Stan środowiska rzek południowej Polski i możliwości jego poprawy – wybrane aspekty
red. Bartłomiej Wyżga, Instytut Ochrony Przyrody PAN, Kraków, 2008

1

WCINANIE SIĘ RZEK POLSKICH KARPAT W CIĄGU XX WIEKU

Bartłomiej Wyżga

Abstrakt: Rzeki Polskich Karpat cechowała w XX wieku tendencja do wcinania się i w wielu ich odcinkach obniżanie się dna było szczególnie szybkie w drugiej połowie stulecia. Zaburzenie pionowej stabilności rzek było wynikiem zwiększenia ich zdolności transportowej w toku prac regulacyjnych przy równoczesnym zmniejszeniu się dostawy rumowiska do koryt. W niektórych rzekach eksploatacja żwirów z koryt dodatkowo zmniejszyła ilość materiału dennego dostępnego do transportu fluwialnego. Tam, gdzie energia przepływów wezbraniowych była niewystarczająca do zniszczenia zabudowy regulacyjnej brzegów i po regulacji rzeki zachowały stabilną pozycję w planie, obniżanie się dna koryta przebiegało w dość jednostajnym tempie. W rzekach o dużej energii okresy pogłębiania się uregulowanego koryta przeplatały się z okresami jego bocznej migracji i zahamowania obniżania się dna, następującymi po zniszczeniu zabudowy regulacyjnej brzegów. Posuwając się w górę rzek karpackich obserwuje się coraz późniejsze wystąpienie głównej fazy pogłębiania się koryt. Było to wynikiem późniejszej regulacji wyższych odcinków rzek, działania erozji wstecznej oraz wzrostu lesistości górskich części zlewni w drugiej połowie stulecia. Wzrost zagrożenia powodziowego poniżej wciętych odcinków rzek i ograniczenie możliwości akumulacji osadów pozakorytowych w dnach dolin rzek karpackich to najważniejsze niekorzystne efekty pogłębienia się koryt zaznaczające się w skali regionalnej. Niezbędne są zmiany w gospodarce wodnej prowadzonej na rzekach karpackich, które umożliwiłyby zmniejszenie ich zdolności transportowej i przywrócenie warunków do retencji wód wezbraniowych i akumulacji osadów pozakorytowych w obszarach zalewowych.

Słowa kluczowe: wcinanie się rzek, regulacja koryt, dostawa rumowiska, zagrożenie powodziowe, sedymentacja pozakorytowa, gospodarka wodna

http://rcin.org.pl

1. Wstęp

W ciekach o aluwialnym dnie zmiany pionowego usytuowania koryta są wypadkową zdolności transportowej cieku i jego zasilania rumowiskiem. W XIX wieku rzeki polskich Karpat cechowała wyraźna tendencja do agradacji [Wyżga, 1993a]. Nadbudowywaniu dna rzek towarzyszył wzrost szerokości koryt, a w wielu odcinkach także dzielenie się nurtu na kilka odnóg (ryc. 1.1) [Klimek, Trafas, 1972; Szumański, 1986; Wyżga, 1993a]. Cechująca ówczesne rzeki tendencja do agradacji świadczy o ich przeciążeniu transportowanym rumowiskiem, a charakter osadów korytowych wskazuje na ich depozycję przez gwałtowne wezbrania o wysokich przepływach kulminacyjnych [Wyżga, 1993a, 2001a].

W XX wieku rzeki karpackie cechowała tendencja do obniżania się dna koryt (ryc. 1.1) [Punzet, 1981; Klimek, 1983; Wyżga, 1991, 2001a]. W wyniku wcinania się

Ryc. 1.1. Budowa brzegu środkowej Raby w podcięciu w Winiarach przedstawiająca sedymentacyjny zapis agradacyjnej i erozyjnej tendencji rzeki w ostatnich dwóch stuleciach. Płytka roztoka została wycięta w górnej części profilu osadów pozakorytowych i wypełniona masywnym żwirem mniej więcej na przełomie XIX i XX wieku, w czasie kulminacji agradacyjnej tendencji rzeki. Wysokie usytuowanie tej roztoki ponad lustrem wody we współczesnym korycie świadczy o głębokim wcięciu się rzeki w ciągu ostatniego stulecia. Znaczki na sznurku rozciągniętym wzdłuż podcięcia rozmieszczone co 1 m.

Fig. 1.1. Structure of a cutbank of the middle Raba at Winiary showing a sedimentary record of the aggradational/degradational tendencies of the river channel from the last two centuries. The shallow braid was eroded in the upper part of the sequence of overbank deposits and filled with massive gravel at about the turn of the 20th century, with the culmination of the aggradational river tendency. A high position of the braid above the low-water level in the contemporary channel testifies to the deep incision of the Raba over the last century. Marks on the rope stretched along the cutbank are spaced at 1 m intervals.

http://rcin.org.pl

rzek nastąpiła istotna zmiana morfologii koryt oraz funkcjonowania cieków, co pociągnęło za sobą szereg niekorzystnych następstw widocznych w korytach i dnach dolin rzek karpackich [Froehlich, 1980; Klimek, 1983; Wyżga, 1991, 2001a].

Tendencję do erozji wgłębnej w ciągu XX wieku, a zwłaszcza w jego końcowych dekadach, stwierdzono w wielu rzekach z różnych regionów świata. W niektórych przypadkach było możliwe przypisanie tej tendencji pojedynczemu lub dominującemu czynnikowi, takiemu jak: eksploatacja żwirów z koryta [Bull, Scott, 1974; Collins, Dunne, 1989; Sear, Archer, 1998], przegrodzenie rzeki zbiornikiem zaporowym [Williams, Wolman, 1984], regulacja koryta [Emerson, 1971; Brookes, 1987; Simon, 1989], wzrost lesistości zlewni [Liébault, Piégay, 2001] lub zaprzestanie zrzutu osadów poflotacyjnych do koryta [Knighton, 1989]. Jednakże znacznie częstsze są sytuacje, gdy wcięcie się rzeki było wynikiem dwóch lub więcej czynników zaburzających stan równowagi dynamicznej, często działających w różnych skalach czasowych i przestrzennych [np. Bravard i in., 1997; Landon i in., 1998; Rinaldi, 2003; Surian, Rinaldi, 2003].

W niniejszym artykule omówiono rozmiary i przebieg wcięcia się rzek karpackich w ciągu XX wieku, w oparciu o dane o zmianach pionowego położenia ich koryt z wielu posterunków wodowskazowych. Przeanalizowano informacje uzyskane w toku wcześniejszych badań, formułując wnioski odnośnie przyczyn tego zjawiska oraz ich względnego znaczenia. Przedstawiono także skutki wcięcia się rzek karpackich, zwłaszcza te widoczne w skali regionalnej. Rozpoznanie niekorzystnych efektów wcięcia się rzek jest niezbędne dla formułowania odpowiednich działań zaradczych i rewitalizacyjnych, natomiast identyfikacja przyczyn obniżania się dna cieków ma kluczowe znaczenie dla powodzenia działań rewitalizacyjnych.

2. Obszar badań i tło historyczne

Większość rzek odwadniających karpacką część dorzecza górnej Wisły ma swe źródła w Beskidach o fliszowym podłożu i wysokościach sięgających 1725 m n.p.m. w części zachodniej i 1346 m n.p.m. w części wschodniej. Jedynie Dunajec i niektóre z jego dopływów mają źródła w masywie Tatr o znacznym udziale skał krystalicznych w podłożu i wysokościach dochodzących do 2655 m n.p.m. (ryc. 1.2). Pomiędzy rzekami odwadniającymi zachodnią i wschodnią część polskich Karpat istnieją znaczne różnice [Klimek, 1979] odzwierciedlające odmienną fizjografię zlewni w obu obszarach (ryc. 1.2). W części zachodniej przeważają obszary górskie; rzeki mają tu duże spadki, płyną w korytach utworzonych z materiału grubożwirowego i cechują się wysokimi wartościami jednostkowej mocy strumienia przy przepływach wezbraniowych. W części wschodniej główne rzeki karpackie mają długie odcinki rozwinięte w obrębie pogórzy i przedpola Karpat i cechują się mniejszymi spadkami, drobniejszym materiałem dennym i mniejszą jednostkową mocą strumienia przy przepływach wezbraniowych.

Średnie roczne sumy opadów w prawobrzeżnej części dorzecza górnej Wisły wynoszą od 1200-1900 mm w Tatrach do 600-700 mm na przedpolu Karpat [Niedźwiedź,

http://rcin.org.pl

Obrębska-Starklowa, 1991], natomiast odpowiednie wartości współczynnika odpływu zmieniają się od ponad 60% w zlewniach tatrzańskich do 20-30% na obszarze przedpola gór [Dynowska, 1991]. W zachodniej części dorzecza, cechującej się stosunkowo częstym napływem oceanicznych mas powietrza, wezbrania są najczęściej powodowane przez letnie opady. W części wschodniej, o bardziej kontynentalnym klimacie, notuje się częste występowanie wezbrań roztopowych o umiarkowanej wielkości i stosunkowo rzadkie występowanie dużych wezbrań deszczowych w okresie lata.

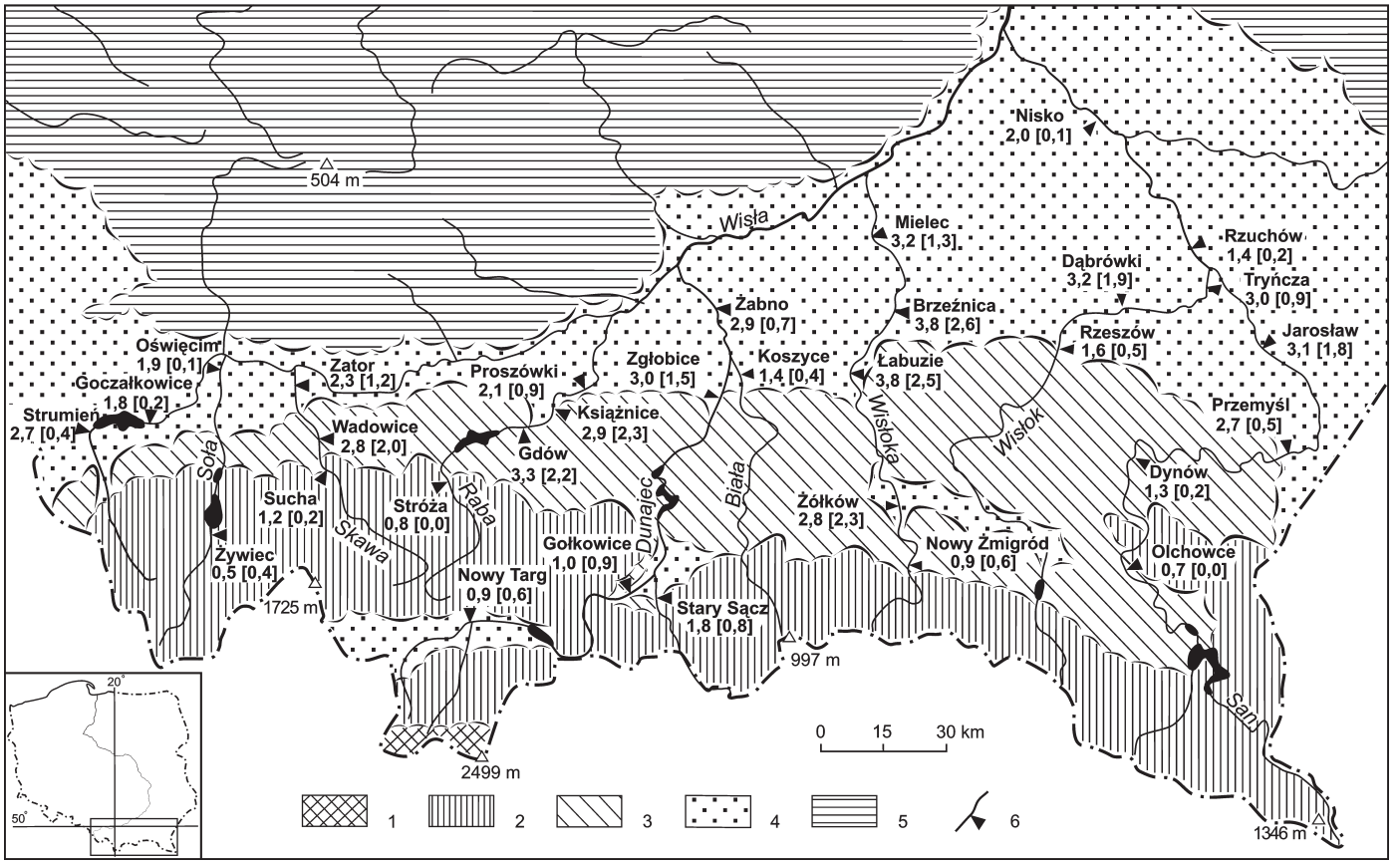
Trzy ekonomiczno-demograficzne uwarunkowania wywarły znaczący wpływ na ewolucję rzek karpackich w XX wieku. Po pierwsze, u schyłku XIX wieku karpacka część dorzecza górnej Wisły stanowiła rolniczy region o dużym zaludnieniu [Pietrzak, 2005]. Powodowało to silne dążenie do rolniczego wykorzystywania terenów nadrzecznych i ochrony den dolin przed powodziami, które zaowocowało podjęciem intensywnych prac regulacyjnych na rzekach karpackich z początkiem XX wieku [Kędzior, 1928]. Po drugie, szybkie uprzemysłowienie i urbanizacja południowej Polski po drugiej wojnie światowej były przyczyną dużego zapotrzebowania na kruszywo. Ponieważ aluwia rzek karpackich są jedynym źródłem żwiru w regionie, w ciągu co najmniej dwóch dziesięcioleci po wojnie zapotrzebowanie to zaspokajano, wydobywając żwir z koryt rzecznych [Rinaldi i in., 2005]. Trzeci czynnik stanowiło gwałtowne wyludnienie wschodniej części polskich Karpat w połowie lat 40. XX wieku, które umożliwiło wzrost lesistości zlewni. To z kolei było przyczyną znacznego zmniejszenia się dostawy rumowiska do koryt rzecznych w tym obszarze [Lach, Wyżga, 2002].

