

Bartłomiej Wyżga

Polska Akademia Nauk, Instytut Ochrony Przyrody, Kraków

WPŁYW POGŁĘBIANIA SIĘ KORYT KARPACKICH DOPŁYWÓW WISŁY NA ZMIANY WARUNKÓW SEDYMENTACJI POZAKORYTOWEJ

Zarys treści: Gwałtowne wcinanie się karpackich dopływów Wisły w ostatnich dziesięcioleciach radykalnie ograniczyło możliwość formowania się osadów pozakorytowych w ich dolinach. Znacznie zmalała ilość wód wezbraniowych przenoszonych w strefie pozakorytowej, a wraz z tym dużo mniejsze ilości rumowiska unoszonego mogą być obecnie wnoszone z wodami wezbraniowymi do obszarów zalewowych. W dolinach rzek odwadniających wschodnią część polskich Karpat towarzyszyło temu znaczne zmniejszenie się częstotliwości zatapiania obszarów zalewowych i postępująca koncentracja transportu obciążenia zawiesinowego w obrębie koryt w miarę wzrostu względnej wysokości brzegów ponad dnem rzek. Natomiast w dolinach rzek w zachodniej części polskich Karpat depozycję osadów pozakorytowych ograniczają wysokie prędkości przepływu wód wezbraniowych ponad wąskimi równiami zalewowymi uformowanymi wzdłuż wciętych koryt.

Słowa kluczowe: regulacja koryta, wcinanie się rzeki, równia zalewowa, sedymentacja pozakorytowa, rumowisko unoszone.

Key words: channelization, river incision, floodplain, overbank deposition, suspended sediment.

1. Wstęp

Rzeki transportują większość swego obciążenia mineralnego w suspensji, a pewna część tak transportowanego materiału ulega akumulacji w obszarze zalewowym. Tempo narastania osadów pozakorytowych maleje wraz z podnoszeniem się powierzchni równi zalewowej i zwiększaniem się wysokości brzegów rzeki przy kolejnych wezbraniach (Wolman, Leopold, 1957). Spadek tempa narastania tych osadów powinien również zachodzić wówczas, gdy wskutek obniżania dna rzeka zwiększa pojemność swego

koryta, tak że może ono przenosić całość lub zdecydowaną większość wód wezbraniowych. W wyniku prowadzonych od początku XX wieku prac regulacyjnych nastąpiło znaczne pogłębienie się koryt karpaccich dopływów Wisły w ich dolnych i środkowych biegach (Punzet, 1981; Klimek, 1983; Wyźga, 1991). Rzeki te wciąły się dotychczas o 1,5-3,8 m, przy czym tempo pogłębienia się koryt było wyraźnie większe w drugiej połowie stulecia. Badania prowadzone w dolinie Raby wykazały, że gwałtowne wcinanie się rzeki rzeczywiście doprowadziło do drastycznego zmniejszenia tempa narastania osadów pozakorytowych (Wyźga, 1991).

Można wskazać trzy bezpośrednie przyczyny spowolnienia akumulacji osadów w obszarze zalewowym degradującej rzeki o uregulowanym korycie. Po pierwsze, zwiększenie spadku i zwężenie koryta w toku prac regulacyjnych i postępująca w miarę wcinania się rzeki koncentracja przepływu w przekroju poprzecznym wywołują wzrost prędkości przy określonym natężeniu przepływu (Wyźga, 1993a), co ułatwia przenoszenie ziarn w dół rzeki i utrudnia ich depozycję. Po drugie, w miarę pogłębienia się koryta określony stan może być osiągnięty przy coraz wyższym przepływie (Wyźga, 1991, 1993a), co powoduje zmniejszenie częstotliwości wylewów rzeki. Wreszcie, wiadomo, że koncentracja transportowanych w zawieszinie ziarn grubszych od drobnego pyłu zmienia się w profilu pionowym rzeki (tzw. zawiesina gradacyjna) (Vanoni, 1946). Zatem wzrost głębokości koryta powoduje, że transport grubszych frakcji obciążenia zawiesinowego rzeki coraz bardziej koncentruje się w obrębie koryta i jednocześnie maleją rozmiary ziarn, które mogą być przenoszone wraz z wodami wezbraniowymi do obszaru zalewowego.

Wcinanie się rzek we wschodniej i w zachodniej części polskich Karpat przebiegało nieco odmiennie. W rezultacie, inne czynniki musiały dominująco oddziaływać na zmiany warunków sedymentacji pozakorytowej wywołane wcinaniem się rzek w obu tych regionach. Celem artykułu jest przedstawienie wpływu pogłębienia się koryt karpaccich dopływów Wisły na zmiany warunków sedymentacji pozakorytowej w ich dolinach i wyjaśnienie jego regionalnego zróżnicowania.

2. Metody badań

Literatura geomorfologiczna obfituje w liczne prace opisujące szybkie narastanie osadów pozakorytowych, zarówno w czasach historycznych, jak i współczesnych (np. Knox, 1987; Magilligan, 1992; Gomez i in., 1998). Natomiast próby udokumentowania współczesnego spowolnienia lub zahamowania sedymentacji pozakorytowej w wyniku wcinania się rzeki napotykają poważne przeszkody metodologiczne. Wprawdzie istnieją procedury analityczne umożliwiające modelowanie przepływu (Bates i in., 1992) i sedymentacji (Nicholas, Walling, 1995) w obszarze pozakorytowym, jednakże wymagają one dokładnej znajomości morfologii równi zalewowej i koryta. Brak takich danych z przeszłości nie pozwala na zastosowanie tych metod do określenia, jak zmieniały się w czasie hydrauliczne i depozycyjne warunki w obszarach zalewowych rzek karpaccich. Z kolei, bardzo rzadkie rozmieszczenie na karpaccich dopływach Wisły posterunków, w których rejestruje się przepływ obciążenia zawiesinowego, nie pozwala

na wyliczenie ubytków ładunku zawieszzonego, jakie miały miejsce w określonych odcinkach tych rzek w kolejnych okresach, choć metodę tę z powodzeniem zastosowano (Łajczak, 1995, 1997) do określenia rozmiarów sedymentacji w dolinie samej Wisły. Wreszcie, fluktuacje klimatyczne i zmiany gospodarowania w zlewniach spowodowały zmniejszenie się w drugiej połowie XX wieku wielkości średniego rocznego wezbrania na karpackich dopływach Wisły (Wyźga, 1991, 1997, por. Bogdanowicz, Stachy, 1995). Zarówno zmniejszenie się kulminacji wezbrań, jak i wcięcie się rzek przyczyniło się do zmniejszenia częstotliwości występowania przepływów ponadpełnokorytowych i nie ma możliwości rozdzielenia wpływu tych czynników na zmiany tempa sedymentacji pozakorytovej na rzekach karpackich.

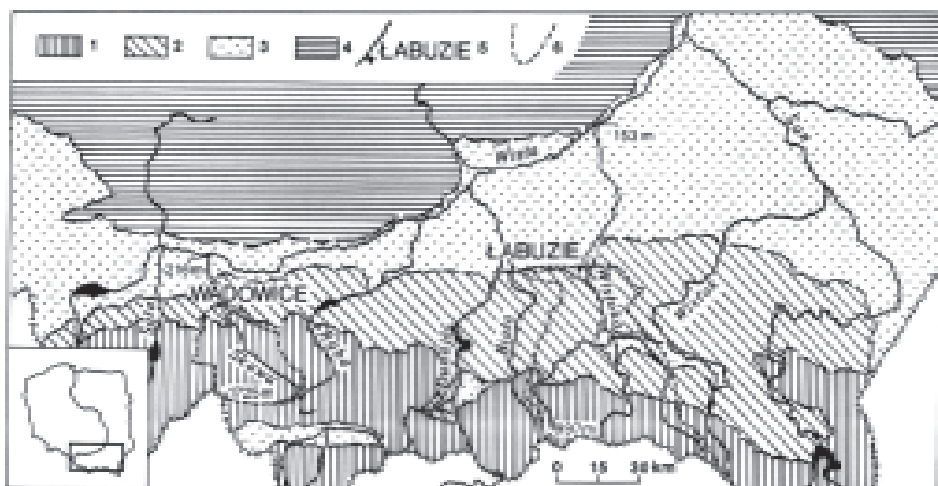
W celu przewyżczenia wymienionych trudności, niniejsze rozważania koncentrują się na zmianach warunków depozycji w obszarze pozakorytovej rzek, a nie na samych zmianach tempa sedymentacji. Zakłócający efekt czasowej zmienności przepływów wyeliminowano porównując zależności stan/przepływ dla różnych lat w okresie weinania się rzek. Umożliwiło to określenie zmian wielkości przepływu oraz okresu jego powtarzalności, osiąganego w różnych latach przy tych samych stanach, a w szczególności przepływu osiąganego przy stanie pełnokorytovej. Określono także zmiany względnej wysokości ponad dnem rzeki stanów osiągniętych przy określonych przepływach, co pozwoliło ocenić, jak pogłębienie się koryt wpłynęło na możliwość wprowadzania do obszaru zalewowego ziarn transportowanych w suspensji frakcyjnej¹⁾.

