



## **Równowaga hydrodynamiczna ważnym parametrem kształtującym stan ekologiczny cieków karpackich**

*Andrzej Strużyński, Wojciech Bartnik*  
*Uniwersytet Rolniczy, Kraków*

*Krzysztof Kulesza, Katarzyna Czołch*  
*Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Kraków*

### **1. Wstęp**

Zgodnie z Ramową Dyrektywą Wodną działania podejmowane przez człowieka powinny prowadzić do poprawy lub niepogarszania stanu wód. Efektywna ochrona ekosystemów w ciekach górskich może nastąpić jedynie po uprzednim rozpoznaniu reżimu cieku. Ze względu na adaptacyjną naturę przyrody żywej, warunki referencyjne określone w myśl RDW należy badać po uprzednim wykonaniu właściwego monitoringu hydromorfologicznego. W przypadku płynących wód powierzchniowych, do hydromorfologicznych elementów jakości należą: reżim hydrologiczny (ilość i dynamika przepływu wód, połączenie z częściami wód podziemnych), ciągłość rzeki oraz warunki morfologiczne (struktura koryta i strefy nadbrzeżnej). W dyrektywie podano jedynie ogólne elementy oceniania stanu ekologicznego cieków. Rzeki i potoki górskie, dążą do wytworzenia stanu równowagi pomiędzy energią wody płynącej w jej korycie, a transportowanym materiałem. Stan równowagi hydrodynamicznej w korytach cieków górskich występuje w przypadku zrównania aktualnej intensywności ruchu rumowiska wleczonego i zdolności transportowej rzeki [3, 6]. Warunki takie występują w przypadku równowagi transportu rumowiska wleczonego docierającego do przekroju i go opuszczającego. W ciekach znajdujących się w warunkach równowagi nie przeważa ani proces erozji

ani akumulacji. W zrównoważonych korytach rzek i potoków górskich często zaobserwować można dno obrukowane, tzn. takie w którym pokrywa pozbawiona jest drobnych frakcji, a ziarna pozostających grubszych frakcji są zaklinowane. Transport masowy materiału dennego jest okresowy, a jego intensywność jest na tyle mała, że zarówno w układzie pionowym jak i poprzecznym rzeka pozostaje niezmienna. Równowaga koryta powstaje w dynamicznym układzie wielu parametrów hydromorfologicznych. Z tego powodu również pozbawienie rzeki dostawy materiału z erozji dna i brzegów prowadzi do jej zachwiania.

W zależności od dynamiki przepływającej wody oraz dostawy i parametrów rumowiska rzecznoego cieki górskie płynące w korytach aluwialnych wytwarzają różnorodne formy morfologiczne różniąc się pomiędzy sobą w układzie pionowym (profile podłużne), poziomym (mapy i zdjęcia lotnicze) i poprzecznym (przekroje poprzeczne). Z tego powodu, w terenach górskich, potoki płyną w korytach prostych lub krętych, a rzeki w krętych, wędrujących (semi-roztokowych), roztokowych, czasem meandrujących. Istnieją również odcinki rzek lub potoków górskich, w których, w warunkach naturalnych, wytworzenie koryta znajdującego się w równowadze hydrodynamicznej nie jest możliwe. W każdym przypadku można określić intensywność i przebieg procesów fluwialnych. W artykule przedstawiono propozycję implementacji tematyki oceny równowagi hydrodynamicznej cieków do oceny ich stanu ekologicznego jako jednego z podstawowych. Ocena parametryczna stanu równowagi została wykonana za pomocą prognozy przepływu powodującego zmiany w dnie rzeki górskiej. Wyniki analizy równowagi hydrodynamicznej przedstawiono na przykładzie rzeki Skawy w odcinku powyżej ujścia Bystrzanki. Przedstawiona metodyka pomiarowa i interpretacja wyników została opracowana w ramach projektu badawczego finansowanego przez NCN w latach 2009–2012 na Białym i Czarnym Dunajcu, Białce, Skawie, Porębianie oraz Wisłoce.

## **2. Wpływ zmian intensywności procesów fluwialnych na równowagę hydrodynamiczną cieków górskich**

Rzekę można traktować jako system łączący elementy geometryczne, (takie jak profil podłużny, poprzeczny czy bieg cieku) oraz procesy związane z przepływem wody i transportem rumowiska rzecznoego.

Różne metodyki badania struktur rzecznych oceniając stan ekologiczny cieków, podają w zakresie hydromorfologii różne parametry, jednak nie uwzględniają one bezpośrednio oceny równowagi hydrodynamicznej cieku. Tymczasem ocena stabilności dna koryt rzek górskich, analizowana w ramach oceny ich stanu ekologicznego umożliwia wskazanie aktualnych i przewidywalnych tendencji zmian morfologii cieku i jego wartości jako siedliska. Cieki górskie charakteryzuje duża dynamika zmian w zakresie natężenia przepływu wody i ruchu rumowiska w czasie wezbrania. Na taką specyfikę struktury i funkcjonowania cieków górskich mają wpływ: ukształtowanie terenu, warunki klimatyczne, wielkość i zagospodarowanie zlewni oraz zróżnicowany reżim hydrologiczny. Inny reżim hydrologiczny panuje w poszczególnych odcinkach rzek (górne, środkowe i dolne). Równowaga hydrodynamiczna cieku rozumiana jest jako wynik istniejących procesów fluwialnych stanowiących podstawę do określania zrównoważonego stanu ekosystemu rzeczno-egzonalnego. Należy podkreślić, że każda zmiana wymienionych powyżej czynników, prędzej czy później spowoduje zmiany morfologiczne w korycie rzeczno-egzonalnym. Z tego powodu przeprowadzone zabiegi regulacyjne, lub dowolne przekształcenie zlewni może po kilku wezbraniach znaleźć odzwierciedlenie w systemie korytowym rzeki.

