INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH

Nr 4/1/2006, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 143–174
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Wojciech Bartnik

CHARAKTERYSTYKA HYDROMORFOLOGICZNA RZEK I POTOKÓW GÓRSKICH

Streszczenie

Tworzenie się warstwy obrukowania dna przedstawiono zmiany morfologicznych dna cieku na podstawie bezpośrednich pomiarów granulometrycznych (średnica rumowiska dennego wzrasta po przejściu fali popowodziowej), oraz na podstawie symulacji komputerowej zmian uziarnienia dennego. Ta procedura obliczeniowa bazuje na założeniach Gesslera dla określenia prawdopodobieństwa nieruszenia się ziaren w funkcji nadwyżki naprężeń krytycznych. Krytyczne naprężenia ścinające były obliczone na podstawie funkcji Wanga określonej dla rzek i potoków Podkarpacia. Obrukowanie dna jest formowane przez ta część rumowiska dennego która nie jest wymywana w czasie przepływu. Wzrost naprężeń krytycznych jest wynikiem wzrostu średnicy miarodajnej. Miąższość warstwy obrukowanej jest w przybliżeniu równa wymiarowi największego kamienia w pokrywie. Ten proces jest różny w rzekach naturalnych i w rzekach poniżej przegród. W tym wypadku proces formacji warstwy obrukowania dna jest wynikiem wyboju i towarzyszy mu zmiana spadku zwierciadła wody i głębokości. Proces ten może być uważany jako zjawisko stochastyczne. Zgodnie z Gesslerem prawdopodobieństwo nieruszenia się ziarna zależy od relatywnych krytycznych wartości naprężeń krytycznych. Tworzenia się obrukowania dna w rzekach i potokach możemy określić poprzez obliczenie następujących parametrów:

– współczynnik ukrywania się ziaren

– początek ruchu rumowiska określony na podstawie początku ruchu materiału drobnego i gruboziarnistego,

– kształt ziaren jako bezwymiarowe naprężenia w zależności od współczynnika kształtu ziaren,

– transport rumowiska wleczonego jako suma transportu poszczególnych frakcji,

– zmiana naprężeń krytycznych funkcji odchylenia standardowego krzywej przesiewu,
– prognoza obrukowania dna,
– analiza równowagi hydrodynamicznej przepływu dla którego zostaje zerwane obrukowanie dna.

Dyrektywa UE określa metody gospodarki wodnej. Jednym z głównych celów regulacji rzek i renaturyzacji jest poprawne obliczenie równowagi hydrodynamicznej w odniesieniu do analizy krytycznych naprężeń ścinających dla poszczególnych frakcji rumowiska dennego oraz masy przetransportowanej rumowiska wleczonego. Poprawne określenie krytycznych naprężeń ścinających, głębokości wody, granicznej prędkości ruchu materiału dennego powinno być powiązane z określeniem warunku początku ruchu. Artykuł przedstawia również pomiary i zalecenia które są ważne dla opisu warunków renaturyzacji Określenie warunków równowagi hydrodynamicznej stwarza podstawę do określenia parametrów renaturyzowanych rzek.

Słowa kluczowe: transport rumowiska wleczonego, naprężenia krytyczne, równowaga hydrodynamiczna, regulacja rzek i renaturyzacji

WSTĘP

Rzeki i potoki górskie są dynamicznymi i zróżnicowanymi ekosystemami, a w ostatnich latach ich wykorzystanie miało charakter jedynie gospodarczy. Spowodowało to w głównej mierze degradacją równowagi ekologicznej oraz wymuszonym przebiegiem procesów morfologicznych. Odizolowanie rzeki od reszty doliny w wyniku regulacji spowodowało w sposób znaczący odcięcie retencji dolinowej. Jak się ostatnio ocenia, negatywny wpływ działalności człowieka był tak znaczący, że większość dużych rzek w Europie została uregulowana. Powszechnie panuje przekonanie, że działania te tj. budowa zbiorników retencyjnych, regulacja rzek, obwałowania nie zapewniły pełnej ochrony przed powodzią.

Ramowa Dyrektywa Wodna rozwija nowy typ zarządzania w tym zakresie, które w przyszłości będą miały na celu zmniejszenie ryzyka powodzi, a jej zasady wprowadzania są dokumentem prawnym dotyczącym środowiska wodnego arbitralnie najważniejszym w Polsce od kilkunastu lat. Zapewnia ona i klasyfikuje środki na kontrolę czynników odziaływających na jakość wód powierzchniowych.

Monitoring i ocena zmian hydromorfoligicznych wymagają opracowania obiektywnej oceny parametrycznej. Będą to następujące elementy hydromorfologczne, które należy opisać lub monitorować:

– reżim przepływu – wielkość i dynamika przepływu,

– ciągłość rzeki – migracja organizmów wodnych, transport i sedymentacja materiału dennego (równowaga hydrodynamiczna),

– warunki morfologiczne – długość, głębokość, prędkość przepływu, rodzaj rumowiska dennego (podłoża), struktura i funkcje strefy brzegowej.

Rzeki i potoki górskie to cieki o znacznym spadku, o dużej szorstkości dennej i o wysokiej dynamice zjawisk związanych z ruchem wód wezbraniowych. W takich warunkach konieczne jest kierowanie się aktualnymi tendencjami związanymi z regulacją i renaturyzacją rzek i potoków górskich w zgodzie z Ramową Dyrektywą UE, Prawem Wodnym, Ustawą o Ochronie Środowiska i innymi ustawami dotyczącymi działań prowadzących do zapewnienia stabilnych warunków przejścia przepływów wysokiej wody. Regulacja i renaturyzacja rzek i potoków wymagają dogłębnej i kompleksowej analizy ich parametrów hydrodynamicznych w szerokim ujęciu, to jest z uwzględnieniem zjawisk towarzyszących przepływom wezbraniowym, procesów dynamicznych związanych z początkiem i ruchem rumowiska. Ulepszenie struktury koryta w procesie regulacji oraz zmiana struktury koryta w procesie renaturyzacji będą siłą napędową dla zrównoważonego działania mającego ma celu przywrócenie zdegradowanych ekosystemów rzecznych.

OCENA HYDRODYNAMICZNA

Rumowisko wleczone występujące w rzekach i potokach górskich charakteryzuje się znaczną niejednorodnością uziarnienia oraz asymetrią kształtu ziaren. Transport tych ziaren odbywa się przy dominującym wpływie sił ciężkości. Tylko duże prędkości strumienia rzecznego mogą spowodować ruch cząstek w warstwie przydennej cieku. Utrzymanie rumowiska w zawieszeniu nie jest możliwe w zakresie prędkości występujących w rzekach. Dominuje więc ruch potoczysty, posuwisty lub saltacyjny ziaren, przy czym okres spoczynku trwa z reguły znacznie dłużej niż okres ruchu. Transport rumowiska obserwuje się podczas powodzi (wezbrania), przy czym najpierw wymywane są drobne, a potem coraz większe ziarna. Tworzące się wskutek tego obrukowanie dna powoduje zwiększenie odporności dna na działanie strumienia i opóźnienie masowego transportu rumowiska. Natomiast po zerwaniu obrukowania wprawiona zostaje w ruch warstwa denna o znacznej miąższości. Kształt rumowiska gruboziarnistego

dennego w rzekach i potokach górskich jest silnie asymetryczny, przy czym dominują ziarna o kształcie płaskim (dachówkowatym, elipsoidalnym). Takie cząstki rumowiska nie układają się wyłącznie poziomo na dnie cieku, lecz często ustawiają się pod kątem do poziomu dna i wyraźnie wystają. Jego ułożenie powoduje m.in. obniżenie wartości granicznych bezwymiarowych naprężeń ścinających *(f)*. Wartości bezwymiarowych naprężeń ścinających dla cząstek asymetrycznych w ciekach górskich są wyraźnie niższe od klasycznych już wartości podanych przez Shieldsa, które zostały określone dla rumowiska o uziarnieniu jednorodnym i kształcie kulistym [Bartnik i in. 1996]. Wyznaczenie parametrów równowagi hydrodynamicznej koryta, przy której w przekroju cieku nie mamy do czynienia ani z akumulacją, ani z erozją materiału dennego, stanowi ważny problem przy rozwiązywaniu zagadnień związanych z oddziaływaniem strumienia na dno. Wyniki niektórych autorów badań wskazują, że podział pomiędzy ruchem a spoczynkiem nie może przebiegać na podstawie określenia tylko jednego wybranego parametru. W przypadku materiału niejednorodnego, a taki występuje w potokach i rzekach górskich, rumowisko denne jako materiał niejednorodny scharakteryzowany przez odchylenie standardowe $\delta > 1,3$, będzie miało tendencję do tworzenia obrukowania zwanego też opancerzeniem dna [Bartnik 1992].

Przebieg zmian morfodynamicznych wymaga określenia oporów przepływu, wartości parametrów granicznych dla warunków początku ruchu rumowiska, charakterystyki pokrywy dna szorstkiego, kształtu ziarna i charakteru zjawisk związanych z przejściem wód wezbraniowych. Jednoczesna analiza wymienionych parametrów wymaga ich zbiorczego ujęcia i przedstawienia na zasadach porównawczych tak, by móc wykazać wpływ poszczególnych czynników dla określenia warunków koryt stabilnych. Przedstawiona w niniejszym opracowaniu propozycja oceny równowagi hydrodynamicznej na podstawie określenia hydraulicznych parametrów przepływu wody i ruchu materiału dennego wychodzi naprzeciw założeniom RDW. Ocena parametryczna pozwala na scharakteryzowanie odcinków profilu podłużnego cieku z przewagą transportu rumowiska, odcinków w równowadze pomiędzy dostawą a odprowadzeniem i wreszcie odcinków potoku górskiego o przewadze akumulacji. Przeprowadzona ocena pozwoli na wybór właściwej regulacji cieku lub deregulacji na podstawie analizy równowagi hydrodynamicznej.