Już wcześniej wskazywano na wpływ warunków hydrodynamicznych przepływów wezbraniowych na formowanie się osadów pozakorytovej w dolinach rzek karpackich (Klimek, 1974a). Przedstawioną powyżej analizę uzupełniono zatem badaniem średnich prędkości przepływu w strefie korytovej i pozakorytovej rozważanych przekrojów wodo-wskazowych. W tym celu wykorzystano opracowaną przez autora metodę (Wyźga, 1999) umożliwiającą oszacowanie średnich prędkości w obu strefach przekroju rzeczne-go przy danej wielkości przepływu odczytanej z krzywej konsumcyjnej. Oszacowania prędkości przepływu posłużyły następnie do wnioskowania o możliwości depozycji transportowa-nych ziarn (por. Sundborg, 1967) w badanych obszarach zalewowych przy określonych przepływach. Znając średnie prędkości w obu strefach można było także określić, jaka część całkowitego przepływu była przenoszona w strefie korytovej, a jaka w strefie pozakorytovej rzeki. To z kolei umożliwiło zrekonstruowanie zmian udziału przepływu przenoszonego w strefie pozakorytovej w całkowitym przepływie, jakie nastąpiły wraz z wcięciem się rzek.

3. Badane rzeki i zmiany ich morfologii w XX wieku

Badania przeprowadzono w posterunku wodowskazowym Łabuzie na Wisłocy i w posterunku Wadowice na Skawie (ryc. 1). Wymienione przekroje wodowskazowe zamykają zlewnie o odmiennej charakterystyce morfologicznej, co znajduje wyraźne odzwierciedlenie w zróżnicowaniu spadku i energii tych karpackich dopływów Wisły

¹⁾ Autor dziękuje dyrekcji Oddziału IMGW w Krakowie za nieodpłatne udostępnienie danych hydrometrycznych.



Ryc. 1. Lokalizacja badanych posterunków wodowskazowych w dorzeczu górnej Wisły
 1 – góry średnie i niskie, 2 – pogórza, 3 – kotliny przedgórskie i śródgórskie, 4 – wyżyny, 5 – badane posterunki wodowskazowe, 6 – granice zlewni Skawy i Wisłoki zamkniętych badanymi posterunkami

Fig. 1. Location of the investigated gauging stations within the upper Vistula River drainage basin
 1 – mountains of intermediate and low height, 2 – foothills, 3 – submontane and intramontane depressions, 4 – uplands, 5 – gauging stations investigated, 6 – boundaries of the catchments of the Skawa and Wisłoka Rivers to the stations investigated

(tab. 1).

Zlewnia Wisłoki do przekroju Łabuzie obejmuje obszar niskich gór o wysokościach do 997 m n.p.m., pogórzy i kotlin śródgórskich. Koryto rzeki ma stosunkowo mały spadek, a jego dno w sąsiedztwie posterunku Łabuzie utworzone jest ze żwiru piaszczystego. Wisłoka cechuje się występowaniem częstych, lecz niezbyt wielkich wezbrań roztopowych i rzadkich, dużych wezbrań letnich.

Zlewnia Skawy obejmuje obszar gór średnich i niskich, o maksymalnej wysokości 1725 m n.p.m. W Wadowicach koryto Skawy, o grubożwirowym dnie, ma stosunkowo znaczny spadek. Wezbrania na Skawie występują zazwyczaj w miesiącach letnich i mają bardziej gwałtowny przebieg niż na Wisłoce (tab. 1).

W końcu XIX wieku Wisłoka i Skawa płynęły szerokimi i płytkimi korytami. W 1904 r. rozpoczęto regulację koryt karpackich dopływów Wisły (Kędzior, 1928); doprowadziła ona do skrócenia biegu obu rzek w sąsiedztwie badanych posterunków o kilkanaście procent i niewielkiego zwężenia ich koryt. W rezultacie, w drugiej dekadzie stulecia rozpoczęło się naturalne pogłębianie koryt obu rzek. Ich późniejsza ewolucja przebiegała jednakże nieco odmiennie, jak świadczą o tym zmiany minimalnych rocznych stanów wody Wisłoki i Skawy w ciągu XX wieku (ryc. 2).

Utworzony w dwóch pierwszych dekadach wieku system regulacyjny Wisłoki, rzeki o mniejszej energii, pozostał zasadniczo nienaruszony w ciągu pierwszej połowy

Tab. 1. Hydrologiczna i hydrauliczna charakterystyka Wisłoki w Łabuziu i Skawy w Wadowicach

Table 1. Hydrological and hydraulic characteristics of the Wisłoka River at the Łabuzie gauging station and of the Skawa River at the Wadowice station

Rzeka	Wisłoka	Skawa
Posterunek wodowskazowy	Łabuzie	Wadowice
Powierzchnia zlewni [km ²]	2546	835
Średni roczny przepływ (1961-1997) [m ³ /s]	26,7	12,7
Średnie roczne wezbranie (1961-1997) [m ³ /s]	352	242
Iloraz Q_{MAX}/Q_{SR}	13,2	19,0
Spadek koryta [m/km]	0,65	3,1
Jednostkowa moc strumienia przy przepływie pełnokorytowym [W/m ²]	65,5	96,8

Wartości spadku koryta i jednostkowej mocy strumienia odnoszą się do koryta Wisłoki z 1996 r. i do koryta Skawy z 1997 r.



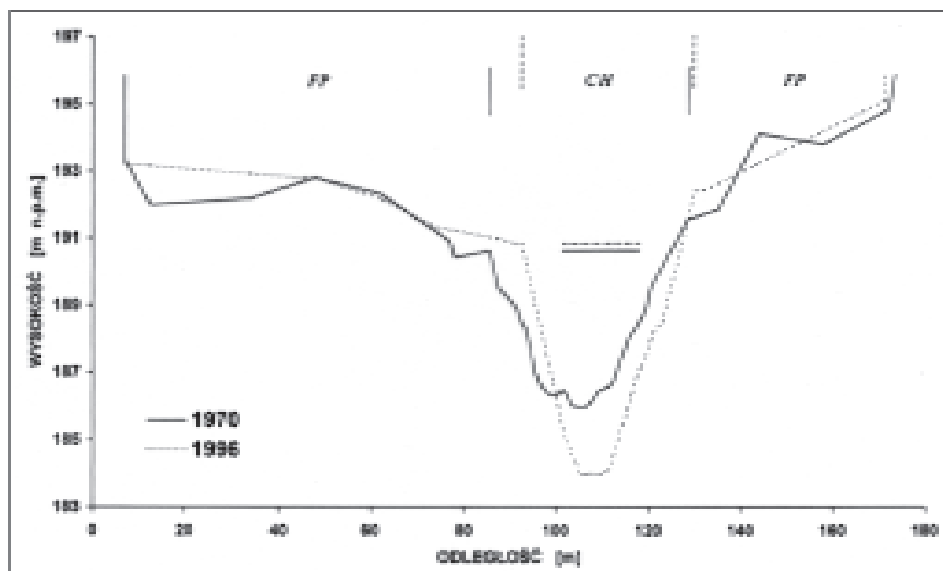
Ryc. 2. Zmiany minimalnych rocznych stanów wody Skawy w posterunku wodowskazowym Wadowice i Wisłoki w posterunku Łabuzie od początku XX wieku

Strzałkami wskazano lata, w których wykonano niwelację przekrojów wodowskazowych pokazanych na rycinach 3 i 4

Fig. 2. Changes in the lowest annual water stage of the Skawa River at the Wadowice gauging station and of the Wisłoka River at the Łabuzie station since the beginning of the 20th century
Arrows indicate the years in which the gauging sections shown in Figures 3 and 4 were surveyed

stulecia. Po początkowym, gwałtownym pogłębieniu się koryta o ok. 0,6 m w połowie drugiej dekady, do połowy lat 50. dno koryta powoli się obniżało, co doprowadziło do wcięcia się rzeki w tym okresie o ok. 0,5 m (ryc. 2). W latach 50. ponownie podjęto na Wisłoce prace regulacyjne prowadzące do dalszego zwężenia jej koryta. Ta powtórna regulacja zbiegła się ze stopniowym zmniejszaniem się dostawy rumowiska do koryta rzeczno, spowodowanym fluktuacjami klimatycznymi i zmianami gospodarowania w zlewni (Wyźga, 1997). Dostawa rumowiska ze zlewni musiała ulec zmniejszeniu wraz z obniżeniem się kulminacji wezbrań w drugiej połowie stulecia (por. Wyźga, 1993b). Ponadto, w górskiej części zlewni Wisłoki znaczna część arealu pól uprawnych została po II wojnie światowej zamieniona na łąki i pastwiska lub zalesiona (Lach, 1975; Alexandrowicz i in., 1981). Wreszcie, od lat 50. w korycie rzeki prowadzono intensywną eksploatację żwirów (Osuch, 1968). Wywołany regulacją wzrost zdolności transportowej rzeki, przy równoczesnym zmniejszaniu się ilości rumowiska mogącego podlegać transportowi fluwialnemu, spowodował zaburzenie jej stabilności. Wzbudziło to gwałtowne wcinanie się rzeki; od połowy lat 50. minimalne roczne stany Wisłoki w Łabuziu obniżyły się o dalsze 2,5 m.

