

ANALIZA PARAMETRÓW HYDRAULICZNYCH W REJONIE BYSTRZA O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI NA RZECE PORĘBIANCE W GORCACH

ANALYSIS OF HYDRAULIC PARAMETERS IN NEAR RAPID HYDRAULIC STRUCTURE (RHS) IN PORĘBIANKA STREAM IN GORCE MOUNTAINS

Karol Plesiński, Monika Janas, Artur Radecki-Pawlik

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Nową tendencją inżynierii rzecznej podczas regulacji cieków jest stosowanie korekcji stopniowej za pomocą bystrzy o zwiększonej szorstkości. Budowle te spełniają funkcje zarówno techniczne, jak i ekologiczne. Powodują zmniejszenie spadku podłużnego cieku, różnicują reżim i dynamikę przepływu, odtwarzają roztokowy układ koryta, nie stanowią przeszkody dla migracji ryb i makrobezkręgowców. Można więc stwierdzić, że budowle te z powodzeniem mogą zastąpić klasyczne stopnie wodne, które niekorzystnie wpływają na koryto cieku w zasięgu ich oddziaływania. Ponadto stanowią przeszkodę dla migracji ryb oraz niekorzystnie współgrają z krajobrazem. Pomimo coraz częstszego zastępowania klasycznych stopni wodnych bystrzami o zwiększonej szorstkości, wymagają one ciągłego monitorowania w terenie oraz głębszej analizy hydrodynamicznej. Stąd w niniejszej publikacji wykonano wspomnianą analizę w rejonie oddziaływania bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Porębiance w Gorcach.

Abstract. At the present, in modern river training use rapid hydraulic structures (RHS's). These RHS's meet both technical and ecological aspects. These cause decrease the longitudinal of the channel, differentiate of the flow regime, reproduce the braiding pattern of channel end do not stop to migrate fish. It can be concluded that these buildings can successfully replace conventional water thresholds. They require constant monitoring in the field and a deeper analysis of hydrodynamic. So, in this paper, we made some hydraulic parameters within the RHS and upstream and downstream of the RHS in Porębianka stream in Gorce Mountain.

Adres do korespondencji – Corresponding authors: mgr inż. Karol Plesiński, mgr inż. Monika Janas, prof. dr hab. inż. Artur Radecki-Pawlik, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 24/28, e-mail: k.plesinski@ur.krakow.pl

Słowa kluczowe: bystrze o zwiększonej szorstkości, potok górski, parametry hydrauliczne, naprężenia styczne, prędkość

Key words: rapid hydraulic structure (RHS), mountain stream, hydrodynamic parameters, shear stress, velocity

WSTĘP

W ujściowym odcinku rzeki Porębianki wykonana została korekcja stopniowa za pomocą 25 bystrzy o zwiększonej szorstkości. Budowle te z powodzeniem zastępują klasyczne stopnie wodne. Zaletą ich jest pozytywne oddziaływanie na koryto ciek, przejawiające się w jego roztokowaniu. Oprócz tego różnicują reżim i dynamikę przepływu w rzece oraz wartości parametrów hydrodynamicznych. Stanowią proekologiczne rozwiązanie z zakresu inżynierii rzecznej.

Celem publikacji jest analiza parametrów hydrodynamicznych w rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Porębiance w Gorcach. Pomiarów terenowe były wykonane w trzech seriach w kwietniu, czerwcu i październiku 2010 r. Podczas pierwszej serii, pomiarów dokonywano podczas przepływu $Q = 2,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, który jest wyższy od przepływu $SSQ = 1,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wysoki stan wody spowodowany był wiosennymi roztopami. Między pierwszą, a drugą serią przeszła fala wezbraniowa o natężeniu przepływu $Q = 55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dno koryta uległo zmianie, więc w drugiej serii niektóre pomiary przeprowadzane były w innych miejscach. Seria druga i trzecia została wykonana przy takim samym układzie dna, lecz o różnym przepływie. Podczas serii drugiej przepływ wynosił $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, będąc wyższym od SSQ . Wysoki przepływ spowodowany był długotrwałymi opadami występującymi w maju i na początku czerwca 2010 r. oraz przechodzącą w maju falą wezbraniową. W październiku występował niski stan wody, co wiąże się występowaniem niżówek w okresie jesiennym. Natężenie przepływu wynosiło wtedy $Q = 1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Okres pomiarowy przypadł na czas występowania wezbrań i powodzi. Pozwoliło to na sprawdzenie, jak badane bystrze o zwiększonej szorstkości oddziałuje na hydrodynamikę koryta ciek powyżej i poniżej budowli przed przejściem fali wezbraniowej oraz po jej przejściu.

OPIS BADANEJ ZLEWNI

Rzeka Porębianka jest ciekami IV rzędu o długości 15,4 km znajdującym się w południowej części województwa małopolskiego, w paśmie górskim Gorców. Stanowi prawobrzeżny dopływ Mszanki. Swoje początek bierze spod szczytu Obidowa jako Porąbka (rys. 1). Powierzchnia całej zlewni wynosi 72 km², a szerokość koryta sięga od 1 m w partiach najbardziej stromych do 140 m w odcinku ujściowym, przy średnim spadku 56,9‰ [Korpak 2008].