Istnienie równowagi hydrodynamicznej koryta cieku przeważnie świadczy o tym, że taki system funkcjonuje prawidłowo [5]. Równowaga ta nie zawsze jest osiągnięta przez rzeki płynące w reżimie naturalnym. Bieg górny rzeki często nie nadaje się do adaptacji przez duże organizmy wodne i wodno-łądowe. W biegu środkowym cieku, w warunkach naturalnych, koryta rzek osiągnęły przeważnie równowagę hydrodynamiczną i jest to stan optymalny dla tworzenia ekosystemu wodnego. Równowaga hydrodynamiczna cieków to pożądaný stan ekologiczny cieku a jednocześnie stan równowagi dynamicznej w sensie geomorfologicznym [1]. Rzeka w dalszym ciągu dąży do wytworzenia nowego stanu równowagi, lecz często nie jest on trwały. Może on występować w zbyt wąskim korycie, w nienaturalnym układzie poziomym rzeki, lub wręcz w korycie z odkrytymi wychodniami skalnymi [13, 15, 23].

Zmiana intensywności procesów fluwialnych jest uzależniona od wymienionych czynników i wpływa na parametry hydromorfologiczne rzek górskich [11]. Dla przykładu regulacja rzeki poprzez wybudowanie korekcji progowej, zmniejszając spadek, może zmienić odcinek erozyjny

na akumulacyjny, a przez to zwiększyć krętość rzeki lub jej tendencję do tworzenia koryta krętego. Umocnienie brzegów, może spowodować zmniejszenie dostawy rumowiska i niedociążenie rzeki, co często doprowadza do wcinania koryt rzecznych. Niedociążenie koryt, prowadzące do zmiany odcinków rzek ze zrównoważonych na erozyjne może być również rezultatem takich działań jak: prostowanie koryt, rozcinanie ramion rzek roztokowych, pobór rumowiska a także zmiana zagospodarowania zlewni [13, 14, 27].

Innym, bardzo ważnym elementem wpływającym na procesy fluwilane w korytach rzek górskich i jednocześnie będącym w ścisłym z nimi związku jest układ bystrzy i plos. Istnieje wiele badań określających warunki powstawania układu bystrzy i plos, naturę ruchu wody i materiału wlezonego podczas różnych stanów wody [17]. Dodatkowo lokalizacja ziaren ponadwymiarowych może wprowadzić zakłócenia powodujące powstanie dodatkowych strug rozmywających dno w obszarach plos [24, 22]. Nie wszystkie procesy istniejące w bystrzach i plosach są dobrze rozpoznane. Poszczególne rzeki górskie wytwarzają różne ich układy [15], będące odpowiedzią między innymi na stopień przekształcenia rzeki. Szczególnie przegrody w rzekach (zapory, stopnie) mogą powodować występowanie koryt wąskich i wciętych. Także obrukowanie dna jest postrzegane jako niekorzystne, ponieważ jest efektem zmniejszonej dostawy rumowiska [10]. Według badaczy amerykańskich po wybudowaniu zapory w niższych przekrojach transport rumowiska wlezonego początkowo utrzymuje się na niezmiennym poziomie, lecz w miarę wypłukiwania aluwiów, zmniejsza się, prowadząc do wytworzenia dna obrukowanego [18, 19]. Jak już wspomniano wcześniej rzeka, zawsze dąży do wytworzenia stanu równowagi hydrodynamicznej w swoim korycie [12]. Z tego powodu istnienie wciętego koryta z obrukowanym dnem świadczy o limitowanej dostawie materiału wlezonego do badanego odcinka górskiej rzeki aluwialnej. Proces ten jednak jest złożony. Odpowiedź na zmianę układu pionowego rzeki jest wypadkową wielu czynników morfologicznych a stabilny stan równowagi pojawia się po pewnym czasie i po wielu oscylacjach wokół warunków optymalnych. Jest to okres od kilku, do kilkudziesięciu lat.

### 3. Wybrane parametry przydatne dla określenia równowagi hydrodynamicznej w korytach cieków górskich

Równowaga hydrodynamiczna koryt górskich powiązana jest ściśle ze zróżnicowaniem procesów fluwialnych. Ze względu na wieloparametrową naturę ruchu rumowiska wlezonego, do oceny warunków równowagi koryta cieków górskich uwzględniono następujące parametry [2, 4]:

- graniczne warunki początku ruchu rumowiska dennego,
- współczynnik klinowania się ziaren,
- wpływ kształtu ziaren na początek ruchu rumowiska dennego,
- prognoza obrukowania dna i naprężenia graniczne.

Określenie parametrów hydraulicznych opisujących warunki równowagi hydrodynamicznej jest trudne. W przedstawionych wynikach prognozy stabilności dna dla Skawy powyżej ujścia Bystrzanki (rys. 5) różnica napelnienia wody pomiędzy najsilniejszym opancerzeniem a transportem rumowiska wynosi 5 cm. Zerwanie obrukowania, którego skutkiem jest wywieszanie materiału z pokrywy i warstw leżących poniżej prowadzi do zmniejszenia średnic charakterystycznych jak np. średnicy miarodajnej albo  $d_{90\%}$  warunkującej stabilizację dna. W zależności od stopnia uzbrojenia pokrywy zmiany te mogą być duże i przy tym samym przepływie wody po jej zerwaniu warunki hydrauliczne przepływającej wody mogą prowadzić do nadmiernego rozmycia dna. Z tego powodu bezpieczniej jest za granicę równowagi koryta przyjąć wprost przepływ powodujący największe obrukowanie.

Dane do obliczeń zgromadzone zostały na w wyniku przeprowadzonych prac terenowych. Wykonano pomiary przekrojów poprzecznych przez koryto rzeczne i dolinę, pomiary spadku zwierciadła wody i dna, pomiary granulometryczne, pomiary kształtów ziaren tworzących pokrywę oraz dokumentację zdjęciową lokalizacji. Dane te pozwoliły na określenie współczynnika szorstkości przepływu [25] oraz spadku. Następnym krokiem było wyznaczenie krzywych przepływu i zmian parametrów hydraulicznych w funkcji napelnienia w każdym przekroju pomiarowym. Równowaga hydrodynamiczna koryt wybranych rzek górskich została oceniona w oparciu o analizę wzajemnych zależności przepustowości koryt rzecznych, układu poprzecznego i pionowego oraz stabilności dna dla przepływów charakterystycznych:

- przepływy prawdopodobne ( $Q_{75\%}$ ,  $Q_{50\%}$ ,  $Q_{25\%}$ ,  $Q_{10\%}$  i  $Q_{1\%}$ ),

- przepływ brzegowy,
- przepływ koryto twórczy,
- przepływy powodujące wylew wody na terasę zalewową.

