

WYBRANE PROBLEMY EKSPLOATACYJNE BYSTRZY O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI (STOPNI-RAMP) W ASPEKCIE ICH PROJEKTOWANIA I FUNKCJONALNOŚCI BIOLOGICZNEJ

Bartosz Radecki-Pawlik

Politechnika Krakowska

Artur Radecki-Pawlik

Politechnika Krakowska, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Karol Plesiński

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Krzysztof Kukuła, Aneta Bylak

Uniwersytet Rzeszowski

Streszczenie. W pracy przedstawiono wybrane problemy budowy i eksploatacji bystrzy o zwiększonej szorstkości zwanych inaczej stopniami-rampami, skupiając się głównie na trzech obszarach tematycznych: stanowisku górnym bystrza, stanowisku dolnym bystrza, płycie spadowej z głazami oraz gurtach obiektu. Podano wnioski co do prawidłowego projektowania bystrzy, jak i przykłady z praktyki inżyniersko-wykonawczej oraz badań. Zwrócono uwagę na możliwości zasiedlenia bystrza przez bezkręgowce wodne, a także na konieczność zapewnienia w projekcie ciągłości ekologicznej w niskich stanach wody.

Słowa kluczowe: bystrze o zwiększonej szorstkości, eksploatacja budowli wodnej, erozja, potok górski

Adres do korespondencji – Corresponding authors: mgr inż. Bartosz Radecki-Pawlik, Katedra Statyki i Dynamiki, Politechnika Krakowska ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; prof. dr hab. inż. Artur Radecki-Pawlik, Katedra Statyki i Dynamiki, Politechnika Krakowska ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków; dr inż. Karol Plesiński, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków; prof. dr hab. Krzysztof Kukuła, dr Aneta Bylak Katedra Ekologii i Biologii Środowiska, Uniwersytet Rzeszowski, ul. Zelwerowicza 4, 35-601 Rzeszów; e-mail: k.plesinski@ur.krakow.pl, abylak@ur.edu.pl

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2017

WPROWADZENIE

W ostatnim czasie prace inżynierskie podejmowane na ciekach zwykło nazywać się pracami utrzymaniowymi rzek. Szczególnie wrażliwe na tego typu prace są potoki górskie. Sprzeczności pomiędzy warunkami przepływu panującymi w potokach utrzymywanych w zgodzie z zasadami technicznymi a wymogami środowiska naturalnego stały się przyczyną poszukiwania nowych rozwiązań w dziedzinie regulacji potoków górskich. Zastosowanie zabudowy techniczno-biologicznej potoków zmniejszyło ingerencję w środowisko człowieka, lecz nie spełniło oczekiwań ekologów wód czy geomorfologów fluwialnych. Rozwiązania techniczne odpowiadające postulatowi ekologicznemu w regulacji naturalnej potoków powinny respektować następujące ogólne zasady [Kajak 1992, Ratomski 2013]:

- bieg potoku należy prowadzić tak, aby jak najmniej różnił się od biegu naturalnego,
- nie należy likwidować istniejących nieregularności, gdyż stanowią one ważny element dla życia biologicznego; należy pozostawić kamienie, nawisy brzegowe, korzenie stanowiące schronienie dla ryb i innych żywych organizmów,
- celowe jest wbudowanie w uregulowane koryto dużych głazów, które zmniejszając prędkość przepływu przeciwdziałają erozji i powodują zróżnicowanie głębokości, mogące stanowić schronienie dla żywych organizmów,
- skarpy cieków należy umacniać materiałami naturalnymi, takimi jak kamień i świeża faszyzna zdolna do porostu,
- dopuszcza się usunięcie istniejących drzew i krzewów jedynie w tych miejscach, gdzie jest to konieczne.

Rozwiązaniem kompromisowym uwzględniającym wymagania fauny wodnej mogą być metody stabilizacji potoków poprzez wykorzystanie naturalnych elementów zwiększających szorstkość koryta.

Jedną z takich metod jest stosowanie bystrzy z kamienia naturalnego o zwiększonej szorstkości [Radecki-Pawlik 2013, Radecki-Pawlik i in. 2013, Plesiński i in. 2015], będącą efektem poszukiwań budowli spełniających wymogi zarówno techniczne, jak i przyrodnicze (ryc. 1).

Bystrza o zwiększonej szorstkości, zwane także stopniami-rampami, stosuje się do stabilizacji mniejszych cieków – szczególnie górskich i podgórskich [Radecki-Pawlik 2014]. Budowle te to krótkie odcinki koryta o dużym spadku wynoszącym od 1:6 do 1:15 ułożone z bloków kamiennych o wielkości rzędu 1 m w taki sposób, by były one stabilne i maksymalnie zwiększały szorstkość koryta cieków [Zastera 1984, Ślizowski i in. 2008, Oertel i Schlenkhoff 2012, Pagliara i Palermo 2012, 2013, Oertel 2013, Radecki-Pawlik 2013, Radecki-Pawlik i in. 2013]. Szorstka powierzchnia bystrza powoduje rozproszenie energii płynącej wody, dodatkowo ją napowietrzając. Wybudowanie bystrza o zwiększonej szorstkości wydaje się być zabiegiem nieskomplikowanym, polegającym głównie na ułożeniu wielkogabarytowych głazów na dnie potoku z zachowaniem stosownego spadku. Tymczasem jest to wyrafinowane przedsięwzięcie, wymagające skupienia już w fazie projektowania, a także subtelności i dokładnego wykonawstwa, jako że źle wykonane bystrze nie spełnia wymogów ekologicznych, jak również wymogów inżynierskich pod względem rozproszenia energii płynącej wody i ubezpieczenia dna cieków.