Obszar zlewni potoku Porębianka zbudowany jest z utworów fliszu karpackiego. Zlewnia leży w północnej części Gorców w obrębie dwóch jednostek tektonicznych: okna tektonicznego Mszany Dolnej, które budują utwory płaszczowiny śląskiej (mało odporne łupki i piaskowce krośnieńskie), oraz płaszczowiny magurskiej, zbudowanej z piaskowców, margli magurskich i łupków o różnej grubości, a także z mniej odpornych łupków

i piaskowców podmagurskich i hieroglifowych, margli, łupków i piaskowców inoceramowych. W rejonie występowania fliszu mamy do czynienia z glebami słabo przepuszczalnymi, brunatnymi, które powstały ze zwietrzliny fliszowej o charakterze glin średnich i iłów. Przeważają tu więc gleby brunatne kwaśne. W górnych partiach wzniesień gleby powstałe na zwietrzelinie fliszowej mają charakter szkieletowy. Na stokach przeznaczonych pod uprawę wykształciły się wtórne gleby brunatne, natomiast u podnóża stoków gleby brunatne deluwialne oraz gruntowo glejowe. Na obszarach współcześnie zalewanych występują mady właściwe, natomiast na obszarach niezalewanych mady brunatne.



Rys. 1. Położenie obiektu badań
Fig. 1. Location of research region

Charakterystyka hydrologiczna wód powierzchniowych potoku Porębianka została przeprowadzona na podstawie stanów wód oraz przepływów na posterunkach wodowskazowych IMGW. Wykorzystano dane dla wodowskazu w Niedźwiedziu, który został założony w 1957 r, a zlokalizowany jest ok. 50 m poniżej ujścia potoku Koninka. Dane wskazują, że Porębianka jest typowym potokiem górskim, który charakteryzuje się dużą zmiennością stanów wody. Średnie stany wody wykazują najwyższe wartości w kwietniu, co jest spowodowane wiosennymi roztopami. Najniższe stany wód występują w lutym oraz październiku. Amplituda stanów wody Porębianki wynosi 151 cm. Duża zmienność stanów wody jest spowodowana gwałtowną reakcją zlewni na opad. Szybki spływ powierzchniowy ułatwiają słabo przepuszczalne podłoże fliszowe oraz częściowe wylesienie obszaru zlewni. W związku z tym reżim rzeczny jest erozyjno-akumulacyjny.

Całość wiadomości geologicznych, glebowych oraz hydrologicznych jest niezbędna, gdy próbuje się zanalizować problem dostawy do potoku rumowiska oraz wcięcia koryta potoku w ostatnich dziesięcioleciach (poza oczywistą dewastacją potoku przez nielegalny pobór kruszywa). Sprawa budowy zlewni i jej reakcji na opad jest kluczowa dla zrozumienia dlaczego w zlewni przebiegają takie, a nie inne procesy. Błędna zabudowa hydrotechniczna bywa często następstwem niezrozumienia owych procesów zlewniowych. Na obecny kształt koryta Porębianki duży wpływ ma obecność zapór przeciwrumowiskowych, gdyż stanowią one granicę pomiędzy poszczególnymi typami odcinków koryt – poniżej zapór występuje erozja, powyżej akumulacja.

Obecnie potok ma koryto jednodelne, wąskie i kręte. Na początku XX w. była to rzeka wieloramienna i roztokowa. Przemiana nastąpiła pod wpływem kilku czynników, przede wszystkim zaś zmiany sposobu użytkowania zlewni. Obecnie występują tu głównie użytki zielone, co powoduje redukcję dostawy materiału stokowego do koryt, duże znaczenie ma też uregulowanie rzeki na 37,7% długości koryta. Regulację zastosowano poprzez budowę wspomnianych zapór przeciwrumowiskowych oraz stopni wodnych i bystrzy, a także poprzez umocnienie brzegów koryta przy zastosowaniu narzutu kamiennego, opasek siatkowo-kamiennych oraz murów oporowych.

METODYKA

Do badań wybrano jedno bystrze o zwiększonej szorstkości znajdujące się na rzece Porębiance. Pomiary prędkości były wykonywane poniżej i powyżej budowli w rejonie jej oddziaływania oraz na samej płycie spadowej bystrza. W zależności od układu dna koryta ciekłu i napełnienia wykonano 63 punkty pomiarowe w serii 1, 57 w serii 2 oraz 37 w serii 3. Pomiędzy serią 1 i 2 przeszła fala wezbraniowa, która zmieniła układ dna. Natomiast pomiary podczas serii 2 i 3 były wykonywane przy niezmiennym układzie dna, ale przy różnych stanach wody.

Pomiary prędkości chwilowej płynącej wody wykonano za pomocą młynka hydrometrycznego firmy OTT typu Nautilus 2000. Urządzenie to daje możliwość pomiaru prędkości wody w zakresie od 0,001 do 10 m · s⁻¹. Odczyty wykonane zostały bezpośrednio nad dnem oraz w określonych pionach w odstępach od 5 mm do 10 mm. Opierając się na wykonanych pomiarach prędkości chwilowych, wykreślono tachoidy prędkości nad poszczególnymi punktami pomiarowymi. Wspomniane pomiary umożliwiły wyznaczenie

następujących wielkości: prędkości średnich, prędkości dynamicznych, liczby Reynoldsa (w pionie oraz tzw. ziarnowa), liczby Froude'a, naprężeń stycznych, parametru Shieldsa.

