POLSKA
AKADEMIA
NAUK

PL ISSN 0012-5032

INSTYTUT GEOGRAFII
I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

DOKUMENTACJA GEOGRAFICZNA

BARTŁOMIEJ WYŻGA

FUNKCJONOWANIE SYSTEMU RZECZNEGO ŚRODKOWEJ I DOLNEJ RABY W OSTATNICH 200 LATACH

ROK 1993 ZESZYT 6

WARSZAWA

WYKAZ ZESZYTÓW INSTYTUTU GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA PAN

1 T. KOZŁOWSKA-SZCZĘSNA - Antropoklimat Polski, Warszawa 1991, 64 s., zł 10 000,-

2 G. WĘCŁAWOWICZ - Zróżnicowania społeczno-przestrzenne w aglomeracji warszawskiej (1978 i 1988), Warszawa 1991, 47 s., zł 10 000,-

3 P. EBERHARDT - Rozmieszczenie i dynamika ludności wiejskiej w Europie środkowo-wschodniej w XX wieku, Warszawa 1991, 52 s., zł 10 000,-

4 L. STARKEL, B. OBRĘBSKA-STARKLOWA - Efekt cieplarniany a globalne zmiany środowiska przyrodniczego, Warszawa 1991, 71 s., zł 30 000,-

5 K. BŁAŻEJCZYK, B. KRAWCZYK, J. SKOCZEK - Badania topoklimatyczne i mikroklimatyczne w różnych strefach klimatycznych, Warszawa 1992, 54 s., zł 10 000,-

6 T. KOZŁOWSKA-SZCZĘSNA - Uwagi o metodach badań klimatu miast.
K. BŁAŻEJCZYK - Wpływ urbanizacji na lokalne warunki bioklimatyczne,
J. PIWOWARCZYK - Wpływ rzeźby terenu na bezpośrednie promieniowanie słoneczne w Zakopanem, Warszawa 1992, 47 s., zł 20 000,-

7 R. SZCZĘSNY - Produktywność ziemi w rolnictwie indywidualnym w Polsce. Przestrzenne zróżnicowanie i przemiany w latach 1938-1988,
W. STOLA, R. SZCZĘSNY - Funkcje podstawowe gmin a typy rolnictwa indywidualnego, Warszawa 1992, 47 s., zł 20 000,-

8 K. BŁAŻEJCZYK - Bioklimatyczna analiza warunków pogodowych w Polsce, Warszawa 1992, 33 s., zł 20 000,-

9 B. GŁĘBOCKI - Organizacja przestrzenna rolnictwa indywidualnego w gminie Wolsztyn;
W. TYSZKIEWICZ, K. ZELENSKÝ - Typy rolnictwa uspołecznionego Słowacji, Warszawa 1992, 64 s., zł 20 000,-

10 A. WERWICKI - Zatrudnienie w usługach wybranych krajów środkowoeuropejskich pod koniec nakazowo-rozdzielczego systemu gospodarczego; Rozwój usług rynkowych w wybranych krajach środkowoeuropejskich w ostatniej dekadzie istnienia nakazowo-rozdzielczego systemu gospodarczego, Warszawa 1992, 82 s., zł 20 000,-

11 S. MISZTAL - Przemiany strukturalne w przemyśle aglomeracji warszawskiej, Warszawa 1992, 58 s., zł 30 000,-

12 Z. BABIŃSKI - Stopień wodny Ciechocinek i jego zbiornik Nieszawa - prognoza zmian środowiska geograficznego;
P. GIERSZEWSKI - Denudacja chemiczna w zlewni Rudy, Warszawa 1993, 45 s., zł 30 000,-

13 A. GAWRYSZEWSKI - Struktura przestrzenna zatrudnienia i bezrobocia w Polsce, 1990-1992, Warszawa 1993, 65 s., zł 30 000,-

14 M. SOBCZYŃSKI - Trwałość dawnych granic państwowych w krajobrazie kulturowym Polski, Warszawa 1993, 100 s., zł 30 000,-

15 P. KORCELLI i inni - Program rozwoju Warszawy. Synteza, Warszawa 1993, 44 s., zł 30 000,-

16 T. GERLACH i inni - Nowe dane o pokrywie karpackiej odmiany lessów w Humniskach koło Brzozowa (1992), Warszawa 1993, 43 s., zł 30 000,-

17 R. SZCZĘSNY - Poziom produkcji towarowej rolnictwa indywidualnego w Polsce. Przestrzenne zróżnicowanie i przemiany w latach 1960-1988, Warszawa 1993, 55 s., zł 30 000,-

18 T. KOZŁOWSKA-SZCZĘSNA, D. LIMANÓWKA, T. NIEDŹWIEDŹ, Z. USTRNUL, S. PACZOS - Charakterystyka termiczna Polski, Warszawa 1993, 73 s., zł 30 000,-

19 R. SZCZĘSNY - Zróżnicowanie produkcji rolnictwa polskiego w aspekcie gospodarki żywnościowej w 1990r., 67 s., zł 30 000,-

20 A. WOŚ - Regiony klimatyczne Polski w świetle częstotliwości występowania różnych typów pogody, 94s., zł 30 000,-

http://rcin.org.pl

FUNKCJONOWANIE SYSTEMU RZECZNEGO ŚRODKOWEJ I DOLNEJ RABY W OSTATNICH 200 LATACH

http://rcin.org.pl

POLISH ACADEMY OF SCIENCES
INSTITUTE OF GEOGRAPHY AND SPATIAL ORGANIZATION

BARTŁOMIEJ WYŻGA

EVOLUTION OF THE FLUVIAL SYSTEM OF THE MIDDLE AND LOWER RABA RIVER (CARPATHIANS, POLAND) IN THE LAST 200 YEARS

YEAR 1993 FASC. 6

WARSZAWA

http://rcin.org.pl

POLSKA
AKADEMIA
NAUK

INSTYTUT GEOGRAFII
I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

DOKUMENTACJA GEOGRAFICZNA

BARTŁOMIEJ WYŻGA

FUNKCJONOWANIE SYSTEMU RZECZNEGO ŚRODKOWEJ I DOLNEJ RABY W OSTATNICH 200 LATACH

ROK 1993 ZESZYT 6

WARSZAWA

http://rcin.org.pl

KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor Naczelny: Jerzy Grzeszczak
Członkowie: Tadeusz Gerlach, Marek Grześ,
Alina Potrykowska, Józef Skoczek, Władysława Stola
Sekretarz: Maria Mozolewska-Adamczyk

Opiniował do druku: prof. dr hab. Kazimierz Klimek

Adres Komitetu:

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
Polskiej Akademii Nauk
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa

Opracowanie redakcyjne:

Maria Mozolewska-Adamczyk

http://rcin.org.pl

SPIS TREŚCI

Przedmowa - *Kazimierz Klimek* 7
Wstęp 9
Zarys problemu 9
Cel pracy 10
Metody badań 11
Teren badań 12
Charakterystyka hydrologiczna Raby 14
Ewolucja rzeki w XIX w. 16
Zmiany geometrii koryta 16
Zmiany charakteru sedymentacji 17
Interpretacja przyczyn transformacji systemu rzecznego Raby w XIX w. 19
Regulacja koryta Raby i zmiany geometrii planarnej rzeki w XX w. 20
Pogłębianie koryta Raby w XX w. 22
Przebieg pogłębiania koryta 22
Przyczyny pogłębiania koryta 23
Analiza czasowej i przestrzennej zmienności tempa pogłębiania koryta Raby 26
Skutki pogłębiania koryta Raby 27
Zmiany charakteru sedymentacji korytowej Raby w XX w. 30
Zmiany przepływów powodziowych Raby w XX w. 33
Analiza maksymalnych rocznych przepływów 33
Analiza średnich dekadowych linii regresji 34
Analiza hydrogramów fal powodziowych 37
Zmiany wielkości i transformacji fal powodziowych Raby jako efekt ewolucji systemu rzecznego 38
Ewolucja systemu rzecznego środkowej i dolnej Raby w ostatnich 200 latach 39
Zmiany funkcjonowania systemów rzecznych innych karpackich dopływów Wisły w XX w. . 41
Pogłębianie się karpackich dopływów Wisły w ostatnich kilkudziesięciu latach 42
Zmiany zależności pomiędzy maksymalnymi przepływami notowanymi wzdłuż biegu innych karpackich dopływów Wisły 43
Przyczyny zwiększania się koncentracji fal powodziowych w rzece uregulowanej . . . 44
Transformacja fal powodziowych w różnych typach systemów rzecznych 45
Reakcja rzeki górskiej na regulację koryta 47
Uwagi końcowe 49
Odrębność systemu rzeki uregulowanej 49
Regulacja koryt jako istotna przyczyna współczesnego wzrostu zagrożenia powodziowego w dorzeczu górnej Wisły 49
Kontynuacja pogłębiania koryt rzek karpackich - prognoza i wskazania praktyczne . . 50
Zyski i straty obecnego systemu regulacji karpackich dopływów Wisły 51
Regulacja przepływów przez zbiorniki zaporowe - wątpliwości 52
Prognoza wpływu zmian środowiskowych na reżim rzeki jako konieczny warunek planowania systemu regulacji koryta 52
Literatura 53
Evolution of the fluvial system of the Middle and Lower Raba River (Carpathians, Poland) in the last 200 years (summary) 57
Ryciny 1-22 59
Fotografie 1-13 81

http://rcin.org.pl

http://rcin.org.pl

PRZEDMOWA

Geosystemy dolinne są obszarem silnej antropopresji. Od czasów prehistorycznych były one źródłem zaopatrzenia w wodę i miejscem połowu ryb, a większe służyły jako drogi wodne. Prymitywna gospodarka człowieka pierwotnego w dorzeczu zmieniała skład naturalnej szaty roślinnej. Późniejsza kolonizacja rolnicza obszarów leśnych oraz budowa młynówek, jazów i lokalnych obwałowań doprowadziły do szybkich zmian w funkcjonowaniu systemów rzecznych, przeważnie jednak niedostrzegalnych w życiu jednego pokolenia. Dopiero budowa dużych zapór i regulacja koryt lub ich kanalizacja zwielokrotniły tempo zachodzących przemian.

Rozprawa Bartłomieja Wyżgi podejmuje problematykę zmian funkcjonowania systemu rzecznego Raby zaistniałych w okresie ostatnich dwu stuleci. Autor sięgnął do źródeł kartograficznych i hydrologicznych, jak również mało docenianych źródeł informacji zapisanych w strukturach sedymentacyjnych osadów aluwialnych zdeponowanych w tym okresie. Analiza płynących stąd informacji umożliwiła mu dosyć szczegółową charakterystykę zmian systemu rzecznego Raby w ostatnich stuleciach.

Wnioski płynące z tej rozprawy wskazują na wątpliwe sukcesy inżynierskich prac regulacyjnych przeprowadzanych w górnych biegach rzek karpackich.

Kazimierz Klimek

http://rcin.org.pl

http://rcin.org.pl

WSTĘP

ZARYS PROBLEMU

Cieki są naturalnymi układami dynamicznymi, którymi następuje przemieszczanie się w obrębie zlewni zarówno wód, jak i materiału skalnego. Przemieszczając się w obrębie geosystemów rzecznych oba te czynniki wzajemnie na siebie oddziałują, zaś efekty tych oddziaływań pozostają zapisane w postaci rzeźby koryt rzecznych i den dolin oraz deponowanych przez rzeki osadów. Wnioski o warunkach odpływu wód oraz dostawy, transportu i depozycji osadu w przeszłości, formułowane w wyniku analizy paleokoryt i aluwiów, mają ogromne znaczenie w prognozowaniu funkcjonowania rzek w warunkach narastającej presji człowieka na środowisko naturalne.

Zmiany geometrii rzeki są wynikiem zmian jej reżimu (Schumm 1969). Mogą one być wzbudzone przez modyfikację wielkości odpływu, fal powodziowych, dostawy osadu oraz stosunku obciążenia zawiesinowego do obciążenia dennego rzeki (Schumm 1968). Te zmiany reżimu rzeki mogą wynikać ze zmian klimatycznych (Hjulström 1949) lub z ingerencji człowieka w przebieg procesów fluwialnych (Gregory 1987).

W najmłodszym okresie historycznym zaznaczyły się poważne zmiany w ewolucji koryt i równin aluwialnych głównych karpackich dopływów Wisły (Klimek, Starkel 1974). Początkowo, aż do drugiej połowy XX w., miała miejsce szybka nadbudowa równin aluwialnych, natomiast w obecnym stuleciu obserwuje się pogłębianie koryt i tworzenie coraz niższych stopni terasowych.

Pionowa stabilność koryta rzecznego lub jej brak jest wypadkową zdolności transportowej rzeki i jej obciążenia materiałem klastycznym. Równoważenie się w dłuższym okresie obciążenia rzeki i jej zdolności transportowej umożliwia utrzymywanie się dna rzeki mniej więcej w tym samym poziomie. Kiedy obciążenie jest większe od zdolności transportowej rzeki, wówczas część ładunku jest akumulowana w korycie, którego dno ulega podwyższaniu. Przy przewadze zdolności transportowej rzeki nad jej obciążeniem materiał denny ulega erozji, co prowadzi do obniżania dna i pogłębiania koryta.

Intensywność pogłębiania koryt karpackich dopływów Wisły w ostatnich kilkudziesięciu latach wielokrotnie przewyższa tempo obniżania den dolin karpackich w holocenie (Klimek 1983), co wskazuje, że proces ten wywołany jest głównie działalnością człowieka zmieniającą reżim hydrologiczny rzek (Klimek 1983; Wyżga 1989, 1991a). Od początku bieżącego stulecia w dolnym i środkowym biegu karpackich dopływów Wisły prowadzone są prace regulacyjne (Kędzior 1928) zmierzające do zmniejszenia zagrożenia powodziowego

http://rcin.org.pl

i stabilizacji rzek w obrębie den dolin. Efektem prac regulacyjnych, prowadzonych szczególnie intensywnie w ostatnich trzech dekadach, było wyprostowanie i znaczne skrócenie rzek oraz zwężenie ich koryt (Klimek 1987; Wyżga 1989, 1991a).