Tabela 1. Ocena hydrodynamiczna rzek górskich i potoków
Table 1. Hydrodynamic evaluation of mountain rivers and streams

Ocena hydrodynamiczna rzek górskich i potoków *Hydrodynamic evaluation of mountain rivers and streams*		
Współczynnik klinowania się ziaren Grain-size hiding factor	Uzależnienie położenia granicy pomiędzy ruchem a spoczynkiem ziarna w materiale różnoziarnistym od efektu klinowania się ziaren Relating the limit between movement and immobility to clogging effect in material of various grain-size	
Początek ruchu rumowiska dennego Beginning of the bedload movement	Określenie granicy pomiędzy ruchem a spoczynkiem dla drobnych i grubych frakcji na podstawie naprężeń bezwymiarowych Determining the limit between movement and immobility for fine- and coarse-grained fractions based on dimensionless stresses	
Kształt ziaren Grain shape	Uzależnienie naprężeń bezwymiarowych od współczynnika kształtu ziaren Relating dimensionless stresses to grain shape coefficient	
Transport rumowiska Bedload transport	Transport całkowity rumowiska wleczonego, jako suma transportów cząstkowych frakcji przy zmiennych naprężeniach granicznych, w funkcji odchylenia standardowego krzywej przesiewu Total dragged bedload transport, as a sum of partial fraction transports at changing critical stresses, as a function of sieve curve standard deviation	
Prognoza procesów obrukowania Prediction of armouring process	Prawdopodobieństwo nieruszenia się ziaren w zależności od nadwyżki siły wleczenia jako funkcja naprężeń granicznych do naprężeń normalnych Probability of grain immobility related to drag force surplus as a function of critical stresses to normal stresses relation	
Naprężenia graniczne Critical shear stresses	Spadek graniczny Critical slope	Napełnienie graniczne Critical depth
Analiza równowagi hydrodynamicznej Analysis of hydrodynamic balance	Przepływ zrywający obrukowanie większy od przepływu miarodajnego: stan stabilizacji Flow in which the armour layer is destroyed, higher than base flow (stable condition)	Przepływ zrywający obrukowanie mniejszy od przepływu miarodajnego: erozja wgłębna Flow in which the armour layer is destroyed, lower than base flow (deep erosion)

Metodyka obliczeń. Projektowanie parametrów przekroju poprzecznego można określić wg następujących kryteriów oceny stabilności:

– dopuszczalnych prędkości przepływu,

– dopuszczalnych sił unoszenia.

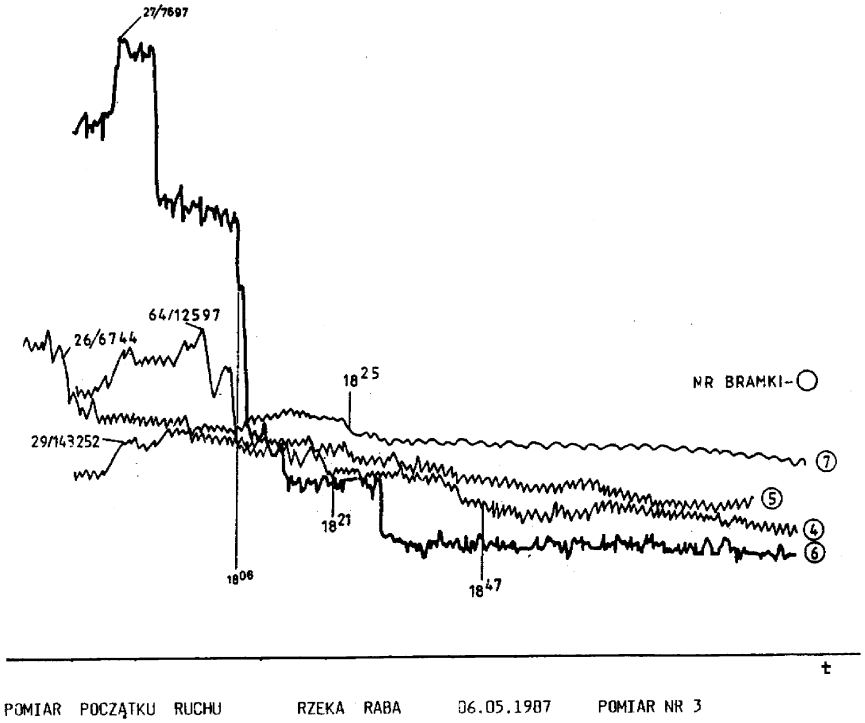
Dla cieków, w których mamy do czynienia ze zmiennym natężeniem przepływu wody i rumowiska podstawowym zagadnieniem jest wyznaczenie miarodajnego natężenia przepływu na podstawie ilości transportowanego rumowiska w danym przekroju oraz określenie zdolności transportowej cieku. Jeżeli te wielkości będą sobie równe to mamy do czynienia z równowagą hydrodynamiczną cieku. Dla takiego założenia będą określone parametry hydrauliczne koryta cieku na podstawie kryterium dopuszczalnej siły unoszenia, na podstawie obliczeń przekroju regulacyjnego na podstawie naprężeń dopuszczalnych oraz na podstawie dopuszczalnej prędkości przepływu. Parametry koryta cieku dla przeprowadzonej regulacji bliżej natury powinny się opierać na obliczeniu zdolności przepustowej koryta ze względu na mało jeszcze rozpoznane warunki przepływu przez zarośnięte części koryta. O natężeniu przepływu przez zarośnięte części koryta będzie decydował współczynnik szorstkości koryta określony dla części niezarośniętych, w korycie wody miarodajnej, w linii rozdziału pomiędzy obszarem porośniętym a nieporośniętym oraz w terenie zalewowym – porośniętym.

Naprężenia graniczne. Badania ruchu rumowiska wleczonego były prowadzone w kilku kierunkach i miały na celu wnikliwe rozpoznanie zjawiska w określeniu warunków stabilności koryta rzecznego. Rozwój badań wiąże się ściśle z doskonaleniem metod pomiarowych oraz znalezieniem równań opisujących ruch rumowiska wleczonego i początek ruchu materiału dennego [Bartnik, Michalik 2000]. Zastosowanie metody radioizotopowej, jako niemającej praktycznie żadnych ograniczeń, poza spełnieniem wymagań ze względu na ochronę radiologiczną było podstawą do wyznaczenia granicznych wartości naprężeń ścinających dla różnych frakcji.

Ponieważ w potokach i rzekach górskich spotyka się materiał wielofrakcyjny, ruch, takiego materiału zależy od udziału poszczególnych frakcji w mieszaninie. Np. początek ruchu dużych kamieni może być przyspieszony, gdy ich procentowy udział w krzywej przesiewu jest niewielki. Może również wystąpić odwrotne zjawisko, tj. opóźnienie ruchu drobnych frakcji, przy przewadze frakcji żwirowych i kamienistych. Do takich warunków hydraulicznych należało opracować

metodę, która pozwoliłaby na zmierzenie natężenia transportu masy przetransportowanego rumowiska w fali powodziowej oraz początku ruchu dla rzek i potoków górskich [Michalik 1990; Bartnik 1992].

Na rysunku 1. przedstawiono wykres zapisu natężenia promieniowania, które spada do wielkości tła po odejściu ziaren spod detektora. Liczby oznaczają numer kanału w analizatorze i częstość zliczeń w [s^{-1}].



Rysunek 1. Pomiar początku ruchu rumowiska wleczonego
Figure 1. Measurement of incipient bed load movement

Jako wyniki pomiarów otrzymuje się krytyczne naprężenia styczne dla każdej mierzonej frakcji, zgodnie ze wzorem:

$$\tau = \gamma_w hI \quad [Nm^{-2}] \tag{1.a}$$

gdzie; h – głębokość strumienia wody [m], I – spadek podłużny, γ_w – ciężar objętościowy wody.

Znając wielkość naprężeń, można wyznaczyć parametr Shieldsa f_i (tab.1) dla frakcji o średnicy d_i:

$$\tau_{gri} = f_i g \Delta\rho_s d_i \quad [Nm^{-2}] \tag{1.b}$$

Na podstawie wszystkich pomiarów początku ruchu na górskich odcinkach rzek (bez ujściowych odcinków Wisłoki i Dunajca) otrzymano zależności parametru Shieldsa f_i :

$$f_i = 0{,}033 \cdot (d_i / d_{50})^{-0.9} \tag{1.c}$$

Tabela 2. Pomiary granicznych parametrów ruchu materiału dennego na rzekach i potokach [Bartnik 1992]
Table 2. Measurement of bed load movement on rivers and streams

Rzeka	d_i [m]	f_i	τ_{okr} [Nm^{-2}]	V_* [ms^{-1}]
Targaniczanka	0,02	0,057	18,296	0,135
	0,04	0,036	23,358	0,153
	0,06	0,032	30,852	0,176
	0,08	0,029	37,582	0,194
	0,10	0,027	43,802	0,209
	0,12	0,025	49,639	0,223
	0,18	0,022	65,550	0,256
Raba	0,0025	0,069	28,057	0,167
	0,02	0,104	33,805	0,183
	0,04	0,045	29,224	0,171
	0,06	0,032	31,529	0,178
	0,08	0,026	33,688	0,183
	0,18	0,012	38,750	0,197
Wisłoka	0,00275	0,029	1,295	0,032
	0,0045	0,025	1,844	0,038
	0,009	0,019	2,845	0,050
	0,018	0,014	3,934	0,062
	0,0225	0,014	4,944	0,070
Dunajec	0,0025	0,028	1,246	0,035
	0,0075	0,023	2,757	0,052
	0,0205	0,014	4,787	0,069
	0,0265	0,013	5,641	0,075

Wyniki badań wskazują, że podział pomiędzy ruchem a spoczynkiem nie może przebiegać na podstawie określenia tylko jednego wybranego parametru. W przypadku materiału niejednorodnego, a taki występuje w potokach i rzekach górskich, używany dotychczas diagram Shieldsa w dotychczasowej formie jest w zasadzie nieprzydatny i powinien uwzględniać pełną charakterystykę zjawiska związanego z ruchem materiału dennego.

