

KAROL PLESIŃSKI, ANNA JADACH, WIKTORIA LASZEK, ARTUR RADECKI-PAWLIK

Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki  
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

## ZMIANY WARUNKÓW HYDRODYNAMICZNYCH W REJONIE BYSTRZA O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI NA RZECE RABIE W KARPATACH\*

HYDRODYNAMIC CONDITIONS DISTRIBUTION  
IN THE AREA OF INCREASED ROUGHNESS BLOCK RAMP  
SITUATED ON THE RABA RIVER – POLISH CARPATHIANS

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono analizę rozkładu parametrów hydrodynamicznych w rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości. W celu określenia zmian warunków hydrodynamicznych wykonano pomiary prędkości wody w strefie oddziaływania bystrza (stanowisko dolne i górne), a także na płycie spadowej budowli na rzece Rabie w miejscowości Rabka-Zaryte. Na podstawie zmierzonych wartości prędkości przepływającej wody obliczono parametry hydrodynamiczne, takie jak prędkości styczne, prędkości średnie i dynamiczne, liczbę Froude'a i Reynoldsa. Dzięki uzyskanym danym udało się określić warunki redukcji energii wody przepływającej w rejonie bystrza.

**Słowa kluczowe:** bystrze o zwiększonej szorstkości, parametry hydrauliczne, prędkość wody, rzeka góraska

### Wstęp

Bystrza o zwiększonej szorstkości wpisują się w naturalne środki techniczne, których stosowanie nakłada na Polskę Ramowa Dyrektywa Wodna (DYREKTYWA 2000/60/WE... 2000), gdzie budowle te uznaje się za element utrzymania koryt rzek i potoków górskich w stanie bliskim naturze (RADECKI-PAWLIK 2010, 2011, ABDEL

---

\*Pracę zrealizowano w ramach projektu z działalności statutowej nr DS-3322/KIWiG/2013 oraz projektu Badania Młodych nr BM 4313 „Warunki hydrodynamiczne i morfologiczne w rejonie oddziaływania bystrzy o zwiększonej szorstkości” Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

SATTAR i IN. 2013, OERTEL 2013, PAGLIARA i PALERMO 2013, RADECKI-PAWLIK i IN. 2013). Bystrza o zwiększonej szorstkości korzystnie oddziałują na koryto rzeki, wpływając na reżim, dynamikę przepływu, a także na warunki hydrodynamiczne cieków. Prędkość maksymalna występująca na bystrzach lub tuż poniżej wpływa na stabilność samej budowli hydrotechnicznej, jak i koryta rzeki (ŚLIZOWSKI i IN. 2008, PLESIŃSKI i IN. 2013, RADECKI-PAWLIK i IN. 2013).

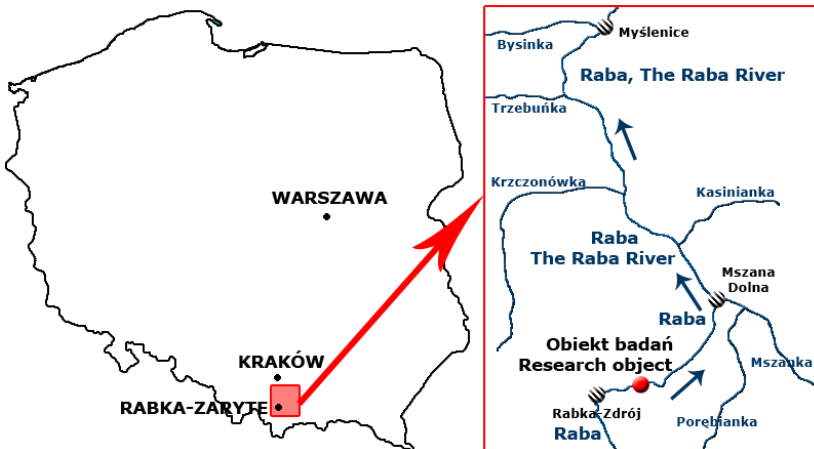
Celem niniejszej pracy jest analiza rozkładu parametrów hydrodynamicznych występujących na bystrzu oraz w rejonie jego oddziaływania.

W pracy zajęto się określeniem prędkości dynamicznych, prędkości średniej oraz naprężenia stycznego zarówno na górnym, jak i dolnym stanowisku bystrza. Dodatkowo wykonano analizę liczby Froude'a i liczby Reynoldsa. Parametry te, poprzez współzależność prędkości przepływu, siły unoszenia, wielkości rumowiska, szerokości i głębokości koryta oraz spadku podłużnego, wpływają na kształtowanie potoków górskich oraz warunki siedliskowe dla organizmów wodnych (ŚLIZOWSKI 1993, 1995, 2002, ZASĘPA i IN. 2006).

## Opis zlewni i obiektu badań

Górny odcinek rzeki Raby przepływa przez Kotlinę Rabczańską, która rozciąga się między Beskidem Makowskim, Wyspowym, Orawsko-Podhalańskim oraz Górcami (KONDRACKI 2000). Utwory górskie w tych rejonach są zbudowane z piaskowców, mułowców, margli i wapieni, tworząc tzw. Karpaty fliszowe (STUPNICKA 1997). Ze względu na podłoże skalne, a także warunki klimatyczno-roślinne, zlewnia rzeki jest pokryta glebami brunatnymi kwaśnymi, często słabo przepuszczalnymi.

Powierzchnia zlewni wynosi 1537,1 km<sup>2</sup>, a długość cieków – 131,9 km. Średni spadek rzeki wynosi 4,42%. Raba swoje źródła ma na wysokości 785 m n.p.m., uchodzi zaś do Wisły na wysokości 180 m n.p.m. Największymi dopływami Raby są Słonka, Stradomka, Mszanka oraz Krzyworzeka (rys. 1). Rzeka prowadzi rumowisko w postaci piasków



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

i żwirów, tworząc terasy rzeczne. Częstym procesem jest również akumulacja rumowiska, czego skutkiem jest tworzenie się łach i dalsze roztokowanie rzek. Ziarna rumowiska (około 1 cm) są zbudowane z piaskowców karpackich, a drobniejsze żwiry – z piaskowców i kwarcu (RADECKI-PAWLIK 2011).