3. Metody badań

W pogórskich i przedgórskich odcinkach karpackich dopływów Wisły obserwacje wodowskazowe prowadzono przez cały XX wiek w ponad dwudziestu posterunkach (ryc. 1.2). Rozmiary oraz przebieg zmian pionowego usytuowania koryt w tych odcinkach określono na podstawie zmian minimalnych rocznych stanów wody w posterunkach wodowskazowych [Punzet, 1981; Klimek, 1983; Wyżga, 1991, 2001a]. Ponieważ obserwowana zmienność minimalnych przepływów w rzekach karpackich może wyjaśniać jedynie pewne odchylenia od generalnych trendów minimalnych stanów, nie zaś same trendy [Wyżga, 1997], zmienność minimalnych rocznych stanów w ciągu wieloletnim można traktować jako odzwierciedlenie erozyjnych lub agradacyjnych tendencji koryt tych rzek.

W górskich odcinkach rzek karpackich w niewielu posterunkach prowadzono obserwacje wodowskazowe przez cały XX wiek (ryc. 1.2), co utrudnia ustalenie czasu zapoczątkowania tu pogłębiania się koryt oraz jego rozmiarów. Nieliczne dane hydrometryczne z tych odcinków rzek uzupełniono zatem informacjami uzyskanymi w wyniku porównania wysokości dna kartograficznie datowanych paleokoryt oraz koryt współczesnych, a także szczytów dawnych i współczesnych łach korytowych [Zawiejska, Wyżga, 2008 – w tym tomie].

http://rcin.org.pl



Ryc. 1.2. Obniżenie się (w metrach) minimalnych rocznych stanów wody głównych rzek karpackich w ciągu XX wieku oraz [w nawiasach] w jego drugiej połowie jako wskaźnik pogłębienia się ich koryt. 1 – góry wysokie; 2 – góry średnie i niskie; 3 – pogórza; 4 – kotliny śródgórskie i przedgórskie; 5 – wyżyny; 6 – posterunki wodowskazowe.

Fig. 1.2. Dimensions (in metres) of channel incision of main rivers of the Polish Carpathians during the 20th century and in its second half [in brackets] inferred from the lowering of minimum annual water stage at gauging stations on the rivers. 1 – high mountains; 2 – mountains of intermediate and low height; 3 – foothills; 4 – intramontane and submontane depressions; 5 – uplands; 6 – water-gauge stations.

http://rcin.org.pl

Zaistniałe w XX wieku zmiany geometrii planarnej oraz przekroju koryt rzek karpackich udokumentowano w licznych opracowaniach [np. Krzemień, 1981; Szumański, 1986; Klimek, 1987; Wyżga, 1991, 1993a-c, 2001a] wykorzystujących informacje z dawnych map, zdjęć lotniczych i planów regulacji koryt, jak również wielokrotnych pomiarów przekrojów wodowskazowych wykonywanych przez służbę hydrologiczną.

Na podstawie porównania charakteru facjalnego datowanych kartograficznie osadów korytowych środkowej Raby oraz osadów współczesnych wnioskowano o zmianach warunków depozycyjnych istniejących w czasie przechodzenia fal wezbraniowych [Wyżga, 1993a-c, 2001a]. Próby pobrano z krótkiego odcinka doliny w celu uniknięcia zniekształcającego wpływu zmian osadów wzdłuż biegu rzeki na analizowane zmiany charakteru sedymentacji w czasie. Zmiany charakteru sedymentacji korytowej podobne do opisanych ze środkowego biegu Raby obserwowano także w innych rzekach polskich Karpat [np. Lach, Wyżga, 2002].

Umiejscowienie i czas prowadzenia przemysłowej eksploatacji żwiru z koryt, objętości wydobytego materiału, jak również późniejsze dostosowanie się koryt zostały udokumentowane dla dwóch rzek karpackich, w których eksploatacja taka była szczególnie intensywna [Augustowski, 1968; Osuch, 1968; Rinaldi i in., 2005].

Wpływ wcięcia się rzek na przepływy wezbraniowe badano za pomocą kilku metod umożliwiających analizę czasowych trendów zależności pomiędzy kulminacyjnymi przepływami fal wezbraniowych notowanymi w górnym i dolnym końcu odcinka rzeki o zmienionej morfologii oraz powiązanie tych trendów ze zmianami pionowego położenia koryta [Wyżga, 1996, 1997]. W niniejszym artykule przedstawiono porównanie przepływów wezbraniowych o określonej powtarzalności notowanych w dwóch posterunkach wodowskazowych na Wisłoce w okresach obserwacji cechujących się małym i dużym stopniem wcięcia się rzeki w odcinku pomiędzy tymi posterunkami.

Zbadano także wpływ wcięcia się rzek na warunki sedymentacji pozakorytowej, analizując zaistniałe zmiany charakterystyk przepływów wezbraniowych w przekrojach wodowskazowych reprezentatywnych dla rzek odwadniających zachodnią i wschodnią część polskich Karpat. Analizą objęto zmiany: (i) procentowego udziału przepływu przenoszonego w strefie pozakorytowej przekrojów wodowskazowych, (ii) częstotliwości zatapiania dna doliny przy określonych przepływach, (iii) względnej wysokości stanów wezbraniowych ponad dnem rzeki, oraz (iv) prędkości przepływu w strefie pozakorytowej [Wyżga, 2001b; Lach, Wyżga, 2002].

4. Rozmiary wcięcia się rzek karpackich w ciągu XX wieku

Analiza zmian minimalnych rocznych stanów wody w posterunkach wodowskazowych wskazuje, że w dolnym i środkowym biegu karpackich dopływów Wisły obniżanie się dna koryt rozpoczęło się przeważnie na początku XX wieku [Punzet, 1981; Wyżga, 1991] i dotychczas doprowadziło do wcięcia się rzek o 1,3-3,8 m (ryc. 1.2). Na większości tych rzek występują przekroje, w których pogłębienie się koryta wy-

http://rcin.org.pl

niosło około 3 m, a największe obniżenie się dna zanotowano w posterunkach Łabuzie i Brzeźnica na Wisłoce. W wielu przekrojach obniżanie się dna rzek było szczególnie szybkie w drugiej połowie stulecia (ryc. 1.2).

W drugiej połowie stulecia obniżanie się dna rzek zaznaczyło się także w górnym biegu niektórych karpackich dopływów Wisły [Lach, Wyżga, 2002; Krzemień, 2003; Kukulak, 2003] oraz w ich beskidzkich i podhalańskich dopływach [Soja, 1977; Froehlich, 1982; Rinaldi i in., 2005]. W większości posterunków, w których obserwacje wodowskazowe prowadzono tu przez cały XX wiek, główna faza obniżania się dna rzek miała miejsce w drugiej połowie stulecia. W posterunku Żółków na Wisłoce, z 2,8 m wcięcia się rzeki w ciągu całego stulecia aż 2,3 m miało miejsce pomiędzy 1964 rokiem i początkiem lat 80., kiedy średnie tempo obniżania się dna przekraczało 10 cm/rok (ryc. 1.2, 1.7) [Lach, Wyżga, 2002]. Na podstawie analizy zmian minimalnych stanów wody w posterunkach wodowskazowych (ryc. 1.2) oraz obserwacji terenowych można stwierdzić, że w górskim biegu rzek pogłębienie się koryt wyniosło 0,5-3,5 m i było bardzo zróżnicowane przestrzennie. Występują tu także nieliczne odcinki nieuregulowane lub odcinki ze skalnym korytem, w których rzeki zachowały pionową stabilność w ostatnich dziesięcioleciach [Zawiejska, Wyżga, 2008 – w tym tomie]. W górnym biegu głównych rzek karpackich oraz w ich górskich dopływach, obniżanie się dna rzek doprowadziło w wielu ich odcinkach do rozcięcia aluwiów i przekształcenia koryt aluwialnych w koryta skalne [Lach, Wyżga, 2002; Krzemień, 2003; Rinaldi i in., 2005]. Tam, gdzie rzeki płyną po piaskowcowym podłożu, obniżanie się ich dna uległo zahamowaniu wraz z rozcięciem aluwiów. Pogłębianie się koryt trwało natomiast nadal w odcinkach, w których dno rzek tworzą skały podłoża o małej odporności i aż do 3,5 m obniżenia się dna Czarnego Dunajca stwierdzono w odcinku tej rzeki podścielonym nieskonsolidowanymi iłami plioceńskimi [Zawiejska, Wyżga, 2008 – w tym tomie].

5. Przyczyny wcinania się rzek karpackich w XX wieku

Szybkie wcinanie się rzek polskich Karpat wskazuje, że w XX wieku ich zdolność transportowa znacznie przekraczała zasilanie tych rzek rumowiskiem. Na taką sytuację, odmienną od istniejącej w XIX stuleciu, złożyło się kilka czynników.

5.1. Wzrost zdolności transportowej rzek spowodowany regulacją koryt

Chociaż lokalne regulacje rzek karpackich prowadzono już w XIX wieku, to zakrojone na szeroką skalę prace regulacyjne rozpoczęto w 1904 r. i kontynuowano je do lat 30. [Kędzior, 1928]. W tym okresie prace te prowadzono głównie w dolnym i środkowym biegu karpackich dopływów Wisły. Polegały one na prostowaniu koryt przekopami przecinającymi niektóre zakola, zwężaniu koryt i umacnianiu brzegów wklęsłych kamiennymi umocnieniami oraz zastępowaniu odcinków wieloramiennego koryta sztucznym jednonurtowym korytem. Na przedpolu gór regulacjom koryt towa-

http://rcin.org.pl

rzyszyła lub poprzedzała je budowa wałów przeciwpowodziowych. Ta faza regulacji spowodowała największe przekształcenie koryt w przedgórskich odcinkach karpackich dopływów Wisły. Na przykład, w przedgórskim odcinku Dunajca jego bieg uległ skróceniu o około 10%, a szerokość koryta zmniejszono o 1/3 [Zawiejska, Wyżga, 2008 – w tym tomie]. W przedgórskim odcinku Raby bieg rzeki skrócono o 15%, a koryto znacznie zwężono, natomiast w pogórskim odcinku zmiany szerokości i długości koryta były stosunkowo niewielkie, choć w wyniku regulacji koryto wielonurtowe zostało tu zastąpione korytem jednonurtowym [Wyżga, 1991, 1993a].

Po przerwie w okresie drugiej wojny światowej i bezpośrednio po jej zakończeniu, prace regulacyjne wznowiono w latach 50. W drugiej połowie stulecia objęto nimi głównie środkowy i górny bieg głównych rzek karpackich oraz ich górskie dopływy. W pogórskich odcinkach karpackich dopływów Wisły druga faza regulacji doprowadziła do znacznego zwężenia koryt i skrócenia biegu rzek. Na przykład, odcinek Raby pomiedzy Dobczycami a Gdowem skrócono w latach 1955-1987 o 15%, a przeciętna szerokość koryta zmalała tam ze 140 do 60 m [Wyżga, 2001a]. Gdyby uregulowane koryto w tym odcinku miało taką samą przepustowość jak koryto przedregulacyjne, to przytoczone zmiany spowodowałyby zwiększenie jednostkowej mocy strumienia przy przepływie pełnokorytowym o około 170%. W rzeczywistości wzrost jednostkowej mocy strumienia musiał tam być jeszcze większy, gdyż regulacja zwykle wiązała się ze zwiększeniem przepustowości koryta (z korytem regulacyjnym wymiarowanym na przepływ 10-letni w obszarach zurbanizowanych i 2-5-letni w obszarach niezurbanizowanych [Raczyński, 1989]). W górskich odcinkach rzek karpackich regulacje prowadziły do zwężenia koryt i zastępowania ich wielonurtowych odcinków sztucznym jednonurtowym korytem [Krzemień, 1981; Zawiejska, Krzemień, 2004; Zawiejska, Wyżga, 2008 – w tym tomie].

Zwiększenie spadku rzek i zwężenie ich koryt w toku prac regulacyjnych spowodowało wzrost jednostkowej mocy strumienia. Koncentracja przepływu, uprzednio w wielu odcinkach dzielonego pomiędzy osobne roztoki lub koryta, doprowadziła natomiast do zmniejszenia oporów przepływu wynikających z kształtu koryta [por. Bathurst, 1982] i zwiększenia części energii przepływu, która mogła być wydatkowana na transport rumowiska. Łącznym efektem zmian spowodowanych regulacją koryt był wzrost prędkości przy określonym natężeniu przepływu [Wyżga, 1993b, 2001a], a zatem i zdolności transportowej rzek.

5.2. Zmniejszenie się dostawy rumowiska do koryt

Współczesne osady korytowe rzek karpackich są bardziej gruboziarniste i lepiej wysortowane od osadów z XIX wieku; ponadto, powierzchnie współczesnych łach korytowych są pokryte brukiem korytowym, natomiast w osadach łach z XIX wieku nie stwierdzono poziomów bruków korytowych [Wyżga, 1993a-c, 2001a]. Wspomniane różnice mogłyby jednak być odnoszone nie tylko do zmian zasilania rzek rumowiskiem,

http://rcin.org.pl

lecz również do zmian warunków hydraulicznych spowodowanych regulacją koryt. Dlatego też znaczenie pierwszego z tych czynników można wykazać, porównując geometrię koryta oraz charakter osadów korytowych rzek nieuregulowanych z różnych okresów. Takie dane przedstawiono [Wyżga, 2001a] w odniesieniu do środkowego biegu Raby z drugiej połowy XIX wieku, przed rozpoczęciem prac regulacyjnych, i z połowy XX wieku, gdy Raba zniszczyła swą zabudowę regulacyjną i uformowała naturalne koryto.