Ryc. 1. Bystrze o zwiększonej szorstkości na potoku Porębianka w Gorcach (fot. K. Plesiński)

Fig. 1. Interlocked carpet block ramp: Porębianka stream, Gorce mountains (photo K. Plesiński)

Jednym z ważniejszych elementów przy projektowaniu tego typu rozwiązań powinno być również zachowanie drożności potoku i ciągłości ekologicznej. Taki obiekt nie powinien być barierą dla przemieszczających się ryb również w okresach niskiego stanu wody. Stąd konieczność takiego ukształtowania bystrza, by nawet w okresie niżówek tworzyła się wyraźna struga wody. W potokach górskich i podgórskich, które zachowały swój naturalny charakter, ichtiofaunę reprezentuje kilka gatunków, m.in. głowacz przegopletwy *Cottus poecilopus*, pstrąg potokowy *Salmo trutta* m. *fario*, strzebla potokowa *Phoxinus phoxinus* oraz śliz *Barbatula barbatula*. To, z wyjątkiem pstrąga, ryby niewielkich rozmiarów, dla których przemieszczania się wystarczają niewielkie strugi wody. Dlatego jeżeli zostanie zapewniona możliwość migracji przez bystrze dla pstrąga potokowego, wymagania migracyjne pozostałych gatunków górskich również będą zachowane. Natomiast faunę bezkręgową zamieszkującą dno cieków (makrozoobentos) stanowią przede wszystkim: jętki z rodziny *Heptageniidae* i *Baetidae*, widelnice z rodziny *Perlidae*, *Nemouridae* i *Leuctridae* oraz chruściki z rodziny *Hydropsychidae*, *Limnephilidae*, *Sericostomatidae*. Chrzęszcze w takich ciekach są reprezentowane głównie przez rodzinę *Elmidae*, natomiast skorupiaki przez kielże *Gammarus* [Tachet i in. 2002]. Dla tych bezkręgowców drożność nie jest aż tak ważna jak dla ryb, a dobrze skonstruowane bystrze może stać się dla nich siedliskiem. Najistotniejszymi czynnikami środowiskowymi umożliwiającymi bytowanie fauny bezkręgowej potoku górskiego jest kamieniste lub kamienisto-żwirowe dno, dobrze

natleniona, zimna woda i wartki jej prąd. Jeżeli te warunki zostaną choć częściowo zapewnione na odcinku zajmowanym przez bystrze, zespół bezkręgowców powinien być zbliżony składem do zespołu naturalnego.

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane problemy budowy i eksploatacji bystrzy o zwiększonej szorstkości, skupiając się głównie na czterech obszarach tematycznych: stanowisku górnym bystrza, stanowisku dolnym bystrza, płycie spadowej z głazami oraz gurtach obiektu. Istotną częścią naszego opracowania jest również analiza funkcjonalności biologicznej takiego obiektu, ze szczególnym uwzględnieniem makrofauny bezkręgowej i ryb.

EKSPLLOATACJA BYSTRZY O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI – SZCZEGÓŁY TECHNICZNE

Jak wspomniano we wstępie, najwłaściwszym rozwiązaniem przy ochronie dna koryt rzecznych przed skutkami gwałtownych spływów wód w razie konieczności redukcji spadku podłużnego cieką wydaje się być stosowanie bystrzy o zwiększonej szorstkości. Budowle te umożliwiają migrację ryb i makrobezkręgowców dennych, sprzyjają lepszemu natlenieniu wody oraz dobrze harmonizują się z krajobrazem. Na odcinkach pomiędzy bystrzami zaleca się zachować przegłębienia, których obecność jest uzasadniona hydrodynamiką przepływu (układ szypot-płoso). W dnie należy rozmieścić kamienie o różnej wielkości, tworząc schronienia dla ryb i innych organizmów żywych [Skalski i in. 2012]. Schronienia takie powinny znajdować się także wzdłuż brzegów rzeki. Proponowane rozwiązania zapewniają spełnienie wymogów związanych zarówno ze stabilizacją koryta potoku, jak i z ekologią, pozostając w zgodzie z architekturą krajobrazu naturalnego.

Poniżej przedstawiono przykładowe gatunki ryb (ryc. 2) oraz organizmów bentosowych (ryc. 3) żyjących w polskich potokach karpackich, dla których bystrza o zwiększonej szorstkości stanowią rozwiązanie akceptowalne przez nie do egzystencji oraz wzdłuż których mogą te zwierzęta migrować. Niektóre z makrobezkręgowców również mogą migrować pod bystrzami, w warstwie żwiru [Gibbins 2016].

Mówiąc o bystrzu o zwiększonej szorstkości oraz jego rejonie można wyznaczyć następujące strefy oraz części: górna część bystrza od strony górnej wody, płyta spadowa z kamieniem łamanym, dolna część bystrza z niecką lub bez niecki wypadowej, od strony dolnej wody (ryc. 4).



a



b



c



d

Ryc. 2. Typowe ryby żyjące w potokach karpackich: a – *Cottus poecilopus* (głowacz pręgopłetwy), b – *Phoxinus phoxinus* (strzebla potokowa), c – *Salmo trutta m. fario* (pstrąg potokowy), d – *Barbatula barbatula* (śliz) (fot. K. Kukula)

Fig. 2. Typical kind of fish one could meet in Polish Carpathian streams: a – *Cottus poecilopus* (Siberian sculpin), b – *Phoxinus phoxinus* (common minnow), c – *Salmo trutta m. fario* (brown trout), d – *Barbatula barbatula* (stone loach) (photo K. Kukula)



a



b



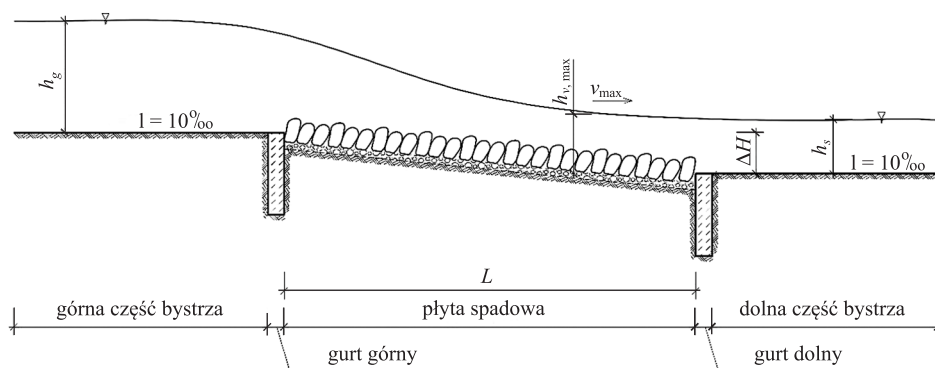
c



d

Ryc. 3. Przedstawiciele makrozoobentosu żyjącego w potokach karpackich, w różnych stadiach życiowych: a – dorosła jętka, b – dorosła widelnica, c – larwa widelnicy, d – larwa jętki (fot. K. Kukula)