Analizowane bystrze o zwiększonej szorstkości znajduje się w miejscowości Rabka-Zaryte (gmina Rabka-Zdrój, powiat nowotarski, województwo małopolskie), na rzece Rابية w 24+790 km (rys. 2). Głównym elementem budowli jest betonowa płyta spadowa o długości 16,5 m, szerokości  $B = 22$  m, spadzie wody 1,5 m i nachyleniu  $1:n = 1:11$ . Dodatkowo w płycie zagnieżdżone są naturalne szykany w postaci kamieni łamanych, ułożonych najczęściej dłuższym bokiem wzdłuż lub w poprzek koryta (nie na sztorc), co sprawia, że wartość wysokości szorstkości jest mniejsza niż na innych, klasycznych budowlach tego typu. Analizowana budowla charakteryzuje się brakiem niecki wypadowej, przez co w korycie rzeki poniżej obiektu występuje erozja denną. Ponadto, w wyniku przejścia kilku fal wezbraniowych, na stanowisku dolnym doszło także do erozji bocznej. Spowodowało to częściowe zniszczenie gabionów siatkowo-kamienianych, które umacniały brzeg koryta, na skutek ich podmycia i wymycia. Z kolei na stanowisku górnym koryto rzeczne jest proste, a stabilizacja brzegów jest wykonana w formie naturalnych elementów (m.in. faszyny).

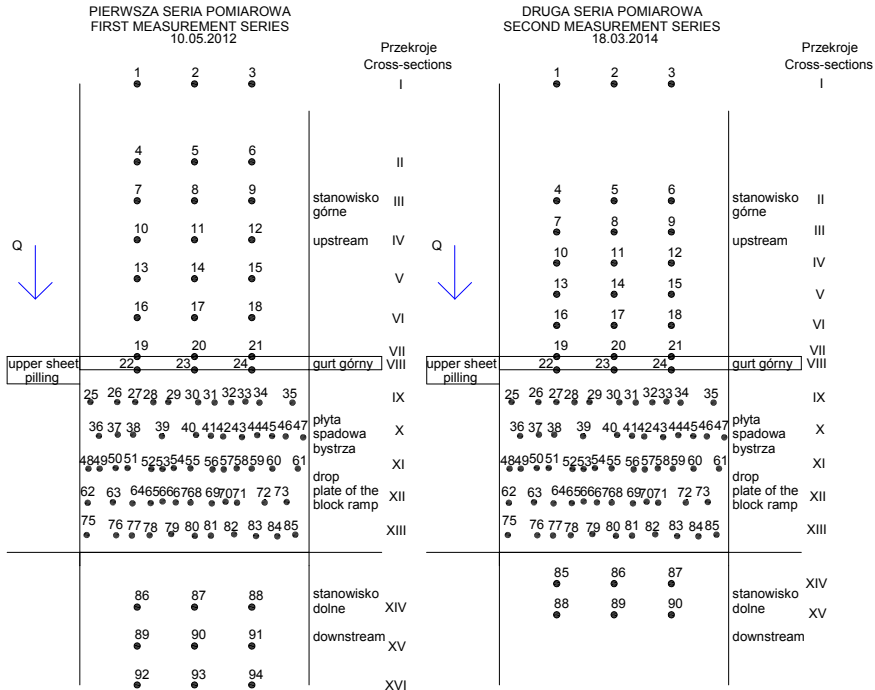


Rys. 2. Bystrze o zwiększonej szorstkości na rzece Rابية (fot. K. Plesiński)

Fig. 2. Block ramp on the Rába River (photo by K. Plesiński)

## Material i metody

Badania terenowe prowadzono w dwóch terminach: 10 maja 2012 roku (pierwsza seria) wykonano pomiary w 16 przekrojach poprzecznych, a 18 marca 2014 roku (druga seria) – w 15 przekrojach. Rysunek 3 przedstawia schemat rozmieszczenia przekrojów pomiarowych.



Rys. 3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na bystrzu oraz w jego rejonie  
Fig. 3. Arrangement of the measurement points on the block ramp and upstream/downstream of it

Przekroje IX, X, XI, XII, XIII przebiegały przez bystrze, natomiast pozostałe charakteryzują obszar oddziaływania: powyżej (I-VIII) oraz poniżej (XIV-XVI) budowli. W każdym z przekrojów wykonywano trzy pomiary: w osi koryta oraz w odległości jednej czwartej od skarp brzegów z każdej strony. Dodatkowo w przekrojach poprzecznych znajdujących się na płycie spadowej budowli zagęszczone punkty pomiarowe, tak aby uzyskać najbardziejnijszy obraz warunków przepływu.

W ramach prac terenowych dokonano pomiarów prędkości za pomocą młynka hydrometrycznego firmy OTT Nautilus 2000. Urządzenie daje możliwość pomiaru prędkości wody zakresie od 0,001 do 10 m s<sup>-1</sup>. Zmierzone rozkład prędkości chwilowych i średnich w pionach tachymetrycznych oraz napętnienie. Z wykonanych pomiarów wykreślono tachoidy prędkości w układzie półlogarytmicznym dla poszczególnych punktów pomiarowych. Na podstawie rozkładów prędkości chwilowej wyznaczono prędkość dynamiczną ( $V_*$ ) (GORDON i IN. 2007):

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

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).

Dzięki obliczeniu wartości prędkości dynamicznej wyznaczono naprężenia styczne według wzoru:

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

gdzie:

$\rho$  – ciężar objętościowy ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  
 $V_*$  – prędkość dynamiczna ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Określono także liczbę Froude'a (Fr) przy prędkości średniej i dynamicznej:

$$\text{Fr} = \frac{v_{\text{sr}}}{\sqrt{gh}}$$

gdzie:

$v_{\text{sr}}$  – prędkość średnia ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,  
 $h$  – napelnienie w korycie (m).

Wyznaczono liczbę Reynoldsa (Re) przy prędkości średniej i liczbę Reynoldsa ziarnową, wykorzystując współczynnik szorstkości:

$$\text{Re} = (v_{\text{sr}} \cdot h) / \nu$$

$$\text{Re}_{\text{zd}} = (v_{\text{sr}} \cdot d_{\text{zm}}) / \nu$$

$$\text{Re}_{\text{ks}} = (v_{\text{sr}} \cdot k_{\text{is}}) / \nu$$

gdzie:

$d_m$  – średnica miarodajna (m),  
 $k_s$  – współczynnik szorstkości,  $k_s = 0,015 \text{ m}$  dla betonu i kamienia łamanego (HYDRAULISCHE... 1991),  
 $\nu$  – kinematyczny współczynnik lepkości.