Zmiany koryta Wisłoki wywołane tym gwałtownym wcinaniem się rzeki ilustruje porównanie przekroju w Łabuziu z lat 1970 i 1996 (ryc. 3). Średnia wysokość dna



Ryc. 3. Przekrój poprzeczny Wisłoki w posterunku wodowskazowym Łabuzie w latach 1970 i 1996

Zaznaczono pozycję stanu pełnokorytowego. Morfologiczne strefy przekroju: CH – koryto, FP – równia zalewowa

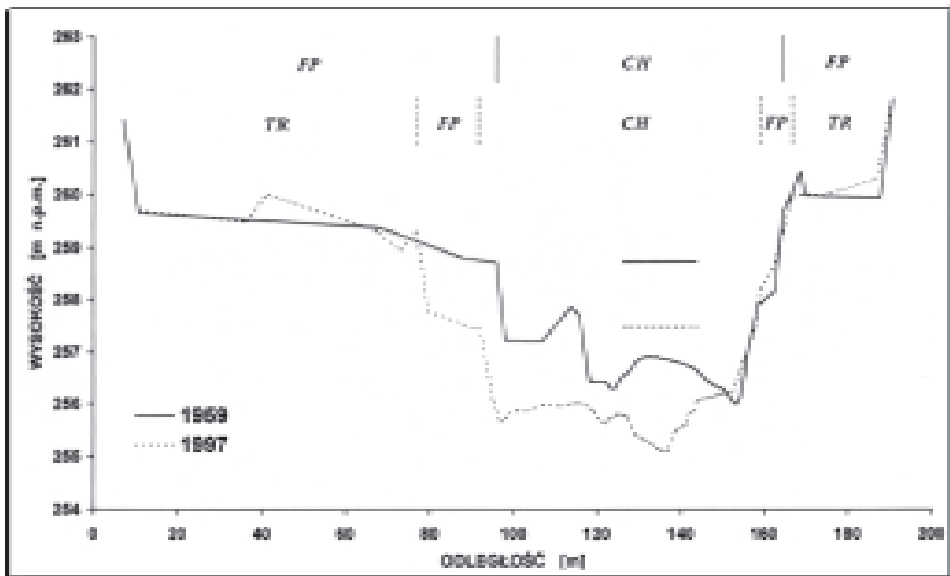
Fig. 3. Cross-section of the Wisłoka River at Łabuzie gauging station in 1970 and 1996

Elevation of bankfull stage is also marked. Morphological zones of the cross-section: CH - channel, FP - floodplain

rzeki obniżyła się w tym okresie o ok. 2,3 m (ryc. 3), czemu towarzyszyło obniżenie się minimalnych rocznych stanów o 1,25 m (ryc. 2). Różnica powyższych wielkości jest wynikiem jednoczesnego zmniejszenia się szerokości koryta, kompensującego częściowo wzrost jego pojemności spowodowany degradacją dna rzeki. Wskutek tych zmian iloraz szerokości do głębokości koryta zmniejszył się z 8,4 w 1970 r. do 5,0 obecnie (ryc. 3). Wskazuje to na malejący udział obciążenia dennego w całkowitym obciążeniu rzeki (por. Schumm, 1969), co jest logiczną konsekwencją zmian użytkowania ziemi, jakie nastąpiły w zlewni Wisłoki.

Od początku drugiej dekady XX wieku minimalne roczne stany Skawy w Wadowicach obniżyły się o ponad 2 m (ryc. 2). W tym czasie zaznaczyły się trzy długie okresy wcinania się rzeki rozdzielone krótkimi epizodami agradacji. Nadbudowa dna w czasie tych epizodów jedynie częściowo równoważyła wielkość pogłębienia się koryta w poprzedzającym okresie degradacji, czego efektem było postępujące obniżanie się dna rzeki w ciągu stulecia. Niemniej jednak te epizody agradacji są istotne, gdyż odzwierciedlają okresy zniszczenia zabudowy regulacyjnej i poszerzania się koryta. Wystąpienie w krótkim czasie kilku dużych wezbrań powodowało, że Skawa, będąca rzeką o wysokiej energii, mogła zniszczyć urządzenia regulacyjne (por. Wyźga, 1991). W istocie, pierwszy epizod był związany z wezbraniem z lat 1948, 1949 i 1951, natomiast drugi miał miejsce po wezbraniach z lat 1970 i 1972. Wraz z rozszerzaniem się koryta i meandrowaniem nurtu malała jednostkowa moc strumienia, co umożliwiało akumulację materiału dennego i agradację dna rzeki (por. Wyźga, 1991). Następnie koryto zostało ponownie wyprostowane i zwężone, a brzegi rzeki umocniono opaskami lub narzutem kamiennym. Wraz z ponowną regulacją koryta następował powrót tendencji do wcinania się rzeki, a jednocześnie ta część dawnego szerokiego koryta, która została oddzielona od nurtu umocnieniami regulacyjnymi, przekształcała się w nową, nisko położoną równię zalewową.

Zmiany morfologii koryta Skawy, jakie dokonały się w ostatnim cyklu rozszerzania się i zwężania koryta oraz agradacji i degradacji dna rzeki, ilustruje porównanie przekroju w Wadowicach z lat 1959 i 1997 (ryc. 4). W latach 70. lewy brzeg cofnął się tu o niemal 20 m. W wyniku wybudowania ostróg w lewej części rozszerzonego koryta, około 1980 r. utworzyła się tam łacha żwirowa. Następnie, wraz z ponownym wyprostowaniem i zwężeniem koryta w sąsiedztwie przekroju wodowskazowego, na początku lat 80. rzeka zaczęła się wcinąć, a to z kolei umożliwiło zapoczątkowanie sedymentacji pozakorytowej na powierzchni łąchy. Podobnie załom w obrębie prawego brzegu w korycie z 1959 r. przekształcił się w wąski pas równi zalewowej po prawej stronie rzeki. W wyniku tej naj-młodszej fazy degradacji średnia wysokość dna rzeki obniżyła się w latach 1959-1997 o nieco ponad 1 m (ryc. 4). Ponieważ kształt koryta nie uległ istotnej zmianie (iloraz szerokości do głębokości wynosił 24,5 dla koryta z 1959 r. i 28,0 dla współczesnego koryta), minimalne roczne stany wody obniżyły się w tym okresie o taką samą wielkość (ryc. 2). Obecnie wody powodziowe koncentrują się w pogłębionym korycie i ponad nową równią zalewową, a wskutek tego dawna równia zalewowa przekształciła się w terasę nadzalewową (ryc. 4) (Wyźga, 1999). Tak więc to uformowanie się nowej, nisko położonej równi zalewowej w wyniku bocznej migracji koryta Skawy wytworzyło tu odmienną sytuację niż na Wisłocie i różnica ta ma istotne odzwierciedlenie w hydraulice przepływów wezbrańowych.



Ryc. 4. Przekrój poprzeczny Skawy w posterunku wodowskazowym Wadowice w latach 1959 i 1997.

Zaznaczono pozycję stanu pełnokorytowego. Morfologiczne strefy przekroju: CH – koryto, FP – równia zalewowa, TR – terasa nadzalewowa

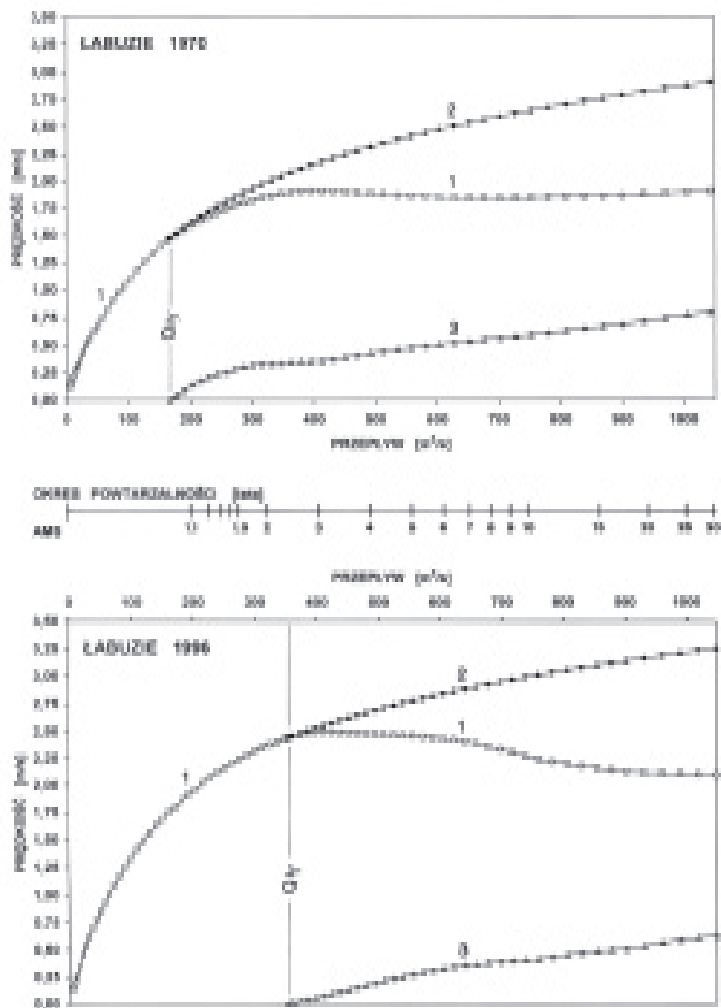
Fig. 4. Cross-section of the Skawa River at the Wadowice gauging station in 1959 and 1997

Elevation of bankfull stage is also marked. Morphological zones of the cross-section: CH – channel, FP – floodplain, TR – terrace

4. Zmiany hydraulicznych i depozycyjnych warunków w obszarach zalewowych Wisłoki i Skawy wywołane pogłębieniem się ich koryt

W wyniku obniżenia się dna rzeki i niewielkiego podniesienia się krawędzi brzegu (ryc. 3) przepływ pełnokorytowy Wisłoki w Łabuziu zwiększył się w latach 1970-1996 ponad dwukrotnie, ze 167 do 354 m³/s, przy wzroście okresu jego powtarzalności, określonego metodą ciągu maksymalnych rocznych przepływów, z 1,03 do 2,35 roku (ryc. 5). Ponieważ górskie rzeki o dużej zmienności przepływów cechuje znaczna rozbieżność ciągu maksymalnych rocznych przepływów i ciągu najwyższych przepływów w zakresie małych, często powtarzających się wezbrań (Wyźga, 1995), okres powtarzalności przepływu osiągniętego przy stanie pełnokorytowym w latach 1970 i 1996 określono także metodą ciągu najwyższych przepływów. Tak określony okres powtarzalności zwiększył się w tych latach z 0,32 do 1,71 roku, co oznacza, że częstotliwość występowania przepływów ponadpełnokorytowych na Wisłocy jest obecnie ponad pięciokrotnie mniejsza niż w 1970 r.