Regulacja koryt rzecznych bezpośrednio modyfikuje procesy fluwialne zachodzące w obrębie i poniżej uregulowanych odcinków. Wzbudza ona zmiany w morfologii koryta i równi zalewowej oraz w przebiegu odpływu (Gregory 1987; Simon 1989). Ponieważ jednak takie cechy geometrii hydraulicznej rzeki, jak szerokość i krętość koryta są stabilizowane przez budowle regulacyjne, procesy dostosowania się rzek do zmienionego reżimu nie stosują się do reguł sformułowanych przez S.A. Schumma (1968, 1969) dla rzek o swobodnym biegu.

Badania D.A. Burkhama (1976b) dowiodły, że system koryta i równi zalewowej, uformowany przez dominujące w bezpośredniej przeszłości przepływy powodziowe, wywiera wpływ na przemieszczające się nim fale powodziowe. Ukształtowany przez niskie przepływy powodziowe i dostosowany do ich przenoszenia system niskich przepływów cechujący się krętym, wąskim i głębokim korytem o małym spadku, łagodzi przemieszczające się nim fale powodziowe. Natomiast system wysokich przepływów, ze stosunkowo prostym, szerokim i płytkim korytem o dużym spadku, nie zmienia kształtu fal powodziowych, umożliwiając zachowanie ich szczytowych przepływów. Dotychczas niewiele jednak wiadomo, jaki wpływ na fale powodziowe wywiera „nienaturalny" system rzeczny uformowany w wyniku regulacji, który cechuje się obecnością prostego i głębokiego koryta o dużym spadku.

CEL PRACY

W toku pracy dążono do rozwiązania kilku szczegółowych zagadnień, których problematyka stała się przedmiotem krótkich publikacji autora. Prowadzone badania zmierzały do:

- określenia zmian geometrii koryta Raby i towarzyszących im zmian układu facji osadów korytowych, jakie dokonały się w ciągu ostatnich 200 lat. Tę charakterystykę morfologicznej i sedymentologicznej transformacji systemu rzecznego wykorzystano następnie jako podstawę wnioskowania o zmianach reżimu rzeki w najmłodszym okresie historycznym (Wyżga 1991b, 1992b, 1993a);
- określenia przyczyn, przebiegu oraz skutków gwałtownego wcinania się rzeki w obecnym stuleciu (Wyżga 1989, 1991a, 1992a);
- przedstawienia i wyjaśnienia wpływu regulacji koryta Raby na zmiany wielkości fal powodziowych i charakteru ich transformacji (Wyżga 1993c, w druku a, b);
- charakterystyki zmian wzbudzonych przez regulację koryta, wskazania procesów wspomagających oraz przeciwdziałających przywracaniu stanu równowagi i sformułowania modelu reakcji rzeki górskiej na regulację jej koryta (Wyżga 1992c, 1993b).

Poprzez wyjaśnienie tych zagadnień zmierzano do charakterystyki funkcjonowania systemu rzecznego środkowej i dolnej Raby w ostatnich 200 latach i do określenia wpływu człowieka na zmiany jego funkcjonowania. Podobny

http://rcin.org.pl

przebieg zmian rejestrowanych w dolinie Raby oraz w dolinach innych karpackich dopływów Wisły umożliwił uogólnioną ocenę roli człowieka w modyfikowaniu procesów fluwialnych kształtujących w bezpośredniej przeszłości systemy rzeczne karpackich dopływów Wisły. Na podstawie tej oceny wskazano działania mogące złagodzić w przyszłości negatywne efekty dotychczasowej ingerencji człowieka w przebieg procesów fluwialnych w karpackiej części dorzecza Wisły.

Datą zamykającą analizowany okres funkcjonowania systemu rzecznego Raby jest 1987r., kiedy to nastąpiło napełnienie zbiornika zaporowego w Dobczycach (Strzemiecki 1988). Przegrodzenie rzeki głębokim zbiornikiem zaporowym o stosunkowo dużej pojemności przeciwpowodziowej znacząco zmieniło dotychczasowe warunki odpływu wody i transportu osadu w niższym odcinku rzeki.

METODY BADAŃ

Przedstawiana praca jest opracowaniem z dziedziny nauki o środowisku. Funkcjonowanie systemu rzecznego jest wynikiem współistnienia i interakcji procesów hydrologicznych, geomorficznych i sedymentologicznych, a w okresie historycznym również pośredniej i bezpośredniej ingerencji człowieka w przebieg procesów fluwialnych. W toku pracy, dążąc do możliwie pełnego odtworzenia funkcjonowania systemu rzecznego Raby w bezpośredniej przeszłości, wykorzystano zatem szeroki wachlarz metod badawczych zmierzających do rekonstrukcji zmian geometrii koryta rzecznego i dna doliny, warunków formowania się aluwiów oraz charakteru przepływów powodziowych.

Badaniami objęto okres ostatnich 200 lat, dla którego istnieje dokumentacja kartograficzna umożliwiająca określenie wieku form i osadów. Rekonstrukcji zmian układu koryta oraz szerokości i krętości rzeki dokonano poprzez porównanie map z lat: 1790, 1855, 1878, 1901, 1932, 1952 i 1974. Mapy te przed podjęciem analizy doprowadzono do jednolitej skali 1:50 000. Dla okresu najmłodszego wykorzystano ponadto ciągi zdjęć lotniczych w skali 1:10 000 wykonane w latach: 1955, 1974 i 1987.

Określenia zmian pionowego położenia koryta Raby (oraz innych karpackich dopływów Wisły) w posterunkach wodowskazowych w XX w. dokonano na podstawie analizy przebiegu minimalnych rocznych stanów wody w ciągu wieloletnim. Te informacje uzupełniono danymi o zmianach w XX w. głębokości i kształtu koryta w przekroju poprzecznym, uzyskanymi z wielokrotnie powtarzanych przez służby hydrologiczne niwelacji przekrojów wodowskazowych. Ponadto do określenia zmian pionowego położenia koryta Raby wzdłuż biegu rzeki wykorzystano pomiary niwelacyjne zwierciadła wody wykonane w 1976r. przez „Hydroprojekt" i powtórzone po 11 latach przez autora niniejszej pracy. Obu tych pomiarów dokonano w okresie stanów niżówkowych. Informacje o pionowym położeniu den starszych koryt oraz o kształcie ich przekrojów poprzecznych uzyskano wykonując świdrem glebowym wiercenia w datowanych kartograficznie obszarach równiny aluwialnej Raby.

http://rcin.org.pl

Wykształcenie osadów o znanym wieku badano w podcięciach brzegów rzeki i w ścianach licznych żwirowni. Do szczegółowej analizy teksturalnej osadów korytowych wybrano odcinek doliny Raby w jej środkowym biegu (pomiędzy Winiarami a Fałkowicami - ryc. 2B) o długości 5 km. Pobór prób ograniczono do krótkiego odcinka doliny, by uniknąć zniekształcającego wpływu zmian osadów wzdłuż biegu rzeki na analizowane zmiany charakteru sedymentacji w czasie. Przeciętny spadek rzeki na tym odcinku wynosi 0,00235. Próby osadów pobierano z górnych części łach żwirowych (współczesnych lub kopalnych) - uznano bowiem, że osady formowane w tej części obwodu zwilżonego stałej rzeki żwirodennej są najbardziej czułym wskaźnikiem zmian warunków odpływu wody i przepływu materiału klastycznego w korycie. Próby pobierano tak, by reprezentowały one stwierdzoną zmienność typów litologicznych (litofacji), natomiast częstość występowania typów litologicznych w osadach danego wieku określano szacunkowo w trakcie obserwacji dużych połaci podcięć brzegów rzeki, ścian żwirowni czy wkopów na łachach współczesnych. We współczesnym korycie próby pobierano spod bruku korytowego, tak aby z analizy cech teksturalnych osadów uzyskać informacje o warunkach depozycyjnych istniejących w trakcie przechodzenia grzbietu fal powodziowych (w warunkach ruchomego dna). Próby rozsiano na sitach o rozstawie co 1/3 ϕ, a następnie obliczono parametry ich rozkładów uziarnienia według wzorów podanych przez R.L. Folka i W.C. Warda (1957). Objętość pobieranych prób - około 10 dcm^3 - była wystarczająca do wiarygodnego ustalenia wartości 5 percentyla (zob. Church, McLean, Wolcott 1987), umożliwiając tym samym prawidłowe ustalenie parametrów rozkładu uziarnienia osadów.

Źródłem informacji o wpływie zaistniałych w ciągu XX w. zmian koryta Raby na przenoszone przez rzekę fale powodziowe była analiza zmian w relacjach stan wody/przepływ w przekrojach wodowskazowych Gdów i Proszówki oraz w zależnościach pomiędzy kulminacyjnymi przepływami rejestrowanymi w tych posterunkach. Analizie poddano także hydrogramy wybranych powodzi z ostatnich 50 lat dla posterunków Gdów i Proszówki.

TEREN BADAŃ

Cechy środowiska geograficznego zlewni określają warunki formowania się odpływu wody i dostawy materiału klastycznego do systemu rzecznego, dlatego też wskazanie terenu bezpośrednich badań poprzedzono krótką charakterystyką dorzecza. Raba odwadnia północny skłon Zachodnich Karpat w ich środkowej części (ryc. 1). Jej zlewnia obejmuje 3 jednostki fizycznogeograficzne: Beskidy, Pogórze Karpackie oraz Kotlinę Sandomierską (Kondracki 1978). Spadki rzeki i wynikający z ich zróżnicowania podział biegu rzeki na część górną, środkową i dolną nawiązują do tych jednostek (Punzet 1969). Skrajne wysokości w dorzeczu to 1310 m i 180 m n.p.m. Powyżej 500 m n.p.m. leży 36%, powyżej 300 m - 73%, a powyżej 200 m - 98% powierzchni dorzecza. Dorzecze cechuje się przewagą (64%) swej prawobrzeżnej części i dominującą ekspozycją stoków ku NW.

http://rcin.org.pl

Około 86% powierzchni dorzecza znajduje się w obszarze karpackim (Beskidy i Pogórze Karpackie) i podścielone jest fliszowymi seriami łupkowo-piaskowcowymi wieku kredowo-oligoceńskiego (Sokołowski i in. 1973). Podłoże zlewni na obszarze Kotliny Sandomierskiej tworzą mioceńskie osady zapadliska przedkarpackiego, wyścielone w dnie doliny luźnymi osadami czwartorzędowymi o miąższości od kilku do kilkudziesięciu metrów. Dolne części stoków w części pogórskiej i przedgórskiej (na obszarze sfałdowanego miocenu) zlewni są okryte lessami lub glinami lessopodobnymi.

Na Pogórzu stoki okryte są glebami pyłowymi, natomiast w górskiej części zlewni dominują gliniaste gleby szkieletowe. Jednak i one zawierają znaczną ilość cząstek pyłowych (Pasternak 1969). W pogórskiej części dorzecza około 70-80% powierzchni stoków jest użytkowane rolniczo, w części beskidzkiej udział ten spada do około 40-50%. Na obszarach o łupkowym podłożu pola orne sięgają do wysokości około 900 m n.p.m., pokrywając stoki o nachyleniu do 30°. Cechy granulometryczne gleb oraz znaczny udział wylesionych stoków warunkują dużą podatność gleb w dorzeczu na erozję (Pasternak 1969).

Wyższe partie dorzecza (pow. 750 m n.p.m.) znajdują się w umiarkowanie chłodnym piętrze klimatycznym, pozostała część dorzecza natomiast w piętrze umiarkowanie ciepłym (Hess 1965). Średnia roczna suma opadów zmienia się od około 1200 mm w górskiej części zlewni do 600 mm w części nizinnej. Największe natężenie i najwyższe dobowe sumy opadów występują w miesiącach letnich i związane są z deszczami rozlewnymi połączonymi z frontalnymi ulewami.

Badaniami objęto odcinek Raby od zapory w Dobczycach do ujścia rzeki (ryc. 1). Obejmuje on niższą część środkowego biegu (do ujścia prawobocznego dopływu Stradomki) i dolny bieg rzeki. Spadek rzeki na tym odcinku zmienia się od około 0,0027 w Dobczycach, poprzez wartości 0,0012 w Gdowie i 0,00068 w Proszówkach do około 0,00075 przy ujściu.

W dnie doliny można tu wyróżnić dwie terasy. Wysokość wyższej terasy ponad średni stan wody w rzece zmienia się od 4-5 m w górze odcinka do około 8 m w okolicach Bochni i 5-7 m przy ujściu. Niższa terasa ma podobny przebieg, sięgając ponad średni stan wody od 2-2,5 m w górze odcinka, do około 6 m w jego części środkowej i 4-5 m w części dolnej. Poziom wyższy formował się od późnego glacjału (Alexandrowicz, Wyżga 1992). Został on rozcięty w ciągu okresu subatlantyckiego (Alexandrowicz, Wyżga *op.cit.*), a rolę równi zalewowej przejął poziom niższy, pełniąc ją aż do obecnego stulecia. W wyniku zmian poziomego zasięgu koryta (migracji koryta oraz zmniejszania się jego szerokości), towarzyszących współczesnemu wcinaniu się rzeki, w jego sąsiedztwie uformowała się nowa równia zalewowa o szerokości od kilku do kilkudziesięciu metrów.

Szczegółowa charakterystyka współczesnej geometrii koryta Raby oraz jej aluwiów zostanie przedstawiona w dalszej części pracy.

http://rcin.org.pl

CHARAKTERYSTYKA HYDROLOGICZNA RABY

Raba cechuje się dużą zmiennością stanów i przepływów wody (Punzet 1969; Ziemońska 1973). Amplituda stanów wody zanotowana w dolnym biegu rzeki (Proszówki) - 10 m - jest największą spośród obserwowanych na karpackich dopływach Wisły. Taki reżim hydrologiczny wynika z małej retencyjności fliszowego podłoża, dużych różnic wysokości w dorzeczu i dominującej NW ekspozycji stoków, sprzyjającej przechwytywaniu znacznych opadów z napływających z tego kierunku oceanicznych mas powietrza. Te cechy reżimu rzeki znalazły odzwierciedlenie w jej nazwie - badania etymologiczne sugerują bowiem, że nazwa *Raba*, prawdopodobnie pochodzenia celtyckiego, oznacza *wściekła, zła* (Rzebik 1985). Wylesienie i rolnicze użytkowanie znacznej części powierzchni zlewni spotęgowało naturalne warunki środowiskowe dorzecza, sprzyjające znacznemu udziałowi spływu powierzchniowego i szybkiemu odpływie wód.