Obliczenia naprężeń stycznych wykonano na podstawie wykresów rozkładów prędkości nad dnem cieku w układzie półlogarytmicznym. Na podstawie profilu prędkości można określić wartość prędkości dynamicznej V_* , korzystając ze wzoru [Gordon i in. 1992]:

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

gdzie:

a – współczynnik nachylenia prostej $v = f(h)$ przyjmującej postać równania $y = ax + b$

(gdzie: x – wysokość nad dnem, na której wykonano pomiar prędkości; b – wyraz wolny równania).

Obliczona wartość prędkości dynamicznej posłużyła do wyznaczenia sił działających na dno cieku, czyli naprężeń stycznych, wg wzoru:

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

gdzie:

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

V_* – prędkość dynamiczna, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

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

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

gdzie:

v – prędkość wody, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

h – napelnienie w korycie, m,

g – przyspieszenie ziemskie, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

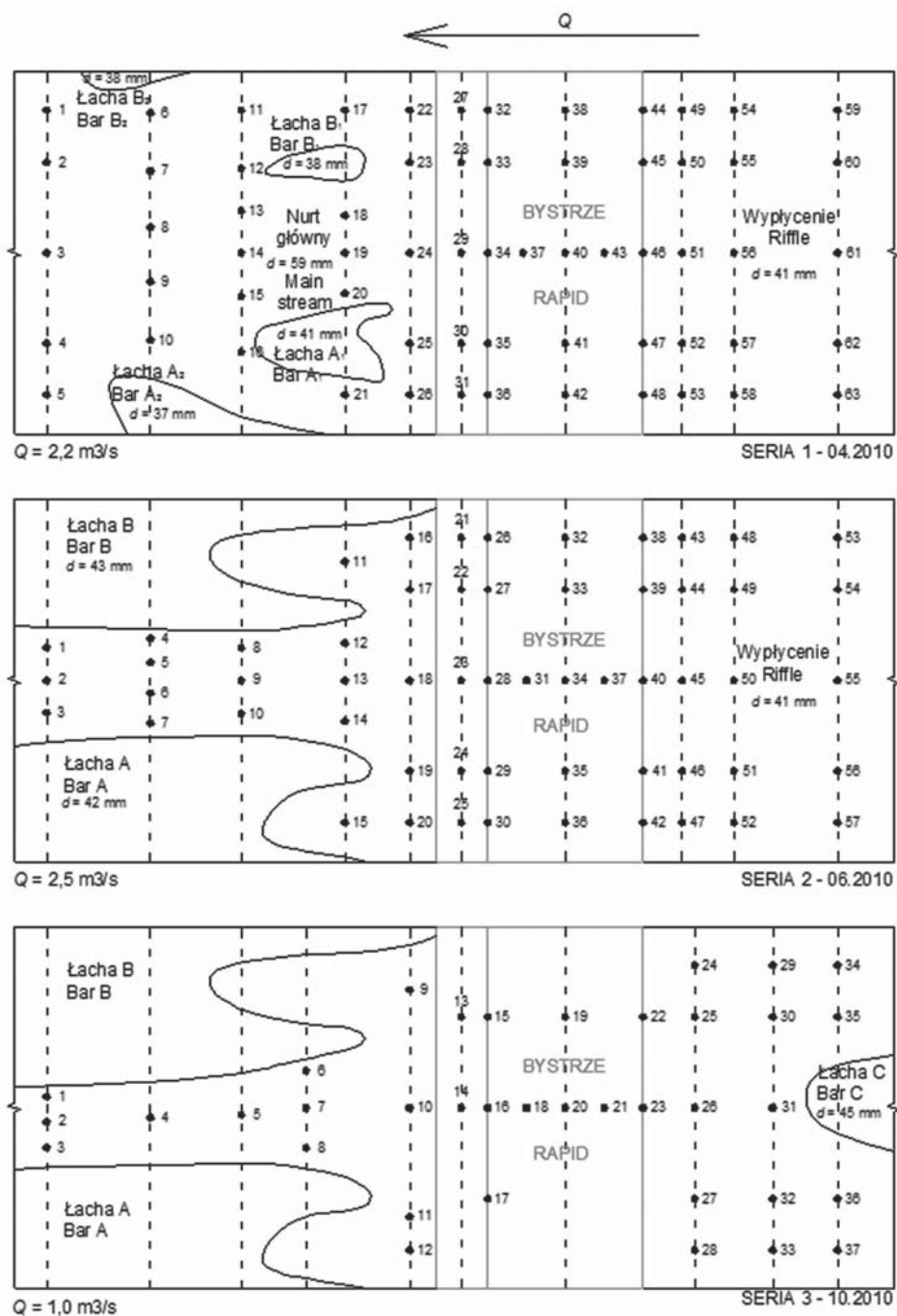
gdzie:

v – prędkość wody, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

d – promień hydrauliczny koryta cieku, lub wielkość cząstek przy dnie, m,

ν – kinetyczny współczynnik lepkości, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Pobrano również rumowisko denne z łach i wypłyceń występujących w korycie cieku. Pobór został wykonany metodą powierzchniową, zgodnie z zaleceniami Wollmana. Z pobranych otoczków wyznaczono średnicę miarodajną.