Zmniejszyła się także częstotliwość zatapiania określonego poziomu na dzień do-



Ryc. 5. Zależność pomiędzy średnią prędkością w całym przekroju (1) oraz w strefie korytowej (2) i pozakorytowej (3) a natężeniem przepływu w posterunku wodowskazowym Łabuzie na Wisłocie w latach 1970 i 1996

Punktami przedstawiono warunki przy stanach wody zmieniających się co 10 cm. Q_{bf} oznacza przepływ pełnokorytowy. Na rycinach 5 i 6 wartości przepływu przyporządkowano ich okres powtarzalności, określony metodą ciągu maksymalnych rocznych przepływów z lat 1961-1997

Fig. 5. Relationship between the mean flow velocity in total cross-section (1), in channel zone (2) and in floodplain zone (3) of the cross-section, and discharge for the Łabuzie gauging station on the Wisłoka River in 1970 and 1996

Points represent conditions for stage changing at 10 cm intervals. Q_{bf} denotes bankfull discharge. Discharges in Figures 5 and 6 are referred to their recurrence interval determined by the annual maximum series method from the years 1961-1997

liny (tab. 2). I tak, poziom osiągnięty w 1970 r. przez 5-letni przepływ w 1996 r. mógł zostać zatopiony przez wezbranie o powtarzalności 7,8 roku, a stan związany uprzednio z 20-letnim wezbraniem mógł teraz zostać osiągnięty przy przepływie o okresie powtarzalności 27,5 roku. Jednocześnie obniżył się stan związany z określonym przepływem (tab. 3); obniżenie to wyniosło 69 cm dla przepływu o 5-letnim okresie powtarzalności, 44 cm dla 10-letniego przepływu i 28 cm dla przepływu o 20-letniej powtarzalności.

Tab. 2. Zmiany wielkości przepływu i okresu powtarzalności jego wystąpienia dla przepływów osiągniętych przy tych samych stanach przed i po okresie szybkiego wezbrania się Wisłoki w przekroju wodowskazowym Łabuzie i Skawy w przekroju Wadowice

Table 2. Changes in discharge and its recurrence interval associated with the same stages of the Wisłoka River at the Łabuzie gauging station and of the Skawa River at the Wadowice station recorded before and after the period of rapid incision of the rivers

Wisłoka w Łabuziu			Skawa w Wadowicach		
1970	1996		1959	1997	
Przepływ o okresie powtarzalności [m ³ /s]	Przepływ przy tym samym stanie [m ³ /s]	Okres powt. [lata]	Przepływ o okresie powtarzalności [m ³ /s]	Przepływ przy tym samym stanie [m ³ /s]	Okres powt. [lata]
Q ₃ 407	551	4,9	Q ₃ 288	639	17,9
Q ₅ 558	678	7,8	Q ₅ 393	751	33,5
Q ₁₀ 745	848	14,5	Q ₁₀ 530	886	68,0
Q ₁₅ 860	952	21,0	Q ₁₅ 605	?	?
Q ₂₀ 940	1025	27,5	Q ₂₀ 660	?	?

Tab. 3. Zażądano w latach 1970-1996 zmiana względnej wysokości ponad dnem rzeki stanów wody Wisłoki w posterunku wodowskazowym Łabuzie przy przepływach o danym okresie powtarzalności

Table 3. Elevation above channel bed of the water stage of the Wisłoka River at the Łabuzie gauging station attained at discharges of given recurrence intervals in 1970 and 1996 and its change between these years

Okres powt. [lata]	Przepływ [m ³ /s]	1970		1996		1970 -1996
		Stan [m n.p.m.]	Wysokość nad dnem [m]	Stan [m n.p.m.]	Wysokość nad dnem [m]	Przyrost wysokości nad dnem [m]
3	407	192,27	5,97	191,27	7,27	1,30
5	558	193,00	6,70	192,31	8,31	1,61
10	745	193,77	7,47	193,33	9,33	1,86
15	860	194,17	7,87	193,82	9,82	1,95
20	940	194,41	8,11	194,13	10,13	2,02
25	1000	194,58	8,28	194,33	10,33	2,05

Rezultatem zmian morfologii rzeki były znaczne zmiany prędkości przepływu, zarówno jej wartości bezwzględnych, jak i rozkładu w przekroju poprzecznym (ryc. 5). Średnia prędkość przy przepływie pełnokorytowym zwiększyła się znacznie z 1,44 m/s w 1970 r. do 2,44 m/s w 1996 r., chociaż wzrost ten częściowo wynikał ze zwiększenia się przepływu przy stanie pełnokorytowym. W warunkach ponadpełnokorytowych średnia prędkość w całym przekroju była teraz wyższa niż w 1970 r., przewyższając odpowiednie wartości od ok. 30% przy niskich przepływach ponadpełnokorytowych do 12% przy przepływie o 20-letniej powtarzalności. Ten wzrost średniej prędkości w całym przekroju rzeki był wynikiem dwóch przeciwstawnych tendencji. Średnia prędkość w strefie korytowej zwiększyła się o kilkanaście procent na skutek większej koncentracji przepływu w pogłębionym korycie. Natomiast średnia prędkość w strefie pozakorytowej znacznie zmalała, co było wynikiem mniejszych głębokości zatopienia równi zalewowej przy określonym natężeniu przepływu; zmniejszyła się ona o 43% w przypadku 5-letniego wezbrania i o 26% w przypadku przepływu o 20-letniej powtarzalności. Przy 5-letnim przepływie średnia prędkość w strefie korytowej wynosiła teraz 2,78 m/s, a średnia prędkość w obszarze zalewowym 0,27 m/s, natomiast przy przepływie o 20-letniej powtarzalności odpowiednie wartości wynosiłyby 3,17 oraz 0,54 m/s. Zatem obecnie Wisłokę cechuje znaczna różnica pomiędzy średnią prędkością w strefie korytowej i w strefie pozakorytowej (ryc. 5). Przy takim rozkładzie prędkości większość grubszych ziarn przenoszonych w suspensji do obszaru zalewowego powinna ulegać gwałtownej depozycji w sąsiedztwie brzegów rzeki (Wyźga, 1999).

W rezultacie wzrostu pojemności koryta i większych prędkości przepływu w strefie korytowej znacznie zmniejszyła się ilość wód wezbraniowych przenoszonych w obszarze zalewowym (tab. 4). W przypadku 5-letniego wezbrania zmalała ona z 7,3% całkowitego przepływu w 1970 r. do zaledwie 1,2% w 1996 r. Przy wezbraniu o 20-letniej powtarzalności w 1970 r. w strefie pozakorytowej byłoby przenoszone 17,4% całkowitego przepływu, natomiast w 1996 r. tylko 10,3%.