Opory przepływu. Opory przepływu zmieniają się z głębokością wody w korycie. W zależności od iloczynu wielkości siły poruszającej i naprężeń krytycznych mogą wystąpić następujące zjawiska: erozji, transportu, akumulacji lub też może wystąpić stan równowagi hydrodynamicznej koryta, kiedy to siła ciężkości poruszająca wodę w korycie będzie zrównoważona przez siłę tarcia. W przypadku ruchu rumowiska, szorstkość w korycie ulega zmianie i wartość n dla dna sztywnego przechodzi w wartość n dla dna ruchomego. Przedstawienie wielkości n jako funkcji intensywności transportu może stanowić rozwiązanie tego problemu. W tym celu autor zastosował parametr intensywności transportu Bogardi [1978]. W bezwymiarowym kształcie równanie to ma postać:

$$\Phi_s = q_B/\tau_0 v_* \left(1 - \tau_{gr}/\tau_0\right) \tag{2}$$

gdzie q_B intensywność transportu została obliczona wzorem Meyera-Petera – Müllera z rozszerzoną modyfikacją [Bartnik 1992]. Wielkość naprężeń ścinających τ_{gr} wyznaczono z pomiaru początku ruchu na Targaniczance, Wisłoce, Dunajcu i Rabie.

dla $n > 0{,}46$:

$$\Phi_s = q_B/\tau_0 \mathrm{v}_* \left(1 - \tau_{gr}/\tau_0\right) = 1{,}0 \tag{3}$$

i dla $n < 0{,}046$:

$$\Phi_s = \left(1/21{,}3n\right)^{4{,}63} \tag{4}$$

Pozwoliło to na obliczenie szorstkości n dla dna ruchomego w funkcji intensywności transportu:

$$n = 0{,}046 \ \Phi_s^{-0{,}218} \tag{5}$$

Po podstawieniu bezwymiarowego parametru transportu, szorstkość dynamiczna jest funkcją intensywności transportu q_B, nadwyżki siły unoszenia τ_{gr}/τ_o i prędkości dynamicznej v_*.

Wzrost oporów przepływu następuje w obszarze początku ruchu. Zjawisko to uwidacznia się w tzw. opóźnieniu transportu cząstek stałych. Pomimo przekroczenia naprężeń granicznych w cieku dla poszczególnych frakcji, transport rumowiska pojawia się później niż by to wynikało ze zmian przepływu wody. Jest to spowodowane w obszarze początku ruchu „wychodzeniem ziaren" o nieregularnych kształtach z pokrywy i tym samym zwiększeniem się oporów przepływu. Zjawisko „pivotingu" zostało opisane na podstawie badań laboratoryjnych przez Jamesa, por. Graf [1989], który przy obliczaniu oporów przepływu zaproponował uwzględnienie współczynnika korekcyjnego dla zmiany profilu prędkości spowodowanej wystawaniem nierównych ziaren powyżej teoretycznego dna cieku.

Współczynnik klinowania się ziaren. W rzekach i potokach występuje materiał różnoziarnisty. W efekcie przesuwania się ziaren po dnie, w czasie kształtowania pokrywy następuje klinowanie się ziaren drobnych pomiędzy ziarnami grubszymi. Występuje tu zjawisko opóźnienia ruchu drobnych frakcji. W efekcie ziarna grubsze wchodzą łatwiej do transportu, ponieważ poruszają się po drobniejszym materiale dennym, a więc w efekcie po dnie o mniejszej szorstkości. Jest to zjawisko określone poprzez tzw. „hiding factor", czyli współczynnik klinowania się ziaren albo współczynnik stabilności ziaren. Wartość zmiennych naprężeń krytycznych może być określona w sposób ogólny z następującego wzoru:

$$\varepsilon = f_i / f_m = \left(d_i / d_m\right)^{-r} \tag{6}$$

dla rzek i potoków Podkarpacia współczynnik klinowania będzie określony [Bartnik 1992]:

dla $d_i / d_m < 0{,}6$:

$$\varepsilon_i = 0{,}039\delta^{0{,}26} / f_i = 1{,}786\left(d_i / d_m\right)^{0{,}95} \tag{7}$$

dla $d_i / d_m > 0{,}6$:

$$\varepsilon_i = 0{,}028\delta^{0{,}26} / f_i = \left(d_i / d_m\right)^{0{,}314} \tag{8}$$

Graniczna liczba Froude'a. Wyprowadzony wzór dotyczy ziaren o kształtach kulistych i materiału jednorodnego. W badaniach warunków granicznych pomiędzy ruchem a spoczynkiem w korytach potoków i rzek górskich będzie to wartość graniczna, do której zmierza wartość liczby $Fr = v^2 / gh$:

$$Fr_{gr} = \left[\left(v_{gr*}^2 / g\rho_s\right)\right]\left[\left(c^2 \rho_s / g\right)\left(d / h\right)\right] \tag{9}$$

Pierwszy człon równania jest parametrem Shieldsa dla v_{*gr}, a drugi współczynnikiem prędkości Chezy'go proporcjonalnym do $(h/d)^{1/6}$. Potwierdzenie tej proporcjonalności uzyskano w badaniach terenowych.

Dla materiału gruboziarnistego:

$$Fr_{gr} = z\left(d_i / h_{igr}\right)^{1/6} \tag{10}$$

gdzie z wynosi od 1,03 do 1,51:

Dla materiału drobnoziarnistego (drobne piaski):

$$Fr_{gr} = 0{,}51\left(d_i / h_{igr}\right)^{1/6} \tag{11}$$

Podany w tym wzorze przedział dla liczby Fr_{gr}, jest wartością graniczną tej liczby od momentu ruchu pojedynczych ziaren, aż do zerwania obrukowania i pojawieniu się tzw. całkowitego (totalnego) ruchu rumowiska dennego o miąższości warstwy większej od d_m. Wzór w przytoczonej postaci może być wykorzystany przy projektowaniu koryt stabilnych na podstawie równowagi hydrodynamicznej.

Prędkość graniczna ruchu rumowiska dennego. Prędkość graniczną określono na podstawie liczby ruchliwości. Liczba ruchliwości dla rzek górskich jest bezwymiarowym parametrem w funkcji szorstkości względnej koryta. Na podstawie równań wyprowadzonych z badań początku ruchu, można określić liczbę ruchliwości z formuły:

$$\rho v_c^2 / \Delta\gamma_s d_m = 1{,}545\left(d_i / h_{igr}\right)^{-0{,}24} \tag{12}$$

Wykorzystanie znajomości warunków granicznych ruchu pomierzonych frakcji rumowiska dennego pozwoliło autorowi również na określenie warunków ruchu dla stałych wartości parametru Shields'a. Występuje tutaj duża zgodność w przebiegu tych funkcji z pomiarami i wynikami badań O' Neilla [Bogardi 1978] dla wartości f = 0,013, 0,03, 0,40, 0,06. Zjawisko to obserwuje się przy rosnącej wielkości szorstkości względnej. Można to wytłumaczyć faktem łatwiejszego wchodzenia do transportu ziaren o średnicy $d_i > d_m$:

dla materiału gruboziarnistego:

$$v_{gr} = 4{,}98 d_i^{0{,}38} h_i^{0{,}12} \tag{13}$$

dla materiału drobnoziarnistego (klinującego się):

$$v_{gr} = d_i^{0{,}38} h_i^{0{,}12} \tag{13.a}$$

Wpływ kształtu ziaren na początek ruchu. Z dotychczas opisanych parametrów, na wielkość naprężeń granicznych wpływają głównie: wielkość ziaren, wartość odchylenia standardowego krzywej przesiewu, współczynnik klinowania się ziaren, prędkość przepływu, intensywność. Istotny wpływ na wielkość naprężeń granicznych ma również kształt ziaren.

Zależność $f_m = 0{,}0123e^{1{,}6SF}$ (rys. 2) pozwala dla danego współczynnika kształtu ziaren $SF=c/(ab)^{0.5}$, występujących w korycie cieku, wyznaczyć wielkość naprężeń bezwymiarowych. Uwidoczniona została tutaj zależność, że ziarna spłaszczone typu deska, pręt wydłużony, płyta oraz ziarna elipsoidalne scharakteryzowane wg klasyfikacji (tab. 2) będą wcześniej wchodziły do transportu, niż by to wynikało z krzywej Shields'a. Natomiast dla kształtu kulistego dla SF = 0,8–1,0 otrzymano odpowiednio z tej funkcji wartość naprężeń bezwymiarowych f = 0,045–0,06, a więc potwierdzające wielkości naprężeń bezwymiarowych otrzymane przez Shields'a dla ziaren kulistych. Dalsze obniżenie wartości naprężeń granicznych może być spowodowane wysunięciem „protrusion" ziarna. Jeżeli stosunek części wysuniętej ziarna do jego średnicy wynosi 0,5, to bezwymiarowe naprężenia graniczne wyniosą odpowiednio f = 0,02. Efekt wysunięcia ziaren w materiale wielofrakcyjnym będzie również decydował o wielkości naprężeń granicznych i może stanowić wyjaśnienie obniżania się wielkości bezwymiarowych naprężeń przy rosnącej średnicy ziaren rumowiska dennego.

Dla określenia parametrów kształtu posłużono się współczynnikiem kształtu i sferyczności [Bartnik 1992]:

– współczynnikiem kształtu;

$$S_p = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}}$$

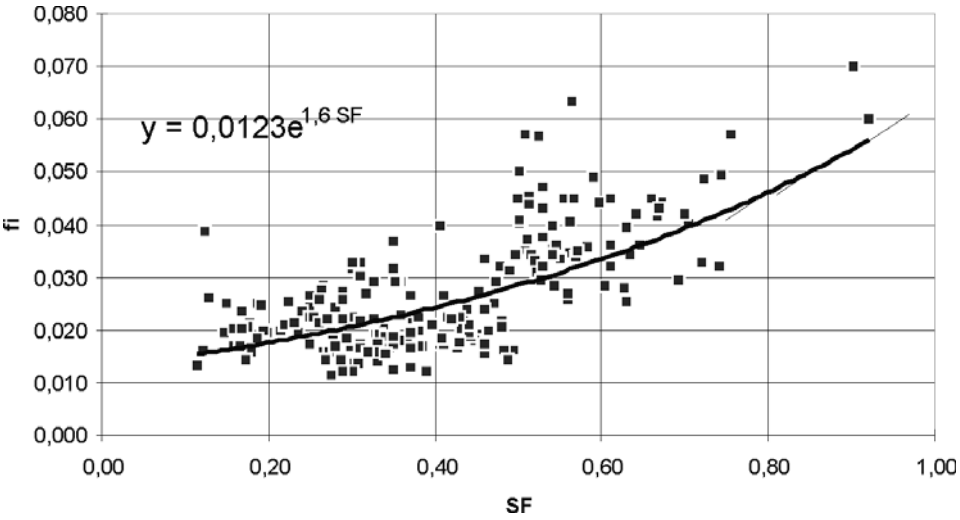
– współczynnikiem sferyczności;

$$\psi_p = \sqrt[3]{\frac{b \cdot c}{a^2}}$$

a kategorie kształtu ziaren przyjęto w wersji uproszczonej dla trzech wyróżniających się kształtów w rzekach i potokach [Michalik 1990] (tab. 3).