Rys. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych
 Fig. 2. Arrangement of measuring point

WYNIKI I DYSKUSJA

Przedstawione w tabeli 1 obliczenia hydrodynamiczne zostały wykonane w kwietniu 2010 r. (rys. 2). Poniżej bystrza prędkości dynamiczne i naprężenia styczne osiągały najwyższe wartości w przekroju „-I”, wynosząc odpowiednio $0,029 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $0,86 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Związane jest to z wysoką prędkością ($V_{sr} = 0,540 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) i turbulencją strugi wypadającej dużym strumieniem z płyty i niecki bystrza. Ponadto wyższe wartości prędkości dynamicznej i naprężeń stycznych występują w nurcie głównym (punkt 8, 13, 19), który płynie środkiem koryta. Liczba Reynoldsa we wszystkich punktach pomiarowych świadczy o występowaniu ruchu turbulentnego. Z kolei liczba Froude’a świadczy o występowaniu ruchu spokojnego, gdyż jej wartość wyniosła poniżej 1.

Tabela 1. Parametry hydrodynamiczne w serii I
Table 1. Hydrodynamic parameters (serie I)

Przekrój Cross-section	Numer punktu No point	h m	V_{sr} $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	V_* $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	τ $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	Re	Re	Fr	Fr_*
-V 30 m poniżej bystrza downstream of the RHS	1	0,04	0,036	0,007	0,05	1101	1065	0,06	0,005
	2	0,20	0,460	0,009	0,08	70331	1356	0,33	0,007
	3	0,12	0,352	0,003	0,01	32291	544	0,32	0,002
	4	0,18	0,470	0,012	0,14	64674	2472	0,35	0,007
	5	0,10	0,420	0,007	0,05	10091	1474	0,42	0,004
-IV 22 m poniżej bystrza downstream of the RHS	6	0,05	0,264	0,004	0,02	10091	503	0,38	0,003
	7	0,19	0,710	0,009	0,09	103127	1168	0,52	0,007
	8	0,20	0,450	0,012	0,15	68802	2523	0,32	0,007
	9	0,13	0,402	0,006	0,04	39951	755	0,36	0,005
-III 15 m poniżej bystrza downstream of the RHS	10	0,13	0,396	0,005	0,03	39355	656	0,35	0,004
	11	0,08	0,264	0,005	0,03	16146	691	0,30	0,004
	12	0,05	0,302	0,016	0,26	11543	2019	0,43	0,013
	13	0,27	0,402	0,009	0,08	82975	1869	0,25	0,005
	14	0,22	0,650	0,017	0,29	109319	3575	0,44	0,010
	15	0,19	0,460	0,003	0,01	66814	343	0,34	0,002
	16	0,05	0,105	0,003	0,01	4013	363	0,15	0,002
-II 8 m poniżej bystrza downstream of the RHS	17	0,20	0,212	0,003	0,01	32413	396	0,15	0,002
	18	0,23	0,354	0,014	0,20	62243	2962	0,24	0,009
	19	0,48	0,324	0,018	0,31	118890	3655	0,15	0,011
	20	0,45	0,334	0,011	0,13	114899	2366	0,16	0,007
	21	0,09	0,044	0,001	0,01	3027	215	0,05	0,001
-I 4 m poniżej bystrza downstream of the RHS	22	0,35	0,338	0,009	0,08	90437	1142	0,18	0,007
	23	0,12	0,113	0,007	0,05	10366	903	0,10	0,006
	24	0,53	0,640	0,029	0,86	259307	6115	0,28	0,033
	25	0,19	0,101	0,004	0,02	14670	617	0,07	0,003
	26	0,09	0,216	0,011	0,13	14861	1653	0,23	0,008

Tabela 1. cd.
Table 1. cont.

Przekrój Cross-section	Numer punktu No point	h m	$V_{\dot{s}r}$ $m \cdot s^{-1}$	V_* $m \cdot s^{-1}$	τ $N \cdot m^{-2}$	Re	Re	Fr	Fr_*
N środek niecki centre of the energy dissipating pool	27	0,10	0,460	0,008	0,06	35166	2057	0,46	0,004
	28	0,13	0,400	0,010	0,11	39752	2769	0,35	0,006
	29	0,10	1,740	0,053	2,85	133017	14276	1,76	0,029
	30	0,15	0,206	0,010	0,10	23622	2685	0,17	0,005
	31	0,12	0,530	0,009	0,07	48620	2285	0,49	0,005
GD gurt dolny bystrza lower concrete sill of the RHS	32	0,08	0,630	0,003	0,01	38529	805	0,71	0,002
	33	0,04	1,480	0,012	0,14	45256	3215	2,36	0,006
	34	0,10	2,160	0,040	1,61	165125	10730	2,18	0,022
	35	0,03	0,840	0,013	0,18	19265	3564	1,55	0,007
	36	0,03	0,470	0,003	0,01	10779	870	0,87	0,002
PS płyta spadowa bystrza ramp of the RHS	37	0,14	2,380	0,024	0,58	254721	6422	2,03	0,013
	38	0,08	1,150	0,009	0,08	70331	2382	1,30	0,005
	39	0,08	1,140	0,008	0,06	69719	2089	1,29	0,004
	40	0,10	2,450	0,036	1,28	187295	9567	2,47	0,019
	41	0,05	0,254	0,009	0,08	9709	2401	0,36	0,005
GD gurt górny bystrza upper concrete sill of the RHS	42	0,03	0,950	0,009	0,08	21787	2382	1,75	0,005
	43	0,10	2,270	0,034	1,16	173534	9097	2,29	0,018
	44	0,05	0,540	0,014	0,19	41205	3704	0,77	0,007
	45	0,04	0,320	0,007	0,04	7935	1778	0,51	0,004
	46	0,17	0,920	0,022	0,51	119563	6017	0,71	0,012
I 4 m powyżej bystrza upstream of the RHS	47	0,03	0,346	0,003	0,01	9785	870	0,64	0,002
	48	0,07	0,770	0,004	0,01	20641	1010	0,93	0,002
	49	0,12	0,360	0,010	0,09	33025	1272	0,33	0,007
	50	0,10	0,212	0,038	0,01	18729	498	0,25	0,005
	51	0,16	0,460	0,008	0,06	56265	1651	0,37	0,005
II 8 m powyżej bystrza upstream of the RHS	52	0,10	0,245	0,004	0,01	18729	524	0,25	0,003
	53	0,12	0,185	0,002	0,005	16971	256	0,17	0,001
	54	0,17	0,420	0,011	0,12	54583	1455	0,33	0,009
	55	0,14	0,410	0,011	0,13	43880	1489	0,35	0,009
	56	0,17	0,530	0,017	0,31	68879	3651	0,41	0,011
III 15 m powyżej bystrza upstream of the RHS	57	0,06	0,161	0,005	0,03	7385	688	0,21	0,004
	58	0,16	0,109	0,007	0,04	12499	909	0,09	0,005
	59	0,07	0,010	0,001	0,005	535	43	0,01	0,001
	60	0,30	0,500	0,003	0,01	114670	385	0,29	0,002
	61	0,14	0,396	0,010	0,10	42382	1304	0,34	0,008
	62	0,12	0,220	0,0003	0,001	20182	45	0,20	0,001
	63	0,05	0,224	0,005	0,03	8562	707	0,32	0,004

