

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2017), 26 (3), 346–360
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2017), 26 (3)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2017), 26 (3), 346–360
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2017), 26 (3)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2017.26.3.34

Karol PLESIŃSKI¹, Artur RADECKI-PAWLIK², Paweł MICHALIK¹

¹Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Department of Hydraulic Engineering and Geotechnics, University of Agriculture
in Krakow

²Instytut Mechaniki Budowli, Politechnika Krakowska
Institute of Structural Mechanics, Cracow University of Technology

Prognozowanie zmian korytotwórczych w uregulowanym korycie rzeki Czarny Dunajec z wykorzystaniem modelu jednowymiarowego*

On using HEC-RAS model for river channel changes predictions along the engineered Czarny Dunajec river

Słowa kluczowe: przepływ korytotwórczy, procesy geomorfologiczne, wykres Hjulströma, HEC-RAS, Czarny Dunajec

Key words: dominant discharge, geomorphological processes, Hjulström's graph, HEC-RAS model, Czarny Dunajec river

Wprowadzenie

W obecnym czasie tzw. Ramowa dyrektywa wodna Unii Europejskiej wymusza na projektantach budownictwa wodnego stosowanie rozwiązań, które nie będą negatywnie wpływały na morfologię koryta naturalnego. Nawet doskonale wpasowana w środowisko kory-

ta rzeczno budowla hydrotechniczna oddziałuje na przemiany korytotwórcze. W prezentowanej pracy przedstawione jest oddziaływanie bystrza o zwiększonej szorstkości na morfologię koryta rzeki Czarny Dunajec. Bystrza tego typu są stosowane na całym świecie, jednakże w Polsce ciągle jeszcze nie są do końca opisane i przebadane (Oertel i Schlenkhoff, 2012; Pagliara i Palermo, 2012, 2013; Oertel, 2013; Plesiński, Janas i Radecki-Pawlik, 2013; Radecki-Pawlik, 2013; Radecki-Pawlik, Plesiński i Wyżga, 2013; Plesiński, Jadach, Laszek i Radecki-Pawlik, 2014; Plesiński, Radecki-Pawlik i Wyżga, 2015; Radecki-Paw-

*Badania zostały sfinansowane z działalności statutowej DS-3322/KIWiG/2015 Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

lik, Plesiński i Ślizowski, 2015; Pagliara, Radecki-Pawlik, Palermo i Plesiński, 2017). Celem analizy było określenie oddziaływania budowli wodnej bliskiej naturze na morfologię dna w korycie rzeki przy przepływie wezbraniowym i przy przepływach średnich. Analizę tę wykonano przy użyciu wykresu Hjulströma, dzięki któremu można wyznaczyć strefy akumulacji, transportu i erodowania materiału dennego w korycie rzecznym. Można w ten sposób spróbować określić miejsca w rzece o dominacji danego procesu geomorfologicznego.

Ocenę działalności rzeźbotwórczej rzeki wykonano dla przepływu wezbraniowego, korzystając z danych wykonanych w trakcie modelowania numerycznego programem HEC-RAS (uzyskując w ten sposób wartość prędkości przepływu) oraz danych terenowych (uzyskując charakterystykę uziarnienia rumowiska dennego oraz przekroje geodezyjne koryta). Analizę tę powtórzono także dla przepływów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia: $Q_{50\%} = 59 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q_{25\%} = 99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q_{10\%} = 165 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $Q_{1\%} = 321 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wartości przepływów zostały obliczone karpackim wzorem Punzeta (Fal i Cabala-Plucińska, 2012).

Opis rzeki i obiektu badań

Zlewnia rzeki Czarnego Dunajca znajduje się w Tatrach Zachodnich (odcinek źródłowy), na Rowie Podhalańskim, Pogórzu Gubałowskim, w Kotlinie Orawsko-Nowotarskiej oraz w Beskidzie Żywieckim (Kondracki, 2000). Najwyższym punktem zlewni jest Starobociański Wierch (2176 m n.p.m.), a najniższym

punktem terenu jest połączenie Czarnego i Białego Dunajca (578 m n.p.m.) w Nowym Targu. Administracyjnie zlewnia leży w województwie małopolskim, w powiecie nowotarskim.

Rzeka Czarny Dunajec jest ciekim II rzędu o długości 48 km i powierzchni zlewni 450 km². Źródła rzeki znajdują się w Tatrach Zachodnich na wysokości 1540 m n.p.m. w Kotle Pod Wołowcem. Początkowo potok płynie Doliną Chochołowską jako Siwa Woda, aby następnie na przedpolu Tatr połączyć się z Kirową Wodą spływającą z Doliny Kościeliskiej. Dalej rzeka płynie już jako Czarny Dunajec przez miejscowości: Witów, Chochołów, Koniówkę, Podczerwone, Czarny Dunajec, Długopole, Wróblówkę, Kraszów, Ludźmierz, aby w Nowym Targu połączyć się z Białym Dunajcem.

