

Artur Radecki-Pawlik, Renata Jasek, Karol Plesiński

**ZRÓŻNICOWANIE PARAMETRÓW
HYDRODYNAMICZNYCH W RZECIE ROZTOKOWEJ
NA PRZYKŁADZIE ODCINKA OCHOTNICY W GORCACH**

***CHANGES OF HYDRAULIC PARAMETERS
IN THE BRAIDED RIVER – THE OCHOTNICA RIVER
IN THE GORCE MOUNTAINS***

Streszczenie

W pracy opisano badania nad zróżnicowaniem parametrów hydrodynamicznych w rzece roztokowej. Badania przeprowadzono w zlewni potoku Ochotnica w miejscowości Ochotnica Górna w Gorcach, w Karpatach polskich. Przekrój pomiarowy został wybrany w miejscu, gdzie w korycie rzeki utworzyły się dwie łachy roztokowe. Pomiary wykonano w latach 2003–2004 w 7 terminach, a następnie w roku 2010 przeprowadzono wizję terenową. Na podstawie zmierzonych wartości prędkości płynącej wody w pionach tachimetrycznych obliczono następujące parametry hydrodynamiczne: naprężenia styczne, prędkość dynamiczną, liczbę Reynoldsa, liczbę Froude’a oraz parametr Shieldsa. Parametry te pozwoliły sprawdzić jakie warunki hydrauliczne panują w korycie podczas tworzenia się roztok. Uzyskane wyniki pokazują, że w rzece przebiegają naturalne procesy roztokowania, mimo antropogenicznego zdewastowania koryta.

Słowa kluczowe: rzeka roztokowa, potok górski, parametry hydrauliczne, prędkość

Summary

Along the paper, the research on chosen hydrodynamic parameters in braided river was described. The research was conducted within the reach of the Ochotnica River in the Gorce Mountains – Polish Carpathians. The research reach was located in the place where two bars in the river were created. In 2003 and 2004 measurements were done in 7 series. Values of flow velocities were measured in the river reach and then shear stresses, dynamic velocities, Reynolds

and Froude numbers and Shields parameters were calculated. Analysis of hydrodynamics parameters allowed to check the hydrodynamic conditions in the river channel. The results show that in the Ochotnica River natural braiding processes are taking place despite of anthropological pressure on the river.

Key words: braided river, hydrodynamic parameters, velocity, mountain stream

WSTĘP

Ramowa Dyrektywa Unii Europejskiej – RDW - [Dyrektywa 2000/60/WE] zobowiązuje państwa członkowskie do doprowadzenia wód powierzchniowych do dobrego stanu. Ocena stanu ekologicznego wód odbywa się na podstawie analiz kilku elementów jakościowych. Jednym z tych elementów są warunki hydromorfologiczne cieków, w skład których wchodzi: reżim hydrologiczny (ilość i dynamika przepływu), ciągłość rzeki dla wędrówki organizmów wodnych, zmienność w głębokości i szerokości rzeki, struktura i skład podłoża, struktura strefy nadbrzeżnej. Elementami które warunkują zmienność hydromorfologiczną cieków są parametry hydrodynamiczne przepływu. To one właśnie i ich wartości są tematem niniejszego artykułu.

Przedstawione w pracy badania miały na celu poznanie warunków hydrodynamicznych w korycie żwirowym o budowie roztokowej. W korycie wielonurtowym rzeki Ochotnica zlokalizowano przekrój pomiarowy, którego rozwój obserwowano na przestrzeni lat 2003–2004. Pomiarów przeprowadzono dla wybranych punktów charakterystycznych w tym przekroju: w dwóch głównych roztokach oraz za łączą korytową przy połączeniu dwóch nurtów. W badaniach skupiono się na wykonaniu pomiarów prędkości wody w różnych warunkach przepływu, a na ich podstawie określono następujące parametry hydrauliczne przepływu: prędkość dynamiczną, naprężenia styczne, liczbę Reynoldsa, liczbę Froude'a oraz parametr Shieldsa. Oprócz tego zbadano materiał denny budujący koryto cieków.

OPIS BADANEJ ZLEWNI

Rzeka Ochotnica jest ciekami III rzędu o długości 22,7 km znajdującym się w południowej części województwa małopolskiego, w paśmie górskim Górców. Jest lewobrzeżnym dopływem Dunajca. Swoją początek bierze z połączenia dwóch potoków: Forędowskiego oraz Furcowskiego wypływających pod Kiczorą na wysokości 1200 m n.p.m. Powierzchnia całej zlewni wynosi 108 km². Spadek rzeki kształtuje się od 5,68% w partiach górnych do 1,55% w partiach dolnych. Średni spadek wynosi 3,61% [Krzemień 1984].