Tab. 4. 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

Table 4. Percentage of the total flow of the Wisłoka River at the Łabuzie station and of the Skawa River at the Wadowice station conveyed in the extra-channel zone of the gauging sections before and after the period of rapid incision of the rivers

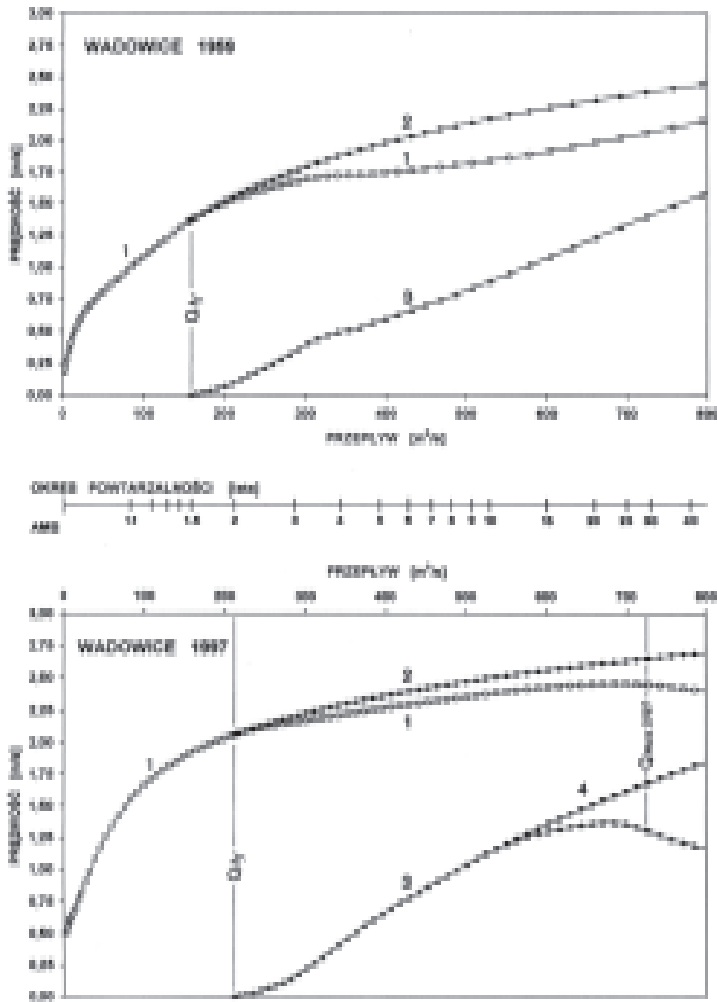
	Wisłoka w Łabuziu		Skawa w Wadowicach	
	1970	1996	1959	1997
Q ₃	2,7	0,1	1,3	0,2
Q ₅	7,3	1,2	5,5	1,6
Q ₁₀	12,3	5,2	12,5	4,2
Q ₁₅	15,3	8,2	16,3	5,7
Q ₂₀	17,4	10,3	19,0	6,7
Q ₂₅	18,9	12,0	20,8	7,5

Innym efektem weinania się Wisłoki był znaczny wzrost względnej wysokości stanów wezbraniowych ponad dnem rzeki (tab. 3). W latach 1970-1996 wysokość ponad dnem rzeki stanu związanego z 5-letnim wezbraniem zwiększyła się o 1,61 m, a przy wezbraniach o 10-letniej i 20-letniej powtarzalności wzrosła odpowiednio o 1,86 i 2,02 m. Wobec równoczesnego zmniejszenia się głębokości zatopienia obszaru zalewowego przy określonych przepływach (tab. 3) ten znaczny wzrost odległości pomiędzy dnem rzeki a powierzchnią wody oznacza, iż 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. Choć w rozważanym przypadku brak podstaw do ilościowej oceny wpływu tych czynników, ich oddziaływanie bez wątpienia spowodowało zmniejszenie się frakcji oraz ilości grubszych ziarn materiału klastycznego wnoszonych wraz z wodami wezbraniowymi do obszaru zalewowego Wisłoki. Wraz ze zmniejszeniem się ilości wód wezbraniowych przenoszonych w strefie pozakorytowej (tab. 4), musiało to ograniczyć tempo sedymentacji takich ziarn, mimo że prędkości przepływu są tu obecnie mniejsze. Tempo depozycji drobnych ziarn, transportowanych w suspensji jednorodnej, jest proporcjonalne do głębokości wody w danym miejscu równi zalewowej (Walling, He, 1998). Zatem również i tempo sedymentacji takich ziarn w obszarze zalewowym Wisłoki musiało ulec zmniejszeniu wraz ze zmniejszeniem się głębokości i skróceniem czasu zatopienia równi zalewowej przy określonych przepływach.

W latach 1959-1996 przepływ pełnokorytowy Skawy w Wadowicach zwiększył się ze 159 do 211 m³/s (ryc. 6). Okres powtarzalności przepływu osiągniętego przy stanie pełnokorytowym, określony metodą ciągu maksymalnych rocznych przepływów, zwiększył się w tym czasie z 1,50 do 1,97 roku (ryc. 6), a wyznaczony metodą ciągu najwyższych przepływów wzrósł z 0,87 do 1,29 roku. Zmniejszenie się częstotliwości przepływów ponadpełnokorytowych na Skawie było więc znacznie mniejsze niż to, które miało miejsce na Wisłocie w latach 1970-1996 przy podobnej wielkości obniżenia się minimalnych rocznych stanów obu rzek w rozważanych okresach i ta odmienna sytuacja jest najwyraźniej związana z utworzeniem się nowej, nisko położonej równi zalewowej na Skawie.

Koncentracja wód wezbraniowych w pogłębionym korycie i w obszarze nowej równi zalewowej spowodowała drastyczne obniżenie się stanów związanych z określonymi przepływami; w rozważanym okresie wyniosło ono 139 cm dla przepływu o 5-letnim okresie powtarzalności, 118 cm dla 10-letniego przepływu i 94 cm dla przepływu o 20-letniej powtarzalności. Z kolei, stany wody związane uprzednio z przepływem o 5-letniej i 10-letniej powtarzalności obecnie mogłyby zostać osiągnięte przy wystąpieniu wezbrania o okresie powtarzalności, odpowiednio, 33,5 i 68 lat (tab. 2). Efektem tego obniżenia się stanów było znaczne ograniczenie poziomego zasięgu wód wezbraniowych w przekroju dna doliny i przekształcenie się wyższego poziomu w terasę nadzalewową (ryc. 4).

Rezultatem zwiększonej koncentracji przepływu w przekroju rzeki i zwiększenia spadku koryta w toku prac regulacyjnych był wzrost prędkości przepływu (ryc. 6). Średnia prędkość przy przepływie pełnokorytowym zwiększyła się z 1,36 m/s w 1959 r. do 2,06 m/s w 1997 r., choć i tu wzrost ten częściowo wynikał ze zwiększenia się prze-



Ryc. 6. Zależność pomiędzy średnią prędkością w całym przekroju (1) oraz w strefie korytowej (2) i pozakorytowej (3) a natężeniem przepływu w posterunku wodowskazowym Wadowice na Skawie w latach 1959 i 1997.

Sygnaturą (4) przedstawiono średnią prędkość przepływu w obszarze samej równi zalewowej od momentu rozpoczęcia zatapiania terasy nadzalewowej w przekroju rzeki z 1997 roku. Punktami przedstawiono warunki przy stanach wody zmieniających się co 5 cm. Q_{bf} oznacza przepływ pełnokorytowy

Fig. 6. Relationship between the mean flow velocity in total cross-section (1), in channel zone (2) and in extra-channel zone (3) of the cross-section, and discharge for the Wadowice gauging station on the Skawa River in 1959 and 1997.

Signature (4) depicts velocities over the floodplain itself after the start of inundation of the terrace in the 1997 cross-section. Points represent conditions for stage changing at 5 cm intervals. Q_{bf} denotes bankfull discharge

pływu przy stanie pełnokorytowym. W warunkach ponadpełnokorytowych prędkości przepływu są obecnie wyższe nie tylko w strefie korytowej, lecz również ponad równią zalewową; w rezultacie, średnia prędkość w całym przekroju przewyższa odpowiednie wartości z 1959 r. o ok. 20-30%. W czasie wezbrania w lipcu 1997 r. średnia prędkość w strefie korytowej osiągnęła 2,35 m/s przy przepływie o 5-letniej powtarzalności i 2,65 m/s przy kulminacyjnym przepływie 725 m³/s, którego okres powtarzalności wynosi 29 lat. Natomiast średnia prędkość przepływu ponad równią zalewową wyniosła 0,64 m/s przy 5-letnim przepływie i 1,68 m/s w czasie kulminacji wezbrania. W 1997 r. średnia prędkość w obszarze równi zalewowej osiągnęła 1 m/s już przy przepływie o okresie powtarzalności 8,5 roku, podczas gdy w roku 1959 nastąpiłoby to przy przepływie o 12,5-letniej powtarzalności. Przy takiej prędkości w trakcji mogą być transportowane nawet drobne otoczaki, a frakcje aż do średnioziarnistego piasku są stale utrzymywane w suspensji (Sundborg, 1967). Pokazuje to, iż obecnie, w czasie dużych wezbrań przenoszących największe ładunki mineralne, prędkości przepływu ponad wąskimi równiami zalewowymi Skawy są zbyt duże, by umożliwiać tu depozycję przenoszonego w zawieszaniu materiału klastycznego.

Zatopienie przy dużych przepływach terasy usytuowanej po lewej stronie rzeki (ryc. 4) powoduje, że obecny rozkład prędkości różni się znacznie od rozkładu z 1959 r. (ryc. 6). Prędkość przepływu ponad powierzchnią tej terasy była niewielka, osiągając w czasie kulminacji wezbrania z lipca 1997 r. około 0,3 m/s. Wraz z rozprzestrzenianiem się wody na terasie średnia prędkość w całej strefie pozakorytowej wzrastała wolniej, niż prędkość ponad samą równią zalewową, osiągając maksymalną wartość 1,37 m/s przy przepływie 685 m³/s, by w końcu zmniejszyć się do 1,31 m/s w czasie kulminacji wezbrania.