Najwyższe wartości prędkości średniej płynącej wody występowały na płycie spadowej bystrza w centralnym obniżeniu, powodującym koncentrację przepływającej strugi. W punktach 34, 37, 40, 43 prędkość wody przekraczała $2,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (maksimum $2,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ w punkcie 40). Również na niecce wypadowej oraz na płycie spadowej poza koncentracją strugi obserwowano wysokie prędkości $1,00\text{--}2,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Najwyższe wartości prędkości dynamicznej i naprężeń stycznych występowały w miejscach, gdzie średnia prędkość była największa. W punkcie 29 (w centralnej części niecki) wystąpiły najwyższe wartości prędkości dynamicznej i naprężeń stycznych wynosząc odpowiednio $0,053 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $2,85 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Również powyżej w centralnym obniżeniu płyty spadowej odnotowano wysokie naprężenia z zakresu $1,16\text{--}1,61 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ (punkty 34, 40, 43). Spośród wszystkich punktów pomiarowych na bystrzu te, które znajdują się na gurcie górnym, wykazują najniższe wartości naprężeń stycznych ($0,01\text{--}0,51 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$). Na całej powierzchni bystrza występuje ruch turbulentny. Liczba Froude'a osiąga wartości powyżej 1 (ruch rwący) na całej płycie spadowej oraz na gurcie dolnym i w niecce w punktach znajdujących się w obniżeniu płyty spadowej, a także w jej okolicy. Jej najwyższa wartość to 2,47 w punkcie 40 (środek płyty spadowej w obniżeniu). Ruch spokojny na bystrzu występuje w punktach zlokalizowanych na gurcie górnym oraz na obrzeżach gurtu dolnego i niecki wypadowej.

Na stanowisku górnym prędkości średnie, prędkości dynamiczne i naprężenia styczne są do siebie porównywalne. Zakres ich wartości wynosi: $0,074\text{--}0,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla prędkości średniej, $0,001\text{--}0,017 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dla prędkości dynamicznej oraz $0,01\text{--}0,13 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ dla naprężeń stycznych. Wyjątek stanowi punkt 56, w którym wartość naprężeń sięga $0,31 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Liczba Reynoldsa świadczy o występowaniu ruchu turbulentnego. Tu wyjątkiem jest punkt 59, w którym występuje ruch przejściowy. Również w każdym przekroju pomiarowym występuje ruch spokojny.

Tabela 2 przedstawia parametry hydrodynamiczne pomierzone i obliczone podczas drugiej serii badań, wykonanej w czerwcu 2010 r. Po wezbraniu w maju 2010 r. koryto zmieniło swój układ. Poniżej bystrza wytworzyły się dwie duże łachy boczne, pomiędzy którymi płynęła struga cieczy. Nastąpiła erozja denną w nurcie głównym (rys. 2).

Bezpośrednio poniżej bystrza (przekrój „I”) po obu stronach koryta wytworzyły się przegłębienia ($0,94 \text{ m}$ i $1,05 \text{ m}$), w których woda płynęła z bardzo małą prędkością ($0,148 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $0,010 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Również w tych miejscach występowały najniższe naprężenia styczne ($0,001\text{--}0,005 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ dla przegłębienia prawego i $0,04\text{--}0,13 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ dla przegłębienia lewego).

Na dolnym stanowisku najwyższe wartości prędkości dynamicznych i naprężeń stycznych notowano w nurcie głównym – odpowiednio $0,026\text{--}0,031 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $0,69\text{--}0,94 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Bliżej brzegów, gdzie prędkość wody jest mniejsza, wartości naprężeń stycznych są niższe niż w nurcie ($0,13\text{--}0,57 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$). Wszędzie wystąpił ruch turbulentny i spokojny.