Wartości przepływów prawdopodobnych pochodzą z archiwum Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Przepływ korytotwórczy został określony za pomocą metody Lambora [16] polegającej na odnalezieniu maksymalnej wartości iloczynu przepływu przez prawdopodobieństwo jego wystąpienia. Przepływ ten przeważnie jest zbliżony do  $Q_{75\%}$ , proponowanego przez Pickupa i Warnera [20]. Przepływ brzegowy był poszukiwany za pomocą analizy zmian promienia hydraulicznego ( $R_h$ ) oraz indeksu bifurkacji (BI) zaproponowanego przez Riley'a [20]:

$$BI = \frac{W_i - W_{i+1}}{D_i - D_{i+1}} \quad (1)$$

gdzie:  $W_i$  – szerokość zwierciadła wody przy napełnieniu  $D_i$ .

Riley zaproponował by poszukiwać pierwszego maksimum lokalnego tego indeksu w przypadku badanych rzek, których koryta często były wcięte lub płynęły w łóżyskach wielokorytowych. Poziom ten przeważnie był położony zbyt nisko, znacznie niżej od poziomu określonego dla przepływu brzegowego proponowanego przez Pickupa i Warnera jako znajdującego się w przedziale rzędnych odpowiadających przedziałowi od przepływu  $Q_{10\%}$  do  $Q_{25\%}$  [20]. Z tego powodu wybierano maksimum lokalne, powyżej którego następował duży przyrost powierzchni zwilżonej przekroju poprzecznego. Ponieważ w systemie wielokorytowym terasa zalewowa znajdowała się w strefie dużych przepływów (od  $Q_{25\%}$  do przepływów przekraczających  $Q_{1\%}$ ) jej położenie wyznaczano za pomocą analizy parametrów  $R_h$  i BI, podobnie jak przy określaniu przepływów brzegowych. Po wyznaczeniu przepływów charakterystycznych w następnym etapie obliczeń wykonano analizę składu granulometrycznego rumowiska wlezonego.

Koryta rzek i potoków górskich, ze względu na przepływ wody w warunkach dużej szorstkości przepływu, są wrażliwe na zmiany składu granulometrycznego i warunków ruchu rumowiska wlezonego. Warunki przepływu w których występuje duży wpływ szorstkości dennej na profil

prędkości uzależnione zostały przez Sentürka [21] od liczby Reynolds'a dla ziaren  $Re^* > 68$ :

$$Re^* = k_s U^* / \nu \quad (2)$$

gdzie:  $k_s$  – szorstkość Nikuradse'go [m],  $U^*$  – prędkość dynamiczna [ $m\ s^{-1}$ ],  $\nu$  – lepkość kinematyczna wody [ $m^2\ s^{-1}$ ].

W tych warunkach nie tworzą się formy denne oraz, podczas przepływów niskich i średnich, nie występuje zjawisko transportu rumowiska, a jedynie zaobserwować można procesy ukrywania drobnych ziaren, procesy sortowania i obrukowania ziaren tworzących pokrywę dna. Z tego powodu procesy fluwialne występujące w rzekach górskich różnią się zdecydowanie od procesów występujących w rzekach nizinnych. Obliczenia stabilności dna wykonane dla poszczególnych frakcji pozwalają na analizę zmian składu granulometrycznego rumowiska dennego podczas zmian przepływów wody w rzekach górskich. Analiza stabilności dna przedstawiona w artykule jest wykonana przy użyciu programu komputerowego ARMOUR [8].

Procedura obliczeniowa zastosowana w programie ARMOUR:

1. wczytanie wszystkich frakcji uziarnienia  $d_i$  i obliczenie średnicy miarodajnej  $dm$ ,
2. obliczenie stosunku wartości  $d_i/dm$  dla każdej frakcji,
3. obliczenie bezwymiarowych naprężeń granicznych Shieldsa  $f_{m1}$  i  $f_{m2}$  za pomocą równania 7,
4. obliczenie bezwymiarowych naprężeń granicznych Shieldsa  $f_i$  dla wszystkich frakcji za pomocą równań 6,
5. obliczenie naprężeń granicznych charakteryzujących poszczególne frakcje (równanie 4),
6. zastosowanie funkcji Gesslera opisanej wykresem Komury do obliczeń prawdopodobieństwa nieruszenia poszczególnych frakcji za pomocą równania 3,
7. znając prawdopodobieństwo nieruszenia poszczególnych frakcji uziarnienia dna tworzona jest prognozowana krzywa przesiewu dla zadanego napełnienia (przepływu określonego z krzywej wydatku),
8. krzywe te tworzone są dla wszystkich zadanych przepływów.

Prognoza zmian krzywej granulometrycznej wykonana została w oparciu o metodę stochastyczną zaproponowaną przez Gesslera [8]. Zakłada ona, że zrównanie naprężeń stycznych i granicznych stwarza 50% prawdopodobieństwo ruchu ziarna spoczywającego na dnie [21]. Przebieg funkcji Gesslera w programie ARMOUR zapisany został za pomoc równań przedstawionych poniżej:

$$\begin{aligned} \text{dla } 0 < \tau_{gr} / \tau_0 < 2,15 \quad q(d_i) &= \frac{\arctg(1,7(\frac{\tau_{gr}}{\tau_0} - 1))}{130} + 0,5 \\ \tau_{gr} / \tau_0 > 2,15 \quad q(d_i) &= \frac{-6}{(\frac{\tau_{gr}}{\tau_0} - 1)^{11}} + 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Obliczenia są wykonywane na podstawie porównania granicznych naprężeń uzależnionych od zmian naprężeń bezwymiarowych Shieldsa (2) z naprężeniami stycznymi przy dnie wywoływanymi przez przepływ wody (3).

$$\tau_{gr} = f_i \Delta\gamma d_i \quad (4)$$

gdzie:  $\tau_{gr}$  – naprężenia graniczne [ $\text{N m}^{-2}$ ],  $\Delta\gamma$  – ciężar objętościowy rumowiska zanurzonego w wodzie [ $\text{N m}^{-3}$ ],  $d_i$  – średnica frakcji [m].

$$\tau_0 = \gamma h I \quad (5)$$

gdzie:  $\tau_0$  – naprężenia styczne przy dnie wywoływane przez przepływającą wodę [ $\text{N m}^{-2}$ ],  $\gamma$  – ciężar objętościowy wody [ $\text{N m}^{-3}$ ],  $h$  – napełnienie [m],  $I$  – spadek [–].