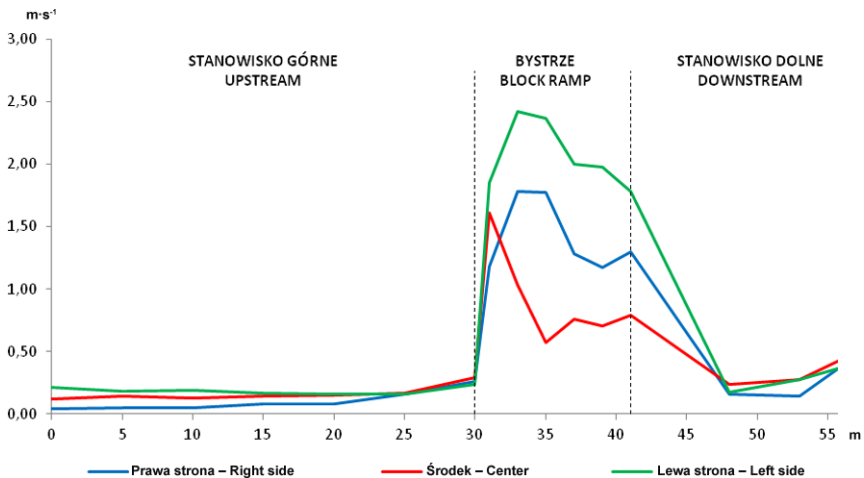
## Wyniki i dyskusja

Obserwacje terenowe pozwoliły na określenie parametrów hydraulicznych w korycie rzeki Raby w rejonie oddziaływania bystrza o zwiększonej szorstkości oraz na samej płycie spadowej tej budowli. W czasie wykonywania pomiarów w dniu 10 maja 2012 roku przepływ  $Q = 0,55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a 23 czerwca 2012 roku był większy:  $Q = 1,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Podstawowym parametrem hydrodynamicznym mówiącym o warunkach panujących w korycie rzeki jest prędkość średnia. Jej znajomość jest niezbędna do uzyskania danych dotyczących pozostałych parametrów przepływu. Wartość jej zależy przede wszystkim od spadku zwierciadła wody, napelnienia w korycie, oporów ruchu, kształtu

i wymiaru przekroju poprzecznego, kształtu koryta w planie, ruchu rumowiska rzeczne-go, zjawisk lodowych, roślinności i zarastania koryta, budowli wodnych oraz lokalnych przeszkód (OZGA-ZIELIŃSKA 1997).

W trakcie pierwszej serii pomiarowej (rys. 4) na stanowisku górnym prędkość wody płynącej prawą stroną koryta osiągnęła wartość  $V$  z zakresu  $0,04-0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (przekroje I-VI). Następnie zauważono niewielki wzrost wartości na początku gurtu górnego bystrza ( $V = 0,26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Od tego miejsca zaobserwowano znaczny wzrost wartości prędkości średniej, gdyż w odległości 1 m (odcinek 30-31 m) występuje wzrost prędkości z  $V = 0,26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $V = 1,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . W dalszej odległości, w środkowej części płyty spadowej, nadal prędkość przepływu wzrasta, osiągając wartości z zakresu  $1,77-1,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , co jest wielkością maksymalną (przekroje IX-X). Następnie prędkość wody spada, osiągając na wylocie płyty spadowej wartość  $V = 1,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (w przekroju XIII). Na stanowisku dolnym prędkość wody znacznie się zmniejsza, do wartości w granicach  $0,15-0,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Rys. 4. Prędkość średnia podczas pierwszej serii pomiarowej  
Fig. 4. Average velocity during the first measurement series

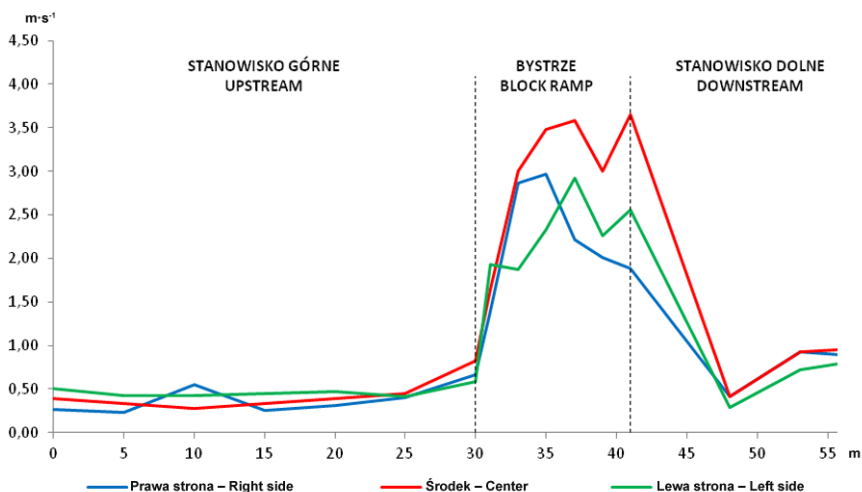
Podobny rozkład przyjmują prędkości w lewej stronie koryta. Na stanowisku górnym mieszczą się one w zakresie  $0,16-0,24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na bystrzu na gurtie górnym występuje gwałtowny wzrost prędkości z  $0,24$  do  $1,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Maksimum wartości prędkości występuje w środkowej części płyty spadowej, wynosząc  $2,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (przekrój IX). W następnym przekroju, X, struga wody nadal płynie z dużą prędkością:  $2,38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . W dalszych miejscach płyty spadowej prędkości się zmniejszają, osiągając na jej końcu wartość  $1,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na stanowisku dolnym występuje tendencja spadkowa, a wartości prędkości w tej części koryta mieszczą się w zakresie  $0,18-0,44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Dla profilu środkowego w korycie powyżej budowli wartości prędkości są małe: wynoszą  $0,12-0,29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Wartość maksymalną ( $V = 1,61 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) zmierzono na gurtie górnym bystrza (o 2 m wyżej niż w profilach bocznych). Odtąd zauważa się spadek wartości prędkości wody do  $V = 0,57 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  w przekroju X (środek płyty). W dolnej

części płyty następuje wyrównanie prędkości, a jej wartości mieszczą się w zakresie  $0,70\text{--}0,79\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na stanowisku dolnym prędkość płynącej wody wynosi  $0,24\text{--}0,55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Analizując poszczególne profile pomiarowe, można zauważyć, że rozkłady prędkości średniej są do siebie podobne. W każdym profilu najmniejsze wartości występują na stanowisku górnym. Z kolei na płycie spadowej woda płynie z największą prędkością. Jej maksimum występuje w przekrojach IX-X (środek płyty) dla profili bocznych, a tylko dla profilu środkowego – w przekroju VIII (gurt górny). W dolnej części płyty spadowej oraz na jej końcu, we wszystkich profilach, prędkości przepływu wody zmniejszają się. Na stanowisku dolnym, po wypłynięciu wody z budowli, prędkość nadal się zmniejsza.