Tabela 3. Kategorie kształtu ziaren
Table 3. Categories of grain shape

Kategorie kształtu ziaren		b/a	c/b	Ψ_p	S_p
I	Kule	≥ 0.64	≥ 0.63	0.75-0.96	>0.70
II	Elipsy	> 0.33	> 0.4	>0.50<0.86	<0.70≥0.43
III	Dyski i pręty	< 0.64	< 0.52	< 0.70	<0.43

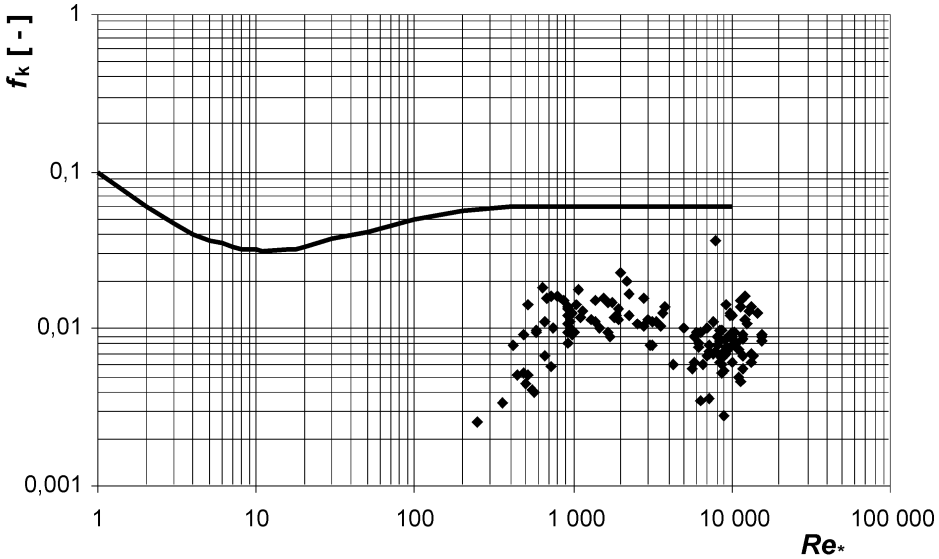


Rysunek 2. Naprężenia bezwymiarowe f_m jako funkcja współczynnika kształtu ziaren *SF*
Figure 2. Dimensionless critical shear stresses f_m as function of grain shape *SF*

Poprawne określenie kształtu ziarna ma znaczenie ze względu na powierzchnię ziarna, która narażona jest na działanie przepływającej wody, a ta z kolei wpływa na wielkość sił działających na ziarno. Badania ruchu pojedynczych ziaren w rzekach (rys. 3) dotyczą związków pomiędzy odległościami na jaką przemieszczane są ziarna przez wodę i ich wielkością oraz ich sposobem poruszania się. Siłę wleczenia, którą wywołuje przepływający strumień wody określa się dla każdego ziarna indywidualnie. Na wielkość siły wleczenia ma wpływ wielkość i kształt ziarna oraz szorstkość dna. Najczęściej badanymi siłami są siła ciężkości F_g i siła wleczenia w ruchu turbulentnym F_t, które określają następujące zależności:

$$F_g = K_1 \cdot \gamma'_s \cdot d_b^3 \qquad F_t = \tau_0 \cdot K_2 \cdot d_b^2 \tag{14}$$

gdzie: τ_0 – naprężenia styczne [N·m^{-2}], K_2 – współczynnik kształtu powierzchni ścinania.



Rysunek 3. Diagram Shieldsa z wynikami pomiarów laboratoryjnych [Michalik, Książek 2000]
Figure 3. Diagram of Shields with results measurements in laboratory [Michalik, Książek 2000]

Pomiary siły wleczenia przeprowadzono w uchylnym korycie hydraulicznym w warunkach przepływu turbulentnego. Wykazały one, że bezwymiarowe naprężenia styczne dla żadnego nie przekraczają wartości 0,06. Porównanie siły wleczenia i siły ciężkości ziarna wskazuje, że siła wleczenia jest wielokrotnie mniejsza od siły ciężkości w ruchu turbulentnym. Siła wleczenia w ruchu turbulentnym jest proporcjonalna do naprężeń stycznych z wyjątkiem ziaren mniejszych od 2 cm, gdzie siła wleczenia jest stała i dopiero po przekroczeniu wartości naprężeń wynoszących 20 $N \cdot m^{-2}$ siła wleczenia wzrasta i zaczyna być proporcjonalna do naprężeń stycznych [Michalik, Książek 2000].

Wybrane równania intensywności transportu rumowiska. Istnieje wiele wzorów, które umożliwiają przybliżoną ocenę ilościową cząstek stałych, jednak każdy wzór ze względu na zróżnicowane warunki transportu rumowiska ma charakter regionalny. Znaczne zwiększenie dokładności oceny ilościowej transportu rumowiska uzyskano po wprowadzeniu metod opartych na pomiarze radioznacznikowym dla rzek i potoków karpackich. Regionalizacja może być w pewien sposób eliminowana przez dobór odpowiedniego typu równania:

typ I: naprężenie styczne oddziałujące na dno koryta,

typ II: natężenie przepływu strumienia i spadek zwierciadła wody,

typ III: fluktuację przepływu i probabilistyczny charakter transportu ziarna,

typ IV: prędkość przepływu strumienia.

Równanie Meyera-Petera i Müllera

Badania radioizotopowe wykazały, że intensywność transportu powinna być obliczana jako suma intensywności transportu poszczególnych frakcji rumowiska dennego, w następstwie czego zmodyfikowano równanie Meyera-Petera i Müllera. Modyfikacja [Bartnik 1992; Gładki i in. 1981] dała dużą zgodność obliczeń masy transportowanego rumowiska z pomiarem [Michalik 1990]. Wspomniana modyfikacja polega na zastąpieniu parametru Shieldsa f = 0,047 przez parametr f_i dla średnicy frakcji d_i, który może być obliczony zgodnie ze wzorem (3). Kolejnym etapem modyfikacyjnym było wprowadzenie zmiennych naprężeń granicznych wg Wanga w funkcji odchylenia standardowego krzywej przesiewu. Została ona również przeprowadzona na podstawie pomiarów radioznacznikowych transportowanej masy rumowiska wleczonego na potoku Targaniczanka oraz na rzece Rabie [Bartnik 1992]. Po wprowadzeniu modyfikacji formułę MPM można zapisać:

$$g_i = \left(\frac{\rho g h_i I - f_i g \Delta\rho_s d_i}{0{,}25 \rho^{0{,}33}} \right)^{1{,}5} \Delta p_i b_i \quad [\mathrm{kNs^{-1}}] \tag{15}$$

Wartość zmiennych naprężeń krytycznych może być określona w sposób ogólny z następującego wzoru dla rzek i potoków wyniesie:

$$\text{dla } d_i / d_m < 0{,}6: \ \varepsilon_i = 0{,}039 \delta^{0{,}26} / f_i = 1{,}786 (d_i / d_m)^{0{,}95} \tag{16}$$

$$\text{dla } d_i / d_m > 0{,}6: \ \varepsilon_i = 0{,}028 \delta^{0{,}26} / f_i = (d_i / d_m)^{0{,}314} \tag{17}$$

natomiast transport całkowity będzie sumą transportów cząstkowych:

$$g_{wi} = b_i p_i g_i \tag{18}$$

$$G_w = \sum \; g_{wi} \, \mathrm{t} \tag{19}$$

Teoria i równanie Bagnolda

Teoria Bagnolda transportu rumowiska rzecznego opiera się na prawach fizyki ogólnej, dzięki czemu prowadzi do możliwości jednoznacznego określenia intensywności transportu rumowiska wleczonego. Bagnold wprowadził moc strumienia jako iloczyn średniej prędkości przepływu wody v i naprężeń stycznych na dnie koryta, wyrażonych w jednostkach masowych $\tau = \rho \cdot h \cdot I$ czyli jednostkową moc strumienia wyraża zależność:

$$\omega = \tau \cdot v \tag{20}$$

Transport rumowiska zaczyna się powyżej wartości progowej ω_0.W szerokich analizach i badaniach Bagnold stwierdził, że jednostkowa intensywność transportu rumowiska wleczonego i_b zmienia się jak (głębokość napełnienia)$^{-2/3}$ i jak (średnica ziarna)$^{-1/2}$. Dla stałej głębokości przepływu intensywność i_b zmienia się jak (moc strumienia)$^{3/2}$. Ogólnie można tę zmienność ująć w następującej postaci:

$$i_b \approx (\omega - \omega_0)^{3/2} h^{-2/3} d^{-1/2} \tag{21}$$

W celu wyeliminowania niejednorodności wymiarowej tego równania Bagnold zaproponował jego postać bezwymiarową:

$$\frac{i_b}{(i_b)_*} = \left(\frac{\omega - \omega_0}{(\omega - \omega_0)_*} \right)^{3/2} \left(\frac{h}{h_*} \right)^{-2/3} \left(\frac{d}{d_*} \right)^{-1/2} \tag{22}$$

gdzie wielkość oznaczone gwiazdką są wybrane arbitralne na podstawie wszystkich dostępnych wyników badań laboratoryjnych i terenowych i wynoszą:

$$(i_b)_* = 0{,}1 \, kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}, \;\; (\omega - \omega_0)_* = 0{,}5 \, kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \tag{23}$$

$$h_* = 0{,}1 \, m, \;\; d = 1{,}1 \times 10^{-3} \; m$$

Zależność intensywności transportu rumowiska i_b od mocy strumienia (ω-ω_0) w skali logarytmicznej jest linią prostą i pokazuje jej perfekcyjne dopasowanie do wyników eksperymentalnych przeprowadzonych zarówno w korytach laboratoryjnych, jak i na różnych rzekach i w tym również na rzece Rabie [Michalik, Książek 2000].