Do określenia warunków początku ruchu materiału wielofrakcyjnego i szorstkiego (o średnicy  $d > 5$  cm), jest używana formuła Wanga [26]:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{f_{m1}}{1,786(\frac{d_i}{d_m})^{0,947}} \quad \text{dla} \quad d_i/d_m < 0,6 \quad \text{i} \\ f_2 &= \frac{f_{m2}}{(\frac{d_i}{d_m})^{0,314}} \quad \text{dla} \quad d_i/d_m > 0,6. \end{aligned} \quad (6)$$



gdzie:  $f_1, f_2$  – graniczne naprężenia bezwymiarowe [-],  $f_{m1}, f_{m2}$  – graniczne naprężenia Shields'a określone dla średnicy miarodajnej,  $d_i$  – średnica  $i$ -tej frakcji [m],  $d_m$  – średnica miarodajna [m].

Naprężenia graniczne Shieldsa  $f_m$  zostały podzielone przez Bartnika [3] na  $f_{m1}$  i  $f_{m2}$ , opisujące grubsze i drobne frakcje na podstawie bezpośrednich pomiarów wykonywanych w rzekach górskich. Obliczenie tych parametrów uzależnione zostało od kształtu krzywej granulometrycznej:

$$f_{m1} = 0,039 d^{0,26} \quad \text{i} \quad f_{m2} = 0,028 d^{0,26} \quad (7)$$

gdzie:  $\delta = (d_{84,13} / d_{15,87})^{0,5}$  – odchylenie standardowe krzywej przesiewu [-].

Zmiany kształtu krzywej granulometrycznej odzwierciedlone są przez zmiany szeregu parametrów. Podczas trwania procesu tworzenia lub usuwania warstwy opancerzonej dna występują zmiany wielkości frakcji charakteryzujących dno (tj.:  $d_{50\%}$ ,  $d_{90\%}$ ) wpływających zarówno na szorstkość przepływu jak i na parametry graniczne ruchu [9]. Skład granulometryczny uziarnienia w poszczególnych rzekach zmienia się. Również w tej samej rzece w różnych odcinkach jej biegu wielkości ziaren mogą ulegać zmianie. Do ważnych i umożliwiających porównanie różnych krzywych przesiewu zastosować można przedstawione powyżej odchylenie standardowe krzywej przesiewu. W tak odmiennych warunkach odchylenie standardowe krzywej przesiewu poprawnie opisuje wysortowanie materiału wlezonego. Dno obrukowane istnieje dla wartości  $\delta$  mniejszych od 1,6, przy czym w warunkach naturalnych jego wartość nie spada poniżej 1,3. W takim przypadku materiał drobny jest prawie całkowicie usunięty z pokrywy dna. W przypadku gdy materiał jest równomiernie wymieszany, co odpowiada częstemu uruchamianiu pokrywy  $\delta$  waha się wokół wartości 2,5. Bezpośrednio po zerwaniu pokrywy, kiedy ukrywający się materiał jest odkryty i dodatkowo w dnie znajduje się drobny materiał z odsypisk,  $\delta$  osiąga wartości większe od 3,5 [7]. Ze względu na wspomniane zmiany składu granulometrycznego, podobna ilość transportowanego rumowiska może występować przy różnych przepływach wody w rzece. Przed usunięciem opancerzenia dna, ilość transportowanego materiału różni się radykalnie w porównaniu z ilością występującą podczas transportu masowego. Bartnik [3] prezentuje rów-

niez proporcjonalną zależność parametru Shieldsa od współczynnika kształtu ziaren:

$$\begin{aligned} d_i / d_m < 0,4, & \quad f_m = 0,0058e^{2,37 SF}, \\ d_i / d_m > 0,4, & \quad f_m = 0,0127e^{1,67 SF}, \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie: współczynnik kształtu ziaren –  $SF = c/(a b)^{0.5}$ , a, b oraz c – wymiary odpowiednio: największy, średni (przesiewowy) i najmniejszy [m].

Należy zwrócić uwagę na fakt, że warunki równowagi hydrodynamicznej nie muszą odzwierciedlać naturalnego stanu rzeki lub potoku górskiego. Z tego powodu przed rozpoczęciem prac obliczeniowych dla istniejącego reżimu hydrologicznego rzeki, warto jest zastanowić się nad jej układem poziomym a także, w miarę możliwości, poprzecznym i pionowym sprzed wykonanych regulacji lub istotnych zmian w systemie zagospodarowania zlewni. Na tej podstawie można próbować wstępnie zakwalifikować morfologicznie stan historyczny i obecny rzeki za pomocą klasyfikacji zaproponowanej przez Rosgena [11]. Określenie w jakim stanie równowagi hydrodynamicznej rzeka znajdowała się w przeszłości może zwiększyć trafność aktualnej oceny jej stanu. Warto również przeanalizować warunki hydromorfologiczne rzek płynących w pobliżu.

