INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 8/1/2010, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 179–189
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Łukasz Bąk, Alicja Michalik

PROCESY EROZJI I AGRADACJI NA UREGULOWANYM ODCINKU RZEKI CZARNA NIDA

PROCESSES OF EROSION AND AGGRADATION WITHIN THE REGULATED SECTION OF THE CZARNA NIDA RIVER

Streszczenie

Głównym celem prezentowanych badań jest określenie zmian morfologicznych na „uregulowanym" odcinku rzeki Czarna Nida, spowodowanych czterema wezbraniami. Na odcinku tym wykonano pomiary geometrii dwunastu przekroi poprzecznych po przejściu fal wezbraniowych, składu uziarnienia materiału dennego oraz prędkości przepływu. Oceniono zmiany warunków hydrodynamicznych, mających decydujący wpływ na objętość transportowanego materiału dennego, rozmycie skarp i tym samym na kształt koryta. Oceniono objętość materiału zakumulowanego w obrębie koryta i równiny zalewowej oraz pochodzącego z erozji skarp. Objętość transportu rumowiska została obliczona równaniem Ackersa i White'a. Stwierdzono, że procesem mającym największy wpływ na transformacje koryta jest depozycja, a usunięcie wyspy śródkorytowej może wpłynąć na rozmieszczenie stref erozji i sedymentacji w korycie.

Słowa kluczowe: agradacja, erozja boczna, erozja denna, wezbranie

Summary

The main goal of the presented research was to determine the morphological changes in the "regulated" section of the Czarna Nida River caused by four freshets. The surveying measurements of twelve cross-sections, bed material composition and stream velocity were carried out. The changes of the hydrodynamic conditions, having a decisive impact on the intensity of transported material, bank erosion and thus on the channel shape were estimated. The volume of material accumulated within the channel and flood plains and derived from bank erosion was

estimated. The Ackers and White- equation was used to calculate the volume of transported material. It was found that the greatest impact on the river channel transformation has the deposition of material.

Key words: *aggradation, bank erosion, bed erosion, freshet*

WSTĘP

Procesy fluwialne obserwowane w korycie rzecznym zależą od wielu czynników takich jak: natężenie przepływu i czas jego trwania, uziarnienie materiału dennego, odporność brzegów na erozję oraz geometria samego koryta [Brice 1982; Odgaard 1984; Thorne 1992]. Im większe wezbranie i dłuższy czas jego trwania, tym intensywniej przebiegają procesy takie jak erozja denna, boczna i transport. Natężenie i prędkości przepływu przekraczają wówczas znacznie wartości dopuszczalne. Do drugiej grupy czynników wpływających i nie rzadko potęgujących przebieg procesów fluwialnych należy działalność człowieka, prowadzona bezpośrednio w korycie, jak i dolinie rzeki. Niewłaściwie prowadzone prace regulacyjne, niekontrolowany pobór rumowiska dennego maja znaczący wpływ na przebieg tych procesów [Kondolf 1997; Kościelniak 2004, 2007]. Z procesem erozji stowarzyszony jest transport i akumulacja materiału. Konfiguracja dna ulega zmianie po każdym wezbraniu, gdyż jest ona wynikiem interakcji między omawianymi procesami.

W prezentowanym artykule przedstawiono wyniki badań procesów erozji i depozycji na „uregulowanym" odcinku rzeki Czarna Nida oraz podjęto próbę oceny wpływu przeprowadzonych prac na kierunek i intensywność tych procesów.

CEL I METODYKA BADAŃ

W wyniku powodzi w 2001 roku koryto rzeki Czarna Nida uległo intensywnemu przeobrażeniu. Wystąpiły liczne zniszczenia koryta w postaci rozmycia dna oraz intensywnej erozji skarp. Dla zabezpieczenia i naprawy zniszczeń wykonano w 2003 roku na odcinku o długości 0,5 km (km 14 + 400 – 15 + 900) prace polegające na nadaniu korytu przekroju trapezowego o nachyleniu 1:1, wyprofilowaniu i umocnieniu przy pomocy brzegosłonu faszynowego wklęsłej skarpy oraz usunięciu utrwalonych roślinnością trawiastą wysp śródkorytowych i łach zakolowych przy brzegach wypukłych. Celem badań była próba określenia intensywności transportu rumowiska oraz zmian morfologicznych koryta w obszarze „uregulowanego" odcinka, spowodowanych wezbraniami roztopowymi w latach 2004–2006 oraz wpływem przeprowadzonych robót na kierunek i intensywność tych zmian.