Rysunek 1. Położenie obiektu badań
Figure 1. Location of the research region

Potok Ochoznica zaliczany jest typologicznie do rzek karpackich, których zasoby wodne są nierównomiernie rozłożone w czasie i przestrzeni. Charakteryzują się częstą zmianą stanów wód, znacznym potencjałem powodziowym oraz znacznymi procesami erozyjnymi brzegów i dna rzecznej [Strategia 2008].

Obszar zlewni potoku Ochoznica należy do Gorców wchodzących w skład Karpat Zewnętrznych. Są one zbudowane z zespołu wzajemnie przekładających się ławic zlepieńców, piaskowców, mułowców i iłowców, czyli tzw. fliszu. Osa-

dom tym towarzyszą skały krzemionkowe oraz skały węglanowe [Warszyńska 1995]. W Gorcach można wyróżnić płaszczowinę magurską, która jest utworzona z pstrych łupków, które odpowiadają łupkom kredowym rejonu śląskiego, przykrytych warstwami inoceramowymi. Paleogen płaszczowiny zbudowany jest z pstrych łupków, piaskowców ciężkowickich, warstw hieroglifowych i piaskowca magurskiego [Książkiewicz i in. 1965].

Pokrywa glebowa w zlewni potoku jest typowa dla górskich obszarów bezkiszczkich. Są to głównie gleby pochodzenia mineralnego, wykształcone na podłożu fliszowym. Dominującym typem gleb są gleby brunatne. Na całym obszarze występują gleby brunatne kwaśne o odczynie kwaśnym i bardzo kwaśnym, które charakteryzują się płytkim poziomem próchnicznym oraz dużym udziałem części szkieletowych. Pod buczyną karpacką występują gleby szarobrunatne o lekko kwaśnym odczynie i rozbudowanym poziomie próchnicznym. W części dolnej zlewni przeważają gleby brunatne wylugowanie o płytkim poziomie próchnicznym oraz zasadowym i kwaśnym odczynie. Sporadycznie na terenie zlewni znajdują się gleby brunatne deluwialne, powstałe w wyniku procesów zmywowych. W wyższych partiach regla górnego i częściowo dolnego występują gleby bielcowe oraz częściowo bielice żelaziste i próchniczno-żelaziste. Przy ciekach wodnych oraz w zagłębieniach śródpolnych występują w niedużych, rozproszonych kompleksach gleby mułowo-glejowe o dobrze rozwiniętym poziomie próchnicznym oraz wadliwych stosunkach wodnych. W dolinie Ochotnicy występują niewielkimi kompleksami gleby torfowe oraz strefami wzdłuż cieków napływowe mady rzeczne- brunatne i czarnoziemie [Strategia 2008].

Odcinek pomiarowy został usytuowany w miejscowości Ochotnica Górna. W pierwszym okresie pomiarowym (25.04.2003 r.) podczas małego wezbrania woda była prowadzona dwoma roztokami 1A-1C i 2A-2B (rys. 4A) z trzech zaobserwowanych, nie uruchamiając roztoki na brzegu prawym. Zauważono jednakże stagnowanie wody w punkcie 3 poniżej tej roztoki. Następnie podczas pomiarów 14.06.2003r. w warunkach suszy hydrologicznej woda płynęła tylko w roztoce umiejscowionej po lewej stronie koryta rzeczno 1A-1C (rys. 4A), która to roztoka stanowiła koryto główne cieku.

Kolejne pomiary wykonano 29.07.2003 r. podczas niskiego wezbrania. Zaobserwowano, że przekrój rzeki był zmieniony w ten sposób, iż woda płynęła wyłącznie w roztoce i po łasze bocznej znajdującej się na brzegu lewym rzeki, usiłując ją rozciąć. Szerokość koryta płynącej wody była większa w tym terminie o 12 metrów, niż podczas poprzednich pomiarów przy niskich stanach wód.

Podczas kolejnych pomiarów (17.10.2003 r.) odnotowano raz jeszcze niskie stany wody, a roztoki środkowa i będąca z prawej strony rzeki nie były uruchomione. Warunki te spowodowały stagnowanie wody w roztoce prawej (2A-2B – rys. 4B) i utrzymywanie się przegłębienia poniżej łachy zwirowej, umiejscowionej również po prawej stronie koryta (punkt 3).

W dniu 05.04.2004 r. wykonano pomiary zaraz po bezpośrednim przejściu fali wezbraniowej. Koryto rzeki zostało zmienione w ten sposób, że nastąpiło zalanie brzegu lewego oraz prawego, co skutkowało uruchomieniem wszystkich roztok podczas wezbrania, a bezpośrednio po jego przejściu, woda pozostała w roztoce lewej, środkowej oraz prawej (rys. 4D).