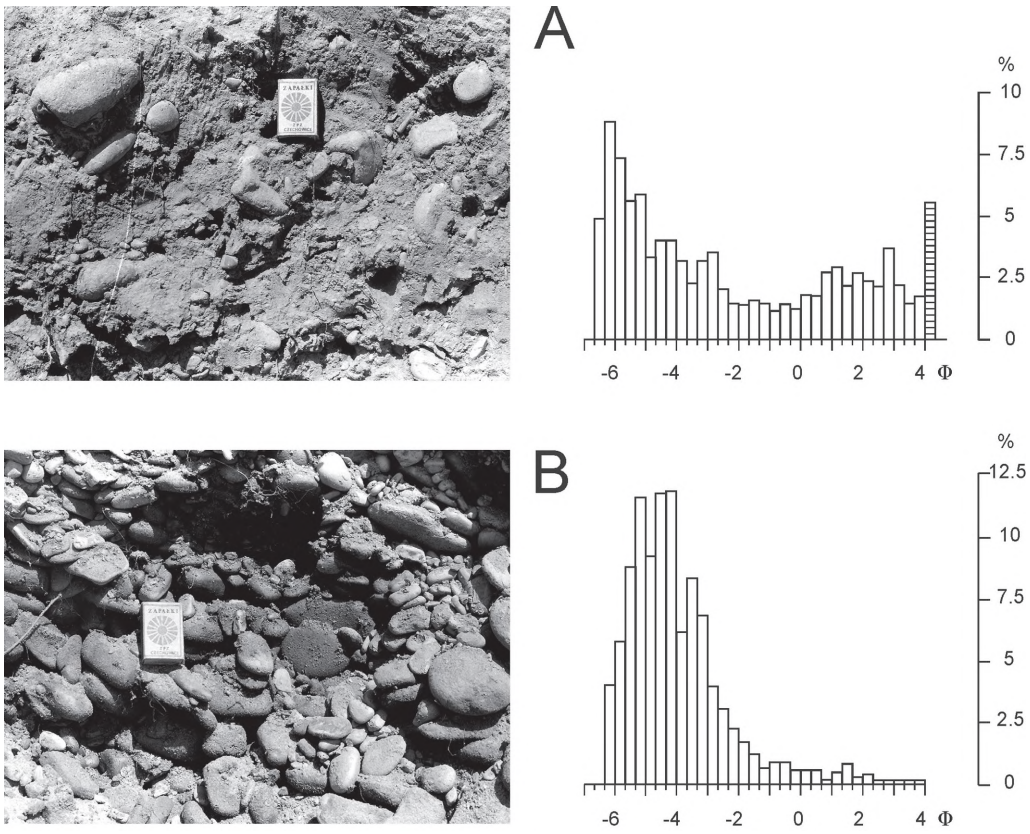
W drugiej połowie XIX wieku Raba w środkowym biegu płynęła prostym lub roztokowym korytem (wskaźnik krętości SI = 1,12). Było ono szerokie i płytkie. Natomiast Raba z połowy XX wieku wykazywała wyraźną tendencję do meandrowania. W latach 1932-1955 długość koryta w odcinku Dobczyce-Gdów zwiększyła się o 22%, co wiązało się ze wzrostem wskaźnika krętości do 1,31 i zmniejszeniem się spadku rzeki. Zmianom tym towarzyszył wzrost głębokości koryta kompensujący zmniejszenie się spadku rzeki. Średnia odległość pomiędzy kolejnymi miejscami przerzutu nurtu z jednej strony koryta na drugą zmniejszyła się niemal o połowę w porównaniu z sytuacją w przedregulacyjnym korycie z 1878 roku. Zmiany geometrii planarnej rzeki były powiązane ze zmianami przekroju poprzecznego koryta; w posterunku Gdów iloraz szerokości do głębokości koryta zmniejszył się w latach 1928-1963 z 40 do 32 [Wyżga, 1993a].

Według Schumma [1969], zmiany parametrów geometrycznych koryta są wynikiem zmian wielkości przepływu wody i/lub obciążenia rzeki transportowanym rumowiskiem. Wzrost krętości i głębokości koryta Raby oraz zmniejszenie się spadku rzeki i długości fali meandra jednoznacznie wskazują na zmniejszenie się obciążenia rzeki w ciągu pierwszej połowy XX wieku [Wyżga, 2001a]. Jednocześnie zmniejszenie się ilorazu szerokości do głębokości koryta wskazuje na zmniejszenie się udziału obciążenia dennego w całkowitym obciążeniu rzeki [Wyżga, 1993a].

W drugiej połowie XIX wieku na łachach korytowych Raby były deponowane żwiry o normalnym i luźnym upakowaniu (por. Church, 1978) i bimodalnym rozkładzie uziarnienia (ryc. 1.3A). Żwiry te były bardzo źle wysortowane, a w ich obrębie nie stwierdzono poziomów bruków korytowych. Takie osady musiały być deponowane przez gwałtowne wezbrania o wysokich przepływach kulminacyjnych, które transportowały duże ilości materiału dennego [Wyżga, 1993a]. Przeciążona materiałem klastycznym rzeka transportowała w obciążeniu dennym nie tylko frakcje żwirowe, lecz również znaczną ilość piasku. Po przejściu szczytu fali transportowany materiał denny był gwałtownie deponowany, a szybkie opadanie wód wezbraniowych uniemożliwiało jego sortowanie.

Osady łach meandrowych krętej rzeki z połowy XX wieku były silnie zróżnicowane pod względem teksturalnym. Znacznie zmalał wówczas udział żwirów luźno upakowanych w materiale dennym na rzecz żwirów ciasno upakowanych i żwirów niewypełnionych (ryc. 1.3B), które nie występowały w korycie z XIX wieku. Osady z połowy XX wieku cechował mniejszy udział frakcji piaszczystej i lepsze wysortowanie, a w ich obrębie zaznaczała się obecność imbrykowanych otoczaków i poziomów bruków ko-

http://rcin.org.pl



Ryc. 1.3. Żwiry łach środkowej Raby i histogramy ich uziarnienia (w procentach wagowych): (A) masywne żwiry o luźnym upakowaniu z drugiej połowy XIX wieku, o bimodalnym rozkładzie uziarnienia; (B) unimodalne żwiry niewypełnione z lat 50. XX wieku. Wielkość ziarna osadów przedstawiono w jednostkach Φ. Poziomą szrafurą przedstawiono nierozdzielone frakcje najdrobniejsze.

Fig. 1.3. Bar gravels of the middle Raba River and histograms of their grain-size distribution (in weight frequency per cent): (A) massive, underloose gravels from the second half of the 19th century showing bimodal grain-size distribution; (B) unimodal, openwork gravels from the 1950s. Sediment size is expressed in Φ units. Hatched area in the histogram of sample A represents percentage of undivided fines.

rytowych. Zaistniałe w pierwszej połowie XX wieku zmiany charakteru sedymentacji korytowej świadczą o zmniejszeniu się w tym okresie obciążenia rzeki oraz gwałtowności wezbrań.

Regulacja koryta środkowej Raby przeprowadzona pomiędzy 1955 i 1987 rokiem znacząco zmieniła warunki hydrauliczne w rzece i tendencja do zmniejszania się udziału frakcji piaszczystej w osadach łach kontynuowała się w ciągu drugiej połowy stulecia, doprowadzając do znacznej zmiany układu facji osadów korytowych [Wyżga, 1993a, b, 2001a]. Ustało formowanie się żwirów luźno upakowanych, coraz większego znaczenia nabierała natomiast depozycja żwirów ciasno upakowanych oraz formowanie się bruków korytowych i skupień otoczaków.

http://rcin.org.pl

W dolinach innych rzek karpackich również stwierdzono podobne zmiany charakteru sedymentacji korytowej prowadzące do stopniowego wzrostu średnicy ziarna materiału dennego oraz rozwoju depozycji żwirów o ciasnym upakowaniu i formowania się bruków korytowych w ciągu XX wieku [zob. Lach, Wyżga, 2002]. Takie zmiany są wynikiem ograniczenia dostawy rumowiska do koryt [np. Dietrich i in., 1989; Lisle i in., 1993] i są charakterystyczne dla rzek, w których uprzednio wystąpiła faza intensywnego zasilania rumowiskiem [Knighton, 1989; Madej, Ozaki, 1996].

Do zmniejszenia dostawy rumowiska do Raby i innych rzek karpackich przyczyniło się szereg zmian w zagospodarowaniu ich zlewni [Wyżga, 1991, 1993a, 2001a]. Orka w kierunku zgodnym z nachyleniem stoków była stopniowo zastępowana przez orkę wzdłuż poziomic, wprowadzono także terasowanie stoków. Wypas bydła i owiec w lasach, częsty w XIX wieku, zaniechano po drugiej wojnie światowej. W połowie lat 40. nastąpiło wyludnienie wschodniej części polskich Karpat (górskie partie zlewni Białej, Wisłoki, Wisłoka i Sanu) i w konsekwencji znaczna część areału pól uprawnych została tam zamieniona w łąki i pastwiska lub zalesiona [Lach, 1975]. Na przykład, w beskidzkiej części zlewni górnej Wisłoki lesistość zwiększyła się z 30% w 1938 r. do 67% w 1995 r. [Lach, Wyżga, 2002], a w zlewni górnego Sanu wzrosła pomiędzy 1937 i 1997 rokiem z 48% do 77% [Kukulak, 2004]. Dostawa rumowiska z tych zlewni musiała zmaleć nie tylko w wyniku zmian pokrywy roślinnej na stokach, lecz również wskutek zmniejszenia się działalności ludzkiej w tym obszarze. Na przykład, wraz z zaprzestaniem użytkowania dróg polnych, zarosły one trawą i krzewami i stopniowo przestały funkcjonować jako szlaki szybkiego odprowadzania wody i zwietrzeliny ze stoków [Lach, Wyżga, 2002].

Inną z przyczyn zmniejszenia się dostawy rumowiska do koryt rzek karpackich w XX wieku była bezpośrednia ingerencja człowieka w te rzeki [Klimek, 1987; Wyżga, 2001a]. Trasy regulacyjne karpackich dopływów Wisły wytyczano tak, aby uniemożliwić podcinanie zboczy dolin, stożków napływowych dopływów i progów wyższych teras [Kędzior, 1928]; wraz ze stabilizacją brzegów koryt musiało to ograniczyć ilość rumowiska dostarczanego do rzek w wyniku bocznej migracji ich koryt. Zabudowa

Tabela 1.1. Maksymalne przepływy Wisłoki o danej częstotliwości pojawiania się w posterunkach wodowskazowych Łabuzie i Brzeźnica, ustalone na podstawie okresów obserwacji z lat 1921-1955 oraz 1956-2000

	Łabuzie		Brzeźnica	
	1921-1955	1956-2000	1921-1955	1956-2000
$Q_{1,5}$	385	272	370	295
$Q_{2,33}$	525	360	505	410
Q_5	720	575	690	630
Q_{10}	880	745	850	800
Q_{20}	1035	910	990	960

Q_X oznacza przepływ o danym okresie powtarzalności

http://rcin.org.pl

brzegów potoków górskich i wznoszenie zapór przeciwrumowiskowych na potokach, szczególnie częste w zachodniej części polskich Karpat, musiały zmniejszyć ilość rumowiska dostarczanego z wyższych części zlewni. Ponadto, poczynając od 1936 roku na karpackich dopływach Wisły utworzono kilka zbiorników zaporowych (ryc. 1.2). Przechwytywały one całość rumowiska wleczonego i większość rumowiska unoszonego dostarczanego z wyższych odcinków rzek [Łajczak, 1994], powodując tym samym przerwanie ciągłości transportu rumowiska w korytach i wypuszczanie niedociążonych wód ze zbiorników [Kondolf, 1997].

Wreszcie, zmiany przepływów wezbraniowych formowanych w górskich i pogórskich częściach zlewni również musiały wpłynąć na ilość rumowiska dostarczanego do rzek i warunki jego transportu. Istniejący zapis maksymalnych rocznych przepływów rzek karpackich od 1921 roku wskazuje na zmniejszenie się przepływów wezbraniowych w ciągu ostatnich 80 lat i w niniejszym artykule przedstawiono takie dane dla Wisłoki i Skawy odwadniających, odpowiednio, wschodnią i zachodnią część polskich Karpat. W posterunku Łabuzie na Wisłoce średnie roczne wezbranie ($Q_{2,33}$) z lat 1956--2000 było mniejsze o 31% w porównaniu ze średnią z lat 1921-1955 (tab. 1.1), natomiast w posterunku Wadowice na Skawie odpowiednie zmniejszenie średniego rocznego wezbrania wyniosło jedynie 8%. Przy niewielkiej zmianie lesistości zlewni Skawy w ciągu XX wieku, zmniejszenie się przepływów wezbraniowych na tej rzece najprawdopodobniej było wynikiem zmian w rozkładzie opadów wywołanych modyfikacją cyrkulacji atmosferycznej nad Europą Środkową [por. Kaszewski, Filipiuk, 2003]. Na podstawie analizy przepływów wezbraniowych Raby wykazano wcześniej, że wyraźne zmniejszenie się kulminacji wezbrań na tej rzece w latach 1951-1980 było powiązane ze wzrostem czasu trwania niskich przepływów wezbraniowych, odzwierciedlając zastąpienie wysokich, krótkotrwałych fal wezbraniowych z początku tego okresu falami dłuższymi, o mniejszych przepływach kulminacyjnych w jego drugiej części [Wyżga, 2001a]. Znacznie większy stopień zmniejszenia maksymalnych przepływów Wisłoki musiał być wynikiem wzrostu lesistości jej zlewni, sprzyjającego wyrównywaniu odpływu, oraz analogicznych zmian w rozkładzie opadów [por. Wyżga, 1997]. Wraz z obniżeniem się kulminacji wezbrań dostawa rumowiska ze zlewni rzek karpackich musiała ulec zmniejszeniu. Jednocześnie dłuższe utrzymywanie się niskich przepływów wezbraniowych sprzyjało wymywaniu drobniejszych ziarn z materiału dennego i odprowadzaniu ich do niższych odcinków rzek. Ten drugi mechanizm musiał być szczególnie aktywny poniżej zbiorników zaporowych.

5.3. Eksploatacja żwiru z koryt rzecznych

Od połowy XX wieku częstą praktyką w rzekach karpackich stała się eksploatacja żwiru z koryt. Szczególnie duże ilości materiału dennego wydobyto w pierwszych dwóch dziesięcioleciach po drugiej wojnie światowej z Wisłoki i jej dopływu Ropy [Augustowski, 1968; Osuch, 1968; Rinaldi i in., 2005], w których skład granulome-

http://rcin.org.pl

tryczny żwiru był szczególnie przydatny do produkcji betonu. W latach 1941-1966 z kilkukilometrowego odcinka Ropy w sąsiedztwie Biecza wydobyto co najmniej 1 mln m^3 materiału dennego i eksploatację zakończono tam wraz z całkowitym wyczerpaniem się zasobów żwiru w korycie w połowie lat 60. [Augustowski, 1968]. Z kolei, w latach 1955-1964 z koryta Wisłoki w jej dolnym i środkowym biegu wydobyto 2,1 mln m^3 żwiru [Osuch, 1968]. Z tej ilości aż 1,5 mln m^3 osadu wydobyto z 30-kilometrowego odcinka rzeki usytuowanego u jej wlotu do Kotliny Sandomierskiej.