Największe prędkości na bystrzu wystąpiły w jego środkowej części, w koncentracji strugi. Jej najwyższa wartość wyniosła $2,86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na gurcie dolnym (punkt 28). Wysokie wartości wynoszące powyżej $2,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wystąpiły w punktach 23 i 31. Naprężenia styczne również były najwyższe na gurcie dolnym (punkt 28), wynosząc $4,82 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. W większości pozostałych punktów również występowały wysokie wartości naprężeń stycznych ($2,48$ w punkcie 23 na niecce, $1,45$, $1,57$, $2,59$, $1,97$ i $2,04 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ odpowiednio w punktach 31, 33, 34, 35, 37 na płycie oraz $1,12 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ w punkcie 40 gurtu górnego).

Tabela 2. Parametry hydrodynamiczne w serii 2
 Table 2. Hydrodynamic parameters (serie 2)

Przekrój Cross-section	Numer punktu No point	h m	V_{sr} $m \cdot s^{-1}$	V_* $m \cdot s^{-1}$	τ $N \cdot m^{-2}$	Re	Re^*	Fr	Fr^*
-V	1	0,40	0,780	0,014	0,20	238514	2060	0,39	0,010
	2	0,44	0,760	0,026	0,69	255638	5462	0,37	0,016
	3	0,30	0,530	0,031	0,94	121550	4350	0,31	0,023
-IV	4	0,05	0,264	0,028	0,77	10091	4090	0,38	0,020
	5	0,50	0,780	0,024	0,58	298142	5005	0,35	0,015
	6	0,28	0,570	0,017	0,28	122009	3513	0,34	0,010
	7	0,10	0,248	0,008	0,06	18959	1085	0,25	0,006
-III	8	0,50	0,430	0,021	0,43	164361	3063	0,19	0,015
	9	0,76	0,520	0,019	0,37	302118	4029	0,19	0,012
	10	0,36	0,390	0,027	0,73	107331	3840	0,21	0,020
-II	11	0,44	0,045	0,002	0,005	15136	250	0,02	0,002
	12	0,40	0,270	0,020	0,41	82562	4218	0,14	0,012
	13	0,83	0,960	0,026	0,74	609128	12083	0,34	0,035
	14	0,12	0,158	0,006	0,03	14494	1234	0,15	0,004
	15	0,50	0,074	0,011	0,13	28285	1261	0,03	0,009
	16	1,05	0,010	0,001	0,001	8027	131	0,01	0,001
-I	17	0,16	0,128	0,008	0,06	15656	901	0,10	0,007
	18	0,60	1,120	0,030	0,87	513722	6167	0,46	0,018
	19	0,09	0,042	0,006	0,04	2890	698	0,04	0,005
	20	0,94	0,148	0,007	0,04	106353	737	0,05	0,005
N	21	0,10	0,770	0,016	0,27	58864	4388	0,78	0,009
	22	0,14	0,650	0,028	0,81	69567	7594	0,55	0,015
	23	0,18	2,100	0,050	2,48	288969	13313	1,58	0,027
	24	0,15	0,330	0,009	0,07	37841	2308	0,27	0,005
	25	0,05	0,780	0,015	0,23	29814	4081	1,11	0,008
	26	0,08	0,770	0,006	0,04	47091	1661	0,87	0,003
GD	27	0,06	1,420	0,013	0,16	65133	3402	1,85	0,007
	28	0,12	2,860	0,069	4,82	262365	18585	2,64	0,037
	29	0,03	0,680	0,011	0,11	15595	2834	1,25	0,006
	30	0,06	0,860	0,012	0,15	39447	3257	1,12	0,007
PS	31	0,12	2,050	0,038	1,45	94030	10181	2,67	0,021
	32	0,08	0,960	0,013	0,16	58711	3360	1,08	0,007
	33	0,08	1,140	0,040	1,57	69719	10605	1,29	0,021
	34	0,10	1,980	0,051	2,59	105955	13615	2,39	0,027
	35	0,05	1,040	0,044	1,97	39752	11871	1,48	0,024
	36	0,05	0,930	0,025	0,60	35548	6566	1,33	0,013
	37	0,15	1,560	0,045	2,04	178885	12071	1,29	0,024

Tabela 2. cd.
Table 2. cont.

Przekrój Cross-section	Numer punktu No point	h m	V_{sr} $m \cdot s^{-1}$	V^* $m \cdot s^{-1}$	τ $N \cdot m^{-2}$	Re	Re^*	Fr	Fr^*
GG	38	0,08	0,870	0,014	0,20	53207	3820	0,98	0,008
	39	0,06	0,660	0,007	0,04	30273	1778	0,89	0,004
	40	0,20	1,070	0,034	1,12	163596	8967	0,76	0,018
	41	0,05	0,600	0,012	0,15	22934	3267	0,86	0,007
	42	0,05	0,570	0,007	0,06	21787	2006	0,81	0,004
I	43	0,21	0,400	0,024	0,56	64215	4954	0,28	0,015
	44	0,14	0,169	0,008	0,06	18087	1582	0,14	0,005
	45	0,32	0,690	0,018	0,31	168794	3677	0,39	0,011
	46	0,14	0,368	0,015	0,23	39385	3147	0,31	0,009
	47	0,12	0,164	0,009	0,08	15045	1898	0,15	0,006
II	48	0,24	0,540	0,025	0,62	99075	5201	0,35	0,015
	49	0,10	0,330	0,012	0,13	25227	2425	0,33	0,007
	50	0,20	0,530	0,015	0,23	81034	3194	0,38	0,009
	51	0,15	0,246	0,012	0,15	28209	2515	0,20	0,007
	52	0,12	0,152	0,008	0,06	13944	1670	0,14	0,005
III	53	0,28	0,680	0,012	0,14	145555	1592	0,41	0,009
	54	0,11	0,400	0,038	1,45	33637	5193	0,39	0,029
	55	0,20	0,600	0,023	0,51	91736	4729	0,43	0,014
	56	0,16	0,264	0,020	0,40	32291	2722	0,21	0,015
	57	0,12	0,344	0,019	0,36	31557	2594	0,32	0,014