Aby dokonać wspomnianej oceny w latach 2003–2006 przeprowadzona badania, które obejmowały:

– pomiary geodezyjne profilu podłużnego oraz przekrojów poprzecznych,

– pomiary składu granulometrycznego materiału dennego na początku prowadzonych badań i po każdym zaobserwowanym wezbraniu (metodą konwencjonalną). Oznaczone średnice charakterystyczne wykorzystano do określenia wskaźników uziarnienia [Dąbkowski i in. 1982], takich jak: wskaźnik wysortowania (S_o) według Traska, wskaźnik różnoziarnistości (ε) oraz wskaźnik jednostajności Kollisa (C_d),

– określenie uziarnienie materiału budującego skarpy,

– wyznaczenie prędkości przepływającej wody na podstawie bezpośrednich pomiarów,

– określenie wielkości wezbrań w analizowanym okresie na podstawie danych z IMGW.

Wyniki pomiarów wykorzystano do obliczenia intensywności transportu rumowiska zgodnie z równaniem Ackersa i White'a [1973]:

$$S_t = C_s Q \tag{1}$$

Określenie całkowitego wydatku rumowiska dokonuje się na podstawie następujących parametrów:

$$F_{gr} = \frac{u_*^{N_1}}{\sqrt{gD_{35}\dfrac{\rho_s - \rho}{\rho}}} \left[\frac{U}{\sqrt{32}\log\left[\dfrac{10h}{D_{35}}\right]} \right]^{1-N_1} \tag{2}$$

$$G_{gr} = C_w \left[\frac{G_{gr}}{A_1} - 1 \right]^{M_1} \tag{3}$$

$$D_{gr} = D_{35} \left[\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{g}{\nu^2} \right]^{1/3} \tag{4}$$

$$u_* = \left(gR_h I_f \right)^{1/2} \tag{5}$$

$$C_s = \frac{G_{gr} D_{35}}{h\left(\dfrac{u_*}{U} \right)^{N_1}} \tag{6}$$

gdzie:

F_{gr} – parametr rozmywalności [-],

G_{gr} – parametr transportu [-],

D_{gr} – Bezwymiarowa średnica cząstki [-],
R_h – promień hydrauliczny,
I_f – spadek podłużny linii energii [-],
u_* – prędkość dynamiczna [m/s],
D_{35} – średnica rumowiska [-],
ρ, ρ_s – gęstość wody i gęstość rumowiska,
U – średnia prędkość przepływu wody w przekroju poprzecznym [m/s],
ν – kinematyczny współczynnik lepkości [m^2/s],
współczynniki C_w, A_1, M_1, N_1, są zależne od D_{gr}.

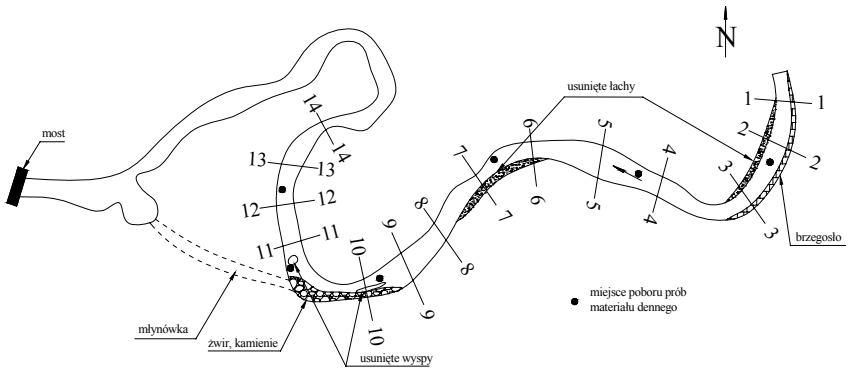
CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Czarna Nida jest lewobrzeżnym dopływem Nidy o całkowitej długości 63,80 km. Powstaje z połączenia dwóch cieków Belnianki oraz Lubrzanki (w pobliżu wsi Marzysz), odwadniających centralną część Gór Świętokrzyskich o powierzchni 1224,0 km^2. Za odcinek źródłowy (biorąc pod uwagę kryterium wielkości rocznego odpływu wody) należy uznać Belniankę, której źródła wypływają na wysokości 495,0 m n.p.m. z południowego stoku Pasma Łysogórskiego. Czarna Nida płynie w kierunku południowo-zachodnim, przy średnim spadku i = 0,57%, w górnej części biegu rzeki spadek wynosi i = 1,07% w środkowej i = 0,14%, a w dolnym odcinku (poniżej wodowskazu w Morawicy) zmniejsza się do i = 0,08% [Rzepa 1992].