Widok bystrza o zwiększonej szorstkości, zbudowanego na rzece Czarny Dunajec (w km 216+860) w miejscowości Czarny Dunajec pokazano na rysunku 1. Powierzchnia zlewni zamknięta badanym obiektem wynosi 142 km². Budowlę tę zaprojektowano i wykonano w formie betonowej płyty spadowej o spadku 1 : 4 ze znajdującymi się na niej kamiennymi szykanami ułożonymi w rzędach naprzemiennie w odległości



RYSUNEK 1. Bystrze na rzece Czarny Dunajec w miejscowości Czarny Dunajec
FIGURE 1. The block ramp in the Czarny Dunajec river in Czarny Dunajec

2,5 m oraz z usytuowaną poniżej niecką wypadową. Długość płyty spadowej oraz niecki wynosi odpowiednio 8 i 7 m. Szerokość obiektu na przelewie wynosi 30 m, zaś na końcowym progu niecki 40 m. Spad płyty spadowej wynosi 2,1 m, zaś całej budowli 1,25 m. Przepływ wody przez obiekt jest skoncentrowany na płycie spadowej (środkowa część przelewu na długości 4 m została obniżona o 0,25 m), dzięki czemu zapewniona jest ciągłość przepływu, nawet przy niskim stanie wody (Drozdowski, 1992). Poniżej bystrza znajdują się trzy przemiały żwirowe i jedna ławica boczna, dzięki którym nurt główny zostaje rozdzielony w bezpośredniej odległości od progu niecki wypadowej.

Metodyka

Pomiary terenowe

Pomiary geodezyjne przekrojów poprzecznych koryta rzecznego poniżej i powyżej bystrza wykonano w dwóch seriach 19 maja 2012 roku i 13 marca 2014 roku. Zastosowano metodę precyzyjnego pozycjonowania za pomocą globalnego systemu nawigacji satelitarnej GNSS. Wykorzystano kinematyczną technikę pomiarową RTN – pomiar wykonywany przy użyciu odbiorników stacjonarnych stanowiących sieć stacji referencyjnych oraz jednego odbiornika ruchomego mającego bezpośrednią łączność ze stacjami referencyjnymi, względem których jest wyznaczana w czasie rzeczywistym pozycja odbiornika ruchomego na podstawie danych obserwacyjnych lub poprawek do danych obserwacyjnych przesyłanych ze stacji referencyjnej do tych odbiorników za

pośrednictwem ośrodka obliczeniowego. Pomiar ten wykonywano odbiornikiem ruchomym GNSS firmy Leica składającym się z anteny Leica GS12 oraz kontrolera Leica CS15.

W wyniku tych pomiarów dla każdego pomierzonego punktu otrzymano współrzędne płaskie X, Y w państwowym układzie współrzędnych geodezyjnych 2000, oraz wysokość H w obowiązującym w Polsce układzie wysokościowym Kronsztadt86. Dokładność określenia współrzędnych przy wykorzystaniu techniki pomiarowej RTN wynosi 0,03 m dla współrzędnych poziomych (X, Y) oraz 0,05 m dla wysokości (H).

Powyżej bystrza dokonano geodezyjnego pomiaru przekrojów dna koryta rzecznego w odległościach 3, 7, 10, 15, 24, 30, 40, 60, 80 i 100 m od budowli. Z kolei poniżej bystrza wykonano pomiary przekrojów w odległościach 1, 6, 10, 15, 19, 24, 30, 35, 40, 45, 50, 55 i 65 m od budowli. Ponadto wykonano pomiar siedmiu przekrojów poprzecznych przez budowlę hydrotechniczną (rys. 2).



RYSUNEK 2. Rozmieszczenie przekrojów pomiarowych wraz z formami dennymi w programie HEC-RAS

FIGURE 2. The arrangement of cross-sections within bed form for the HEC-RAS modeling

Pobór i analiza rumowiska

Z koryta rzecznoego pobrano i przeanalizowano materiał aluwialny metodą Wolmana (1954), która polega na poborze 100 otoczków zbieranych w linii prostej i zmierzeniu ich wielkości. Na podstawie uzyskanych w ten sposób danych sporządzono krzywe granulometryczne, według których wyznaczono charakterystyczne średnice uziarnienia. Dla form korytowych znajdujących się w obszarze badawczym wyróżniono następujące wielkości materiału dennego:

- przemiał A: $d_{75} = 0,073$ m, $d_{50} = 0,058$ m, $d_{25} = 0,043$ m,
- przemiał B: $d_{75} = 0,093$ m, $d_{50} = 0,056$ m, $d_{25} = 0,035$ m,
- ławica C: $d_{75} = 0,105$ m, $d_{50} = 0,081$ m, $d_{25} = 0,059$ m,
- przewał 1: $d_{75} = 0,140$ m, $d_{50} = 0,102$ m, $d_{25} = 0,075$ m,
- przewał 2: $d_{75} = 0,105$ m, $d_{50} = 0,081$ m, $d_{25} = 0,059$ m,
- stanowisko górne: $d_{75} = 0,112$ m, $d_{50} = 0,084$ m, $d_{25} = 0,066$ m.

Modelowanie numeryczne w programie HEC-RAS

Modelowanie parametrów hydrodynamicznych dla przepływów wysokich przeprowadzono modelem HEC-RAS. Jest to model szeroko stosowany na świecie, który może być wykorzystywany do symulowania warunków przepływu przez różne budowle hydrotechniczne oraz w korytach rzecznych w zasięgu ich oddziaływania.

Między I serią pomiarową (19.05.2012) a II serią (13.03.2014) przeszła fala wezbraniowa o przepływie $Q_{wez} = 16,9$ m³·s⁻¹, stąd wartość ta została wykorzystana do tarowania mo-

delu hydrodynamicznego w programie HEC-RAS.