Analiza układu pionowego rzeki pozwala między innymi na określenie spadków, długości i różnic wysokości występujących w odcinkach zbystrzeń i plos. W artykule za odcinki zbystrzeń przyjęto te, w których spadek zwierciadła wody jest większy od spadku średniego obliczonego dla badanego odcinka, zaś plosa, jako odcinki o spadku mniejszym od średniego. Warunkiem poprawności obliczeń jest aby w odcinku badawczym znajdowało się kilka bystrzy i plos. W przypadku, kiedy odcinek pomiarowy jest za krótki obliczony spadek średni nie będzie reprezentatywny i z tego powodu nie może być zastosowany do rozdziału poszczególnych odcinków wartkiego i spokojnego przepływu. W wybranych odcinkach badawczych rzek porównano stosunki średnich wartości spadków i długości panujących w bystrzach i plosach.

#### 4. Prezentacja danych pomiarowych i charakterystyka hydromorfologiczna Skawy w rejonie ujścia Bystrzanki

Skawa jest prawym dopływem rzeki Wisły. Płyynie na obszarze Beskidów Zachodnich. Powierzchnia zlewni rzeki zamyka się w obszarze 1160 km<sup>2</sup>. Badany odcinek leży w 61 kilometrze biegu Skawy w odległości od 500 do 700 metrów powyżej ujścia potoku Bystrzanki. Rzeka na tym odcinku płynie w korycie bliskim naturze, jest ono jednak lokalnie umacniane na brzegach wklęsłych. Wyżej leżące odcinki Skawy są częściowo uregulowane.



**Rys. 1.** Widok z lotu ptaka na Skawę w rejonie ujścia Bystrzanki

**Fig. 1.** The Skawa River in the reach of Bystrzanka estuary

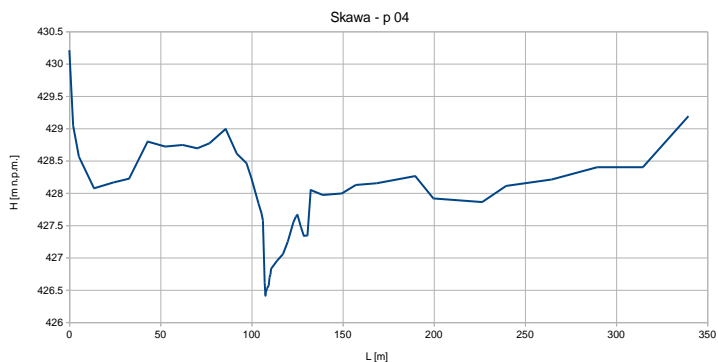
W tym i wyżej położonych przekrojach Skawa wytworzyła przeważnie nurt spokojny, choć w badanym odcinku tworzy dobrze wykształcone sekwencje plos i bystrzy o dość wartkim przepływie.

Skawa płynie w dolinie o szerokości około 350 metrów. W górnej części odcinka badawczego opiera się o prawą skarpe, natomiast na jego dolnym końcu, o lewą skarpe ograniczającą terasę zalewową. Rzeka płynie tu w płaskim dnie doliny, a wcięcie koryta jest niewielkie. W łózysku wytworzone jest jedno kręte koryto rzeczne. Znajdują się tutaj liczne odsypiska brzegowe.



**Rys. 2.** Skawa w rejonie badań (km 61+600)

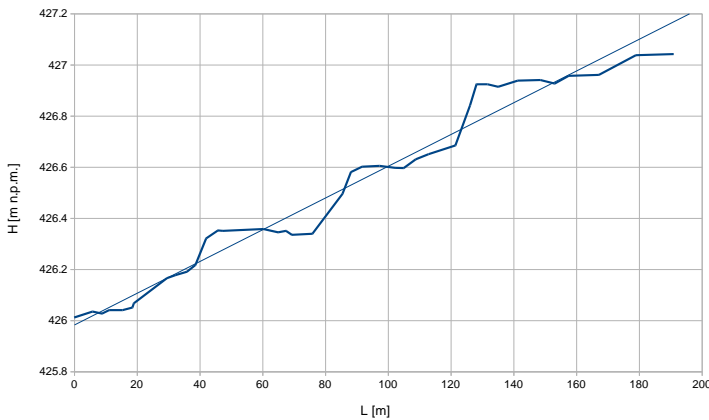
**Fig. 2.** The Skawa River within the measurement reach (km 61+600)



**Rys. 3.** Przekrój poprzeczny rzeki (km 61+620)

**Fig. 3.** The Skawa River cross-section (km 61+620)

Spadek średni Skawy na badanym odcinku wynosi 6 ‰. W bystrzach średnio zwiększa się on do 2,5%, a w plosach wynosi średnio 2 promile. Stosunek spadków średnich w bystrzach i plosach jest bardzo duży i osiąga krotność 12,5. Stosunek długości tych odcinków jest natomiast bardzo mały i wynosi 0,15. Na tym odcinku szerokości plos sięgają 7 metrów, a w bystrzach rzeka jest znacznie węższa (o szerokości koryta bliskiej 3 m).

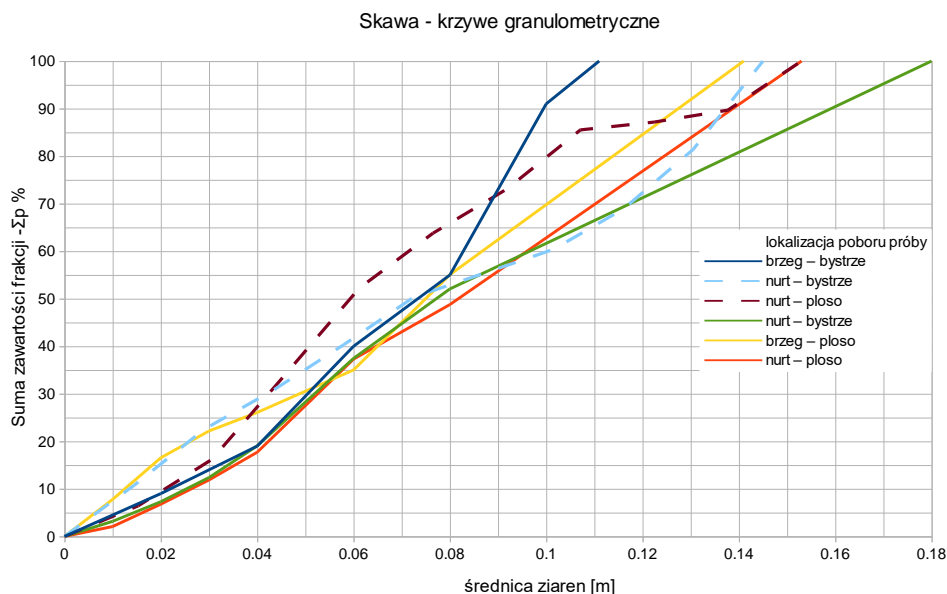


**Rys. 4.** Spadek średni i układ zwierciadła wody w profilu podłużnym rzeki  
**Fig. 4.** The average slope and the water surface profile