Tabela 1

Charakterystyka hydrologiczna Raby w przekrojach wodowskazowych Gdów i Proszówki

Przekrój wodowskazowy	Gdów	Proszówki
Powierzchnia zlewni [km^2]	929	1470
Najniższy pomierzony przepływ (G-1971r., P-1932r.)[m^3/s]	0,65	1,46
Średni minimalny przepływ (lata 1951-1980)[m^3/s]	2,29	3,07
Średni roczny przepływ (lata 1951-1980)[m^3/s]	12,14	17,58
Najwyższy pomierzony przepływ (G-1958r., P-1934r.)[m^3/s]	1300	1470
Średni maksymalny przepływ (lata 1951-1980)[m^3/s]	318	482
Współczynnik nieregularności przepływów (Qmax/Qmin)	2000	1007
Iloraz Qmax/$\overline{Q}$	107,1	83,6

Tabela 2

Trendy zmian maksymalnego i średniego rocznego przepływu Raby oraz czasu trwania przepływów wyższych niż średnie w przekrojach wodowskazowych Gdów i Proszówki w latach 1951-1980

Przekrój wodowskazowy	Gdów			Proszówki		
Okres	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1951-1960	1961-1970	1971-1980
Średni maksymalny przepływ [m^3/s]	424	322	208	538	489	420
Średni roczny przepływ [m^3/s]	10,2	12,9	13,3	15,6	18,6	18,6
Czas trwania przepływów wyższych niż średnie [doby]	86	107	101	77	97	93

http://rcin.org.pl

Powodzie na Rabie występują w miesiącach letnich, natomiast drugorzędne wezbrania w okresie tajania śniegu w marcu lub kwietniu. W półroczu letnim występuje około 70% rocznych maksimów przepływu (Punzet 1969).

W badanym odcinku Raby zlokalizowane były 4 posterunki wodowskazowe (Proszówki od 1887r., Książnice - 1887-1960, Gdów od 1897r., Dobczyce od 1970r.; patrz: ryc. 1). Prowadzone w nich obserwacje umożliwiają scharakteryzowanie zmienności stanów wody w ciągu ostatnich 90-100 lat, maksymalnych rocznych przepływów od 1921r. i codziennych przepływów od 1951r. W tabelach 1 i 2 podano krótką charakterystykę zmienności przepływów Raby w posterunkach Gdów i Proszówki. Na podstawie tych danych można sformułować następujące wnioski o reżimie hydrologicznym Raby i jego zmianach zaznaczających się w ostatnich dziesięcioleciach:

- zmienność przepływów Raby jest bardzo duża; maleje ona z biegiem rzeki;
- w latach 1951-1980 zaznaczyło się zwiększenie średniego rocznego przepływu; jego przeciętna wielkość w dwóch ostatnich dekadach była wyższa, w porównaniu z dziesięcioleciem 1951-1960, o około 28% w Gdowie i o około 20% w Proszówkach;
- przeciętna wielkość maksymalnego rocznego przepływu malała w latach 1951-1980, jednakże maksymalne przepływy zmniejszyły się znacznie bardziej w Gdowie - o połowę - niż w Proszówkach - o 22%;
- zwiększaniu się średniego rocznego przepływu i zmniejszaniu przepływów maksymalnych towarzyszyło wydłużanie się czasu trwania przepływów większych niż średnie. W badanym okresie nie nastąpiła znacząca zmiana częstotliwości wezbrań, można więc stwierdzić, iż wysokie i strome fale powodziowe z początku okresu zostały później zastąpione falami bardziej rozciągniętymi w czasie, o obniżonych przepływach maksymalnych.

Rozcięcie starszego poziomu równiny aluwialnej, obecność licznych żwirowni oraz zachowanie się starszych fragmentów równiny aluwialnej w sąsiedztwie koryta rzecznego, dzięki stabilizacji jego położenia budowlami regulacyjnymi, czynią dno doliny Raby w jej środkowym i dolnym biegu wdzięcznym obiektem badawczym. Jednocześnie wysoka aktywność hydrologiczna rzeki warunkuje szybkie tempo przebiegających tu procesów fluwialnych.

* * *

Praca została wykonana w Zakładzie Ochrony Przyrody i Zasobów Naturalnych PAN w Krakowie w latach 1986-1992 pod kierunkiem prof. dr. hab. Kazimierza Klimka, któremu pragnę podziękować za życzliwą opiekę i liczne wskazówki podczas badań oraz za krytyczną analizę tekstu pracy. Składam podziękowania prof. dr. hab. L. Starklowi, prof. dr. hab. A. Kotarbie, prof. dr. hab. J. Punzetowi, prof. dr. hab. W. Zuchiewiczowi, dr. A. Imesonowi, dr. M. Macklinowi i dr. A. Łajczakowi za udzielone mi w trakcie badań rady i wskazówki, a recenzentom pracy prof. dr. hab. K. Rotnickiemu i doc. dr. hab. W. Froehlichowi dziękuję za krytyczne uwagi.

Pomocą w pracach terenowych służyli mi: mgr J. Grocholska, mgr D. Ciszewski i dr A. Łajczak.

Dyrekcji „Hydroprojektu" oraz dyrekcji Oddziału IMGW w Krakowie dziękuję za nieodpłatne udostępnienie danych pomiarowych.

http://rcin.org.pl

EWOLUCJA RZEKI W XIX W.

ZMIANY GEOMETRII KORYTA

Pod koniec XVIII w. Raba w swym górskim odcinku, aż po Dobczyce, miała charakter rzeki roztokowej, o szerokości koryta sięgającej do 250 m. W odcinku Dobczyce-Gdów rzeka płynęła stosunkowo prostym (wskaźnik krętości SI = 1,14), jednonurtowym lub anastomozującym korytem (ryc. 2B). Miało ono trójkątny przekrój poprzeczny (ryc. 3); jego pełnokorytowa szerokość wynosiła około 50 m, zaś stosunek szerokości do głębokości około 12 (ryc. 4). Poniżej Gdowa rzeka meandrowała (SI = 1,63), jednakże w najwyższej części tego odcinka zaznaczała się tendencja do prostowania koryta na drodze odcinania zakoli (ryc. 2B).

Ewolucję Raby w XIX w. charakteryzował wzrost szerokości i zmniejszanie głębokości koryta przy postępującej w jego obrębie agradacji (ryc. 3). Trend ten osiągnął swą kulminację w drugiej połowie XIX w. Szerokość ówczesnego koryta, w porównaniu z sytuacją z 1790r., zwiększyła się mniej więcej dwu-trzykrotnie (do 80-200 m) w środkowym i 1,5-2 razy (do 80-170 m) w dolnym biegu rzeki (ryc. 2B). Agradacja w korycie w środkowym biegu Raby dokonała się na drodze zasypania najgłębszych partii dna o około 1,5-2 m oraz wzrostu wysokości łach żwirowych o około 0,5-1 m (ryc. 3, 4). To zmniejszenie pełnokorytowej głębokości rzeki oraz znaczny wzrost jej szerokości złożyły się na kilkakrotny wzrost stosunku szerokości do głębokości koryta.

Tabela 3

Zmiany długości koryta Raby poniżej Dobczyc w ciągu ostatnich 200 lat

Odcinek rzeki:		D - G	G - K	K - P	P - UR	K - UR	G - UR
Długość odcinka w roku (km):	1790	11,25	15,20	18,55	30,55	49,10	64,30
	1878	11,00	12,15	20,30	25,45	45,75	57,90
	1932	10,60	12,05	16,60	22,15	38,75	50,80
	1952	12,10	12,05	16,70	21,90	38,60	50,65
	1974	11,00	11,55	15,20	21,75	36,95	48,50
Względna zmiana długości w okresie (%):	1790-1878	-2,2	-20,1	+7,8	-16,7	-6,8	-10,0
	1878-1932	-3,6	-0,8	-18,2	-9,1	-15,3	-12,3
	1932-1952	+14,1	0,0	+0,6	-1,1	-0,4	-0,3
	1952-1974	-9,1	-4,1	-9,0	-0,7	-4,3	-4,2
	1878-1974	0,0	-4,9	-25,1	-14,5	-19,2	-16,2
	1790-1974	-2,2	-24,0	-18,1	-28,8	-24,7	-24,6

Lokalizacja odcinków na rycinie 1: D - Dobczyce; G - Gdów; K - Książnice; P - Proszówki; UR - ujście rzeki.

http://rcin.org.pl

Radykalnej zmianie kształtu koryta w przekroju poprzecznym towarzyszyły zmiany układu koryta i krętości rzeki (ryc. 2B). W odcinku Gdów-Książnice w latach 1790-1878 nastąpiło skrócenie rzeki o 20% (tab. 3). Raba w środkowym biegu płynęła teraz prostym lub roztokowym korytem; jedynie w strefie ujścia dużego prawobocznego dopływu - Stradomki - i bezpośrednio powyżej niego wykształciły się dwa odcinki anastomozujące. W dolnym biegu, poniżej Książnic, skrócenie rzeki na drodze odcinania zakoli wyniosło jedynie kilka procent (tab. 3). Jednakże w górnej części tego odcinka doszło do utworzenia się licznych łach śródkorytowych i powstania tu złożonych układów meandrująco-roztokowych.

ZMIANY CHARAKTERU SEDYMENTACJI

Odsłonięcia aluwiów, które można zidentyfikować jako osiemnastowieczne są nieliczne. Profil takich osadów odsłania się w podcięciu brzegu rzeki w Łężkowicach, w początkowej części dolnego biegu rzeki (1 km pon. Książnic). Profil ten tworzą (ryc. 5):

1) drobnoziarniste żwiry, masywne lub niewyraźnie warstwowane poziomo, o widocznej miąższości 2 m - interpretowane jako osady platformy łachy (terminologia wg Blucka 1971);

2) piaski i piaski ze żwirem z rynnowym warstwowaniem przekątnym dużej skali, o miąższości 2 m. Tworzą one kompleksy o rozciągłości do kilkunastu metrów, przedzielone nachylonymi warstwami masywnych piasków pylastych przechodzących ku górze w drobnoziarniste piaski z riplemarkami wstępującymi. Osady te reprezentują dolny reżim szorstkości dna (por. Harms, Fahnestock 1965; Simons, Richardson, Nordin 1965) i uznane zostały za osady łachy ponadplatformowej. Ich wewnętrzne zróżnicowanie odzwierciedla etapy bocznego przyrastania łachy meandrowej oraz jej złożoną budowę z szerokimi łachami wałowymi oraz wąskimi zagłębieniami międzyłachowymi (por. Hickin 1974; Antczak 1978).

Opisane osady korytowe są nadbudowane dwumetrowym kompleksem osadów pozakorytowych utworzonych z przewarstwiających się piasków i mułów.

Odsłaniające się w pobliżu tego stanowiska (Siedlec, 0,5 km poniżej posterunku wodowskazowego Książnice) osady korytowe z końca XIX w. (fot. 1) zalegają erozyjnie na osadach wypełnienia koryta. Ich spąg znajduje się około 0,75 m nad współczesnym średnim poziomem wody. Masywne drobnoziarniste żwiry o miąższości 2,5 m przykryte są tu żwirami piaszczystymi z warstwowaniem poziomym, o miąższości 1,5 m. Transport i depozycja żwirów piaszczystych zachodziły w warunkach górnego reżimu szorstkości dna (por. Fahnestock, Haushild 1962; Harms, Fahnestock 1965). Zinterpretowano je jako osady górnej części łachy korytowej. Nadścielające osady pozakorytowe reprezentuje kompleks laminowanych równolegle piasków o miąższości około 0,75 m.

Dokonaną w XIX w. zmianę układu facji osadów korytowych w środkowym biegu rzeki ilustruje odsłonięcie w podcięciu brzegu w Stadnikach, 4 km powyżej Gdowa (ryc. 6). Na masywnych lub niewyraźnie warstwowanych poziomo żwirach średnioziarnistych, o widocznej miąższości 1,1 m (osady platformy łachy),

http://rcin.org.pl

spoczywa kompleks zróżnicowanych facjalnie osadów o miąższości 1-1,2 m. Tworzą go: (a) piaski bardzo gruboziarniste z rynnowym warstwowaniem przekątnym dużej skali, (b) piaski ze żwirem wykazujące tabularne warstwowanie przekątne dużej skali, (c) masywne żwiry drobnoziarniste wypełniające kanały erozyjne o szerokości kilku metrów i głębokości do 0,7 m. Osady te cechuje złe wysortowanie i duży rozrzut średniej średnicy ziarna (ryc. 12).

Obserwacje współczesnych łach meandrowych Raby umożliwiły rozpoznanie opisanego kompleksu jako osadów łachy ponadplatformowej rzeki meandrującej i przypisanie wyróżnionych facji jej mezośrodowiskom (fot. 4; por. także Gustavson 1978). Typ (a) reprezentuje osady grzbietów podłużnych i powstał w wyniku migracji podwodnych diun w strefie łachy porośniętej roślinnością. Typ (b) to osady odsypów poprzecznych, zaś typ (c) to osady czopu żwirowego wypełniające koryto przelewowe lub koryto wewnętrzne. Depozycja osadów łachy ponadplatformowej zachodziła w warunkach dominacji przepływów podkrytycznych [typ (a) i (b)], (por. Harms, Fahnestock 1965; Simons, Richardson, Nordin 1965). Umiejscowienie osadów w sąsiedztwie łukowato biegnącej historycznej granicy wsi silnie popiera tezę o utworzeniu ich przez rzekę meandrującą, starszą od 1790r.

Osady łachy ponadplatformowej są ścięte i przykryte przez warstwę masywnych żwirów drobnoziarnistych o miąższości 0,8-1 m (ryc. 6). Są one bardzo źle wysortowane i bardziej gruboziarniste, niż dominująca część osadów leżących poniżej. Maksymalne rozmiary otoczaków są 2-4-krotnie większe niż w podścielających osadach łachy ponadplatformowej. Transport i depozycja masywnych żwirów zachodziły w warunkach górnego reżimu szorstkości dna. Jedynie w warunkach reologicznego stanu dna możliwe jest zarówno gwałtowne przyrośnięcie grubej warstwy osadu, jak i przebiegająca w nieuporządkowany sposób depozycja pojedynczych ziarn (Moss 1972). Oba wymienione sposoby sedymentacji uniemożliwiają powstanie struktur trakcyjnych. Opisane osady można łączyć z korytem z drugiej połowy XIX w. Zostały one zinterpretowane jako osady łachy korytowej płytkiej, agradującej rzeki o małej krętości, transportującej okresowo znaczne ilości obciążenia dennego w warunkach przepływów nadkrytycznych.