Objętość osadu wydobytego z Ropy i Wisłoki jest ogromna, gdy porówna się ją z ilością materiału dennego zgromadzoną w ich korytach i usunięcie tego osadu wywarło znaczny wpływ na funkcjonowanie obu rzek. Objętość osadu pozyskanego z Ropy odpowiadała usunięciu 1-metrowej warstwy żwiru z koryta o 40-metrowej szerokości w 25-kilometrowym odcinku rzeki. Wydobycie takiej ilości osadu ze stosunkowo krótkiego odcinka rzeki było możliwe dzięki zwiększeniu spadku koryta powyżej miejsca eksploatacji [por. Kondolf, 1997] i wywołanym przez to wzroście natężenia transportu rumowiska dennego. W wyniku eksploatacji żwiru dno rzeki w Bieczu obniżyło się o 1,5 m, a koryto aluwialne uległo przekształceniu w koryto skalne [Augustowski, 1968]. Od miejsca eksploatacji erozja wgłębna postępowała zarówno w górę, jak i w dół rzeki, tak że na początku lat 80. skalne koryto występowało już na długości kilkudziesięciu kilometrów jej biegu [Rinaldi i in., 2005].

Na podstawie oszacowań natężenia transportu rumowiska w Wisłoce stwierdzono, że całkowite uzupełnienie objętości osadu wydobytego z jej koryta mogłoby nastąpić w ciągu około 500 lat [Osuch, 1968]. W 30-kilometrowym odcinku rzeki z najbardziej intensywną eksploatacją objętość pozyskanego osadu odpowiadała 68-centymetrowej warstwie materiału dennego usuniętego na 77 m szerokości koryta z okresu przed rozpoczęciem eksploatacji [Osuch, 1968]. Gwałtowne pogłębianie się koryta Wisłoki rozpoczęło się równocześnie z zapoczątkowaniem intensywnej eksploatacji żwiru i w drugiej połowie stulecia rzeka w środkowym biegu wcięła się o około 2,5 m [Rinaldi i in., 2005]. Obniżenie się dna rzeki odzwierciedlało kilka czynników, w tym zwiększenie jej zdolności transportowej wskutek zwężenia koryta budowlami regulacyjnymi [Wyżga, 1997, 2001b] oraz zmniejszenie dostawy rumowiska z wyższego odcinka Wisłoki spowodowane zmianami użytkowania ziemi w górskiej części zlewni [Lach, Wyżga, 2002] i eksploatacją żwiru z koryta Ropy [Rinaldi i in., 2005]. Dwa fakty podkreślają jednak znaczenie eksploatacji osadów z koryta Wisłoki dla spowodowania wcięcia się tej rzeki. Największe obniżenie się dna rzeki, dokonane zarówno w ciągu całego XX wieku, jak i w jego drugiej połowie, miało miejsce w odcinku Wisłoki z najbardziej intensywną eksploatacją osadów z koryta (ryc. 1.2 – posterunki Łabuzie i Brzeźnica). Ponadto, wśród głównych rzek polskich Karpat to właśnie Wisłoka cechuje się największym pogłębieniem się koryta w XX wieku (ryc. 1.2), mimo że wszystkie te rzeki podobnie poddano regulacji i w wielu z nich (z wyłączeniem Wisłoki) dostawa rumowiska dennego z górskiej części zlewni została przerwana wskutek przegrodzenia rzek zbiornikiem retencyjnym.

http://rcin.org.pl

Ryc. 1.4. Usunięcie całej objętości łachy żwirowej usytuowanej naprzeciw podcinanego brzegu wklęsłego środkowej Raby, przeprowadzone w celu wyeliminowania zacieśnienia przepływu i odsunięcia nurtu od podcinanego brzegu.

Fig. 1.4. Skimming of the gravel bar positioned against an undercut concave bank in the channel of the middle Raba River undertaken in order to eliminate flow confinement and move the thalweg away from the bank.

W latach 70. zakazano przemysłowej eksploatacji żwiru z koryt rzecznych, wciąż jednak pozyskiwano z nich mniejsze ilości materiału dennego. W celu utrzymania rzek w obrębie wytyczonych tras regulacyjnych wielokrotnie ponawiano wybieranie całej objętości łach żwirowych usytuowanych naprzeciw podcinanych wklęsłych brzegów koryt (ryc. 1.4) [Wyżga, 2001a]. Częstą praktyką, zwłaszcza w zachodniej części polskich Karpat, był nielegalny pobór żwiru z koryt [Radecki-Pawlik, 2002]. Chociaż działania takie były rozproszone wzdłuż koryt, ich znaczna częstotliwość powodowała, że musiały się one w znacznym stopniu przyczynić do deficytu rumowiska w rzekach.

5.4. Wzrost podatności materiału dennego na uruchomienie spowodowany ingerencją człowieka w koryta rzek

Współcześnie rzeki polskich Karpat cechuje obecność bruków korytowych i skupień otoczaków na powierzchni dna, a także ciasne upakowanie materiału dennego pod brukiem korytowym. Te cechy zmniejszają mobilność osadu [Laronne, Garson, 1976; Reid i in., 1985; Richards, Clifford, 1991] i ich niezaburzone występowanie w korytach odgrywa kluczową rolę w zapobieganiu uruchamiania ziarn materiału dennego. Jednakże w ostatnich kilkudziesięciu latach zarówno bruki korytowe, jak i wewnętrz-

http://rcin.org.pl

ną strukturę osadów korytowych wielokrotnie niszczono w trakcie prac regulacyjnych oraz eksploatacji żwirów z koryt [Wyżga, 1991, 2001a]. W trakcie regulacji formowano koryta o jednolitym spadku i trapezoidalnym przekroju, przepychając spychaczami bardzo duże ilości materiału dennego w poprzek koryt. Przy obecnej tendencji karpackich dopływów Wisły do meandrowania, koryta o takim kształcie są nietrwałe i w rezultacie działania takie wielokrotnie powtarzano w celu zapobieżenia meandrowaniu nurtu i ochrony wklęsłych brzegów uregulowanych koryt przed erozją. Z kolei, przejazd pojazdów po dnie rzeki w trakcie eksploatacji żwirów z koryt powodował niszczenie bruku korytowego i odsłonięcie drobnych ziarn na działanie przepływu. Wybieranie dużych otoczaków z powierzchni łach, prowadzące do usunięcia ochronnej warstwy obrukowania dna i zmniejszenia średniej średnicy osadów korytowych, było szczególnie częste w rzekach Podhala [Dudziak, 1965]. Wszystkie te czynniki ułatwiały uruchamianie i transport materiału dennego, wzmacniając tendencję do wcinania się rzek.

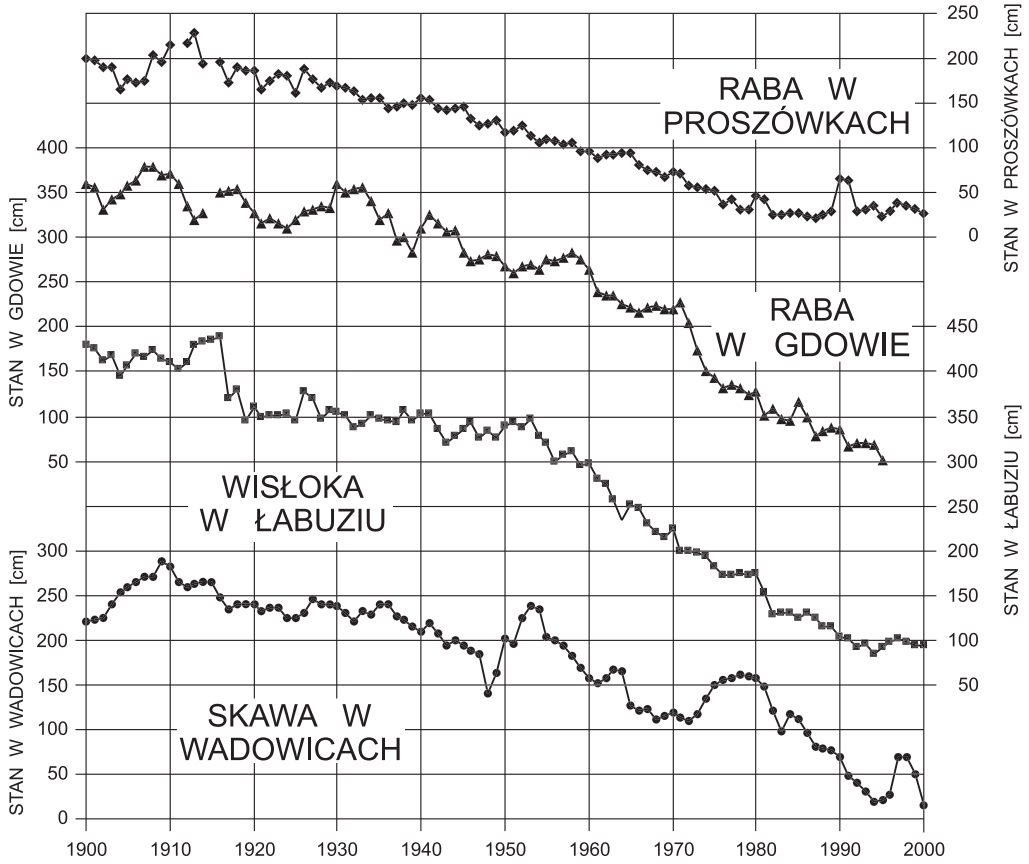
6. Przestrzenne zróżnicowanie przebiegu i czasu wystąpienia wcinania się rzek

Wzdłuż biegu karpackich dopływów Wisły, a także pomiędzy tymi rzekami zaznaczają się istotne różnice przebiegu i czasu wystąpienia pogłębiania się koryt w XX wieku i poniżej omówiono trzy aspekty tego zróżnicowania. Po pierwsze, przebieg obniżania się dna rzek zmieniał się wzdłuż ich biegu [Wyżga, 1991, 1993b]. Ilustruje to porównanie zmian minimalnych rocznych stanów Raby w posterunku Proszówki w dolnym biegu rzeki oraz w posterunku Gdów w jej środkowym biegu (ryc. 1.5). W dolnym biegu rzeki obniżanie się dna rzeki przebiegało w dość jednostajnym tempie, natomiast w środkowym biegu wcięcie się rzeki było wynikiem szeregu oddzielnych epizodów pogłębiania koryta przedzielonych okresami stabilizacji dna lub jego agradacji. Podobną różnicę przebiegu pogłębiania się koryt stwierdzono pomiędzy rzekami odwadniającymi wschodnią i zachodnią część polskich Karpat [Wyżga, 2001b] i w niniejszym artykule zilustrowano ją na przykładzie posterunku Łabuzie na Wisłoce oraz posterunku Wadowice na Skawie (ryc. 1.5), przy czym oba te posterunki są zlokalizowane mniej więcej w 1/3 całkowitej długości tych rzek powyżej ich ujścia do Wisły (ryc. 1.2). W Łabuziu od początku lat 50. miało miejsce dość jednostajne obniżanie się dna Wisłoki. Natomiast w Wadowicach w ciągu XX wieku zaznaczyły się trzy długie okresy wcinania się Skawy przedzielone krótkimi epizodami agradacji jej dna.

Te różnice w przebiegu pogłębiania się koryt są najprawdopodobniej związane ze zróżnicowaniem spadku i energii rzek. W swych przedgórskich odcinkach rzeki karpackie mają mniejsze spadki i cechują się niższymi wartościami jednostkowej mocy strumienia przy przepływach o określonej powtarzalności niż w odcinkach pogórskich. Znaczne różnice spadku i jednostkowej mocy strumienia zaznaczają się także pomiędzy rzekami odwadniającymi wschodnią i zachodnią część polskich Karpat [Klimek, 1979; Wyżga, 2001b], odzwierciedlając odmienną hipsometrię ich zlewni oraz różnice odległości pomiędzy obszarami źródłowymi a ujściem tych rzek do Wisły (ryc. 1.2).

http://rcin.org.pl

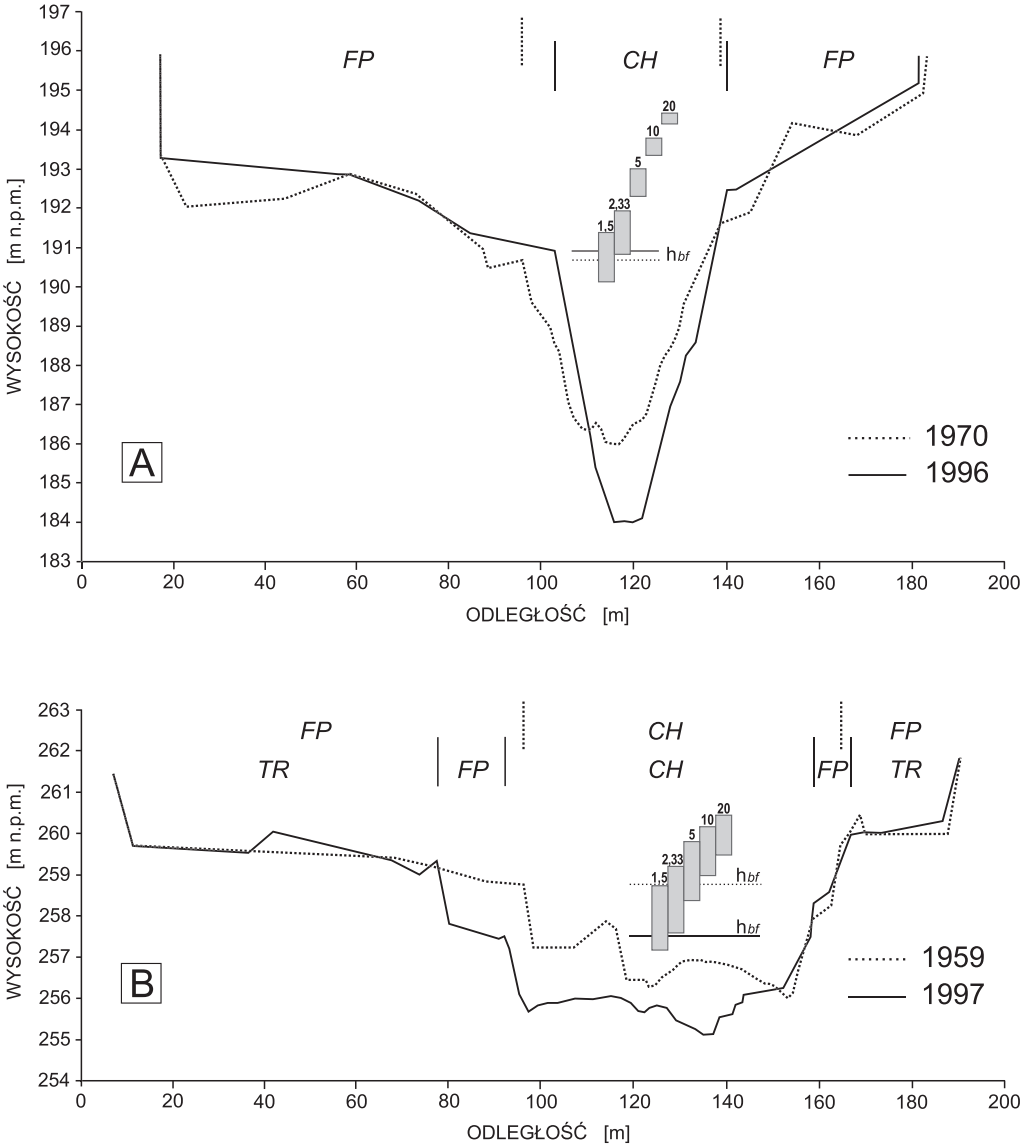
W dolnych odcinkach rzek karpackich oraz w rzekach odwadniających wschodnią część polskich Karpat energia przepływów wezbraniowych była niewystarczająca do zniszczenia zabudowy regulacyjnej koryt i po regulacji rzeki te zachowały stabilną pozycję w planie. W takich warunkach nadmierna energia wyprostowanych i zwężonych rzek była kierowana na rozmywanie ich dna. Prowadziło to do formowania głębokich koryt z towarzyszącymi im wysoko położonymi równiami zalewowymi, tak jak w przekroju wodowskazowym Łabuzie na Wisłoce (ryc. 1.6A) oraz w przekroju Proszówki na Rabie. Natomiast w wyższych odcinkach rzek oraz w rzekach zachodniej części