W trakcie pomiarów, które odbyły się 18 marca 2014 roku (druga seria), wartość przepływu była większa niż podczas wcześniejszych obserwacji terenowych (rys. 5). W tym dniu przepływ  $Q$  wyniósł  $1,35\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Jego znacznie większa wartość spowodowała także wzrost prędkości przepływającej wody. Na stanowisku górnym rozkład prędkości przepływu dla lewego i środkowego koryta był niemal identyczny. W przekrojach I-V wartości opisywanego parametru mieściły się w granicach  $0,41\text{--}0,59\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  z lewej strony oraz  $0,23\text{--}0,66\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  w środku koryta. Również w środkowym profilu pomiarowym prędkość była zbliżona do wartości zaobserwowanych w częściach bocznych koryta i wynosiła  $0,28\text{--}0,83\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Rys. 5. Prędkość średnia podczas drugiej serii pomiarowej  
Fig. 5. Average velocity during the second measurement series

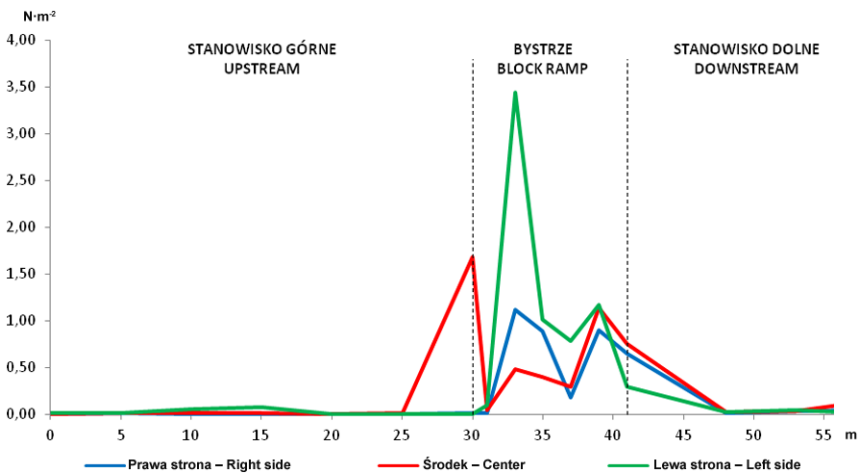
Na płycie spadowej budowli, w profilach bocznych, wartości prędkości są ze sobą porównywalne: dla lewej strony koryta  $V$  wynosi  $1,87\text{--}2,92\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a dla prawej  $1,39\text{--}2,97\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Mniejsze wartości uzyskano przede wszystkim w miejscach zlokalizowanych za kamiennymi szykanami, gdzie struga wody, odbijając się od kamienia, spowalniała. Największą prędkość obserwowano przed szykanami i w miejscach, gdzie przepływ

strugi wody nie był zaburzany żadnymi elementami. W centralnej części płyty spadowej prędkość przepływającej wody była nieznacznie większa i mieściła się w zakresie  $1,64\text{--}3,65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Większe wartości prędkości w tym miejscu były spowodowane koncentracją strugi przepływającej w centralnym miejscu płyty spadowej.

Na stanowisku dolnym w profilu lewym obserwuje się spadek prędkości do wartości  $0,29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a następnie w niżej położonym przekroju wzrost do  $0,72\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Podobnie sytuacja przedstawia się w profilu środkowym i prawym. Tam wartości prędkości przepływającej wody także maleją do  $0,41\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  w środku i  $0,42\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  z prawej strony, a potem wzrastają do  $0,93\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Kolejnym opisywanym parametrem jest naprężenie styczne, które definiuje się jako siłę składową działającą na dno w kierunku linii spadku, wzdłuż której płynie struga wody odmierzona od jednostki powierzchni dna (RADECKI-PAWLIK 2011).

Po lewej stronie (rys. 6) na całym górnym stanowisku zauważono bardzo małe wartości naprężeń stycznych:  $\tau < 0,08\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Dopiero w 33. metrze koryta badawczego (przekrój IX – górna część płyty spadowej budowli) naprężenie wzrasta do wartości maksymalnej  $\tau = 3,44\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ , co było wartością największą w całym badanym odcinku koryta. Następnie  $\tau$  stopniowo maleje do wartości  $0,78\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Zauważalny jest kolejny wzrost – do wartości  $\tau = 1,17\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$  – w 39. metrze profilu badawczego (przekrój XII – dolna część płyty). W korycie rzeki poniżej bystrza wartości naprężeń stycznych maleją do  $0,01\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ .



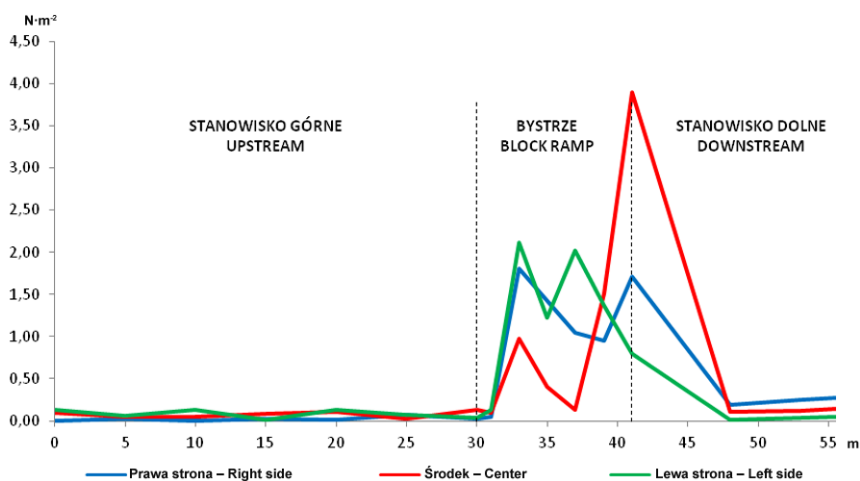
Rys. 6. Naprężenia styczne podczas pierwszej serii pomiarowej  
Fig. 6. Shear stresses during the first measurement series

Dla prawej strony koryta uzyskano stałą wartość naprężeń stycznych do przekroju VIII:  $0,01\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Z kolei w 33. metrze profilu badawczego występuje wzrost naprężeń do wartości  $\tau = 1,11\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Podobnie jak dla lewej strony koryta wartości te maleją i ponownie wzrastają w 39. metrze profilu (tu do wartości  $\tau = 0,90\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Również na stanowisku dolnym wartości naprężeń stycznych są porównywalne z lewą stroną koryta:  $\tau < 0,05\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ .



W środkowej części badanego odcinka przebieg rozkładu naprężeń stycznych ma nieco inny charakter niż w bocznych częściach. Obserwuje się wzrost wartości z  $\tau = 0,00 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$  do  $\tau = 1,68 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$  już w przekroju VII (gurt górny), czyli o 4 m wcześniej niż w prawej i lewej stronie koryta. W środkowej części płyty spadowej wartości mieszczą się w zakresie  $0,04\text{-}0,40 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Kolejny wzrost obserwuje się w przekroju XII (dół płyty spadowej), gdzie naprężenia wynoszą  $1,14 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Dla przekroju XVI wartość naprężeń wynosi  $0,01 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ .

W czasie drugiej serii pomiarowej (18 marca 2014 r.) (rys. 7), w związku z obecnością przepływu większego ( $1,35 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) niż w pierwszej serii (10 maja 2012 r.), zaobserwowano tylko nieznacznie większe wartości naprężeń stycznych.