Prognoza obrukowania dna. Obrukowanie dna tworzy ta część materiału dennego, która nie podlega wymyciu w czasie przepływu. Jest to proces, który może być scharakteryzowany dwoma krzywymi, tj. krzywą początkową dla rumowiska niejednorodnego i krzywą końcową dla rumowiska jednorodnego określonego poprzez odchylenie standardowe krzywej przesiewu δ = 1,3. Po przejściu kolejnego wezbrania krzywa przesiewu na skutek wymieszania się uziarnienia pokrywy z podłożem może powrócić do krzywej początkowej. Rumowisko niepodlegające wymyciu stanowi około 60% powierzchni dna, natomiast grubość uzbrojenia dna odpowiada najgrubszemu kamieniowi z pokrywy. Opancerzenie dna tworzy się przez stopniowe wymywanie z dna drobnych części uziarnienia. Inaczej ten proces przedstawia się w korycie o przepływach naturalnych, inaczej poniżej zbiorników wodnych, zapór rumowiskowych oraz stopni wodnych, gdzie odpływ może być regulowany, a sam zbiornik czy budowla piętrząca odcina dopływ rumowiska do niższych partii cieku. Proces ten przebiega na znacznych długościach poniżej budowli piętrzących, a sam proces wskutek braku alimentacji rumowiska zachodzi tak długo, aż wytworzy się stan równowagi, a więc powstanie obrukowanie dna.

Tworzenie się opancerzenia dna jest możliwe w przypadku materiału wielofrakcyjnego. Obrukowanie dna tworzy ta część materiału dennego, która nie podlega wymyciu w czasie przepływu. Gessler [1971] ustalił, że prawdopodobieństwo pozostania ziarna na dnie zależy od względnych naprężeń granicznych:

$$q = \phi_p\left(\tau_{gr} / \tau_0\right) \tag{24}$$

Według Gesslera na podstawie prawdopodobieństwa nieruszania się ziarna z podłoża q_O istnieje możliwość określenia rozkładu uziarnienia obrukowania dna. Prawdopodobieństwo nieruszania się ziaren Gessler opisał funkcją:

$$q = 0{,}015x^3 - 0{,}01477x^2 + 0{,}4777x + 0{,}4921 \tag{25}$$

gdzie: x jest funkcją nadwyżki naprężeń ścinających i dla $x = \tau_{gr}/\tau_0$ można obliczyć prawdopodobieństwo q nieruszenia się ziarna z pokrywy. Funkcja ta została wyznaczona doświadczalnie. Krzywa uziarnienia pokrywa się z wykresem funkcji:

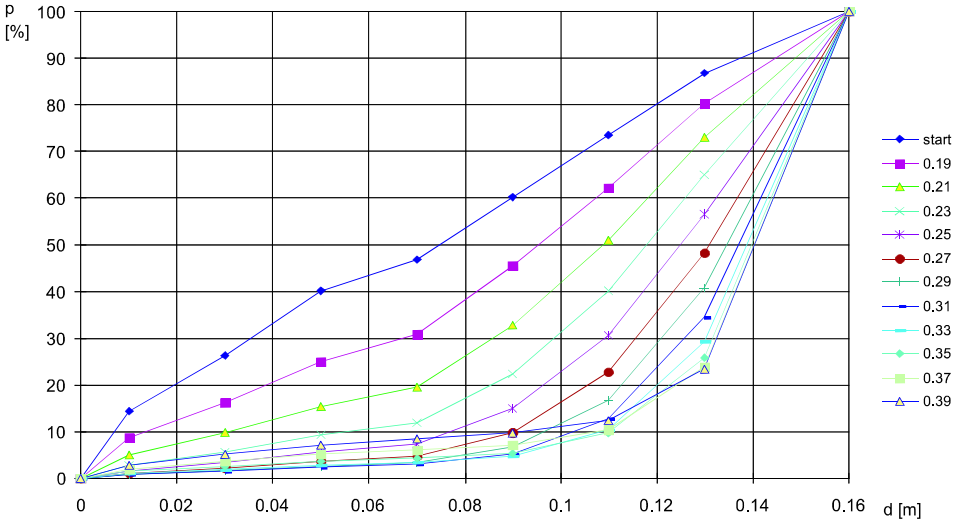
$$p_a(d) = \frac{\sum_{d\,\min}^{d} q(d)\Delta p_0(d)}{\sum_{d\,\min}^{d\,\max} q(d)\Delta p_0(d)} \tag{26}$$

gdzie: $q(d)$ – prawdopodobieństwo, że ziarna o średnicy d nie będą transportowane, p_o – funkcja gęstości rozkładu uziarnienia,

Na podstawie badań radioznacznikowych transportu rumowiska wleczonego opracowano metodę prognozowania obrukowania dna poprzez obliczenie naprężeń granicznych ruchu materiału dennego dla poszczególnych frakcji f_i ze wzoru:

$$\tau_{gr} = fig\Delta\rho_s d_i \tag{27}$$

gdzie f_i jest obliczone ze wzoru 20 i 21 i dla danych warunków można prognozować i obliczyć zmiany zachodzące w dnie koryta cieku po przejściu przepływu większego od granicznego dla ruchu poszczególnych frakcji. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów obrukowania dna oraz przeprowadzonej symulacji komputerowej (rys. 4)



Rysunek 4. Symulacja obrukowania dna (potok Tenczyński)
Figure 4. Simulation of the armouring layer formation Tenczyński stream

zmian w dnie po przejściu fali wezbrania, można określić wzrost naprężeń ścinających dla w pełni rozwiniętego obrukowania dna, tj. aż do powstaniu jednorodnego rumowiska dennego dla odchylenia standardowego σ = 1,30.

Zmianę wartości naprężeń granicznych uwzględniających proces tworzenia się obrukowania w dnie cieku można wyznaczyć na podstawie wzorów, które zostały wyprowadzone z pomiarów uziarnienia dennego, pokrywy i podłoża [Bartnik 1997]. Przy braku danych określających zależność końcową, wartość naprężeń ścinających można obliczyć z założenia, że proces zmian w uziarnieniu pokrywy przebiega aż do osiągnięcia warunku δ_k = 1,3 dla tzw. krzywej końcowej uziarnienia, po przekroczeniu której następuje zerwanie obrukowania dna i w korycie cieku wystąpi ruch masowy.

$$\tau_k = \tau_p \, 1{,}09 \, (\delta_p/\delta_k)^{-0{,}57} \tag{28.a}$$

$$\tau_k = \tau_p \, 1{,}07 \, (d_{50p}/d_{50k})^{0{,}71} \tag{28.b}$$

gdzie:

τ_k – ścinające naprężenia końcowe [N/m^2],

$\delta_{p,k}$ – odchylenie standardowe krzywej przesiewu początkowej, końcowej,

$d_{50p,k}$ – średnica frakcji rumowiska dennego początkowa, końcowa.

Wielkości naprężeń w powyższych równaniach możliwe są do obliczenia dla założenia, które wynika z warunku powstania obrukowania dna cieku i wykorzystania tego procesu w regulacji, a mianowicie:

a) odchylenie standardowe krzywej granulometrycznej rumowiska dennego δ_k jest równe 1,3 na podstawie założenia Gesslera,

b) średnica d_{50k} dla krzywej przesiewu rumowiska dennego ukształtowanego w wyniku obrukowania dna cieku wynosi 1,5–1,8 d_{50p}.

Określenie naprężeń ścinających dla profilu podłużnego z uwzględnieniem warunku powstania naturalnego obrukowania dna cieku powinno być wyznaczone dla d_{90} i tę wielkość średnicy rumowiska dennego należy wstawić do równania i obliczyć $\tau_{gr.}$ Wartość tych naprężeń granicznych będzie gwarantowała równowagę morfodynamiczą na wybranym odcinku cieku.

Taki proces obliczeniowy oparty tylko na znajomości naprężeń granicznych dla d_{90} upraszcza model oceny równowagi morfodynamicznej.

Ocena parametryczna przeprowadzona na podstawie przedstawionego arkusza oceny opartego na hydraulicznych parametrach przepływu wody i transportu pozwoli na wybór właściwej regulacji cieku lub deregulacji na podstawie analizy równowagi hydrodynamicznej.

Do tej oceny zostały opracowane programy TRANS i ARMOUR [Bartnik 1992, 2002], które w dużym stopniu ułatwią taką szczegółową ocenę. Regulację koryta głównego cieku przeprowadza się z reguły na średnią wodę roczną – wodę miarodajną $Q_{50\%}$. Jeżeli transport masowy rumowiska wleczonego, to jest zerwanie obrukowania nastąpi poniżej tego przepływu w badanym korycie, to potok będzie wykazywał tendencję do erozji wgłębnej i konieczna jest w tym wypadku stabilizacja profilu podłużnego na całej długości cieku. Natomiast w przeciwnym wypadku potok będzie potokiem stabilnym i nie będzie wymagał stabilizacji profilu podłużnego. Natomiast koryto wielkiej wody (woda stuletnia) powinno być chronione poprzez metody nietechniczne, a więc wyznaczenie strefy zagrożenia powodziowego dla zalewu wody stuletniej oraz wyznaczenie zalewu spowodowanego intensywnym spływem powierzchniowym wód opadowych przy dużych deniwelacjach terenu [Radczuk i in. 2001].

Nowe rozwiązania – kierunki i wnioski. Ramowa Dyrektywa Wodna UE(2000/60/UE) w zakresie zrównoważonego użytkowania wód jest wyzwaniem dla regulacji rzek i potoków górskich. Powstaje pytanie jak ją realizować?

Coraz częściej sięgamy do takich właśnie rozwiązań przyjaznych środowisku, przywracając rzekom ich naturalny bieg za pomocą renaturyzacji i deregulacji. Regulacja naturalna rzek i potoków górskich narażonych na silne wezbrania wymaga przewidywania zmian w dnie koryta, które mogą wystąpić po przejściu wezbrania. Wymagana jest w tym wypadku prognoza przebiegu procesów korytotwórczych, ocena intensywności transportu rumowiska wleczonego oraz ocena procesów erozji i sedymentacji w korycie.