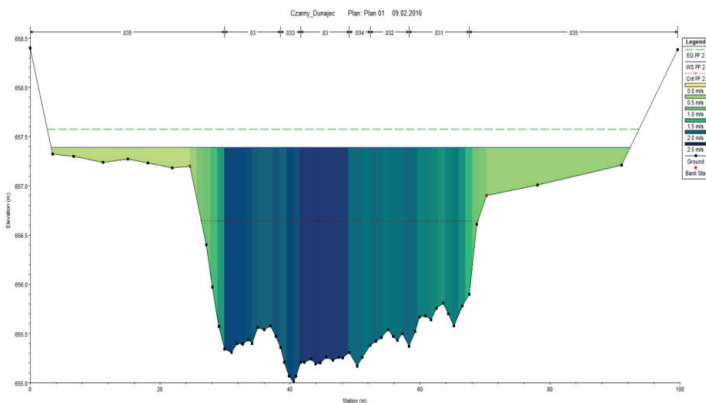
Następnym krokiem było zdefiniowanie pozostałych przepływów, dla których wykonano modelowanie numeryczne: $Q_{1\%} = 321$ m³·s⁻¹, $Q_{10\%} = 165$ m³·s⁻¹, $Q_{25\%} = 99$ m³·s⁻¹, $Q_{50\%} = 59$ m³·s⁻¹. Na podstawie pomiarów granulometrycznych określono także wartości współczynnika szorstkości według Manninga, określenie brzegów koryta oraz warunki graniczne na podstawie głębokości krytycznej w każdym z przekrojów poprzecznych.

Po wykonaniu modelowania numerycznego, w każdym przekroju odczytano wartości prędkości przepływu wody w korycie głównym, w przewałach oraz nad przemiałami i ławicami. Przykładowy przekrój z wynikami symulacji rozkładu prędkości dla przepływu wezbraniowego pokazano na rysunku 3.

Wyniki badań i dyskusja

W tabeli 1 przedstawiono wartości prędkości uzyskane w wyniku modelowania numerycznego w programie HEC-RAS, przykładowo dla $Q_{10\%} = 165$ m³·s⁻¹.

Na całym stanowisku górnym wartości prędkości są zbliżone do siebie (2,06–2,61 m·s⁻¹ dla $Q_{1\%}$, 1,96–2,63 m·s⁻¹ dla $Q_{10\%}$, 1,87–2,51 m·s⁻¹ dla $Q_{25\%}$, 1,41–2,02 m·s⁻¹ dla $Q_{50\%}$ oraz 0,68–1,39 m·s⁻¹ dla Q_{wez}) i są stosunkowo małe w porównaniu ze stanowiskiem dolnym. Przyczyną tak małych wartości prędkości jest podpiętrzenie wody wywołane przez przelew bystrza, który wystaje ponad dno ciekłu o 0,11 m. Tylko tuż przed przelewem woda



RYSUNEK 3. Przykładowy przekrój 12 z wynikami rozkładu prędkości przepływu według modelowania numerycznego dla $Q_{10\%}$

FIGURE 3. Example of flow velocity distribution in Cross-section 12 as a result of numerical modeling for $Q_{10\%}$

TABELA 1. Wartości prędkości uzyskane w wyniku modelowania numerycznego (przykład dla $Q_{10\%}$)

TABLE 1. The values of velocity obtained from the numerical modeling (example for $Q_{10\%}$)

Stano- wisko Location	Przekrój Cross-section	Strona lewa Left side			Środek Center	Strona prawa Right side	
		przecinał A bar A	przewał 1 channel 1	przecinał B bar B	nurt główny main current	ławica C bar C	przewał 2 channel 2
1	2	3	4	5	6	7	8
Stanowisko dolne Downstream	1	3,96			4,65	3,57	
	2	3,09			3,18	2,48	
	3	3,34			3,41	2,70	
	4	3,04			3,22	2,53	
	5	2,93			3,29	2,56	
	6	2,75			3,19	2,48	
	7	2,66			2,98	2,46	
	8	2,40			2,26	1,94	
	9	2,19	1,81	2,04	2,19	1,90	
	10	2,27	2,06	2,25	2,24	2,00	
	11	2,38	2,15	2,29	2,35	2,14	
	12	2,15			2,25	1,97	1,87
	13	6,21	6,10		6,19	5,62	5,51

TABELA 1 cd.

TABLE 1 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8
Bystrze Block ramp	14 – próg/ /threshold				3,48		
	15 – próg/ /threshold				3,45		
	16 – niecka wypadowa/ /energy dis- sipation pool				1,57		
	17 – niecka wypadowa/ /energy dis- sipation pool				1,57		
	18 – płyta spadowa/ /sloping apron				7,23		
	19 – płyta spadowa/ /sloping apron				6,11		
	20 – płyta spadowa/ /sloping apron				5,35		
	21 – przelew/ /notch	3,44	3,47		3,92	3,47	3,51
Stanowisko górne Upstream	22	2,40	2,21		2,29	2,14	2,37
	23	2,33	2,04		2,13	2,00	2,16
	24	2,34	2,01		2,10	1,98	2,28
	25	2,31	2,03		2,12	2,00	2,31
	26	2,26	2,05		2,11	2,16	2,35
	27	2,23	2,09		2,15	2,29	2,38
	28	2,31	2,29		2,37	2,44	2,62
	29	2,29	2,20		2,29	2,37	2,50
	30	2,20	2,29		2,28	2,37	2,63
	31	2,32	2,49		2,53	2,60	1,96
×	1/6 koryta 1/6 of channel	1/3 koryta 1/3 of channel		1/2 koryta 1/2 of chan- nel	2/3 ko- ryta/2/3 channel	5/6 koryta 5/6 of channel	