Zaznacza się zróżnicowanie żwirów powstałych w odcinkach koryta o odmiennej morfologii; jest ono wyraźnie widoczne w odsłonięciach i znajduje wyraz w odmiennych wartościach parametrów rozkładu uziarnienia. W warunkach stosunkowo wąskiego koryta i skoncentrowanego przepływu (Stadniki, Winiary) rzeka deponowała wówczas żwiry o normalnym upakowaniu, z dominacją mody żwirowej nad piaszczystą (ich rozkład uziarnienia jest podobny do współczesnej próby D; por. ryc. 13D, 14D). Zajmują one dolną część pola osadów z XIX w. na wykresie średnia średnica/odchylenie standardowe [Mz/σ_I] (por. ryc. 12). W miejscach rozszerzania się koryta i dzielenia przepływu przez łachy śródkorytowe formowane były żwiry luźno upakowane, z tworzącymi szkielet ziarnowy otoczakami rozproszonymi w obrębie piaszczystej masy wypełniającej (fot. 12A), utworzone z niemal równorzędnej ilości piasku i żwiru (ryc. 13A, 14A).

http://rcin.org.pl

Grupują się one na wykresie Mz/σ_I w górnym wierzchołku pola osadów z XIX w. (ryc. 12). Żwiry takie musiały powstawać w wyniku jednoczesnej depozycji ziarn piasku i otoczaków (Plumley 1948). Najprawdopodobniej część piasku wypadała z zawiesiny i ulegała włączeniu w obręb warstwy reologicznej w miejscach, gdzie następował spadek mocy strumienia i turbulencji przepływu.

INTERPRETACJA PRZYCZYN TRANSFORMACJI SYSTEMU RZECZNEGO RABY W XIX W.

Zmiany geometrii koryta cechujące ewolucję Raby w XIX w., w jej środkowym i dolnym biegu - wzrost szerokości, spadku i stosunku szerokości do głębokości koryta; zmniejszanie się głębokości i krętości - można wiązać ze wzrostem przepływów rzeki oraz udziału obciążenia dennego w jej całkowitym obciążeniu (Schumm 1969). W odniesieniu do rzeki żwirodennej, jaką jest Raba, wydaje się słuszne wiązanie zmian geometrii koryta raczej ze zmianą przepływów powodziowych niż średniego rocznego przepływu (patrz D.B. Simons, R.K. Simons 1987). W XIX w. koryto Raby było zatem kształtowane przez większe przepływy powodziowe niż w XVIII w.

Zwiększenie się wielkości i/lub częstotliwości powodzi wywołane było najprawdopodobniej dwoma przyczynami. Można sądzić, iż duża wilgotność schyłkowej fazy małej epoki lodowej (Pfister 1980) znacznie przyczyniła się do pojawiania się wówczas częstych, dużych powodzi w górskich rzekach Europy Środkowej (Mikulski 1954; Adamczyk 1981; Starkel 1986). Datowania spływów gruzowych w piętrze alpejskim pobliskich Tatr (gdzie wpływ człowieka na przebieg naturalnych procesów był znikomy) wskazują na znaczną intensywność zjawisk meteorologicznych i hydrologicznych w XIX w. Została wówczas generowana większość, a zarazem największe z rozpoznanych spływów, a ich osady pogrzebały starsze osady holoceńskie (Kotarba 1989).

Drugą przyczyną było zmniejszanie się retencyjności dorzecza wskutek działalności człowieka. Postępujące wylesianie stoków, wzrost gęstości dróg polnych, a zwłaszcza wprowadzona z końcem XVIII w. uprawa ziemniaków powodowały narastającą intensywność spływu powierzchniowego i linijnego (Klimek, Trafas 1972; Klimek 1987), zaś likwidacja licznych w średniowieczu w dnach dolin młynówek, stawów i jazów (Podwińska 1970; Adamczyk 1981) sprzyjała zwiększaniu prędkości przemieszczania się fal powodziowych. Rezultatem gwałtownego odpływu wód opadowych było formowanie się fal powodziowych o wysokich wartościach maksymalnych przepływów i małej objętości.

Wraz z upływem czasu następowało przemieszczanie się w dół rzeki transformacji koryta o dużej lub umiarkowanej krętości w koryto o małej krętości. Proces ten, wyraźnie widoczny w XIX w., w górskim odcinku rzeki musiał rozpocząć się wcześniej. Dokonana w ciągu XIX w. zmiana osadów od deponowanych przez przepływy podkrytyczne do osadów przepływów nadkrytycznych wskazuje na agradację kontrolowaną od góry (Teisseyre 1985). Intensyfikacja aktywności rolniczej w górskiej części dorzecza musiała

http://rcin.org.pl

spowodować wzrost dostawy osadu ze stoków do koryta rzecznego (Łajczak 1988). Jej efektem było rozszerzanie i spłycanie koryta zwiększające zdolność rzeki do przenoszenia materiału dennego (Carling 1983) i przywracające w ten sposób równowagę pomiędzy dostawą osadu a zdolnością transportową rzeki (Bagnold 1977). W ciągu XIX w. Raba w środkowym biegu zmieniła się z rzeki o obciążeniu mieszanym w rzekę o obciążeniu dennym, a w dolnym biegu z rzeki o obciążeniu zawiesinowym w rzekę o obciążeniu mieszanym (por. Schumm 1968, 1972).

Wykształcony w XIX w. system korytowy Raby był dostosowany do przenoszenia wysokich przepływów. Wiadomo, iż taki system rzeczny - tzw. system wysokich przepływów - umożliwia zachowanie kształtu fal powodziowych i podtrzymywanie ich kulminacyjnych przepływów (Burkham 1976b). Fale gwałtownych powodzi, rodzących się w górskiej części dorzecza, uruchamiały i transportowały duże ilości materiału dennego. Po przejściu szczytu fali powodziowej ulegał on gwałtownej depozycji, a szybkie opadanie wód powodziowych uniemożliwiało przemywanie i sortowanie materiału dennego. Wysokie wartości naprężeń ścinających wywieranych na dno przy przejściu fal powodziowych (wysokie przepływy, zwiększony spadek rzeki) powodowały przenoszenie cząstek znacznie grubszych niż te, które były transportowane we wcześniej istniejącym korycie niskich przepływów. Efektem wyrównania naprężeń ścinających w szerokim i płytkim korycie było formowanie słabo zróżnicowanych facjalnie osadów.

REGULACJA KORYTA RABY I ZMIANY GEOMETRII PLANARNEJ RZEKI W XX W.

W 1904r. w dolnym i środkowym biegu Raby rozpoczęto prace regulacyjne (Kędzior 1928). Polegały one na prostowaniu koryta przekopami przecinającymi zakola (ryc. 2B), na jego zwężaniu za pomocą ostróg oraz zabezpieczaniu brzegów wklęsłych przed erozją kamiennymi umocnieniami. Nową trasę regulacyjną starano się tak wytyczyć, by likwidować odcinki, w których rzeka podcinała zbocze doliny lub próg terasy w dnie doliny - w ten sposób ulegała ograniczeniu bezpośrednia dostawa rumowiska do koryta rzecznego. Prace regulacyjne prowadzono do lat trzydziestych. W ich wyniku długość rzeki w odcinku poniżej Książnic uległa zmniejszeniu o 15% - z 45,75 do 38,75 km (tab. 3). W odcinku Książnice-Proszówki skrócenie rzeki wyniosło 18,7%. W środkowym biegu zmiany krętości rzeki były nieznaczne, jednakże zlikwidowano tu dwa odcinki anastomozujące, przecinając je sztucznym pojedynczym korytem (ryc. 2B).

W celu zmniejszenia dostawy rumowiska z górnych części zlewni od 1907r. w dorzeczu Raby rozpoczęto regulację potoków górskich (Kędzior 1928). Polegała ona na wznoszeniu kamiennej obudowy ich koryt oraz na budowie licznych zapór przeciwrumowiskowych.

http://rcin.org.pl

Tabela 4
Zmiany długości, krętości i szerokości koryta Raby pomiędzy Dobczycami a Wieńcem w latach 1955-1987

Wyszczególnienie	1955 r.		1974 r.		1987 r.	
	kmw	kp	kmw	kp	kmw	kp
Długość odcinka (km)		19,94		17,74		17,42
Krętość rzeki		1,29		1,15		1,13
Średnia szerokość (m)	46,4	137,3	38,9	103,6	29,0	53,7
Standardowe odchylenie szerokości	19,9	63,0	15,2	54,0	11,6	17,1
Najmniejsza szerokość	15	38	12	37	10	27
Największa szerokość	153	346	96	326	67	118

kmw - koryto małej wody; kp - koryto powodziowe.

W ciągu pierwszej połowy stulecia koryto wielonurtowe w środkowym biegu rzeki uległo przekształceniu w jednonurtowe (ryc. 4). Jednocześnie pojawiła się tendencja do meandrowania rzeki, wyrażona formowaniem koryta o trójkątnym przekroju z przegłębieniami po wklęsłej stronie i żwirowymi łachami po wypukłej stronie zakoli, usytuowanymi na przemian przy przeciwległych brzegach koryta. Zaniechanie prac regulacyjnych w czasie II wojny światowej i bezpośrednio po jej zakończeniu umożliwiło zwiększenie krętości rzeki w odcinku Dobczyce-Gdów o 14% (ryc. 2B, tab. 3). W niższym odcinku rzeki, gdzie większość budowli regulacyjnych nie uległa zniszczeniu, krętość rzeki nie uległa istotnej zmianie; jednakże długość linii nurtu musiała wzrosnąć wraz z pojawieniem się tendencji do meandrowania.

Prace regulacyjne podjęto ponownie z końcem lat 50. Spowodowały one ponowne skrócenie biegu rzeki. Pomiędzy Dobczycami a Proszówkami długość rzeki zmalała o 7,6% - z 40,85 do 37,75 km (tab. 3). Największe skrócenie rzeki miało miejsce w jej środkowym biegu (ryc. 2B, 7B; tab. 4).

Zmiany geometrii planarnej rzeki, wywołane powtórną regulacją jej koryta w latach 50.-70., dokumentują zdjęcia lotnicze odcinka Dobczyce-Wieniec z lat: 1955, 1974 i 1987 (fot. 2). Wszystkie zdjęcia zostały wykonane w zbliżonych warunkach niskich stanów wody. Lokalizację odcinka Dobczyce-Wieniec przedstawiono na rycinie 7. Dla każdego z wymienionych lat ustalono (tab. 4) długość koryta mierzoną wzdłuż linii nurtu, krętość rzeki oraz szerokość koryta małej wody i szerokość strefy aktywnego transportu materiału dennego (uznano, że szerokość ta jest dobrym przybliżeniem szerokości koryta powodziowego, różniąc się od niej szerokością brzegów). Ustalenia szerokości koryta małej wody i koryta powodziowego dokonano na podstawie pomiarów co 100 m.

Koryto z 1955r., o naturalnym charakterze, było kręte i szerokie (fot. 2; ryc. 8B; tab. 4). Obecność licznych, rozległych łach meandrowych, a także pewnej liczby łach śródkorytowych stwarzała dogodne warunki do akumulacji dostarczanego z wyższych odcinków rzeki materiału dennego (por. Church, Jones 1982). Szerokość koryta powodziowego była trzykrotnie większa od szerokości koryta małej wody. Szerokości koryta powodziowego i koryta małej wody łączył słaby

http://rcin.org.pl

związek korelacyjny (współczynnik korelacji $r = 0,27$), istotny na bardzo wysokim poziomie ufności ($\alpha = 0,0001$). Istnienie takiego związku można przypisać warunkom stosunkowo swobodnego formowania się koryta powodziowego; związek ten wskazuje, że w warunkach stosunkowo małych głębokości rzeki istniejący układ przewężeń i rozszerzeń koryta powodziowego determinował zmiany szerokości koryta przy niższych przepływach.

Prace zmierzające do wyprostowania i skrócenia biegu Raby zostały niemal zakończone do 1974r. W ich wyniku krętość rzeki w odcinku Dobczyce-Wieniec zmalała w latach 1955-1974 o 14% (fot. 2; tab. 4). Jednakże zmniejszanie szerokości rzeki trwało nadal (fot. 2; ryc. 8B; tab. 4). Do 1987r. szerokość koryta małej wody uległa zmniejszeniu o 40%, zaś szerokość koryta powodziowego o 60%. Dla koryta z 1974r. i 1987r. nie stwierdzono istotnej korelacji pomiędzy szerokością koryta małej wody i koryta powodziowego. Wydaje się, iż fakt ten przynajmniej częściowo odzwierciedla narastającą trójwymiarowość przepływu - warunkującą osiąganie przez rzekę przy niskich przepływach najmniejszych szerokości na zakolach, gdzie koryto jest najszersze podczas wysokich przepływów - która powodowała zacieranie istniejącej poprzednio relacji.

Podsumowując, w wyniku przeprowadzonych w obecnym stuleciu prac regulacyjnych, współczesne koryto Raby jest stosunkowo proste i wąskie (ryc. 2B, 8B; fot. 2). Łachy śródkorytowe lub meandrowe, będące miejscami efektywnej akumulacji dostarczanego z wyższych odcinków rzeki materiału dennego, są nieliczne i rozdzielone długimi odcinkami transportowymi z wąskimi łachami bocznymi (fot. 2; ryc. 8B).

Współczesne koryto Raby w środkowym biegu rzeki utworzone jest z odcinków o małej (dominujących) i dużej krętości. Wśród tych o małej krętości przeważają mało aktywne morfologicznie i depozycyjnie odcinki z łachą boczną, podrzędnie występują odcinki roztokowe (fot. 3). Odcinki o dużej krętości powstają na drodze szybkiego cofania się jednego z brzegów i uformowania się na brzegu wypukłym łachy meandrowej cechującej się obecnością poprzecznego odsypu żwirowego z wyraźnym załomem i stokiem osypiskowym (fot. 4, 5), (por. Hickin 1969). Wcześniej istniejąca łacha boczna ulega wbudowaniu w obręb łachy meandrowej, spełniając rolę inicjalnej platformy łachy (fot. 5).

POGŁĘBIANIE KORYTA RABY W XX W.

