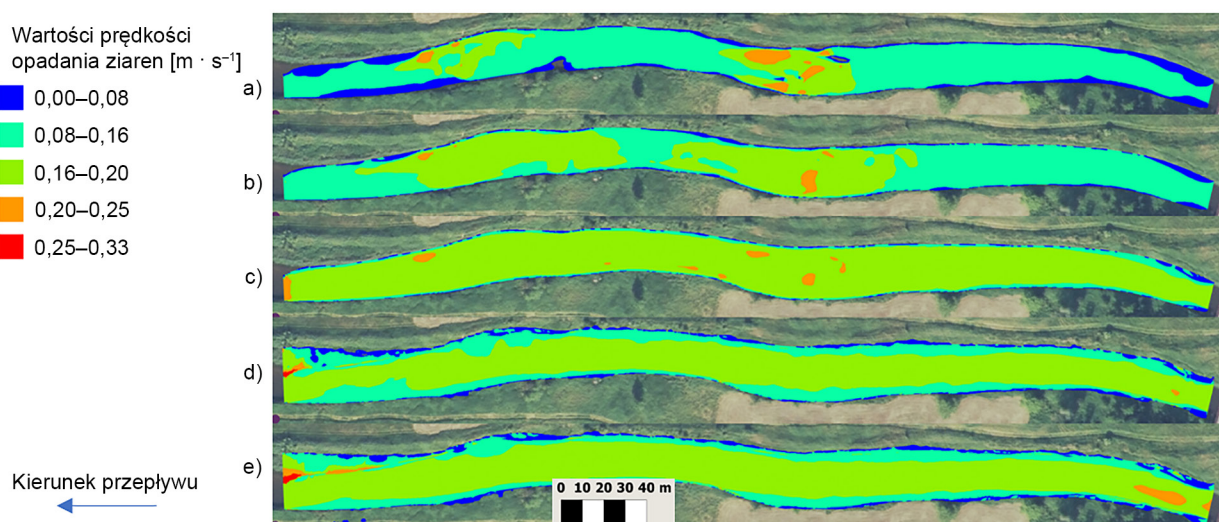
Fig. 10. Comparison of the Reynolds number values for grains in the channel at different flows: a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Source: own study)

Prędkość opadania (ryc. 11) pozostaje w ścisłym dodatnim związku z warunkami hydraulicznymi przepływu. Z tego powodu w obszarach o większych turbulencjach opadanie transportowanego rumoszu będzie od dwóch do czterech razy szybsze niż w wodzie płynącej przy niskich wartościach Re^* . Przy najmniejszych przepływach Nida na badanym odcinku może więc odkładać materiał w miejscach płytkich, a podczas przepływów występujących z koryta zasypywać obszary najgłębsze oraz tworzyć wały morenowe. Przepływ korytowy jest bardzo interesujący, ponieważ lokalizacje największych prędkości opadania pojawiają się w obszarach niespotykanych przy innych przepływach. Podczas występowania przepływu $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ tendencje do tworzenia koryta krętego wydają się największe.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Omawiany odcinek rzeki Nidy ma dno piaszczyste oraz jest prosty, o stosunkowo niewielkim spadku i krętości. Tego typu koryta według typologii Churcha należą do najbardziej stabilnych (Church, 2006), choć mają tendencje do meandrowania. Podczas opisanych symulacji uzyskano wyniki analogiczne do tych przed-

stawionych przez Adynkiewicz-Piragas i in. (2006), opisujących silną zależność statystyczną pomiędzy parametrami hydromorfologicznymi koryta rzeczniczego a parametrami hydrologicznymi rzek (obok zadrzewień przykorytowych i użytkowania doliny rzecznej). Zaprezentowana przez Fergusona i Churcha (2004) zależność opisująca prędkość opadania wykazuje wysoką zgodność pomiędzy wartością zmierzoną i obliczoną, co skłoniło autorów niniejszego materiału do jej zastosowania na przykładzie rzeki Nidy. W przypadku przeprowadzonej analizy parametrów rumowiska transportowanego w rzece Nidzie zmiany prędkości opadania uzależnione są przede wszystkim od zmian wartości liczby Reynoldsa dla ziaren. Zauważalne różnice pomiędzy danymi przedstawionymi na rycinach 9 i 10 wynikają głównie z różnej skali barw i pewnego uwikłania liczby Re^* z innymi parametrami w równaniu na prędkość opadania. Różnice w hydraulicznych warunkach przepływu wpływają na skutki oddziaływania sił płynącej wody w różnych obszarach koryta przy zmiennych przepływach (por. granice obszarów przedstawionych na ryc. 6, 7 oraz 9). Wielu badaczy w celu scharakteryzowania koryt rzecznych analizuje jedynie podstawowe parametry, takie jak: prędkość przepływu wody, szerokość i głębokość średnią oraz