Zlewnia Czarnej Nidy ma kształt nieregularny. W części źródliskowej jest wyraźnie zwężona i wraz z przyrostem długości ulega rozszerzeniu. Związane jest to z przyrostem dorzeczy Lubrzanki z prawej strony oraz Pierzchnianki i Morawki z lewej strony.

Czarna Nida jest rzeką wyżynną o deszczowo-śnieżno-gruntowym reżimie zasilania, opadach rocznych wahających się w przedziale od 560 do 720 mm. Maksymalna koncentracja odpływu przypada na okres wiosenny (wezbrania roztopowe) i letni (wezbrania deszczowe).

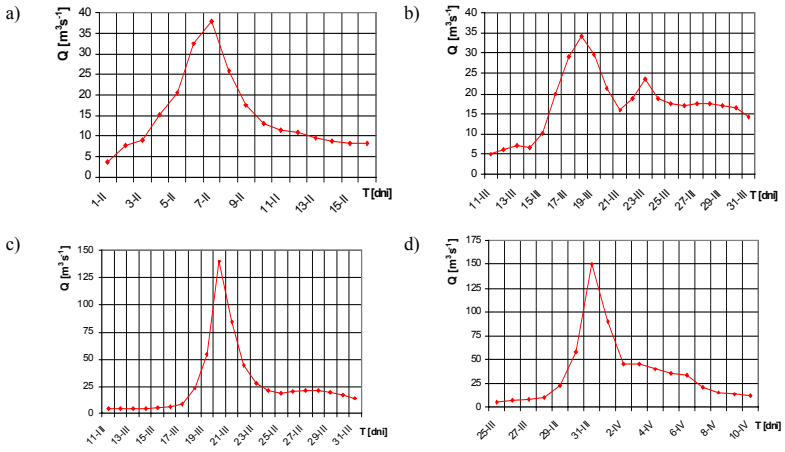
Na rysunku 1 przedstawiono lokalizacje 500-metrowego odcinka pomiarowego poddanego „regulacji", którego początek zlokalizowany był w odległości około 400 m do mostu usytuowanego w ciągu komunikacyjnym Morawica–Wolica w miejscowości Ostrów. W części silnie erodowanych skarp o wysokości 1,5–2,5 m zbudowanych z pyłu piaszczystego i gliny oraz wysp piaszczystych usuniętych w wyniku prowadzonych prac w korycie, wykonano 14 przekrojów poprzecznych. Wyniki pomiarów posłużyły do oceny zmian morfologicznych koryta po przejściu wezbrań.



Rysunek 1. Lokalizacja badanego odcinka i przekrojów pomiarowych
Figure 1. The studied sector and cross-sections location

WARUNKI HYDROLOGICZNE W OKRESIE BADAŃ

W latach 2004-2006 maksymalne przepływy zawierały się w granicach od Q = 35,0 m^3s^{-1} do Q = 150,0 m^3s^{-1} (w dwóch przypadkach były to przepływy większe od pełnokorytowego) i wystąpiły w miesiącach luty–kwiecień (rys. 2). Były to wezbrania wiosenne o charakterze roztopowym. W miesiącach letnich wezbrania były znacznie mniejsze i w okresie prowadzenia obserwacji nie osiągnęły przepływu brzegowego.



Rysunek 2. Natężenia przepływów wód wezbraniowych: (a i b) – 2004r., (c) – 2005 r., (d) – 2006r.
Figure 2. The Czana Nida water discharges during freshets: (a i b) in 2004, (c) in 2005, (d) in 2006

WYNIKI POMIARÓW

Przeprowadzone pomiary i obserwacje na odcinku koryta, którego naturalny układ został zmieniony w wyniku przeprowadzonych w jego obrębie prac usuwających uszkodzenia powstałe po powodzi z 2001 roku, pozwoliły prześledzić proces adaptacji rzeki do nowych warunków hydraulicznych.