PRZEBIEG POGŁĘBIANIA KORYTA

Prowadzone od stu lat obserwacje stanów wody Raby pozwalają na określenie zmian pionowego położenia koryta rzeki w jej biegu poniżej zapory w Dobczycach (ryc. 9). Stosunkowo stabilne warunki klimatyczne i hydrologiczne notowane w ciągu tego okresu w dorzeczu Raby pozwalają na traktowanie zmienności minimalnych rocznych stanów wody w ciągu wieloletnim jako odzwierciedlenia

http://rcin.org.pl

tendencji erozyjnych lub agradacyjnych koryta (por. np. Punzet 1969, 1981; Klimek 1983). Analiza zmian przekroju poprzecznego koryta w posterunkach wodowskazowych (ryc. 4) potwierdza istotność informacji o zmianach pionowego położenia koryta zawartych w wieloletnim przebiegu minimalnych rocznych stanów wody.

W Gdowie i w Książnicach pogłębianie koryta rozpoczęło się w 1908r. i do chwili obecnej wyniosło około 3 m. W Proszówkach natomiast od 1913r. koryto uległo pogłębieniu o około 2 m (ryc. 9).

Tempo obniżania dna rzeki w wymienionych przekrojach wodowskazowych było zróżnicowane (ryc. 9). W Proszówkach było ono mniej więcej jednostajne, wynosząc średnio 29 mm/rok; w latach 80. po wybudowaniu betonowego jazu kilkaset metrów poniżej przekroju wodowskazowego - pogłębianie ustało. W Książnicach intensywne (przeciętnie 75 mm/rok) obniżanie dna trwało do 1921r., a następnie do 1952r. zachodziło jego powolne (19 mm/rok) podwyższanie. Od 1952r. do połowy lat 70. dno rzeki gwałtownie się obniżało (100 mm/rok). W ostatnich kilkunastu latach erozja, po spowodowaniu pogłębienia koryta o około 2,5 m, uległa przypuszczalnie zahamowaniu. W Gdowie, po czterech cyklach obniżania i podnoszenia się dna w latach 1908-1958, nastąpiło ogólne pogłębienie koryta o 1 m. W latach 1958-1964 dno koryta obniżyło się o 0,6 m (100 mm/rok), by po okresie stabilizacji trwającej do 1971r. obniżyć się ponownie o 0,9 m (175 mm/rok) w latach 1971-1976. Od połowy lat 70. intensywność pogłębiania zmniejszyła się do 35 mm/rok. W przekroju działającego od niedawna posterunku wodowskazowego Dobczyce w latach 1971-1984 zanotowano obniżenie się dna o około 1,25 m (średnio 96 mm/rok), na które złożyły się dwa epizody gwałtownego pogłębienia: o około 0,4 m w latach 1971-1972 oraz o 0,75 m w latach 1982-1983, przedzielone okresem pewnej stabilizacji koryta.

PRZYCZYNY POGŁĘBIANIA KORYTA

Z przedstawionej analizy wynika, że pogłębianie koryta Raby rozpoczęło się o kilka lat wcześniej w odcinku pogórskim (Gdów, Książnice) niż w Kotlinie Sandomierskiej (Proszówki). Świadczy to, iż procesy erozyjne zostały wywołane zmianami, które nastąpiły w korycie rzeki oraz w jej dorzeczu i spowodowały, że ilość rumowiska odprowadzanego w dół rzeki jest większa od ilości doprowadzanej z góry. Minimalne roczne stany wody Wisły bezpośrednio poniżej ujścia Raby (posterunek wodowskazowy Popędzynka) uległy w ciągu XX w. obniżeniu zaledwie o 0,3 m - fakt ten potwierdza, że obniżenie się bazy erozyjnej rzeki nie może być brane pod uwagę jako istotna przyczyna współczesnego pogłębiania koryta Raby.

Przyczyną zmniejszonej dostawy rumowiska w bieżącym stuleciu były pewne zmiany gospodarowania w dorzeczu. Należy tu wymienić zmiany w sposobach rolniczego użytkowania gruntów, prowadzące do zaniechania orki zgodnie z nchyleniem stoków oraz do terasowania stoków, a także wznoszenie licznych zapór przeciwrumowiskowych na potokach w górskiej części dorzecza. Obudowa

http://rcin.org.pl

brzegów koryt ograniczyła bezpośrednią dostawę do nich materiału skalnego z podcinanych stoków i progów teras.

Główną przyczyną pogłębiania koryta Raby była, zdaniem autora, regulacja rzeki. Skrócenie biegu rzeki, zwężenie koryta oraz koncentracja przepływu, dzielonego dotychczas w odcinkach anastomozujących między dwa odrębne koryta, spowodowały wzrost siły erozyjnej rzeki. Wobec umocnienia brzegów rzeki kierowała się ona na rozmywanie dna. Pogłębianie koryta Raby rozpoczęło się zaledwie w kilka lat po zainicjowaniu prac regulacyjnych.

Efektem skrócenia biegu rzeki w trakcie prac regulacyjnych było zaburzenie pionowej stabilności jej koryta (por. Daniels 1960; Emerson 1971; Bird 1980). Naturalną reakcją rzeki na nasilającą się aż do drugiej połowy XIX w. dostawę rumowiska było prostowanie jej biegu i zwiększanie spadku (tab. 3 - okres 1790-1878). Zachowanie równowagi rzeki w warunkach zmniejszonego w XX w. dopływu rumowiska dennego z wyższej części dorzecza oraz z podcinanych zboczy doliny i progów teras wymagałoby zwiększenia jej krętości (por. Schumm 1969). Naturalna tendencja rozwojowa rzeki w XX w. byłaby zatem przeciwna do zmian wywołanych przez regulacje. Potwierdzeniem tej naturalnej tendencji jest zwiększenie krętości Raby w środkowym biegu, które nastąpiło w okresie przerwy w pracach regulacyjnych w latach 40. i 50. (tab. 3). Rezultatem wzrostu krętości rzeki było zahamowanie obniżania dna jej koryta obserwowane w Gdowie oraz jego nieznaczne podwyższanie w Książnicach (ryc. 9).

Gwałtowne obniżanie się dna koryta Raby w ciągu ostatnich trzech dziesięcioleci (ryc. 4, 9) zostało spowodowane przede wszystkim ponowną regulacją rzeki. Wzrost energii przepływu wskutek jego koncentracji w zwężonym korycie o zwiększonym spadku wyzwolił, wobec umocnienia brzegów rzeki, naturalny mechanizm dostosowania się rzeki w formie cofającej się w górę jej biegu „fali obniżania dna koryta".

W celu zweryfikowania postulowanego wpływu przeprowadzonych prac regulacyjnych na zaburzenie pionowej stabilności rzeki porównano wartości średnich prędkości przepływu w przekroju wodowskazowym Gdów przy określonym natężeniu przepływu w okresie bezpośrednio przed rozpoczęciem (1952r.) i po przeprowadzeniu prac regulacyjnych z ostatnich dziesięcioleci (1987r). - rycina 10. By uzyskać najbardziej wiarygodne dane, dokonano analizy dla lat, w których została zrobiona niwelacja przekroju wodowskazowego. Średnie prędkości obliczono dla całego przedziału przepływów zaistniałych w ciągu wybranych lat hydrologicznych. Wyniki analizy wskazują na znaczny wzrost średnich prędkości przepływu, jaki nastąpił po wykonaniu prac regulacyjnych.

Zaistniała w ostatnich dziesięcioleciach zmiana charakteru fal powodziowych (zmniejszenie się wielkości fal i wydłużenie czasu ich trwania - tab. 2) również przyczyniła się do zwiększenia tempa pogłębiania koryta Raby. Przy mniejszych przepływach powodziowych dostawa rumowiska ze zlewni musiała ulec zmniejszeniu; efekt ten nałożył się na obniżenie dostawy wynikające z kontroli przepływu obciążenia dennego w potokach górskich. Jednocześnie dłuższe

http://rcin.org.pl

utrzymywanie się przepływów wyższych niż średnie sprzyjało rozmywaniu dna i odprowadzaniu materiału dennego w dół rzeki.

Do pogłębiania koryta Raby przyczynia się także eksploatacja żwirów bezpośrednio z koryta oraz pewne zabiegi hydrotechniczne, nie dostosowane do obecnego reżimu rzeki. Intensywna eksploatacja żwirów z koryt rzek karpackich do celów budownictwa rozpoczęła się w latach 50. (Osuch 1968) i trwa do dzisiaj. W odcinku Gdów-Dobczyce eksploatacja taka prowadzona jest obecnie na skalę przemysłową - polega ona na wybieraniu całej objętości łach żwirowych położonych naprzeciw brzegów zagrożonych erozją. Objętość usuwanego w taki sposób z koryta osadu znacznie przewyższa tę jego ilość, która może być w drodze transportu fluwialnego dostarczona przez rzekę z wyższego odcinka (Osuch 1968).

Pobór żwiru z koryta przez ludność miejscową, pomimo niewielkiej objętości usuwanego w ten sposób materiału, stanowi również poważne zagrożenie dla stabilności koryta rzecznego. W wyniku tak prowadzonej eksploatacji na powierzchni łach pozostają liczne zagłębienia o głębokości do 1 m i średnicy do kilku-kilkunastu metrów. Wywrotki i ciągniki eksploatujące żwir powodują zniszczenie na powierzchni łach i bystrzy naturalnego opancerzenia oraz wyciskają głębokie na 10-30 cm koleiny (fot. 6B). Zagłębienia i koleiny zwiększają szorstkość dna, a przez to turbulencję przepływu, co ułatwia uruchomienie materiału dennego oraz utrzymywanie jego transportu. Przez wybieranie z powierzchni łach największych otoczaków niszczy się na znacznych powierzchniach naturalne bruki korytowe (fot. 7). Usuwanie z koryta większych otoczaków zmniejsza ponadto średnią średnicę osadów korytowych, co również ułatwia ich uruchamianie i transport.

Negatywne skutki przynosi także realizowana przez hydrotechników praktyka wytyczania koryta o trapezoidalnym przekroju. Przy tendencji rzeki do meandrowania uformowane sztucznie koryto płaskodenne jest nietrwałe i w odcinkach krętych ulega przy pierwszym wezbraniu przekształceniu w koryto o przekroju trójkątnym (por. Leeks, Lewin, Newson 1988). Często ponawiane próby formowania koryta o trapezoidalnym przekroju w celu ochrony wklęsłych brzegów przed erozją nie mogą zatem przynieść trwałych pozytywnych rezultatów, powodują natomiast całkowite zniszczenie na bardzo rozległych powierzchniach dna naturalnego opancerzenia i wewnętrznej struktury osadów korytowych.

Podsumowując należy stwierdzić, że obserwowane w obecnym stuleciu pogłębianie koryta Raby jest wynikiem:
– skrócenia biegu rzeki i zwężenia jej koryta w wyniku prac regulacyjnych, co spowodowało wzrost energii przepływu i zwiększenie zdolności transportowej rzeki;
– ograniczenia dostawy rumowiska z górnej części dorzecza i podcinanych brzegów rzeki;
– nadmiernej i nie kontrolowanej eksploatacji żwirów z koryta;
– dewastacji powierzchni dna rzeki, umożliwiającej uruchamianie materiału dennego przy mniejszych prędkościach przepływu niż w przypadku istnienia naturalnego dna.

http://rcin.org.pl

Gwałtowne pogłębianie koryta Raby w obecnym stuleciu jest ponadto wynikiem stabilizacji biegu rzeki przez budowle regulacyjne. Tym samym działalność erozyjna rzeki koncentruje się w wąskiej strefie, inaczej niż w warunkach naturalnych, kiedy to boczna migracja rzeki o przewadze zdolności transportowej nad swym obciążeniem powoduje powolne i równomierne obniżanie dna doliny.

ANALIZA CZASOWEJ I PRZESTRZENNEJ ZMIENNOŚCI TEMPA POGŁĘBIANIA KORYTA RABY

Dwie prawidłowości zwracają uwagę, gdy analizuje się przebieg pogłębiania. Posuwając się w górę rzeki obserwuje się coraz późniejsze wystąpienie głównej fazy pogłębiania koryta. Ponadto przebieg i tempo pogłębiania zmieniają się wzdłuż biegu rzeki. Charakterystyczne dla dolnego biegu rzeki powolne i dość jednostajne obniżanie dna jest zastąpione w środkowym biegu szeregiem oddzielnych epizodów pogłębiania, przy czym tempo i wielkość obniżenia dna w poszczególnych epizodach zwiększają się w coraz to wyższych przekrojach (ryc. 9). Niesynchroniczność głównej fazy prac regulacyjnych, zwłaszcza skracania biegu rzeki, w różnych jej odcinkach wydaje się jedynie częściowym wytłumaczeniem pierwszej prawidłowości. Dowodzi tego zróżnicowana wielkość pogłębienia koryta, które dokonało się w latach 1976-1987 w odcinku Dobczyce-Wieniec (ryc. 8A), gdzie prace regulacyjne prowadzono mniej więcej równocześnie w latach 60. i 70. W dolnym końcu odcinka obniżenie dna rzeki o 3 m zostało niemal w pełni osiągnięte przed 1976r. Przy podobnej wielkości pogłębienia koryta w XX w. (3 m) aż do 8 km odcinka Dobczyce-Wieniec, obniżenie dna rzeki w latach 1976-1987 wyniosło 0,5 m w Gdowie, a niemal 2,5 m na 8-8,5 km odcinka. Powyżej 8 km pogłębienie koryta wyniosło dotychczas 1-1,5 m i dokonało się w najmłodszym okresie.

Obniżenie dna w wyniku regulacji danego odcinka rzeki prowadzi do złagodzenia spadku w tym odcinku i zwiększenia spadku bezpośrednio powyżej. Znaczna energia przepływu w odcinku o zwiększonym spadku umożliwia przekroczenie odporności osadów korytowych na rozmywanie i cofanie powstałego bystrza (por. Daniels 1960). Jeśli prace regulacyjne prowadzono na znacznej długości rzeki, to powstały w danym pododcinku impuls obniżania dna nakłada się na degradacyjny efekt przeprowadzonej poniżej regulacji. Konsekwencją tego jest szereg cofających się bystrzy - gdy patrzymy na dany odcinek (ryc. 8A), albo kolejnych epizodów obniżania dna - gdy analizujemy wydarzenia w jednym przekroju (ryc. 9).

