

2

DEGRADACJA RZEK WIELONURTOWYCH POLSKICH KARPAT W XX WIEKU

Hanna Hajdukiewicz, Bartłomiej Wyżga

Abstrakt: Na przykładzie Soły, Sanu i Dunajca przedstawiono porównanie współczesnej oraz istniejącej w drugiej połowie XIX wieku planarnej geometrii koryta rzek odwadniających zachodnią i wschodnią część polskich Karpat fliszowych oraz rzek wypływających z wysokogórskiego masywu tatrzańskiego. W wyniku różnic w sposobie przedstawienia rzek na austriackich mapach sztabowych i polskich mapach topograficznych porównano jedynie szerokość i liczbę koryt małej wody analizowanych rzek. W drugiej połowie XIX wieku rzeki płynęły szerokimi korytami. W Sole roztokowy układ koryta występował na całej jej długości, koryto Dunajca na przeważającej części biegu rzeki było roztokowe, a koryto jednonurtowe występowało jedynie w odcinkach przełomowych, natomiast w Sanie występowanie koryta wielonurtowego było ograniczone do odcinków rzeki w obrębie kotlin. W ciągu XX wieku doszło do niemal całkowitego przekształcenia roztokowych koryt rzek karpackich w koryta jednonurtowe, a odcinki wielonurtowe zachowały się jedynie w górnym biegu Dunajca. Szerokość koryt(a) małej wody znacznie zmalała, nawet do 33% wielkości historycznej, czemu towarzyszyło znaczne ograniczenie zróżnicowania szerokości koryt(a) małej wody wzdłuż biegu rzek. Zmianom planarnej geometrii koryta rzek karpackich towarzyszyło znaczne wcięcie się rzek. W pogórskich odcinkach rzek wystąpiło ono zasadniczo wcześniej, a jego skala była większa niż w odcinkach górskich. W XX wieku nastąpiła radykalna zmiana facjalnego charakteru osadów korytowych rzek karpackich, prowadząca do wzrostu średniej średnicy ziarna i stopnia wysortowania tych osadów oraz do rozwoju opancerzenia dna rzek. W wielu odcinkach potoków i rzek karpackich doszło do przekształcenia aluwialnego koryta w koryto skalne. Efektem zaistniałej degradacji rzek karpackich jest zdecydowane pogorszenie się warunków bytowania organizmów rzecznych.

Słowa kluczowe: degradacja rzek, koryta wielonurtowe, historyczne mapy, geometria koryt rzecznych, wcięcie się rzek, zmiany materiału dennego

1. Wstęp

Historyczne mapy są cennym źródłem informacji w badaniach zmierzających do określenia zmian geometrii koryt rzecznych. Porównanie planarnej geometrii koryt rzecznych przedstawionej na archiwalnych materiałach kartograficznych i współczesnych

mapach topograficznych pomaga ocenić przyczynę przeobrażania się koryt oraz prognozować ich dalsze zmiany [Pattrick i in., 1982]. Wyniki takiej analizy są istotne dla oceny trafności dotychczasowego zarządzania rzekami oraz określenia możliwości podjęcia działań rewitalizacyjnych. Warunkiem prowadzenia porównania jest zbliżony stopień generalizacji obrazu koryt rzecznych oraz przedstawienie tych samych elementów koryt na historycznych i współczesnych materiałach kartograficznych.

Występowanie w XIX wieku wielonurtowej morfologii koryt rzek karpackich udokumentowano w szeregu publikacji [np. Baumgart-Kotarba, 1980; Krzemień, 1981; Adamczyk, 1981; Klimek, 1987; Starkel, 1990; Wyźga, 1993a; Starkel i in., 2008]. Rozwój roztokowego układu koryta tych rzek w XIX wieku wiązano z dużą dostawą rumowiska z intensywnie użytkowanych, znacznie wylesionych zlewni [Adamczyk, 1981; Pietrzak, 2005], wspomaganą dużymi opadami w czasie małej epoki lodowej [Klimek, 1987; Wyźga, 1993a]. Chociaż rozprzestrzenienie koryt wielonurtowych wzdłuż biegu rzek było znaczne, sięgając kotlin przedgórskich [Starkel, 1981; Szumański, 1986], występowanie wielonurtowej morfologii rzek nie miało ciągłego charakteru i wzdłuż ich biegu występowały wówczas także odcinki z jednonurtowym, prostym lub krętym korytem [Zawiejska, Wyźga, 2010]. Dotychczas brak jednak rozpoznania pełnego zasięgu występowania koryt wielonurtowych w rzekach karpackich w jednym horyzoncie czasowym oraz analizy przyczyn istniejącego rozprzestrzenienia wielonurtowej morfologii rzek.

Zanik występowania wielonurtowej morfologii koryt rzek karpackich w ciągu XX wieku również udokumentowano w licznych pracach [np. Krzemień, 1981, 2006; Klimek, 1987; Wyźga, 1993b, 2008; Zawiejska, Krzemień, 2004; Korpak, 2007; Starkel i in., 2008; Zawiejska, Wyźga, 2010]. Przy rozpatrywaniu przyczyn zmian struktury koryt rzecznych istotne jest analizowanie ich na całej długości rzek [Krzemień, 2006]. Dotychczas do wyjątków należą jednak prace, które rozpatrują transformację koryta wzdłuż całego biegu rzeki i na tej podstawie formułują wnioski o przyczynach zaistniałych zmian koryta [Zawiejska, Wyźga, 2010]. Brak także całościowego obrazu zmian koryt rzecznych, jakie miały miejsce w XX wieku w karpackiej części dorzecza górnej Wisły. W XX wieku, a zwłaszcza w jego drugiej połowie, doszło do istotnych zmian warunków środowiskowych w zlewniach karpackich. Rolnicze i pasterskie użytkowanie stoków zostało znacznie ograniczone, a odsetek powierzchni lasów wzrósł średnio o 15% [Kozak i in., 2007], choć wzrost lesistości był największy we wschodniej części polskich Karpat, gdzie w połowie XX wieku dokonano wysiedleń ludności [Lach, Wyźga, 2002; Kukulak, 2004]. Zmniejszenie się dostawy rumowiska do koryt rzek karpackich, spowodowane zmianami użytkowania ziemi w zlewniach [Jahn, 1979; Lach, Wyźga, 2002; Wyźga i in., 2012a], znacząco ograniczyło ilość materiału dostępnego do transportu fluwialnego [Wyźga, 2001a; 2008], ale jego wpływ był największy w górskich odcinkach karpackich dopływów Wisły i oddziaływał przede wszystkim w drugiej połowie stulecia. Zmiany planarnej geometrii koryt i wysokościowego usytuowania dna rzek zostały natomiast zapoczątkowane w dolnych biegach karpackich dopływów Wisły jeszcze z początkiem XX wieku lub nawet w końcowych dziesięcioleciach XIX wieku [Punzet, 1981; Wyźga, 2001, 2008; Zawiejska, Wyźga, 2010].

Przy swobodnym przebiegu procesów fluwialnych rzeki dostosowują się do zmian w obciążeniu rumowiskiem oraz wielkości/częstotliwości wezbrań poprzez transformację układu koryta [Schumm, 1969], która nie pociąga za sobą zmiany wysokości stanów

wody osiąganych przy określonym natężeniu przepływu [Wyźga i in., 2008]. Przykładem takich zmian może być uformowanie się krętego koryta środkowej Raby w połowie XX wieku, po zniszczeniu przez rzekę zabudowy regulacyjnej brzegów [Wyźga, 2001a], oraz transformacja wielonurtowego koryta z łachami żwirowymi w wielonurtowe koryto z kępami zaistniała w XX wieku w nieuregulowanym odcinku Czarnego Dunajca [Wyźga i in., 2012a]. W ubiegłym stuleciu na zdecydowanej większości biegu karpackich dopływów Wisły doszło jednak nie do zastąpienia jednego swobodnie kształtowanego układu koryta innym, lecz do przekształcenia wielonurtowych koryt o urozmaiconej morfologii w proste, wąskie koryta regulacyjne o bardzo uproszczonej morfologii. Degradacji planarnej geometrii koryt towarzyszyło szybkie wcinanie się rzek [Wyźga, 2001a, 2008] i niekorzystne zmiany materiału tworzącego ich dno, włącznie z przekształcaniem koryt aluwialnych w koryta skalne.

Rzeki pozostające w równowadze dynamicznej, których ciągłość nie jest przerwana przez poprzeczne budowle hydrotechniczne (zapory, stopnie), cechuje trójwymiarowa łączność ich ekosystemów: wzdłuż biegu rzek, ze zbiornikami wodnymi w obszarze zalewowym oraz ze strefą hyporeiczną obejmującą trwale nasycone wodą aluwia [Kondolf i in., 2006]. Ekosystemy rzek roztokowych cechuje ponadto duża różnorodność i szybka zmiana siedlisk wodnych i lądowych (będąca efektem szybkiej migracji koryt małej wody w obrębie strefy aktywnej rzek), rozszerzanie się i kurczenie zasięgu ekosystemu wodnego towarzyszące szybkim zmianom natężenia przepływu, duże zróżnicowanie termiczne wody oraz obecność licznych refugium dla organizmów wodnych [Tockner i in., 2006]. Degradacja fizycznej struktury rzek roztokowych, do jakiej doszło w XX wieku w polskich Karpatach, musiała w istotny sposób wpłynąć negatywnie na stan ekosystemów wodnych tych rzek.

Celem niniejszego artykułu jest:

- ocena przydatności mapy trzeciego wojkowego zdjęcia Monarchii Austro-Węgierskiej i współczesnych średnioskalowych map topograficznych do określenia zmian planarnej geometrii rzek polskich Karpat od drugiej połowy XIX wieku,
- określenie zaistniałych w ostatnich 130 latach zmian planarnej geometrii koryta wybranych rzek reprezentatywnych dla różnych części polskich Karpat,
- przedstawienie i omówienie innych przejawów degradacji fizycznej struktury rzek karpackich (wcinanie się rzek, zmiany materiału tworzącego dno koryt),
- dyskusja środowiskowych skutków degradacji rzek wielonurtowych w polskich Karpatach.

2. Sposób przedstawienia rzek na austriackich mapach sztabowych i polskich mapach topograficznych

Materiał wyjściowy do analizy zmian geometrii planarnej rzek polskich Karpat od drugiej połowy XIX wieku stanowiły mapy tzw. trzeciego wojkowego zdjęcia Monarchii Austro-Węgierskiej (*Spezialkarte der Österreichisch-Ungarischen Monarchie*). Zdjęcie topograficzne dla tych map sporządzono w latach 70. XIX wieku w skali 1:25000, generalizując je następnie do postaci sztabowej mapy wojkowej w skali 1:75000 [Konias, 2000]. Treść arkuszy, w tym także obraz koryt rzecznych, unaczęsniono z początkiem XX wieku [zob. Zawiejska, Wyźga, 2010], jednak planarną geometrię rzek przed

wykonaniem pierwszych prac regulacyjnych przedstawia pierwsza edycja tej mapy z lat 70. XIX wieku. Dla obszaru polskich Karpat zachowały się jedynie pojedyncze arkusze tej mapy w skali 1:25000, tak więc analizą objęto mapy w skali 1:75000 o znacznie bardziej kompletnym zachowanym pokryciu tego obszaru.