W 2004 roku zaobserwowano dwa wezbrania o natężeniu przepływu 35-38 m^3/s. Nie miały one jednak większego wpływu na morfologię omawianego odcinka. Podczas pomiarów stwierdzono jedynie niewielkie podniesienie niwelety dna w miejscach, w których zostały usunięte łachy meandrowe (rys. 3 i 4).

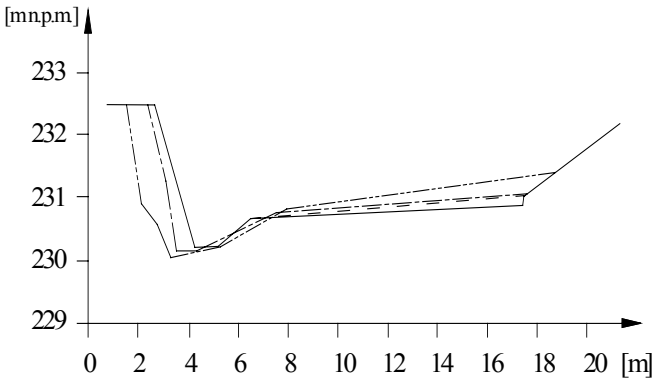
W 2005 roku stwierdzono rozmycie umocnionego brzegu na całej długości. Największe zaobserwowane przemieszczenie skarpy wynosiło 0,45 m i zaobserwowane było w centralnej części meandra (rys. 3). Rozmyciu uległ również odcinek lewej skarpy o długości 40 m zawarty między przekrojami 11-11 i 14-14, średnio o 0,70 m. Migracji bocznej koryta towarzyszyła erozja dna. Przy rozmywanych skarpach stwierdzono występowanie lokalnych przegłębień o długości 40–50 m. W ich obrębie koryto wycięte było w utworach ilastych. Maksymalne obniżenie niwelety dna wyniosło 0,15 m i wystąpiło w przekroju 2-2. W strefie brzegów wypukłych stwierdzono nadbudowanie istniejących łach średnio o 0,15–0,20 m (rys. 3 i 4).

Usunięcie wysp śródkorytowych między przekrojami 9-9 i 11-11 spowodowało przesunięcie nurtu w kierunku lewego brzegu. W tym obszarze stwierdzono powstanie strefy depozycji materiału piaszczystego (rys. 5). Agradacja była prawdopodobnie bezpośrednim wynikiem usunięcia wysp piaszczystych, ponieważ podczas obserwacji prowadzonych przed rokiem 2003 nie stwierdzono występowania obszarów depozycji materiału piaszczystego w tej części koryta, w której materiał denny składał się ze żwir i kamieni o średnicy 0,02–0,20 m. W miejscach usuniętych wysp zaobserwowano nasilenie procesów erozji dna. Obserwowane formy erozyjne miały kształt regularny, o obrysie zbliżonym do elipsy z maksymalnym zagłębieniem w centralnej części. Obniżenie dna w ich obszarze osiągało 0,30–0,40 m. Rozpatrując profil 10-10, można zauważyć podniesienie się rzędnej dna w centralnej części przekroju. Przypuszczalnie jest to początkowe stadium formowania się nowej łachy śródkorytowej i powrót koryta do kształtu zbliżonego do obserwowanego przed „regulacją".

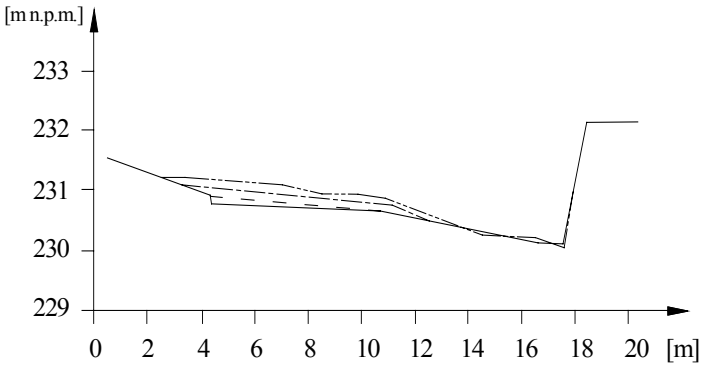
Pomiary przeprowadzone w roku 2006 pokazały dalszą tendencję do niszczenie przez rzekę skarp wklęsłych oraz do deponowania materiału przy brzegach wypukłych. Strefa maksymalnego rozmycia w przypadku lewej skarpy (przekrój 1-1 do 3-3) uległa przemieszczeniu w dół meandra i osiągnęła maksymalną wartość 1,20 m. Przepływ w obrębie tej skarpy był zaburzony przez pozostałości umocnienia. Prowadziło to do powstawania za przeszkodą równolegle (w tym samym czasie) szeregu wirów obracających się zgodnie z ruchem wskazówek zegara, przemieszczających się w kierunku brzegu i zanikających w jego