Ryc. 1.5. Zmiany minimalnych rocznych stanów Raby w posterunkach wodowskazowych Proszówki i Gdów, Wisłoki w posterunku Łabuzie i Skawy w posterunku Wadowice w ciągu XX wieku. Zróżnicowanie zmian minimalnych stanów wody w tych posterunkach ilustruje różnice przebiegu pogłębiania się koryt pomiędzy rzekami o małej (Wisłoka w Łabuziu) i dużej energii (Skawa w Wadowicach) oraz pomiędzy odcinkami danej rzeki o małej (Raba w Proszówkach) i dużej energii (Raba w Gdowie).

Fig. 1.5. Changes in minimum annual stage of the Raba River at the Proszówki and Gdów gauging stations, the Wisłoka River at the Łabuzie station and the Skawa River at the Wadowice station during the 20th century. The variation of the changes in minimum annual stage among the stations illustrates differences in the course of channel incision between the low-energy (the Wisłoka at Łabuzie) and high-energy (the Skawa at Wadowice) Carpathian rivers as well as between the low-energy (the Raba at Proszówki) and high-energy (the Raba at Gdów) sections of a given river.

http://rcin.org.pl



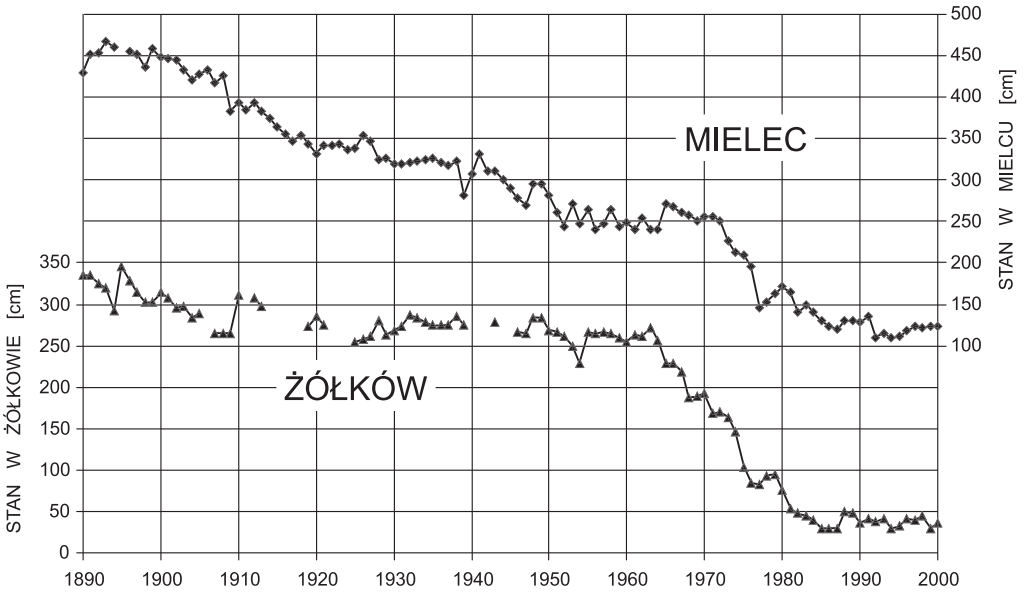
Ryc. 1.6. Przekrój poprzeczny (A) Wisłoki w posterunku wodowskazowym Łabuzie w latach 1970 i 1996 oraz (B) Skawy w posterunku Wadowice w latach 1959 i 1997. Szare prostokąty wskazują obniżenie się stanów wody związanych z przepływami o danym okresie powtarzalności, jakie towarzyszyło pogłębieniu się koryt w analizowanych okresach. Zaznaczono także pozycję stanu pełnokorytowego, h_{bf}. Morfologiczne strefy przekroju: *CH* – koryto; *FP* – równia zalewowa; *TR* – terasa nadzalewowa.

Fig. 1.6. Downstream view of the cross-sections of (A) the Wisłoka River at the Łabuzie gauging station in 1970 and 1996, and (B) the Skawa River at the Wadowice station in 1959 and 1997. Grey-shaded columns indicate a lowering of the stage attained at the flood discharges of given recurrence intervals, that accompanied incision of the channels between the years considered. Elevation of the bankfull stage, h_{bf}, is also marked. Morphological zones of the cross-section: *CH* – channel; *FP* – floodplain; *TR* – terrace.

http://rcin.org.pl

polskich Karpat wysoka energia przepływów wezbraniowych umożliwiała niszczenie zabudowy regulacyjnej. Rozszerzanie się koryta i wzrost krętości rzeki, następujące po zniszczeniu umocnień brzegów, powodowały tu zmniejszenie zdolności transportowej rzeki i zahamowanie obniżania się dna aż do czasu ponownej regulacji, prostującej i zwężającej koryto. Następujące tu po sobie okresy wcinania się uregulowanej rzeki oraz bocznej migracji koryta prowadziły do tworzenia się wciętych pasów meandrowych, z coraz niższymi, wąskimi równiami zalewowymi uformowanymi wzdłuż wciętych koryt, i przekształcania dawnych równi zalewowych w terasy nadzalewowe, tak jak w przekroju Wadowice na Skawie (ryc. 1.6B) oraz w przekroju Gdów na Rabie.

Po drugie, posuwając się w górę rzek karpackich, obserwuje się coraz późniejsze wystąpienie głównej fazy pogłębiania się ich koryt. Ilustruje to porównanie zmian minimalnych rocznych stanów Wisłoki w posterunku Mielec zlokalizowanym w dolnym biegu rzeki oraz w posterunku Żółków w jej górnym biegu (ryc. 1.7). W Mielcu około 2/3 całkowitego wcięcia się rzeki miało miejsce w pierwszej połowie stulecia, natomiast w Żółkowie główna faza obniżania się dna miała miejsce w drugiej połowie XX wieku. To zróżnicowanie wydaje się być sumarycznym efektem kilku czynników. Niesynchroniczność głównej fazy prac regulacyjnych spowodowała, że istotne zwiększenie zdolności transportowej rzek karpackich nastąpiło najpierw w ich przedgórskim biegu, później zaś w odcinkach pogórskich i górskich [Wyżga, 2001a; Zawiejska, Wyżga, 2008 – w tym tomie]. Ponadto, dokonane w niższym odcinku rzeki obniżenie



Ryc. 1.7. Zmiany minimalnych rocznych stanów Wisłoki w posterunku wodowskazowym Mielec w dolnym biegu rzeki oraz w posterunku Żółków w jej górnym biegu od 1890 roku.

Fig. 1.7. Changes in minimum annual stage of the Wisłoka at the Mielec gauging station in the lower course of the river and at the Żółków station in its upper course since 1890.

http://rcin.org.pl

się dna powodowało wzrost spadku koryta w bezpośrednio wyższym odcinku, a w konsekwencji obniżanie się dna również w tym odcinku na drodze erozji wstecznej [Galay, 1983; Wyżga, 1993b]. Wreszcie, zmiany zagospodarowania zlewni, które w największej mierze ograniczyły dostawę rumowiska do rzek karpackich, miały miejsce w drugiej połowie XX wieku w górskich częściach zlewni, zwłaszcza we wschodniej części polskich Karpat [Lach, Wyżga, 2002; Kukulak, 2003].

Trzecim zasługującym na uwagę aspektem przestrzennego zróżnicowania wcinania się rzek karpackich jest fakt, iż bezpośrednio poniżej ujścia intensywnie pogłębiającego się dopływu w korycie rzeki głównej obserwuje się zahamowanie lub spowolnienie obniżania się dna [Wyżga, 1993c]. Taka sytuacja miała miejsce w dolnym odcinku Sanu, gdzie szybkie obniżanie się dna rzeki w pierwszej połowie XX wieku zostało następnie zahamowane wraz z zapoczątkowaniem szybkiego wcinania się Wisłoka w latach 50. (ryc. 1.2 – zobacz posterunki Nisko i Rzuchów). Natomiast w odcinku Sanu powyżej ujścia Wisłoka szybkie obniżanie się dna rzeki trwało nadal w drugiej połowie stulecia (ryc. 1.2 – zobacz posterunek Jarosław). Najwyraźniej duża dostawa rumowiska dennego wynoszonego z pogłębiającego się koryta dopływu ułatwiała zachowanie stabilnej pozycji dna w rzece głównej. Te różne tendencje pionowej pozycji dna Sanu obserwowane poniżej i powyżej ujścia dopływu wskazują, że przy znacznym zwiększeniu zdolności transportowej rzek karpackich w wyniku ich regulacji, zachowanie pionowej stabilności ich dna było możliwe jedynie w warunkach obfitej dostawy rumowiska do koryt.

7. Istotność głównych przyczyn wcinania się rzek

Zestawienie rozmiarów i czasu wcięcia się rzek karpackich z lokalizacją i okresem oddziaływania głównych przyczyn tego procesu umożliwia ocenę względnego znaczenia poszczególnych czynników odpowiedzialnych za obniżanie się dna koryt. W skali regionalnej najważniejszą przyczyną wcinania się rzek była bez wątpienia regulacja ich koryt. Zaburzyła ona pionową stabilność rzek, znacząco zwiększając ich zdolność transportową, zmniejszając dostawę rumowiska do koryt poprzez odgrodzenie ich zabudową regulacyjną brzegów od zboczy dolin i aluwiów zgromadzonych na dnie dolin, oraz zwiększając podatność ziarn materiału dennego na uruchomienie w wyniku wielokrotnego niszczenia bruków korytowych i struktury osadów dennych w trakcie prac regulacyjnych. Na regulacje koryt jako główną przyczynę erozyjnej tendencji rzek karpackich w ciągu XX wieku wskazuje zapoczątkowanie wcinania się rzek niemal równocześnie z rozpoczęciem intensywnych prac regulacyjnych w 1904 roku [Wyżga, 1991, 2001a], przesuwanie się w górę biegu rzek zarówno intensywnych zmian geometrii planarnej rzek, jak i głównej fazy obniżania się dna koryt [Wyżga, 2001a; Zawiejska, Wyżga, 2008 – w tym tomie], a także wyraźne powiązanie stopnia zwężenia koryta i rozmiarów jego pogłębienia się wzdłuż biegu rzeki [Wyżga, 1993b]. Wzrost zdolności transportowej rzek spowodowany regulacją ich koryt był tak duży, że nawet przy dosta-

http://rcin.org.pl

wie materiału wynoszonego z pogłębianych wyższych odcinków rzek koryta nie mogły powrócić do swej pionowej pozycji sprzed regulacji.

Przemysłowa eksploatacja żwirów prowadzona w latach 40.-60. w niektórych rzekach karpackich znacząco zwiększyła deficyt rumowiska oraz tempo i zasięg spowodowanego nim pogłębiania się koryt. Odcinki rzek, w których prowadzono przemysłową eksploatację żwirów albo cechują się największymi rozmiarami obniżenia się dna wśród rzek karpackich (3,8 m na Wisłoce i do 3,5 m na Czarnym Dunajcu), albo też nastąpiła w nich transformacja aluwialnego koryta w koryto skalne (Ropa) [Rinaldi i in., 2005; Zawiejska, Wyżga, 2008 – w tym tomie].

Wśród różnych form bezpośredniej ingerencji człowieka w rzeki karpackie, najmniejszy wpływ na dotychczas dokonane obniżenie się dna koryt można przypisać przegradzaniu rzek zbiornikami zaporowymi. Taka sytuacja odzwierciedla niewielką liczbę zbiorników zaporowych na rzekach karpackich, stosunkowo późne spiętrzenie rzek w ciągu XX wieku (np. porównaj przegrodzenie Raby zbiornikiem dobczyckim w 1987 r. z przebiegiem wcinania się rzeki w niżej zlokalizowanym posterunku Gdów – ryc. 1.5) i/lub zlokalizowanie niektórych zbiorników w górnym biegu rzek (Solina na Sanie, Besko na Wisłoku, Klimkówka na Ropie), gdzie zatrzymują one rumowisko dostarczane z niewielkiej części zlewni. Jedynie zbiorniki Porąbka oraz Rożnów, wybudowane w latach 30. w połowie długości Soły i Dunajca, mogły w znaczącym stopniu wpłynąć na przebieg erozji wgłębnej w dolnym biegu tych rzek.