Ryc. 11. Zestawienie wartości prędkości opadania ziaren w korycie przy różnych przepływach: a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 11. Comparison of values of grain settling velocity in the channel at different flows: a) $Q = 2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, b) $Q = 4,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, c) $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, d) $Q = 18,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e) $Q = 24,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Source: own study)

spadek rzeki (Leja i in., 2013, Gleason, 2015). Z pewnością dokładny opis procesu formowania koryta rzeki z dnem piaszczystym wymaga wykonania analiz nie tylko podstawowych parametrów geometrycznych, lecz także wpływu warunków przepływu wody na dominujące procesy w ruchu rumowiska. Przedstawione dane należy interpretować jako wstępne, ponieważ w niniejszych analizach nie uwzględniono wpływu roślinności korytowej, która w okresie letnim pojawia się w obszarach o mniejszej prędkości przepływającej wody.

WNIOSKI

Przy zwiększającym się przepływie, począwszy od najmniejszego, następuje zmniejszenie oddziaływania dna rzeki i zwiększenie oddziaływania brzegów koryta, powodujące wyrównanie spadków od dennego do uśrednionego w profilu, w tym odcinku do spadku doliny Nidy. Jest to efekt powiązany z rosnącym wypełnieniem koryta wodą, pociągającym za sobą zmiany rozkładu oporów ruchu wody. Zmiany wszystkich parametrów poddanych analizie zachodzą pod wpływem wyżej wymienionej zależności.

Dla małych przepływów występuje w korycie wiele lokalizacji z niewielkim napełnieniem. Miejsca te charakteryzują się największymi wartościami prędkości dynamicznej U^* i liczby Reynoldsa dla ziaren Re^* , a także największymi prędkościami opadania ziaren. Można się tam więc spodziewać szybkich zmian w mikrorzeźbie dna. Procesy te zapewne sprzyjają także wytwarzaniu form dennych.

Przepływy powodujące wylewanie się wody z koryta sprzyjają intensywnemu transportowi i erozji dna w obszarach nurtu, ale także powodują odkładanie rumowiska na granicy koryta rzeki i terasy zalewowej.

Z jednej strony można stwierdzić, że podczas przepływu brzegowego występuje zjawisko uśrednienia warunków ruchu mas wody, jednak z drugiej strony przepływ $Q = 9,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ jest mniejszy od przepływu brzegowego, a jednocześnie jest hydraulicznie dość skomplikowany. Silnie zmieniają się w tym przypadku warunki hydrauliczne przepływu oraz następuje wyrównanie intensywności procesów fluwialnych widoczne na przykładzie rozkładów prędkości dynamicznej i liczby Reynoldsa dla ziaren, a więc parametrów opisujących warunki ruchu i zdolności transportowe

rzek. Pojawiają się także unikalne obszary, w których prędkość opadania ziaren jest znacznie większa od średniej.

Przeprowadzona przestrzenna analiza parametrów hydraulicznych przepływu wody (prędkość, napełnienie, prędkość dynamiczna, liczba Re , liczba Re dla ziaren, prędkość opadania) pokazuje różne trendy zmian poszczególnych parametrów. Podczas przyboru wód część z nich równomiernie wzrasta i osiąga wartości maksymalne przy największym przepływie, a inne osiągają swoje maksimum przy przepływach średnich. Lokalizacja poszczególnych stref na obszarze analizowanego odcinka cieku też zmienia się wraz ze zmianą przepływu. Siły odpowiedzialne za zmiany konfiguracji dna podczas niżówek rozmieszczone są w korycie analizowanego odcinka odmiennie w porównaniu z warunkami występującymi podczas przepływu korytotwórczego i brzegowego. Odmienny jest ich rozkład także wówczas, gdy woda wylewa się z koryta. Ta różnorodność lokalizacji poszczególnych stref aktywności procesów fluwialnych świadczy o postępującej renaturyzacji badanego odcinka rzeki Nidy.