Następnie podczas niskich stanów wody w dniu 08.07.2004 r. woda płynęła roztoką lewą 1A-1C (rys.4A) pozostawiając dwie prawe roztocki nieczynne. W dalszym ciągu zaobserwowano utrzymywanie się wypełnionego wodą przegłębienia poniżej miejsca łączenia się tych roztok.

Zasadnicze zmiany w morfologii odcinka pomiarowego zauważono w dniu 29.10.2004 r. Wykonane zostały wtedy pomiary w warunkach zdewastowanego koryta rzeczne. W wyniku nielegalnej eksploatacji żwiru z roztocki, usunięto łączę żwirową z lewego brzegu ciek, co poskutkowało przerwaniem naturalnego procesu roztokowania, a w przekroju utworzył się kanał z bardzo skoncentrowaną strugą wody (rys. 4E).

Przeprowadzona wizja lokalna dnia 30.03.2010 r. w badanym przekroju pomiarowym na Ochotnicy pokazała, że mimo wcześniejszej dewastacji koryta utworzyła się tu nowa łacha korytowa z naniesionego żwiru z górnych partii potoku, a woda prowadzona była dwoma z trzech istniejących roztok, co wskazuje na odtworzenie się procesu roztokowania rzeki w tym przekroju. Zauważono również, że na skarpie prawego brzegu rzeki występowała erozja boczna, a w punkcie 3 u wylotu roztocki prawej (2A-2C) i za łachą prawą woda znajdowała się w przegłębieniu, podobnie jak miało to miejsce podczas poprzednich obserwacji.

W przekroju pomiarowym średnica miarodajna rumowiska dennego w badanych łachach korytowych wynosiła $d_m = 0,102$ m, a średnice charakterystyczne wynosiły: $d_{20} = 0,022$ m, $d_{50} = 0,085$ m, $d_{80} = 0,170$ m. Obliczone parametry granulometryczne rumowiska miały następujące wartości, odpowiednio: wskaźnik

wysortowania Traska wynosił $S_0 = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} = \sqrt{\frac{0,150}{0,028}} = 2,31$, stopień wysor-

towania według Hazena $u = \frac{d_{90}}{d_{10}} = \frac{0,195}{0,006} = 32,5$, wskaźnik różnoziarnistości

według Knoroza, cecha dominacji według Kollisa $C_d = \frac{d_{90}d_{10}}{d_{50}^2} = \frac{0,195 \cdot 0,006}{0,085^2} = 0,16$, a współczynnik skośności według Traska

wynosił $S_k = \frac{d_{25}d_{75}}{d_{50}^2} = \frac{0,028 \cdot 0,150}{0,085^2} = 0,58$. Wartości te wskazują, że materiał

budujący koryto ciek jest umiarkowanie wysortowany, z przewagą drobnych frakcji.



Rysunek 2. Przekrój pomiarowy na potoku Ochotnica
Figure 2. The research cross section in the Ochotnica River

METODYKA

Pomiary prędkości wody zostały wykonane na potoku Ochotnica w przekroju, w którym koryto ma charakter roztokowy. Liczba pionów pomiarowych wahała się od 4 do 8 w zależności od panujących warunków przepływu. Badania wykonano w 7 różnych terminach w zróżnicowanych warunkach przepływu.

Pomiary prędkości chwilowej płynącej wody wykonano za pomocą młynka hydrometrycznego firmy OTT typu Nautilus 2000. Urządzenie to daje możliwość pomiaru prędkości wody w zakresie $0,001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Odczyty wykonane zostały bezpośrednio nad dnem oraz w określonych pionach w odstępach od 5 mm do 10 mm. W oparciu o wykonane pomiary prędkości chwilowych wykreślono tachoidy prędkości nad poszczególnymi punktami pomiarowymi. Pomiary prędkości chwilowej umożliwiły wyznaczenie następujących wielkości: prędkości średnie, prędkości dynamiczne, liczbę Reynoldsa (w pionie oraz tzw. ziarnowa), liczbę Froude'a i naprężenia styczne.

Obliczenia naprężeń stycznych wykonano na podstawie wykresów rozkładów prędkości nad dnem cieku w układzie pół-logarytmicznym. Z profilu prędkości można znaleźć wartość prędkości dynamicznej, ze wzoru [Gordon i in. 1992]:

$$V_* = \frac{a}{5,75} [m \cdot s^{-1}]$$

gdzie:

a – współczynnik nachylenia prostej $v = f^{(h)}$ przyjmującej postać
 $y = ah + b$

(gdzie: h – wysokość nad dnem na której wykonano pomiar prędkości;

b – wyraz wolny równania)

Obliczona wartość prędkości dynamicznej posłużyła do wyznaczenia naprężeń stycznych:

$$\tau = \rho \cdot (V_*)^2 [N \cdot m^{-2}]$$

gdzie:

$\rho = 1000 [kg \cdot m^{-3}]$ – gęstość wody

Następnie wyznaczono liczbę Froude'a przy głębokości średniej oraz maksymalnej, a także liczby Reynoldsa (odpowiednio dla głębokości w pionie pomiarowym oraz dla wysokości ziarnowej):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} [-]$$

gdzie:

v – prędkość wody [$m \cdot s^{-1}$],

h – napelnienie w korycie [m],

g – przyspieszenie ziemskie [$m \cdot s^{-2}$]

Obliczono również liczbę Reynoldsa (dla głębokości w pionie pomiarowym oraz dla wysokości ziarnowej).

$$Re = (v \cdot d) / [\nu]$$

gdzie:

v – prędkość wody [$m \cdot s^{-1}$],

d – promień hydrauliczny koryta ciekłu, lub wielkość cząstek przy dnie [m],

ν – kinetyczny współczynnik lepkości [$m^2 \cdot s$].

Wyznaczono również bezwymiarowe naprężenie krytyczne, zwane również parametrem Shieldsa. Wartość tego parametru określa wielkość naprężenia stycznego, po przekroczeniu której następuje początek ruchu rumowiska wlezonego.

$$\theta_{kr} = \frac{\tau}{(\gamma_r - \gamma_w) D_{50}} [-]$$

gdzie:

θ_{kr} – bezwymiarowe naprężenie krytyczne [-],

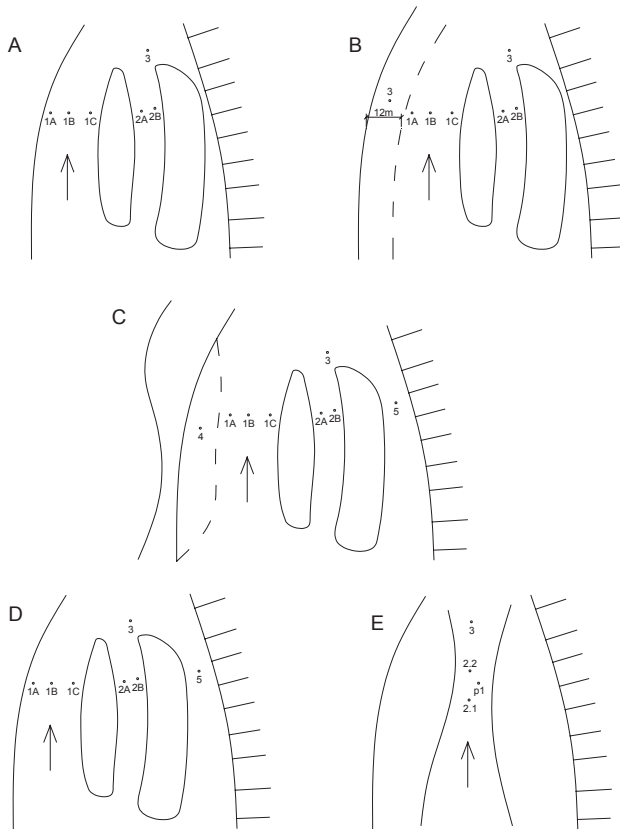
γ_w – ciężar właściwy wody [$N \cdot m^{-3}$],

γ_r – ciężar właściwy rumowiska [$N \cdot m^{-3}$],

D_{50} – średnica zastępcza [m].

WYNIKI BADAŃ WRAZ Z DYSKUSJĄ

W obrębie badanego obiektu przeprowadzono pomiary prędkości w charakterystycznych punktach tak, aby odzwierciedlały warunki hydrauliczne panujące w obszarze roztoki. Wybrano do tego celu od 4 do 8 punktów pomiarowych w zależności od panujących warunków przepływu, a następnie zestawiono tabelarycznie uzyskane wyniki.



Rysunek 3. Układ koryta podczas pomiarów w dniach:
A – 25.04, 14.06, 17.10.2003; B – 29.07.2003; C – 05.04.2004; D – 08.07.2004;
E – 29.10.2004

Figure 3. Pattern of channel during measurements in days:
A – 25.04, 14.06, 17.10.2003; B – 29.07.2003; C – 05.04.2004; D – 08.07.2004;
E – 29.10.2004