Rys. 7. Naprężenia styczne podczas drugiej serii pomiarowej  
Fig. 7. Shear stresses during the second measurement series

Prawa strona koryta przy znacznie większym przepływie odznacza się nieznacznie mniejszymi wartościami naprężeń stycznych w stosunku do środka koryta oraz jego lewej strony. Wartości tego parametru na górnym stanowisku mieszczą się w zakresie  $0,01\text{-}0,13 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Bezpośrednio przed bystrzem wartości nadal pozostawały w granicach  $0,02\text{-}0,08 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Na gurcie górnym budowli wartości naprężenia stycznego były nieznacznie większe i zawierały się w przedziale  $0,08\text{-}0,14 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Na bystrzu o zwiększonej szorstkości można zaobserwować wysoką amplitudę sił działających na dno. Na płycie spadowej wartości naprężenia mieściły się w zakresie  $0,13\text{-}3,89 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Zaobserwowano wartości bardzo duże, przekraczające  $5,00 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$  (lokalnie wartość naprężenia dochodziła nawet do  $42,11 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Tak duże wartości naprężenia stycznego mogą powodować rozkruszanie kamiennych szykan i ich obtaczanie. W środkowej części płyty spadowej, pomimo większych wartości prędkości przepływającej wody, wartości naprężeń były mniejsze niż w bocznych częściach budowli, wynosząc  $0,13\text{-}1,51 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Dopiero na końcu płyty spadowej, w miejscu wylotu strugi wody z płyty spadowej do koryta rzeczno, wartość naprężeń w profilu środko-

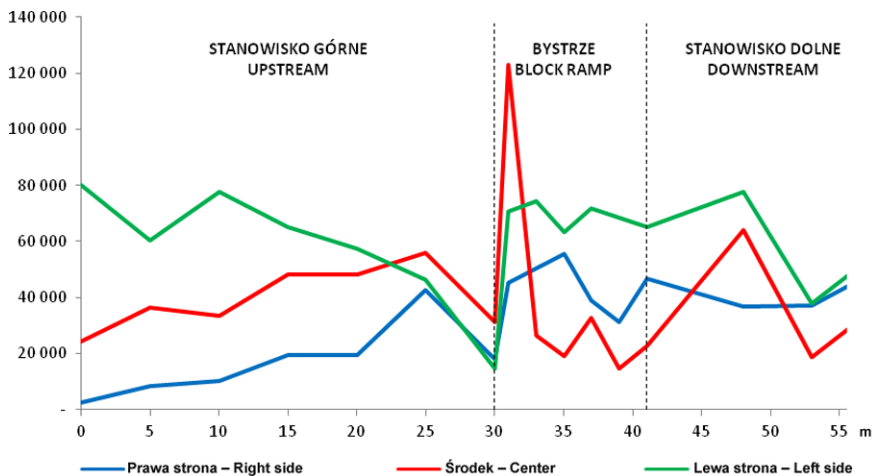
wym wzrosła do  $3,89 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . Z lewej i prawej strony budowli wartości naprężeń są porównywalne: wynosiły odpowiednio  $0,80\text{-}2,12 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$  i  $0,96\text{-}1,81 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Wartości naprężenia stycznego na stanowisku dolnym również były bardzo małe. Największe zaobserwowano w prawym profilu pomiarowym, gdzie wynosiły  $0,192\text{-}0,30 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ . W środkowym profilu było to  $0,11\text{-}0,16 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ , a najmniejsze wystąpiły w lewej części koryta:  $0,01\text{-}0,06 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Kolejnym analizowanym parametrem była liczba Reynoldsa, która klasyfikuje charakter przepływu w rzece na dwa rodzaje: laminarny i turbulentny. W trakcie występowania w rzece warunków burzliwych w strudze tworzą się wiry, a cząsteczki wody przesuwały się w różnych kierunkach oraz z różną prędkością na całej głębokości. Z kolei w warunkach przepływu laminarnego struga wody płynie na całej głębokości z podobną prędkością, a ponadto nie tworzą się żadne zawirowania. W warunkach terenowych bardzo rzadko można zaobserwować warunki laminarne ( $Re < 500$ ), przeważnie występuje ruch turbulentny ( $Re > 2000$ ), chociaż warunki przejściowe także nie należą do rzadkości ( $500 < Re < 2000$ ) (RADECKI-PAWLIK 2011).

Inną klasyfikacją, także związaną z liczbą Reynoldsa, jest jej odniesienie do szorstkości dna rzecznoego lub podłoża, po którym przemieszcza się struga wody. W takiej sytuacji ziarnowa liczba Reynoldsa informuje nas o przepływie hydraulicznie gładkim ( $Re_{ks,d} < 5$ ), kiedy to szorstkość podłoża nie ma wpływu na wartości prędkości. Z kolei wartość  $Re_{ks,d} > 70$  świadczy o przepływie hydraulicznie szorstkim, a szorstkość podłoża oddziałuje na prędkość przepływu (RADECKI-PAWLIK 2011).

Prawa strona koryta przy niewielkim przepływie ( $Q = 0,55 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) charakteryzuje się mniejszymi wartościami liczby Reynoldsa niż lewa strona oraz środkowa część koryta (rys. 8). Wartości tego parametru w przekroju I są bardzo małe:  $Re = 2446$ . Następnie, z biegiem strumienia wody, liczby Reynoldsa rosną, osiągając wartość 42 542 (przekrój VI), co było największą wartością zaobserwowaną na stanowisku górnym. W kolejnym przekroju, VII (zlokalizowanym na początku gurtu górnego), wartość



Rys. 8. Wartości liczby Reynoldsa podczas pierwszej serii pomiarowej  
Fig. 8. Values of Reynold's number during the first measurement series

opisywanego parametru lokalnie maleje do 17 888. Z lewej strony płyty spadowej bystrza o zwiększonej szorstkości wartości liczby Reynoldsa mieściły się w zakresie 45 103 – 55 404 w środkowej jej części oraz 31 419 – 46 708 w jej dolnym obszarze. Na stanowisku dolnym wartości analizowanego parametru wyniosły 36 694 – 50 454, były więc zbliżone do wartości uzyskanych na płycie spadowej bystrza. Potwierdza to obserwacje pozostałych parametrów świadczących o wypływie strugi wody z budowli ze znaczną prędkością, co prowadzi do wzrostu turbulencji i tworzenia się odsokołu hydraulicznego poniżej obiektu.