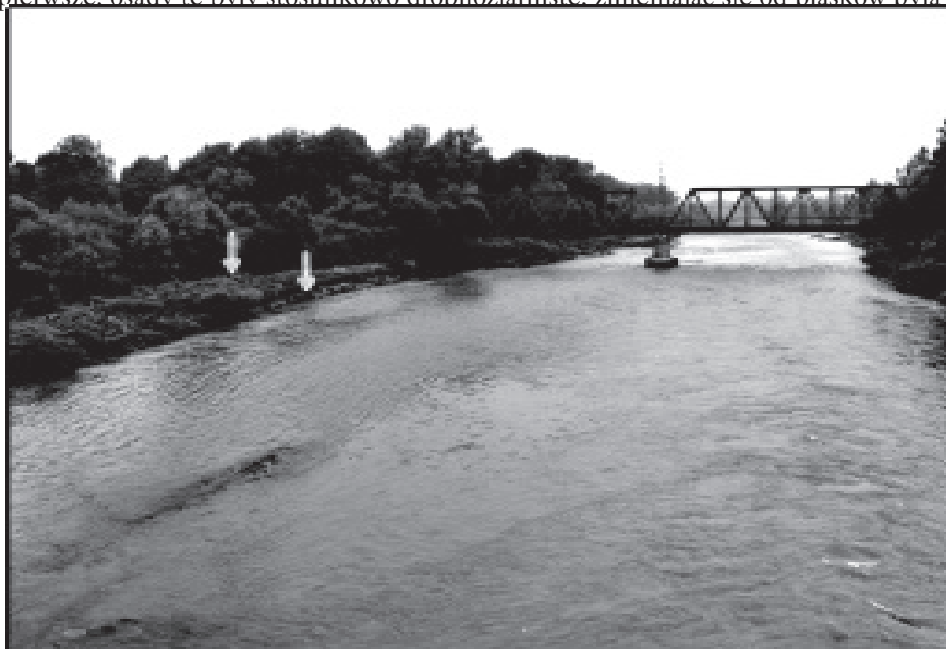
Wreszcie, również na Skawie wraz z wcięciem się rzeki zmalała ilość wód wezbraniowych przenoszonych w strefie pozakorytowej (tab. 4). Przy przepływie o 5-letniej powtarzalności zmalała ona z 5,5% całkowitego przepływu w 1959 r. do 1,6% w 1997 r., natomiast w przypadku przepływu o okresie powtarzalności 20 lat zmniejszyła się z 19,0 do 6,7%. W przypadku dużych wezbrań skala tego zmniejszenia była na Skawie wyraźnie większa niż na Wisłoce. Można to przypisać nie zmienionej szerokości koryta pomimo wcięcia się rzeki i koncentrowaniu się zarówno przepływów korytowych, jak i poza-korytowych w wąskim przekroju rzeki (ryc. 4).

Podsumowując, należy stwierdzić, że zmiany hydrauliki przepływów wezbraniowych Wisłoki i Skawy, spowodowane gwałtownym weinaniem się tych rzek w ostatnich dziesięcioleciach, radykalnie ograniczyły możliwość formowania się osadów pozakorytowych w ich dolinach. Znacznie zmalała ilość wód wezbraniowych przenoszonych w strefie pozakorytowej (tab. 4), a wraz z tym dużo mniejsze ilości rumowiska unoszonego mogą być obecnie wnoszone z wodami wezbraniowymi do obszarów zalewowych. Na Wisłoce towarzyszyło temu znaczne zmniejszenie się częstotliwości zatapiania obszaru zalewowego i postępująca koncentracja przepływu grubszych frakcji obciążenia zawieszinowego w obrębie koryta w miarę wzrostu względnej wysokości równi zalewowej ponad dnem rzeki. Na Skawie drastyczne obniżenie się maksymalnych stanów spowodowało znaczne ograniczenie poziomego zasięgu wód wezbraniowych.

wych. Jednocześnie wysokie prędkości przepływu ponad wąskimi, nisko położonymi równiami zalewowymi nie pozwalają tu na depozycję rumowiska unoszonego w czasie dużych wezbrań.

5. Obserwacje terenowe i ich znaczenie

Wezbranie w lipcu 1997 r. na Skawie stworzyło okazję do skonfrontowania przewidywanych teoretycznie warunków hydraulicznych w przekroju Wadowice z rozkładem zdeponowanych tu osadów pozakorytowych. Wkrótce po zakończeniu wezbrania stwierdzono tu poważne zniszczenia roślinności w obszarze zalewowym, wskazujące na duże prędkości przepływu ponad równią zalewową; nie tylko rośliny zielne, lecz również wikliny, porastające równię powyżej przekroju wodowskazowego, zostały przygięte do ziemi zgodnie z kierunkiem prądu (fot. 1). Z lewobrzeżnej części równi zalewowej w przekroju wodowskazowym pobrano cztery próby osadów, których właściwości wskazują na dwie ważne cechy sedymentacji pozakorytovej na Skawie. Po pierwsze, osady te były stosunkowo drobnoziarniste, zmieniając się od piasków pyla-



Fot. 1. Koryto i lewobrzeżna równia zalewowa Skawy w Wadowicach.

Strzałki wskazują przebieg przekroju wodowskazowego na równi zalewowej, a zarazem lokalizację prób osadu pobranych najbliżej i najdalej od brzegu. Bezpośrednio powyżej linii przekroju wodowskazowego na równi zalewowej widoczne wyłożone wikliny

Photo 1. Downstream view of the Skawa River and its left-hand floodplain at Wadowice.

White arrows indicate the location of the gauging section on the floodplain and of the most proximal and most distal of the four sediment samples taken here. Note osiers bent down to the ground on the floodplain immediately upstream of the gauging section

stych ponad krawędzią brzegu, poprzez pyły w odległości 4 m od brzegu, do mułów w obu dystalnych pozycjach. Po drugie, mimo że stan pełnokorytowy był tu 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 6-7 cm w sąsiedz-twie brzegu do ok. 1,5 cm przy skłonie terasy. Zarazem, w czasie tego wezbrania na wałach przykorytowych Wisły, bezpośrednio poniżej ujścia Skawy, zostały złożone rozległe pokrywy piasków średnioziarnistych o miąższości dochodzącej do 30 cm. Spadek koryta Skawy w Wadowicach około 20-krotnie przewyższa spadek koryta Wisły poniżej ujścia Skawy. Zatem przepływy pozakorytowe na Skawie musiały transportować w suspensji co najmniej tak grube frakcje jak te, które zostały zdeponowane w obszarze zalewowym Wisły i mała miąższość oraz drobnoziarnisty charakter sedymentacji pozakorytovej na Skawie nie mogą być przypisywane małej kompetencji jej przepływów pozakorytowych. Przeciwnie, niewielka miąższość osadów jest najprawdopodobniej wynikiem zbyt wysokiej prędkości przepływu w czasie przechodzenia grzbietu fali wezbraniowej, która uniemożliwiała depozycję na równi zalewowej. Brak depozycji towarzyszący dużym przepływom ponadpełnokorytowym jest charakterystyczny dla obszarów zalewowych rzek górskich (Teisseyre, 1989); na Skawie zjawisko to musiało zostać wzmocnione wskutek zwiększania się koncentracji przepływów wezbraniowych w przekroju rzeki w miarę jej wcinania się. Depozycja w obrębie równi zalewowej była najprawdopodobniej ograniczona do wczesnej fazy wezbrania, kiedy to roślinność, aż do czasu jej wyłożenia przez wodę, ułatwiała osadzanie się materiału. Natomiast na terasie po lewej stronie rzeki można było jedynie zaobserwować cienką powłokę osadu na zdźbłach trawy. Ponieważ prędkość przepływu po powierzchni terasy była bardzo mała, fakt ten należy przypisać niewielkiej koncentracji rumowiska unoszonego w najwyższych partiach kolumny wody oraz krótkiemu czasowi zatopienia terasy.

W ostatnich kilku latach na Wisłocze nie było większego wezbrania i fakt ten uniemożliwia wyodrębnienie i analizę osadów z ostatniego epizodu depozycyjnego. Obserwacje równi zalewowej Wisłoki pozwalają jednak na sformułowanie pewnych wniosków. Przy dużej różnicy prędkości w strefie korytovej i w strefie pozakorytovej danej rzeki pokaźne ilości rumowiska unoszonego powinny być deponowane na wałach przykorytowych i rzeczywiście taki charakter depozycji w czasie wezbrania w lipcu 1997 r. stwierdzono w dolinie Wisły (Wyźga, 1999). Jednakże na Wisłocze brak jest dobrze rozwiniętych wałów przykorytowych, zarówno w analizowanym przekroju (ryc. 3), jak i w sąsiadujących z nim odcinkach rzeki, mimo iż wały takie mogły zostać uformowane w trakcie dużych wezbrań w latach 1987 i 1989, o okresie powtarzalności 35 oraz 18 lat. Taką sytuację tłumaczy to, iż obecnie, nawet przy tak dużych wezbraniach, w górnych partiach kolumny wody przenoszone są niewielkie ilości rumowiska, natomiast grubsze frakcje obciążenia zawieszinowego rzeki są transportowane niemal wyłącznie w obrębie wciętego koryta. W takich warunkach osady złożone z tych frakcji są deponowane na wypukłych brzegach rzeki, tworząc tu stromo nachylone warstwy typowe dla tzw. wew-nętrznego brzegu akrecyjnego (ang. *inner accretionary bank*; Bluck, 1971). *Właśnie taki przebieg depozycji doprowadził do zwężenia koryta Wisłoki po 1970 r. (ryc. 3).*

6. Regionalne zróżnicowanie wpływu wcinania się rzek na warunki sedymentacji pozakorytowej

W poprzednim rozdziale wykazano, że inne czynniki odegrały dominującą rolę w zmniejszeniu w ostatnich kilku dziesięcioleciach depozycyjnej roli przepływów poza-korytowych na Wisłocze, inne zaś na Skawie. Poniżej przedstawiono przyczyny tego zróżnicowania oraz określono regionalną reprezentatywność obu analizowanych przypadków.