Na austriackich mapach wojskowych elementy koryt rzecznych były zobrazowane bardzo starannie. Obraz sieci hydrograficznej stanowił wiarygodny i bardzo cenny element tych map, dostarczając informacji nie tylko o aktywnych korytach rzek, lecz również starorzeczach, młynówkach i miejscach podmokłych [Trafas, 1975]. Metoda przedstawienia koryt małej wody na mapach sztabowych obejmowała poszerzanie ich sygnatury w węższych odcinkach rzek dla zachowania czytelności rysunku, dlatego też szerokość koryta małej wody obliczona dla takich odcinków jest obciążona pewnym błędem. Zmiany w rysunku koryt małej wody, spowodowane generalizacją zdjęcia topograficznego w skali 1:25000 do mapy w skali 1:75000 określono na podstawie analizy 11,5 km biegu Czarne Dunajca. Łączna szerokość koryt małej wody pomierzona na mapie w skali 1:25000 wyniosła tu średnio 51,6 m, a pomierzona na mapie w skali 1:75000 średnio 60,3 m, a więc o kilkanaście procent więcej. Sposób generalizacji mapy sztabowej wpłynął również na przedstawienie na niej mniejszej liczby koryt małej wody niż na mapie w skali 1:25000. W analizowanym odcinku Czarne Dunajca na mapie sztabowej zaznaczono średnio 2,5 koryta małej wody, natomiast na mapie w skali 1:25000 średnio 4,2 koryta. Można jednak przypuszczać, iż zniekształcenia rysunku koryt małej wody były największe w górnych biegach rzek i malały w dół ich biegu z uwagi na zwiększanie się szerokości koryt.

Sposób przedstawienia rzek na mapach sztabowych pozwalał jednak na znacznie pełniejsze przedstawienie informacji o ich charakterze niż analogiczny obraz rzek przedstawiany na mapach współczesnych. Na mapach austriackich odpowiednimi szrafurami zaznaczano łachy boczne i śródkorytowe w aktywnym korycie rzeki, a także zadrzewione lub zakrzaczone kępy (ryc. 2.1) [Paluszkiwicz, 2011]. Pozwala to na odtworzenie zasięgu strefy aktywnej (aktywnego koryta) i szerokości poszczególnych elementów ówczesnych rzek. Mapy sporządzane przez Kwatermistrzostwo Sztabu Generalnego armii austriackiej były przeznaczone do celów wojskowych, dlatego też błędy kartometryczne, wynikające z niedoskonałości technik geodezyjnych, rekompensowano plastycznym i bardzo starannym przedstawieniem elementów strategicznych, do których niewątpliwie należało aktywne koryto rzeki.

Po odzyskaniu niepodległości przez Polskę nastąpiła wyraźna zmiana w sposobie przedstawiania rzek na mapach topograficznych, początkowo tworzonych przez kartografów wojskowych (Wojskowy Instytut Geograficzny w okresie międzywojennym, Wojskowe Zakłady Kartograficzne po II wojnie światowej), a od lat 70. także cywilnych. Na mapach rozbudowano skalę barw [Krassowski, 1973], jednak przedstawiany na nich obraz rzek uległ zdecydowanemu uproszczeniu. Na mapach WIG w skali 1:100000 wydanych w latach 30., mapach w skali 1:50000 z lat 50. oraz tzw. obrębowej mapie powiatów w skali 1:25000 opublikowanej na początku lat 60. przedstawiano niemal wyłącznie koryto(a) małej wody, natomiast łachy korytowe zaznaczano jedynie sporadycznie i bez wyraźnego wskazania ich zasięgu. O ile w przypadku mapy WIG taki sposób przedstawiania rzek mógł być częściowo podyktowany dużą generalizacją jej treści odpowiednią do skali mapy, o tyle w przypadku późniejszych map o większej skali



Ryc. 2.1. Obraz koryta Dunajca na sztabowej mapie austriackiej w skali 1:75000 z 1901 roku, na współczesnej ortofotomapie w skali 1:5000 i na współczesnej wektorowej mapie topograficznej w skali 1:50000.

Fig. 2.1. Cartographic presentation of the Dunajec River channel on a 1:75 000 military map of the Austro-Hungarian Empire from 1901, on a 1:5 000 contemporary orthophoto and on a contemporary 1:50 000 topographic map (Vector Map Level 2).

musiał on już być w pełni świadomym zabiegiem kartograficznym. Poczynając od lat 70. obraz rzek przedstawianych na średnioskalowych mapach topograficznych ograniczono jedynie do koryta małej wody.

Po II wojnie światowej kilkakrotnie zmieniano sposób cięcia arkuszowego map przy jednoczesnej zmianie ich układu współrzędnych. Wiązało się to z koniecznością każdorazowej edycji mapy, a przy każdej kolejnej edycji aktualizację mapy przeprowadzano z niejednorodną starannością. W przypadku obrębowej mapy powiatów przygotowanej na użytek cywilny celowo dokonano jej zniekształcenia, wprowadzając deformacje kątowe, liniowe i wysokościowe do kilku metrów [Nita, Myga-Piątek, 2012], co istotnie wpływa na zafałszowanie przebiegu koryt rzecznych.

Dostępne obecnie mapy rastrowe w skali 1:50000 dla obszaru karpackiej części dorzecza górnej Wisły w części są wydane w nowym cięciu arkuszowym i zostały opracowane w układzie współrzędnych PL-1992. Aktualizacja tych map odbyła się głównie w latach 90. Jednakże część arkuszy tej mapy, sporządzonych w układzie współrzędnych „1965”, była aktualizowana jeszcze w latach 70. W analizie zmian planarnej geometrii koryt rzecznych od drugiej połowy XIX wieku nie można posłużyć się tak niejednorodnym czasowo materiałem kartograficznym.

Obecnie dostępną mapą średnioskalową, która mogłaby zostać użyta w analizie zmian planarnej geometrii koryt karpackich dopływów Wisły, jest mapa wektorowa poziomu 2 (VMap Level 2) w skali 1:50000, sporządzona do 2002 roku. Niestety, sposób edycji również i tej mapy nie pozwala na zaznaczanie na niej łąch korytowych. Rycina 2.1 ilustruje wynikającą z tego utratę informacji o morfologii współczesnych rzek – chociaż szerokość aktywnego koryta Dunajca w pokazanym na ortofotomapie odcinku rzeki w obrębie Kotliny Sądeckiej jest porównywalna z tą z drugiej połowy XIX wieku, nie jest to widoczne na mapie. Dodatkową trudność stwarza uproszczenie przedstawienia szerokości koryta małej wody na tej mapie. Dla odcinków koryta małej wody węższego niż 30 m stosuje się jednolitą sygnaturę dla danego przedziału szerokości koryta, np. 5-30 m, a jedynie koryta szersze niż 30 m są przedstawione sygnaturą oddającą przebieg brzegów i faktyczną szerokość koryta [Instrukcja techniczna K2, 1980]. Taki sposób przedstawienia koryt rzecznych wyklucza z dokładniejszych analiz ich górne odcinki o szerokości mniejszej niż 30 m, które ponadto zaznacza się jako odcinki wyłącznie jednonurtowe.

Uproszczony sposób przedstawienia koryt rzecznych na współczesnych mapach uniemożliwia ich wykorzystanie do pełnego określenia zmian planarnej geometrii koryt karpackich dopływów Wisły od drugiej połowy XIX wieku. Możliwe jest jedynie porównanie liczby i szerokości koryt małej wody przedstawionych na mapach z XIX wieku i współczesnych. Należy przy tym pamiętać, że stwierdzonych zmian szerokości koryt małej wody nie można przenosić na zmiany pełnokorytowej szerokości rzek. Analiza zdjęć lotniczych środkowej Raby z lat 1955-1987 wykazała, że w wyniku regulacji i wcięcia się rzeki szerokość aktywnego koryta zmalała w tym okresie znacznie bardziej niż szerokość koryta małej wody [Wyźga, 1993c]. Z kolei porównanie koryt rzecznych przedstawionych na austriackich mapach sztabowych w skali 1:75000 i ich obrazu na współczesnych ortofotomapach w skali 1:5000 wymagałoby nie tylko digitalizacji koryt na ortofotomapach, ale także generalizacji ich rysunku do skali mapy austriackiej.

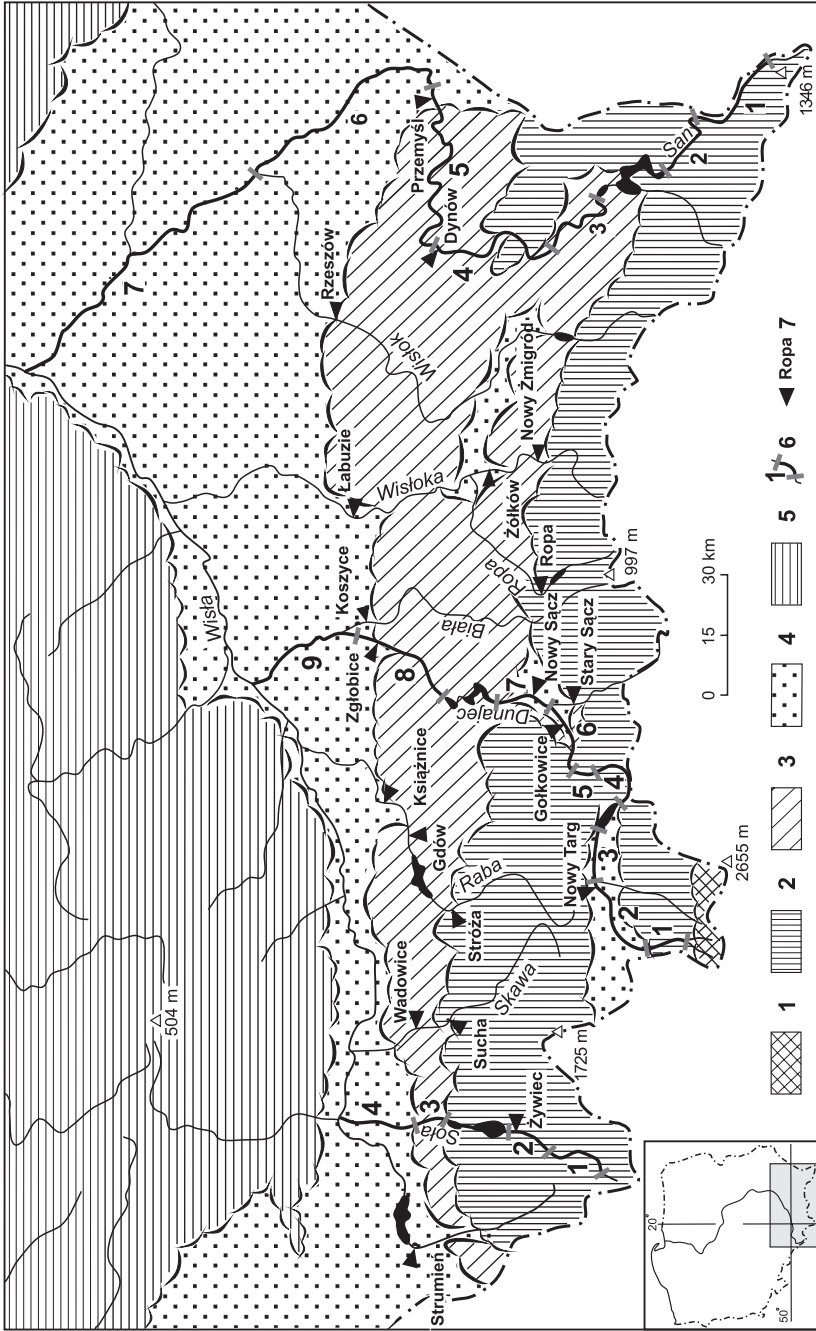
3. Metodyczne podstawy opracowania

Zmiany planarnej geometrii koryt karpackich dopływów Wisły od drugiej połowy XIX wieku określono, porównując obraz tych rzek na austriackiej mapie sztabowej z lat 70. XIX wieku i współczesnej wektorowej mapie topograficznej poziomu 2. Zeskanowanym mapom austriackim nadano georeferencje w układzie współrzędnych PL-1992 metodą rektyfikacji na punktach kontrolnych. Średni błąd położenia punktu na mapie (błąd RMS) dla poszczególnych arkuszy wynosił 3,24-4,85 m. Ze względu na brak zobrazowania aktywnego koryta rzek na współczesnych mapach topograficznych, analizy ograniczono do porównania szerokości i liczby koryt małej wody.