Tabela 1. Wyniki
Tabela 1. Results

25.04.03 Punkty	V_{sr} [m · s ⁻¹]	h_{max} [m]	V_{max} [m · s ⁻¹]	V_* [m · s ⁻¹]	τ [N · m ⁻²]	Fr_{max} [-]	Fr_{d50} [-]	Re_{max} [-]	Re_{d50} [-]	Re_{ks} [-]	Θ [-]
1A	0,165	0,32	0,165	0,0068	0,0467	0,093	0,182	40364	10596	75052	0,000034
1B	0,791	0,20	0,791	0,0163	0,2650	0,565	0,871	120939	50794	359793	0,000195
1C	0,591	0,27	0,591	0,0232	0,5374	0,363	0,651	121986	37951	268821	0,000395
2A	0,660	0,18	0,660	0,0181	0,3265	0,497	0,727	90819	42382	300206	0,000240
2B	0,989	0,20	0,989	0,0665	4,4182	0,706	1,089	151212	63509	449855	0,003249
3	0,127	0,60	0,127	0,0183	0,3354	0,052	0,140	58252	8155	57767	0,000247
14.06.03 Punkty	V_{sr} [m · s ⁻¹]	h_{max} [m]	V_{max} [m · s ⁻¹]	V_* [m · s ⁻¹]	τ [N · m ⁻²]	Fr_{max} [-]	Fr_{d50} [-]	Re_{max} [-]	Re_{d50} [-]	Re_{ks} [-]	Θ [-]
1A	0,282	0,08	0,290	0,0067	0,0455	0,318	0,319	17246	18622	128270	0,000033
1B	0,575	0,18	0,648	0,0411	1,6860	0,433	0,714	79122	41611	261543	0,001240
1C	0,361	0,14	0,376	0,0364	1,3250	0,308	0,414	38636	24145	164204	0,000974
3	0,298	0,04	0,303	0,0136	0,1840	0,476	0,334	9112	19457	135548	0,000135
29.07.03 Punkty	V_{sr} [m · s ⁻¹]	h_{max} [m]	V_{max} [m · s ⁻¹]	V_* [m · s ⁻¹]	τ [N · m ⁻²]	Fr_{max} [-]	Fr_{d50} [-]	Re_{max} [-]	Re_{d50} [-]	Re_{ks} [-]	Θ [-]
1A	0,501	0,24	0,520	0,0448	2,0102	0,327	0,573	91920	33392	227884	0,001478
1B	1,139	0,32	1,160	0,0524	2,7439	0,643	1,278	278633	74490	518083	0,002018
1C	0,269	0,10	0,302	0,0138	0,1897	0,272	0,333	20564	19393	122357	0,000140
2A	0,535	0,12	0,565	0,0302	0,9105	0,493	0,622	49079	36282	243349	0,000670
2B	0,570	0,12	0,590	0,0347	1,2074	0,525	0,650	52290	37887	259269	0,000888
3	0,105	0,70	0,131	0,0091	0,0821	0,040	0,144	56188	8412	47760	0,000060
4	0,515	0,08	0,530	0,0113	0,1286	0,581	0,584	31496	34034	234252	0,000095
17.10.03 Punkty	V_{sr} [m · s ⁻¹]	h_{max} [m]	V_{max} [m · s ⁻¹]	V_* [m · s ⁻¹]	τ [N · m ⁻²]	Fr_{max} [-]	Fr_{d50} [-]	Re_{max} [-]	Re_{d50} [-]	Re_{ks} [-]	Θ [-]
1A	0,448	0,08	0,450	0,0141	0,1999	0,506	0,496	27399	28897	203776	0,000147
1B	0,685	0,20	0,711	0,0098	0,0952	0,489	0,783	104732	45657	311578	0,000070
1C	0,133	0,09	0,137	0,0047	0,0220	0,142	0,151	9151	8797	60496	0,000016
2A	0,013	0,09	0,019	0,0008	0,0007	0,014	0,021	894	1220	5913	0,000000
3	0,017	0,40	0,019	0,0007	0,0004	0,009	0,021	5198	1220	7733	0,000000
05.04.04 Punkty	V_{sr} [m · s ⁻¹]	h_{max} [m]	V_{max} [m · s ⁻¹]	V_* [m · s ⁻¹]	τ [N · m ⁻²]	Fr_{max} [-]	Fr_{d50} [-]	Re_{max} [-]	Re_{d50} [-]	Re_{ks} [-]	Θ [-]
1A	0,723	0,26	0,808	0,0093	0,0866	0,453	0,890	143705	51886	328862	0,000064
1B	1,420	0,36	1,472	0,0051	0,0260	0,756	1,622	390796	94525	645899	0,000019
1C	0,623	0,15	0,638	0,0101	0,1024	0,514	0,703	71439	40969	283377	0,000075
2A	0,808	0,22	0,812	0,0214	0,4591	0,550	0,895	135892	52143	367525	0,000338
2B	0,487	0,12	0,534	0,0102	0,1031	0,449	0,588	44675	34291	221516	0,000076
3	0,177	0,58	0,184	0,0123	0,1503	0,074	0,203	78480	11816	80510	0,000111
4	0,331	0,12	0,336	0,0066	0,0439	0,305	0,370	30365	21576	150558	0,000032
5	0,137	0,08	0,140	0,0151	0,2268	0,155	0,154	8379	8990	62316	0,000167