Dotychczasowe metody regulacji technicznej w sposób znaczący zmieniały reżim i charakter cieków górskich przez wprowadzenie do koryta cieku budowli w postaci stopni, bystrotoków i zapór przeciwrumowiskowych zaopatrzonych w otwory w korpusie zapory celem przepuszczenia drobnych i średnich cząstek rumowiska wleczonego.

Dalszym postępem były konstrukcje siatkowo-kamienne i belkowo--kamienne zapór przeciwrumowiskowych. W ostatnim czasie w Austrii i we Włoszech na potokach alpejskich [Armanini i in. 1991] pojawiły się konstrukcje ażurowe z belek żelbetowych i żelaznych, które miały nowa funkcję, a mianowicie dozowały i frakcjonowały rumowisko w czasie przepływów katastrofalnych. Ich dużą zaletą jest to, że budowle szutrujące i dozujące rumowisko wleczone nie posiadają niecek wypadowych.

We Francji pojawiają się ażurowo-siatkowe zapory o konstrukcji stalowej i przypominają urządzenia przechwytujące lawiny rumowiskowe. W Japonii ażurowe zapory przeciwrumowiskowe przypominają swym wyglądem raczej urządzenia obronne-przeciwczołgowe. W USA ażurowe zapory są wykonywane z żelbetowych belek prefabrykowanych. Są to konstrukcje ażurowe z belek żelbetowych lub żelaznych. W Polsce badania nad procesem akumulacji i erozji w korycie cieku pod wpływem ażurowych stopni zapoczątkował Bielecki w latach siedemdziesiątych. Obecnie przyjmowany jest pogląd [Żbikowski, Żelazo 1993], że zadaniem obiektów służących regulacji potoków nie jest zatrzymywanie całego rumowiska. Małe przepływy powinny, ·przechodzić przez konstrukcję bez zaburzenia naturalnego stanu potoku i bez piętrzenia. Odchodzi się więc od budowy zapór, których głównym zadaniem było zatrzymanie rumowiska wleczonego na rzecz koncepcji budowania obiektów kontrolujących przebieg jego transportu [Bartnik i in. 1996] w czasie przepływów katastrofalnych. Budowle te w swych rozwiązaniach stanowią stabilizację profilu podłużnego w obrębie koryta głównego cieku. Duże zapory przeciwrumowiskowe stanowią barierę dla organizmów żywych i zmieniają morfologie koryta. Modernizacja zapór powinna iść w kierunku uzyskania łączności z korytem pierwotnym, poprzez wycięcie odpowiedniej szczeliny w korpusie sięgającej dna cieku. Nowe zapory powinny już w całości przejąć tylko funkcję kontrolną transportu rumowiska w czasie fali powodziowej celem zahamowania erozji dennej. Erozja denna powoduje bowiem, że przy znacznym wcięciu w koryto rzeka lub potok traci łączność pomiędzy strefą koryta a strefą brzegową, następuje zmiana dynamiki przepływu charakterystycznego dla ciągów siedliskowych. Brak kontaktu ze strefą brzegową wpływa negatywnie na florę i faunę siedliska.

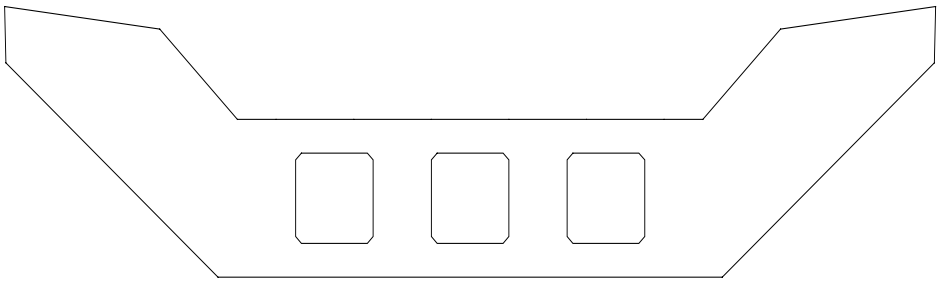
Wśród zapór nowego typu można wyróżnić:

– zapory szczelinowe (rys. 5) o pionowych otworach (jednym lub wielu), sięgających od korony zapory zwykle do poziomu pierwotnego

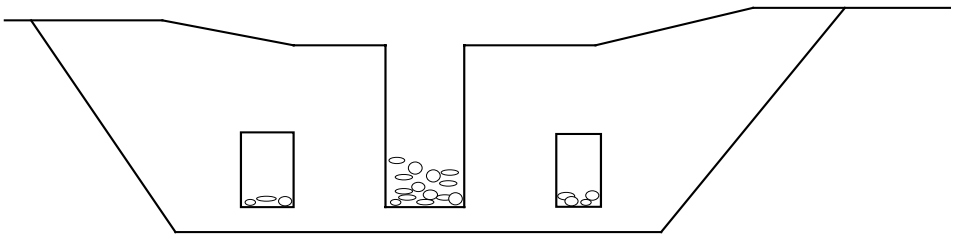
dna potoku. Zadaniem tych zapór jest regulacja szybkości transportu rumowiska. Szczeliny mają taką szerokość, aby przy normalnym stanie wody przepływała ona przez nie bez przeszkód, a uległa spiętrzeniu w czasie fali powodziowej. Na skutek spiętrzenia i efektu cofki, znaczna część rumowiska zostaje zatrzymana. Po opadnięciu fali woda przepływa przez zaporę, unosząc z sobą stopniowo nagromadzone uprzednio rumowisko,

– zapory belkowe (rys. 6) o szerokich poziomych otworach. Zadaniem tych zapór jest głównie sortowanie rumowiska i zatrzymywanie pni drzew. Wielkość otworów jest proporcjonalna do wielkości największego ziarna rumowiska, jakiemu umożliwia się przejście przez zaporę,

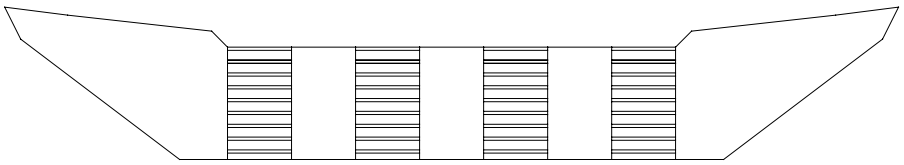
– stopnie (rys. 7) z okienkami osączającymi umieszczonymi w korpusie stopnia,



Rysuenek 5. Schemat zapory szutrującej
Figure 5. Scheme of rubble dosing dam



Rysunek 6. Schemat zapory dozujacej i szutrującej
Figure 6. Scheme of rubble dosing dam



Rysunek 7 . Schemat zapory dozującej i szutrującej
Figure 7. Scheme of rubble dosing dam

Schemat postępowania przy planowaniu renaturyzacji rzeki i doliny. Ocena parametryczna jest również clem dla określenia środków dla renaturyzacji [Bartnik in. 2004] i osiągnięcia dobrego stanu ekologicznego. Środki te należy ocenić pod względem zapewnienia morfologicznej, a w konsekwencji biologicznej poprawy stanu przekształconych wód. Tak, w tych rozwiązaniach musimy poszukiwać warunków oceny równowagi hydrodynamicznej koryta dla osiągnięcia celów szczegółowych, takich jak:

– wzrost zróżnicowania biologicznego i zwiększenie walorów przyrodniczych,
– wzrost walorów krajobrazowych, rekreacyjnych i turystycznych,
– poprawa jakości wody,
– zwiększenie możliwości retencyjnych,
– zachowanie ciągłości ekosystemu rzeki,
– racjonalizacja wykorzystania rzeki,
– ochrona przed powodzią osiedli zagrożonych wylewami,
– wyznaczenie stref zintegrowanego rozwoju gospodarczego.

Należy przeprowadzić wstępne rozpoznanie faktycznego stanu zagrożeń dla środowiska przyrodniczego w obszarze zlewni, rozeznanie celów strategicznych rozwoju i zagospodarowania przestrzennego województwa i poszczególnych powiatów zmierzające do ochrony i odbudowy zasobów przyrodniczo-kulturowych tego regionu. Wskaże ono na pilną potrzebę sporządzenia kompleksowego projektu wymagającego interwencji o cechach zintegrowanych działań w obszarach poszczególnych jednostek administracyjnych tego obszaru i zbadania uwarunkowań realizacji zamierzeń projektowych dla określenia stopnia wykonalności zadania i jego wpływu na środowisko. Wstępne

założenia projektowe określają charakter projektu, tryb postępowania, fazy i zadania związane z realizacją poszczególnych jego elementów w dziedzinie ochrony przyrody, regulacji stosunków hydraulicznych i hydrologicznych zlewni rzek w kontekście renaturalizacji obszaru przyrodniczego, koordynacji planowania przestrzennego i projektowania urbanistycznego w obszarach o unikalnych wartościach przyrodniczo-kulturowych.

W ostatnim okresie wrasta zainteresowanie przywróceniem stanu naturalnego cieku w wyniku prac renaturyzacyjnych na obszarach zmeliorowanych dolin rzecznych. Doliny tych rzek w obecnym czasie ze względu na zaistniałe zmiany gospodarczo-społeczne zostały wyłączone z intensywnej uprawy rolniczej i mogą być z powodzeniem poddane zabiegom związanym z przywróceniem bioróżnorodności w wyniku renaturyzacji.

