INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 1/2010, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 25–38
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Artur Radecki-Pawlik, Katarzyna Świderska, Karol Plesiński

ZRÓŻNICOWANIE PARAMETRÓW HYDRAULICZNYCH W REJONIE BYSTRZY O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI

DIVERSIFICATION OF HYDRAULIC PARAMETERS IN NEAR RAPID HYDRAULIC STRUCTURES (RHS)

Streszczenie

Obecnie poszukuje się nowych rozwiązań budowlanych z zakresu inżynierii rzecznej. Najodpowiedniejszymi budowlami wydają się być bystrza o zwiększonej szorstkości. Spełniają one walory przyrodnicze i estetyczne oraz nie powodują przegrodzenia rzeki wędrującym rybom i innym organizmom wodnym, przez co są zalecane przez Ramową Dyrektywę Wodną Unii Europejskiej.

W publikacji określono wartości parametrów hydraulicznych w rejonie bystrzy o zwiększonej szorstkości, znajdujących się na potoku Porębianka w Gorcach. Głównym celem pracy jest próba pokazania możliwości monitorowania wykonanych budowli hydrotechnicznych oraz pokazanie ewentualnych zmian w hydrodynamice cieku, które uniemożliwiłyby zamieszkiwanie odcinka rzeki przez organizmy wodne.

Z przeprowadzonych badań można wnioskować o prawidłowej pracy bystrzy oraz o spełnieniu funkcji ekologiczno-krajobrazowej przez te budowle. Świadczy o tym bogate zróżnicowanie warunków hydrodynamicznych, co wpływa na zwiększenie ilości miejsc o różnorodnej faunie makrobezkręgowej. Parametry hydrodynamiczne zaobserwowane w rejonie bystrzy ściśle zależą od usytuowania punktu pomiarowego w stosunku do poszczególnych elementów budowli. Maksymalne prędkości nie zawsze powodują powstawanie największych sił działających na dno cieku, gdyż jest to związane również z ich rozkładem w pionie pomiarowym.

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

Summary

At the present, in modern river training practices and philosophy one can notice coming more into use ecological friendly hydraulic structures. Those, which are especially needed for river training works, as far as expectation of Water Framework Directive is concerned, are rapid hydraulic structures (RHS). What is important, RHS in general do not stop fish and invertebrates against migrating upstream, provide natural and esthetical effects within the river channel, still working as hydraulic engineering structures.

Along this paper we described and measured some hydraulic parameters within the reach of chosen rapid hydraulic structures, which we found in the field. The main aim of the research was to describe changes of values of those parameters upstream and downstream of the RHS's and to find out their influence on hydrodynamics of the stream. The study was undertaken on the Porębianka Stream in the Gorce Mountains.

Observed hydrodynamic parameters within the reach of the RHS's depend on the location of measuring point and the influence of individual part of the structure. At the same time maximum velocity does not always create the bigger shear force, because it is also depend on the velocity distribution along the hydrological profile.

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

WSTĘP

Wprowadzana w krajach europejskich Ramowa Dyrektywa Wodna wymusza na krajach członkowskich Unii, a szczególnie w miejscu tak zaniedbanym w sferze świadomości ekologicznej jak Polska, inne niż tylko techniczne podejście do problemu inżynierii rzecznej. Coraz częściej zauważa się walory przyrodnicze i estetyczne potoku, rzeki oraz doliny rzecznej, również w momencie tworzenia planów utrzymania koryta cieku, co jest symptomem prób zrozumienia złożoności zagadnienia. Całe to nowe, ekologiczno-hydrotechniczne podejście do regulacji rzecznej jest procesem niełatwym, lecz koniecznym, aby stanąć wreszcie na stanowisku ratowania polskich rzek lub tego co z nich pozostało. Obecnie, przy konsultacjach projektów hydrotechnicznych, nawet tych najmniejszych, zwracać należy uwagę na oddziaływanie budowli na otaczającą przyrodę i ich rolę w środowisku naturalnym [Żelazo 1992; Żelazo, Popek 2002]. W związku z powyższym od pewnego czasu rozpoczęto wprowadzanie nowych budowli wodnych, które wymagają jednak monitorowania po wykonaniu ich w terenie. Niektóre z nich, choć technicznie wykonane precyzyjnie i z dołożeniem wszelkiej staranności uzgodnień przyrodniczych z grupami ekologicznymi, mogą okazać się niespełniającymi w dłuższej perspektywie czasowej wymagań dawanych wędrówką ryb, a przede wszystkim bentosu [Kłonowska-Olejnik, Radecki-Pawlik 2000].