Znaczne różnice wysokości zlewni i spadku koryt (ryc. 2.2), charakteru rumowiska dostarczanego ze stoków do koryt rzecznych oraz przebiegu wezbrań zaznaczające się pomiędzy rzekami ze wschodniej i zachodniej części polskich Karpat są przyczyną istotnych różnic w cechującym je naturalnym układzie koryta [Klimek, 1979]. W XX wieku różnice cech fizjograficznych zlewni i rzek z obu obszarów były także odzwierciedlone w odmiennym przebiegu wcinania się rzek [Wyźga, 2001b, 2008]. Od rzek z obu tych obszarów odróżnia się Dunajec, który bierze swój początek w wysokogórskim masywie tatrzańskim i płynie na przemian odcinkami wąskiej doliny górskiej oraz odcinkami w obrębie szerokich kotlin śródgórskich [Klimek, 1979]. To zróżnicowanie morfologii koryta Dunajca znalazło odzwierciedlenie w zróżnicowanym przebiegu zmian planarnej geometrii rzeki w XX wieku [Zawiejska, Wyźga, 2010]. W celu uwzględnienia wskazanych różnic morfologii karpackich dopływów Wisły, w niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy zmian planarnej geometrii koryta Soły, Dunajca i Sanu (ryc. 2.2).

Analizowane rzeki podzielono na odcinki badawcze nawiązujące do jednostek fizycznogeograficznych, lokalizacji zbiorników zaporowych i ujść większych dopływów (ryc. 2.2). W analizie pominięto najwyższe odcinki rzek, które na austriackiej mapie były znaczone pojedynczą linią, a także odcinki współcześnie zatopione przez zbiorniki zaporowe oraz krótkie odcinki między kolejnymi zbiornikami. Każdy z wyróżnionych odcinków podzielono na segmenty o długości 250 m. Na historycznej mapie w programie ArcGIS zdigitalizowano koryta małej wody, a następnie dla mapy historycznej i współczesnej obliczono średnią łączną szerokość koryt małej wody w poszczególnych segmentach rzek, dzieląc powierzchnię zajmowaną przez koryta przez długość segmentu. Liczbę koryt małej wody określano na końcu każdego segmentu, doliczając także koryta nie sięgające linii końcowej, lecz obecne na ponad 50% długości segmentu. Dla każdego odcinka analizowanych rzek ustalono następnie minimalne, średnie i maksymalne wartości szerokości i liczby koryt małej wody.

Soła wypływa z Beskidu Żywieckiego, z najwyższym punktem w zlewni znajdującym się na wysokości 1543 m n.p.m. Przy stosunkowo dużych deniwelacjach w zlewni (1318 m) i krótkim biegu (ryc. 2.2), Soła ma bardzo duży spadek koryta – w analizowanej części biegu rzeki wynosi on średnio 0,0036 m/m. Cechy te, wraz ze stosunkowo dużymi opadami generowanymi przez barierę orograficzną eksponowaną na wilgotne masy powietrza napływające z północnego zachodu [Niedźwiedź, Obrębska-Starkłowa, 1991] oraz małą zdolnością retencyjną fliszowego podłoża, warunkującą znaczny udział spływu powierzchniowego w całkowitym odpływie ze zlewni, powodują, że Solę cechuje znaczny potencjał formowania wezbrań [Malarz, 1997].



Ryc. 2.2. Lokalizacja badanych odcinków Soly, Dunajca i Sanu oraz badanych posterunków wodowskazowych w górskich i pogórskich odcinkach rzek karpackich. 1 – góry wysokie; 2 – góry średnie i niskie; 3 – pogórza; 4 – kotłiny śródogórskie i przedgórskie; 5 – wyżyny; 6 – odcinki rzek analizowane na rycinach 2.3 i 2.4; 7 – posterunki wodowskazowe analizowane na rycinie 2.5.

Fig. 2.2. Location of the studied reaches of the Sola, Dunajec and San rivers and of the studied water-gauge stations in the mountain and foothill reaches of Polish Carpathian rivers. 1 – high mountains; 2 – mountains of intermediate and low height; 3 – foothills; 4 – intramontane and submontane depressions; 5 – uplands; 6 – river reaches shown in Figures 2.3 and 2.4; 7 – water-gauge stations shown in Figure 2.5.

Sołę podzielono na 4 odcinki badawcze (ryc. 2.2). Odcinek 1 obejmuje część biegu rzeki na terenie Beskidu Żywieckiego, od połączenia potoków Ujsoly i Rycerki do ujścia potoku Żabnica, a odcinek 2 bieg rzeki w Kotlinie Żywieckiej, aż do ujścia Koszarawy. Odcinek 3 znajduje się na terenie Pogórza Śląskiego, od zapory w Czańcu do Kęt, natomiast odcinek 4 obejmuje bieg rzeki w Kotlinie Oświęcimskiej, aż do ujścia Soły do Wisły.

Dunajec to jedyny karpacki dopływ Wisły odwadniający Karpaty Wewnętrzne i Zewnętrzne. Źródła rzeki znajdują się w Tatrach Zachodnich, jednak wyższe partie jego dorzecza znajdują się w źródłiskowych obszarach jego prawobrzeżnych dopływów – Białki i Popradu, z najwyższym punktem położonym na wysokości 2655 m n.p.m. Pomimo dużych deniwelacji w dorzeczu (2484 m), boczne umiejscowienie jego najwyższych partii i stosunkowo duża długość rzeki (ryc. 2.2) warunkują mniejszy spadek koryta niż w przypadku Soły – w analizowanej części biegu rzeki wynosi on średnio 0,0029 m/m. Znaczny wpływ na kształtowanie się układu koryta Dunajca wywierają także wysokie opady w tatrzańskiej części dorzecza [Niedźwiedz, Obrębska-Starkłowa, 1991] i zachodząca tam dostawa gruboziarnistego materiału.

Dunajec podzielono na 9 odcinków badawczych. Odcinek 1 rozpoczyna się u zbiegu potoków Chochołowskiego i Kościeliskiego i obejmuje część biegu Czarnego Dunajca w obrębie Pogórza Spisko-Gubałowskiego, natomiast dalszą część jego biegu w obrębie Kotliny Orawsko-Nowotarskiej, aż do połączenia z Białym Dunajcem, wydzielono jako odcinek 2. Dalsza część biegu Dunajca w obrębie tej kotliny, aż do zbiornika czorsztyńskiego, stanowi odcinek 3. Odcinek 4 obejmuje bieg rzeki od zbiornika sromowieckiego do Krościenka, w większości w obrębie Przełomu Pienińskiego. Odcinek 5 znajduje się w Przełomie Tylmanowskim, rozdzielającym pasma Gorców i Beskidu Sądeckiego, sięgając do ujścia Kamienicy, natomiast bieg Dunajca pomiędzy Beskidem Wyspowym i Beskidem Sądeckim, aż do ujścia Popradu, wydzielono jako odcinek 6. Kolejny odcinek (7) obejmuje bieg rzeki w Kotlinie Sądeckiej od ujścia Popradu do cofki zbiornika rożnowskiego. Pogórski bieg rzeki poniżej zbiornika czchowskiego wydzielono jako odcinek 8, a bieg rzeki w Kotlinie Sandomierskiej jako odcinek 9.

W dorzeczu Sanu góry – z kulminacją 1346 m n.p.m. – obejmują niewielką część jego powierzchni, znaczną większość stanowią natomiast obszary nizinne i pogórskie. Deniwelacje są tu nieco mniejsze niż w zlewni Soły (1207 m), natomiast długość rzeki jest kilkakrotnie większa (ryc. 2.2). Znajduje to odzwierciedlenie w stosunkowo małym spadku koryta – w analizowanej części biegu Sanu wynosi on średnio 0,0013 m/m. San podzielono na 7 odcinków badawczych (ryc. 2.2). Odcinek 1 obejmuje graniczny odcinek rzeki w Bieszczadach, natomiast odcinek 2 dalszą część bieszczadzkiego biegu rzeki do zbiornika solińskiego. Odcinek 3 wydzielono na terenie Dołów Jasielsko-Sanockich, od zbiornika w Myczkowcach do ujścia Osławy. Odcinek 4 obejmuje południkową część pogórskiego biegu rzeki do Dynowa, a odcinek 5 jego równoleżnikową część, aż po ujście Wiaru. Odcinek 6 stanowi wyższą część biegu rzeki w Kotlinie Sandomierskiej do ujścia Wisłoka, a odcinek 7 jego niższą część.

Wielkość wcięcia się rzek karpackich w ciągu XX wieku określono na podstawie obniżenia się minimalnych rocznych stanów wody w posterunkach wodowskazowych [Wyźga, 2001a, 2008], przy czym dla każdego posterunku wskazano wcięcie się rzeki w pierwszej i drugiej połowie stulecia. Zmianę pionowego położenia koryta określono dla 10 posterunków wodowskazowych w górskim biegu rzek karpackich (wyjątek

stanowił posterunek Żółków charakteryzujący zlewnię górnej Wisłoki) i 10 posterunków zlokalizowanych w pogórskim biegu rzek lub bezpośrednio poniżej niego (ryc. 2.2).

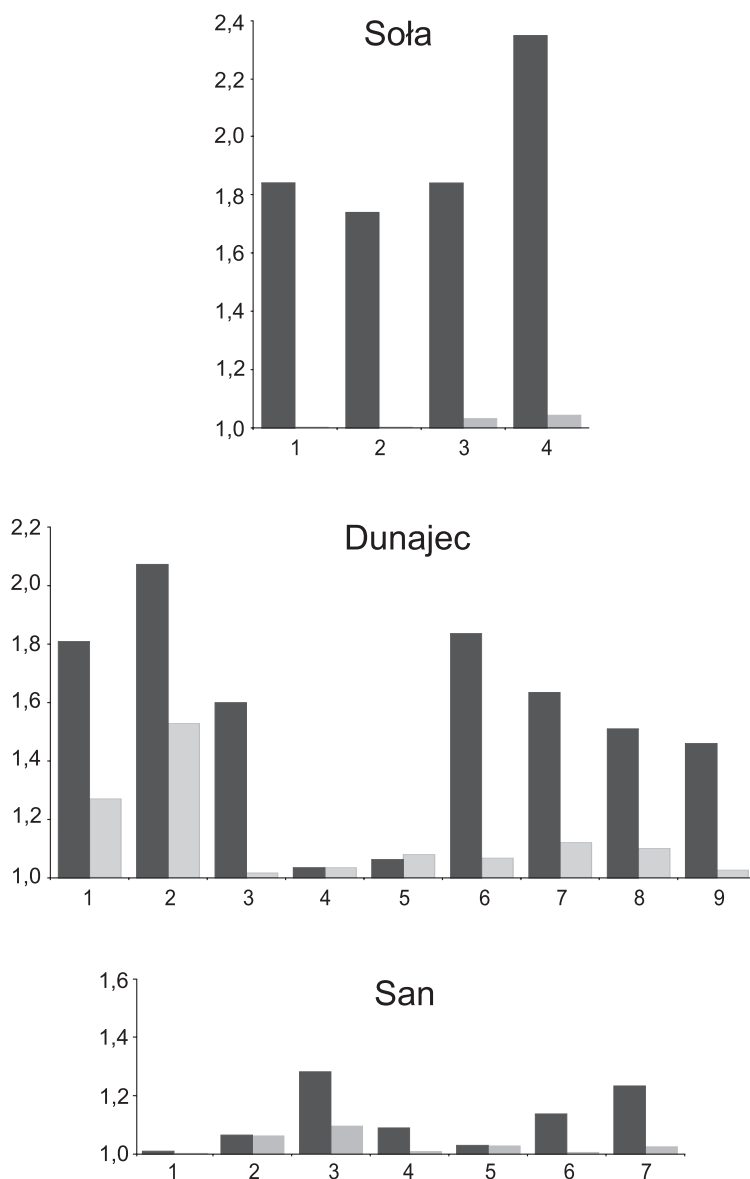
Zaistniałe w XX wieku zmiany średniej średnicy ziarna, wysortowania oraz facjalnego charakteru osadów korytowych przedstawiono na przykładzie środkowego biegu Raby [Wyźga, 1993a, 1993c]. Należy jednak podkreślić, że podobny charakter zmian osadów korytowych obserwowano także w szeregu innych rzek polskich Karpat [np. Wyźga i in., 2012a]. Przedstawiono także jakościowe obserwacje dotyczące przestrzennego zasięgu transformacji aluwialnych koryt rzek karpackich w koryta skalne.