Zwiększanie się w górę rzeki wysokości bystrzy (ryc. 8A) oraz gwałtowności epizodów pogłębiania najprawdopodobniej odzwierciedla zróżnicowane tempo cofania się bystrzy - niżej położone bystrza cofają się szybciej, doganiając i łącząc się z bystrzami z wyższego odcinka. Jednakże przyczyna tego zróżnicowanego tempa cofania się bystrzy nie jest jasna. Można by sugerować, iż to zróżnicowane tempo erozji wstecznej odzwierciedla zmiany frakcji osadów korytowych wzdłuż biegu rzeki - wraz ze zwiększającą się frakcją materiału dennego przekroczenie

http://rcin.org.pl

progu stabilności koryta, określonego przez B. Bulla (1979) „progiem krytycznej mocy rzeki", mogłoby zachodzić przy coraz większych, coraz rzadziej powtarzających się przepływach. Być może taki związek wielkości materiału dennego i wartości progowych stabilności koryta odgrywa pewną rolę w sterowaniu tempem erozji wstecznej w skali całej rzeki, jednakże nie jest on zauważalny, gdy analizuje się sytuację w konkretnym odcinku. Towarzyszące rozcinaniu dna rzeki i cofaniu się bystrza selektywne wymywanie drobniejszych ziarn z materiału dennego pozostawia bowiem w pogłębionym odcinku materiał o podobnej frakcji, jak w wyższym, dotychczas nierozciętym odcinku. Dlatego też konieczne jest inne, alternatywne lub uzupełniające wyjaśnienie zróżnicowanego tempa erozji wstecznej.

Zdaniem autora opisany przebieg erozji wstecznej związany jest z mechanizmem dodatniego sprzężenia zwrotnego uruchomionym przez dokonane już w danym odcinku pogłębienie koryta (problem ten jest szczegółowo omówiony w dalszej części pracy). W pogłębionym odcinku przepływy powodziowe koncentrują się w strefie korytowej, z czym wiążą się wysokie wartości prędkości przepływu i mocy strumienia w samym korycie. Natomiast w niepogłębionym odcinku znaczna część przepływów powodziowych przemieszcza się w strefie pozakorytowej, tym samym obniżając prędkości przepływu i moc strumienia w korycie.

Obserwacje autora wskazują, że łachy śródkorytowe spełniają ważną rolę w czasowym zatrzymaniu erozji wstecznej. Odcinki z łachą śródkorytową mają stosunkowo duży spadek (por. Hooke 1986), zwłaszcza w ich dystalnej części (ryc. 8A - łacha na 7,75 km koryta z 1987r.). Kilkuletnie obserwacje dowodzą pionowej stabilności koryta w tych odcinkach. Jednakże przyrośnięcie łachy do jednego z brzegów lub odtworzenie jednego nurtu w toku prac regulacyjnych zmienia warunki przepływu wody i materiału klastycznego w korycie, umożliwiając ponowne cofanie się bystrza. Najwyraźniej nierównomierność przepływu w odcinkach z łachą śródkorytową powoduje, że znaczna część energii przepływu musi tu być użyta na pokonanie oporu wynikającego z kształtu koryta (ang. *channel form resistance* - Bathurst 1982). Akumulacja rumowiska wleczonego na łasze chroni natomiast materiał denny przed dostaniem się do niżej położonego odcinka transportowego. To właśnie w stosunkowo mało pogłębionej, najwyższej części analizowanego odcinka rzeki (0-8 km odcinka Dobczyce-Wieniec - ryc. 8), zachowane zostały dotychczas warunki do akumulacji materiału dennego.

SKUTKI POGŁĘBIANIA KORYTA RABY

Szybkie pogłębianie koryta Raby w XX w. spowodowało niezamierzone skutki w korycie i w dnie doliny, niekorzystne dla środowiska przyrodniczego i gospodarki człowieka (por. Osuch 1968; Klimek 1983).

Obniżenie maksymalnych stanów wody w stosunku do wysokości brzegów rzeki zmniejszyło częstotliwość wylewów rzeki. Ilustruje to tabela 5 - w miarę pogłębiania koryta określony stan wody może być osiągany przy coraz większych, coraz rzadziej powtarzających się przepływach. Wiadomo, że koncentracja trans-

http://rcin.org.pl

portowanych w zawiesinie ziarn grubszych niż drobnopylaste maleje wraz z przesuwaniem się ku coraz wyższym warstwom przekroju wód powodziowych (zawiesina gradacyjna), (Vanoni 1946). Można zatem przypuszczać, że to względne obniżenie się najwyższych stanów w stosunku do wysokości brzegów spowodowało zmniejszenie wielkości ziarn niesionych w zawiesinie przez wody powodziowe płynące po powierzchni równi zalewowej. Ponadto zwiększony spadek i zmniejszająca się szorstkość hydrodynamiczna strefy pozakorytowej (rozrzedzanie lasków łęgowych wskutek ich przesuszania w miarę obniżania się poziomu wód gruntowych oraz wycinanie nadrzecznych wiklin) musiały spowodować tu wzrost prędkości przepływu wód powodziowych (por. Burkham 1976a). Łącznym efektem wymienionych zmian jest gwałtowny spadek lub zahamowanie tempa narastania drobnoziarnistych osadów powodziowych na obszarze teras zalewowych (fot. 8).

Tabela 5

Zmiany wielkości przepływu i okresu powtarzalności wezbrania odpowiadającego danemu stanowi wody w wyniku obniżenia się dna koryta Raby

Przekrój wodowskazowy:	Gdów			Proszówki		
Rok:	1929	1966	1980	1929	1957	1978
Minimalny roczny stan wody (m n.p.m.):	218,49	217,32	216,43	188,74	188,07	187,32
Maksymalny roczny stan wody (m n.p.m.):	219,65	219,65	219,63	191,28	191,28	191,28
Maksymalny przepływ (m^3/s):	130	297	341	150	196	270
Prawdopodobieństwo wystąpienia wezbrania:	80,4%	47,0%	41,1%	86,3%	78,4%	53,3%
Okres powtarzalności wezbrania w latach:	1,24	2,13	2,43	1,16	1,27	1,87

Szybkie wcinanie się rzeki spowodowało, że niskie i średnie stany wód znajdują się z reguły poniżej gęstej strefy korzeniowej roślinności nadrzecznej (fot. 9). Jest to przyczyną zmniejszonej odporności osadu na rozmywanie (por. Smith 1976) i przyspieszonej erozji brzegów (Klimek 1974). W połączeniu z naturalną tendencją rzeki o nadmiernie zwiększonym spadku do osiągania stanu równowagi poprzez wzrost krętości (Schumm 1968) powoduje to szybką (w odcinku Dobczyce-Gdów do 25 m rocznie) boczną migrację koryta w tych miejscach, gdzie umocnienia brzegów zostały zniszczone. Efektem bocznej migracji koryta przy jednoczesnym jego pogłębianiu (por. Striclin 1961) jest wytworzenie się strefy teras żwirowych (fot. 8, 10) lub pokrytych jedynie cienką warstwą drobnoziarnistych

http://rcin.org.pl

osadów pozakorytowych, o szerokości sięgającej w odcinku Dobczyce-Gdów kilkuset metrów. Obszary te z trudem ulegają zasiedlaniu przez roślinność łęgową (fot. 10).

Obniżanie się, w ślad za postępującym pogłębianiem koryta, zwierciadła wód gruntowych w dnie doliny powoduje drenowanie do koryta wód retencjonowanych dotychczas w zalegających tu żwirach. Przypuszczalnie zanotowany w latach 1951-1980 wzrost średniego rocznego przepływu Raby (tab. 2) odzwierciedla także, oprócz zwiększenia się opadów (Stachy 1984), ten właśnie proces. Tym samym niszczeniu ulega jeden z najzasobniejszych i najbardziej przydatnych do eksploatacji (konfiguracja terenu, bliskość użytkowników) zbiorników wód podziemnych w dorzeczu. Obniżanie się zwierciadła wód gruntowych w dnie doliny, najsilniej zaznaczające się w sąsiedztwie koryta, powoduje przesuszanie gruntów uprawnych, zwłaszcza piaszczystych, i znaczny spadek plonów roślin okopowych.

Zmniejszanie się powierzchni i degradacja (wysychanie starorzeczy, rozrzedzanie roślinności, ubożenie składu gatunkowego) lasów łęgowych są przyczyną istotnych zmian w świecie zwierzęcym (zob. Brookes 1988). Powodują one likwidację miejsc lęgu i żerowania licznych gatunków drobnych ssaków i ptaków, a także eliminację wielu gatunków bezkręgowców.

Niekorzystny wpływ szybkiego pogłębiania koryta Raby na istniejące w dnie doliny budowle techniczne przejawia się w:

- wynurzeniu brzegowych ujęć wody ponad zasięg niskich stanów (dla zachowania ciągłości ich działania konieczne jest zatem wznoszenie kosztownych stopni piętrzących);
- podmywaniu i niszczeniu istniejących budowli regulacyjnych;
- zagrożeniu stateczności budowli w obrębie koryta rzecznego, np. filarów mostowych (fot. 11).

Obniżanie się stanów wody Raby w miarę pogłębiania jej koryta powoduje obniżenie bazy erozyjnej jej dopływów. Inicjuje to z kolei migrację „fali obniżania dna koryta" w górę tych dopływów. W przypadku większych dopływów (Stradomka, Krzyworzeka), na których prowadzono prace regulacyjne, impuls ten sumuje się z własną tendencją tych rzek do pogłębiania.

http://rcin.org.pl

ZMIANY CHARAKTERU SEDYMENTACJI KORYTOWEJ RABY W XX W.

Najbardziej charakterystyczną cechą aluwiów Raby z początku XX w. w jej środkowym biegu są liczne, mułowe lub piaszczyste litosomy tkwiące w obrębie żwirów (ryc. 11). Większe z nich, wykształcone w środkowej części profilu, uznano za osady wypełnień płytkich roztok, natomiast mniejsze, znajdujące się w górnej części profilu za osady wypełnień koryt przelewowych rozcinających żwirowe łachy.

Przerzucanie się stref aktywności w obrębie szerokiego, płytkiego koryta powodowało zamieranie i wypełnianie niektórych roztok drobnoziarnistymi osadami. Przy ponownym zbliżeniu się nurtu osady te były erodowane i przykrywane żwirami łach korytowych.

Wśród osadów łach dominują masywne żwiry o normalnym upakowaniu, natomiast podrzędnie występują żwiry luźno upakowane oraz niewypełnione ciasno upakowane żwiry (ryc. 11). Osady te cechują się bardzo złym wysortowaniem przy znacznym rozrzucie średniej średnicy ziarna (ryc. 12).

Osady łach meandrowych krętej rzeki z lat 50. były silnie zróżnicowane pod względem teksturalnym. W proksymalnych częściach łach powstawały żwiry normalnie upakowane oraz wypełnione żwiry ciasno upakowane (fot. 12B). W dystalnych częściach łach oprócz tych dwóch typów deponowane były żwiry o rozproszonym szkielecie ziarnowym oraz niewypełnione żwiry ciasno upakowane (fot. 12C), przy podobnym udziale wszystkich typów w osadach. Wzrost stopnia wysortowania (σ_I = 2,9 do 1,2) oraz średniej średnicy ziarna (od 4,5 do 22 mm, Mz = -2,2 do -4,45ϕ), obserwowany przy przesuwaniu się na diagramie Mz/σ_I od luźno upakowanych do niewypełnionych ciasno upakowanych żwirów (ryc. 12), odzwierciedla malejący udział mody piaszczystej w osadach (ryc. 13B,C; 14B,C).

Zróżnicowanie współczesnej rzeki na odcinki o małej oraz o dużej krętości znajduje odzwierciedlenie w grupowaniu się powstających w ich obrębie osadów w odrębne pola na diagramie Mz/σ_I (ryc. 12). W odcinkach o małej krętości formowane są normalnie upakowane (fot. 12D) oraz wypełnione ciasno upakowane żwiry, o znacznym udziale mody piaszczystej (ryc. 13D, 14D). Osady te cechuje bardzo złe wysortowanie (σ_I = 2,0 : 2,75), a ich średnia średnica zmienia się od 5,5 do 22 mm (Mz = -2,45 do -4,45), (ryc. 12).

Mechanizmy transportu i depozycji działające w odcinkach o dużej krętości prowadzą do formowania poprzecznego odsypu(ów), w obrębie którego powstają przekątnie warstwowane żwiry (fot. 4, 5). To właśnie te poprzeczne odsypy żwirowe i związane z nimi wielkoskalowe tabularne warstwowania przekątne są charakterystyczne dla łach ponadplatformowych meandrujących rzek żwirodennych (McGowen, Garner 1970; Gustavson 1978).

Współczesne osady łach ponadplatformowych Raby w jej środkowym biegu to niewypełnione ciasno upakowane żwiry (fot. 12E). Osady te cechuje brak lub nieznaczny udział piasku (ryc. $13E_1$; $14E_1$,E_2). Ich wysortowanie zmienia się od

http://rcin.org.pl

złego do umiarkowanie dobrego (σ_I = 1,8 : 0,53), a średnia średnica waha się od 12 do 50 mm (Mz = -3,5 do -5,6ϕ), (ryc. 12). Wykazują one odwrotne frakcjonowanie wzdłuż warstw czołowych, widoczne jako normalne uziarnienie frakcjonalne w płaszczyźnie pionowej (fot. 12E).

Efektywne sortowanie materiału dennego wydaje się być wynikiem dwóch mechanizmów. Pierwszy z nich działa na powierzchni łachy ponadplatformowej, powodując odmywanie piasku z masy transportowanego materiału dennego. Przenoszenie piasku w stan zawiesiny powoduje, że docierający do załomu łachy i deponowany bezpośrednio poniżej niego materiał (fot. 12E) zawiera jedynie niewielką, w porównaniu z osadami łach śródkorytowych i bocznych w odcinkach o małej krętości, ilość piasku (ryc. 14E$_2$). Bruk korytowy uformowany w wyniku stabilizacji przenoszonych żwirów przy opadaniu fali powodziowej (fot. 12E) efektywnie ogranicza infiltrację niesionych w zawiesinie drobnych ziarn w przestrzenie porowe (por. Frostick, Lucas, Reid 1984).