Przepływy charakterystyczne zostały zamieszczone w tabeli 1. W odcinkach o większych spadkach znajdują się wychodnie skalne, a w miejscach występowania mniejszych prędkości w nurcie zalega żwir i drobne kamienie. Uziarnienie zmierzone we wszystkich lokalizacjach charakteryzuje się podobną zawartością frakcji drobnych. Ziarna znajdujące się w korycie Skawy są dość płaskie i charakteryzują się współczynnikiem SF równym 0,38. Drobne frakcje uziarnienia opisane są parametrem SF=0,47, a grubsze frakcje – 0,28. Parametry te odpowiadają odpowiednio ziarnom o kształcie elipsoidalnym i elipsoidalnym wydłużonym, a frakcje większe są to ziarna charakterystyczne dla kategorii kształtu: pręty, płyty i dyski. Uziarnienie dna w poszczególnych miejscach pomiarowych przedstawiono na rysunku 5. Wszystkie przedstawione krzywe granulometryczne uziarnienia dennego mają podobny rozkład. Wyjątek stanowią próbki rumowiska pobrane z odsypiska znajdującego się na brzegu. Przebieg krzywych granulometrycznych w każdym przypadku, zarówno w odcinkach szybkiego jak i spokojnego nurtu, świadczy o dużej aktywności procesów fluwialnych w tym odcinku Skawy.

**Tabela 1.** Przepływy charakterystyczne dla badanego odcinka Skawy  
**Table 1.** Characteristic discharges in the measured section of the Skawa

$Q_{p\%}$	1	2.5	5	10	25	50	75
$[m^3 s^{-1}]$	284	227	191	148	85	48	24

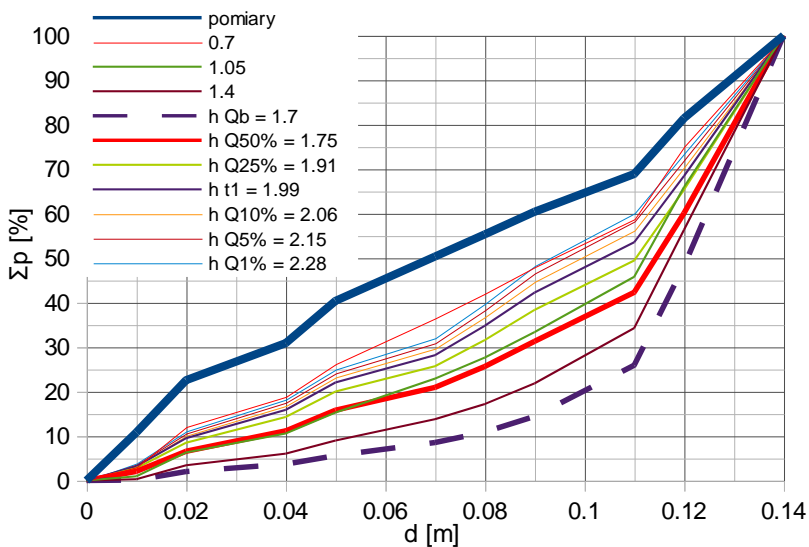


**Rys. 5.** Krzywe granulometryczne zmierzone w wybranych lokalizacjach Skawy  
**Fig. 5.** Measured grain size distributions characterizing the bed cover in chosen sections of the Skawa River

Odchylenie standardowe przedstawionych krzywych granulometrycznych zawiera się pomiędzy wartościami od 1,73 do 2,48. Średnia jego wartość wynosi 2,12. Dolna granica wartości  $\delta$  zmierzona została w odcinkach zbystrzeń. Podczas wezbrań pokrywa dna w bystrzu narażona jest szczególnie na uszkodzenie lub zerwanie. Wyjątek stanowią przekroje plos w których występują ziarna ponadwymiarowe. Tych jednak nie ma w badanym odcinku, co pozwoliło na zastosowanie krzywej pobranej w nurcie bystrza (rys. 5.; krzywa niebieska przerywana) do wykonania prognozy stabilności całego odcinka podczas wezbrań. Wybrana krzywa granulometryczna opisana jest przez średnice charakterystyczne podane w tabeli 2. Odchylenie standardowe krzywej przesiewu próby pobranej z nurtu wynosi 2,5, co świadczy o przemieszaniu materiału wlezonego. W pokrywie brak jest frakcji piaszczystych. Najdrobniejszy zmierzony materiał stanowi drobny żwir.

**Tabela 2.** Parametry rumowiska wleczonego zmierzonego w nurcie bystrza  
**Table 2.** Bedload parameters measured in current of the riffle.

Średnice charakterystyczne rumowiska dennego	Wartość d [m]
$d_{16}$	0,021
$d_{50}$	0,072
$d_{84}$	0,133
$d_{90}$	0,137
$d_m$	0,077



**Rys. 6.** Prognoza stabilności dna Skawy wykonana za pomocą programu ARMOUR

**Fig. 6.** Bed stability prognosis performed by means of the ARMOUR program

Prognoza stabilności dna przeprowadzona została zarówno dla przepływów charakterystycznych, jak również brzegowego i korytotwórczego (rys. 6). Potwierdziła ona występowanie częstego ruchu materiału wleczonego w badanym odcinku Skawy. W korycie rzeki na odcinku powyżej ujścia Bystrzanki obrukowanie dna trwa do wystąpienia przepływu brzegowego, który jest mniejszy od  $Q_{50\%}$ . Odchylenie standardowe krzywej przesiewu osiąga wówczas wartość 1,3. Napętnienie zrywające obrukowanie dna przekracza 1,70 m. Należy spodziewać się częste-

go przemieszczania materiału wlezonego w korycie Skawy na tym odcinku, ponieważ przepływy  $Q_{50\%}$  występują statystycznie co dwa lata. Ze względu na właściwe parametry koryta świadczące o występowaniu równowagi hydrodynamicznej można stwierdzić, że dostawa materiału wlezonego jest na właściwym poziomie.