4. Zmiany szerokości i liczby koryt małej wody karpackich dopływów Wisły od drugiej połowy XIX wieku

W drugiej połowie XIX wieku Soła płynęła stosunkowo szerokim, roztokowym korytem. Średnia liczba koryt małej wody wynosiła od 1,80 w odcinku 2 do 2,35 w przedgórskim odcinku 4 (ryc. 2.3). Maksymalna liczba koryt w poszczególnych odcinkach rzeki wynosiła od 3 do 5, przy czym należy pamiętać, że mapa sztabowa przedstawiała zgeneralizowany rysunek rzeki w stosunku do sytuacji rzeczywistej zarejestrowanej na zdjęciu topograficznym wykonanym w skali 1:25000. Średnia łączna szerokość koryt małej wody stopniowo wzrastała z biegiem rzeki od 52,6 m w odcinku 1 do 92,9 m w odcinku 4 (ryc. 2.4). Jednocześnie w obrębie analizowanych odcinków zaznaczało się znaczne zróżnicowanie szerokości koryt małej wody; w odcinkach 1-3 ich maksymalna łączna szerokość była ok. 3,5 razy większa niż szerokość minimalna, natomiast w przedgórskim odcinku rzeki aż 6,2 razy większa, wynosząc niemal 240 m.

Współcześnie Soła płynie prostym, jednonurtowym korytem, jedynie w pogórskim i przedgórskim odcinku sporadycznie występuje koryto dwunurtowe (ryc. 2.3). Średnia szerokość koryta małej wody wynosi teraz od 17,6 m w odcinku 1 do 42,7 m w odcinku 3, uległa zatem zmniejszeniu do 33-52% wielkości sprzed 130 lat (ryc. 2.4). Szerokość minimalna zmalała mniej niż średnia, do 50-68% wielkości sprzed 130 lat, natomiast szerokość maksymalna zmniejszyła się w większym stopniu, do 23-47% wielkości historycznej, w przedgórskim odcinku rzeki wynosząc 72 m. W rezultacie, znacznie zmalało zróżnicowanie szerokości koryt(a) małej wody wzdłuż biegu rzeki; maksymalna szerokość koryta była teraz większa od minimalnej od 1,3 do 3,1 razy.

W drugiej połowie XIX wieku zróżnicowanie stopnia roztokowości koryta Dunajca wzdłuż biegu rzeki zaznaczało się bardzo wyraźnie [Zawiejska, Wyźga, 2010]. W odcinkach rzeki w obrębie kotlin Orawsko-Nowotarskiej i Sądeckiej średnia liczba koryt małej wody była zbliżona do 2, a maksymalna wynosiła 4-5. W przełomach Pienińskim i Tylmanowskim rzeka płynęła korytem jednonurtowym, jedynie sporadycznie występowało tam koryto dwunurtowe (ryc. 2.3). Średnia łączna szerokość koryt małej wody systematycznie wzrastała z biegiem rzeki od 54,1 m w obrębie Pogórza Spisko-Gubałowskiego do 136 m w Kotlinie Sandomierskiej. Jedynie w Przełomie Tylmanowskim szerokość ta była mniejsza niż w wyżej zlokalizowanym odcinku rzeki (ryc. 2.4). Zróżnicowanie szerokości koryta małej wody było bardzo duże; w poszczególnych odcinkach rzeki szerokość maksymalna przewyższała szerokość minimalną od 2,9 do 8,8 razy. Najmniejszy stopień zróżnicowania szerokości koryta odnotowano w odcinku rzeki w Kotlinie Sądeckiej, co prawdopodobnie było odzwierciedleniem



Ryc. 2.3. Średnia liczba koryt małej wody w badanych odcinkach Soły, Dunajca i Sanu w drugiej połowie XIX wieku (czarne kolumny) i na początku XXI wieku (szare kolumny). Lokalizację odcinków rzek przedstawiono na rycinie 2.2.

Fig. 2.3. Average number of low-flow channels in the studied reaches of the Soła, Dunajec and San rivers in the second half of the 19th century (black columns) and at the beginning of the 21st century (grey columns). Location of the reaches is shown in Figure 2.2.

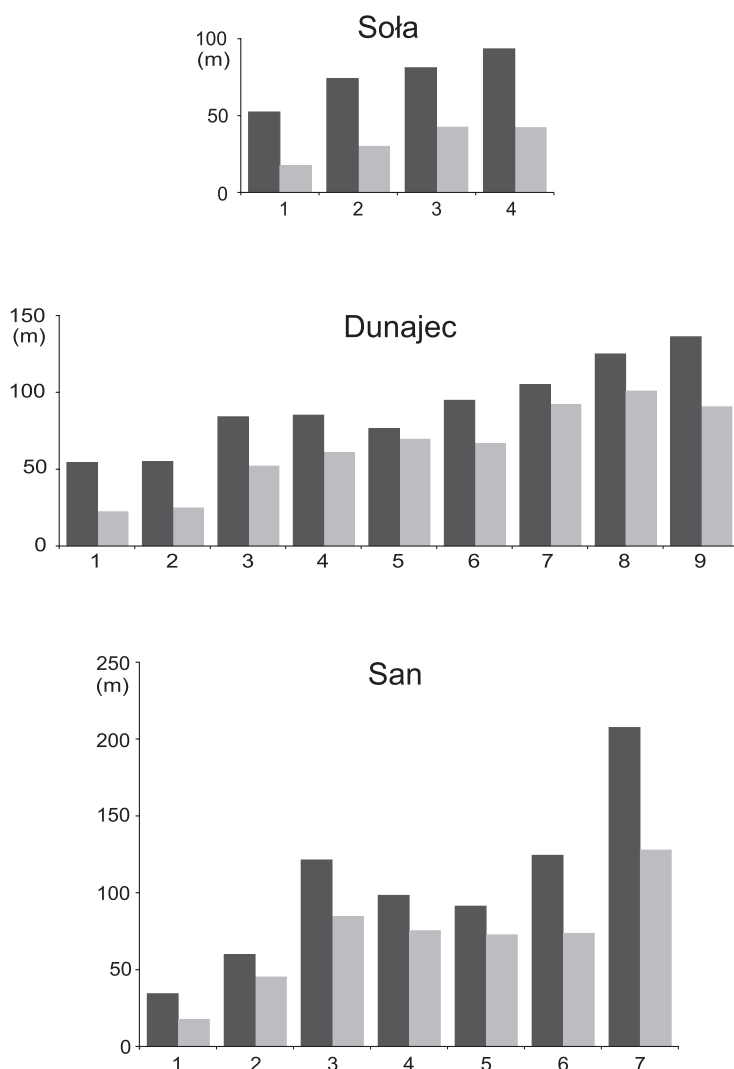
najwcześniejszych prac regulacyjnych prowadzonych w sąsiedztwie Nowego Sącza już w drugiej połowie XIX wieku.

Współcześnie wielonurtowy układ koryta występuje częściej jedynie w Czarnym Dunajcu, zwłaszcza w jego odcinku w Kotlinie Orawsko-Nowotarskiej; średnia liczba koryt małej wody wynosi tu 1,53, a rzeka płynie maksymalnie 5 korytami. W pozostałej

części swego biegu Dunajec płynie korytem jednonurtowym, w którym sporadycznie dochodzi do rozdławiania się nurtu (ryc. 2.3). Zmiany zaistniałe w ostatnich 130 latach doprowadziły do zaniku wcześniejszego zróżnicowania układu koryta rzeki pomiędzy jej odcinkami w obrębie szerokich kotlin śródgórskich i przedgórskich oraz odcinkami przełomowymi [Zawiejska, Wyżga, 2010]. Średnia szerokość koryta małej wody zasadniczo wzrasta z biegiem rzeki od 22,1 m w odcinku 1 do 100,6 m w odcinku pogórskim (8), w Kotlinie Sandomierskiej zmniejszając się do 90 m (ryc. 2.4). W porównaniu z wielkością historyczną, szerokość ta zmalała najbardziej w odcinkach 1 i 2 wydzielonych wzdłuż Czarne Dunajca (41-45%), w umiarkowanym stopniu w odcinkach Dunajca w obrębie Kotliny Nowotarskiej i Kotliny Sandomierskiej (62-66%), a w najmniejszym stopniu w odcinku rzeki w Przełomie Tylmanowskim (91%). Ta zróżnicowana skala zmian szerokości koryta małej wody jest najprawdopodobniej odbiciem zróżnicowanego stopnia wcięcia się rzeki w różnych jej odcinkach, warunkowanego grubością pokrywy aluwialnej [Zawiejska, Wyżga, 2010]. Szerokość minimalna zmalała w niewielkim stopniu, najbardziej – do 64% wielkości historycznej – w odcinku 1, a w kilku odcinkach rzeki nie uległa zmianie. Szerokość maksymalna zmalała do 36-90% wielkości sprzed 130 lat, najbardziej wzdłuż Czarne Dunajca i w Kotlinie Sandomierskiej, najmniej natomiast w odcinku rzeki w Kotlinie Sądeckiej. Największą szerokość koryta małej wody – wynoszącą 165 m – stwierdzono w trzech odcinkach Dunajca: w Kotlinie Sądeckiej, w odcinku pogórskim i w Kotlinie Sandomierskiej. W rezultacie większego ograniczenia szerokości maksymalnej niż minimalnej zmalało zróżnicowanie szerokości koryt(a) małej wody; w poszczególnych odcinkach rzeki szerokości te różniły się teraz od 2,4 do 5,9 razy.

W drugiej połowie XIX wieku na większości swego biegu San płynął prostym, jednonurtowym korytem, które lokalnie przechodziło w koryto dwunurtowe. W odcinkach rzeki w obrębie Dołów Jasielsko-Sanockich oraz w Kotlinie Sandomierskiej oprócz dominujących fragmentów jednonurtowego koryta występowały także dłuższe fragmenty z wielonurtowym korytem, w którym rzeka płynęła 2-4 odnogami; w rezultacie, średnia liczba koryt małej wody w tych odcinkach wynosiła 1,13-1,27 (ryc. 2.3). Rozdzielaniu się przepływu w wielonurtowym korycie towarzyszył także znaczny wzrost jego szerokości i w rezultacie te trzy odcinki rzeki cechowała także szczególnie duża szerokość koryt małej wody (ryc. 2.4). Największą średnią (209 m) i maksymalną (910 m) łączną szerokość koryt małej wody zanotowano w dolnym biegu Sanu, gdzie proces roztokowania rzeki był szczególnie intensywny [Szumański, 1986]. Oba dolne odcinki Sanu cechowało bardzo duże zróżnicowanie szerokości koryta małej wody; szerokość maksymalna przewyższała tu szerokość minimalną 10,2-16,2 razy. W wyższych odcinkach rzeki to zróżnicowanie było wyraźnie mniejsze (2,4-5,8-krotne).