Drugi z nich - mechanizm przenoszenia - powoduje dalszą segregację ziarn w trakcie ich ruchu po powierzchni stoku osypiskowego, prowadząc do tworzenia się w jego dolnej części (fot. 12E) unimodalnych żwirów (ryc. 13E$_1$) składających się z jednej populacji ziarnowej (ryc. 14E$_1$). Polega on na uprzywilejowanym ruchu większych ziarn ponad gładką powierzchnią utworzoną przez drobniejsze ziarna (Allen 1983), wskutek większych sił wleczenia wywieranych na wystające większe cząstki oraz ich większej bezwładności warunkującej prostszą drogę po powierzchni stoku i ograniczającej ilość ich kontaktów z dnem (Carling, Glaister 1987).

W osadach łach korytowych środkowej Raby z drugiej połowy XIX w. nie stwierdzono obecności poziomów bruków korytowych oraz imbrykacji otoczaków. Struktury takie występują sporadycznie w osadach z początku XX w., pojawiając się liczniej w osadach łach meandrowych z lat 50. Współcześnie całe dno koryta jest pokryte brukiem korytowym, a na jego powierzchni znajdują się liczne skupienia otoczaków (fot. 13). Średnia średnica ziarna w warstwie bruku korytowego jest 2-4-krotnie większa niż w żwirach pod brukiem.

W ciągu XX w. zaznaczyły się znaczne zmiany w wykształceniu niewypełnionych żwirów ciasno upakowanych. Miąższość zestawów warstwowania przekątnego, odzwierciedlająca wysokość czoła odsypów poprzecznych, wzrastała od 5-15 cm w osadach z początku wieku do około 30cm w latach 50. i 60-100 cm obecnie. Kąt upadu warstw czołowych zwiększył się w ciągu tego okresu od 20-25° do 30-35°.

Interpretacja zmian charakteru sedymentacji korytowej Raby w XX w. ma szczególne znaczenie dla rekonstrukcji zaistniałych w tym okresie zmian reżimu rzeki. Ograniczenie rzeki przez budowle regulacyjne uniemożliwia bowiem dokonanie takiej rekonstrukcji w oparciu o sformułowane przez S.A. Schumma (1969, 1972) zależności dla zmian parametrów geometrycznych koryta.

Dokonane w ciągu XX w. zmiany charakteru sedymentacji korytowej Raby można przypisać dwóm czynnikom; efekty ich działania są jednak trudne do rozdzielenia. W okresie tym ilość transportowanego przez rzekę drobnoziarnistego materiału

http://rcin.org.pl

musiała ulec znacznemu zmniejszeniu. Świadczy o tym: 1) wzrastający udział w budowie łach żwirów niewypełnionych kosztem żwirów o luźnym i normalnym upakowaniu; 2) wzrastający stopień rozwoju bruków korytowych na powierzchni łach; 3) zwiększający się kąt upadu warstw czołowych w odsypach poprzecznych.

Wiadomo, że wzrost kąta upadu warstw czołowych w odsypach poprzecznych odzwierciedla zmniejszający się udział piasku w dostarczanym osadzie (Carling, Glaister 1987). Malejąca zawartość piasku w żwirach łach wskazuje bezpośrednio na zmniejszającą się ilość piasku przenoszonego w formie obciążenia dennego. Z kolei formowanie bruków korytowych wymaga znacznej turbulencji przepływu, której intensywność jest odwrotnie proporcjonalna do koncentracji obciążenia zawiesinowego rzeki (Beckinsale 1972).

W poprzednim rozdziale założono *a priori*, że zaistniałe w XX w. zmiany gospodarowania w dorzeczu, w tym zwłaszcza regulacja potoków górskich, musiały spowodować ograniczenie dopływu rumowiska z wyższej części zlewni, uznając zarazem to ograniczenie dostawy za jedną z przyczyn zaburzenia pionowej stabilności rzeki. W świetle analizy sedymentologicznej wniosek o zmniejszaniu się w ciągu XX w. obciążenia rzeki znajduje pełne uzasadnienie.

Drugą przyczyną dokonanej w ciągu XX w. zmiany charakteru sedymentacji Raby był wzrost średniej prędkości przepływu i mocy strumienia wskutek regulacji koryta. Spowodował on stopniowe wymywanie drobniejszych ziarn z materiału dennego. Znaczenie regulacji koryta uwidacznia intensyfikacja przebudowy układu facji osadów korytowych w ostatnich dziesięcioleciach.

W ciągu XX w., oprócz zmniejszenia obciążenia rzeki transportowanym materiałem klastycznym, zaznaczyło się także zmniejszenie udziału obciążenia dennego w jej całkowitym obciążeniu. W rezultacie Raba w środkowym biegu zmieniła się z rzeki o obciążeniu dennym w rzekę o obciążeniu mieszanym. Morfologiczną tego konsekwencją było uformowanie się koryta jednonurtowego o tendencji do meandrowania, a także znaczna zmiana stosunku szerokości do głębokości koryta (ryc. 4 - por. przekroje z 1928r. i 1987r.). Czynnikami warunkującymi zmianę dominującego typu obciążenia rzeki były: 1) wzrost frakcji materiału dennego; 2) zastępowanie w materiale dennym żwirów luźno upakowanych żwirami o ciasnym upakowaniu; 3) wzrost głębokości koryta; 4) zmniejszenie się przepływów powodziowych. Zmierzały one do zmniejszenia rozmiarów obciążenia dennego rzeki poprzez obniżenie średnich naprężeń ścinających na dnie (pkt. 3 i 4 - Bagnold 1977) oraz obniżenie podatności ziarn na uruchomienie (pkt. 1, 2, 3 - Baker, Ritter 1975; Church 1978; Carling 1983).

Zmiany osadów korytowych były ważnym mechanizmem samoregulacji rzeki w warunkach ustabilizowanej przez budowle regulacyjne krętości koryta. Zmierzały one do przywrócenia równowagi pomiędzy zwiększoną zdolnością transportową rzeki a jej zmniejszającym się obciążeniem poprzez obniżenie podatności ziarn na uruchomienie oraz przez zwiększenie oporu stawianego przepływowi przez dno i brzegi koryta (ang. *boundary resistance* - Bathurst 1982). Selektywne wymywanie drobniejszych ziarn z materiału dennego powodowało

http://rcin.org.pl

stopniowy wzrost średniej średnicy osadów korytowych (ryc. 12). Ustało formowanie się żwirów luźno upakowanych, z których powierzchni znaczna część ziarn mogła być łatwo uruchomiona (Church 1978). Coraz większego znaczenia nabierała natomiast depozycja żwirów ciasno upakowanych oraz formowanie się bruków korytowych i skupień otoczaków. Ciasne upakowanie ziarn w materiale dennym i ich agregacja w skupienia otoczaków znacznie zwiększają stabilność ziarn (Laronne, Carson 1976; Brayshaw, Frostick, Reid 1983; Reid, Frostick 1984). W istocie ich obecność powoduje, że dno rzeki zachowuje się tak, jak gdyby było utworzone z najgrubszych ziarn materiału dennego (Reid, Frostick *op. cit.*). Obecność skupień otoczaków na powierzchni dna zwiększa także jego szorstkość hydrodynamiczną, a tym samym opór stawiany przepływowi (Hassan, Reid 1990).

Na podkreślenie zasługuje zróżnicowanie osadów powstających w odcinkach o małej lub dużej krętości. Przypomina to zróżnicowanie osadów formowanych w różniących się morfologią koryta odcinkach Raby w XIX w., gdzie zwartość koryta sprzyjała tworzeniu się żwirów o lepszym wysortowaniu. Krętość i kształt koryta w przekroju poprzecznym nie tylko odzwierciedlają proporcje pomiędzy dennym i zawiesinowym obciążeniem rzeki, lecz same wpływają modyfikująco na zmiany tych proporcji. Odmienne mechanizmy sortowania osadu działające na współczesnych łachach meandrowych i w odcinkach o małej krętości świadczą, że odcinki o różnym stopniu krętości cechują się odmiennym układem naprężeń ścinających na dnie, co warunkowane jest różnym tempem rozpraszania energii przepływu wskutek oporów kształtu koryta.

ZMIANY PRZEPŁYWÓW POWODZIOWYCH RABY W XX W.

ANALIZA MAKSYMALNYCH ROCZNYCH PRZEPŁYWÓW

System koryta i równi zalewowej wywiera wpływ na przemieszczające się nim fale powodziowe (Burkham 1976b). Zaistniałe w ciągu XX w. zmiany systemu rzecznego środkowej i dolnej Raby powinny zatem znaleźć odzwierciedlenie w modyfikowaniu przepływów powodziowych. Istniejący zapis maksymalnych rocznych przepływów w posterunkach wodowskazowych Gdów i Proszówki od 1921r. umożliwia analizę zmian przepływów powodziowych Raby począwszy od lat 20.

Do określenia wpływu zmian koryta Raby w XX w. na przenoszone przez rzekę fale powodziowe wykorzystano kilka metod analitycznych. Po pierwsze zbadano, jak zmieniał się w czasie iloraz maksymalnego rocznego przepływu zanotowanego w posterunkach wodowskazowych w dolnym (Proszówki) i środkowym (Gdów) biegu rzeki (ryc. 15). Wartości ilorazu najpierw powoli malały, od 1,67 dla lat 20. do 1,06 dla lat 40., a następnie szybko wzrastały osiągając wartość 2,41 w latach 70. W latach 1981-1985 średnie wartości ilorazu obniżyły się do 1,87; następnie, wraz z oddaniem do eksploatacji zbiornika w Dobczycach, istniejąca dotychczas

http://rcin.org.pl

zależność pomiędzy maksymalnymi przepływami Raby i jej dopływów w środkowym i dolnym biegu rzeki musiała ulec zmianie.

Przebieg zmian maksymalnych przepływów Raby w odcinku Gdów-Proszówki staje się bardziej czytelny, gdy od wartości ilorazu maksymalnych przepływów dla każdego roku odejmie się liczbę 1,45. Wartość ta reprezentuje przeciętny z wielolecia iloraz średniego rocznego przepływu Raby w posterunkach Gdów i Proszówki oraz określa w przybliżeniu wzrost objętości fal powodziowych w odcinku Gdów-Proszówki. Zatem ujemne lub dodatnie wartości „poprawionego" ilorazu maksymalnych przepływów reprezentują odpowiednio niższy i wyższy wzrost maksymalnego przepływu pomiędzy Gdowem a Proszówkami niż wynikałoby to z przyrostu objętości fali powodziowej w tym odcinku. Opadanie lub podnoszenie się krzywej kumulacyjnej „poprawionego" ilorazu pokazuje zatem utrzymujące się trendy zmian maksymalnych rocznych przepływów (ryc. 15).

Przebieg zmian maksymalnych rocznych przepływów Raby skonfrontowano ze zmianami pionowego położenia jej koryta w odcinku Gdów-Proszówki (ryc. 15). Zmiany pionowego położenia koryta rzeki w tym odcinku ustalono jako średnią ważoną zmian minimalnych rocznych stanów wody w przekrojach wodowskazowych Gdów, Książnice i Proszówki w stosunku do sytuacji z 1920r., przy czym zmianom rejestrowanym w górnym (G) i dolnym (P) końcu odcinka przypisano wagi po 1/4, a zmianie w środkowym posterunku (K) wagę 1/2 całkowitej zmiany położenia dna w odcinku. Zestawienie trendów zmian maksymalnych przepływów i krzywej przedstawiającej zmiany pionowego położenia koryta Raby w odcinku Gdów-Proszówki ukazuje uderzającą zgodność pomiędzy rozpoczętym z końcem lat 50. szybkim pogłębianiem koryta i wzrastającym równocześnie ilorazem maksymalnych przepływów (ryc. 15). Skoro wraz z przemieszczaniem się fal powodziowych ich maksymalne przepływy rosły szybciej niż wynikałoby to z przyrostu objętości fal w miarę wzrostu powierzchni dorzecza, musiała zachodzić zmiana kształtu fal; zwiększanie się wielkości fal kompensowane było ich wzrastającą koncentracją. Z kolei malejący trend ilorazu maksymalnych przepływów w okresie ustabilizowanego pionowego położenia koryta, szczególnie wyraźny w latach 40., można powiązać ze wzrastającą wówczas krętością rzeki i postępującą transformacją Raby w system niskich przepływów.

Podobne tendencje zmian wielkości fal powodziowych Raby między Gdowem a Proszówkami stwierdzono analizując średnie dekadowe wartości ilorazu maksymalnych przepływów dla dziesięciu największych fal z każdego dziesięciolecia (ryc. 15). Tak ustalone wartości ilorazu maksymalnych przepływów wykazywały szybki wzrost od 1,01 w latach 40. do 1,84 w latach 70., a następnie nieznacznie zmalały do 1,81 w latach 1981-1985.

ANALIZA ŚREDNICH DEKADOWYCH LINII REGRESJI

Kolejnym krokiem analizy było zbadanie zmian w czasie zależności pomiędzy maksymalnymi przepływami w górnym i dolnym końcu odcinka Gdów-Proszówki ustalonej dla szerokiego przedziału wielkości fal powodziowych. Dysponując

http://rcin.org.pl

zapisem codziennych wartości przepływu w Gdowie i w Proszówkach od 1951r., dla każdej fali powodziowej o wielkości przekraczającej 20 m^3/s (ok. dwukrotną wartość średniego rocznego przepływu) w górnym końcu odcinka (G) ustalono jej kulminacyjny przepływ w dolnym końcu odcinka (P). Procedurę taką zastosowano także w odniesieniu do kilkunastu największych fal powodziowych z lat 40. Tak uzyskane dane, pogrupowane oddzielnie dla poszczególnych dziesięcioleci, przedstawiono na diagramach zależności: maksymalny przepływ w Gdowie/maksymalny przepływ w Proszówkach (ryc. 16) oraz maksymalny przepływ w Gdowie/wzrost wielkości fali w odcinku Gdów-Proszówki (ryc. 17). Następnie dla obu zależności obliczono średnie dekadowe równania regresji. Ustalono, że określone tymi równaniami zależności są istotne statystycznie na poziomie $\alpha = 0,01$.

Z przebiegu średnich dekadowych linii regresji na rycinach 16 i 17 (zob. też tab.6) można wyciągnąć dwa zasadnicze wnioski. Po pierwsze, wraz z przekroczeniem pewnej granicznej wielkości przepływu charakter transformacji fal powodziowych ulegał zmianie. Odzwierciedla ona przejście od warunków przepływu w korycie do warunków przepływu pozakorytowego. Umożliwia to oszacowanie wielkości przepływu pełnokorytowego w przekrojach wodowskazowych Gdów i Proszówki oraz jego zmian w czasie. W latach 50. przepływ pełnokorytowy wynosił 129 m^3/s w Gdowie, a 259 m^3/s w Proszówkach, natomiast w latach 70. odpowiednie wartości wynosiły 105 oraz 252 m^3/s. Te czasowe zmiany wielkości przepływu pełnokorytowego pozostają w zgodzie ze znacznym obniżeniem się w tym okresie średniego maksymalnego przepływu w Gdowie i stosunkowo niewielkim jego zmniejszeniem w Proszówkach (tab. 2).