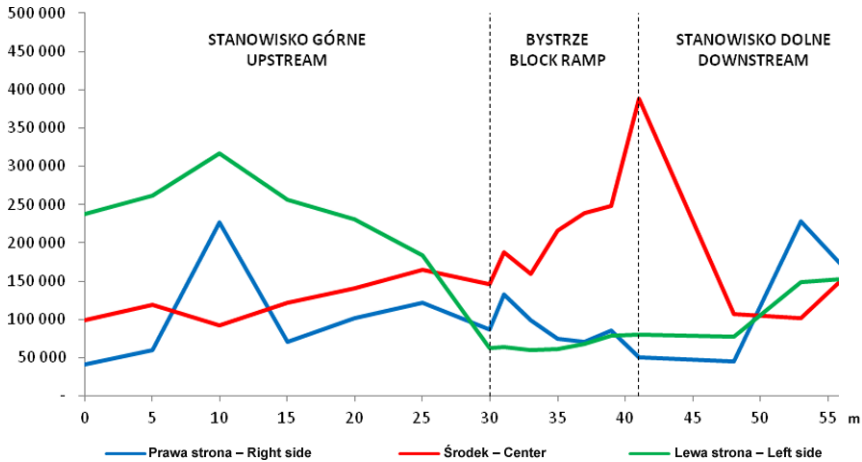
Z lewej strony koryta, na stanowisku górnym, wartości liczby Reynoldsa spadały w miarę przepływu wody od 80 269 (przekrój I) do 14 677 (przekrój VI), zbliżając się tym samym do wartości uzyskanej z prawej strony koryta ( $Re = 17\,888$ ). Na płycie spadowej budowli obserwuje się wzrost wartości analizowanego parametru, który mieścił się w zakresie 63 359 – 74 401. Podobne wartości uzyskano na stanowisku dolnym, gdzie wyniosły one 37 703 – 77 562.

W środkowej części koryta rozkład wartości liczby Reynoldsa jest zbliżony do rozkładu uzyskanego z prawej strony koryta powyżej budowli, z tym że są to wartości średnio o 25 000 większe (24 355 – 48 161). Tylko w przekroju V różnica pomiędzy wartościami w obu profilach pomiarowych zmalała, wynosząc 13 339 ( $Re = 55\,882$ ). Na początku gurtu górnego także obserwujemy lokalny spadek wartości liczby Reynoldsa, gdzie  $Re = 31\,144$ . W kolejnym przekroju, VIII, usytuowanym pod koniec gurtu, wartości liczby Reynoldsa zwiększyły się aż do 123 079. Może to świadczyć o bardzo dużej turbulencji w tym miejscu, czego przyczyną było wybicie się płynącej strugi na wystającej ponad dno rzeczne ścianie szczelnej. Na płycie spadowej wartości opisywanego parametru są dużo mniejsze i wynoszą 14 544 – 32 668. Na stanowisku dolnym, w przekroju XIV, obserwuje się lokalny wzrost wartości liczby Reynoldsa do 64 215. W przekrojach zlokalizowanych na końcu odcinka badawczego parametr ten mieści się w zakresie 18 851 – 37 841.

Analizując wartości ziarnowej liczby Reynoldsa, możemy stwierdzić, że ruch hydraulicznie przejściowy pomiędzy warunkami gładkimi a szorstkimi wystąpił tylko w bocznych częściach gurtu górnego i mieścił się w zakresie 26-44 (punkty 19, 21 i 22). W pozostałych miejscach, zarówno budowli, jak i koryta rzecznoego w rejonie obiektu, dno było hydraulicznie szorstkie ( $Re_{k_s} > 70$ ,  $Re_d > 70$ ).

W trakcie drugiej serii pomiarowej wartości liczby Reynoldsa na stanowisku górnym były bardzo zróżnicowane (rys. 9) i zawierały się w zakresie 41 281 – 316 795. Największe wartości występowały z lewej strony koryta, gdzie wyniosły 183 243 – 316 795 (przekroje I-VI). W środku koryta wartości liczby Reynoldsa wzrastały w przekrojach I-VI: od  $Re = 98\,387$  do  $Re = 165\,125$ , a w przekroju VII liczba Reynoldsa zmalała do 145 937. Podobna sytuacja miała miejsce w prawym profilu pomiarowym, gdzie wartości w przekrojach I-VI także wzrastały: od 41 281 do 122 315. Tylko w przekroju III z prawej strony koryta zaobserwowano nagle lokalny wzrost wartości liczby Reynoldsa do 227 047. Na całym odcinku badawczym usytuowanym powyżej bystrza o zwiększonej szorstkości występują warunki turbulენტne.

Na płycie spadowej bystrza o zwiększonej szorstkości warunki również były turbulენტne. Amplituda zmienności liczby Reynoldsa była podobna jak na górnym stanowisku i wynosiła 51 056 – 388 770. Najmniej zróżnicowane wartości analizowanego parametru zauważono z lewej strony budowli, gdzie wyniosły one 60 304 – 79 603 (amplituda



Rys. 9. Wartości liczby Reynolda podczas drugiej serii pomiarowej  
 Fig. 9. Values of Reynold's number during the second measurement series

wyniosła 19 299). Większą amplitudę (80 993) uzyskano z prawej strony budowli, gdzie wartości liczby Reynolda mieściły się w zakresie 51 056 – 132 049. Największe wartości liczby Reynolda zaobserwowano na środku płyty spadowej, w jej dolnej części, gdzie mieściły się one w zakresie 145 937 – 388 770.

Na stanowisku dolnym wartości liczby Reynolda były porównywalne. Nieznacznie większe wartości zaobserwowano z prawej strony koryta, gdzie wyniosły one 44 951 – 227 506. W środkowym i lewym profilu pomiarowym zawierały się one w przedziale 77 593 – 185 383.

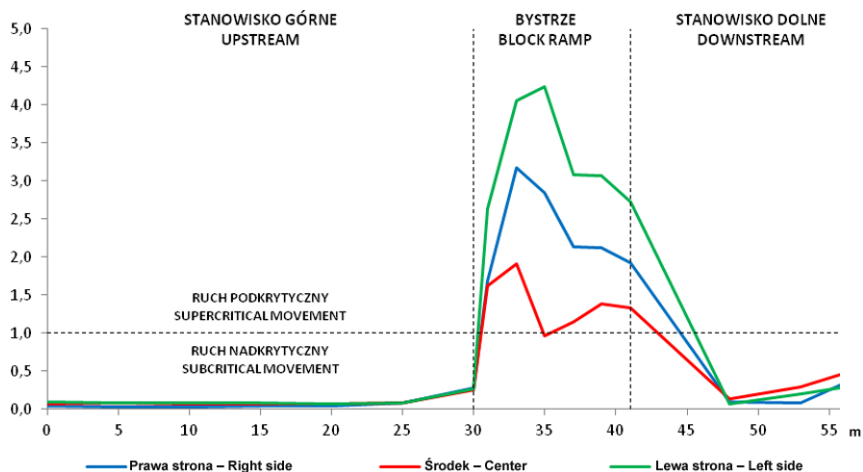
Warunki hydraulicznie przejściowe pomiędzy warunkami szorstkimi a gładkimi stwierdzono na całym gurcie górnym, gdzie wartości ziarnowej liczby Reynolda mieściły się w zakresie 14-95.