Zmiany użytkowania ziemi, jakie miały miejsce w drugiej połowie stulecia we wschodniej części polskich Karpat, musiały znacząco i trwale zmniejszyć dostawę rumowiska do rzek w tym obszarze. Wskazuje na to dokonana w ostatnich kilkudziesięciu latach powszechna transformacja koryt aluwialnych w koryta skalne [Lach, Wyżga, 2002; Kukulak, 2003], również w odcinkach rzek biegnących przez tereny leśne, gdzie koryta nie były poddane zabiegom regulacyjnym. Z kolei, w odcinkach dolin o miąższej pokrywie aluwiów, połączone działanie wzrostu zdolności transportowej rzek po regulacji ich koryt oraz zmniejszenia dostawy rumowiska po wzroście lesistości zlewni prowadziło do głębokiego wcięcia się rzek (zobacz posterunek Żółków – ryc. 1.7, 1.8) [Lach, Wyżga, 2002]. Należy jednak zauważyć, że przy niewielkim udziale terenów górskich w zlewniach rzek odwadniających wschodnią część polskich Karpat (ryc. 1.2) wpływ zalesienia stoków górskich na zmniejszenie zasilania rzek rumowiskiem musiał maleć z biegiem rzek. W zachodniej części polskich Karpat zmiany użytkowania ziemi zachodziły stopniowo od końcowych dziesięcioleci XIX wieku i polegały głównie na zmianach niektórych praktyk rolniczych (np. terasowanie stoków) [Wyżga, 1991, 2001a], natomiast zmiany lesistości zlewni były tam stosunkowo niewielkie. Choć wynikające stąd zmiany zasilania rzek rumowiskiem musiały być znacznie mniejsze niż we wschodniej części gór, ich wpływ na procesy fluwialne uwidacznia zastąpienie roztokowego koryta Raby z XIX wieku przez kręte koryto tej rzeki z połowy XX wieku. Przy zmniejszonej dostawie rumowiska do koryt, regulacje przeprowadzone w drugiej połowie XX wieku spowodowały większe zaburzenie pionowej stabilności rzek niż prace z początku stulecia [Wyżga, 2001a].

http://rcin.org.pl

8. Niekorzystne skutki wcinania się rzek

Głębokie wcięcie się rzek karpackich spowodowało ujawnienie się w ich korytach i dnach dolin szeregu zjawisk niekorzystnych dla środowiska przyrodniczego i gospodarki człowieka [Froehlich, 1980; Klimek, 1983; Wyżga, 1991, 2001a]. Podmywanie budowli regulacyjnych i filarów mostów stwarza konieczność kosztownych napraw. Wynurzenie brzegowych ujęć wody ponad zasięg niskich stanów powoduje, że dla zachowania ciągłości ich działania konieczne jest wznoszenie kosztownych stopni piętrzących. Obniżanie się zwierciadła wód gruntowych w dnach dolin, w ślad za obniżającymi się stanami wody w rzekach, jest przyczyną: (i) zmniejszenia zasobności aluwialnych zbiorników wód podziemnych; (ii) przesuszania gruntów uprawnych w dnach dolin i spadku plonów prowadzonych tu upraw; oraz (iii) wysychania starorzeczy i ubożenia roślinnych i zwierzęcych zbiorowisk nadrzecznych ekosystemów. Ponadto, obniżenie się stanów wody w rzekach poniżej gęstej strefy korzeniowej roślinności nadrzecznej ułatwia podmywanie i szybkie cofanie się brzegów rzek.

Wymienione powyżej skutki wcięcia się rzek są widoczne w skali lokalnej, jednak najbardziej istotne jest to, że wraz z pogłębieniem się koryt drastycznie zmniejszyły się możliwości retencji wód wezbraniowych i akumulacji osadów pozakorytowych w obszarach zalewowych rzek karpackich. Po regulacji koryt i zaistniałym po niej pogłębieniu się koryt, poniżej odcinków wciętych rzek zanotowano znaczny wzrost zagrożenia powodziowego [Wyżga, 1996, 1997]. Wzrost ten widać, gdy porówna się wielkość wezbrań o danym okresie powtarzalności w posterunkach Łabuzie i Brzeźnica na Wisłoce, zanotowanych w okresach 1921-1955 oraz 1956-2000 o małym i dużym stopniu wcięcia się rzeki (tab. 1.1). Odcinek Łabuzie-Brzeźnica jest wystarczająco długi (21 km), by zachodziła w nim znacząca transformacja fal wezbraniowych. Jednocześnie przyrost powierzchni zlewni na długości odcinka wynosi zaledwie 12%, co powoduje, że zanotowanych tu trendów zmian kulminacji wezbrań nie można wiązać ze zmianami zasilania przez dopływy. W drugim z rozważanych okresów w obu posterunkach zanotowano niższe przepływy wezbraniowe niż w pierwszym okresie (tab. 1.1) w wyniku większego wyrównania odpływu po wzroście lesistości górskiej części zlewni [Lach, Wyżga, 2002] i prawdopodobnie także pewnej zmiany w rozkładzie opadów. Skala tego zmniejszenia była jednak różna w obu posterunkach, gdyż wielkość średniego rocznego wezbrania obniżyła się w Łabuziu o 31%, natomiast w Brzeźnicy o 19% i różnicę tę można przypisać zmienionym warunkom transformacji fal wezbraniowych w odcinku rzeki pomiędzy tymi posterunkami. Podczas gdy w latach 1921-1955 przepływy wezbraniowe Wisłoki nieznacznie malały pomiędzy Łabuziem a Brzeźnicą, po roku 1955 wielkość fal wzrastała w tym odcinku i wzrost ten wynosił od 5% dla 20-letniego wezbrania do 14% dla średniego rocznego wezbrania (tab. 1.1).

Porównując maksymalne roczne przepływy, jak również kulminacyjne przepływy wszystkich fal wezbraniowych notowane w kolejnych dziesięcioleciach, również dla Raby pomiędzy Gdowem a Proszówkami rozpoznano towarzyszące wcięciu się rzeki

http://rcin.org.pl

znaczne zwiększenie się kulminacji wezbrań notowanych w dolnym końcu pogłębionego odcinka koryta [Wyżga, 1996, 1997]. Synchroniczność wcięcia się Wisłoki w odcinku Łabuzie-Brzeźnica, Raby w odcinku Gdów-Proszówki i niektórych innych rzek karpackich oraz wzrostu kulminacji wezbrań w dolnym końcu tych odcinków wskazuje na powiązanie obu zjawisk [Wyżga, 1996, 1997]. W miarę narastającej koncentracji przepływów wezbraniowych w pogłębianych korytach, ograniczeniu ulegała retencja wód wezbraniowych w obszarach zalewowych rzek. Ponadto, wraz z pogłębianiem się koryt i wzrostem średniej głębokości wody przy danym natężeniu przepływu, malał opór wynikający z szorstkości dna. Wraz ze zmniejszeniem się po regulacji rzek oporu wynikającego z kształtu koryta, zmniejszyło to spłaszczanie się fal wezbraniowych przenoszonych w korytach.

Zmniejszenie zagrożenia powodziowego było jednym z głównych celów regulacji rzek karpackich, lecz osiągnięty skutek jest przeciwny. Wprawdzie we wciętych odcinkach rzek nastąpiło obniżenie się stanów wezbraniowych, lecz zagrożenie powodziowe zostało jedynie odsunięte w dół biegu rzek i tam zwielokrotnione wskutek postępującej koncentracji fal wezbraniowych przemieszczających się w pogłębionych korytach. Ten wzrost zagrożenia powodziowego poniżej wciętych odcinków rzek nie był dostrzegany wskutek równoczesnego zmniejszenia się kulminacyjnych przepływów fal wezbraniowych formowanych w górskich częściach zlewni karpackich. Jednak, z uwagi na charakter czynników, które w ostatnich kilku dziesięcioleciach równoważyły ten wzrost, jego przyszłe konsekwencje będą przypuszczalnie inne dla rzek odwadniających wschodnią i zachodnią część polskich Karpat [Wyżga, 1997]. Obniżenie się kulminacji wezbrań w rzekach ze wschodniej części polskich Karpat zostało głównie spowodowane wzrostem lesistości zlewni, zatem prawdopodobnie będzie kontynuowane w przyszłości. Szybkie zwiększanie się kulminacyjnych przepływów fal wezbraniowych we wciętych odcinkach tych rzek oznacza zatem utraconą szansę trwałego zmniejszenia zagrożenia powodziowego również w ich niższych odcinkach, jakie mogło było zostać osiągnięte w wyniku wzrostu lesistości górskich części zlewni. Natomiast zmiana rozkładu opadów warunkująca obniżenie się w ostatnich kilkudziesięciu latach wezbrań w rzekach z zachodniej części polskich Karpat przypuszczalnie ma jedynie czasowy charakter. Ponowne wystąpienie wysokich opadów w ich zlewniach spowodowałoby nagłe ujawnienie się potencjalnego wzrostu zagrożenia powodziowego wywołanego wcięciem się tych rzek.

Wcięcie się rzek karpackich w znacznym stopniu zmniejszyło możliwość akumulacji osadów pozakorytowych w ich obszarach zalewowych [Wyżga, 2001b]. Inne czynniki odegrały jednak decydującą rolę w zmniejszeniu możliwości formowania się osadów pozakorytowych w odcinkach dolin z wciętym korytem, jakie cechowały rzeki karpackie o mniejszej energii, inne zaś w odcinkach dolin z wciętym pasem meandrowym, typowych dla rzek o dużej energii. Wykazano to, analizując zmiany warunków sedymentacji pozakorytowej, jakie miały miejsce w posterunku wodowskazowym Łabuzie na Wisłoce w latach 1970-1996 oraz w posterunku Wadowice na Skawie pomiędzy 1959

http://rcin.org.pl

i 1997 rokiem [Wyżga, 2001b]. W rozważanych okresach w obu przekrojach zachodziła erozja wgłębna odzwierciedlona w podobnym obniżeniu się minimalnych stanów rzek o 1-1,2 m. W Łabuziu towarzyszyło temu znaczne obniżenie się stanów związanych z niskimi przepływami wezbraniowymi i wyraźnie mniejsze obniżenie się stanów osiąganych przy wysokich przepływach wezbraniowych. Na przykład stan osiągany przy średnim rocznym wezbraniu obniżył się w latach 1970-1996 o 110 cm, natomiast stan związany z wezbraniem o 20-letniej powtarzalności jedynie o 28 cm (ryc. 1.6A). W Wadowicach koncentracja przepływów wezbraniowych w pogłębionym korycie i ponad nową, nisko położoną równią zalewową spowodowała znaczne obniżenie się stanów związanych zarówno z niskimi, jak i wysokimi przepływami wezbraniowymi. W latach 1959-1997 wyniosło ono 160 cm dla stanu osiąganego przy średnim rocznym wezbraniu i 94 cm dla stanu związanego z wezbraniem o 20-letniej powtarzalności (ryc. 1.6B). To duże obniżenie się stanów wezbraniowych spowodowało przekształcenie dawnej równi zalewowej w terasę i znaczne ograniczenie poziomego zasięgu wód wezbraniowych na dnie doliny. Ograniczeniu pionowego i poziomego zasięgu wód wezbraniowych w przekrojach rzek towarzyszyło zmniejszenie częstotliwości i czasu zatopienia określonego poziomu na dnie dolin przy wystąpieniu określonego przepływu. W przypadku Skawy było ono znacznie większe niż w przypadku Wisłoki [Wyżga, 2001b].

Wzrost koncentracji przepływów wezbraniowych w przekroju rzek pociągnął za sobą zmniejszenie ilości wody przenoszonej w ich strefie pozakorytowej (tab. 1.2). Dla większych przepływów wezbraniowych skala tego zmniejszenia była większa na Skawie niż na Wisłoce (tab. 1.2). Było to spowodowane zachowaniem podobnej szerokości koryta Skawy w trakcie obniżania się dna tej rzeki i zawężeniem zarówno strumienia korytowego, jak i pozakorytowego w obrębie wciętego pasa meandrowego (ryc. 1.6B).

Tam gdzie obniżanie się dna rzeki było połączone z poziomą stabilnością koryta, doprowadziło ono do zwiększenia względnej wysokości stanów wezbraniowych ponad

Tabela 1.2. Procentowy udział przepływu przenoszonego w strefie pozakorytowej w całkowitym przepływie Wisłoki w posterunku wodowskazowym Łabuzie oraz Skawy w posterunku Wadowice przed i po okresie szybkiego wcinania się tych rzek

	Wisłoka w Łabuziu		Skawa w Wadowicach	
	1970	1996	1959	1997
Q_3	2,7	0,1	1,3	0,2
Q_5	7,3	1,2	5,5	1,6
Q_{10}	12,3	5,2	12,5	4,2
Q_{15}	15,3	8,2	16,3	5,7
Q_{20}	17,4	10,3	19,0	6,7