08.07.04 Punkty	V_{sr} [m · s ⁻¹]	h_{max} [m]	V_{max} [m · s ⁻¹]	V_* [m · s ⁻¹]	τ [N · m ⁻²]	Fr_{max} [-]	Fr_{d50} [-]	Re_{max} [-]	Re_{d50} [-]	Re_{ks} [-]	Θ [-]
1A	0,049	0,11	0,060	0,0032	0,0104	0,047	0,066	4120	3853	22288	0,000008
1B	1,169	0,20	1,182	0,0340	1,1536	0,835	1,302	178733	75902	531729	0,000848
1C	0,248	0,06	0,268	0,0066	0,0441	0,323	0,295	11375	17210	112805	0,000032
2A	0,003	0,08	0,005	0,0002	0,00002	0,003	0,006	183	321	1365	0,000000
3	0,007	0,30	0,007	0,0005	0,0003	0,004	0,008	1605	450	3184	0,000000
4	0,137	0,04	0,140	0,0060	0,0358	0,219	0,154	4189	8990	62316	0,000026
29.10.04 Punkty	V_{sr} [m · s ⁻¹]	h_{max} [m]	V_{max} [m · s ⁻¹]	V_* [m · s ⁻¹]	τ [N · m ⁻²]	Fr_{max} [-]	Fr_{d50} [-]	Re_{max} [-]	Re_{d50} [-]	Re_{ks} [-]	Θ [-]
2.1	1,039	0,30	1,107	0,0447	2,0008	0,606	1,219	238285	71086	472598	0,001472
2.2	0,382	0,27	0,397	0,0213	0,4517	0,235	0,437	78847	25493	173756	0,000332
p1	0,020	0,12	0,022	0,0016	0,0026	0,019	0,024	1862	1413	9234	0,000002
3	0,732	0,40	0,750	0,0566	3,2065	0,370	0,826	223836	48161	332956	0,002358

gdzie:

V_{sr} – prędkość średnia; h_{max} – napelnienie maksymalne; V_{max} prędkość maksymalna; V_* – prędkość dynamiczna; τ – naprężenie styczne; Fr_{max} – liczba Froude'a maksymalna; Fr_{d50} – liczba Froude'a ziarnowa; Re_{max} – liczba Reynoldsa maksymalna; Re_{d50} – liczba Reynoldsa ziarnowa; Re_{ks} – liczba Reynoldsa związana z wysokością szorstkości; Θ – współczynnik Shieldsa

Pomiary w dniu 25.04.2003 r. zostały wykonane podczas małego wezbrania. W korycie panowały warunki turbulentne, o czym świadczy wielkość liczby Reynoldsa, która była najwyższa w roztoce środkowej (punkt 2B) wynosząc $Re_{d50} = 63509$ i $Re_{max} = 151212$ dla napelnienia $h_{max} = 0,20$ m oraz $Re_{ks} = 449855$. Również w tym punkcie najwyższą wartość osiągnęła liczba Froude'a wynosząc $Fr_{50} = 1,089$, co wskazuje na występowanie ruchu nadkrytycznego. Także naprężenia styczne oraz parametr Shieldsa przyjmowały w tym pionie najwyższe wartości wynoszące $\tau = 4,4182$ N · m⁻² oraz $\Theta = 0,00325$ dla prędkości dynamicznej $V_* = 0,0665$ m · s⁻¹. Wskazuje to na tworzenie się roztoki 2A-2B.

Kolejne pomiary wykonano 14.06.2003 r. podczas suszy hydrologicznej. Woda znajdowała się tylko w roztoce lewej (1A-1C). W całym korycie panowały warunki ruchu podkrytycznego, na co wskazuje wartość liczby Froude'a z zakresu 0,308 – 0,714. Wartość liczby Reynoldsa w zakresie 9112 – 261543 świadczy o ruchu turbulentnym. Największa wartość parametru Shieldsa oraz naprężenia stycznego wystąpiły w Ionie 1B przyjmując wartość $\Theta = 0,00124$ i $\tau = 1,6860$ N · m⁻² dla napelnienia $h_{max} = 0,18$ m i prędkości dynamicznej $V_* = 0,0411$ m · s⁻¹. Najmniejsze naprężenia styczne wystąpiły w punkcie 1A i wynosiły $\tau = 0,0455$ N · m⁻² dla napelnienia $h_{max} = 0,08$ m i prędkości dynamicznej $V_* = 0,0067$ m · s⁻¹.