I tak, budowlami spełniającymi wiele wymagań techniczno-przyrodniczych są bystrza z kamienia łamanego o zwiększonej szorstkości. Działanie tych konstrukcji polega na wytworzeniu tak dużej szorstkości na płycie spadowej bystrza, aby energia przepływającej wody została rozproszona na bystrzu, a nie poniżej niego [Ślizowski, Radecki-Pawlik 1998, 2000]. Budowle te, często są układane w sposób, który powoduje koncentracje strugi w środkowej części obiektu, a zarazem mają stosowny spadek, aby nie przeszkadzać w migracji zwierząt. Jednocześnie spełniają rolę podtrzymania dna poniżej choćby mostów lub przepustów, ochrony przed erozja koryta, redukują spadek cieku, a także powodują odtwarzanie łach korytowych. Obiekty te mogą z powodzeniem zastąpić tradycyjne stopnie betonowe, bez konieczności budowania drogich i często technicznie chybionych projektowo przepławek. Bystrza stwarzają także lepsze warunki biologiczne w potoku przez większe natlenienie wody dla makrobentosu i ryb oraz dobrze współgrają z krajobrazem [Ślizowski 1993, 2002; Korpak i in. 2008].

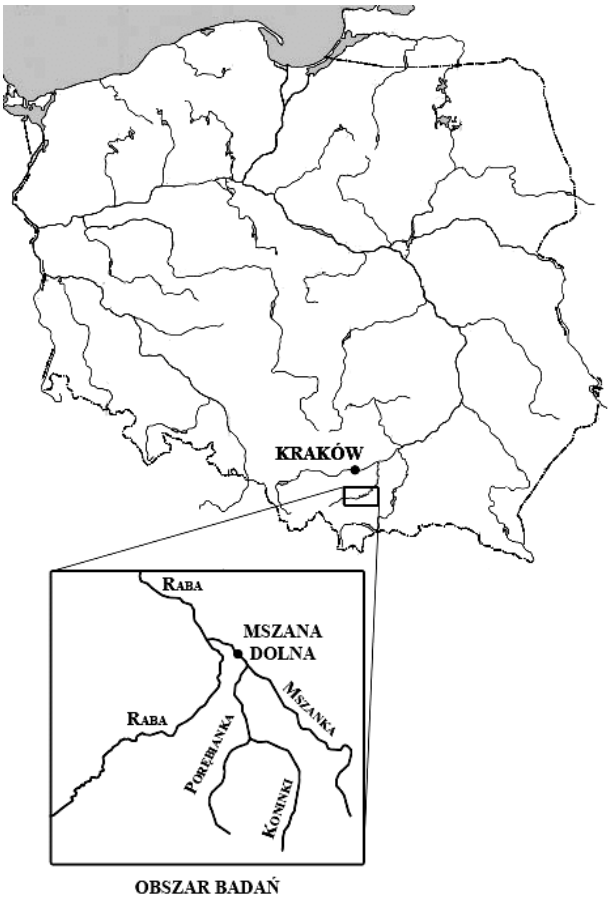
Celem niniejszej publikacji jest określenie parametrów hydraulicznych w rejonie bystrzy o zwiększonej szorstkości. Cel ten to w perspektywie próba pokazania możliwości monitorowania wykonanych budowli hydrotechnicznych oraz pokazanie czy nie powodują one takich zmian w hydrodynamice cieku, które uniemożliwiłyby zamieszkiwanie odcinka rzeki przez faunę wodną. Jako obiekt badań w pracy wybrano grupę bystrzy na potoku Porębianka w Gorcach. Pomiary rozkładu prędkości powyżej i poniżej budowli wodnych miały na celu zbadanie czy warunki hydrauliczne przepływu są porównywalne, nie powodują zbytniego wzrostu sił dynamicznych na dnie oraz drastycznej zmiany reżimu przepływu. W publikacji dokonano więc analizy prędkości stycznych, prędkości średnich i dynamicznych występujących na bystrzu i w strefie jego oddziaływania, a także analizy podstawowych liczb związanych z ruchem wody w formie charakterystyk Froude'a i Reynoldsa.

OPIS BADANEJ ZLEWNI

Rzeka Porębianka jest ciekiem IV rzędu o długości 15,4 km znajdującym się w południowej części województwa małopolskiego, w pasmie górskim Gorców. Jest prawobrzeżnym dopływem Mszanki. Swój początek bierze spod szczytu Obidowa, jako Porąbka. Powierzchnia całej zlewni wynosi 72 km^2, a szerokość koryta od 1 m w partiach najstromszych do 140 m w odcinku ujściowym, przy spadku średnim 56,9‰ [Korpak 2008].