Współcześnie San płynie jednonurtowym korytem, które jedynie sporadycznie dzieli się na 2 lub 3 odnogi (ryc. 2.3). Średnia szerokość koryta małej wody zmalała do 53-80% wielkości sprzed 130 lat, najbardziej w granicznym odcinku rzeki w Bieszczadach oraz w dolnym biegu Sanu w Kotlinie Sandomierskiej (ryc. 2.4). Minimalna szerokość zmalała w mniejszym stopniu niż średnia (przeciętnie do 76% wielkości historycznej), chociaż skala tej zmiany była znacznie zróżnicowana wśród badanych odcinków rzeki. Podobnie jak w pozostałych rzekach, szerokość maksymalna uległa największej zmianie, przeciętnie do 52% wielkości historycznej. Największą szerokość koryta małej wody – 248 m – zanotowano w najniższym odcinku rzeki. Uległa ona tu zmniejszeniu do zale-



Ryc. 2.4. Średnia łączna szerokość koryt małej wody w badanych odcinkach Soły, Dunajca i Sanu w drugiej połowie XIX wieku (czarne kolumny) i na początku XXI wieku (szare kolumny). Lokalizację odcinków rzek przedstawiono na rycinie 2.2.

Fig. 2.4. Average aggregated width of low-flow channels in the studied reaches of the Soła, Dunajec and San rivers in the second half of the 19th century (black columns) and at the beginning of the 21st century (grey columns). Location of the reaches is shown in Figure 2.2.

dwie 27% wielkości notowanej przed 130 laty. Zróżnicowanie szerokości w badanych odcinkach rzeki znacznie zmalało; maksymalna szerokość koryta małej wody była teraz od 1,4 do 5,9 razy większa niż szerokość minimalna.

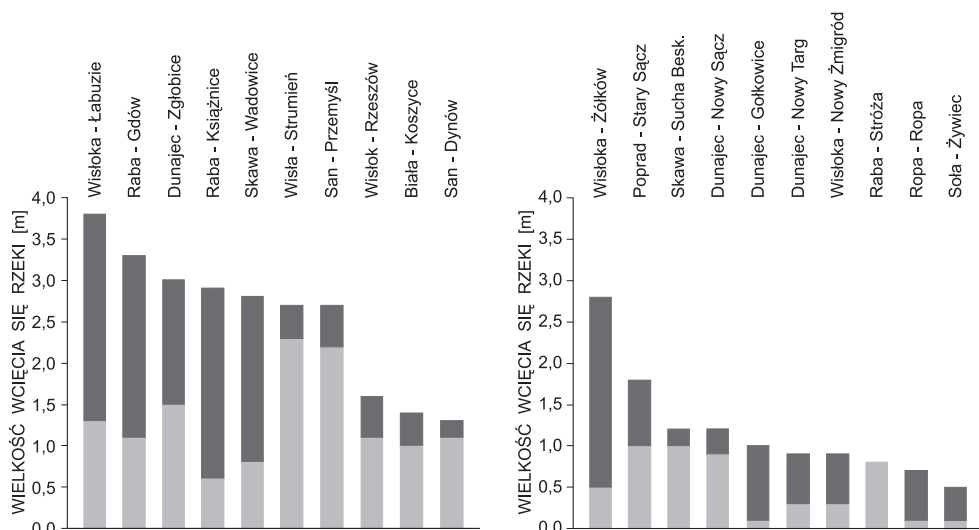
5. Wcinanie się rzek karpackich

Przekształceniom planarnej geometrii rzek karpackich w XX wieku towarzyszyły zmiany pionowego położenia dna ich koryt. W dolnych biegach rzek karpackich obni-

zanie się dna koryt, odzwierciedlone w obniżaniu się minimalnych rocznych stanów wody, zostało zapoczątkowane jeszcze w końcu XIX lub z początkiem XX wieku wraz z rozpoczęciem prac regulacyjnych [Punzet, 1981; Wyźga, 1991] i w ciągu ostatniego stulecia doprowadziło do wcięcia się rzek o 1,4-3,8 m [Wyźga, 2001a, 2008]. Istotną przyczyną degradacji dna karpackich dopływów Wisły w ich przedgórskich odcinkach było skracanie biegu jednokorytowego koryta poprzez przecinanie szyi meandrów [np. Wyźga, 1991; Zawiejska, Wyźga, 2010], co wykracza poza tematykę niniejszej pracy.

W pogórskich odcinkach karpackich dopływów Wisły wcięcie się rzek wyniosło w ciągu XX wieku od 1,3 do 3,8 m, przy średniej wielkości 2,6 m (ryc. 2.5). Obniżanie się dna rzek rozpoczęło się tu stosunkowo wcześniej, zazwyczaj na początku XX wieku, i jego większa część (średnio 56%) przypadła na pierwszą połowę stulecia (ryc. 2.5). W górskich odcinkach karpackich dopływów Wisły i w ich beskidzkich dopływach wielkość wcięcia się rzek była mniejsza, wynosząc od 0,5 do 2,8 m. Średnia wielkość wcięcia się rzek wyniosła tu 1,2 m, a jego większa część (średnio 56%) nastąpiła w drugiej połowie stulecia (ryc. 2.5).

Porównanie wielkości obniżenia się minimalnych rocznych stanów wody w kolejnych posterunkach wodowskazowych na danej rzece wskazuje na zmniejszanie się skali obniżenia dna koryta ku górze rzeki (np. posterunki Zgłobice, Nowy Sącz, Gołkowice i Nowy Targ na Dunajcu czy Łabuzie, Żółków i Nowy Żmigród na Wisłoce – ryc. 2.5), czemu zazwyczaj towarzyszy coraz późniejsze wystąpienie głównej fazy wcinania się rzeki w coraz wyższych jej odcinkach [Wyźga, 1993c, 2008; Zawiejska, Wyźga, 2010]. Szczegółowa analiza czasowego przebiegu prac regulacyjnych wzdłuż biegu Dunajca oraz obniżania się minimalnych rocznych stanów wody w kolejnych posterunkach wodowska-



Ryc. 2.5. Wielkość wcięcia się rzek polskich Karpat w ciągu XX wieku oraz w jego pierwszej (szare słupki) i drugiej połowie (czarne słupki) określona na podstawie obniżenia się minimalnych rocznych stanów wody w posterunkach wodowskazowych w pogórskich (lewy diagram) i górskich (prawy diagram) odcinkach rzek.

Fig. 2.5. The amount of channel incision of Polish Carpathian rivers during the 20th century and in its first (grey columns) and second (black columns) half inferred from the lowering of minimum annual water stage at gauging stations in the foothill (left diagram) and mountain (right diagram) reaches of the rivers.

zowych na tej rzece wskazała, że zasadniczą przyczyną coraz późniejszego wystąpienia głównej fazy erozji wgłębnej w wyżej położonych odcinkach rzeki było prowadzenie prac regulacyjnych w jej poszczególnych odcinkach w różnych okresach [Zawiejska, Wyźga, 2010]. W toku prac regulacyjnych następowało znaczne zwężenie koryt rzek karpackich i zastąpienie ich wielonurtowego koryta prostym jednonurtowym korytem [Wyźga, 2001a, Korpak, 2007]; zmiany te prowadziły do znacznego zwiększenia prędkości przepływu i zdolności transportowej rzeki przy danym natężeniu przepływu [Wyźga, 1993c, 2001a]. Efektem tego było pojawienie się tendencji do erozji wgłębnej najpóźniej kilka lat po zapoczątkowaniu prac regulacyjnych w danym odcinku rzeki [Wyźga, 1993c]. Do szybkiego pogłębienia się w drugiej połowie stulecia koryt rzek karpackich w ich górnych odcinkach przyczyniał się pobór żwiru i większych otoczaków z dna rzek [Rinaldi i in., 2005; Wyźga i in., 2010]. W niektórych rzekach (np. Ropa, Czarny Dunajec) eksploatację żwiru prowadzono w powojennych dziesięcioleciach na skalę przemysłową [Dudziak, 1965; Augustowski, 1968], a jej efektem było szybkie obniżanie się dna koryt i przekształcanie koryt aluwialnych w koryta skalne. Pozyskiwanie największych otoczaków z powierzchni łąch [Krzemień, 1998; Wyźga, 2001a], pomimo stosunkowo niewielkiej objętości usuwanego materiału, również znacząco przyczyniało się do obniżania dna rzek. Powodowało bowiem odsłonięcie mniejszych ziarn podścielających warstwę opancerzenia dna, ułatwiając ich uruchamianie i transport w czasie wezbrań [Wyźga, 2001a; Wyźga i in., 2010]. Wreszcie, w drugiej połowie stulecia w polskich Karpatach zaznaczył się znaczny wzrost lesistości [Kozak i in., 2007] i zmniejszenie rolniczego i pasterskiego użytkowania gruntów. Najbardziej znaczące zmiany użytkowania ziemi miały miejsce w górskich częściach zlewni [Lach, Wyźga, 2002; Kukulak, 2004; Wyźga, i in., 2012a], ograniczając dostawę rumowiska do górnych odcinków rzek karpackich. Wzrost zdolności transportowej rzek spowodowany ich regulacją nastąpił tu w czasie, gdy malała dostawa rumowiska do koryt, prowadząc w efekcie do utraty dynamicznej równowagi rzek i szybkiego pogłębienia się ich koryt [Wyźga, Lach, 2002; Wyźga, 2008].

Mniejsza skala wcięcia się rzek karpackich w ich górnym biegu może częściowo być wynikiem późniejszego zainicjowania erozji wgłębnej i wciąż trwających procesów dostosowania się rzek do zmienionych warunków środowiskowych. Zasadniczą jej przyczyną była jednak niewielka miąższość aluwii wysielających dna dolin w górnym biegu rzek karpackich. W rezultacie, w wielu odcinkach rzek doszło tu do rozcięcia i wyprzątnięcia aluwii z koryt (ryc. 2.6) [Wyźga, 2003], a skala degradacji dna koryt była uzależniona od odporności skalnego podłoża na erozję [Zawiejska, Wyźga, 2010; Wyźga i in., 2012a]. Tam, gdzie podłoże to stanowią stosunkowo odporne piaszczowce, wcięcie się rzeki zazwyczaj nie przekroczyło 1 m i uległo zahamowaniu po wyprzątnięciu aluwii z koryta i odsłonięciu wychodni skalnych (ryc. 2.6). Natomiast w odcinkach, w których pod aluwiami występowały skały o małej odporności, po wyprzątnięciu aluwii erozja wgłębna trwała nadal, prowadząc do wcięcia się rzeki w podłoże skalne (ryc. 2.7).

6. Zmiany materiału tworzącego dno rzek

W naturalnych warunkach holocenu rzeki karpackie cechowało formowanie stosunkowo drobnoziarnistych żwirów i pionowa stabilność aluwialnych koryt pomimo niewielkiej dostawy rumowiska z zalesionych zlewni. Taki charakter procesów był



Ryc. 2.6. Skalne koryto górnej Wisłoki w Żółkowie. Szybkie wcinanie się rzeki spowodowane regulacją koryta przeprowadzoną w latach 60. doprowadziło do rozcięcia pokrywy aluwium i przekształcenia aluwialnego koryta w koryto skalne. Wcinanie się rzeki ustało tu po odsłonięciu odpornych piaskowców warstw krośnieńskich.