Następnie pomiary wykonano 29.07.2003 r. podczas małego wezbrania. Przekrój rzeki był nieznacznie zmieniony, ponieważ woda płynęła po łasze bocznej znajdującej się na brzegu lewym. Na tej łasze został usytuowany nowy punkt pomiarowy nr 4. W pionie 1B wystąpił ruch nadkrytyczny, na co wska-

zuje liczba Froude'a wynosząca $Fr_{d50} = 1,278$. W pozostałych punktach występował ruch podkrytyczny, przy czym najmniejszą wartość liczby Froude'a odnotowano w punkcie 3 znajdującą się za łachą prawą $Fr_{max} = 0,040$ przy napełnieniu wynoszącym $h_{max} = 0,70$ m. w całym korycie wystąpił ruch turbulentny ($Re = 8412 - 518083$). Największe naprężenia styczne wystąpiły w pionach 1A i 1B wynosząc odpowiednio $\tau = 2,0102 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ dla $V_* = 0,0448 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ oraz $\tau = 2,7439 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ dla $V_* = 0,0524 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Również parametr Shieldsa osiągnął najwyższe wartości w pionach 1A ($\Theta = 0,001478$) i 1B ($\Theta = 0,002018$). Wysokie wartości naprężeń stycznych w punkcie 2A i 2B wynoszące odpowiednio $\tau = 0,9105 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ i $\tau = 1,2074 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ wskazują na dalszy rozwój roztoki w tym miejscu.

Podczas kolejnych pomiarów wykonanych 17.10.2003 r. odnotowano niskie stany wody, co spowodowało stagnowanie wody w roztoce prawej oraz za łachą prawą (punkty 2A i 3). W punkcie 2A ruch wody był laminarny, a liczba Reynoldsa wynosiła $Re_{max} = 894$ i $Re_{d50} = 1220$. W pozostałych punktach ruch był turbulentny. Woda w korycie środkowym pojawiła się tylko na $\frac{3}{4}$ szerokości roztoki jako wypływ spod żwiru. Małe stany wody oraz jej stagnowanie spowodowały wstrzymanie dalszego procesu tworzenia się roztoki 2A-2B. W punkcie 3 zaobserwowano zerwane obrukowanie dna. W miejscu tym naprężenia styczne i parametr Shieldsa osiągnęły wartość najniższą wynosząc $\tau = 0,0004 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ i $\Theta = 3 \cdot 10^{-7}$ przy prędkości dynamicznej $V_* = 0,0007 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. We wszystkich punktach pomiarowych ruch wody był podkrytyczny, o czym świadczą wartości uzyskanych liczb Froude'a ($Fr = 0,009 - 0,783$). Najwyższe wartości naprężenia stycznego oraz parametru Shieldsa odnotowano w roztoce głównej (punkt 1A), które wynosiły $\tau = 0,1999 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ i $\Theta = 0,000147$ dla $h_{max} = 0,08$ m.

Kolejne pomiary przeprowadzono 05.04.2004 r. po przejściu fali wezbrańniowej. Koryto zostało bardzo zmienione, nastąpiło zalanie brzegu lewego oraz prawego, a także łachy pomiędzy roztoką pierwszą i drugą, gdzie została połamana porastająca ją roślinność. Ruch nadkrytyczny wystąpił w punkcie 1B, na co wskazuje wartość liczby Froude'a $Fr_{d50} = 1,622$. W pozostałych punktach woda poruszała się ruchem podkrytycznym. We wszystkich pionach pomiarowych wartość liczby Reynoldsa wskazywała na ruch turbulentny, gdzie maksymalna jej wartość wyniosła $Re_{ks} = 645899$ w punkcie 1B. Największe wartości naprężeń stycznych i parametru Shieldsa zanotowano w pionach 2A i 5. Ich wartości były następujące: $\tau = 0,4591 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ i $\Theta = 0,000338$ dla prędkości dynamicznej $V_* = 0,0214 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (punkt 2A) oraz $\tau = 0,2268 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ i $\Theta = 0,000167$ dla prędkości dynamicznej $V_* = 0,0151 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Wskazuje to na dalszy rozwój roztoki 2A-2B oraz uruchomienie roztoki prawej. W punkcie 3 zaobserwowano znaczący wzrost naprężeń stycznych ($\tau = 0,1503 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$) i parametru Shieldsa ($\Theta = 0,000111$) w porównaniu z poprzednim pomiarem, co było skutkiem dodatkowego zasilania z roztoki prawej.

Podczas pomiarów w dniu 08.07.2004 r. aktywne pozostawało tylko koryto 1A-1C. Niskie stany wody ($h_{\max} = 0,08$ m), małe wartości naprężeń stycznych i parametry Shieldsa wynoszące $\tau = 0,0003 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ i $\Theta = 2 \cdot 10^{-8}$ w roztoce 2A-2B spowodowały, że roztocka przestała się rozwijać. Woda płynęła tam ruchem laminarnym, o czym świadczą wartości liczby Reynoldsa $Re = 183 - 1365$. W pozostałych punktach ruch był turbulentny. Liczba Froude'a w punkcie 1B wynosiła $Fr = 1,302$, co świadczy o występowaniu ruchu nadkrytycznego. W pozostałych pionach pomiarowych stwierdzono ruch podkrytyczny. Naprężenia styczne oraz parametr Shieldsa osiągnęły najwyższą wartość w punkcie 1B wynosząc $\tau = 1,1536 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ i $\Theta = 0,000848$ dla prędkości dynamicznej $V_* = 0,0340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Przesiąki wody z punktu 4 w roztoce prawej nie wpłynęły na wielkość parametrów hydrodynamicznych w punkcie 3.