Fig. 3. Invertebrates example living in Polish Carpathian streams: a – adult stonefly, b – adult mayfly, c – stonefly nymph, d – mayfly nymph (photo K. Kukula)



Ryc. 4. Główne elementy bystrza o zwiększonej szorstkości: L – długość płyty spadowej z kamieniem łamanym, h_g – głębokość wody na stanowisku górnym, h_s – głębokość wody na stanowisku dolnym, $h_{s,max}$ – maksymalna głębokość poniżej bystrza, v_{max} – prędkość maksymalna wody poniżej bystrza, ΔH – wysokość bystrza

Fig. 4. Elements of interlocked-carpet block ramp (BR): L – length of the sloping apron with stones along it, h_g – water depth upstream of the BR, h_s – water depth downstream of the BR, $h_{s,max}$ – water depth over a downstream sill of the BR, v_{max} – water velocity over a downstream sill of the BR, ΔH – BR height

STANOWISKO GÓRNE BYSTRZA O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI

Należy zwrócić uwagę, że bystrze oddziałuje na stanowisko górne (ryc. 5) poprzez między innymi zmiany prędkości powyżej gurtu górnego. W pracy Radeckiego-Pawlika i in. [2016] przeanalizowano zmiany wartości naprężeń stycznych na dno potoku Brennica od strony górnej wody stopnia w km 7 + 964 w normalnych warunkach eksploatacyjnych (Q bliskie SRQ) na podstawie pomierzonych rozkładów prędkości (ryc. 6) i stwierdzono, że w odległości 50 m (bezwymiarowo: $L/W = 50/20 = 2,5$ gdzie: L – długość kanału doprowadzającego, W – szerokość kanału doprowadzającego) od progu obiektu, oddziaływanie bystrza stopniowo zanika, a naprężenia styczne na dno cieku wynoszą od $\tau = 0,68 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ do $1,17 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. W miarę zbliżania się do progu górnego bystrza następuje stopniowy wzrost naprężeń stycznych działających na dno cieku. Pierwszy wyraźny wzrost naprężeń obserwuje się w odległości około 40 m ($L/W = 2$) od progu bystrza. Wartość naprężeń stycznych wynosi tu średnio $\tau = 6,0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Kolejna wyżka naprężeń stycznych występuje przy $L/W = 1$ (około 20 m od progu) gdzie wynoszą one $= 14,0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Od tego punktu wartości naprężeń stycznych zaczynają gwałtownie wzrastać, aż do maksimum równego $\tau = 29,0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, przy lewej stronie progu bystrza (L/W bliskie 0). Analizując zmiany naprężeń stycznych (ryc. 6), nie można nie zauważyć pól warstw w środkowej partii koryta o wyraźnym spadku wartości. Dla $L/W = 1,5$ oraz $L/W = 0,75$ zaobserwowano wklęsłe leje warstw naprężeń o wartościach zmniejszających się do $\tau = 1,0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$.

Zmiany wartości naprężeń w środkowej części koryta tłumaczy się zmianami pulsacyjnymi prędkości wody, które, po przekroczeniu wartości naprężeń krytycznych powodują ruch rumowiska dennego. Zmiany pulsacyjne lokalnych prędkości wody



Ryc. 5. Widok na górne stanowisko bystrza o zwiększonej szorstkości – potok Porębianka (fot. A. Radecki-Pawlik)

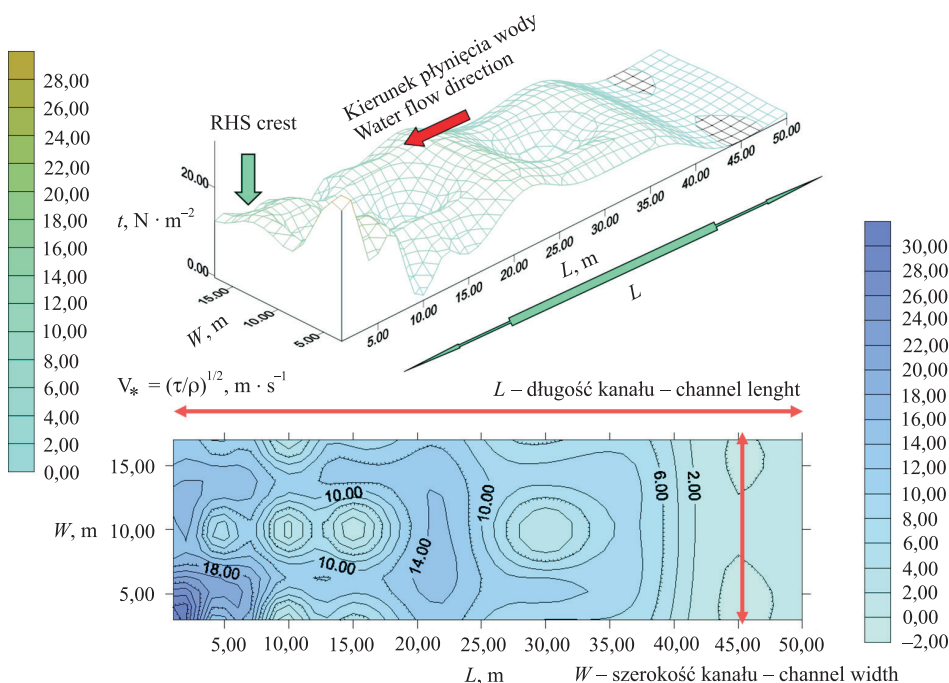
Fig. 5. Interlocked carpet block ramp upstream part: Porębianka stream, Gorce mountains (photo A. Radecki-Pawlik)

przedstawiono na ryc. 6. Także w tym miejscu, poza korytem od strony górnej proggu bystrza ($L = 30\text{--}80\text{ m}$), przedstawione są zmiany lokalnych prędkości wody na płycie spadowej bystrza ($L = 20\text{--}30\text{ m}$). Zmiany prędkości w korycie doprowadzającym wodę na bystrze rozpoczynają się w odległości $L/W = 1,5$, gdzie od tego miejsca przybierają postaci pulsacyjne. Nasuwa się przypuszczenie, że w odległości $L/W = 1,5$ rozpoczyna się oddziaływanie bystrza na koryto wody górnej. Maksymalna prędkość lokalna zaobserwowana na płycie spadowej bystrza wynosi $V = 2,6\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Zauważono również, że największe wartości prędkości odnotowuje się w części środkowej płyty spadowej bystrza oraz przy jej brzegach. Pola prędkości układają się niejako symetrycznie względem osi podłużnej płyty. Z przeprowadzonej tu dyskusji wyciągnąć należy następujące wnioski:

- Oddziaływanie bystrza na dno ciekę powyżej bystrza ustaje dla wartości stosunku długości ciekę do szerokości $L/W = 2,5$. Może mieć to znaczenie praktyczne przy projektowaniu ubezpieczenia dna od strony górnej bystrza celem zapobieżenia erozji.
- Gwałtowne zmiany naprężeń stycznych na dno ciekę powyżej bystrza następują przy stosunku $L/W = 1,75$. Powyżej tej wartości bystrze oddziałuje na poszur w sposób intensywny.
- Początek największych wahań pulsacyjnych prędkości następuje w ciekę powyżej bystrza dla $L/W = 1,5$.

- Największe wartości prędkości wody na płycie bystrza zaobserwowano w jej części środkowej oraz po obu brzegach. Może mieć to znaczenie praktyczne przy projektowaniu kierownic bystrza oraz różnicowaniu wielkości kamieni rozpraszających energię wody, wbudowanych w bystrze.
- W części środkowej cieku powyżej bystrza ($L/W < 1,75$) obserwuje się gwałtowne obniżenie wartości naprężeń stycznych przy panującym w cieku przepływie Q bliskim SRQ . Ta część koryta cieku, w której występują znaczne pulsacje prędkości, wydaje się być szczególnie narażona na erozję denną.

Po pewnym czasie funkcjonowania bystrza daje się zauważyć, że po wezbraniach odkładają się w ich rejonie łachy korytowe (jeżeli istnieje dostawa materiału korytowego w korycie żwirowym z górnej partii zlewni lub z brzegów cieku – ryc. 7). Od czasu odłożenia się łach można uznać, że stanowisko górne nie ulega erozji.



Ryc. 6. Rozkład prędkości na dnie koryta od strony górnej progu stopnia-bystrza

Fig. 6. Water velocities for the river bed upstream of the upstream curtain wall of the block ramp hydraulic structure



Ryc. 7. Widok na górne (i dolne) stanowisko bystrza o zwiększonej szorstkości pokryte żwirem poprzez wytworzenie lach korytowych zaraz po przejściu wezbrania – potok Porębianka (fot. A. Radecki-Pawlik)

Fig. 7. Interlocked carpet block ramp upstream and downstream parts, covered with gravel bars after flooding: Porębianka stream, Gorce mountains (photo A. Radecki-Pawlik)

PLYTA SPADOWA Z KAMIENIEM ŁAMANYM BYSTRZA O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI

Istotny wpływ na skuteczność działania bystrza oraz jego współpracę ze środowiskiem przyrodniczym ma właściwe dobranie wielkości kamieni i sposób ich rozmieszczenia (ryc. 8). Poniżej zaprezentowano wybrane metody obliczania wielkości kamienia na bystrzu.

Wielkość kamieni na płycie bystrza można wyliczyć za pomocą wzorów Niela [1960] i Knaussa [1980] oraz korzystając z wytycznych Knaussa [1980].

Wzór Niela ma postać:

$$D = h \cdot I \quad (1)$$

gdzie:

- D – wielkość kamieni na płycie bystrza, m,
- h – napętnienie przy przepływie miarodajnym, m,
- I – spadek płyty bystrza, ‰.

Zależność Niela [1960] może być stosowana przy przepływach jednostkowych poniżej $9 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, dla współczynnika wydatku przelewu $\mu = 0,560$, co odpowiada głębokości 2,7 m na koronie bystrza. Szerokość bystrza zgodnie z postulatami Niela powinna wynosić od 12 do 15 (h) głębokości wody na bystrzu.



Ryc. 8. Widok na płytę spadową bystrza o zwiększonej szorstkości z kamieniem łamanym – potok Porębianka (fot. A. Radecki-Pawlik)

Fig. 8. Interlocked carpet block ramp sloping apron part with huge boulders: Porębianka stream, Gorce mountains (photo A. Radecki-Pawlik)

Knauss [1980], opierając się na doświadczeniach Hartunga i Scheurleina (1970), opracował podstawowe zasady projektowania bystrzy: optymalny spadek bystrza przyjmuje jako równy 1 : 8, 1 : 10 i 1 : 15, a wielkość kamieni ustala z zależności:

$$D = h_s \cdot 10 \cdot \tan(\varphi) \quad (2)$$

gdzie:

h_s – średnia głębokość wody na bystrzu, m,

φ – kąt nachylenia bystrza.

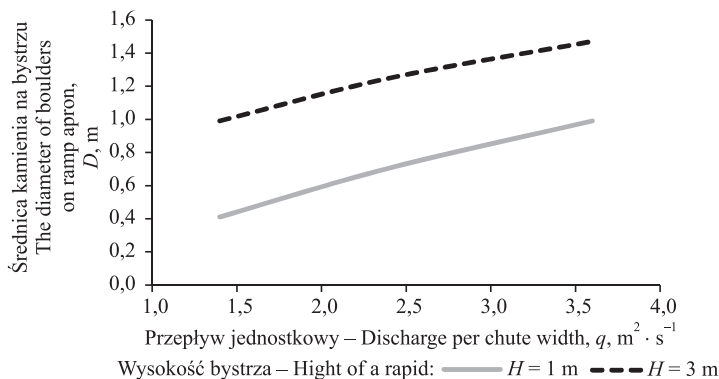
W tabeli 1 przedstawiono wielkości kamienia na płycie spadowej bystrza w zależności od prędkości obliczeniowej oraz spadku bystrza [Knauss 1980].