pobliżu. Było to przyczyną powstania mikronisz brzegowych o maksymalnej średnicy 0,35 m. W miejscu największej migracji brzegu zaobserwowano największe obniżenie dna wynoszące 0,20 m. Między przekrojami 4-4 i 10-10 prawa skarpa była rozmywana w niewielkim stopniu, a obserwowane przemieszczenie wynosiło około 0,04 m, co mieściło się w granicach błędu pomiaru.

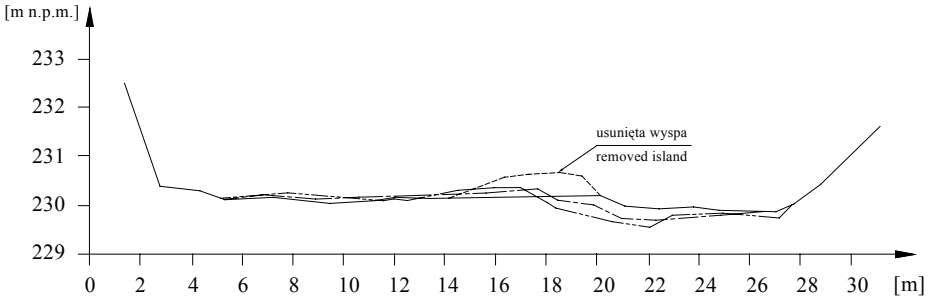
Objętość materiału zdeponowanego przy brzegach wypukłych na koniec okresu pomiarowego była o około 25% większa od objętości, jaka została usunięta podczas nadawania korytu kształtu trapezowego. Szacunkowa objętość wyerodowanego materiału w czasie pomiarów wyniosła 96,0 m^3, a zdeponowanego wewnątrz koryta 200,0 m^3.



Rysunek 3. Przekrój 2-2
Figure 3. Cross-section 2-2



Rysunek 4. Przekrój 7-7
Figure 4. Cross-section 7-7



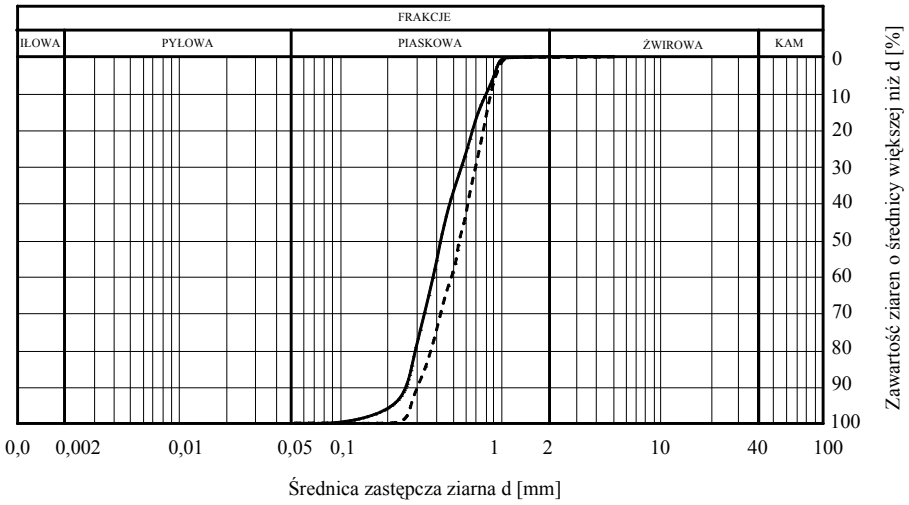
Rysunek 5. Przekrój 10-10
Figure 5. Cross-section 10-10