Pomiary w dniu 29.10.2004 r. były wykonane w warunkach zdewastowanego koryta. Powyżej badanego przekroju trwały roboty regulacyjne. Nastąpiło przerwanie naturalnego procesu roztokowania koryta. Środkowa roztocka została udrożniona, utworzył się kanał z bardzo skoncentrowaną strugą wody. Naprężenia styczne oraz parametr Shieldsa przyjęły najwyższe wartości w punkcie 3: $\tau = 3,2065 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ i $\Theta = 0,002358$ dla prędkości dynamicznej $V_* = 0,0566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Również wysokie wartości tych parametrów wystąpiły w punkcie 2.1: $\tau = 2,0008 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ i $\Theta = 0,001472$ dla prędkości dynamicznej $V_* = 0,0447 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Wysokie wartości parametrów hydrodynamicznych zaobserwowano w wyniku skoncentrowania strugi w tym miejscu, przez co zwiększyła się prędkość przepływu ($V_{\max} = 0,750 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $V_{\max} = 1,107 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla punktu 3 i 2.1). We wszystkich pionach oprócz punktu 2.1 liczba Froude'a wskazywała na ruch podkrytyczny. Ruch laminarny wystąpił tylko w pionie p1, o czym świadczy wartość liczby Reynoldsa $Re_{d50} = 1413$ i $Re_{\max} = 1862$. W pozostałych punktach pomiarowych ruch był turbulentny.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysunąć następujące wnioski:

1. Podczas wezbrań koryto środkowe oraz prawe były uruchamiane, co skutkowało aktywnym tworzeniem się roztocki, w głównej mierze środkowej. W okresach niskich stanów wody oba koryta były nieaktywne i nie zachodziły żadne zmiany w ich morfologii.

2. Podczas niskich stanów wody, przegłębienie znajdujące się za prawą łacją korytową zmieniało poziom wody, nie tracąc jej, co może sugerować, że duża część płynącej wody poruszała się głównie poprzez aluwialny materiał żwirowy.

3. We wszystkich punktach pomiarowych wartość liczby Reynoldsa uwzględniająca szorstkość koryta była kilkakrotnie wyższa niż w przypadku liczby Reynoldsa obliczonej z maksymalnego napełnienia i średnicy miarodajnej. Świadczy to o bardzo dużym wpływie szorstkości na warunki przepływu w korycie.

4. Wartości naprężeń stycznych oraz parametru Shieldsa w analizowanym korycie zależały głównie od prędkości przepływu. Parametr przyjmował przeważnie najwyższą wartość w pionie, w którym prędkość była największa, natomiast wpływ głębokości był mniej znaczącym elementem.

5. Przekrój koryta charakteryzował się różnorodnymi wartościami parametrów hydrodynamicznych, w zależności od umiejscowienia pionu pomiarowego, co ma bezpośredni wpływ na rozwój i różnicowanie warunków siedliskowych dla ichtiofauny.

6. Przeprowadzona 30.03.2010 r. wizja lokalna na badanej rzece pokazała, że mimo dewastacji koryta w badanym przekroju utworzyła się łacha korytowa oraz warkocze, co wskazuje to na dążenie rzeki do odtworzenia się naturalnego procesu roztokowania koryta.

BIBLIOGRAFIA

- Krzemień K. *Współczesne zmiany w modelowaniu koryt potoków w Gorcach*. Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 59, 83-96. 1984.
- Strategia Rozwoju Gminy Ochotnica Dolna na lata 2008–2020*. 2008. Ochotnica Dolna.
- Gordon D.N., McMahon T.A., Finlayson B.L. *Stream Hydrology – an Introduction for Ecologists*. Wiley and Sons. London. 1992.
- Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej.
- Książkiewicz M., Samsonowicz J., Ruhle E. *Zarys geologii Polski*. Wydawnictwa Geologiczne. Warszawa. 1965.
- Warszyńska J. *Karpaty Polskie. Przyroda, człowiek i jego działalność*. Wydawnictwo UJ. Kraków. 1995.

Prof. dr hab. inż. Artur Radecki-Pawlik
Mgr inż. Renata Jasek
Mgr inż. Karol Plesiński
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 24/28, Polska

Recenzent: *Dr hab. Stanisław Węglarczyk, prof. PK*