Obszar zlewni potoku Porębianka zbudowany jest z utworów fliszu karpackiego. Zlewnia leży w północnej części Gorców w obrębie 2 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 oraz z mniej odpornych łupków i piaskowców podmagurskich i hieroglifowych, margli, łupków i piaskowców inoceramowych. W rejonie występowanie fliszu mamy do czynienia z glebami słabo przepuszczalnymi, brunatnymi, które powstały ze zwietrzeliny fliszowej o charakterze glin średnich i iłów. Przeważają więc tu 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 podnóży stoków gleby brunatne deluwialne oraz gruntowo-glejowe. Na obszarach współcześnie zalewanych występują mady właściwe, natomiast na obszarach niezalewanych mady brunatne.



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

Charakterystyka hydrologiczna wód powierzchniowych potoku Porębianka była analizowana 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 mówią, 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. Natomiast 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 próbujemy zrozumieć problem dostawy do potoku rumowiska oraz wcięcia koryta potoku w ostatnich dziesięcioleciach (poza oczywistą dewastacja potoku przez nielegalny pobór kruszywa). Sprawa budowy zlewni i jej reakcji na opad jest kluczowa dla zrozumienia dlaczego takie czy tez inne procesy przebiegają w zlewni. Błędna zabudowa hydrotechniczna jest często następstwem niezrozumienia procesów zlewniowych. Tak więc na obecne wykształcenie koryta Porębianki duży wpływ ma obecność zapór przeciwrumowiskowych, gdyż stanowią one granicę pomiędzy poszczególnymi typami odcinków koryt – poniżej zapór występuje erozja, powyżej akumulacja.

Koryto potoku Porębianka charakteryzuje się następującymi typami odcinków [Korpak 2008]:

1. Odcinki erozyjne. Koryto jest wycięte w litej skale, wymodelowane poprzez erozję wgłębną. Występują w górnym biegu rzeki, jak również poniżej zapór przeciwrumowiskowych. Szerokość koryta nie przekracza 10 m.
2. Odcinki redepozycyjno-erozyjne. Koryto jest wcięte w aluwiach, modelowane poprzez depozycję, redepozycję i erozję boczną. Występują niewielkie łachy i sporadyczne wychodnie skalne. Odcinki koryta są przeważnie kręte. Podcinane są wklęsłe brzegi, a przy brzegach wypukłych tworzą się łachy.
3. Odcinki redepozycyjne. Koryto jest wcięte w aluwiach, łachy mają dużą powierzchnię. Odcinki te występują powyżej zapór przeciwrumowiskowych. W odcinkach, które zostały uregulowane za pomocą stopni lub bystrzy, występują liczne łachy.
4. Odcinki transportacyjne. Koryto ma podłoże aluwialne, bez tendencji erozyjnych i akumulacyjnych. Odcinek ten występuje w ujściowym biegu Mszanki.

W korycie Porębianki największą długość mają odcinki erozyjne (61,7% długości koryta). Występują jeszcze odcinki redepozycyjne (27,4%) oraz redepozycyjno-erozyjne (10,9%).

Obecnie potok ma koryto jednodzielne, wąskie i kręte. Na początku XX w. był rzeką wieloramienną i roztokową. Wspomniana zmiana nastąpiła pod wpływem kilku czynników, lecz przede wszystkim: zmiany sposobu użytkowania zlewni. Obecnie występują głównie użytki zielone, co powoduje redukcję dostawy materiału stokowego do koryt oraz uregulowania rzeki w 37,7% długości koryta. Regulację zastosowano poprzez budowę zapór przeciwrumowiskowych, stopni wodnych, bystrzy oraz poprzez umocnienie brzegów koryta przy zastosowaniu narzutu kamiennego, opasek siatkowo-kamiennych oraz murów oporowych.

METODYKA

W celu zrozumienia działania badanych bystrzy zdecydowano się wyznaczyć kilka obiektów w terenie, które nazwano odpowiednio: BK – bystrza ze swobodnymi formami korytowymi tworzącymi się przed i za obiektem (łachami śródkorytowymi i bocznymi) oraz BZ – bystrza z formami porośniętymi roślinnościa trawiastą, o mniejszej dynamice agradacji i degradacji koryta powyżej i poniżej obiektu. W sumie, pomiary rozkładu prędkości wykonano dla czterech obiektów w kilku pionach i na kilku głębokościach, tak aby uchwycić zarówno prędkości przydenne celem określenia sił oraz prędkości średnie i maksymalne. Miejsca pomiaru zostały w obrębie obiektu wybrane w taki sposób, aby jak najdokładniej odzwierciedlić sytuację hydrauliczną panującą w strefie bystrza w każdym z charakterystycznych punktów budowli, a także w rejonie jej oddziaływania. 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 $m \cdot s^{-1}$ do 10 $m \cdot s^{-1}$. Odczyty wykonane zostały bezpośrednio nad dnem oraz w określonych pionach w odstępach od 5 mm do 10 mm. Pomiary prędkości chwilowej umożliwiły wyznaczenie następujących wielkości: prędkości średnie, prędkości dynamiczne, liczbę Reynoldsa (w pionie oraz tzw. ziarnowa), liczbę Frude'a i naprężenia styczne.