LITERATURA

- Adynkiewicz-Piragas, M., Krzemińska, A., Tarnowski, K., Wróblewski, T. (2006). Charakterystyka i zróżnicowanie parametrów hydromorfologicznych w rzece nizinnej na przykładzie Smortawy. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 4/3, 17–24.
- Buffington, J.M., Montgomery, D.R. (2013). Geomorphic classification of rivers. [In:] J. Shroder, E. Wohl (eds.), *Treatise on Geomorphology 9 Fluvial Geomorphology*. San Diego, CA: Academic Press, 730–776.
- Church, M. (1992). Channel morphology and typology. [In:] P. Carlow, G.E. Petts (eds), *The Rivers. Handbook*. Malden, Mass.: Blackwell Sci, 126–143.
- Church, M. (2006). Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 325–354. DOI: <http://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122721>.
- Crosato, A. (2008). Analysis and modelling of river meandering. IOS Press. Doctoral Thesis. Delft University of Technology.
- Czoch, K., Kulesza, K., Strużyński, A. (2013). Presje hydromorfologiczne – znaczącą barierą w bliskim naturze utrzymaniu rzek i potoków górskich. [W:] B. Więzik

- (red.), Prawne, administracyjne i środowiskowe uwarunkowania zagospodarowania dolin rzecznych. Bielsko-Biała: WSA, 103–113.
- Dyrektywa 2000/60 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 roku (Ramowa Dyrektywa Wodna) ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Dz.U. L. 237 z dnia 22 grudnia 2000 roku).
- Ferguson, R.I., Church, M. (2004). A simple universal equation for grain settling velocity. *Journal of Sedimentary Research*, 74, 933–937.
- Gleason, C.J., (2015). Hydraulic geometry of natural rivers: A review and future directions. *Progress in Physical Geography*, 39(3), 337–360.
- Gorczyca, E., Krzemiń, K., Łyp, M., Strużyński, A. (2018). Białka – ostatnie koryto roztokowe w polskich Karpatach. [w:] *Antropogeniczne uwarunkowania współczesnych procesów fluwialnych*. Kraków: Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, UJ, 85–89.
- Książek, L., Woś, A., Roche, G. (2017). Boulder cluster influence on hydraulic microhabitats distribution under varied instream flow regime. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 16(4), 139–153. DOI: <http://doi.org/10.15576/ASP.FC/2017.16.4.139>.
- Leja, M., Książek, L., Hawryło, A. (2013). Dystrybucja napężeń i prędkości średnich na wybranych odcinkach rzeki Mszanki. [W:] T.M. Traczewska (red.), *Interdyscyplinarne zagadnienia w Inżynierii i Ochronie Środowiska*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 333–340.
- Lenar-Matyas, A., Łopuszek, M., Lafont, M., Poulard, C. (2010). Możliwość rewitalizacji koryt i potoków w warunkach zróżnicowanego zagospodarowania. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 9, 17–27.
- Łopuszek, M. (2013). Wpływ czynników antropogenicznych na równowagę koryt dopływów górnej Wisły. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie*, 13, 1(41), 75–88.
- Łopuszek, M., Lenar-Matyas, A. (2013). *Utrzymanie i zagospodarowanie rzek górskich*. Kraków: Wydawnictwo PK.
- Michalec, B., Strużyński, M. (2010). Definition of dimensionless coefficient of resistance and coefficient of roughness in cross-section of stream with large roughness element. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 11, 15–22.
- Michalec, B., Zwolenik, M. (2019). Assessment of influence large roughness elements on hydraulic water flow conditions in Będkowska stream channel. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 18(2), 13–22. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2019.18.2.13>.
- Michalec, B., Zwolenik, M. (2020). Wstępna weryfikacja formuł empirycznych służących określeniu współczynnika szorstkości. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 19(4), 21–32. DOI: <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2020.19.4.21>.
- Njenga, K., Kioko, K., Wanjiru G. (2013). Secondary current and classification of river channels. *Applied Mathematics*, 4, 1, 2013, 70–78. DOI: <https://doi.org/10.4236/am.2013.41013>.
- Papanicolaou, A.N., Elhakeem, M., Hildale, R. (2007). Secondary current effects on cohesive river bank erosion. *Water Resour. Res.*, 43, W12418. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006WR005763>.
- Pittaluga, M.B., Nobile, G., Seminara, G. (2009). A nonlinear model for river meandering. *Water Resour. Res.*, 45, W04432. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008WR007298>.
- Riley, S. (1972). A comparison of morphometric measures of bankfull. *J. Hydrol.*, 17, 23–30.
- Rosgen, D.L. (1994). A classification of natural rivers. *Catena*, 22, 169–199.
- Saleh, F., Ducharme, A., Flipo, N., Oudin, L., Ledoux, E. (2013). Impact of river bed morphology on discharge and water levels simulated by a 1D Saint-Venant hydraulic model at regional scale. *Journal of Hydrology*, 476, 169–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.027>.
- Shaheed, R., Mohammadian, A., Yan, X. (2021). A Review of numerical simulations of secondary flows in river bends. *Water*, 13, 884. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13070884>.
- Stewardson, M. (2004). Hydraulic geometry of stream reaches. *Journal of Hydrology*, 306, 97–111.
- Strużyński, A. (2006). Skutki powodzi roztopowej w roku 2006 w uregulowanym odcinku delty śródlądowej rzeki Nidy. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 4(1).
- Strużyński, A. (2013). Ocena stanu oraz identyfikacja zaburzeń procesów fluwialnych w korytach rzek karpaccich. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 13 (2), 117–130.
- Strużyński, A., Wyrębek, M., Strużyński, M., Kulesza, K. (2011). Cross-section changes in the lower part of a mountain river after the flood in spring 2010, as presented by means of CCHE2D program. [In:] M. Rowiński (ed.), *Experimental Methods in Hydraulic Research*, Geoplanet: Earth and Planetary Sciences 1. Berlin, Heidelberg: Springer, 287–297. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-17475-9_21.
- Vowinckel, B. (2021). Incorporating grain-scale processes in macroscopic sediment transport models. *Acta Mech*, 232, 2023–2050. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00707-021-02951-4>.