Podczas powodzi w 2005 i 2006 roku materiał niesiony przez rzekę deponowany był również poza korytem w strefie równiny zalewowej, tworząc formy sedymentacyjne o wysokości dochodzącej do 0,50 m i objętości do 2,50 m^3. W miarę oddalania się od krawędzi koryta formy sedymentacyjne były coraz mniejsze. Podczas prowadzonych prac zostały pomierzone jedynie większe formy akumulacyjne, oddalone około 20 m od krawędzi koryta, objętość tych form wyniosła 60,0 m^3. Dokładne pomierzenie objętości materiału zakumulowanego poza korytem byłoby bardzo pracochłonne i niezmiernie trudne, dlatego uzyskane wartości traktowane są jako przybliżające skalę zjawiska.

SKŁAD GRANULOMETRYCZNY MATERIAŁU DENNEGO ORAZ WARUNKI HYDRODYNAMICZNE NA BADANYM ODCINKU

Skład uziarnienia materiału dennego określono na podstawie analizy czterech prób pobranych z miejsc zlokalizowanych w pobliżu głównego nurtu oraz dwóch prób z wysp śródkorytowych (rys. 1). Po każdym z zaobserwowanych wezbrań materiał denny poddawano ponownej analizie granulometrycznej. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci krzywych uziarnienia na rysunku 6. W celu uzyskania większej przejrzystości prezentowanych danych pokazano dwie skrajne krzywe granulometryczne uzyskane podczas całego cyklu pomiarowego.

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że materiałem wyścielającym dno koryta jest piasek gruby oraz piasek drobny o średnicy miarodajnej odpowiednio $d_m = 0{,}54$ mm i $d_m = 0{,}40$ mm. W tabeli 1 przedstawiono wybrane średnice oraz cechy charakterystyczne materiału dennego. Wskaźnik jednostajności (C_d) oraz wysortowania (S_o) zawierał się odpowiednio w przedziale $0{,}83 \leq C_d \leq 1{,}09$ oraz $0{,}46 \leq S_o \leq 0{,}56$.



Rysunek 6. Krzywe uziarnienia materiału dennego uzyskane w latach 2003– 2006
Figure 6. Grain size distributions of bed material obtained in 2003–2006

Wartości tych wskaźników świadczą o bardzo dobrym wysortowaniu i jednorodności materiału dennego.

Tabela 1. Wskaźniki charakteryzujące rumowisko denne Czarnej Nidy
Table 1. Characteristic indicators of Czarna Nida bed material

Krzywa nr	dm [mm]	d_{10} [mm]	d_{50} [mm]	d_{95} [mm]	S_o	ε	C_d
1	0,54	0,90	0,55	0,26	0,56	0,27	0,83
2	0,40	0,80	0,42	0,20	0,46	0,21	1,09

Naprężenia graniczne ruchu rumowiska w rzekach z dnem piaszczystym są na ogół przekraczane [Strużyński, Wyrębek 2009]. Umożliwia to transportowanie materiału dennego i tworzenie form dennych przy niskich stanach. Na „uregulowanym" odcinku Czarnej Nidy już przy napełnieniu rzędu 0,10 m panują warunki charakteryzujące początek ruchu rumowiska dennego. Prędkość nierozmywająca określona równaniem Szamowa i Dębskiego dla piasku grubego i napełnienia 0,10 m wynosi odpowiednio 0,22 m/s i 0,34 m/s. Prędkość pomierzona była odpowiednio o 60% i 4% wyższa i wynosiła 0,35 m/s. Wyznaczone wielkości hydrodynamiczne zestawiono w tabeli 2.

Tabela. 2. Dane hydrodynamiczne dla wybranych przepływów w przekroju 2-2
Table 2. Hydrodynamic data for chosen water discharges in cross-section 2-2

Przekrój	Q [$m^3 \cdot s^{-1}$]	υ [$m \cdot s^{-1}$]	I [%]	τ [$N \cdot m^{-2}$]	ω [$N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]	S_t [$m^3 s^{-1}$]
2-2	10	0,42	0,6	6,80	2,90	2,78
	40	0,98		12,40	12,10	13,12
	100	1,95		17,00	31,00	35,40