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

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

gdzie:

a – współczynnik nachylenia prostej $v = f(h)$ przyjmującej postać równania $y = ax + c$ (gdzie: x – wysokość nad dnem, na której wykonano pomiar prędkości; c – wyraz wolny równania).

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

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

gdzie:

ρ – ciężar objętościowy $\left[kg \cdot m^{-3}\right]$.

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

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

gdzie:

v – prędkość wody $\left[m \cdot s^{-1}\right]$,

h – napełnienie w korycie $[m]$,

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

$$Re = \frac{v \cdot d}{\upsilon} \ [-]$$

gdzie:

v – prędkość wody $\left[m \cdot s^{-1}\right]$,

d – promień hydrauliczny koryta cieku (lub wielkość cząstek przy dnie) $[m]$,

υ – kinetyczny współczynnik lepkości $\left[m^2 \cdot s\right]$.

WYNIKI BADAŃ WRAZ Z DYSKUSJĄ

W celu ułatwienia dyskusji, wyniki badań przedstawiono w postaci stabelaryzowanej, przedstawiając w nich wartości parametrów hydrodynamicznych. Pomiary prędkości chwilowej, której wartości posłużyły do obliczenia pozostałych parametrów hydraulicznych cieku, wykonano w dwóch terminach w ciągu roku. Raz jeszcze należy nadmienić, że oznaczenia odpowiednich obiektów przedstawiają się następująco: BK – bystrza ze swobodnymi formami korytowymi tworzącymi się przed i za obiektem (łachami śródkorytowymi i bocznymi)

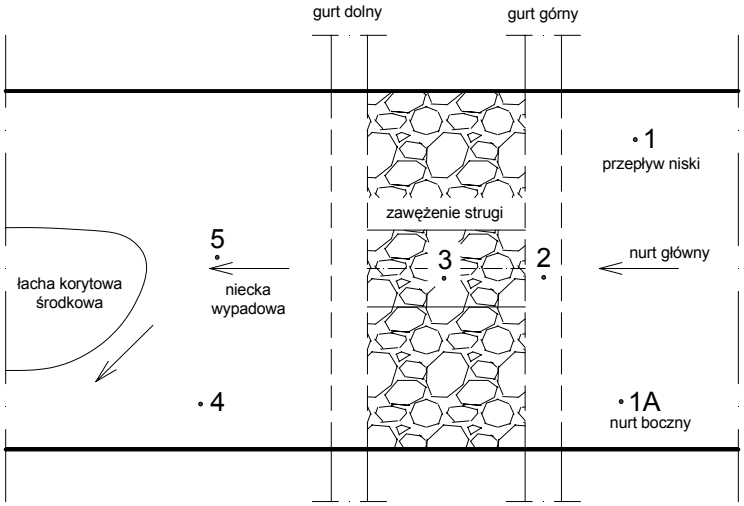
oraz BZ – bystrza z formami porośniętymi roślinnością trawiastą, o mniejszej dynamice agradacji i degradacji koryta powyżej i poniżej obiektu. Oznaczenia w tabelach są następujące: h_{max} – maksymalna głębokość wody w danym punkcie pomiarowym [m], Re_{max} – liczba Reynoldsa przy prędkości maksymalnej [-], Re_{denna} – liczba Reynoldsa przy prędkości średniej dla wysokości ziarnowej [-], Fr_{max} – liczba Froude'a przy prędkości maksymalnej [-], $Fr_{śr}$ – liczba Froude'a przy prędkości średniej [-], $V_{śr}$ – prędkość średnia [$m \cdot s^{-1}$], $V_{śr\ 1cm}$ – prędkość średnia mierzona 1 cm nad dnem [$m \cdot s^{-1}$], V_{max} – prędkość maksymalna [$m \cdot s^{-1}$], τ - naprężenie styczne [$N \cdot m^{-2}$].

W badanych punktach odnotowano zróżnicowane wartości parametrów hydraulicznych, takich jak: liczba Reynoldsa, liczba Froude'a, naprężenie styczne, w zależności od miejsca pomiaru na bystrzu. W punktach BK1,1 oraz BK1,4 występuje przepływ laminarny, o czym świadczy wielkość liczby Reynoldsa – odpowiednio $Re_{denna} = 407$ dla $\tau = 0{,}001\ N \cdot m^{-2}$ oraz $Re_{denna} = 123$ dla $\tau = 0{,}001\ N \cdot m^{-2}$. Największe naprężenia dla tego przekroju występowały na płycie spadowej bystrza (punkt BK1,3) w terminie I oraz w punkcie centralnym niecki wypadowej (punkt BK1,5) w terminie II.