Tabela 4. Identyfikacja stanu środowiska rzeki i doliny
Table 4. Identification state of environmentale river and valley

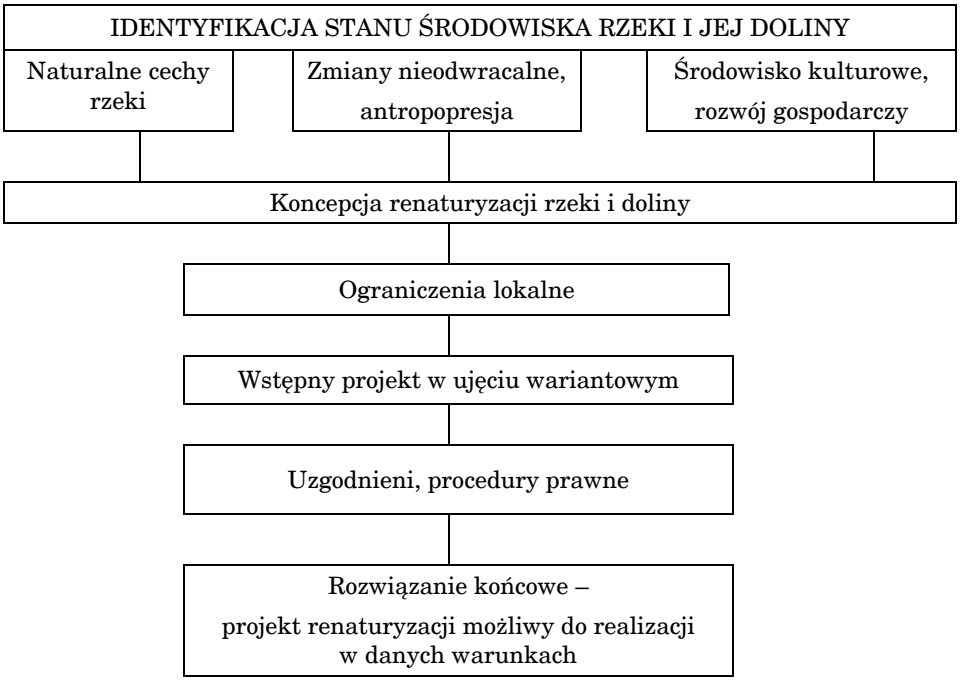
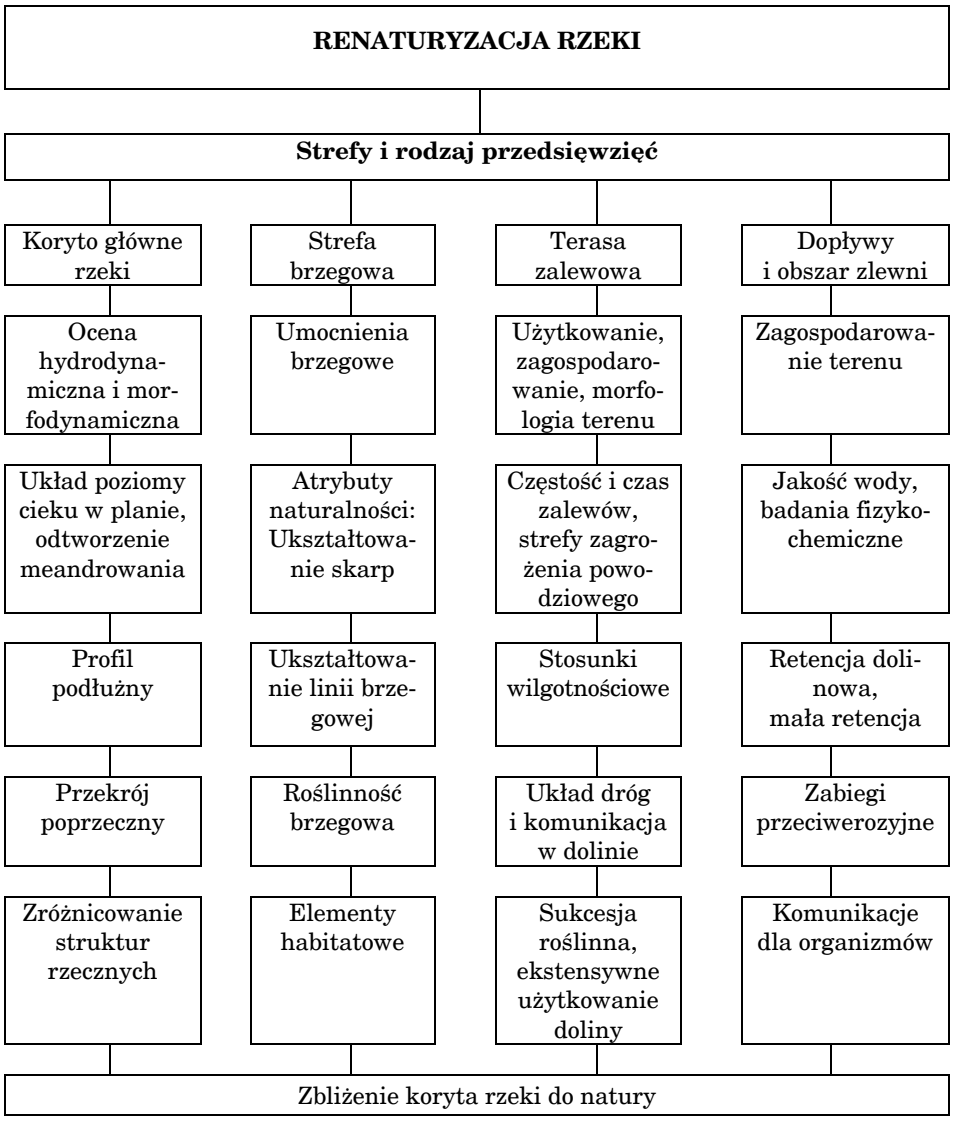


Tabela 5. Uwarunkowania renaturyzacji rzeki
Table 5. Condition of renaturralization of river



Charakterystykę działań dostosowaną do celów renaturyzacji przedstawiono zgodnie z opracowaniem Kerna [Żelazo, Popek 2002] oraz na podstawie opracowanej koncepcji renaturyzacji rzeki i doliny Nidy [Bartnik i in. 2004]. Przedstawione w tabeli 3 i 4 obszary

i rodzaje działań z zakresu renaturyzacji na badanym odcinku zostały opracowane dla potrzeb odcinka rzeki Nidy w rejonie Delty Śródlądowej. Dla utrzymania odpowiedniej jakości wód powierzchniowych przyszłe działania inżynierskie będą dotyczyły w głównej mierze działań przywrócenia dawnego biegu rzeki. Renaturyzacji powinna być ściśle powiązana z ochroną przed powodzią, dla zapewnienia zmniejszenia ryzyka wystąpienia powodzi. Dla określenia wartości ekonomicznej skutków renaturyzacji rzeki i doliny możemy czynnik ekonomiczny wyrazić jako straty wynikłe z zaniechania realizacji renaturyzacji.

Podstawowe skutki zaniechania realizacji renaturyzacji są wymierne i można je określić jako:

– postępujący proces degradacji środowiska naturalnego tego obszaru,

– brak ochrony przed powodzią terenów położonych w sąsiedztwie rzeki,

– destabilizację funkcjonowania rzeki i związane z tym istotne straty gospodarcze,

– erozję wgłębna na odcinku uregulowanym i transport rumowiska wleczonego do przekrojów poniżej położonych,

– degradację obszarów nie użytkowanych rolniczo,

– obumieranie drzew spowodowane wysokim poziomem zwierciadła wody na terenach bezodpływowych,

– brak właściwej ochrony zasobów przyrodniczych i kulturowych,

– dalszy spadek przepustowości koryta głównego na skutek zarastania brzegów.

W rzekach uregulowanych przepustowość koryta jest z reguły wystarczająca dla przepuszczenia wód katastrofalnych. Meandrowania koryta i jego charakter anastomozujący zmniejszy spadek zwierciadła wody, a co za tym idzie zmniejszy prędkość przepływu. Dla zachowania odpowiedniej przepustowości koryta konieczne jest zwiększenie przekroju poprzecznego lub rozdzielenie przepływu na przepływ na koryto uregulowane i udrożnione starorzecza. Ocena hydraulicznych skutków renaturyzacji musi być oparta w tym wypadku na analizie skutków wywołanych zmianami układu poziomego cieku, sukcesją roślinności korytowej oraz wzrostem szorstkości dennej w wyniku powstania form dennych dna piaszczystego. Na skutek zmiany hydraulicznych parametrów przepływu wody w korycie, nastąpi zmiana form dennych z formy charakterystycznej dla ciągłego transportu rumowiska dennego (dno płaskie) na kolejne formy denne

charakterystyczne dla procesu deformacji dna, o znacznie większym współczynniku szorstkości.

W projekcie należy również przewidzieć wieloetapowość planowanych zamierzeń renaturyzacyjnych wynikających między innymi z uwarunkowań hydrauliczno-hydrologicznych. Nie da się bowiem precyzyjnie określić przepustowości renaturyzowanej rzeki, czasu i wielkości zalewów. Nie znamy również reakcji środowiska przyrodniczego na zmiany wywołane renaturyzacją. Późniejsze zmiany zachodzące w krycie cieku i dolinie powinny posłużyć do weryfikacji projektu i oceny poprawności przyjętych rozwiązań. Projekt renaturyzacji będzie bowiem skutkiem rozwiązań opartych głównie na badaniach i pomiarach terenowych. Szczególne znaczenie ma tutaj symulacja przepływu wód katastrofalnych w dolinie, która może wskazać na istniejące zagrożenia powodziowej w skali mikro i w skali makro dla całej doliny cieku.

Transport rumowiska wleczonego jest podstawą dla przeprowadzenia oceny morfodynamicznej, hydrodynamicznej i ekologicznej cieków. Poprawne wyznaczenie parametrów granicznych ruchu materiału dennego oraz określenie natężenia i masy przetransportowanego rumowiska w fali powodziowej jest warunkiem umożliwiającym podjęcie prac technicznych dotyczących sposobu i warunków przeprowadzenia wód katastrofalnych i ochrony przed powodzią przyległych terenów. Rzeki górskie wyróżniają się prowadzeniem znacznych ilości rumowiska unoszonego i wleczonego w fali powodziowej. Określenie natężenia i masy przetransportowanego rumowiska w rzekach ma istotne znaczenie zarówno z technicznego, jak i ekologicznego punktu widzenia.