Q_X oznacza przepływ o danym okresie powtarzalności

http://rcin.org.pl

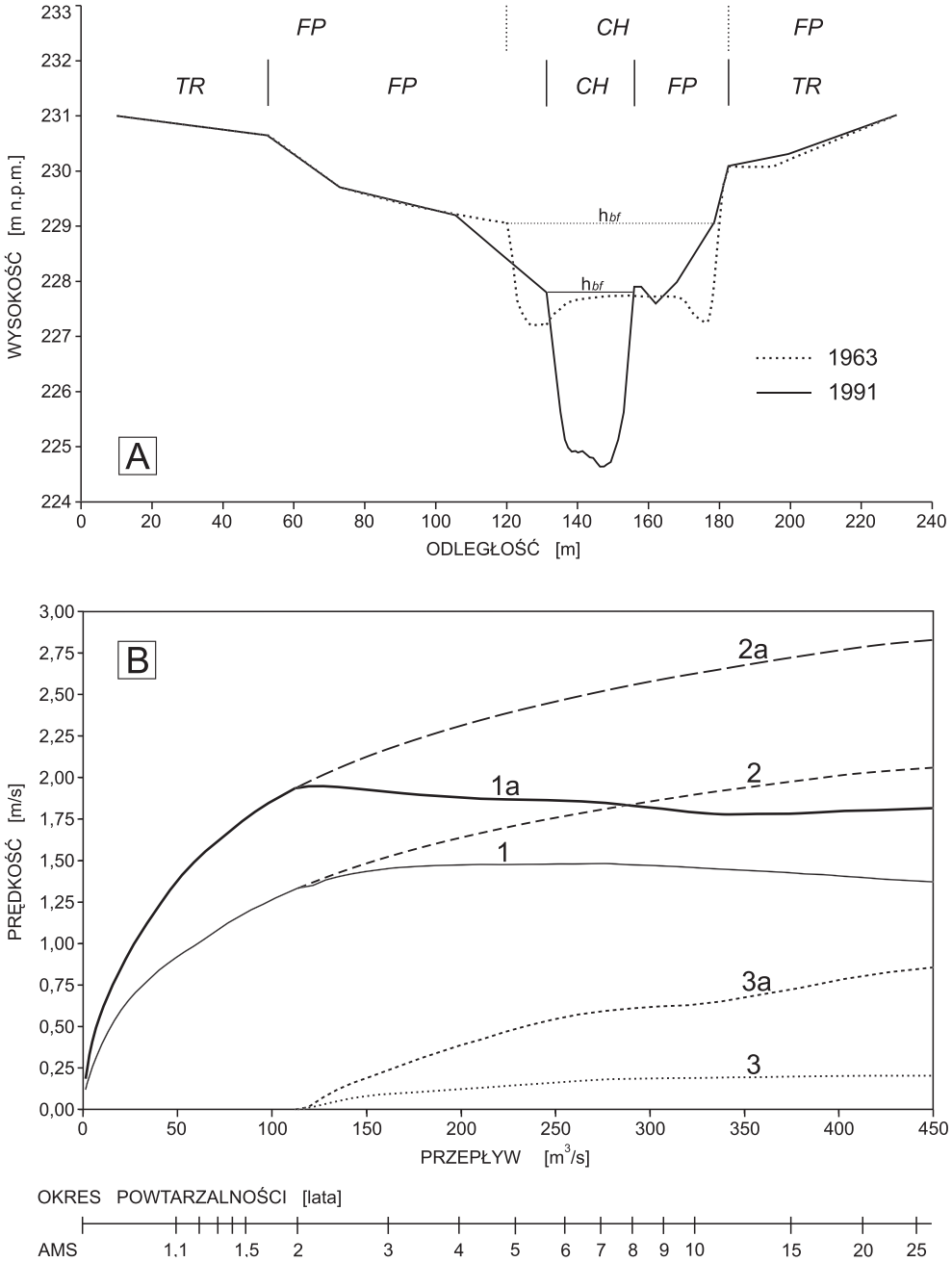
dnem rzeki [Wyżga, 2001b]. W Łabuziu na Wisłoce wysokość ponad dnem rzeki stanu związanego z 5-letnim wezbraniem zwiększyła się z 6,7 m w 1970 roku do 8,31 m w 1996 roku, a przy wezbraniu o 20-letniej powtarzalności wzrosła z 8,11 m do 10,13 m. Przy wzroście odległości pomiędzy dnem rzeki a powierzchnią wody i równoczesnym zmniejszeniu się głębokości zatopienia obszaru zalewowego (ryc. 1.6A), obecnie równia zalewowa może być zatapiana jedynie przez najwyższe partie wód wezbraniowych. Przy większych głębokościach kolumny wody musiało także wzrosnąć pionowe zróżnicowanie rozmiarów i koncentracji ziarn transportowanych w suspensji frakcjonalnej. Oddziaływanie tych czynników powodowało zmniejszenie się ilości grubszych ziarn materiału klastycznego wnoszonych wraz z wodami wezbraniowymi do obszaru zalewowego Wisłoki i postępującą koncentrację transportu obciążenia unoszonego rzeki w pogłębionym korycie.

Zmiany prędkości przepływu stanowią kolejny skutek wcięcia się rzek karpackich, który musiał oddziaływać na warunki sedymentacji pozakorytowej w ich dolinach. Wraz z wcięciem się rzek nastąpił wzrost prędkości w strefie korytowej, natomiast zmiany prędkości w strefie pozakorytowej przebiegały odmiennie w odcinkach dolin z wciętym korytem oraz w odcinkach dolin z wciętym pasem meandrowym [Wyżga, 2001b]. W Łabuziu na Wisłoce, wraz ze zmniejszeniem się w latach 1970-1996 głębokości zatopienia obszaru zalewowego przy określonym przepływie, średnia prędkość w strefie pozakorytowej zmalała. W Wadowicach na Skawie, w 1997 roku średnia prędkość przepływu ponad nową, nisko położoną równią zalewową była o 20-30% wyższa od prędkości w strefie pozakorytowej przekroju z 1959 roku. Jeszcze większy wzrost prędkości w strefie pozakorytowej towarzyszył uformowaniu się wciętego pasa meandrowego na górnej Wisłoce w Żółkowie, który powstał w wyniku rozcięcia o około 2,5 m wcześniejszego, szerokiego dna koryta (ryc. 1.8A) [Lach, Wyżga, 2002]. Pomiędzy 1963 i 1991 rokiem średnia prędkość w strefie korytowej wzrosła tu o 35-45%, natomiast średnia prędkość w strefie pozakorytowej zwiększyła się trzy-czterokrotnie w porównaniu do sytuacji sprzed wcięcia się rzeki (ryc. 1.8B).

Badania prowadzone w dolinie Raby wskazały na drastyczne zmniejszenie tempa narastania osadów pozakorytowych po regulacji jej koryta i spowodowanym przez nią wcięciu się rzeki [Wyżga, 1991]. Obserwacje w dolinach Skawy i Wisłoki również pokazały, że sedymentacja pozakorytowa odgrywa tam obecnie niewielką rolę. Przy kulminacyjnym przepływie wezbrania z lipca 1997 roku na Skawie w Wadowicach, o 29-letnim okresie powtarzalności, średnia prędkość przepływu ponad wąską, nisko położoną równią zalewową wynosiła 1,68 m/s. Chociaż stan pełnokorytowy był tam

Fig. 1.8. (A) Downstream view of the cross-section of the Wisłoka River at the Żółków gauging station in 1963 and 1991. Morphological zones of the cross-section: *CH* – channel; *FP* – floodplain; *TR* – terrace. Elevation of the bankfull stage, h_{bf}, in 1963 and 1991 is also marked. (B) Relationship between the mean flow velocity in total cross-section (1, 1a), in channel zone (2, 2a) and in extra-channel zone (3, 3a) of the cross-section, and discharge for the Żółków station on the Wisłoka River in 1963 (1-3) and 1991 (1a-3a). Discharges are referred to their recurrence intervals determined by the annual maximum series method from the years 1951 to 2000.

http://rcin.org.pl



Ryc. 1.8. (A) Przekrój poprzeczny Wisłoki w posterunku wodowskazowym Żółków w latach 1963 i 1991. Morfologiczne strefy przekroju: *CH* – koryto; *FP* – równia zalewowa; *TR* – terasa nadzalewowa. Zaznaczono także pozycję stanu pełnokorytowego, h_{bf}, w latach 1963 i 1991. (B) Zależność pomiędzy średnią prędkością w całym przekroju (1, 1a), w strefie korytowej (2, 2a) i pozakorytowej (3, 3a), a natężeniem przepływu w posterunku Żółków na Wisłoce w latach 1963 (1-3) i 1991 (1a-3a). Wartościom przepływu przyporządkowano ich okres powtarzalności, określony metodą ciągu maksymalnych rocznych przepływów (AMS) z lat 1951-2000.

http://rcin.org.pl

przekroczony przez ponad dwie doby i w czasie kulminacji wezbrania równia była pokryta około dwumetrową warstwą wody, miąższość osadów lipcowego wezbrania była niezbyt duża, wynosząc od 1,5 do 7 cm. Zarazem, w czasie tego wezbrania na wałach przykorytowych Wisły, bezpośrednio poniżej ujścia Skawy, zostały zdeponowane rozległe pokrywy piasków o miąższości dochodzącej do 30 cm. Koryto Wisły nie jest tu wcięte, a średnią prędkość przepływu w strefie pozakorytowej oszacowano dla kulminacji wezbrania na 0,3 m/s [Wyżga, 1999]. Te różnice prędkości przepływu i miąższości sedymentacji wezbraniowej pokazują, że obecnie, w czasie dużych wezbrań przenoszących największe ładunki mineralne, prędkości przepływu ponad wąskimi równiami zalewowymi utworzonymi wzdłuż wciętych koryt rzek karpackich są zbyt duże, by umożliwiać tam znaczącą depozycję rumowiska unoszonego [Wyżga, 2001b]. Z kolei, w Łabuziu na Wisłoce duża różnica prędkości w strefie korytowej i pozakorytowej, jaka wytworzyła się w wyniku wcięcia się rzeki, powinna sprzyjać formowaniu się wałów przykorytowych. Jednak pomimo przejścia dwóch dużych wezbrań w latach 1987 i 1989, o okresie powtarzalności 35 i 18 lat, wzdłuż wciętego koryta rzeki nie obserwuje się wyraźnie wykształconych wałów przykorytowych. Pokazuje to, że grubsze frakcje obciążenia zawiesinowego rzeki są obecne przenoszone niemal wyłącznie w obrębie wciętego koryta, a zatem możliwość ich wprowadzania do obszaru zalewowego jest niewielka [Wyżga, 2001b].

W tabeli 1.3 zestawiono ważniejsze czynniki, które wpłynęły na zmianę warunków sedymentacji pozakorytowej w dolinach rzek karpackich w wyniku pogłębienia się koryt, oddzielnie dla odcinków dolin z wciętym korytem oraz z wciętym pasem meandrowym. Pomimo odmiennej kombinacji tych czynników w obu rozważanych sytuacjach, wynikiem ich oddziaływania było znaczne ograniczenie w ostatnich kilkudziesięciu latach możliwości akumulacji osadów pozakorytowych w dolinach rzek karpackich [Wyżga, 2001b]. W rezultacie, większość ładunku zawiesinowego tych rzek jest obecnie przenoszona poprzez ich wcięte odcinki bezpośrednio do Wisły, przyczyniając się do szybkiej agradacji w jej środkowym biegu [Łajczak, 1997].

9. Podsumowanie i uwagi końcowe

W ciągu XX wieku miało miejsce głębokie (do 3,8 m) wcięcie się rzek polskich Karpat. Przy swym rozprzestrzenieniu i tempie, pogłębianie się koryt było bez wątpienia spektakularnym zjawiskiem w holoceńskiej ewolucji tych rzek. Obniżanie się dna rzek było wynikiem połączonego oddziaływania czynników, które zwiększyły zdolność transportową rzek i zmniejszyły dostępność materiału mogącego podlegać transportowi fluwialnemu. Wcześniejsze wystąpienie głównej fazy pogłębiania się koryt w dolnych odcinkach rzek i późniejsze w ich wyższych odcinkach wskazuje na wzrost zdolności transportowej rzek spowodowany regulacją koryt jako główną przyczynę obniżania dna zaznaczającą się w skali regionalnej, podczas gdy zmniejszenie dostawy rumowiska ze zlewni było czynnikiem o mniejszym znaczeniu lub później działającym. W niektórych

http://rcin.org.pl

Tabela 1.3. Czynniki zmieniające warunki sedymentacji pozakorytowej w dolinach rzek karpackich w wyniku pogłębienia się koryt, przedstawione dla odcinków dolin z wciętym korytem oraz z wciętym pasem meandrowym

	Odcinki dolin z wciętym korytem	Odcinki dolin z wciętym pasem meandrowym
Częstotliwość i czas zatopienia dna doliny przy określonym przepływie	Zmniejszone	Nieco zmniejszone dla nowej, nisko położonej równi zalewowej i znacznie zmniejszone dla wcześniej istniejącej równi zalewowej
Procent całkowitego przepływu przenoszony w strefie pozakorytowej	Zmniejszony zarówno dla niskich, jak i wysokich przepływów wezbraniowych	Zmniejszony dla niskich przepływów wezbraniowych i znacznie zmniejszony dla wysokich przepływów wezbraniowych
Względna wysokość stanów wezbraniowych ponad dnem rzeki (wpływająca na stopień koncentracji transportu obciążenia zawiesinowego w obrębie koryta)	Zwiększona	Nie zmieniona lub nieco zmniejszona
Prędkość przepływu w strefie pozakorytowej	Zmniejszona	Zwiększona ponad nową, nisko położoną równią zalewową i znacznie zmniejszona ponad wcześniej istniejącą równią zalewową

http://rcin.org.pl

rzekach deficyt rumowiska dostępnego do transportu fluwialnego został dodatkowo zwiększony w wyniku eksploatacji żwirów z koryt.

Podobną historię zmian koryt zanotowano także w odniesieniu do górskich i przedgórskich rzek Europy Zachodniej [Bravard i in., 1997; Landon i in., 1998] i Południowej [Rinaldi, 2003; Surian, Rinaldi, 2003]. Tendencja do agradacji, cechująca rzeki z tych obszarów w czasie małej epoki lodowej, uległa odwróceniu mniej więcej z początkiem XX wieku w wyniku prac regulacyjnych i zmian gospodarowania w zlewniach. Eksploatacja żwirów z koryt i przegradzanie rzek zbiornikami zaporowymi drastycznie nasiliły obniżanie się dna rzek w drugiej połowie stulecia. Zmiany klimatu zaistniałe po zakończeniu małej epoki lodowej wskazywano jako jedną z przyczyn zmniejszonej dostawy rumowiska do rzek Europy Zachodniej [Bravard i in., 1997] i istniejący zapis zmian cyrkulacji atmosferycznej nad Europą Środkową pozwala również wskazywać zmiany opadów jako przyczynę zmniejszonego zasilania rzek karpackich rumowiskiem w XX wieku. Jednakże znaczne odległości pomiędzy wymienionymi regionami i różna orientacja ich pasm górskich względem zasadniczego kierunku cyrkulacji atmosferycznej ponad północną półkulą stwarzają wątpliwości, czy zmiany klimatyczne mogły odegrać istotną rolę w zmniejszeniu dostawy rumowiska z górskich zlewni w Europie. Podobna ewolucja rzek z różnych regionów raczej odzwierciedla podobną historię zmian gospodarowania w zlewniach oraz ingerencji w koryta rzek.