Wartości naprężeń stycznych w tych punktach wynosiły odpowiednio $\tau = 1{,}024\ N \cdot m^{-2}$ dla h = 0,50 m i $\tau = 3{,}025\ N \cdot m^{-2}$ dla h = 0,35 m. Na płycie spadowej bystrza w terminie II wystąpiła największa wartość liczby Froude'a wahająca się od 1,155 do 1,237. Wartości te odpowiadają warunkom ruchu podkrytycznego.

Tabela 1. Parametry hydrodynamiczne w rejonie bystrza BK1
Table 1. Hydrodynamic parameters in near rapid BK1

Termin I									
Nazwa	h_{max} [m]	Re_{max} [-]	Re_{denna} [-]	Fr_{max} [-]	$Fr_{śr}$ [-]	$V_{śr}$ [$m \cdot s^{-1}$]	$V_{śr\ 1cm}$ [$m \cdot s^{-1}$]	V_{max} [$m \cdot s^{-1}$]	τ [$N \cdot m^{-2}$]
BK1,1	0,18	7740	407	0,032	0,030	0,040	0,041	0,043	0,001
BK1,1A	0,22	83 820	2987	0,259	0,216	0,317	0,299	0,381	0,064
BK1,2	0,21	149 100	6200	0,495	0,464	0,666	0,620	0,710	0,144
BK1,3	0,50	460 000	7833	0,415	0,382	0,847	0,783	0,920	1,024
BK1,4	0,50	8500	123	0,008	0,007	0,015	0,012	0,017	0,001
BK1,5	0,45	174 600	2473	0,185	0,151	0,318	0,247	0,388	0,324
Termin II									
Nazwa	h_{max} [m]	Re_{max} [-]	Re_{denna} [-]	Fr_{max} [-]	$Fr_{śr}$ [-]	$V_{śr}$ [$m \cdot s^{-1}$]	$V_{śr\ 1cm}$ [$m \cdot s^{-1}$]	V_{max} [$m \cdot s^{-1}$]	τ [$N \cdot m^{-2}$]
BK1,1	0,22	40 920	1140	0,127	0,091	0,134	0,114	0,186	0,064
BK1,1A	0,25	172 500	4667	0,441	0,350	0,549	0,467	0,690	0,676
BK1,2	0,35	185 500	4100	0,286	0,255	0,473	0,410	0,530	0,324
BK1,3	0,15	225 000	13 700	1,237	1,155	1,402	1,370	1,500	0,361
BK1,4	0,40	280 000	4633	0,353	0,290	0,574	0,463	0,700	1,225
BK1,5	0,35	287 000	4667	0,443	0,359	0,644	0,467	0,820	3,025

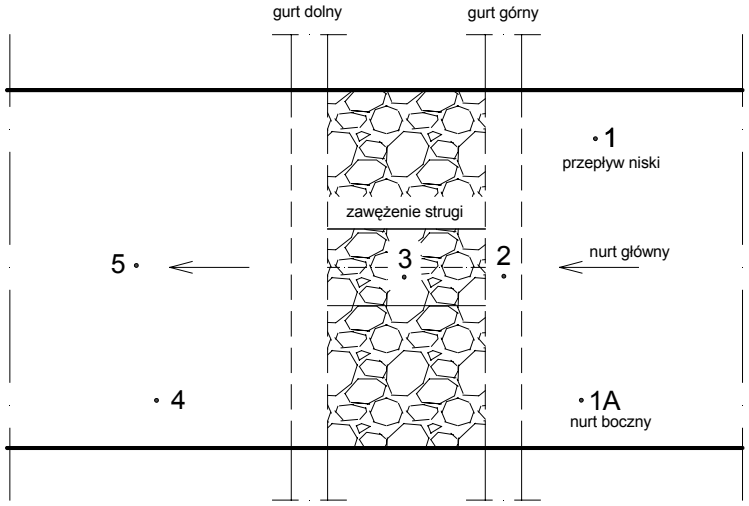


Rysunek 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w rejonie bystrza BK1
Figure 2. Arrangement of measuring points in near rapid BK1

W badanym przekroju wystąpiło zróżnicowanie parametrów hydrodynamicznych, co było związane z terminem pomiaru, a w szczególności ze zmiennym przepływem.