Naprężenia styczne podczas wezbrań osiągały wartości od 6,80 do 17,0 $N \cdot m^{-2}$ natomiast moc strumienia miała wartości w przedziale od 2,90 do 31,00 $N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$. Wartości te były znacznie większe od naprężeń krytycznych i mocy krytycznej, które wynoszą odpowiednio $\tau_{kr} = 0{,}30\ N \cdot m^{-2}$ i $\omega_{kr} = 0{,}10\ N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i obliczeń można sformułować następujące wnioski:

– prace „regulacyjne" wykonane w 2003 roku miały duży wpływ na charakter i kierunek zmian koryta obserwowanych podczas wezbrań. Procesem mającym dominujący wpływ na jego morfologię była depozycja materiału dennego w obrębie wypukłych brzegów, w miejscach usuniętych łach meandrowych. Objętość materiału zdeponowanego w ich obszarze na koniec okresu pomiarowego była o 25% większa od objętości, jaka została usunięta podczas prac regulacyjnych,

– usunięcie wysp śródkorytowych na odcinku między przekrojami 9-9 i 11-11 spowodowało przesunięcie nurtu w kierunku centralnej części koryta, nasilenie procesów erozji dna na tym odcinku oraz sedymentację materiału piaszczystego przy lewej skarpie między przekrojami 9-9 i 10-10. Obserwowane maksymalne obniżenie dna na tym odcinku wyniosło 0,50 m,

– istotną role w procesie kształtowania koryta odgrywa erozja brzegów. Roczne tempo migracji bocznej erodowanych skarp wynosiło 0,40-0,70 m. We wszystkich obserwowanych przypadkach erozji brzegu wklęsłego towarzyszyła erozja denna. Maksymalna zaobserwowana wartość rozmycia dna wynosiła 0,20 m,

– materiał budujący dno koryta w obrębie badanego odcinka jest bardzo dobrze wysortowany i mało różnoziarnisty, a jego cechy charakterystyczne podlegały w okresie obserwacji niewielkim zmianom,

– transport materiału dennego obserwowany był już przy napełnieniu h = 0,10 m. Podczas wezbrań o natężeniu przepływu większym od Q=100 m^3/s materiał denny wynoszony był poza koryto i akumulowany w strefie równiny zalewowej, tworząc formy depozycyjne o objętości od kilku cm^3 do 2,5 m^3.

BIBLIOGRAFIA

Ackers P., White W. R. *Sediment transport – New approach and analysis.* J. Hydr. Div. ASCE 99, HY11, 1973.

Brice J. C**.** *Stream channel stability assessment*. Rep. of Transp., Washington D.C., 1982.

Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A. *Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych*. PWRiL, Warszawa 1982.

Kondolf G. M. *Hungry water: effects of dam and Ravel mining on river channels*. Environ. Manag, 21, 1997, s. 533–551.

Kościelniak J. *The influence of river training on mountain channel changes (Polish Carpatian Mountains)*. Geomorphology, 2007 s. 166–181.

Kościelniak J. *Zmiany funkcjonowania górskich systemów korytowych w wyniku przeprowadzonych regulacji hydrotechnicznych*. W Błaszkiewicz M., Gierszewski P. Rekonstrukcja I prognoza zmian środowiska przyrodniczego w badaniach geograficznych. Prace Geogr. IG i Pz PAN, 2004, s. 187–207.

Odgaard A. J. *Flow and bed topography in an alluvial channel bend*. J. Hyd.Eng., 110(4), 1984, s. 521–536.

Rzepa C. *Wpływ denudacji na chemizm wód w zlewni Czarnej Nidy w Górach Świętokrzyskich,* Kieleckie Towarzystwo Naukowe, 1992, s. 11–75.

Strużyński A., Wyrębek M. *Modelowanie wpływu kanału ulgi ze zbiornika pińczowskiego na procesy hydromorfologiczne w uregulowanym odcinku rzeki Nidy*. Nauka Przyr. Technol., 3, 3, 2009.

Thorne C. R. *Bend scour and bank erosion on the meandering Red River, Louisiana*. Lowland Floodplain Rivers: Geomorphologic Perspectives, John and Wiley & Sons Ltd, 1992, s. 97–101.

Łukasz Bąk
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach,
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,
Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej

Alicja Michalik
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie,
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
e-mail: rmmichal@cyf-kr.edu.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. Włodzimierz Parzonka*