Zmiany hydrauliki przepływów wezbraniowych Wisłoki były wynikiem wcinania się rzeki przebiegającego w warunkach poziomej stabilności jej koryta. Kilka przyczyn złożyło się na brak lub nieznaczna migrację koryta Wisłoki w ostatnich dekadach. Po pierwsze, będąc rzeką o mniejszym spadku i mniej gwałtownych wezbraniach niż Skawa, Wisłoka cechuje się mniejszą energią swych przepływów wezbraniowych (tab. 1). Do zniszczenia zabudowy regulacyjnej brzegów konieczne jest tu zatem wystąpienie większej ilości wezbrań. Po drugie, brzegi Wisłoki są znacznie wyższe od brzegów Skawy (ryc. 3, 4), a ich wysokość jeszcze wzrosła w wyniku pogłębienia się koryta w latach 1970-1996. Tak więc większa objętość osadu musi tu zostać rozmyta i odprowadzona w dół rzeki przy cofnięciu brzegu na daną odległość. Wcześniejsze badania w dolinie Wisłoki rzeczywiście wykazały (Klimek, 1974b), że tempo cofania się brzegów było odwrotnie proporcjonalne do ich wysokości. Wreszcie, obniżenie się dna rzeki w jej dolnym biegu o ponad 3 m w ciągu XX wieku spowodowało, że Wisłoka rozcięła w wielu miejscach pokrywę czwartorzędowych aluwów i wcięła się w iłowce i mułowce miocenu (Alexandrowicz i in., 1981). Te miocenijskie osady są stosunkowo odporne na erozję, wzmacniając tym samym poziomą stabilność koryta.

W przeciwieństwie do sytuacji na Wisłocze, zmiany hydrauliki przepływów wezbraniowych Skawy były wynikiem występujących na przemian faz wcinania się rzeki oraz rozszerzania się koryta i meandrowania nurtu. Najwyraźniej Skawa dysponowała energią umożliwiającą zniszczenie zabudowy regulacyjnej, a mała wysokość brzegów ułatwiała ich erozję. Ponieważ koryto zostało ponownie uregulowane, ostatecznym efektem bocznej erozji rzeki było uformowanie się wciętego pasa meandrowego, w którym następuje koncentracja zarówno przepływów korytowych, jak i pozakorytowych.

Historia ewolucji Skawy i Wisłoki w ciągu XX wieku ilustruje różnice, jakie zaznaczyły się pomiędzy rzekami odwadniającymi zachodnią i wschodnią część polskich Karpat w przebiegu ich wcinania się wywołanego regulacją koryt. Te różnice odzwierciedlają odmienną fizjografię zlewni w obu tych regionach (Klimek, 1979). W części zachodniej przeważają obszary górskie (ryc. 1); rzeki tego regionu mają duże spadki i charakteryzują się wysoką energią przepływów wezbraniowych. Ułatwia ona przekroczenie progu stabilności budowli regulacyjnych. Skoro już zabudowa regulacyjna zostanie zniszczona, rozpoczyna się boczna migracja koryta, zmierzająca do zmniejszenia spadku rzeki zwiększonego nadmiernie w toku prac regulacyjnych. Prowadzi to do uformowania się wciętego pasa meandrowego, w którym następuje koncentracja przepływów wezbraniowych, a rumowisko może być łatwo przenoszone z biegiem rzeki (por. Knox, 1987; Lecce, 1997). Badania prowadzone przez autora w dolinie Raby

wykazały (Wyźga, 1991), że kolejno następujące po sobie epizody wcinania się rzeki oraz bocznej migracji koryta faktycznie doprowadziły do utworzenia się na dnie doliny coraz to niższych stopni teraso-wych z nieobecną lub cienką pokrywą drobnoziarnistych osadów pozakorytowych.

Natomiast we wschodniej części główne rzeki karpackie mają długie odcinki rozwinięte w obrębie pogórzy i przedpola gór (ryc. 1); zarówno ich spadki, jak i energia przepływów wezbraniowych są tu mniejsze niż w przypadku rzek w części zachodniej. Po regulacji, która doprowadziła do wyprostowania i zwężenia koryt, rzeki te zachowały stabilną pozycję w planie, a ich nadmierna energia została skierowana na rozmywanie dna. Wcinanie się rzek znacznie zwiększyło tu pojemność ich koryt, czego efektem był wzrost koncentracji przepływu wody i transportu rumowiska w strefie korytovej.

7. Podsumowanie i uwagi końcowe

Na przykładzie dwóch karpackich dopływów Wisły: Wisłoki i Skawy przedstawiono wpływ wcinania się rzeki, wywołanego regulacją koryta, na zmiany warunków sedymentacji pozakorytovej. Wisłoka ma mniejszy spadek i cechuje się mniejszą zmiennością przepływów niż Skawa, zatem rzeki te różnią się energią swych przepływów wezbraniowych. Koryto Wisłoki zostało wyprostowane i zwężone na początku XX wieku, a następnie jeszcze bardziej zwężone po II wojnie światowej. Ta powtórna regulacja wzbudziła gwałtowne pogłębianie się koryta; ponieważ jednak energia rzeki była niewystarczająca do zniszczenia zabudowy regulacyjnej, obniżaniu dna nie towarzyszyła boczna migracja koryta. W takich warunkach wcinanie się rzeki spowodowało wzrost względnej wysokości równi zalewowej ponad dnem rzeki, czego efektem było znaczne zmniejszenie się częstotliwości zatapiania obszaru zalewowego i zwiększona koncentracja transportu grubszych frakcji obciążenia zawiesinowego rzeki w obrębie koryta.

Natomiast koryto Skawy było kilkakrotnie prostowane i zwężane w ciągu XX wieku, gdyż wysoka energia rzeki umożliwiała niszczenie zabudowy regulacyjnej brzegów. W rezultacie długie okresy wcinania się uregulowanej rzeki przeplatały się z krótszymi okresami rozszerzania się koryta i agradacji dna. Wcinanie się rzeki połączone z boczna migracją jej koryta doprowadziło do uformowania się w niższej pozycji nowej, wąskiej równi zalewowej i w konsekwencji częstotliwość przepływów ponadpełnokorytowych zmniejszyła się na Skawie znacznie mniej niż na Wisłoce. Drastyczne obniżenie się maksymalnych stanów spowodowało tu jednak znaczne ograniczenie poziomego zasięgu wód wezbraniowych i przekształcenie się dawnej równi zalewowej w terasę nadzalewową. Ponieważ obecnie zarówno przepływy korytove, jak i pozakorytove koncentrują się w obrębie wciętego pasa meandrowego, wysokie prędkości przepływu ponad wąskimi, nisko położonymi równiami zalewowymi nie pozwalają tu na deponycję rumowiska unoszonego w czasie dużych wezbrań.

Obserwacje terenowe potwierdziły, że sedymentacja pozakorytova odgrywa obecnie niewielką rolę w dolinach obu rzek. W czasie dużego wezbrania w lipcu 1997 r. na

Skawie średnia prędkość przepływu ponad równią zalewową osiągnęła w Wadowicach maksymalną wartość 1,68 m/s. Depozycja na równi zalewowej była najprawdopodobniej ograniczona do wczesnej fazy wezbrania, natomiast w czasie przechodzenia grzbietu fali wezbraniowej uniemożliwiła ją zbyt duża prędkość przepływu i w rezultacie osady pozakorytowe lipcowego wezbrania mają tu niewielką miąższość. Stwierdzono, że na Wisłoce brak dobrze rozwiniętych wałów przykorytowych, mimo, że duża różnica prędkości w strefie korytowej i w strefie pozakorytowej powinna była sprzyjać ich formowaniu się. Pokazuje to, iż grubsze frakcje obciążenia zawiesinowego rzeki są obecnie przenoszone niemal wyłącznie w obrębie wciętego koryta, a zatem możliwość ich wprowadzania do obszaru zalewowego jest niewielka.

Opisana w artykule sytuacja na Skawie i Wisłoce ilustruje procesy wywołane wcinaniem się w ciągu XX wieku rzek odwadniających, odpowiednio, zachodnią i wschodnią część polskich Karpat, które ograniczyły możliwość formowania się osadów pozakorytowych w ich dolinach. Odmienna ewolucja rzek w obu regionach odzwierciedlała ich różną energię (por. Lecce, 1997), uwarunkowaną odmienną orografią zlewni w tych regionach oraz różnicami odległości pomiędzy obszarami źródłowymi a ujściem rzek karpaccich do Wisły, płynącej skośnie do łańcucha górskiego (ryc. 1). W części zachodniej rzeki o dużej energii uformowały wcięte pasy meandrowe, w których następuje koncentracja przepływów wezbraniowych, a depozycję osadów pozakorytowych ograniczają wysokie prędkości przepływu ponad wąskimi równiami zalewowymi uformowanymi wzdłuż wciętych koryt. Natomiast w części wschodniej energia rzek była niewystarczająca do zniszczenia zabudowy regulacyjnej i pogłębianie się koryt przebiegało tu przy zachowaniu stabilnego biegu rzek; spowodowało ono znaczne zmniejszenie się częstotliwości zatapiania obszarów zalewowych i zwiększyło koncentrację transportu grubszych frakcji obciążenia zawiesinowego rzek w obrębie wciętych koryt.