## 5. Wnioski

Rzeka w badanym odcinku płynie w korycie aluwialnym. Koryto nie jest wcięte, o czym świadczą niewielkie przepływy brzegowe i korytotwórcze. Napełnienie powodujące rozlanie rzeki na terasę jest zaledwie o 0,2 m większe od napełnienia odpowiadającego przepływowi brzegowemu.

W profilu podłużnym rzeki widać łatwo rozróżnialne odcinki bystrzy i plos. Różnią się one zdecydowanie spadkiem, długościami i szerokościami koryta. Stosunek średniego spadku w odcinkach bystrzy i plos wynosi 12,5, a stosunek ich długości – 0,15. Dane te wskazują, że podczas przepływów niskich woda płynie spokojnie w odcinkach bystrzy a nadwyżkę energii rozprasza w krótkich i stromych bystrzach.

Dno rzeki jest bardzo dynamiczne. Materiał wleczony jest łatwo uruchamiany. Zmierzone uziarnienie charakteryzuje się zrównoważonym rozkładem frakcji. Różnice pomiędzy odchyleniem standardowym krzywych granulometrycznych materiału pobranego w różnych lokalizacjach są nie duże. Najmniejsza obliczona jego wartość wynosi 1,73, a największa – 2,48. Są to wartości znacznie większe od 1,3, co świadczy o dużej ruchliwości materiału dennego w tej lokalizacji.

Obbrukowanie dna następuje już przy przepływie brzegowym, a jego zerwanie przy przepływie  $Q_{50\%}$ . Pomiaru geodezyjne i obliczenia hydrauliczne nie uwidoczniły nadmiernego wcięcia koryta, co wskazuje na występowanie równowagi hydrodynamicznej w korycie Skawy, związanej w właściwą alimentacją materiału wlezonego do przekrojów badawczych.

Skawa na odcinku powyżej ujścia Bystrzanki płynie w korycie zrównoważonym hydraulicznie, charakteryzującym się występowaniem prawidłowych procesów fluwialnych. Koryto rzeki na tym odcinku jest korytem naturalnym.

Skawa płynąca w opisanym wyżej odcinku jest z pewnością atrakcyjna dla organizmów żywych. Zaobserwowano tutaj liczne ławice narybku i dorosłe osobniki ryb.



Charakterystyka hydromorfologiczna koryta Skawy wskazuje że, rzeka może stanowić zagrożenie powodziowe. Rzeki płynące w płytkich korytach i płaskich dolinach wymagają wyznaczenia szerokiego korytarza dla przepływu powodziowego, co wiąże się z licznymi ograniczeniami stawianymi przed lokalną ludnością.

*Przedstawione prace zostały wykonane w ramach projektu badawczego nr 1865/B/P01/2009/37 finansowanego przez NCN w Krakowie.*

*Publikacja materiałów została sfinansowana z funduszu DS Katedry Inżynierii Wodnej i Geotechniki, UR w Krakowie.*

## Literatura

1. **Bartnik W.:** *Ocena zrównoważonego stanu środowiska rzek i potoków górskich.* referat wygłoszony w ramach Szkoły Gospodarki Wodnej, Skawina, 2008.
2. **Bartnik W.:** *Ocena warunków równowagi hydrodynamicznej potoków górskich.* Konferencja Naukowo-Techniczna „Bliskie naturze kształtowanie rzek i potoków”, Zakopane, 43–51 (1998).
3. **Bartnik W.:** *Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym – początek ruchu rumowiska wlezonego.* Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie, nr 171, ss. 122 (1992).
4. **Bartnik W., Florek J.:** *Ocena hydrodynamiczna stabilności dna na przykładzie rzek i potoków Podkarpacia.* Konferencja Naukowa nt: Typologia i warunki referencyjne wód powierzchniowych. Bukowina Tatrzańska. Wyd. IMGW w Warszawie, 2005.
5. **Bartnik W., Książek L.:** *Regulacja rzek i potoków górskich w warunkach równowagi hydrodynamicznej,* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi, Nr 4/2/2007, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, 15–26 (2007).
6. **Bartnik W., Majewski W., Łapuszek M., Ratomski J.:** *Ocena równowagi hydrodynamicznej Dolnego Dunajca w warunkach pracy Elektrowni wodnych,* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi, Nr 4/1/2007, Polska Akademia Nauk, Oddział w Krakowie, 21–37 (2007).
7. **Bartnik W., Strużyński A.:** *Estimation of hydraulic parameters of armored layer forming in mountain rivers and streams,* Advances in Hydro-Science and Engineering, ICHE and Warsaw University of Technology, wydanie CD-ROM, 2002.