Tabela 1. Maksymalne prędkości na dolnym progu gurtu bystrza

Table 1. Maximum water velocities for the downstream curtain wall of a ramp structure

Średnica kamienia Stone diameter m	Prędkość wody dla nachylenia bystrza 1 : 8 v for a slope of the ICBR apron 1 : 8 $m \cdot s^{-1}$	Prędkość wody dla nachylenia bystrza 1 : 10 v for a slope of the ICBR apron 1 : 0 $m \cdot s^{-1}$	Prędkość wody dla nachylenia bystrza 1 : 15 v for a slope of the ICBR apron 1 : 15 $m \cdot s^{-1}$
0,6	2,50	2,70	3,70
0,8	4,60	4,90	5,80
1,2	7,00	7,60	8,90

Doboru kamieni na płycie bystrza można również dokonać, stosując wykres zaproponowany przez Ślizowskiego, Radeckiego-Pawlika i in. [2016] (ryc. 9). W tym przypadku wielkość kamieni ustalana jest w zależności od przepływu jednostkowego na bystrzu q oraz wysokości bystrza H .



Ryc. 9. Wykres pozwalający na wybór średnicy kamienia na bystrzu w zależności od przepływu jednostkowego

Fig. 9. A diagram for choosing the dimension of boulder to install it on block ramp

STANOWISKO DOLNE BYSTRZA O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI

Proces powstawania rozmyć miejscowych będący wynikiem działania ruchu wody i rumowiska jest jednym z najmniej rozeznaczonych zagadnień w hydraulice. Dotychczas brakuje dostatecznie dokładnego matematycznego opisu procesu lokalnej erozji powstającej poniżej budowli, co też uzasadnia prowadzenie licznych badań eksperymentalnych. Przede wszystkim są to badania laboratoryjne [Pagliara i in. 2017], rzadziej analizy teoretyczne, a sporadycznie badania terenowe. Wyniki obliczeń parametrów rozmycia miejscowego poniżej budowli, którą w tym przypadku stanowi bystrze o zwiększonej szorstkości, dają na ogół tylko pewną orientację o rozmiarach erozji, której należy się spodziewać. Obliczenia te służyć mogą także do porównania różnych rozwiązań konstrukcyjnych bystrzy mających na celu ograniczenie erozji.

Wzory empiryczne służące do określenia wielkości erozji na dolnym stanowisku budowli stosowane są w wąskim zakresie oszacowując na ogół wielkość wymycia odgórnie. Wykorzystuje się je w celach porównawczych oraz w celu skorelowania głębokości rozmycia ze spadem, jednostkowym natężeniem przepływu, głębokością wody dolnej oraz przy decyzji doboru ubezpieczenia stanowiska dolnego poniżej bystrza.

W celu obliczenia wielkości rozmycia dna poniżej bystrza można wykorzystać następujące formuły: Eggenbergera, Yaegera, Lacey, Mavisa i Lausheya, van der Meulera i Vinje oraz Yanga.

Eggenberger [Vincent 1968] głębokość rozmycia $h_{\max}$ oblicza z zależności:

$$h_{\max} = w \frac{h^{0.5} \cdot q^{0.6}}{d_{90}^{0.4}} h_d$$

gdzie:

$h_{\max}$ – maksymalna głębokość rozmycia, m,
 w – współczynnik liczony ze wzoru:

$$w = \frac{(h'_{\max} + h_d) d_{90}^{0,4}}{h^{0,5} q^{0,6}}$$

gdzie:

$h'_{\max} = 1,65 h_{\max}$,
 h – różnica poziomów zwierciadła wody górnej i dolnej, $h_g - h_d$,
 q – przepływ jednostkowy, $m^{-2} \cdot s$,
 h_d – głębokość wody dolnej, m,
 d_{90} – średnica charakterystyczna rumowiska, m.

Yaeger [Yang 1996] zaproponował do obliczenia głębokości rozmycia następującą formułę:

$$h_{\max} = 0,55 \left[6 \cdot h^{0,25} \cdot q^{0,25} \cdot \left(\frac{h_d}{d_{90}} \right)^{1/3} - h_d \right]$$

Oznaczenia jak wyżej.

Do obliczenia rozmycia poniżej budowli można zastosować równanie reżimu Lacey'a [Novak 1955, Singh 1983, Novak i in. 1997] w postaci:

$$h_{\max} = 0,475 \left(\frac{Q}{f} \right)^{1/3}$$

gdzie:

$f = 1,75 d_{90}^{0,5}$,
 Q – przepływ obliczeniowy, $m^3 \cdot s^{-1}$.

Kolejne dwa wzory służące do obliczenia rozmycia bazują, na teorii rozmycia kanałów naturalnych. Za pomocą wzorów Yanga i Mavisa/Lausheya [Yang 1996] można obliczyć tzw. średnicę tworzącą obrukowanie dna $-d_{ob}$. Według Yanga [Yang 1996] średnicę tę można wyznaczyć z następującego układu równań:

$$\omega = k \cdot d_{ob}^{0,5}$$

$$V/\omega = 2,05$$

gdzie:

V – prędkość wody dla przepływu obliczeniowego, $m \cdot s^{-1}$,
 ω – prędkość opadania ziarna, $m \cdot s^{-1}$,
 d_{ob} – średnica obrukowania, mm,
 k – przelicznik jednostek (tu: $k = 6,01$).

Z kolei Mavis i Laushey [Yang 1996] podają następującą zależność pozwalającą wyliczyć średnicę obrukowania:

$$d_{ob} = (k \cdot V)^2$$

gdzie:

V – prędkość wody, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 k – przelicznik jednostek (tu: $k = 6,43$).

Aby obliczyć głębokość rozmycia Y_d wzorami Mavisa/Lausheya i Yanga należy skorzystać w obu powyższych przypadkach z zależności:

$$Y_d = Y_a \left(\frac{1}{\Delta_p} - 1 \right)$$

gdzie:

$Y_d = h_{\max}$ – głębokość rozmycia, m,
 Y_a – głębokość opancerzenia, m,
 Δ_p – procent materiału frakcji większej niż ten, tworzący opancerzenie.