Wcięcie się karpaccich dopływów Wisły spowodowało, że w ich strefie pozakorytowej przenoszone są obecnie niewielkie ilości wód wezbraniowych (tab. 1), a ponieważ koncentracja obciążenia zawiesinowego w ciekach maleje ku górze kolumny wody, procent całkowitego obciążenia zawiesinowego rzek karpaccich wprowadzany do ich obszarów zalewowych musi być jeszcze mniejszy. Efektem regulacji koryt jest więc drastyczne ograniczenie możliwości akumulacji osadów pozakorytowych w dolnych i środkowych biegach rzek karpaccich i rumowisko jest współcześnie przenoszone poprzez te odcinki bezpośrednio do Wisły. W istocie degradacja koryt rzecznych i formowanie się wciętych pasów meandrowych w XX wieku oznaczają, iż doliny rzek karpaccich cechował w tym okresie ujemny bilans osadu, co wskazuje na sytuację, w której zdolność transportowa rzek przewyższała ich zasilanie rumowiskiem ze zlewni (Trimble, 1983).

Dla stabilnych w pionie rzek wielkość przepływu o półtorarocznej powtarzalności, ustaloną na podstawie ciągu maksymalnych rocznych przepływów, uznaje się za zbliżoną do przepływu pełnokorytowego wyznaczonego w odniesieniu do czynnej równi zalewowej (Williams, 1978). Odchylenie częstotliwości występowania przepływu pełnokorytowego od tej wartości można więc uważać za miernik stopnia wycięcia się

rzeki; zgodnie z tym kryterium Wisłoka byłaby bardziej wcięta niż Skawa (ryc. 5, 6). Z kolei, przy wysokich przepływach ponadpełnokorytowych wyraźnie mniejsza część całkowitego przepływu jest przenoszona w strefie pozakorytowej na Skawie, niż na Wisłoce (tab. 4). Oznacza to, iż sama analiza zmian częstotliwości występowania przepływu pełnokorytowego nie pozwala zadowalająco ocenić wpływu wcięcia się rzeki na hydraulikę jej przepływów wezbraniowych, a jednocześnie wykazuje użyteczność w tym względzie rozwiniętej przez autora (Wyźga, 1999) metody określania średnich prędkości w strefie korytowej i pozakorytowej rzeki.

Literatura

- Alexandrowicz S.W., Klimek K., Kowalkowski A., Mamakowa K., Niedziałkowska E., Pazdur M., Starkel L., 1981, *The evolution of the Wisłoka Valley near Dębica during the Late Glacial and Holocene*, Folia Quatern., 53.
- Bates P. D., Anderson M. G., Baird L., Walling D. E., Simm D., 1992, *Modelling floodplain flows using a two-dimensional finite element model*, Earth Surf. Proc. Landforms, 17.
- Bluck B. J., 1971, *Sedimentation in the meandering River Endrick*, Scott. J. Geol., 7(2).
- Bogdanowicz E., Stachý J., 1995, *Zmiany reżymu wezbraniowego w Polsce. Domysły czy prawda?* Wiad. IMGW, 18 (2).
- Gomez B., Eden D. N., Peacock D. H., Pinkney E. J., 1998, *Floodplain construction by recent, rapid vertical accretion: Waipaoa River, New Zealand*, Earth Surf. Proc. Landforms, 23.
- Kędzior A., 1928, *Roboty wodne i melioracyjne w Południowej Małopolsce wykonane z inicjatywy Sejmu i Wydziału Krajowego*, Lwów.
- Klimek K., 1974a, *The structure and mode of sedimentation of the flood-plain deposits in the Wisłoka Valley (South Poland)*, Stud. Geomorph. Carp.-Balcan., 8.
- Klimek K., 1974b, *The retreat of alluvial river banks in the Wisłoka Valley (South Poland)*, Geogr. Pol., 28.
- Klimek K., 1979, *Geomorfologiczne zróżnicowania koryt karpackich dopływów Wisły*, Folia Geogr., ser. Geogr.-Phys., 12.
- Klimek K., 1983, *Erozja wgłębna dopływów Wisły na przedpolu Karpat* [w:] Z. Kajak (red.), *Ekologiczne podstawy zagospodarowania Wisły i jej dorzecza*, Warszawa-Łódź.
- Knox J. C., 1987, *Historical valley floor sedimentation in the Upper Mississippi Valley*, Ann. Assoc. Am. Geogr., 77.
- Lach J., 1975, *Ewolucja i typologia krajobrazu Beskidu Niskiego z uwzględnieniem gospodarczej działalności człowieka*, Prace Monogr. WSP w Krakowie, 16.
- Lece S. A., 1997, *Spatial patterns of historical overbank sedimentation and floodplain evolution, Blue River, Wisconsin*, Geomorphology, 18.
- Lajczak A., 1995, *Potential rates of the present-day overbank sedimentation in the Vistula valley at the Carpathian foreland, southern Poland*, Quaest. Geogr., 17/18.
- Lajczak A., 1997, *Anthropogenic changes in the suspended load transportation by and sedimentation rates of the River Vistula, Poland*, Geogr. Pol., 68.
- Magilligan F. J., 1992, *Sedimentology of a fine-grained aggrading floodplain*, Geomorphology, 4.
- Nicholas A. P., Walling D. E., 1995, *Modelling contemporary overbank sedimentation on floodplains:*

- some preliminary results* [w:] E.J. Hickin (red.), *River Geomorphology*, Wiley, Chichester.
- Osuch B., 1968, *Problemy wynikające z nadmiernej eksploatacji kruszywa rzecznoego na przykładzie rzeki Wisłoki*, Zesz. Nauk. AGH, 219.
- Punzet J., 1981, *Zmiany w przebiegu stanów wody w dorzeczu górnej Wisły na przestrzeni 100 lat (1871-1970)*, Folia Geogr., ser. Geogr.-Phys., 14.
- Schumm S. A., 1969, *River metamorphosis*, J. Hydraul. Div., ASCE, 95.
- Sundborg A., 1967, *Some aspects on fluvial sediments and fluvial morphology: I. General views and graphic methods*, Geogr. Ann., 49A.
- Teisseyre A. K., 1989, *Mady dolin sudeckich. Część III: Subaeralnie i subakwalnie deponowane osady pozakorytowe w świetle eksperymentu terenowego (1977-1979)*, Geol. Sudetica, 23 (2).
- Trimble S. W., 1983, *A sediment budget for Coon Creek basin in the Driftless Area, Wisconsin, 1853-1977*, Am. J. Sci., 283.
- Vanoni V. A., 1946, *Transportation of suspended sediment by water*, Trans. Am. Soc. Civil Engrs, 111.
- Walling D. E., He Q., 1998, *The spatial variability of overbank sedimentation on river floodplains*, Geomorphology, 24.
- Williams G. P., 1978, *Bank-full discharge of rivers*, Water Res. Research, 14.
- Wolman M. G., Leopold L. B., 1957, *River flood plains: some observations on their formation*, US Geol. Surv. Prof. Paper, 282-C.
- Wyźga B., 1991, *Present-day downcutting of the Raba River channel (Western Carpathians, Poland) and its environmental effects*, Catena, 18.
- Wyźga B., 1993a, *River response to channel regulation: case study of the Raba River, Carpathians, Poland*, Earth Surf. Proc. Landforms, 18.
- Wyźga B., 1993b, *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. Puigdefabregas (red.), *Alluvial Sedimentation*, Spec. Publ. Int. Assoc. Sediment., 17.
- Wyźga B., 1995, *Evaluating the occurrence of low magnitude floods: a study of the reliability of the annual maximum series method*, Geogr. Ann., 77A.
- Wyźga B., 1997, *Methods for studying the response of flood flows to channel change*, J. Hydrol., 198.
- Wyźga 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.

IMPACT OF THE CHANNELIZATION-INDUCED INCISION OF THE CARPATHIAN TRIBUTARIES TO THE VISTULA ON THE CONDITIONS OF OVERBANK DEPOSITION

Summary

The impact of river incision in response to channelization on the conditions of overbank deposition is shown by the study of two montane rivers from the upper Vistula drainage basin, southern Poland. The Wisłoka River had insufficient energy to destroy

the river-control structures and remained laterally stable in the course of the channel downcutting. Under such conditions the incision has raised the relative elevation of the floodplain above the river bed, thereby reducing considerably the frequency of overbank flows and increasing concentration of suspended sediment transport within the incised channel. On the high-energy Skawa, the long periods of incision of the channelized river alternated with the shorter periods of lateral channel migration over the 20th century. This has led to the formation of an incised meander belt within which flood flows are constricted and where the high velocities of the floodplain flows inhibit overbank deposition. Field observations confirm an insignificant role played nowadays by floodplain sedimentation in the valleys of both rivers.

This study shows that the potential of the floodplains of the Carpathian tributaries to the Vistula for sediment storage has been dramatically reduced over the few past decades as a result of the channelization-induced incision of the rivers. The frequency of overbank flows has decreased considerably on the rivers draining the eastern part of the Polish Carpathians and the majority of the suspended sediment is routed within the resultant enlarged channels. In the western part of the mountains, high velocities of the floodplain flows restrict overbank deposition on the narrow floodplains developed along incised channels.