Fig. 2.6. Bedrock channel of the upper Wisłoka River at Żółków. Rapid incision of the river induced by the channelization from the 1960s have resulted in the dissection of alluvium and transformation of the former alluvial channel into the bedrock one. Here, river incision has ceased with the exhumation of resistant sandstone layers of the Krosno Beds.

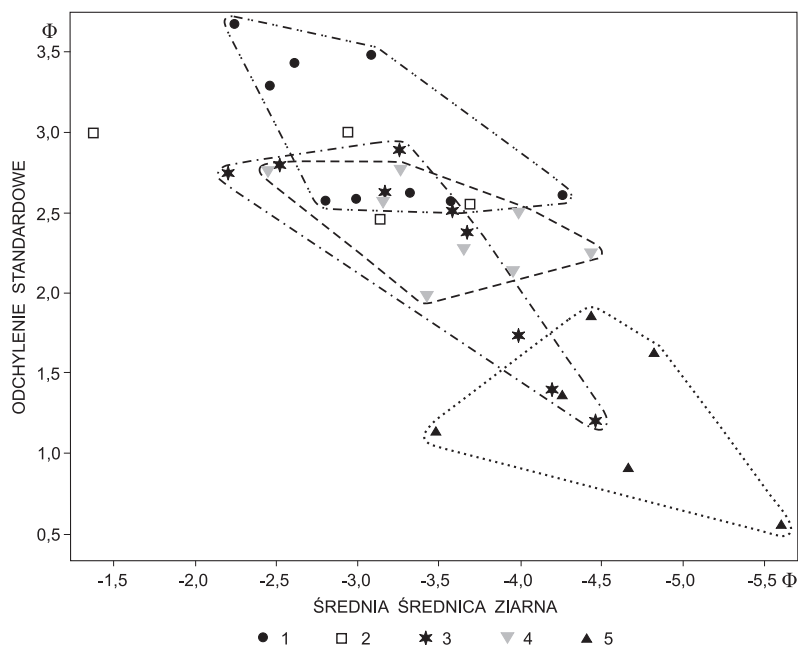


Ryc. 2.7. Koryto górnej Wisłoki w Nieglowicach wcięte w łupkowe serie warstw krośnieńskich. Po rozcięciu warstwy aluwium rzeka wcięła się tu w mało odporne podłoże skalne do głębokości ok. 1,5 m.

Fig. 2.7. Channel of the upper Wisłoka River at Nieglowice incised into shale series of the Krosno Beds. Here, after the dissection of the alluvium, the river incised down to 1.5 m into the non-resistant bedrock.

wynikiem efektywnego rozpraszania energii wód wezbraniowych wskutek dużych oporów przepływu generowanych przez obecność zadrzewionych kęp [Gurnell, Petts, 2002] i grubego rumoszu drzewnego w rzekach [Buffington, Montgomery, 1999]. Wraz z zagospodarowaniem dolin rzecznych następowała wycinka nadrzecznych lasów, a postępujące w minionych stuleciach wylesienie oraz rolnicze i pasterskie zagospodarowanie zlewni karpackich [Adamczyk, 1981; Pietrzak, 2002] spowodowało wzrost wielkości i częstotliwości wezbrań [Wyźga, 1993a] oraz tempa bocznej migracji koryt [Adamczyk, 1981]. Efektem tych zmian środowiskowych był brak lub rzadkie występowanie nadrzecznych lasów w dolinach rzek karpackich i zadrzewionych kęp w obrębie rzek, widoczne na mapach z XIX i z początku XX wieku [Baumgart-Kotarba, 1983; Wyźga, 2007; Wyźga i in., 2012a], oraz radykalne ograniczenie dostawy grubego rumoszu drzewnego do rzek [Wyźga, 2007]. Aż do XX wieku wyeliminowanie oporów przepływu generowanych uprzednio przez gruby rumosz drzewny i zadrzewione kępy nie znalazło odzwierciedlenia w zmianach materiału dennego rzek i pogłębianiu się ich koryt [por. Brierley i in., 2005], było bowiem równoważone przez wzrost dostawy rumowiska z wylesionych i intensywnie użytkowanych zlewni [Rinaldi i in., 2013]. W XIX i z początkiem XX wieku duża dostawa piaszczystego materiału z wylesionych stoków spowodowała formowanie się w rzekach luźno upakowanych żwirów o bardzo słabym wysortowaniu (ryc. 2.8), a efektem szybkiego opadania wysokich, lecz krótkotrwałych fal wezbraniowych był brak rozwoju opancerzenia dna koryt [Wyźga, 1993a, 2012; Wyźga in. 2012a].

W XX wieku połączone oddziaływanie zmian hydrauliki przepływów wezbraniowych spowodowanych regulacją koryt oraz zmniejszenia się dostawy rumowiska ze zlewni doprowadziło do radykalnych zmian charakteru facjalnego osadów korytowych rzek karpackich [Wyźga, 1993a, 1993c, 2012a]. Przy zwiększonej zdolności transportowej rzek i jednoczesnym zmniejszeniu się dostawy rumowiska z ich wyższych odcinków następowało wymywanie drobniejszych ziarn z materiału dennego prowadzące do wzrostu średniej średnicy ziarna i stopnia wysortowania osadów korytowych (ryc. 2.8). Wzrost kompetencji przepływów wezbraniowych, spowodowany ich narastającą koncentracją w coraz węższych i głębszych korytach, umożliwił także przenoszenie w dół rzek większych otoczków uprzednio występujących jedynie w ich wyższych odcinkach, co również przyczyniało się do wzrostu średniej średnicy ziarna osadów korytowych [Wyźga i in., 2012b]. W ciągu XX wieku w rzekach karpackich ustało formowanie się żwirów o luźnym upakowaniu, coraz większego znaczenia nabierała natomiast depozycja żwirów niewypełnionych [Wyźga, 1993a, 2012a]. Stopniowo zaznaczył się także rozwój opancerzenia dna rzek [Wyźga, 1993a, 2001a]. Wiadomo, że takie opancerzenie formuje się wówczas, gdy dostawa obciążenia dennego do danego odcinka rzeki jest mniejsza od zdolności rzeki do transportu tego obciążenia [Dietrich i in., 1989]. Stanowi ono mechanizm ograniczający mobilność ziarn materiału dennego i przywracający przez to równowagę pomiędzy zasilaniem rzeki rumowiskiem i jej zdolnością transportową [Wyźga, 2012]. Wzrost średniej średnicy ziarna również jest mechanizmem przywracającym równowagę dynamiczną rzek, których zdolność transportowa uległa zwiększeniu w następstwie regulacji koryta [Wyźga, 1993c]. Współcześnie średnia średnica ziarna materiału dennego pod warstwą opancerzenia dna może być 2 do 4 razy większa niż na początku XX wieku (ryc. 2.8), a materiału tworzącego opancerzenie dna 2-4 razy większa niż w warstwie pod opancerzeniem [Wyźga, 1993c, 2001a].



Ryc. 2.8. Zmiany średniej średnicy i standardowego odchylenia rozkładu uziarnienia żwirów łach środkowej Raby od drugiej połowy XIX wieku. Wiek osadów: 1 – druga połowa XIX w.; 2 – początek XX w.; 3 – lata 50.; 4 – współczesne łachy boczne i śródkorytowe z odcinków koryta o małej krętości; 5 – współczesne łachy meandrowych z krętych odcinków koryta. Według: Wyżga [1993c].

Fig. 2.8. Changes in mean grain diameter and standard deviation of the grain-size distribution of bar gravels of the middle Raba River since the second half of the 19th century. Sediment age: 1 – second half of the 19th century; 2 – beginning of the 20th century; 3 – the 1950s; 4 – present-day lateral and mid-channel bars from low-sinuosity reaches; 5 – present-day point bars from sinuous channel reaches. After: Wyżga [1993c].

Powyżej wspomniano, że w wyniku trwającego obniżania się dna koryt, w wielu odcinkach rzek doszło do całkowitego rozcięcia i usunięcia z koryta aluwów, a w rezultacie do przekształcenia aluwialnego koryta w koryto skalne. Współcześnie skalne koryta występują najczęściej w górnych biegach karpackich dopływów Wisły [Lach, Wyżga, 2002; Krzemień, 2003; Zawiejska, Krzemień, 2004] oraz w ich beskidzkich i podhalańskich dopływach [Korpak, 2007; Wyżga, Radecki-Pawlik, 2011; Bucała, 2012]. Do przekształcenia aluwialnego koryta w koryto skalne doszło także w tych potokach, które nie były poddane regulacji i/lub eksploatacji żwiru, w których jednak przy zmniejszaniu się dostawy rumowiska ze zlewni kontynuowano usuwanie grubego rumoszu drzewnego z koryta (ryc. 2.9). Natomiast w przypadku obecności grubego rumoszu drzewnego w potoku nie obserwuje się zaniku występowania aluwialnego dna koryta [Wyżga, Radecki-Pawlik, 2011]. Potwierdza to analogiczne trendy kształtowania się koryt cieków górskich stwierdzone w zalesionych zlewniach zachodniej części USA [Montgomery i in., 1996] i wskazuje, że rumosz drzewny odgrywa kluczową rolę w utrzymywaniu aluwialnego dna koryt takich cieków dzięki efektywnemu rozpraszaniu energii płynącej wody [Buffington, Montgomery, 1999] i bezpośredniemu zatrzymywaniu materiału dennego powyżej tam drzewnych [Thompson, 1995].



Ryc. 2.9. Skalne koryto potoku Kamienica w obszarze Gorczańskiego Parku Narodowego poza rezerwatem ścisłym. Usuwanie grubego rumoszu drzewnego z odcinka potoku przylegającego do drogi leśnej zmniejszało opory przepływu, umożliwiając usunięcie żwirowych aluwii przez wody wezbraniowe, gdy dostawa rumowiska do potoku zmalała po zaniechaniu gospodarki leśnej w obrębie zlewni.

Fig. 2.9. Bedrock channel of Kamienica Stream in the part of the Gorce Mountains National Park subjected to partial protection only. The removal of large wood from the stream reach adjacent to a forest road reduced boundary resistance to flow and allowed flushing out of gravelly alluvium to downstream reaches once the sediment delivery to the stream diminished with the decline of forest harvest in the catchment.

Lokalne występowanie skalnego koryta stwierdza się współcześnie w obrębie pogórskich odcinków karpackich dopływów Wisły, a także w najwyższej części ich odcinków w Kotlinie Sandomierskiej (podłoże skalne stanowią tu sfałdowane osady miocenne Zapadliska Przedkarpackiego). Licznie również występują odcinki rzek, w których dno koryta małej wody jest wyszczelnione jedynie cienką warstwą żwirów [Zawiejska, Wyźga, 2010] o grubości odpowiadającej 1-2 średnim średnicom ziarna w materiale dennym. Taka cienka pokrywa żwirowa łatwo ulega rozerwaniu w czasie wezbrań (ryc. 2.10), co w rezultacie prowadzi do przyspieszonego usuwania aluwii z dna rzeki i przekształcania aluwialnego koryta w koryto skalne.

7. Dyskusja i uwagi końcowe

Uproszczony sposób przedstawiania koryt rzecznych na współczesnych średnioskalowych mapach topograficznych (mapach rastrowych, wektorowej mapie poziomu 2 oraz Mapie Podziału Hydrograficznego Polski) ograniczył możliwość porównania planarnej geometrii koryt rzek karpackich z drugiej połowy XIX wieku i współczesnych. Ograniczenie obrazu rzek na współczesnych mapach do koryt małej wody, z pominięciem przedstawiania łańcuchów korytowych, z pewnością nie wynikało z trudności technicznych



Ryc. 2.10. Cienka, nieciągła warstwa żwirów na dnie koryta małej wody Białej Tarnowskiej w Wilczyskach w środkowym biegu rzeki. Jasne plamy to wychodnie skalnego podłoża.