Przejście pomiędzy ruchem nadkrytycznym  $Fr < 1$  a podkrytycznym  $Fr > 1$  jest określane przez liczbę Froude'a. Za jej pomocą możemy rozróżnić rodzaj przepływu; w przypadku napotkania przez płynącą strugę cieczy przeszkody lub nierówności dna następuje deformacja swobodnej powierzchni zwierciadła wody. Warunek ciągłości strugi zostaje wtedy zachowany wskutek wplycenia głębokości i przyspieszenia przepływu (ruch podkrytyczny, rwący) lub poprzez zwiększenie głębokości i spowolnienie płynącej strugi (ruch nadkrytyczny, spokojny) (RADECKI-PAWLIK 2011).

W trakcie pomiarów pierwszej serii (rys. 10) zarówno na stanowisku górnym, jak i dolnym uzyskano wartości  $Fr < 1$ , co świadczy o ruchu nadkrytycznym. W korycie powyżej bystrza wartości liczby Froude'a mieszczą się w zakresie 0,03-0,09, a poniżej obiektu – w zakresie 0,08-0,59.

Na bystrzu o zwiększonej szorstkości tylko w przekroju VII, znajdującym się na gurcie górnym, występuje ruch podkrytyczny płynącej wody. Wartości liczby Froude'a w tym miejscu mieściły się w zakresie 0,25-0,28. Na płycie spadowej budowli w przeważającej większości punktów obserwuje się ruch podkrytyczny ( $Fr > 1$ ). Tylko w 11 punktach pomiarowych spośród wszystkich 64 pionów znajdujących się na płycie zaob-

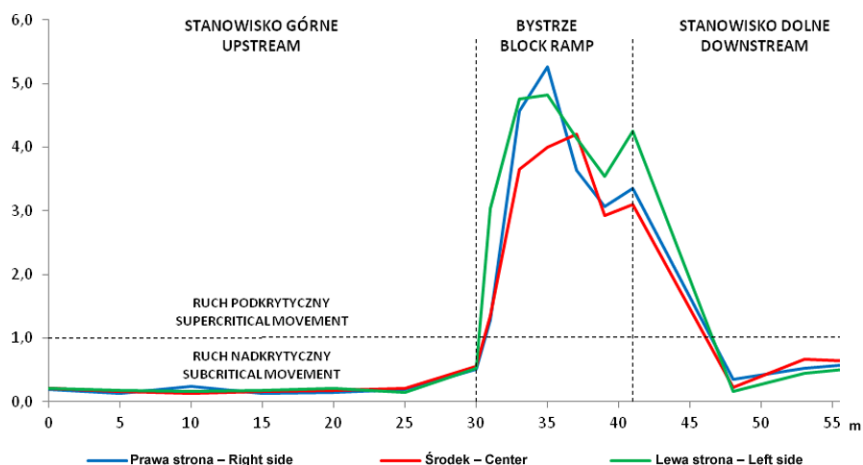
Plesiński K., Jadach A., Laszek W., Radecki-Pawlik A., 2014. Zmiany warunków hydrodynamicznych w rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Rabe w Karpatach. Nauka Przyr. Technol. 8, 4, #57.



Rys. 10. Wartości liczby Froude'a podczas pierwszej serii pomiarowej  
Fig. 10. Values of Froude's number during the first measurement series

serwowano ruch nadkrytyczny ( $Fr < 1$ ). Były to miejsca znajdujące się w prawej i środkowej części obiektu (tylko 1 punkt był usytuowany po lewej stronie płyty) oraz w cieniu kamiennych szykan. Największe wartości  $Fr$  wystąpiły z lewej strony obiektu: 5,17, 5,33 i 5,37 odpowiednio w punktach 47, 59 i 46.

W trakcie drugiej serii pomiarowej (rys. 11) w korycie rzeki poza budowlą uzyskano wartości liczby Froude'a bardzo podobne jak w trakcie serii pierwszej. Na górnym stanowisku wartości tego parametru mieściły się w zakresie 0,13-0,24. Występowały więc warunki nadkrytyczne.



Rys. 11. Wartości liczby Froude'a podczas drugiej serii pomiarowej  
Fig. 11. Values of Froude's number during the second measurement series

Na płycie spadowej bystrza uzyskano przepływ podkrytyczny. Wartości liczby Froude'a we wszystkich profilach pomiarowych mieściły się w zakresie 1,28-5,26 (lokalnie dochodząc nawet do wartości 9,58). Były to wartości nieznacznie większe od wyników uzyskanych w trakcie pierwszej serii pomiarowej (0,97-4,24). Tylko na gurcie górnym wartości są dużo mniejsze: zawierają się w przedziale 0,51-0,55.

Poniżej budowli zaobserwowano przepływ nadkrytyczny we wszystkich punktach pomiarowych (Fr od 0,16 do 0,66).

## Wnioski

1. W rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości występują zróżnicowane warunki hydrodynamiczne, co sprzyja tworzeniu się różnorodnych siedlisk dla organizmów wodnych. Występują strefy o bardzo silnym i burzliwym przepływie, szczególnie na płycie spadowej bystrza oraz wzdłuż nurtu głównego rzeki, można także zaobserwować strefy o spokojnej toni wodnej i słabej turbulencji, występujące w bocznych częściach koryta i budowli, za kamiennymi szykanami znajdującymi się na płycie spadowej oraz w bocznych kotłach eworsyjnych utworzonych na stanowisku dolnym. Dla wszelkiego rodzaju organizmów wodnych tak zróżnicowane warunki przepływu powodują zwiększenie ich populacji i różnorodności gatunkowej poprzez wybór najodpowiedniejszego dla siebie rodzaju siedliska.

2. Przy przepływie  $Q = 0,55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} < SSQ = 1,30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (pierwsza seria pomiarowa) największe wartości wszystkich analizowanych parametrów zmierzono na płycie spadowej bystrza. Na stanowisku dolnym i górnym wartości są ze sobą porównywalne, a także dużo mniejsze niż na samej budowli. Podobna sytuacja wystąpiła przy przepływie średnim  $Q = 1,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \approx SSQ = 1,30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (druga seria), gdzie największe wartości parametrów hydrodynamicznych również są obserwowane na płycie spadowej bystrza. Świadczy to o bardzo dobrym rozpraszaniu energii kinetycznej wody przepływającej na płycie spadowej bystrza oraz o znacznej redukcji większości parametrów hydrodynamicznych.