Kolejny wzór, którym można obliczać rozmycie występujące poniżej budowli hydrotechnicznej, to formuła van der Meulera i Vinje [Przedwojski i in. 1995]. Formuła ta ma postać:

$$z = \frac{(U_m - U)^{1,634} \cdot h^{0,24} \cdot t^{0,38}}{8,15 \cdot \Delta^{0,646}}$$

gdzie:

$z = h_{\max}$ – głębokość rozmycia, m,
 $U_m = U + 3\delta_u$,
 U – średnia prędkość zmierzona bezpośrednio przed rozmyciem poniżej bystrza, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
 δ_u – odchylenie standartowe wielkości prędkości bezpośrednio przed rozmyciem,
 h – głębokość tuż przed rozmyciem, m,
 t – czas, godz.,

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$$

gdzie:

ρ_s – gęstość materiału dennego, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
 ρ – gęstość wody, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Stosując powyżej przedstawione formuły, oblicza się wielkość rozmycia dna poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości (ryc. 10). Należy dodać, że w literaturze znaleźć można więcej wzorów specjalistycznych, przykładowo za pomocą których można okre-

ścić wymycie poniżej budowli wodnych znajdujących się na zakręcie rzeki, jak u Pagliary i in. 2016, lecz w tym miejscu czytelnik musi zostać odesłany do takowej literatury, gdy zetknie się ze specyficznym wąskim problemem obliczeniowym.



Ryc. 10. Widok na rozmycie poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości – potok Porębianka (fot. A. Radecki-Pawlik)

Fig. 10. Interlocked carpet block ramp and scouring in the downstream part of it: Porębianka stream, Gorce mountains (photo A. Radecki-Pawlik)

GURTY BYSTRZY O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI

W budowlach typu bystrzy o zwiększonej szorstkości stosujemy różnego rodzaju gurdy (ścianki szczelne) zarówno betonowe, jak i stalowe (typu Larsena) celem ustabilizowania budowli w profilu podłużnym (ryc. 6 oraz 11–14). Niestety gurdy te nie zezwalają na migracje zwierząt wzdłuż budowli pod jej korpusem ani w jej części, jako że ciągłość trasy jest przerywana monolitycznymi ścianami gurtów. Jest to niewątpliwa wada tych budowli. Z drugiej strony, z punktu widzenia konstrukcyjnego oraz stateczności budowli, pozostawienie bystrzy o zwiększonej szorstkości bez gurtów prowadzi do szybkiego ich rozmycia podczas wezbrania, rozrzucając kamień łamany z bystrzy wzdłuż koryta potoku.



Ryc. 11. Widok na bystrze o zwiększonej szorstkości z gurtem betonowym – potok Jachówka-Bienkówka (fot. A. Radecki-Pawlik)

Fig. 11. Interlocked carpet block ramp on Jachówka-Bienkówka stream with upper curtain walls (photo A. Radecki-Pawlik)



Ryc. 12. Widok na bystrze o zwiększonej szorstkości z gurtem ze ścianki stalowej Larsena – potok Poniczanka (fot. K. Plesiński)

Fig. 12. Interlocked carpet block ramp on Poniczanka stream with steel Larsen kind curtain walls (photo K. Plesiński)



Ryc. 13. Widok na bystrze o zwiększonej szorstkości ze stalowym gurtem z oczepem betonowym – potok Porębianka (fot. A. Radecki-Pawlik)

Fig. 13. Interlocked carpet block ramp on Porębianka stream with steel curtain wall with concrete cap (photo A. Radecki-Pawlik)



Ryc. 14. Widok na gurt stalowy z oczepem betonowym – potok Porębianka (fot. W. Wielgus, RZGW)

Fig. 14. Steel curtain wall with concrete cap (photo W. Wielgus, RZGW)

EKOLOGICZNE WALORY BYSTRZY O ZWIĘKSZONEJ SZORSTKOŚCI

Obecność progów, przepustów czy brodów w korycie ma skutki przyrodnicze, m.in. w związku z ograniczeniem możliwości przemieszczania się w górę potoku ryb i bezkręgowców wodnych. Takie konstrukcje są przede wszystkim przeszkodą w przemieszczaniu się ryb, ze względu na powstające poniżej progi erozyjne, zwiększoną prędkość przepływu i/lub niewielką głębokość wody na gładkiej powierzchni przepustu czy brodu. Poza istotnym wpływem na drożność całego potoku, na krótszych odcinkach obiekty infrastruktury technicznej przyczyniają się do zmiany charakteru podłoża. Powyżej prąd wody ulega spowolnieniu i deponowane są osady drobnoziarniste [Kukula 2006, Bylak i Kukula 2017].

Osady mineralne, pokrywając dno, zmieniają charakter dna potoku górskiego. Zamiast mozaiki siedlisk tworzą się odcinki z homogennym dnem pokrytym przez osady, a fauna bezkręgowca staje się mniej urozmaicona [Bylak i Wójcik 2016]. Poniżej wyżej wymienionych przeszkód prąd wody jest przyspieszony, co skutkuje erozją wgłębną, a następnie obniżeniem dna potoku. Takie warunki są niekorzystne dla zasiedlających potok organizmów [Bylak i in. 2009].

Ten wielokierunkowy, niekorzystny wpływ zabudowy hydrotechnicznej rzek składania do wprowadzania rozwiązań uwzględniających potrzeby organizmów wodnych. Odtworzenie całkowicie naturalnych układów w środowisku rzeczonym jest w wielu przypadkach niewykonalne, ale nowoczesne rozwiązania umożliwiają przynajmniej zachowanie dobrego stanu ekologicznego potoków. Jednym z nich są bystrza o zwiększonej szorstkości. Konstruowane w sposób zapewniający przemieszczanie się ryb, nawet przy niskich stanach wody, nie stanowią bariery migracyjnej. Analiza funkcjonalności biologicznej projektu bystrza wskazuje, że przez większą część roku ryby powinny bez problemu pokonywać te, skonstruowane wg współczesnych wytycznych, bystrza. Dodatkowo, warunki siedliskowe dla bezkręgowców wodnych powyżej i poniżej bystrza o zwiększonej szorstkości są bardzo zbliżone do naturalnych.