Fig. 2.10. Thin, discontinuous layer of gravels on the bed of a low-flow channel of the Biała Tarnowska River in its middle course at Wilczyska. Light patches are bedrock exposures.

związanych z przedstawieniem wszystkich elementów aktywnego koryta rzek, lecz musiało być świadomym zabiegiem kartograficznym. Współgrał on z równolegle podejmowanymi przez specjalistów inżynierii wodnej praktycznymi działaniami zmierzającymi do znacznego zwężenia koryt rzek karpackich i ograniczenia powierzchni rzek zajmowanej przez łachy korytowe. Wyeliminowanie łach korytowych z rysunku rzek przedstawianego na mapach topograficznych wskazuje na brak zrozumienia wśród polskich kartografów znaczenia łach korytowych dla właściwego przebiegu procesów fluwialnych i funkcjonowania ekosystemów rzecznych. Zarazem, taki sposób przedstawiania rzek na mapach topograficznych (a także mapach turystycznych rozpowszechnianych wśród szerokiego rzesz społeczeństwa) musiał przyczyniać się do zaniku postrzegania rozległych łach korytowych jako niezbędnego przyrodniczo, istotnego dla interesów człowieka i atrakcyjnego wizualnie elementu rzek górskich i pogórskich [por. Lelay i in., 2013].

Pełny obraz planarnej geometrii współczesnych rzek przedstawia ortofotomapa. Zdjęcia lotnicze przetworzone do postaci ortofotomapy mogą być bardzo przydatne do szczegółowych analiz zmian planarnej geometrii wybranych odcinków rzek w ciągu drugiej połowy XX wieku. Wykorzystanie ortofotomapy do porównań współczesnej geometrii koryt rzecznych i tej przedstawionej na austriackiej mapie sztabowej wymagałoby jednak znacznej generalizacji rysunku współczesnych koryt do skali mapy austriackiej. Nie jest to możliwe przy przeglądowym opracowaniu obejmującym cały bieg głównych rzek polskich Karpat.

W drugiej połowie XIX wieku rzeki karpackie płynęły szerokimi korytami. W Sole roztokowy układ koryta występował na całej długości rzeki i był najpełniej rozwinięty w jej przedgórskim odcinku. Dunajec na przeważającej części swego biegu miał roztokowe

koryto, jedynie w odcinkach przełomowych płynął korytem jednonurtowym. W Sanie koryto roztokowe występowało nieciagle w obrębie kotlin, natomiast w pozostałych odcinkach rzeki jedynie sporadycznie dochodziło do rozdzielania się nurtu. Wielonurtowa morfologia koryta była zatem najpełniej rozwinięta w Sole – reprezentatywnej dla rzek odwadniających zachodnią część polskich Karpat fliszowych, o dużym udziale obszarów górskich w zlewni, znacznym spadku koryta i dostawie do niego spoistego, grubookruchowego rumowiska [por. Owczarek, 2007]. Najsłabszy rozwój roztokowego układu koryta cechował natomiast San – rzekę o mniejszym spadku koryta, reprezentatywną dla wschodniej części polskich Karpat fliszowych, o niewielkim udziale obszarów górskich w zlewni dostarczających do rzek przede wszystkim materiał piaszczysty powstający w wyniku wietrzenia łatwo rozsypliwych piaszczowców. Zarówno w Dunajcu, jak i w Sanie do rozwoju roztokowego koryta nie dochodziło w wąskich odcinkach dolin, gdzie duża energia skoncentrowanych przepływów wezbraniowych sprzyjała przenoszeniu rumowiska dennego w dół biegu rzek [Zawiejska, Wyźga, 2010]. Zróżnicowany stopień rozwoju wielonurtowej morfologii rzek w obrębie polskich Karpat odzwierciedlał zróżnicowanie warunków fizjograficznych w ich zlewniach [Klimek, 1979]. Do znacznego rozwoju roztokowego układu koryta rzek karpaccich w ich przedgórskich odcinkach doszło jednak dopiero w XIX wieku [Szumański, 1986; Wyźga, 1993a; Woskowicz-Ślęzak, 2012]. Rozwój ten był uwarunkowany obfitą dostawą rumowiska z wylesionych i intensywnie użytkowanych rolniczo zlewni i jego depozycją na przedpolu gór, gdzie zdolność transportowa rzek była stosunkowo mała [Wyźga i in., 2013].

W ciągu XX wieku doszło do niemal całkowitego przekształcenia roztokowych koryt rzek karpaccich w koryta jednonurtowe, połączonego ze znacznym zmniejszeniem szerokości koryt. Wraz z tą zmianą planarnej geometrii koryt nastąpiło znaczne wcięcie się rzek i znaczące zmiany materiału tworzącego ich dno: wzrost średniej średnicy ziarna osadów korytowych, rozwój opancerzenia dna, a w wielu odcinkach rzek przekształcenie aluwialnego koryta w koryto skalne. Zmniejszenie dostawy rumowiska do rzek karpaccich, będące efektem zmian użytkowania ziemi w zlewniach, musiało w pewnej mierze przyczynić się do wskazanych zmian rzek. Ich zasadniczą przyczyną były jednak zmiany w funkcjonowaniu rzek spowodowane bezpośrednimi ingerencjami człowieka w ich koryta: regulacją koryt, eksploatacją żwiru z koryt i przegradzaniem rzek zbiornikami zaporowymi. Wskazuje na to synchroniczność tych ingerencji oraz zmian rzek [Rinaldi i in., 2005; Wyźga, 2008; Zawiejska, Wyźga, 2010] oraz fakt, iż w XX wieku doszło do kompleksowej degradacji fizycznej struktury rzek karpaccich, a nie zastąpienia jednego układu ich koryta innym.

Współcześnie odcinki wielonurtowego koryta zachowały się jedynie w górnym biegu Dunajca i w niektórych potokach podhalańskich i beskidzkich. Przetrwaniu wielonurtowego układu koryta w tych odcinkach towarzyszyła pionowa stabilność [Zawiejska, Wyźga, 2010] lub jedynie niewielkie obniżenie się dna cieku, a także przekształcenie istniejącego wcześniej wielonurtowego koryta z łachami żwirowymi w wielonurtowe koryto z kępami [Wyźga i in., 2012a].

Zaistniała degradacja fizycznej struktury rzek karpaccich znalazła odzwierciedlenie w szeregu negatywnych zjawisk zaznaczających się zarówno w skali lokalnej, jak i regionalnej [Wyźga, 2001a, 2008]. Znaczny wzrost pojemności koryt w wyniku obniżania się dna rzek zmniejszył częstotliwość zatapiania den dolin przez wody wezbraniowe i możliwość retencjonowania tych wód wezbraniowych na dnach dolin [Wyźga, 2001b, 2008;

Soja, 2002]. Doprowadziło to do wzrostu kulminacyjnych przepływów fal wezbraniowych pojawiających się w dolnym końcu pogłębionych odcinków rzek przy wystąpieniu określonego przepływu w górnym końcu tych odcinków [Wyźga, 1997, 2008] oraz osłabienia lub zaniku bocznej łączności ekosystemów rzecznych. Drastyczne uproszczenie systemu przepływu rzek karpaccich musiało spowodować znaczące zmniejszenie zróżnicowania warunków siedliskowych dla organizmów rzecznych [Wyźga i in., 2011]. Znaczny wzrost średniej średnicy ziarna osadów korytowych i rozwój opancerzenia dna rzek utrudnił odbywanie tarła przez ryby litofilne. Pionowa łączność ekosystemów rzecznych [Brunke, Gonser, 1997] uległa znacznemu ograniczeniu w wyniku głębokiego wcięcia się rzek, a transformacja koryt aluwialnych w koryta skalne powodowała zupełny zanik tej łączności. Efektem wskazanych zmian rzek była degradacja warunków hydromorfologicznych, prowadząca do pogorszenia się stanu ekologicznego rzek [Vaughan i in., 2009].

Powyższe studium sfinansowano ze środków na naukę w latach 2010-2013 w ramach realizacji projektu badawczego nr N N305 097239.

Piśmiennictwo

- Adamczyk M., 1981: Rzeki Karpat Północnych w XVIII i XIX wieku. *Wierchy*, **49**, 227-240.
- Augustowski B., 1968: Spostrzeżenia nad zmianami antropogenicznymi w korycie rzeki Ropy w Karpatach. *Zeszyty Geograficzne WSP w Gdańsku*, **10**, 161-168.
- Baumgart-Kotarba M., 1980: Braided channel changes at chosen reaches of the Bialka River (the Podhale, Western Carpathians). *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, **14**, 113-134.
- Baumgart-Kotarba M., 1983: Kształtowanie koryt i teras rzecznych w warunkach zróżnicowanych ruchów tektonicznych (na przykładzie wschodniego Podhala). *Prace Geograficzne Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN*, **145**, 1-119.
- Brierley G.J., Brookes A.P., Fryirs K., Taylor M.P., 2005: Did humid-temperate rivers in the Old and New Worlds respond differently to clearance of riparian vegetation and removal of woody debris? *Progress in Physical Geography*, **29**, 27-49.
- Brunke M., Gonser T., 1997: The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, **37**, 1-33.
- Bucala A., 2012: Współczesne zmiany środowiska przyrodniczego pod wpływem działalności człowieka w dolinach potoków Jamne i Jaszcze (Gorce). *Landform Analysis*, **19**, 5-15.
- Buffington J.M., Montgomery D.R., 1999: Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers. *Water Resources Research*, **35**, 3507-3521.
- Dietrich W.E., Kirchner J.W., Ikeda H., Iseya F., 1989: Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers. *Nature*, **340**, 215-217.
- Dudziak J., 1965: Dzika eksploatacja kamienia w powiecie nowotarskim. *Ochrona Przyrody*, **31**, 161-187.
- Gurnell A.M., Petts G.E., 2002: Island-dominated landscapes of large floodplain rivers, a European perspective. *Freshwater Biology*, **47**, 581-600.
- Instrukcja techniczna K2, 1980: *Mapy topograficzne do celów gospodarczych*. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa.
- Jahn A., 1979: On the Holocene and present-day morphogenetic processes in the Tatra Mountains. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, **13**, 111-129.