Tabela 2. Parametry hydrodynamiczne w rejonie bystrza BK2
Table 2. Hydrodynamic parameters in near rapid BK2

Termin I									
Nazwa	h_{max} [m]	Re_{max} [-]	Re_{denna} [-]	Fr_{max} [-]	$Fr_{śr}$ [-]	$V_{śr}$ [m · s^{-1}]	$V_{śr\ 1cm}$ [m · s^{-1}]	V_{max} [m · s^{-1}]	τ [N · m^{-2}]
BK2,1	0,32	58 560	1573	0,103	0,090	0,159	0,157	0,183	0,029
BK2,1A	0,10	25 800	2167	0,260	0,236	0,234	0,217	0,258	0,031
BK2,2	0,22	242 000	9633	0,749	0,692	1,017	0,963	1,100	0,289
BK2,3	0,06	84 000	13 500	1,825	1,786	1,370	1,350	1,400	0,100
BK2,4	0,38	19 760	260	0,027	0,016	0,031	0,026	0,052	0,004
BK2,5	0,55	291 500	1747	0,228	0,140	0,325	0,175	0,530	1,764
Termin II									
Nazwa	h_{max} [m]	Re_{max} [-]	Re_{denna} [-]	Fr_{max} [-]	$Fr_{śr}$ [-]	$V_{śr}$ [m · s^{-1}]	$V_{śr\ 1cm}$ [m · s^{-1}]	V_{max} [m · s^{-1}]	τ [N · m^{-2}]
BK2,1	0,28	69 440	1403	0,150	0,112	0,186	0,140	0,248	0,169
BK2,1A	0,19	57 000	2293	0,220	0,191	0,261	0,229	0,300	0,100
BK2,2	0,25	275 000	8267	0,702	0,634	0,993	0,827	1,100	2,025
BK2,3	0,50	572 000	10 407	0,517	0,487	1,078	1,041	1,144	0,144
BK2,4	0,46	32 660	620	0,033	0,030	0,064	0,062	0,071	0,001
BK2,5	0,60	378 000	3653	0,260	0,201	0,487	0,365	0,630	1,444



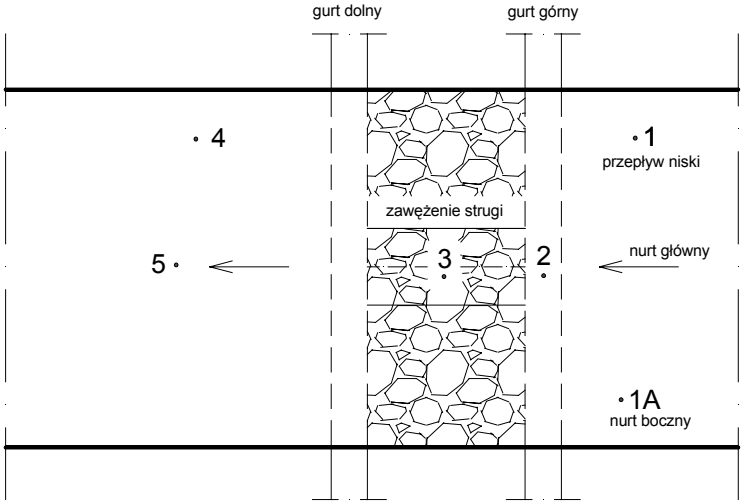
Rysunek 3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w rejonie bystrza BK2
Figure 3. Arrangement of measuring points in near rapid BK2

W punkcie BK2,4 wystąpił ruch laminarny (Re_{denna} = 260 dla τ = 0,004 N · m^{-2}). W pozostałych punktach pomiarowych wystąpił ruch turbulentny. Największe naprężenia występowały w punkcie centralnym niecki wypadowej bystrza oraz na koronie bystrza. Wartości te wynosiły τ = 1,764 N · m^{-2} dla h = 0,55 m i τ = 1,444 N · m^{-2} dla h = 0,60 m (dla punktu BK1,5 w terminie I i II) oraz τ = 2,025 N · m^{-2} dla h = 0,25 m (dla punktu BK2,2 w terminie II). Występowanie ruchu podkrytycznego zaobserwowano na płycie spadowej bystrza w punkcie BK2,3 w terminie I. Liczba Froude'a wahała się w tym punkcie w przedziale 1,786–1,825.

Tabela 3. Parametry hydrodynamiczne w rejonie bystrza BZ1
Table 3. Hydrodynamic parameters in near rapid BZ1

Termin I									
Nazwa	h_{max} [m]	Re_{max} [-]	Re_{denna} [-]	Fr_{max} [-]	$Fr_{śr}$ [-]	$V_{śr}$ [m · s^{-1}]	$V_{śr\ 1cm}$ [m · s^{-1}]	V_{max} [m · s^{-1}]	τ [N · m^{-2}]
BZ1,1	0,20	33 400	1500	0,119	0,111	0,156	0,150	0,167	0,004
BZ1,1A	0,10	15 100	1227	0,152	0,135	0,134	0,123	0,151	0,016
BZ1,2	0,21	170 100	7500	0,564	0,540	0,776	0,750	0,810	0,064
BZ1,3	0,07	34 300	3493	0,591	0,488	0,405	0,349	0,490	0,784
BZ1,4	0,49	12 250	57	0,011	0,005	0,012	0,006	0,025	0,004
BZ1,5	0,85	255 000	1623	0,104	0,079	0,227	0,162	0,300	0,624