Możliwości wykorzystania przez bezkręgowce powierzchni samego bystrza, wydają się bardzo duże. Zróżnicowana struktura bystrza, zbliżona do powierzchni dna naturalnego potoku górskiego, oferuje faunie bezkręgowcej różnorodne habitaty. W miejscach, gdzie woda z dużą siłą spływa po głazach i żwirach (gdzie występują również wysokie wartości naprężeń stycznych), odpowiednie siedlisko mogą znaleźć larwy widelnic, jętek płaskich czy chruścików z rodziny *Rhyacophilidae* [Bylak i Kukula 2017]. W spokojniejszych siedliskach potoku, bliżej brzegu często przebywają kielże. Występowaniu tej grupy, podobnie jak chruścików z rodziny *Limnephilidae*, sprzyja obecność opadłych liści i nagromadzona grubocząstkowa materia organiczna stanowiąca ich pokarm [Tachet i in. 2002]. Przestrzenie pomiędzy głazami i kamieniami bystrza o zwiększonej szorstkości, podobnie jak w potoku naturalnym, sprzyjają odkładaniu się materii organicznej i w wielu ciekach stanowiącej podstawę sieci troficznej.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z przedstawionych wyżej problemów eksploatacyjnych stopni bystrzy o zwiększonej szorstkości można wyciągnąć następujące wnioski:

- Bystrze skutecznie redukuje warunki sprzyjające wystąpieniu wyraźnego odskoku hydraulicznego u jego podnóża.
- Bardzo istotne jest stosowanie progu na wlocie bystrza, który zabezpiecza dno powyżej bystrza przed erozją, oraz rozpraszanie energii.
- Kamienie naturalne na bystrzu, oprócz skutecznego rozproszenia energii, mają także znaczenie architektoniczne, wkomponowując budowlę w krajobraz.
- Krótki odcinek dna poniżej oraz powyżej bystrza powinno się dodatkowo ubezpieczyć rzędami kamieni lub narzutem kamiennym, aż do wytworzenia się łańcuchów korytowych w tym rejonie podczas wezbrania.
- Uwzględnienie w projekcie problemu drożności w niskich stanach wody zapewnia ciągłość ekologiczną i możliwość przemieszczania się ryb.
- Znajdujące się na odcinku bystrza mikrosiedliska, wydają się być odpowiednie dla większości występujących w potokach górskich bezkręgowców wodnych.
- Bystrza o zwiększonej szorstkości z całą pewnością mogą stanowić element stabilizacji potoków górskich spełniający wymogi zarówno techniczne, jak i ekologiczne – powinny być one stosowane w regulacji naturalnej potoków.

W wielu miejscach rzek i potoków górskich na pewno nie jest konieczna jakakolwiek ingerencja techniczna. Gdy jednak istnieje taka konieczność, należy rozpatrzyć zastosowanie opisanych w niniejszej pracy bystrzy o zwiększonej szorstkości, traktowanych jako budowle utrzymania koryt cieków, które wymagają zarówno precyzyjnego zaprojektowania, jak i odpowiedniego reżimu wykonania. Takie bystrza są mniej kosztowne w utrzymaniu i trwalsze niż niektóre mniej nowoczesne rozwiązania. Pozwalają one również na zachowanie unikatowych walorów przyrodniczych potoków karpackich.

PODZIĘKOWANIE

Autorzy pracy pragną serdecznie podziękować prof. Chrisowi Gibbinsowi z Uniwersytetu w Aberdeen (obecnie z Uniwersytetu Nottingham – oddział w Malezji) za dyskusje oraz uwagi dotyczące prac nad bystrzami o zwiększonej szorstkości, a także za wyjaśnienia dotyczące sposobu migracji zwierząt. Dziękujemy również panu mgr. inż. Witoldowi Wielgusowi z RZGW Kraków za udostępnienie zdjęcia bystrza na potoku Porębianka, wykonanego podczas budowy tego obiektu oraz za cenną dyskusję merytoryczną. Należy nadmienić, że w obecnym czasie praca hydrotechników, chcących analizować i usprawniać budowle utrzymania rzek i potoków górskich spełniających wymogi ekologiczne, jest właściwie niemożliwa bez współpracy interdyscyplinarnej z hydrobiologami.

PIŚMIENNICTWO

- Bylak, A., Wójcik, M. (2016). Reakcje bezkręgowców bentosowych na akumulację drobnoziarnistego osadu w potoku górskim. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(1), 35–47.
- Bylak, A., Kukuła, K. (2017). Concrete slab ford crossing – an anthropogenic factor modifying aquatic invertebrates communities. *Aquatic Ecosystem Health and Management* (w druku).
- Bylak, A., Kukuła, K., Kukuła, E. (2009). Influence of regulation on ichthyofauna and benthos of the Różanka stream. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 9, 211–223.