- Klimek K., 1979: Geomorfologiczne zróżnicowania koryt karpackich dopływów Wisły. *Folia Geographica, Series Geographica-Physica*, **12**, 35-47.
- Klimek K., 1987: Man's impact on fluvial processes in the Polish Western Carpathians. *Geografiska Annaler*, **69A**, 221-226.
- Kondolf G.M., Boulton A.J., O'Daniel S., Poole G.C., Rahel F.J., Stanley E.H., Wohl E., Bång A., Carlstrom J., Cristoni C., Huber H., Koljonen S., Louhi P., Nakamura K., 2006: Process-based ecological river restoration: Visualizing three-dimensional connectivity and dynamic vectors to recover lost linkages. *Ecology and Society*, **11**, 5.
- Konias A., 2000: *Kartografia topograficzna Śląska Cieszyńskiego i zaboru austriackiego od II połowy XVIII wieku do początku XX wieku*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Korpak J., 2007: The influence of river training on mountain channel changes (Polish Carpathian Mountains). *Geomorphology*, **92**, 166-181.
- Kozak J., Estreguil C., Troll M., 2007: Forest cover changes in the northern Carpathians in the 20th century: a slow transition. *Journal of Land Use Science*, **2**, 127-146.
- Krassowski B., 1973: *Polska kartografia wojskowa (1919-1945)*. Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa.
- Krzemień K., 1981: Zmienność systemu korytowego Czarnego Dunajca. *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, **53**, 123-137.
- Krzemień K., 1998: Wpływ antropopresji na strukturę i dynamikę koryta Dunajca. [w:] *Konferencja „Bliskie naturze kształtowanie rzek i potoków”*, Zakopane, 95-103.
- 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.
- Krzemień K., 2006: Badania struktury i dynamiki koryt rzek karpackich. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, **4/1**, 131-142.
- Kukulak J., 2004: Zapis skutków osadnictwa i gospodarki rolnej w osadach rzeki górskiej na przykładzie aluwów dorzecza górnego Sanu w Bieszczadach Wysokich. *Prace Monograficzne Akademii Pedagogicznej w Krakowie*, **381**, 1-125.
- 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.
- LeLay Y.F., Piégay H., Rivière-Honegger A., 2013: Perception of braided river landscapes: Implications for public participation and sustainable management. *Journal of Environmental Management*, **119**, 1-12.
- Malarz R., 1997: Powódzie w dorzeczu Soły. *Wiadomości Ziem Górskich*, **6**, 5-25.
- Montgomery D.R., Abbe T.B., Buffington J.M., Peterson N.P., Schmidt K.M., Stock J.D., 1996: Distribution of bedrock and alluvial channels in forested mountain drainage basins. *Nature*, **381**, 587-589.
- Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B., 1991: Klimat. [w:] I. Dynowska, M. Maciejewski (red.), *Dorzecze górnej Wisły*. PWN, Warszawa-Kraków, 68-84.
- Nita J., Myga-Piątek U., 2012: Rola GIS w ocenie historycznych opracowań kartograficznych na przykładzie Wyżyny Częstochowskiej. *Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego PTG*, **16**, 191-207.
- Owczarek P., 2007: *Transformacja koryt rzecznych w warunkach dostawy grubofrakcyjnego materiału stokowego (na przykładzie średniogórskich dopływów Odry i Wisły)*. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Paluszkievicz F., 2011: *Kartografia Galicji Wschodniej w latach 1772-1914*. Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, Rzeszów.
- Patrick D.M., Smith L.M., Whitten C.B., 1982: Methods for studying accelerated fluvial change. [w:] R.D. Hey, J.C. Bathurst, C.R. Thorne (red.), *Gravel-Bed Rivers*. Wiley, Chichester, 783-815.

- Pietrzak M., 2002: *Geomorfologiczne skutki zmian użytkowania ziemi na Pogórzu Wiśnickim*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków.
- Pietrzak M., 2005: Relationship between settlement and relief in the Polish Carpathian mountains. [w:] W. Zgłobicki, J. Rejman (red.), *Human Impact on sensitive geosystems*. Maria Curie Skłodowska University Press, 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.
- Rinaldi M., Wyźga B., Surian N., 2005: Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives. *River Research and Applications*, **21**, 805-828.
- Rinaldi M., Wyźga B., Dufour S., Bertoldi W., Gurnell A., 2013: River processes and implications for fluvial ecogeomorphology: A European perspective. [w:] J. Shroder, D. Butler, C.R. Hupp (red.), *Treatise on Geomorphology. Vol. 12. Ecogeomorphology*. Academic Press, San Diego, 37-52.
- Schumm S.A., 1969: River metamorphosis. *Journal of the Hydraulic Division, American Association of Civil Engineers*, **95**, 255-273.
- Soja R., 2002. Hydrologiczne aspekty antropopresji w Karpatach. *Prace Geograficzne Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN*, **186**, 1-130.
- Starkel L. (red.), 1981: The evolution of the Wisłoka Valley near Dębica during the Late Glacial and Holocene. *Folia Quaternaria*, **53**, 1-91.
- Starkel L., 1990: Ewolucja środowiska przyrodniczego Karpat w okresie działalności człowieka. *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich*, **29**, 35-46.
- Starkel L., Kostrzewski A., Kotarba A., Krzemień K. (red.), 2008: *Współczesne przemiany rzeźby Polski*. Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich, Kraków.
- Szumański A., 1986: Postglacialna ewolucja i mechanizm transformacji dna doliny Dolnego Sanu. *Geologia*, **12(1)**, 5-92.
- Thompson D.M., 1995: The effects of large organic debris on sediment processes and stream morphology in Vermont. *Geomorphology*, **11**, 235-244.
- Tockner K., Paetzold A., Kraus U., Claret C., Zettel J., 2006: Ecology of braided rivers. [w:] G. Sambrook Smith, J.L. Best, C.S. Bristow, G.E. Petts (red.), *Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management*. Blackwell, London, 339-359.
- Trafas K., 1975: Zmiany biegu Wisły na wschód od Krakowa w świetle map archiwalnych I fotointerpretacji. *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, **40**, 1-85.
- Vaughan I.P., Diamond M., Gurnell A.M., Hall K.A., Jenkins A., Milner N.J., Naylor L.A., Sear D.A., Woodward G., Ormerod S.J., 2009: Integrating ecology with hydromorphology: a priority for river science and management. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **19**, 113-125.
- Woskowicz-Ślęzak B., 2012: Zapis antropopresji w rzeźbie przedgórskiego odcinka dna doliny Soły. [w:] A. Łajczak i in. (red.), *Antropopresja w wybranych strefach morfoklimatycznych – zapis zmian w rzeźbie i osadach*. Uniwersytet Śląski, Sosnowiec, 441-452.
- Wyźga B., 1991: Present-day downcutting of the Raba River channel (Western Carpathians, Poland) and its environmental effects. *Catena*, **18**, 551-566.
- Wyźga 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.
- Wyźga B., 1993b: Funkcjonowanie systemu rzecznej środkowej i dolnej Raby w ostatnich 200 latach. *Dokumentacja Geograficzna*, **6**, 1-92.
- Wyźga B., 1993c: River response to channel regulation: case study of the Raba River, Carpathians, Poland. *Earth Surface Processes and Landforms*, **18**, 541-556.

- Wyźga B., 1997: Methods for studying the response of flood flows to channel change. *Journal of Hydrology*, **198**, 271-288.
- Wyźga 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.
- Wyźga 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.
- Wyźga B., 2003: Współczesne wcinanie się rzek polskich Karpat: przyczyny, przebieg i skutki. [w:] J. Lach (red.), *Dynamika zmian środowiska geograficznego pod wpływem antropopresji*. Akademia Pedagogiczna, Kraków, 161-167.
- Wyźga B., 2007: *Gruby rumosz drzewny: depozycja w rzece górskiej, postrzeganie i wykorzystanie do rewitalizacji cieków górskich*. Instytut Ochrony Przyrody PAN, Kraków.
- Wyźga B., 2008: A review on channel incision in the Polish Carpathian rivers during the 20th century. [w:] H. Habersack, H. Piégay, M. Rinaldi (red.), *Gravel-Bed Rivers VI – From Process Understanding to River Restoration*. Elsevier, Amsterdam, 525-555.
- Wyźga B., 2012: Cechy teksturalne żwirowych osadów korytowych jako odzwierciedlenie dynamiki przepływu wody i transportu rumowiska w ciekach z różnych stref klimatycznych. [w:] A. Łajczak i in. (red.), *Antropopresja w wybranych strefach morfoklimatycznych – zapis zmian w rzeźbie i osadach*. Uniwersytet Śląski, Sosnowiec, 461-469.
- Wyźga B., Lach J., 2002: Współczesne wcinanie się rzek karpacczych jako przejaw zaburzenia równowagi pomiędzy ich zdolnością transportową a zasilaniem rumowiskiem. [w:] K. German, J. Balon, (red.) *Przemiany środowiska przyrodniczego Polski a jego funkcjonowanie*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków, 562-568.
- Wyźga B., Radecki-Pawlik A., 2011: Jak zmniejszyć zagrożenie i ryzyko powodziowe w dorzeczu górnej Wisły? *Gospodarka Wodna*, **10**, 414-421.
- Wyźga B., Zawiejska J., Radecki-Pawlik A., 2008: Określanie wielkości wcięcia się rzek i jego wpływu na hydraulikę przepływów wezbraniowych – przykłady z rzek karpacczych. *Landform Analysis*, **9**, 402-405.
- Wyźga B., Hajdukiewicz H., Radecki-Pawlik A., Zawiejska J., 2010: Eksploatacja osadów z koryt rzek górskich – skutki środowiskowe i procedury oceny. *Gospodarka Wodna*, **6**, 243-249.
- Wyźga B., Oglecki P., Radecki-Pawlik A., Zawiejska J., 2011: Diversity of macroinvertebrate communities as a reflection of habitat heterogeneity in a mountain river subjected to variable human impacts. [w:] A. Simon, S.J. Bennett, J.M. Castro (red.), *Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems: Scientific Approaches, Analyses and Tools*. American Geophysical Union, Washington, 189-207.
- Wyźga B., Zawiejska J., Radecki-Pawlik A., Hajdukiewicz H., 2012a: Environmental change, hydromorphological reference conditions and the restoration of Polish Carpathian rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, **37**, 1213-1226.
- Wyźga B., Hajdukiewicz H., Zawiejska J., Radecki-Pawlik A., Mikuś P., 2012b: Site 2.2 Chochółów – human induced changes in channel sedimentation in a mountain river. [w:] B. Wyźga, J. Zawiejska, M. Lehotský (red.), *International Field Seminar 'Processes and Patterns in Highly Dynamic Mountain Fluvial Systems', 2-4 June, 2012, Stará Lesná – Zakopane*, 15-18.
- Wyźga B., Zawiejska J., Hajdukiewicz H., 2013: Uwarunkowania występowania i przyczyny zaniku wielonurtowej morfologii rzek polskich Karpat. [w:] Wyźga B. (red.), *Stan środowiska rzek południowej Polski – znaczenie środowiskowe, degradacja i możliwości rewitalizacji rzek wielonurtowych*. Instytut Ochrony Przyrody PAN, Kraków, 7-32.
- Zawiejska J., Krzemiń K., 2004: Human impact on the dynamics of the upper Dunajec River channel: a case study. *Geografický Časopis*, **56**, 111-124.
- Zawiejska J., Wyźga B., 2010: Twentieth-century channel change on the Dunajec River, southern Poland: patterns, causes and controls. *Geomorphology*, **117**, 234-246.

Twentieth-century degradation of multi-thread rivers in the Polish Carpathians

Summary

The case studies of the rivers Soła, San and Dunajec are used to demonstrate changes in planform geometry of the rivers draining the western and eastern part of the Polish flysch Carpathians and those originating in the high-mountain Tatra massif, respectively, between the second half of the 19th century and the present. Differences in the cartographic presentation of rivers on Austrian military maps and Polish topographic maps limit the comparison to the number and width of the low-flow channels of the studied rivers. In the second half of the 19th century, the rivers flowed in wide channels. The Soła supported a braided channel along its entire course, the Dunajec was mostly braided, with a single-thread channel within gorge sections, whereas in the San the braided pattern was limited to the river reaches within intramontane and submontane depressions. Over the 20th century, the braided channel pattern was nearly completely eliminated and substituted by single-thread channels; multi-thread channel sections remained only in the upper course of the Dunajec River. Average low-flow channel width significantly decreased, even by 66%, and this was accompanied by a reduction in the variability of low-flow channel width along the rivers. The change in planform channel geometry was accompanied by river incision, which started earlier and has resulted in greater bed degradation in the downstream, foothill reaches than in the mountain reaches. Twentieth-century river changes also encompassed a radical change in the facies pattern of channel deposits, accompanied by an increase in their mean grain size and sorting as well as the development of bed armour. Moreover, transformation from alluvial to bedrock boundary conditions took place in many reaches of Carpathian streams and rivers. The degradation of physical structure of Carpathian watercourses has resulted in a marked deterioration of habitat conditions for riverine biota.