Niekorzystne efekty pogłębienia się koryt stwarzają konieczność zmian w gospodarce wodnej prowadzonej na rzekach karpackich, a także wciętych rzekach wymienionych regionów Europy, które umożliwiłyby zahamowanie obniżania się dna rzek i przywrócenie warunków do retencji wód wezbraniowych i akumulacji osadów pozakorytowych w ich obszarach zalewowych. Należy zaprzestać działań powodujących usuwanie materiału dennego z koryt i ułatwiających jego wynoszenie do niższych odcinków rzek [Wyżga, 2001a; Bojarski i in., 2005; Rinaldi i in., 2005]. Wiąże się to z koniecznością zaniechania usuwania z koryt łach żwirowych usytuowanych naprzeciw brzegów zagrożonych erozją oraz wyeliminowania niekontrolowanego poboru żwiru z rzek. Budowa i remonty umocnień brzegów muszą być prowadzone tak, aby zminimalizować niszczenie obrukowania dna i wewnętrznej struktury osadów korytowych.

Najważniejsze jest jednak to, że zmniejszone obciążenie współczesnych rzek transportowanym rumowiskiem stwarza konieczność zmniejszenia ich zdolności transportowej [Wyżga, 2001a]. W dolinach górskich można to osiągnąć, zwiększając szerokość koryt, natomiast w pogórskich i przedgórskich odcinkach, gdzie w ciągu XX wieku rzeki ponownie zaczęły wykazywać tendencję do meandrowania, wskazane jest dopuszczenie do wzrostu ich krętości wszędzie tam, gdzie nie niosłoby to ze sobą zagrożenia dla istniejącej zabudowy i infrastruktury w dnach dolin. Przy aktywnym meandrowaniu rzek możliwe byłoby nie tylko zmniejszenie ich spadku i zdolności transportowej, lecz również dostawa rumowiska do koryt na drodze erozji bocznej. Ta dostawa rumowiska sprzyjałaby powstrzymaniu wcinania się rzek nie tylko w odcinkach z aktywnym ich meandrowaniem, lecz również tam, gdzie zabudowa regulacyjna koryt zostałaby utrzymana.

http://rcin.org.pl

Piśmiennictwo

Augustowski B., 1968: Spostrzeżenia nad zmianami antropogenicznymi w korycie rzeki Ropy w Karpatach. *Zeszyty Geograficzne WSP w Gdańsku*, **10**, 161-168.

Bathurst J. C., 1982: Theoretical aspects of flow resistance. [w:] R. D. Hey, J. C. Bathurst, C. R. Thorne (red.), *Gravel-bed Rivers*. Wiley, Chichester, 83-108.

Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J., 2005: *Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich*. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.

Bravard J. P., Amoros C., Pautou G., Bornette G., Bournaud M., Creuzé des Châtelliers M., Gibert J., Peiry J. L., Perrin J. F., Tachet H., 1997: River incision in South-east France: morphological phenomena and ecological effects. *Regulated Rivers: Research and Management*, **13**, 1-16.

Brookes A., 1987: River channel adjustment downstream from channelization works in England and Wales. *Earth Surface Processes and Landforms*, **12**, 337-351.

Bull W. B., Scott K. M., 1974: Impact of mining gravel from urban stream beds in the southwestern United States. *Geology*, **2**, 171-174.

Church M., 1978: Palaeohydrological reconstructions from a Holocene valley fill. [w:] A. D. Miall (red.), *Fluvial Sedimentology*. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, **5**, 743-772.

Collins B., Dunne T., 1989: Gravel transport, gravel harvesting, and channel-bed degradation in rivers draining the southern Olympic Mountains, Washington, USA. *Environmental Geology and Water Science*, **13(3)**, 213-224.

Dudziak J., 1965: Dzika eksploatacja kamienia w powiecie nowotarskim. *Ochrona Przyrody*, **31**, 161-187.

Dynowska I., 1991: Bilans wodny. [w:] I. Dynowska, M. Maciejewski (red.), *Dorzecze górnej Wisły*. PWN, Warszawa-Kraków, 223-227.

Emerson J. W., 1971: Channelization: a case study. *Science*, **173**, 325-326.

Froehlich W., 1980: Hydrologiczne aspekty pogłębiania koryt rzek beskidzkich. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, **235**, 257-268.

Froehlich W., 1982: Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryta w górskiej zlewni fliszowej. *Prace Geograficzne Instytutu Geografii PAN*, **143**, 1-144.

Galay V. J., 1983: Causes of river bed degradation. *Water Resources Research*, **19**, 1057-1090.

Kaszewski B. M., Filipiuk E., 2003: Variability of atmospheric circulation in Central Europe in the summer season 1881-1998 (on the basis of the Hess-Brezowski classification). *Meteorologische Zeitschrift*, **12(3)**, 123-130.

Kędzior A., 1928: *Roboty wodne i melioracyjne w Południowej Małopolsce wykonane z inicjatywy Sejmu i Wydziału Krajowego*. Lwów.

Klimek K., 1979: Geomorfologiczne zróżnicowania koryt karpackich dopływów Wisły. *Folia Geographica, Series Geographica Physica*, **12**, 35-47.

Klimek K., 1983: Erozja wgłębna dopływów Wisły na przedpolu Karpat. [w:] Z. Kajak (red.), *Ekologiczne podstawy zagospodarowania Wisły i jej dorzecza*. PWN, Warszawa-Łódź, 97-108.

Klimek K., 1987: Man's impact on fluvial processes in the Polish Western Carpathians. *Geografiska Annaler*, **74A**, 123-131.

http://rcin.org.pl

Klimek K., Trafas K., 1972: Young-Holocene changes in the course of the Dunajec River in the Beskid Sądecki Mts (Western Carpathians). *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, **6**, 85-92.

Knighton A. D., 1989: River adjustment to changes in sediment load: the effects of tin mining on the Ringarooma River, Tasmania, 1875-1984. *Earth Surface Processes and Landforms*, **14**, 333-359.

Kondolf G. M., 1997: Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, **21**, 533-551.

Krzemień K., 1981: Zmienność subsystemu korytowego Czarnego Dunajca. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne*, **53**, 123-137.

Krzemień K., 2003: The Czarny Dunajec River, Poland, as an example of human-induced development tendencies in a mountain river channel. *Landform Analysis*, **4**, 57-64.

Kukulak J., 2003: Ewolucja koryta Sanu w Bieszczadach Wysokich w drugiej połowie minionego 1000-lecia. [w:] J. Lach (red.), *Dynamika zmian środowiska geograficznego pod wpływem antropopresji*. Akademia Pedagogiczna, Kraków, 134-140.

Kukulak J., 2004: Zapis skutków osadnictwa i gospodarki rolnej w osadach rzeki górskiej na przykładzie aluwiów dorzecza górnego Sanu w Bieszczadach Wysokich. *Prace Monograficzne Akademii Pedagogicznej w Krakowie*, **381**, 1-125.

Lach J., 1975: Ewolucja i typologia krajobrazu Beskidu Niskiego z uwzględnieniem gospodarczej działalności człowieka. *Prace Monograficzne WSP w Krakowie*, **16**, 5-72.

Lach J., Wyżga B., 2002: Channel incision and flow increase of the upper Wisłoka River, southern Poland, subsequent to the reafforestation of its catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, **27**, 445-462.

Landon N., Piégay H., Bravard J. P., 1998: The Drôme river incision (France): From assessment to management. *Landscape and Urban Planning*, **43**, 119-131.

Laronne J. B., Carson M. A., 1976: Interrelationships between bed morphology and bed-material transport for a small, gravel-bed channel. *Sedimentology*, **23**, 67-85.

Liébault F., Piégay H., 2001: Assessment of channel changes due to long-term bedload supply decrease, Roubion River, France. *Geomorphology*, **36**, 167-186.

Lisle T. E., Iseya F., Ikeda H., 1993: Response of a channel with alternate bars to a decrease in supply of mixed-size bed load: a flume experiment. *Water Resources Research*, **29**, 3623-3629.

Łajczak A., 1994: The rates of silting and the useful lifetime of dam reservoirs in the Polish Carpathians. *Zeitschrift für Geomorfologie*, **38**, 129-150.

Łajczak A., 1997: Anthropogenic changes in the suspended load transportation by and sedimentation rates of the River Vistula, Poland. *Geographia Polonica*, **68**, 7-30.

Madej M. A., Ozaki V., 1996: Channel response to sediment wave propagation and movement, Redwood Creek, California, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, **21**, 911-927.

Niedźwiedź T., Obrębska-Starklowa B., 1991: Klimat. [w:] I. Dynowska, M. Maciejewski (red.), *Dorzecze górnej Wisły*. PWN, Warszawa-Kraków, 68-84.

Osuch B., 1968: Problemy wynikające z nadmiernej eksploatacji kruszywa rzecznego na przykładzie rzeki Wisłoki. *Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej*, **219**, 283-301.

http://rcin.org.pl

Pietrzak M., 2005: Relationship between settlement and relief in the Polish Carpathian mountains. [w:] W. Zgłobicki, J. Rejman, (red.), *Human impact on sensitive geosystems*. Wydawnictwo UMCS, Lublin, 65-82.

Punzet J., 1981: Zmiany w przebiegu stanów wody w dorzeczu górnej Wisły na przestrzeni 100 lat (1871-1970). *Folia Geographica, Series Geographica Physica*, **14**, 5-28.

Raczyński K., 1989: Wymiarowanie koryt cieków górskich. *Gospodarka Wodna*, **4**, 76-78.

Radecki-Pawlik A., 2002: Pobór żwiru i otoczaków z dna potoków górskich. *Aura*, **2**, 17-19.

Reid I., Frostick L. E., Layman J. T., 1985: The incidence and nature of bedload transport during flood flows in coarse-grained alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, **10**, 33-44.

Richards K., Clifford N., 1991: Fluvial geomorphology: structured beds in gravelly rivers. *Progress in Physical Geography*, **15**, 407-422.

Rinaldi M., 2003: Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, **28**, 587-608.

Rinaldi M., Wyżga B., Surian N., 2005: Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives. *River Research and Application*, **21**, 805-828.

Schumm S. A., 1969: River metamorphosis. *Journal of Hydraulic Division, American Association of Civil Engineers*, **95**, 255-273.

Sear D. A., Archer D., 1998: Effects of gravel extraction on stability of gravel-bed rivers: the Wooler Water, Northumberland, UK. [w:] P. C. Klingeman, R. L. Beschta, P. D. Komar, J. B. Bradley (red.), *Gravel-Bed Rivers in the Environment*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, 415-432.

Simon A., 1989: A model of channel response in disturbed alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, **14**, 11-26.

Soja R., 1977: Deepening of channel in the light of the cross profile analysis. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, **11**, 127-138.

Surian N., Rinaldi M., 2003: Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, **50**, 307-326.

Szumański A., 1986: Postglacjalna ewolucja i mechanizm transformacji dna doliny dolnego Sanu. *Geologia*, **12**, 5-92.

Williams G. P., Wolman M. G., 1984: Downstream effects of dams on alluvial rivers. *US Geological Survey Professional Paper*, **1286**, 1-83.

Wyżga B., 1991: Present-day downcutting of the Raba River channel (Western Carpathians, Poland) and its environmental effects. *Catena*, **18**, 551-566.

Wyżga B., 1993a: Present-day changes in the hydrologic regime of the Raba River (Carpathians, Poland) as inferred from facies pattern and channel geometry. [w:] M. Marzo, C. Puigdefábregas (red.), *Alluvial Sedimentation*. International Association of Sedimentologists Special Publication, **17**, 305-316.

Wyżga B., 1993b: River response to channel regulation: case study of the Raba River, Carpathians, Poland. *Earth Surface Processes and Landforms*, **18**, 541-556.

Wyżga B., 1993c: Funkcjonowanie systemu rzecznego środkowej i dolnej Raby w ostatnich 200 latach. *Dokumentacja Geograficzna*, **6**, 1-92.

http://rcin.org.pl

Wyżga B., 1996: Changes in the magnitude and transformation of flood waves subsequent to the channelization of the Raba River, Polish Carpathians. *Earth Surface Processes and Landforms*, **21**, 749-763.

Wyżga B., 1997: Methods for studying the response of flood flows to channel change. *Journal of Hydrology*, **198**, 271-288.

Wyżga B., 1999: Estimating mean flow velocity in channel and floodplain areas and its use for explaining the pattern of overbank deposition and floodplain retention. *Geomorphology*, **28**, 281-297.

Wyżga B., 2001a: A geomorphologist's criticism of the engineering approach to channelization of gravel-bed rivers: case study of the Raba River, Polish Carpathians. *Environmental Management*, **28**, 341-358.

Wyżga B., 2001b: Impact of the channelization-induced incision of the Skawa and Wisłoka Rivers, southern Poland, on the conditions of overbank deposition. *Regulated Rivers: Research and Management*, **17**, 85-100.

Zawiejska J., Krzemień K., 2004: Human impact on the dynamics of the upper Dunajec River channel: a case study. *Geograficky Časopis*, **56**, 111-124.

Zawiejska J., Wyżga B., 2008: Transformacja koryta Dunajca w XX wieku jako wynik ingerencji człowieka i zmian środowiskowych w zlewni. [w:] B. Wyżga (red.), *Stan środowiska rzek południowej Polski i możliwości jego poprawy – wybrane aspekty*. Instytut Ochrony Przyrody PAN, Kraków, 41-50.

http://rcin.org.pl

Twentieth-century incision of the Polish Carpathian rivers during the 20th century

Summary

Rivers draining the Polish Carpathians deeply incised over the 20th century and in many sections, the downcutting was especially rapid in the second half of the century. Incision has resulted from the increase in transport capacity of the rivers caused by their channelization, and the concomitant decrease in sediment supply to the channels. In some of the rivers, in--stream gravel mining has additionally reduced the amount of sediment available for fluvial transport. Where the rivers had insufficient energy to destroy the river-control structures and remained laterally stable following their channelization, bed degradation has proceeded at a relatively steady rate. On the high-energy rivers, the periods of incision of the regulated channel alternated with the periods of lateral channel migration following the destruction of channelization structures. The main phase of incision of the Carpathian rivers occurred progressively later in the upstream direction, this reflecting the variation in timing of the most intense channelization works along their course, the operation of upstream-progressing bed degradation as well as the concentration of the land use changes from the second half of the century in the montane parts of the catchments. A marked increase in flood hazard to downstream reaches and a reduction in the potential of Carpathian floodplains for sediment storage have been the most important detrimental effects of the river incision manifested at the regional scale. Changes in management of the rivers are necessary to reduce their transport capacity and re-establish the conditions for water and sediment storage on the floodplains.

Bartłomiej Wyżga – Instytut Ochrony Przyrody PAN, al. Mickiewicza 33,
31-120 Kraków, wyzga@iop.krakow.pl

http://rcin.org.pl