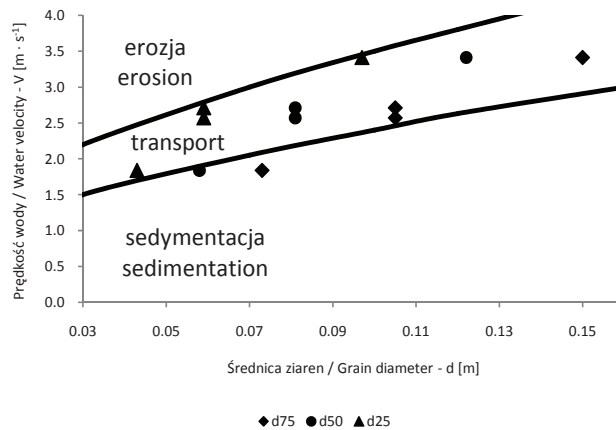
nieznacznie przyśpiesza (z 2,20 do 2,35 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{1\%}$, z 2,17 do 2,28 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{10\%}$), co jest spowodowane oddziaływaniem płyty spadowej, na której woda płynie ze znaczną prędkością. Tam też występują największe wartości prędkości przepływu w całym analizowanym korycie (przekroje 18–20). Napłyty spadowej przy przepływie $Q_{1\%}$ wartości prędkości wahały się od 6,06 do 7,91 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dla pozostałych analizowanych przepływów wartości w tym miejscu wyniosły: 5,35–7,23 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{10\%}$, 4,90–6,80 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{25\%}$, 4,43–6,14 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{50\%}$, 3,56–5,06 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla Q_{wez} .

W niecce wypadowej dochodzi do wytłumienia energii kinetycznej przepływającej wody, stąd dla najmniej korzystnego wariantu, przy przepływie $Q_{1\%}$, prędkość wyniosła 2,26 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Analogicznie dla przepływów niższych prędkości przepływu w niecce wypadowej są dużo mniejsze niż na płycie spadowej (1,57 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{10\%}$, 1,16 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{25\%}$, 0,78 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{50\%}$ oraz 0,33 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla Q_{wez}). Na progu niecki występują zaś wartości stosunkowo duże ($\approx 4,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{1\%}$, $\approx 3,46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{10\%}$, $\approx 2,98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{25\%}$, $\approx 2,46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{50\%}$, $\approx 1,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla Q_{wez}). W korycie rzeki poniżej budowli największe prędkości przepływu wody występowały tuż poniżej obiektu, w bezpośrednim sąsiedztwie wypływu wody z niecki wypadowej i jej spadu do koryta. Wartości prędkości dochodziły nawet do 6,96 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{1\%}$, 6,21 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{10\%}$, 6,08 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{25\%}$, 5,68 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{50\%}$ oraz 5,48 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla Q_{wez} . Duże wartości prędkości powodują dużą erozję denną poniżej budowli – głębokość rozmycia dna w tym miejscu wynosi 1,39 m. W następnych przekrojach prędkość

wody stabilizuje się w zakresie 2,29–2,82 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{1\%}$, 1,81–2,38 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{10\%}$, 1,59–2,21 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{25\%}$, 1,27–2,14 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{50\%}$ oraz 1,20–2,07 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla Q_{wez} . Za zmniejszenie prędkości przepływu wody odpowiada naturalny, roztokowy charakter rzeki w tym miejscu, gdzie możemy zaobserwować przemiały i przewały, które różnicują reżim przepływu. W kolejnych przekrojach badawczych, gdzie koryto staje się jednonurtowe i zawężone, prędkość przepływu rośnie, osiągając wartość 2,86–4,48 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{1\%}$, 2,46–4,65 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{10\%}$, 1,94–4,00 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{25\%}$, 1,35–3,61 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $Q_{50\%}$, 0,98–2,82 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla Q_{wez} .

Następnym elementem analizy było określenie na podstawie wykresu Hjulstoma rodzaju występującej przy wezbraniu aktywności geomorfologicznej rzeki, która może polegać na akumulacji niesionego materiału, jego transporcie lub erodowaniu i uruchamianiu znajdujących się w dnie rzeki ziaren (rys. 4). W celu wykonania takiego określenia posłużono się wartościami prędkości wody uzyskanymi w wyniku modelowania numerycznego oraz wartościami średnic charakterystycznych (d_{25} , d_{50} i d_{75}) rumowiska dennego, zmierzonego przed wezbraniem. Analizy wykonano dla wszystkich przekroi. Odczytane z wykresu Hjulstoma dane dotyczące działalności rzeźbotwórczej rzeki zestawiono w tabeli 2.

Na stanowisku górnym, gdzie wartości prędkości są małe, dno jest wyrównane, a jego spadek niewielki ($I = 0,82\%$), tylko przy przepływach $Q_{1\%}$ i $Q_{10\%}$ stwierdzono transport rumowiska, ale tylko frakcji drobnej ($\leq d_{50}$). Dla przepływu $Q_{25\%}$, już tylko frakcja najdrob-



RYSUNEK 4. Wykres Hjulströma do określania aktywności geomorfologicznej Czarnego Dunajca w przekroju 12
 FIGURE 4. Hjulström's graph used to determine geomorphology activity of the Czarny Dunajec at Cross-section 12

niejsza może być transportowana ($\leq d_{25}$). Z kolei dla przepływów $Q_{50\%}$ i Q_{wez} nawet najdrobniejsze ziarna nie są wleczone.