3. Struga wody napotykająca na swej drodze poprzecznie usytuowaną w korycie rzeczonym budowlę hydrotechniczną, której elementy nawet nieznacznie wystają ponad dno rzeczne, zostaje o nią rozbita na mniejsze strużki wody. Następuje wtedy skierowanie ich na wszystkie strony, co zwiększa składowe pionowe i poprzeczne przepływy kosztem składowej podłużnej. Przy przepływach wezbraniowych taka sytuacja może powodować powiększanie się erozji dennej, a tym samym podmywanie obiektu od strony wody górnej. Sytuację taką zaobserwowano podczas pierwszej serii pomiarowej w środkowym profilu pomiarowym, kiedy to struga wody była rozbijana o górną ściankę szczylną bystrza, powodując większą turbulencję w strefie przydennej koryta.

4. Nurt główny rzeki przepływał środkiem badanego bystrza. Jest to zjawisko pozytywne, gdyż polepsza stabilność brzegów poprzez odsunięcie od nich szybko płynącego i wartkiego strumienia cieczy. W ten sposób oddala się niebezpieczeństwo ich podmycia. Zjawisko koncentracji nurtu głównego na bystrzu o zwiększonej szorstkości często występuje w budowlach z krzywoliniową koroną przelewu oraz na płycie spadowej z jej centralnym obniżeniem. Takich rozwiązań konstrukcyjnych nie wykonano na analizowanym bystrzu, gdzie przelew i płyta spadowa mają charakter prostoliniowy, bez dodatkowych obniżzeń, jednakże zjawisko koncentracji przepływu na płycie spadowej zostało zaobserwowane także na tym obiekcie.

5. Na stanowisku dolnym w bocznych częściach utworzone są wyboje o głębokości  $h = 1,60$  m. Świadczyć to może o znacznych prędkościach przepływu wody mających miejsce podczas przejścia fali wezbraniowej.

## Literatura

- ABDEL SATTAR A.M., RADECKI-PAWLIK A., ŚLIZOWSKI R., 2013. Using genetic programming to predict scour downstream rapid hydraulic structures from experimental results. W: IWLHS 2013: Proceedings of the International Workshop on Hydraulic Design of Low-Head Structures. Red. D.B. Bung. Bundesanstalt für Wasserbau, Aachen: 179-189.
- DYREKTYWA 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej. 2000. Off. J. 327, 22.12.2000: 1-73.
- GORDON N.D., MCMAHON T.A., FINLAYSON B.L., GIPPEL C.J., NATHAN R.J., 2007. Stream hydrology. An introduction for ecologists. Wiley, London.
- HYDRAULISCHE Berechnung von Fließgewässern. 1991. DVWK-Merkblatt 220. DWA, Bonn.
- KONDRACKI J., 2000. Geografia regionalna Polski. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- OERTEL M., 2013. In-situ measurements on cross-bar block ramps. W: IWLHS 2013: Proceedings of the International Workshop on Hydraulic Design of Low-Head Structures. Red. D.B. Bung. Bundesanstalt für Wasserbau, Aachen: 111-119.
- OZGA-ZIELIŃSKA M., 1997. Hydrologia stosowana. PWN, Warszawa.
- PAGLIARA S., PALERMO M., 2013. Scour at foundations of rock made low-head structures. W: IWLHS 2013: Proceedings of the International Workshop on Hydraulic Design of Low-Head Structures. Red. D.B. Bung. Bundesanstalt für Wasserbau, Aachen: 169-177.
- PLESIŃSKI K., JANAS M., RADECKI-PAWLIK A., 2013. Analiza parametrów hydraulicznych w rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Porębianie w Górcach. *Acta Sci. Pol. Form. Circum.* 12, 1: 101-114.
- RADECKI-PAWLIK A., 2010. O niektórych bliskich naturze rozwiązaniach utrzymania koryt rzek i potoków górskich. *Gosp. Wod.* 2: 78-85.
- RADECKI-PAWLIK A., 2011. Hydromorfologia rzek i potoków górskich. Działy wybrane. Wyd. UR w Krakowie, Kraków.
- RADECKI-PAWLIK A., PLESIŃSKI K., WYŻGA B., 2013. Analysis of chosen hydraulic parameters of a rapid hydraulic structure (RHS) in Porębianka Stream, Polish Carpathians. W: IWLHS 2013: Proceedings of the International Workshop on Hydraulic Design of Low-Head Structures. Red. D.B. Bung. Bundesanstalt für Wasserbau, Aachen: 121-128.
- STUPNICKA E., 1997. Geologia regionalna Polski. Wyd. UW, Warszawa.
- ŚLIZOWSKI R., 1993. Bystrza o zwiększonej szorstkości jako element zabudowy potoków górskich. *Zesz. Nauk. AR Krak. Rozpr. Hab.* 181.
- ŚLIZOWSKI R., 1995. Ekologiczne formy regulacji potoków górskich. *Zesz. Nauk. AR Krak.* 298, Inż. Środ. 45: 225-233.
- ŚLIZOWSKI R., 2002. Wpływ bystrzy o zwiększonej szorstkości na migrację ryb w potokach górskich. *Zesz. Nauk. AR Krak.* 393, Inż. Środ. 23: 331-336.
- ŚLIZOWSKI R., RADECKI-PAWLIK A., HUTA K., 2008. Analiza wybranych parametrów hydrodynamicznych na bystrzu o zwiększonej szorstkości na potoku Sanoczek. *Infrastrukt. Ekol. Ter. Wiej.* 2: 47-58.
- ZASĘPA P., KLONOWSKA-OLEJNIK M., RADECKI-PAWLIK A., 2006. Wpływ wybranych zmian abiotycznych w rejonie łachy zwirowej potoku górskiego na mikrosiedliska makrobezkręgowców dennych. *Infrastrukt. Ekol. Ter. Wiej.* 4, 2: 221-232.

## HYDRODYNAMIC CONDITIONS DISTRIBUTION IN THE AREA OF INCREASED ROUGHNESS BLOCK RAMP SITUATED ON THE RABA RIVER – POLISH CARPATHIANS

**Summary.** The paper presents the velocity distribution of water on and along the block ramp on the Raba River. In order to determine water velocity changes, measurements of water velocities were performed along the drop plate and in the zone of the interaction of rapids (upstream and downstream of it) on the Raba River in Rabka-Zaryte. Based on the measured values different hydrodynamic parameters were calculated, such as shear velocity, average velocity, dynamic Reynold's number and Froude's number. It could be determined whether the block ramp reduces the energy of the flowing water.

**Key words:** block ramp, hydraulics parameters, water velocity, mountain stream

*Adres do korespondencji – Corresponding address:*

*Karol Plesiński, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, Poland, e-mail: k.plesinski@ur.krakow.pl*

*Zaakceptowano do opublikowania – Accepted for publication:*

*26.08.2014*

*Do cytowania – For citation:*

*Plesiński K., Jadach A., Laszek W., Radecki-Pawlik A., 2014. Zmiany warunków hydrodynamicznych w rejonie bystrza o zwiększonej szorstkości na rzece Rابية w Karpatach. *Nauka Przyr. Technol.* 8, 4, #57.*