- Gibbins, Ch. (2016). Uwaga profesjonalna wygłoszona podczas pobytu studialnego w Polsce nad potokiem Porębianka i rzeką Rabą w kwietniu 2016 do autorów niniejszej pracy.
- Hartung, F., Scheurlein, H. (1970). Design of Overflow Rockfill Dams. Beitrag no. 36 zu Q 36, Talsperrenkongress in Montreal.
- Jarabač, M. (1973). Zkusenosti se zavadenim balvanitych skluzu v Moravskoslezských Beskydech. Sbornik DT-ČSVTS, Ostrava.
- Kajak, Z. (1992) Ekologiczne skutki zabudowy hydrotechnicznej i wykorzystania wód śródlądowych. XII Ogólnopolska Szkoła Hydrauliki, Międzyzdroje, 21–25.09.1992, Materiały Szkoły, 17–36.
- Knauss, J. (1980). Drnseskluzy. Vodni Hospodarstvi, A C 1, Praha.
- Kukula, K. (2006). A low stone weir as a barrier for the fish in a mountain stream. Polish J. Environm. Studies, 15, 132–137.
- Niel, A. (1960). Über die vernichtung kinetischer energie durch niedere gefallsstufen. Öosterreichische Wasserwirtschaft, 4, 5, Wien.
- Novak, P. (1955). Study of silting basins with special regard to their end sills. 6th Congress of the IAHR, Hague, paper C15.
- Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., Narayann, R. (1997). Hydraulics Structures. E. & F. N. Spon, Chapman and Hall, London.
- Oertel, M. (2013). In-Situ Measurements on Cross-Bar Block Ramps. [W:] D.B. Bung, S. Pagliara (red.). International Workshop on Hydraulic Design of Low-Head Structures, IWLHS. Bundesanstalt für Wasserbau, Aachen, 111–119.
- Oertel, M., Schlenkhoff, A. (2012). Crossbar Block Ramps: Flow Regimes, Energy Dissipation, Friction Factors, and Drag Forces. J. Hydraulic Engin., 138(5), 440–448.
- Pagliara, S., Bung, D. (2013) Design of Low-Head Structures. International Workshop on Hydraulic Design of Low-Head Structures. FH Aachen University of Applied Sciences, ss. 230.
- Pagliara, S., Palermo, M. (2012). Effect of energy dissipation pool geometry on the dissipative process in the presence of block ramps. J. Irrigation and Drainage Engin., 138(11), 1027–1031.
- Pagliara, S., Palermo, M. (2013). Scour at Foundations of Rock Made Low-Head Structures. [W:] D.B. Bung, S. Pagliara (red.). International Workshop on Hydraulic Design of Low-Head Structures, IWLHS. Bundesanstalt für Wasserbau, Aachen, 169–177.
- Pagliara, S., Palermo, M. (2015). Scour Problems Downstream of Low-Head Hydraulic Structures. [W:] P. Rowiński, A. Radecki-Pawlik (red.). Rivers – Physical, Fluvial and Environmental Processes. GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences. Springer, Heidelberg, 99–119.
- Pagliara, S., Radecki-Pawlik, A., Palermo, M., Plesiński, K. (2017). Block ramps in curved rivers: morphology analysis and prototype data supported design criteria for mild bed slopes. River Res. Applic., 33(3), 427–437.
- Plesiński, K., Radecki-Pawlik, A., Wyzga, B. (2015). Sediment Transport Processes Related to the Operation of a Rapid Hydraulic Structure (Boulder Ramp) in a Mountain Stream Channel: A Polish Carpathian Example. [W:] P. Heininger, J. Cullmann (red.). Sediment Metters. Springer, Koblenz, 39–58.
- Przedwojski, B., Błażejowski, R., Pilarczyk, K.W. (1995). River training techniques – fundamental, design and application. AA Balcoma, Rotterdam.
- Radecki-Pawlik, A. (2013). On using artificial rapid hydraulic structures (RHS) within mountain stream channels – some exploitation and hydraulic problems. [W:] P. Rowiński (red.). Experimental and Computational Solutions of Hydraulic Problems. GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, Monograph, Springer, Heidelberg etc., 101–115.
- Radecki-Pawlik, A. (2014) Hydromorfologia rzek i potoków górskich. Działy wybrane. Wydawnictwo UR w Krakowie. Kraków.
- Radecki-Pawlik, A., Plesiński, K., Ślizowski, R. (2015). Comparative research of interlocked-carpet block ramp (ICBR) made of natural stone with rapid hydraulic structures (RHS) of Peterka

- type. [W:] R.F. Carvalho, S. Pagliara (red.). IWLHS –The International Workshop on Hydraulic Structures: Data Validation IAHR, University of Coimbra, Marine and Environmental Sciences Centre, Coimbra, 105–114.
- 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:] D.B. Bung, S. Pagliara (red.). International Workshop on Hydraulic Design of Low-Head Structures, IWLHS. Bundesanstalt für Wasserbau, Aachen, 121–128.
- Radecki-Pawlik, A., Plesiński, K., Radecki-Pawlik, B. (2016). Block ramp rebuilding and exploitation problems: chute stone dimension choosing; upstream the ramp river channel erosion. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, III/1, 835–847.
- Ratowski J. (2013). Podstawy projektowania zabudowy potoków górskich. Politechnika Krakowska. Kraków.
- Schauberger, W. (1957). *Naturgemasser Wasserbau an geschiebeführenden flüssen*. Wasser und Boden, 11, Wien.
- Scheuerlein, H. (1968). *Der Rauherinneabfluss*. Bericht 1. Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischer Universität, München.
- Singh, K.V.H. (1983). *Fundamentals of Irrigation Engineering*. Nemchand, Roorkee.
- Skalski, T., Kędzior, R., Radecki-Pawlik, A. (2012). Riverine ground beetles as indicators of inundation frequency of mountain stream: a case study of the Ochotnica Stream, Southern Poland. *Baltic J. Coleopterol.*, 12(2), 117–126.
- Ślizowski, R., Radecki-Pawlik, A., Huta, K. (2008). Analiza wybranych parametrów hydrodynamicznych na bystrzu o zwiększonej szorstkości na potoku Sanoczek. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.*, 2, 47–58.
- Tachet, H., Richoux, P., Bournaud, M., Usseglio-Polatera, P. (2002). *Invertébrés d’eau douce, Systématique, biologie, écologie*. CNRS Editions, Paris.
- Vincent, J. (1968). *Vysukum zdrasnych sklozov na tokach s pevnym dnom*. VUVH, Bratislava.
- Yang, T.C. (1996). *Sediment Transport. Theory and Practice*. McGraw-Hill, New York.
- Zastera Z. (1984). *Balvanite Skluzu*. Hydroprojekt O.Z., Rezortni Ukol R-4, Brno.

ON SOME CHOSEN EXPLOITATION PROBLEMS AND BIOLOGICAL FUNCTIONALITY OF INTERLOCKED CARPET BLOCK RAMPS

Abstract. Along the paper some chosen problems of exploitations interlocked carpet block ramps are presented. Among many the most important are: scouring at the downstream part of the structure, the dimensions of the boulders used on the sloping apron of the structure, upstream of structures changes of the velocity and shear stresses and their influence on the river channel and finally the problem of construction of curtain walls at two ends of the structure. The attention was paid into invertebrates which might live in the area of ramps and into river continuum under low water discharges.

Key words: interlocked carpet block ramps, mountain stream, scouring, boulders

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.03.2017

Do cytowań – For citation: Radecki-Pawlik, B., Radecki-Pawlik, A., Plesiński, K., Kukuła, K., Bylak A. (2017). Wybrane problemy eksploatacyjne bystrzy o zwiększonej szorstkości (stopni-ramp) w aspekcie ich projektowania i funkcjonalności biologicznej. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 16(1), 127–147.