Urbanizacja i zabudowa osiedlowa terenów zalewowych rzek i potoków górskich spowodowała, że każde wezbranie w cieku jest klasyfikowane jako powódź. Podstawowy cel regulacji rzek i potoków górskich jakim jest bezpieczne przepuszczenie wód katastrofalnych wymaga nowych działań i nowego spojrzenia na złożoność procesów zachodzących w korycie cieku. Ocena parametryczna jest podstawą do opracowania systemów wspomagających podejmowanie decyzji odnośnie do warunków regulacji rzek i potoków oraz oceny zagrożenia powodziowego. Szczegółowo ocena ta pozwala na scharakteryzowanie odcinków profilu podłużnego cieku z przewagą transportu rumowiska i erozji wgłębnej, odcinków w równowadze pomiędzy dostawą a odprowadzeniem i wreszcie odcinków cieku o przewadze akumulacji. Jeżeli zerwanie obrukowania dna i transport masowy rumowiska

wleczonego nastąpi w poddanym analizie profilu podłużnym koryta poniżej wartości przepływu wody miarodajnej (np. $Q_{50\%}$), to ciek będzie wykazywał tendencję do erozji wgłębnej i konieczna jest w tym wypadku stabilizacja profilu podłużnego cieku. Jeżeli zjawisko transportu rumowiska wystąpi dopiero przy większych przepływach, to przy przepływie mniejszym od miarodajnego potok będzie stabilny i wówczas nie wymaga stabilizacji profilu podłużnego, a prace będą miały korzystny charakter regulacji bliskiej naturze.

SPIS OZNACZEŃ

B szerokość zwierciadła wody,
b_w szerokość pasa wleczenia,
d średnica ziaren rumowiska,
d_i średnica i-tej frakcji rumowiska,
d_m średnica miarodajna,
$d_{\%}$ średnica p% ziarna wraz z mniejszymi ziarnami,
f bezwymiarowe naprężenie krytyczne (tzw. parametr Shieldsa),
f_i bezwymiarowe naprężenie krytyczne dla frakcji rumowiska o średnicy d_i,
Fr_{gr} graniczna liczba Froude'a,
g przyspieszenie ziemskie,
n współczynnik szorstkości do wzoru na prędkość strumienia wg Manninga,
p_a rozkład uziarnienia dla opancerzenia dna,
p_o początkowy rozkład uziarnienia rumowiska dennego,
q prawdopodobieństwo pozostania ziarna na dnie lub przepływ jednostkowy,
Q natężenie przepływu strumienia,
R promień hydrauliczny dla przekroju cieku,
Re_* liczba Reynoldsa dla ziaren o średnicy d_i,
SF współczynnik kształtu ziaren,
t czas,
v_{gri} wartość v_{gr} dla ruchu i-tej frakcji,
v_* prędkość dynamiczna w pionie o głębokości h,
w prędkość opadania ziaren w cieczy,
ε_i współczynnik klinowania się ziaren f_i/f_m,
ρ gęstość wody,
ρ_s gęstość rumowiska,
$\Delta\rho_s$ gęstość rumowiska pomniejszona o gęstość wody,
δ odchylenie standardowe krzywej przesiewu $(d_{84}/d_{16})^{1/2}$,
τ naprężenia ścinające na dno koryta cieku.

BIBLIOGRAFIA

Armanini A., Dellagiacoma F., Ferreri L. *From the check dam to the development of functional check dam*. Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, Lecture Notes in Earth Sciences, Eds A.Armanini, G.Di Silvio, Springer–Verlag, Berlin–Heidelberg, 1991, s. 331–344.

Bartnik W. *Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym, początek ruchu rumowiska wleczonego*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, ser. Inżynieria Środowiska, Rozprawa habilitacyjna, 1992, 171.

Bartnik W. *Warunki kształtujące charakter ruchu materiału dennego w rzekach i potokach górskich*. Praca zbiorowa pod red. Jerzego Ratomskiego pt: *Procesy związane z ruchem w ciekach karpackich*. Warszawa 1997.

Bartnik W., Kopka W., Krok J. *Równowaga hydrodynamiczna koryta potoku powyżej zapory rumowiskowej dozującej rumowisko wleczone*. Zeszyty Naukowe AR w Krakowie, 1996, nr 45 , s. 187–196.

Bartnik W., Michalik A. *Rozwój badań ruchu rumowiska wleczonego i jego praktyczna weryfikacja*. XX Ogólnopolska Szkoła Hydrauliki – Współczesne Problemy Hydrauliki Wód Śródlądowych Komitet Gospodarki Wodnej PAN, 2000.

Bartnik W., Florek J. *Ocena warunków równowagi hydrodynamicznej potoku górskiego na podstawie analizy hydraulicznych parametrów przepływu*. Zesz. Nauk. AR w Krakowie nr 20, 2000. s. 163–176.

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, 2002, published on CD-ROM.

Bartnik W., Strużyński A., Deńko S., Zając T. *Analiza warunków przyrodniczych ocena potrzeb renaturyzacji rzeki Nidy na odcinku delty środkowej*. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska. Rocznik XIII, 2004, z. 30, s. 209–220.

Bielecki H. *Dynamika procesów akumulacji i erozji zachodzących w korycie potoku górskiego pod wpływem ażurowych stopni przciwrumpwiskowych*. Gospodarka Wodna, 1978, nr 10, s. 304–308.

Bogardi J. *Sediment transport in alluvial streams*. Acad. Kiado, Budapest 1978.

Cobeli D. *Ramowa Dyrektywa Wodna: Możliwości dla gospodarki powodziowej. „Nietechniczne metody ochrony przed powodzią”*. SGGW, Warszawa 2005.

Gessler J. *Beginning and ceasing sediment motion, “River Mechanics”*. Ed. Shen H.W. Rozdz.7, 1971.

Graf W. H. *A method to calculate total load*. Advance in Sediment Transport Ossolineum, 1981.

Graf W.H. *Flow resistance over a gravel bed, its Consequence on Initial Sediment Movement*. Inter. Workshop on Fluvial Hydraulics of Mountain Region, IAHR, Trent, Italy 1989.

Gładki H., Michalik A., Bartnik W. *Measurements of Bed Load Transport in Mountain Streams Using the Radioactive Tracers Method*. Proc. of Workshop IAHR, Rapperswil 1981, 45, 1.

Kopka W. *Badania modelowe zapór funkcjonalnych do regulacji transportu rumowiska wleczonego*. Rozprawa doktorska, Katedra Inżynierii Wodnej AR w Krakowie, 1998, maszynopis.

Krok J., Bartnik W., Kopka W. *Numerical modelling of the mountain stream channel deformation due to bed load movements*. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Pol. Wrocławskiej, 1996, z. 71/38, s. 174–185.

Michalik A. *Badania intensywności transportu rumowiska wleczonego w rzekach karpackich*. Analiza modeli empirycznych stosowanych w obliczeniach transportu rumowiska przy wykorzystaniu pomiarów radioznacznikowych. Zesz. Nauk. AR Kraków. Rozprawa Habilitacyjna nr 138, Kraków 1990.

Michalik Al., Książek L. *Drag force on individual particles on turbulent flow conditions*. 10th Int. Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Zesz. Nauk. AR Wrocław, 2000, nr 382, s. 205–215.

Parzonka Wł., Flow resistance and transport rates in alluvial riwvers. 12 –th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles.Zesz.Nauk. AR we Wrocławiu nr 481, 2004, s. 35–58.

Radczuk L., Szymkiewicz R., Jełowiecki J., Żyszkowska W. *Wyznaczenie stref zagrożenia powodziowego*. SAFEGE Wrocław 2001.

Wang F. Y. *Bed load transport in open channels*. Proc.of IAHR, Baden-Baden 1977.

Wierzbicki J. *Przyrodnicze, gospodarcze i hydrotechniczne przesłanki regulacji rzek*. Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, Warszawa 2003.

Zelazo J., Popek Z. *Podstawy renaturyzacji rzek*.Wydawnictwo SGGW Warszawa 2002.

Żbikowski A., Żelazo J. *Ochrona Środowiska w Budownictwie Wodnym*. Materiały Informacyjne, Ministerstwo Ochrony Środowiska i Zasobów Naturalnych, Warszawa 1993.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Bartnik
Katedra Inżynierii Wodnej
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji
Akademii Rolniczej w Krakowie

Recenzent: *Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Parzonka*

Wojciech Bartnik

HYDROMORPHOLOGICAL CHARACTERIZATIONS OF RIVERS AND STREAMS

SUMMARY

The formation of an armouring layer can be observed on the base of morphological changs by direct measurements of granulometry (grain diameter generally grows after flood) or by computer simulation of changes of the grain sieve curve. This procedure is based on the Gessler's analysis of the probability of grain movement, on the basis of the shear stress of the acting water. The critical shear stress is calculated using the Wang function developed for Carpathian streams. The armouring layer is formed by that part of non-cohesive bed material, which is not washed away during the flow. The increase in critical shear stress is due to the increase of the mean diameter d_m as small fractions are washed out from the bed. The thickness of the armouring layer is approximately equal to the size of the largest stones of the layer. This process in rivers with natural flow is different from this one below reservoirs; in the former case it takes place at a significant distance below dams. In this case, the armouring layer formation causes bed scouring, linked with a change in the water slope and depth. This scouring may be assumed to be a stochastic process. According to Gessler, the probability that a grain will not be moved from the bottom depends on relative critical shear stress. We can observed hydrodynamic evaluation of a mountain river and stream by calculation:

– grain-size hiding factor relating the limit between movement and immobility to clogging effect in material of various grain-size,

– beginning of the bedload movement determining the limit between movement and immobility for fine- and coarse-grained material based on dimensionless stresses,

– grain shape relating dimensionless stresses to grain shape coefficient,

– bedload transport as total dragged bedload transport, as a sum of partial fraction transports

– at changing critical stresses, as a function of sieve curve standard deviation,

– prediction of armoring process, probability of grain immobility related to drag force surplus as a function of critical stresses to normal stresses relation,

– analysis of flow with hydrodynamic balance in which the armour layer is destroyed,

Directives of EU do not impose methods of habitat and species conservation. The only criterion is the maintenance of favorable conservation status for them. That means that the area of habit must be stable in long term or increasing, and its quality must be maintained. The restoration processes are welcomed. One of the most important aims when preparing river training and renaturalization is the correct calculating of hydrodynamics balance of the bed with respect to the analysis of critical shear stress for bed material fractions and of capacity of bed load transport.

The correct determination of critical shear stress, of critical depth of water, of critical velocity in non-uniform materials is strictly connected with the incipient motion of bed load. This paper presents investigations and measurement which are important to describe the condition of renaturalization. According to hydrodynamic balance under natural conditions new parameters of river renatulization parameters were created.

Key words: bedload movement, critical shear stress, hydrodynamic balance, river training and renaturalization