Termin II									
Nazwa	h_{max} [m]	Re_{max} [-]	Re_{denna} [-]	Fr_{max} [-]	$Fr_{śr}$ [-]	$V_{śr}$ [m · s^{-1}]	$V_{śr\ 1cm}$ [m · s^{-1}]	V_{max} [m · s^{-1}]	τ [N · m^{-2}]
BZ1,1	0,12	38 880	2413	0,299	0,258	0,280	0,241	0,324	0,121
BZ1,1A	0,12	37 440	2740	0,288	0,267	0,290	0,274	0,312	0,064
BZ1,2	0,29	240 700	6433	0,492	0,430	0,726	0,643	0,830	0,625
BZ1,3	0,05	45 500	6000	1,299	1,045	0,732	0,600	0,910	4,356
BZ1,4	0,20	25 400	957	0,091	0,080	0,111	0,096	0,127	0,016
BZ1,5	0,60	192 000	1637	0,132	0,093	0,226	0,164	0,320	0,361



Rysunek 4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w rejonie bystrza BZ1
Figure 4. Arrangement of measuring points in near rapid BZ1

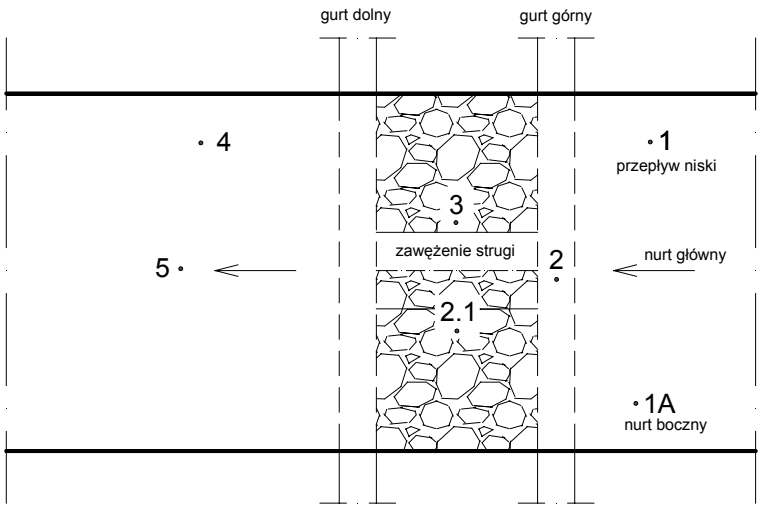
Największą wartość naprężeń stycznych zaobserwowano z terminie II na płycie spadowej bystrza (punkt BZ1,3) wynoszącą $\tau = 4{,}356\ N \cdot m^{-2}$ dla h = 0,05 m. W punkcie tym występuje również ruch podkrytyczny, o czym świadczy liczba Froude'a zawierająca się w granicach 1,045 do 1,299. Pomiary w pozostałych punktach wykazały ruch nadkrytyczny. Ruch laminarny wystąpił w punkcie BZ1,4. Wartość liczby Reynoldsa w omawianym punkcie wynosiła $Re_{denna} = 57$ dla $\tau = 0{,}004\ N \cdot m^{-2}$.

W badanym przekroju ruch laminarny wystąpił powyżej bystrza, gdzie prąd był słaby (punkt BZ2,1). Wartość liczby Reynoldsa w tym punkcie wynosiła $Re_{denna} = 407$ dla $\tau = 0{,}004\ N \cdot m^{-2}$. Obliczone wartości liczby Froude'a wskazują na występowanie ruchu nadkrytycznego we wszystkich punktach pomiarowych. W terminie I najwyższe wartości naprężeń stycznych występują na płycie spadowej bystrza (punkt BZ2,3), wynosząc $\tau = 2{,}025\ N \cdot m^{-2}$ dla h = 0,10 m,

natomiast w terminie II najwyższe wartości omawianego parametru wystąpiły na koronie bystrza (punkt BZ2,2), wynosząc $\tau = 3{,}136\ N \cdot m^{-2}$ dla h = 0,29 m.