Wysokie wartości tego parametru związane są z dużymi prędkościami płynącej wody, znacznymi wartościami prędkości dynamicznej oraz dużą turbulencją i burzliwością strugi. Takie warunki na bystrzu zostały wytworzone dzięki zastosowaniu obniżenia celem koncentracji strugi. Niższe wartości naprężeń stycznych występowały na obrzeżach bystrza. Na całej budowli występuje ruch turbulentny. Na całej płycie spadowej i gurgie dolnym występuje ruch rwący. Wartość liczby Froude'a w tym rejonie dochodzi do 2,67. Na niecce wypadowej już tylko w dwóch punktach (23, 25) występuje ruch rwący, w pozostałych spokojny. Natomiast na gurgie górnym we wszystkich pomiarach wystąpił ruch spokojny.

Na stanowisku górnym prędkości średnie mieszczą się w zakresie 0,164–0,690 $m \cdot s^{-1}$. Prędkości dynamiczne kształtują się na poziomie 0,008–0,038 $m \cdot s^{-1}$, a naprężenia styczne 0,06–0,62 $N \cdot m^{-2}$. Najwyższa wartość naprężeń występuje w punkcie 54 i wynosi 1,45 $N \cdot m^{-2}$. Liczba Reynoldsa świadczy o występowaniu ruchu turbulentnego powyżej bystrza, a liczba Froude'a informuje o ruchu spokojnym.

Tabela 3. Parametry hydrodynamiczne w serii 3
 Table 3. Hydrodynamic parameters (serie 3)

Przekrój Cross-section	Numer punktu No point	h m	V_{sr} $m \cdot s^{-1}$	V_* $m \cdot s^{-1}$	τ $N \cdot m^{-2}$	Re	Re^*	Fr	Fr^*
-V	1	0,17	0,102	0,005	0,03	13256	768	0,08	0,004
	2	0,50	0,222	0,002	0,01	84856	494	0,10	0,001
	3	0,36	0,242	0,012	0,14	66600	1680	0,13	0,009
-IV	4	0,59	0,312	0,018	0,32	140723	3757	0,13	0,011
-III	5	0,56	0,181	0,009	0,08	77486	1878	0,08	0,005
	6	0,40	0,157	0,010	0,11	48009	1533	0,08	0,008
-II	7	0,60	0,151	0,004	0,02	69261	853	0,06	0,002
	8	0,32	0,163	0,005	0,03	39875	769	0,09	0,004
-I	9	1,10	0,002	0,001	0,001	1682	147	0,01	0,001
	10	0,36	0,400	0,019	0,38	110083	4061	0,21	0,012
	11	0,78	0,013	0,001	0,001	7752	155	0,01	0,001
	12	0,94	0,006	0,001	0,001	4312	109	0,01	0,001
N	13	0,02	0,370	0,005	0,03	5667	1387	0,84	0,003
	14	0,10	1,420	0,030	0,91	108554	8069	1,43	0,016
GD	15	0,03	0,630	0,024	0,57	14448	6370	1,16	0,013
	16	0,10	1,10	0,062	3,90	84091	16715	1,11	0,034
	17	0,02	0,140	0,028	0,76	2141	7385	0,32	0,015
PS	18	0,07	2,160	0,021	0,44	115587	5619	2,61	0,011
	19	0,08	0,720	0,014	0,21	44033	3858	0,81	0,008
	20	0,05	2,230	0,024	0,57	85238	6384	3,18	0,013
	21	0,05	1,020	0,021	0,44	38988	5619	1,46	0,011
GD	22	0,05	0,380	0,024	0,56	14525	6328	0,54	0,013
	23	0,14	0,400	0,016	0,25	42810	4211	0,34	0,008
I	24	0,20	0,143	0,005	0,02	21864	965	0,10	0,003
	25	0,15	0,128	0,007	0,05	14678	1470	0,11	0,004
	26	0,22	0,254	0,004	0,02	42718	846	0,17	0,002
	27	0,06	0,035	0,001	0,001	1605	174	0,05	0,001
	28	0,15	0,106	0,009	0,08	12155	1862	0,09	0,005
	29	0,13	0,252	0,008	0,06	25044	1152	0,22	0,006
II	30	0,05	0,075	0,002	0,01	2867	228	0,11	0,001
	31	0,08	0,112	0,003	0,01	6850	486	0,13	0,002
	32	0,07	0,084	0,008	0,06	4495	1164	0,10	0,005
III	33	0,13	0,252	0,007	0,05	25044	1060	0,22	0,006
	34	0,22	0,222	0,013	0,16	37337	1884	0,15	0,009
	35	0,10	0,094	0,007	0,05	7186	1088	0,09	0,005
	36	0,10	0,266	0,023	0,51	20335	3335	0,27	0,016
	37	0,06	0,198	0,009	0,09	9082	1362	0,26	0,007

Parametry hydrodynamiczne analizowane podczas trzeciej serii zostały przedstawione w tabeli 3. Dno cieku od pomiarów wykonanych w serii 2 nie zmieniło się. Pomiarów wykonano przy niskim stanie wody (rys. 2).