Z kolei na stanowisku dolnym, tuż poniżej budowli hydrotechnicznej dla każdego modelowanego przepływu stwierdzono wmywanie materiału dennego i erozję dna, co jest zgodne z obserwacjami terenowymi. W korycie na odcinku najbardziej roztokowym otoczaki są w pierwszej kolejności uruchamiane i transportowane z lewego przemiału A, gdzie wielkość ziaren jest najmniejsza. Ich transport można zaobserwować już przy przepływie $Q_{50\%}$ dla frakcji $\leq d_{50}$ oraz przy $Q_{25\%}$ dla wszystkich frakcji, zaś erozję przy przepływie $Q_{10\%}$. Kolejnym miejscem, gdzie można zaobserwować transport rumowiska dla frakcji $\leq d_{50}$, jest przemiał B, w którym rumowisko także jest drobne. Tylko na ławicy C, w przewale 1 oraz w nurcie głównym nie zaobserwowano transportu rumowiska nawet przy przepływie $Q_{10\%}$, co jest spowodowane bardzo dużymi ziarnami

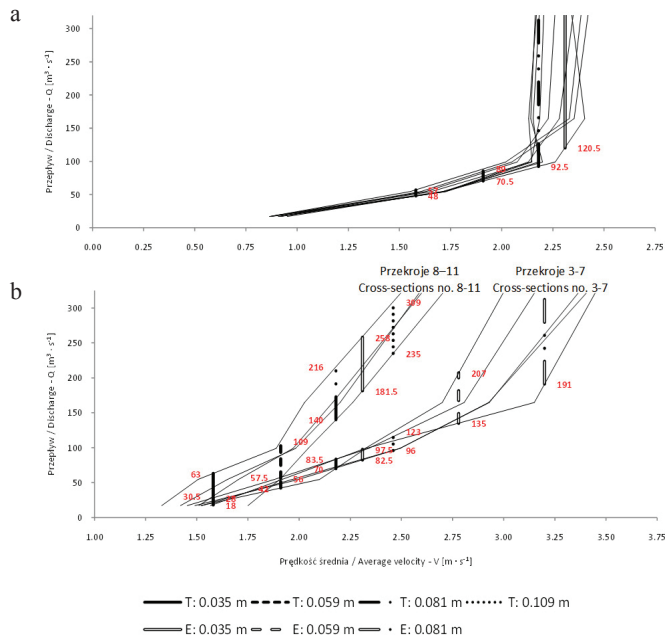
zalegającymi w dnie koryta. Transport w tych miejscach występuje tylko przy przepływie $Q_{1\%}$.

W następnym odcinku koryta, gdzie koryto staje się jednonurtowe, transport i erodowanie otoczków drobnych występuje już przy przepływie $Q_{25\%}$, zaś rumowiska grubego przy $Q_{10\%}$. Pomimo iż wielkość ziaren w tym miejscu jest porównywalna do wielkości rumowiska znajdującego się w innych miejscach koryta, to prędkość przepływu jest znacznie większa niż w odcinku roztokowym, co powoduje wcześniejsze uruchamianie i transportowanie otoczków.

Następnie dla każdego przekroju wykreślono zależność natężenia przepływu i prędkości średniej. Na podstawie wcześniejszych danych nałożono dodatkowo na wykresy wartości prędkości, przy których następuje początek ruchu i erozji dla danej wielkości ziarna rumowiska (rys. 5). Z rysunku 5 wynika, że nie można jednoznacznie stwierdzić, że ruch rumowiska występuje przy konkretnej, jednej wartości przepływu.

TABELA 2. Rodzaj działalności rzeźbotwórczej w poszczególnych miejscach koryta
 TABLE 2. The geomorphological activity within particular places in channel

Stanowisko Location	Przekrój Cross-section	Strona lewa/Left side						Środek/Center				Strona prawa/Right side						
		przemiał A bar A		przewał 1 channel 1		przemiał B bar B		nurt główny main current		ławica C bar C		przewał 2 channel 2						
		d ₇₅	d ₅₀	d ₇₅	d ₂₅	d ₇₅	d ₅₀	d ₇₅	d ₅₀	d ₇₅	d ₂₅	d ₇₅	d ₅₀	d ₂₅				
Stanowisko dolne Downstream	1	E	E	E				E	E	E	E	E						
	2	E	E	E				T	T	T	T	T						
	3	E	E	E				T	T	T	T	T						
	4	T	E	E				T	T	T	T	T						
	5	T	E	E				T	T	T	T	T						
	6	T	T	E				T	T	T	T	T						
	7	T	T	E				T	T	T	T	T						
	8	T	T	T				S	S	S	S	S						
	9	T	T	T	S	S	S	T	S	S	S	S	S					
	10	T	T	T	S	S	S	T	S	S	S	S	T					
	11	T	T	T	S	S	T	T	S	S	S	S	T					
	12	T	T	T					S	S	S	S	T	S	S	S	S	S
	13	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
Bystre Bystre ramp	14 – próg/threshold																	
	15 – próg/threshold							T	E	E								
	16 – niecka wypadowa/energy dissipation pool							S	S	S	S							
	17 – niecka wypadowa/energy dissipation pool							S	S	S	S							
	18 – płyta spadowa/sloping apron							E	E	E	E							



T: 0,035 m – początek procesu transportu rumowiska o średnicy $d = 0,035$ m / begin of sediment transport phenomena of $d = 0,035$ m, E: 0,035 m – początek wymywania, erozji i transportu ziaren otoczków o średnicy $d = 0,035$ m / begin the scour, erosion and transport of grains of $d = 0,035$ m

RYSUNEK 5. Wykres zależności natężenia przepływu od prędkości średniej w korycie w odniesieniu do początku ruchu rumowiska: a – stanowisko górne, b – stanowisko dolne
 FIGURE 5. Water discharge and average velocity in relation to the bed-load transport entrainment: a – upstream, b – downstream

W zależności od uzyskanych wartości prędkości w przekroju, wartość przepływu inicjującego ruch rumowiska jest wielkością z pewnego zakresu. Zakres ten jest mniejszy dla przepływów niższych, zaś większy rozrzut występuje dla przepływów największych, stąd zakres wartości przepływu inicjującego transport rumowiska wliczonego rośnie w miarę wzrostu natężenia przepływu.