2. **Bartnik W, Strużyński A.:** *Determining hydrodynamic balance in Mountain stream floods*, 3rd International Symposium on Ecohydraulics, IAHR and Utah State University, wydanie na CD\_ROM, Salt Lake City, 1999.
3. **Bray D.I.:** *Flow resistance in gravel-bed rivers*. In: R.D. Hey, J.C. Bathurst and C.R. Thorne (Editors), *Gravel-Bed Rivers: Fluvial Processes, Engineering and Management*. Wiley, New York, 109–137 (2002).
4. **Elkins E.M., Pasternack G.B., Merz J.E.:** *Use of slope creation for rehabilitating incised, regulated, gravel bed rivers*, *Water Resour. Res.*, 43, W05432, doi:10.1029/2006WR005159, 2007.
5. **Fuller I.:** *River and channel morphology*. Technical Report prepared for Horizons Regional Council Measuring and monitoring channel morphology Geography Programme, School of People, Environment & Planning Report 2007/EXT/773, Massey University, p. 22 (2007).
6. **Gessler J.:** *Self stabilizing tendencies of alluvial channels*. *J. Waterways and Harbors Division*, 235–249 (1970).
7. **Gorczyca E., Krzemień K., Lyp M.:** *Contemporary trends in the Białka River channel development in the Western Carpathians*, *Geographia Polonica*, 84, Special Issue Part 2, 39–53 (2011).
8. **Korpak J., Krzemień K., Radecki-Pawlik A.:** *Wpływ czynników antropogenicznych na zmiany koryt cieków karpaccich*, *Infrastruktura i Ekologia Obszarów wiejskich*, Nr 4, PAN, Kraków, p. 88 (2008).
9. **Kulesza K., Bartnik W., Gorczyca E., Krzemień K., Strużyński A.:** *Ocena zrównoważonego stanu rzek i potoków górskich w oparciu o naturalne warunki morfologiczne*. IMGW, maszynopis, 2012.
10. **Lambor J.:** *Hydrologia inżynierska*, Arkady, Warszawa, 1971.
11. **Lisle T.E.:** *A sorting mechanism for a riffle-pool sequence: summary*. *Geological Society of America Bulletin* 90, 616–617 (1979).
12. **Lisle T.E., Church M.:** *Sediment transport-storage relations for degrading, gravel bed channels*, *Water Resour. Res.*, 38(11), 1219 (2002).
13. **Lisle T.E., Smith B.:** *Dynamic transport capacity in gravel-bed river systems*. [in] T. Araya, Kuroki, M., Marutani, T., editor. *International Workshop for Source to Sink Sedimentary Dynamics in Catchment Scale*. Organizing Committee of the International Workshop for Sedimentary Dynamics, 2003, Sapporo, Japan, 187–206 (2003).
14. **Radecki-Pawlik A.:** *Hydromorfologia rzek i potoków górskich*, Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2011, p. 288 (2011).
15. **Sentürk F.:** *Sediment transport technology*, Fort Collins, Colorado, 1977.

16. **Strutyński M., Strużyński A., Kulesza K.:** *The Influence of Large Roughness Elements on Natural Morphological Changes in a Mountain River Bed*, P. Rowinski (ed.), *Experimental and Computational Solutions of Hydraulic Problems*, GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, w druku.
17. **Strużyński A., Kulesza K., Strutyński M.:** *Bed Stability as a Parameter Describing the Hydromorphological Balance of a Mountain River*, P. Rowinski (ed.), *Experimental and Computational Solutions of Hydraulic Problems*, GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, 2013, w druku.
18. **Thompson D.M., Wohl E.E., Jarrett R.D.:** *Velocity reversals and sediment sorting in pools and riffles controlled by channel constrictions*. *Geomorphology* 27, Elsevier Science B.V. 229–241 (1999).
19. **Ven Te Chow, Maidment, D.K., Mays, L.W.:** *Applied of Hydrology*. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, New York, 1988.
20. **Wang F.Y.:** *Bed load transport in open channels*, Proc. of IAHR, Baden-Baden, 1977.
21. **Wyżga B., Radecki-Pawlik A.:** *Jak zmniejszyć zagrożenie i ryzyko powodziowe w dorzeczu górnej Wisły?* *Gospodarka Wodna*, 10/2011, 414–421 (2011).

## **Hydrodynamical Balance as Important Parameter Influencing the Ecological Status of Carpathian Rivers**

### **Abstract**

According to the Water Framework Directive human activities should lead to an improvement or at least stabilizing of water ecosystems. Due to the adaptive nature of living species, reference conditions specified under the WFD for mountain river should be tested after reaching of proper hydromorphological parameters. The hydrodynamical balance of mountain river channel is reflected by its plan view as well as by vertical and cross-sectional layouts. Mountain river in natural conditions produce a clearly defined riffle and pool system and can create a variety of channels with bars. Fluvial processes occurring in mountain rivers differ much from those that occur in lowland rivers. Beds of mountain rivers and streams, due to the water flow in high bed relative roughness conditions, are sensitive to changes in the bed material composition, size and shape. In these circumstances, bedforms are not created. While low and medium flows, there is no sediment transport, and only minor grain hide, sorting and armoring processes form the top of the bed. Granulometric curve changes depend on variations in several parameters. During the process of creating or re-

moving the armored layer, the variation of fractions describing bed stability and water flow conditions exist. In a changing regime of watercourses functioning with the rough bottom, the standard deviation of the curve correctly reflects the bed material sorting processes. Armored bottom exists for its values less than 1.6, and in the natural conditions the value does not fall below 1.3. In this case, fine material is almost completely removed from the bottom of the cover.

Below the reaches of river sources, which are the steepest sections of mountain streams, riverbeds mostly achieve hydrodynamic balance and this is the optimal condition for the development of the aquatic ecosystem. When the incised channel, with armored bottom in alluvial river is found, it often shows a limited supply of bed material. Many factors can affect the change of the river channel so the stable morphological state occurs after some time, and after many oscillations around the optimal condition. It is a period of a few to tens of years. In any case, one can determine the state and intensity of fluvial processes.

This paper presents a proposal for the implementation of the hydrodynamic balance to assess their ecological status as one of the first and basic. The assessment of the alluvial rivers hydrodynamic balance is shown on the example of the Skawa river (section above the mouth of Bystrzanka stream). Hydrodynamic balance of the channel was based on the analysis of interdependencies between riverbed bandwidth, the channel lateral and vertical layout and bed stability for the characteristic flows of the water: ( $Q_{75\%}$ ,  $Q_{50\%}$ ,  $Q_{25\%}$ ,  $Q_{10\%}$  and  $Q_{1\%}$ , bankfull and dominant flows). Bed stability analysis presented in the paper was performed using the computer program ARMOUR. Calculations were performed by comparing the critical Shields stresses characterizing all fractions of bed material to the bed shear stresses of the flowing water. On the basis of analysis of the riverbed in this section it was classified as natural.