Bezpośrednio poniżej bystrza (przekrój „-I”) nastąpiła dalsza erozja przegłębień. Podczas tej serii we wspomnianych miejscach odnotowano również najniższe wartości prędkości dynamicznej i naprężeń stycznych – odpowiednio $0,001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $0,001 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ dla obydwu przegłębień. W pozostałych punktach stanowiska dolnego naprężenia styczne były mniejsze niż podczas serii 2, co jest związane z mniejszym przepływem i niższymi wartościami prędkości dynamicznej. W nurcie głównym poniżej bystrza ich wartości były najwyższe ($0,38 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ dla punktu 10 i $0,32 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ dla punktu 4). Wszędzie prócz przegłębień występował ruch turbulentny, natomiast w przegłębieniach był to ruch przejściowy. Na całym dolnym stanowisku liczba Froude’a kształtowała się poniżej 1, co oznaczało ruch spokojny.

Podczas tej serii punktów pomiarowych na bystrzu było mniej, gdyż woda nie płynęła całą szerokością budowli. Na obiekcie najwyższe średnie prędkości wody płynącej odnotowano na płycie spadowej, tak jak w poprzednich seriach – w miejscu koncentracji strugi. Ich największe wartości sięgały $2,16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ w punkcie 18 i $2,23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ w punkcie 20. Najwyższe prędkości dynamiczne i naprężenia styczne występowały na gurcie dolnym, a także w obniżeniu, wynosząc odpowiednio $0,062 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i $3,90 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. W pozostałych punktach pomiarowych wartości naprężenia wahały się w granicach $0,21$ – $0,91 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Wyjątek stanowił punkt 24 na niecce, gdzie wartości tego parametru wyniosły $0,03 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Liczba Reynoldsa wskazywała na ruch turbulentny. Na prawie całej płycie spadowej zaś występował ruch rwący, przy czym najwyższą wartość liczby Froude’a – 3,18, stwierdzono w punkcie 20. Tak jak w poprzednich seriach, tak i w tej na gurcie górnym zaobserwowano ruch spokojny.

Na stanowisku górnym woda płynęła ze średnią prędkością $0,112$ – $0,266 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Naprężenia styczne były do siebie zbliżone. Wynosiły one $0,001$ – $0,09 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Wyjątek stanowiły dwa punkty (34, 36) w przekroju „III”, których wartości wynosiły odpowiednio $0,16 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ i $0,51 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Wszędzie powyżej bystrza występował ruch turbulentny i spokojny.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysunąć następujące wnioski:

1. Parametry hydrodynamiczne w rejonie badanych budowli wodnych ściśle zależą od usytuowania punktu pomiarowego w stosunku do poszczególnych elementów budowli.
2. Rejon budowli wodnych, a w szczególności bystrzy, wykazuje znaczne zróżnicowanie warunków hydrodynamicznych, co oznacza większą niż gdzie indziej liczbę miejsc, w których bytują różnorodne formy fauny makrobezkręgowej.
3. Najwyższe prędkości odnotowano na płycie spadowej bystrza w miejscu koncentracji strugi.
4. Prędkości maksymalne, średnie i dynamiczne powyżej i poniżej budowli wodnych są porównywalne, co świadczy o prawidłowej pracy bystrzy.
5. Wartości naprężeń stycznych są uzależnione od prędkości przepływu wody i jej turbulencji oraz prędkości dynamicznej.

PIŚMIENNICTWO

- Gordon D.N., McMahon T.A., Finlayson B.L., 1992. Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists. Wiley and Sons London.
- Kłonowska-Olejnik M., Radecki-Pawlik A., 2000. Zróżnicowanie mikrosiedliskowe makrobezkręgowców dennych w obrębie łach korytowych potoku górskiego o dnie zwirowym. XVIII Zjazd Hydrobiologów Polskich, 4–8.09.2000, Białystok.
- Korpak J., 2008. Rola maksymalnych wezbrań w funkcjonowaniu systemów uregulowanych koryt górskich. Landform Analys. 8, 41–44
- Korpak J., Krzemiń K., Radecki-Pawlik A., 2008. Wpływ czynników antropogenicznych na zmiany koryt cieków karpackich. Infrastr. Ekol. Ter. Wiejs. 4
- Ślizowski R., Radecki-Pawlik A., 1998. Bystrze z kamienia naturalnego jako przykład nowoczesnej, ekologicznej budowli regulacyjnej w zlewniach rzecznych. Przegł. Nauk. SGGW Warsz. 15, 162–170.
- Ślizowski R., Radecki-Pawlik A., 2000. Distribution of maximum velocities and Froude numbers on a rapid hydraulic structure apron. Electr. J. Pol. Agric. Univ. (EJPAU) 3(1), 1–13.
- Ślizowski R., 2002. Wpływ bystrzy o zwiększonej szorstkości na migracje ryb w potokach górskich. Zesz. Nauk. AR Krak. 393, Inżyn. Środ. 23, 331–336.
- Ślizowski R., 1993. Bystrza o zwiększonej szorstkości jako element zabudowy potoków górskich. Zesz. Nauk. AR Krak., Rozpr. Habil. 181.
- Żelazo J., 1992. Badania prędkości i oporów przepływu w naturalnych korytach rzek nizinnych. Rozpr. Nauk. Monogr. SGGW Warszawa
- Żelazo J., Popek Z., 2002. Podstawy renaturyzacji rzek. SGGW Warszawa.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 21.03.2013