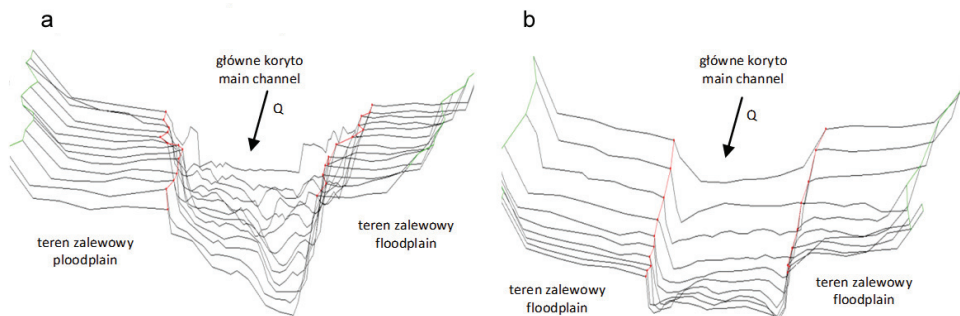
Na stanowisku górnym (rys. 5a), gdzie kształt koryta we wszystkich przekrojach był do siebie podobny (rys. 6a), można zauważyć, że wartości prędkości są do siebie zbliżone i mało zróżnicowane (tab. 1). Początek transportu naj-

drobniejszej frakcji rumowiska, o średnicy ziaren $d = 0,035$ m, w zależności od przekroju poprzecznego występuje już przy przepływie $48\text{--}57\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Podobną sytuację możemy zaobserwować dla rumowiska o średnicy ziaren $d = 0,059$ m, gdzie początek transportu tej frakcji możemy zaobserwować w wąskim zakresie wartości przepływu, wynoszącym $Q = 70,5\text{--}89\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (rys. 5a).

Sytuacja ulega bardzo diametralnej zmianie przy przepływie zbliżonym do $Q_{10\%}$, kiedy to struga płynącej wody rozlewa się na tereny zalewowe, na które jest przeniesiona część energii kinetycznej wody. Zauważa się, że pomi-

mo wzrostu przepływu, prędkość wody nie ulega już znacznemu zwiększeniu, dlatego na początek ruchu rumowiska i erozji dennej możemy wyznaczyć tylko dolną granicę przepływu. Wynosi ona $Q = 92,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla początku transportu otoczków o $d = 0,081 \text{ m}$ oraz $Q = 120,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla początku erozji dennej i wymywania otoczków o średnicy $d = 0,035 \text{ m}$ (rys. 5). Na stanowisku dolnym (rys. 5b), dla przekrojów 3–7, czyli najdalej oddalonych od bystrza, występują większe wartości prędkości wody niż w przekrojach 8–11, które są zlokalizowane tuż poniżej budowli (tab. 1). Spowodowane jest to jednonurtowym odcinkiem koryta w przekrojach 3–7 (rys. 6b). Dla odcinka roztokowego

na odwrót niż dla przepływów niskich. W korycie jednonurtowym wykresy zależności przepływ – prędkość są do siebie zbliżone, co świadczy o mniejszej dynamice i mniejszym zróżnicowaniu reżimu przepływu dla przepływów niskich i średnich. Brak przewalów i przemiałów korytowych w korycie rzeki (rys. 6a) powoduje, że dany odcinek charakteryzuje się jednorodną prędkością przepływu. Dopiero dla przepływów wyższych, kiedy woda rozlewa się na tereny zalewowe, wartości prędkości są bardziej zróżnicowane. Podobną sytuację można zaobserwować na stanowisku górnym, gdzie także koryto jest jednonurtowe i mało zróżnicowane geometrycznie (rys. 6b).



RYSUNEK 6. Kształt koryta na stanowisku górnym (a) i dolnym (b) bystrza
 FIGURE 6. Upstream (a) and downstream (b) cross-sections of analyzed ramp

(przekroje 8–11) zakresy wartości przepływu inicjującego transport otoczków o konkretnej wielkości ziaren są mniej zróżnicowane (rys. 5b). Zakresy tych przepływów są większe w korycie roztokowym niż w jednonurtowym dla przepływów niższych. Sytuacja zmienia się jednak dla przepływów wysokich, gdzie zakresy przepływów inicjujących transport są większe w korycie jednonurtowym niż w roztokowym, a więc

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Analiza rzeźbotwórcza rzeki Czarnej Dunajec w rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości wykazała występowanie zjawisk erozyjnych i transportu rumowiska dennego dla średnic charakterystycznych d_{25} , d_{50} i d_{75} , jedynie przy przepływach wysokich w kilku

przekrojach za niecką wypadową bystrza na stanowisku dolnym oraz na płycie spadowej bystrza. Dla średnic charakterystycznych d_{25} i d_{50} stwierdzono też występowanie transportu rumowiska także w najdalej oddalonych od bystrza przekrojach na stanowisku dolnym, gdzie występował jeden nurt, przez co moc strumienia była znacznie większa niż na przekrojach wcześniejszych, jednakże mniejsza była jego dynamika. Z kolei w przekrojach powyżej bystrza zjawiska erozyjne i transport rumowiska występuje tylko dla średnic d_{25} i d_{50} przy najwyższych modelowanych przepływach, co jest skutkiem podpiętrzenia wody przez budowlę i zmniejszenia prędkości przepływu wody, a tym samym zmniejszenia siły transportowej i erozyjnej rzeki.