Tabela 4. Parametry hydrodynamiczne w rejonie bystrza BZ2
Table 4. Hydrodynamic parameters in near rapid BZ2

Termin I									
Nazwa	h_{max} [m]	Re_{max} [-]	Re_{denna} [-]	Fr_{max} [-]	$Fr_{śr}$ [-]	$V_{śr}$ [$m \cdot s^{-1}$]	$V_{śr\ 1cm}$ [$m \cdot s^{-1}$]	V_{max} [$m \cdot s^{-1}$]	τ [$N \cdot m^{-2}$]
BZ2,1	0,11	14 190	660	0,124	0,088	0,091	0,066	0,129	0,064
BZ2,1A	0,11	33 440	2210	0,293	0,243	0,252	0,221	0,304	0,121
BZ2,2	0,16	171 200	9133	0,854	0,776	0,972	0,913	1,070	0,400
BZ2,3	0,10	57 000	2840	0,575	0,379	0,375	0,284	0,570	2,025
BZ2,4	0,30	44 400	893	0,086	0,067	0,115	0,089	0,148	0,064
BZ2,5	0,50	139 000	1497	0,126	0,094	0,209	0,150	0,278	0,324
Termin II									
Nazwa	h_{max} [m]	Re_{max} [-]	Re_{denna} [-]	Fr_{max} [-]	$Fr_{śr}$ [-]	$V_{śr}$ [$m \cdot s^{-1}$]	$V_{śr\ 1cm}$ [$m \cdot s^{-1}$]	V_{max} [$m \cdot s^{-1}$]	τ [$N \cdot m^{-2}$]
BZ2,1	0,30	15 900	407	0,031	0,027	0,046	0,041	0,053	0,004
BZ2,1A	0,09	53 100	5000	0,628	0,581	0,546	0,500	0,590	0,169
BZ2,2	0,29	179 800	1600	0,368	0,197	0,332	0,160	0,620	3,136
BZ2,3	0,12	103 200	4867	0,793	0,615	0,668	0,487	0,860	2,916
BZ2,4	0,38	120 840	2220	0,165	0,136	0,263	0,222	0,318	0,169
BZ2,5	0,49	303 800	3593	0,283	0,204	0,446	0,359	0,620	0,961



Rysunek 5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w rejonie bystrza BZ2
Figure 5. Arrangement of measuring points in near rapid BZ2

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. Maksymalne prędkości nie zawsze powodują powstanie największych sił, które działają na dno cieku, ponieważ jest to ściśle związane z napełnieniem koryta.
3. Rejon budowli wodnych, a w szczególności bystrzy, wykazuje bogate zróżnicowanie warunków hydrodynamicznych, co wpływa na zwiększenie ilości miejsc o różnorodnej faunie makrobezkręgowej.
4. Najwyższe prędkości odnotowano na płycie spadowej bystrza.
5. Prędkości maksymalne, średnie i dynamiczne powyżej i poniżej budowli wodnych są porównywalne, co świadczy o prawidłowej pracy bystrzy.

BIBLIOGRAFIA

Gordon D.N., McMahon T.A., Finlayson B.L. Stream *Hydrology – an Introduction for Ecologysts*. Wiley and Sons. London 1992.

Kłonowska-Olejnik M., Radecki-Pawlik A. *Zróżnicowanie mikrosiedliskowe makrobezkręgowców dennych w obrębie łach korytowych potoku górskiego o dnie żwirowym*. XVIII Zjazd Hydrobiologów Polskich. Białystok 2000.

Korpak J. *Rola maksymalnych wezbrań w funkcjonowaniu systemów uregulowanych koryt górskich*. Landform Analysis. 8, 2008, s. 41–44.

Korpak J., Krzemień K., Radecki-Pawlik A. *Wpływ czynników antropogenicznych na zmiany koryt cieków karpackich*. PAN. 4 Kraków 2008.

Ślizowski R., Radecki-Pawlik A. *Bystrze z kamienia naturalnego jako przykład nowoczesnej, ekologicznej budowli regulacyjnej w zlewniach rzecznych*. Przegląd Naukowy SGGW w Warszawie. 15, 1998, s. 162–170.

Ślizowski R., Radecki-Pawlik A. *Distribution of maximum velocities and Froude numbers on a rapid hydraulic structure apron*. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities (EJPAU). 3(1), 2000, s. 1–13.

Ślizowski R. *Wpływ bystrzy o zwiększonej szorstkości na migracje ryb w potokach górskich*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie – Inżynieria Środowiska. 23, 2002, s. 331–336.

Ślizowski R. *Bystrza o zwiększonej szorstkości jako element zabudowy potoków górskich*. Rozprawa habilitacyjna nr 181. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, 1993.

Żelazo J. *Badania prędkości i oporów przepływu w naturalnych korytach rzek nizinnych*. Rozprawy naukowe i monografie. SGGW. Warszawa 1992.

Żelazo J, Popek Z. Podstawy renaturyzacji rzek. SGGW. Warszawa 2002.

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

Recenzent: *Prof. dr hab. Ryszard Ślizowski*