- Wierzbicki, J. (2003). *Przyrodnicze, gospodarcze i hydro-techniczne przesłanki regulacji rzek*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza „Sadyba”.
- Yuce, M.I., Esit, M., Muratoglu, A. (2015). determining the hydraulic geometry parameters of Seyhan river. *American Journal of Engineering, Technology and Society*, 2, 4, 77–84.
- Zhang, Y. (2005). CCHE2D-GUI Graphical User Interface for the CCHE2D Model. NCCHE Technical Report. NC-CHE-TR-2005-03, May 2005.

ANALYSIS OF CHANGES IN HYDRAULIC PARAMETERS IN A LOWLAND RIVER USING NUMERICAL MODELING

ABSTRACT

Aim of the study

River channels are dynamic structures in which fluvial processes leading to equilibrium state between energy of flowing water and the stability of the bed material. The changes of river morphology is difficult to capture using the monitoring tools, however, physical or numerical modeling can be used instead to reflect these natural processes. Objective of the study is to analyze the variability of hydraulic parameters and their impact on morphological changes using numerical modeling of a regulated section of the Nida River.

Material and methods

On the basis of field measurements, numerical model of the river was built. In this section, the channel has been strengthened, which enables the process of its restoration. Numerical modeling was carried out for a range of flows from low to an overbank one. Bankfull discharge was determined using the Riley method. Calculations based of modeled parameters made it possible to analyze their impact on the bed dynamics.

Results and conclusions

The numerical modeling results (average velocity, shear stresses, and water depth) was used to calculate shear velocity, Reynolds Number, Grain Reynolds Number and settling velocity. The lack of clear trends of changes in individual parameters with increasing flows proves the existence of irregular connections between flowing water and riverbed. Changing discharge in the river affects not only the intensity of fluvial processes, but also their location. The bottom morphology created during low flows is completely changed at the passage of high water, as indicated by measurements and simulations of the examined section of the Nida River.

Keywords: numerical modelling, hydraulic parameters, lowland rivers