2. Prędkości przepływu wody zarówno przy przepływach niskich, jak i w czasie fali wezbraniowej były znacznie mniejsze w przekrojach na stanowisku górnym niż w przekrojach na stanowisku dolnym, co było spowodowane podpiętrzeniem wody powyżej budowli. W związku z tym, na stanowisku górnym nie stwierdzono erozji dna nawet podczas przepływów wysokich.

3. W przekrojach usytuowanych na stanowisku dolnym występuje znacznie większe zróżnicowanie występujących form korytowych niż na stanowisku górnym, co także odpowiada większej zmienności parametrów hydrodynamicznych.

4. Zróżnicowanie parametrów hydrodynamicznych i morfologii dna rzeczne powyżej i poniżej bystrza jest związane z zasięgiem i ze sposobem oddziaływania tej budowli na koryto rzeczne. Na stanowisku górnym oddziaływanie bystrza występuje na odcinku około 100 m, co jest efektem podpiętrzenia

płynącej wody przez wystającą ponad dno rzeczne koronę przelewu bystrza o wielkość $h \approx 0,11$ m). W związku z tym, przy stosunkowo dużych napełnieniach, woda płynie z względnie małą prędkością. Z kolei na stanowisku dolnym bystrze oddziałuje na odległość około 25 m, co jest wartością czterokrotnie mniejszą niż w przypadku stanowiska górnego. Oddziaływanie to polega na roztokowaniu koryta rzeczne, co jest możliwe dzięki dużej szerokości niecki wypadowej i progu, który znajduje się na jej końcu, wynoszącej $B_d = 40$ m (tj. większej niż w przypadku szerokości korony przelewu górnego, wynoszącej $B_p = 30$ m). Woda przelewa się przez wspomniany próg jednostajnie, w podobnej ilości na całej szerokości progu, różnicując tym samym warunki hydrodynamiczne i morfologiczne poniżej obiektu. Dopiero w odległości 25 m poniżej bystrza wszystkie płynące wcześniej strugi łączą się w jeden nurt, a koryto staje się jednonurtowe o szerokości $B_k \approx 13,5$ m (z silnie wykształconym korytem głównym i wysoką ławicą boczną).

5. Analiza wykazała, że dla określonej średnicy ziaren rumowiska nie można wyznaczyć jednej wartości natężenia przepływu, przy której rozpoczyna się ich transport lub powstaje erozja dna. W tym przypadku możemy mówić tylko o zakresie przepływów, przy których możemy zaobserwować wspomniane zjawiska. Za taki stan rzeczy odpowiada złożona geometria koryta i przekrojów poprzecznych, a także różnorodne rumowisko denne. Im bardziej zróżnicowane są te warunki, tym większy zakres przepływów będzie odpowiadał inicjacji transportu i erozji. Możemy natomiast mówić o wartościach prędkości wystę-

pujących niezależnie od wartości przepływu, przy których ziarna rumowiska o określonej średnicy mogą być transportowane i przy której następuje erozja dna.

6. Wartość przepływu korytotwórczego, przy której w myśl definicji powinien występować w korycie transport przynajmniej połowy otoczków (min. $\leq d_{50}$) (Marlette i Walker, 1968), nie może być jednoznacznie wyznaczony dla całego analizowanego koryta, lecz tylko dla jego fragmentów, które cechują się zbliżoną morfologią i wielkością rumowiska dennego. Wartość tego przepływu wynosi $Q_{50\%} = 55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla odcinka poniżej bystrza, charakteryzującego się jednonurtowym korytem (przekroje 3–7), $Q_{10\%} = 165 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla odcinka poniżej budowli, charakteryzującego się dużą zmiennością morfologii (przekroje 8–11), oraz $Q_{1\%} = 321 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ dla stanowiska górnego, gdzie woda jest podpiętrzana przez budowlę, co z kolei prowadzi do spadku siły transportowej i erozyjnej rzeki.

Literatura

- Drozdowski, J. (1992). Regulacja potoku Czarnej Dunajec w Czarnym Dunajcu /km 216 – 217,5/. *Projekt techniczny jednostadiowy*. BSiPBW Hydroprojekt Kraków Sp. z o.o.
- Fal, B. i Cabala-Plucińska, B. (2012). Wykorzystanie wzorów empirycznych do szacowania maksymalnych przepływów rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia na przykładzie obliczeń w dorzeczu Sanu. *Gospodarka Wodna, 1*, 19-25.
- Kondracki, A. (2000). *Geografia regionalna Polski*. Warszawa: PWN.
- Marlette, R. i Walker, H. (1968). Dominant Discharge at Plate Missouri Confluence. *Journal of Waterways and Harbors Division, 94*, 5801-5805.
- Oertel, M. (2013). In-Situ Measurements on Cross-Bar Block Ramps. W: D.B. Bung & S. Pagliara (red.), *International Workshop on Hydraulic Design of Low-Head Structures*. (strony 111-119). Aachen: IWLHS. Bundesanstalt für Wasserbau.
- Oertel, M. i Schlenkhoff, A. (2012). Crossbar Block Ramps: Flow Regimes, Energy Dissipation, Friction Factors, and Drag Forces. *Journal of Hydraulic Engineering, 138(5)*, 440-448.
- Pagliara, S. i Palermo, M. (2012). Effect of energy dissipation pool geometry on the dissipative process in the presence of block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138(11)*, 1027-1031.
- Pagliara, S. i Palermo, M. (2013). Scour at Foundations of Rock Made Low-Head Structures. W: D.B. Bung, S. Pagliara (red.), *International Workshop on Hydraulic Design of Low-Head Structures*. (strony 169-177). Aachen: IWLHS. Bundesanstalt für Wasserbau.
- Pagliara, S., Radecki-Pawlik, A., Palermo, M. i Plesiński, K. (2017). Block ramps in curved rivers: morphology analysis and prototype data supported design criteria for mild bed slopes. *River Research and Applications, 33*, 427-437.
- Plesiński, K., Radecki-Pawlik, A. i Wyżga, B. (2015). Sediment Transport Processes Related to the Operation of a Rapid Hydraulic Structure (Boulder Ramp) in a Mountain Stream Channel: A Polish Carpathian Example. W: P. Heininger, J. Cullmann (red.), *Sediment Matters*. (strony 39-56). Koblenz: Springer.
- Plesiński, K., Jadach, A., Laszek, W. i Radecki-Pawlik, A. (2014). Zmiany warunków hydrodynamicznych w rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Rabe w Karpatach. *Nauka Przyroda Technologie, 8(4)*, 57, 1-16.
- Plesiński, K., Janas, M. i Radecki-Pawlik, A. (2013). Analiza parametrów hydraulicznych w rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Porębianie w Gorcach. *Acta Scientiarum Polonorum: Formatio Circumiecetus, 12(1)*, 101-114.
- Radecki-Pawlik, A. (2013). On using artificial rapid hydraulic structures (RHS) within

mountain stream channels – some exploitation and hydraulic problems. W: P. Rowiński (red.), *Experimental and Computational Solutions of Hydraulic Problems. GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*. (strony 101-115). Springer.

- Radecki-Pawlik, A., Plesiński, K. i Ślizowski, R. (2015). Comparative research of interlocked-carpet block ramp (ICBR) made of natural stone with rapid hydraulic structures (RHS) of Peterka type. W: R.F. Carvalho, S. Pagliara (red.), *IWLHS – The International Workshop on Hydraulic Structures: Data Validation*. (strony 105-114). Coimbra: IAHR, University of Coimbra, Marine and Environmental Sciences Centre.
- Radecki-Pawlik, A., Plesiński, K. i Wyzga, B. (2013). Analysis of Chosen Hydraulic Parameters of a Rapid Hydraulic Structure (RHS) in Porębianka Stream, Polish Carpathians. W: D.B. Bung, S. Pagliara (red.), *International Workshop on Hydraulic Design of Low-Head Structures*. (strony 121-128). Aachen: IWLHS. Bundesanstalt für Wasserbau.
- Wolman, M.G. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions, American Geophysical Union*, 35(6), 951-956.

Streszczenie

Prognozowanie zmian korytotwórczych w uregulowanym korycie rzeki Czarny Dunajec z wykorzystaniem modelu jednowymiarowego. W pracy przedstawiono prognozę zmian korytotwórczych w korycie rzeki uregulowanej za pomocą bystrza o zwiększonej szorstkości. Obszar badań znajdował się na rzece Czarny Dunajec i obejmował swoim zasięgiem 100-metrowy odcinek koryta powyżej bystrza o zwiększonej szorstkości i 65 m poniżej. Na podstawie pomiarów terenowych, modelowania numerycznego oraz z użyciem wykresu Hjulströma określono miejsca, w których występuje erozja koryta, transport lub sedymentacja rumowiska. Modelowanie numeryczne przeprowadzono dla prze-

plywu wezbraniowego $Q_{wezb} = 16,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, zaobserwowanego w rzece 5 sierpnia 2013 roku, oraz dla przepływów prawdopodobnych: $Q_{50\%} = 59 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q_{25\%} = 99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q_{10\%} = 165 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $Q_{1\%} = 321 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Podjęto także próbę wyznaczenia dla badanego odcinka rzeki wartości przepływu korytotwórczego.

Summary

On using HEC-RAS model for river channel changes predictions along the engineered Czarny Dunajec river. Along the paper, we presented an analysis of changes of cross-sections morphology within the regulated reach of a mountain river. The river engineering works there were done by building cable block ramp. The studied reach was located in the Czarny Dunajec river. Analyzed reach of the river consisted of 100-m long segment upstream of the existing block ramp and 65 m downstream of it. The analysis was done based on field measurements, numerical modeling with HEC-RAS and Hjulström's graph. Numerical modeling was conducted for observed flood $Q_{flood} = 16.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ on 5 August 2013, and for the t -years floods: $Q_{50\%} = 59 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q_{25\%} = 99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q_{10\%} = 165 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $Q_{1\%} = 321 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. For the analyzed reach an attempt was done to determinate dominant discharge.

Authors' address:

Karol Plesiński, Paweł Michalik
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
Poland
e-mail: k.plesinski@ur.krakow.pl

Artur Radecki-Pawlik
Politechnika Krakowska
Instytut Mechaniki Budowli
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
Poland