Po drugie, charakter transformacji fal powodziowych pomiędzy Gdowem a Proszówkami uległ w ostatnich kilkudziesięciu latach znacznym zmianom. W latach 40. wyraźnie zaznaczała się tendencja do spłaszczania się[1] przemieszczających się w dół Raby fal powodziowych. W rezultacie, pomimo znacznego przyrostu objętości fal w odcinku Gdów-Proszówki, ich maksymalne przepływy w obu przekrojach były podobne. Wzrost wielkości fali pomiędzy Gdowem a Proszówkami wynosił od 1% w przypadku najniższych przepływów pozakorytowych w Gdowie do 10% w przypadku hipotetycznej fali o kulminacji 1000 m^3/s (tzn. przepływu o 23-letnim okresie powtarzalności), (tab. 6). Oznacza to, że niskie przepływy pozakorytowe w górze odcinka ulegały wówczas transformacji w przepływy korytowe w dolnym końcu odcinka.

W latach 50. im wyższy był przepływ korytowy, tym bardziej wielkość fali wzrastała pomiędzy Gdowem a Proszówkami - wzrost maksymalnego przepływu w tym odcinku zmieniał się od 0,96 w przypadku fali o wielkości 10 m^3/s do 2,00

[1] W niektórych pracach hydrologicznych termin „płaszczenie się fali" oznacza zmniejszanie się z biegiem rzeki kulminacyjnego przepływu fali powodziowej. Określenia „fala płaska, stroma" opisują jednakże kształt fali, a nie jej wielkość (fala wysoka, niska). Dlatego też w niniejszej rozprawie spłaszczaniem się fali powodziowej określono zmianę kształtu fali prowadzącą do zmniejszenia stosunku kulminacyjnego przepływu do czasu trwania fali; spłaszczanie się fali może więc być połączone ze wzrostem jej wielkości, jeśli tylko kulminacyjny przepływ z biegiem rzeki wzrasta wolniej od zwiększania się podstawy czasowej fali.

http://rcin.org.pl

w przypadku przepływu pełnokorytowego w Gdowie. Następnie, wraz ze wzrastającymi przepływami pozakorytowymi, wzrost maksymalnego przepływu pomiędzy Gdowem a Proszówkami był coraz mniejszy, osiągając wartość 1,01 w przypadku hipotetycznej fali o kulminacji 1000 m^3/s (tab. 6). W przypadku dużej części przedziału zmienności przepływów pozakorytowych w Gdowie odpowiadające im kulminacje fal w dolnym końcu odcinka były obecnie znacznie wyższe niż w latach 40. Jeżeli uwzględni się przyrost objętości fal powodziowych pomiędzy Gdowem a Proszówkami przeciętnie o 45%, wówczas okazuje się, iż koncentracja fal o wielkości 40-325 m^3/s wzrastała z biegiem rzeki, natomiast fale mniejsze od 40 m^3/s lub większe od 325 m^3/s (tzn. od średniego maksymalnego przepływu) ulegały w tym odcinku spłaszczaniu.

Tabela 6

Średnie dekadowe trendy zmian wielkości fal powodziowych w odcinku Gdów-Proszówki dla lat 40.-70.

G_{Qmax} (m^3/s)	P_{Qmax} (m^3/s)			P_{Qmax}/G_{Qmax}		
	1941-1950	1951-1960	1971-1980	1941-1950	1951-1960	1971-1980
10		*9,6*	*12,2*		0,96	1,22
25		*31,4*	*39,7*		1,26	1,59
50		*76,6*	*97,1*		1,53	1,94
100		*186*	*236*		1,86	2,36
125	*125*	*250*	283	1,00	2,00	2,26
150	*151*	289	322	1,01	1,93	2,15
325	339	482	554	1,04	1,48	1,70
500	532	641	748	1,06	1,28	1,50
1000	1100	1014	1216	1,10	1,01	1,22

Na podstawie średnich dekadowych linii regresji (patrz ryc. 16, 17) dla wybranych wartości kulminacyjnych przepływów powodziowych w górnym posterunku wodowskazowym (G_{Qmax}), obliczono charakterystyczne dla danego dziesięciolecia maksymalne przepływy w dolnym końcu odcinka (P_{Qmax}) oraz wzrost wielkości fali w odcinku (P_{Qmax}/G_{Qmax}). Zastosowano zróżnicowanie czcionki do odróżnienia przepływów korytowych (*kursywa*) i pozakorytowych w Proszówkach.

W latach 70. tendencja do wzrostu koncentracji fal powodziowych z biegiem rzeki zaznaczała się jeszcze wyraźniej. Przepływ pełnokorytowy w Gdowie ulegał teraz zwiększeniu w odcinku Gdów-Proszówki 2,40 razy. Przy obniżaniu się przepływów korytowych lub zwiększaniu się przepływów pozakorytowych wzrost maksymalnego przepływu pomiędzy Gdowem a Proszówkami był coraz mniejszy, obniżając się do wartości 1,22 w przypadku fal o kulminacji 10 lub 1000 m^3/s (tab. 6). Znacznie rozszerzył się przedział wielkości fal powodziowych, których koncentracja wzrastała z biegiem rzeki. Jedynie fale mniejsze od 20 m^3/s lub większe od 600 m^3/s (co odpowiada przepływom o co najmniej 6-letnim okresie powtarzalności) ulegały teraz w tym odcinku spłaszczaniu.

Z przedstawionej analizy wynika, że coraz wyższym przepływom pozakorytowym w Gdowie odpowiadał coraz mniejszy wzrost kulminacji fali z biegiem rzeki (ryc. 17). Ta prawidłowość pozwala wyjaśnić rozbieżności pomiędzy średnimi dekadowymi wartościami ilorazu maksymalnych przepływów w Gdowie

http://rcin.org.pl

i w Proszówkach obliczonymi albo dla maksymalnych rocznych przepływów, albo dla 10 największych fal z dziesięciolecia (ryc. 15) - w niektórych latach maksima roczne zostają osiągnięte przy przepływach zbliżonych do pełnokorytowego, co daje w efekcie bardzo wysokie wartości ilorazu maksymalnych rocznych przepływów.

ANALIZA HYDROGRAMÓW FAL POWODZIOWYCH

Porównanie zmian maksymalnych przepływów pomiędzy Gdowem a Proszówkami dla fal powodziowych o różnej wielkości sugeruje, że w rozpatrywanym okresie największej zmiany charakteru transformacji w tym odcinku doznały fale, których kulminacja w Gdowie była zbliżona do przepływu pełnokorytowego (tab. 6; ryc. 17). Rekonstrukcja hydrogramów fal o takiej wielkości jest jednak mało wiarygodna wskutek niskiej częstotliwości obserwacji stanów wody w czasie małych powodzi. Z okresu 1941-1980 wybrano zatem 6 fal powodziowych o wielkości 540-610 m^3/s w Gdowie. Analiza ich hydrogramów w przekrojach wodowskazowych Gdów i Proszówki dostarcza informacji o zaistniałych w ostatnich dziesięcioleciach zmianach transformacji fal powodziowych pomiędzy Gdowem a Proszówkami (ryc. 18; tab. 7).

Porównując fale powodziowe o zbliżonej kulminacji w Gdowie (zob. powodzie z lipca 1949r., lipca 1962r. i sierpnia 1972r.) obserwuje się osiąganie w czasie kolejnych powodzi coraz wyższych maksymalnych stanów i przepływów w Proszówkach. Ten wzrost maksymalnych stanów w dolnym końcu odcinka w czasie kolejnych powodzi, zanotowany w okresie obniżania się dna rzeki w tym przekroju, jest bardzo istotny - dowodzi on, że stwierdzane zwiększanie się kulminacyjnych przepływów kolejnych fal powodziowych w Proszówkach rzeczywiście miało miejsce, a nie było jedynie przypadkowym efektem niewłaściwego ustalenia krzywych konsumcyjnych.

Wraz ze wzrostem maksymalnych przepływów kolejnych fal czas trwania fali powodziowej w Proszówkach ulegał skracaniu. Czas ten był przeciętnie o 20% dłuższy niż w Gdowie w grupie trzech pierwszych analizowanych fal (z lat: 1949, 1955 i 1960), natomiast jedynie o 8% dłuższy w trakcie trzech ostatnich powodzi (z lat: 1962, 1965 i 1972). Jeszcze większemu skróceniu w rozpatrywanym okresie uległ czas, w którym kulminacyjna połowa objętości fali powodziowej przemieszczała się przez dolny przekrój wodowskazowy (ryc. 18). Czas przejścia kulminacyjnej połowy objętości fali powodziowej przez przekrój wodowskazowy w Proszówkach był w trakcie trzech pierwszych powodzi o 19% dłuższy niż w Gdowie, a w trakcie trzech ostatnich powodzi jedynie o 5% dłuższy. Zmiana ta była łącznym efektem skracania czasu trwania fali powodziowej oraz wzrastającej koncentracji odpływu powodziowego w szczycie fali.

W analizowanym okresie tendencja zmian koncentracji fal powodziowych z biegiem rzeki uległa odwróceniu. Widać to, gdy porówna się jaka część całkowitego odpływu powodziowego każdej fali, została w obu przekrojach wodowskazowych odprowadzone przy przepływie przekraczającym wielkość

http://rcin.org.pl

kulminacji o prawdopodobieństwie pojawiania się 50% (Gdów - 240 m^3/s; Proszówki - 350 m^3/s). Ze względu na unikalny kształt każdej fali odzwierciedlający czasowy rozkład opadów w zlewni, znaczące są jedynie różnice wartości w obu przekrojach dla tej samej fali, nie zaś różnice pomiędzy poszczególnymi falami. W czasie powodzi z 1949r. oraz 1955r. odpływ odprowadzony przy przepływie przewyższającym wskazane wartości stanowił większą część całkowitej objętości fali powodziowej w Gdowie, natomiast w czasie czterech kolejnych powodzi większą w Proszówkach.

Tabela 7

Wybrane parametry hydrogramów w przekrojach wodowskazowych Gdów i Proszówki dla 6 fal powodziowych o kulminacji 540-610 m^3/s w Gdowie z lat 1941-1980

Fala powodziowa	G_{Qmax} (m^3/s)	P_{Qmax} (m^3/s)	P_{hmax} (mn.p.m.)	$\frac{P_{Qmax}}{G_{Qmax}}$	$P_t : G_t$	$\frac{P_{t50\%}}{G_{t50\%}}$	G_{Vex} (%)	P_{Vex} (%)
VII 1949	568	696	194,60	1,22	1,23	1,18	74	64
VIII 1955	600	805	195,04	1,34	1,19	1,08	69	65
VIII 1960	610	850	195,22	1,39	1,17	1,30	66	70
VIII 1962	580	880	195,34	1,52	1,09	1,09	54	62
VI 1965	540	656	194,40	1,21	1,01	1,16	26	34
VIII 1972	584	915	195,48	1,57	1,14	0,91	71	77

Objaśnienia: G_{Qmax}, P_{Qmax} - kulminacyjny przepływ w Gdowie i w Proszówkach; P_{hmax} - maksymalny stan powodziowy w dolnym posterunku; P_t, G_t - czas trwania fali powodziowej w analizowanych przekrojach; $P_{t50\%}$, $G_{t50\%}$ - czas przejścia kulminacyjnej połowy objętości fali powodziowej przez analizowane przekroje wodowskazowe; G_{Vex}, P_{Vex} - procent całkowitej objętości fali powodziowej odprowadzony w obu posterunkach przy przepływie przekraczającym wielkość kulminacji o 50%-prawdopodobieństwie występowania.

Podsumowując, na początku okresu 1941-1980 koncentracja odpływu w szczycie fal powodziowych zmniejszała się z biegiem rzeki. Następnie kierunek działania mechanizmów transformacji uległ odwróceniu, powodując teraz wzrost koncentracji odpływu powodziowego w szczycie fal. Towarzyszyło temu szybkie zwiększanie się kulminacyjnego przepływu i skracanie czasu trwania powodzi.

ZMIANY WIELKOŚCI I TRANSFORMACJI FAL POWODZIOWYCH RABY JAKO EFEKT EWOLUCJI SYSTEMU RZECZNEGO

Brak danych nie pozwala na ocenę hydrologicznych efektów pierwszej fazy regulacji koryta Raby z początku XX w. Natomiast dwa odrębne stadia zaznaczające się w ewolucji systemu rzecznego Raby po 1920r. znajdują wyraźne odzwierciedlenie w zmianach jej przepływów powodziowych. Pierwsze stadium cechowało się wzrostem krętości rzeki przy pionowej stabilności jej koryta. Jednocześnie coraz wyraźniej zaznaczała się tendencja do łagodzenia fal powodziowych z biegiem rzeki. W rezultacie, w latach 40. kulminacyjne przepływy w Gdowie i w Proszówkach były podobne pomimo znacznego przyrostu objętości fal w tym odcinku. Taki czasowy przebieg zmian transformacji fal powodziowych, wyrażający się stopniowym wzrostem zdolności rzeki do

http://rcin.org.pl

łagodzenia przenoszonych fal, jest charakterystyczny dla kształtującego się systemu niskich przepływów (por. Burkham 1976b).

Najbardziej zbliżoną do systemu niskich przepływów była Raba w latach 40.; dla tego okresu brak jednakże dokumentacji kartograficznej. Seria dużych powodzi w latach 1948-1951 spowodowała najprawdopodobniej retrogresywne zmiany w morfologii systemu rzecznego, których efektem było przywrócenie w latach 50. warunków do zwiększania się kulminacyjnych przepływów wraz ze wzrostem objętości fal. W wyniku ponownie podjętych w latach 50. prac regulacyjnych nastąpiło wyprostowanie i zwężenie koryta; ich efektem było gwałtowne obniżanie się dna rzeki. W miarę pogłębiania się koryta coraz wyraźniej zaznaczała się tendencja do zwiększania kulminacyjnych przepływów z biegiem rzeki. Wzrastającej koncentracji odpływu w szczycie fal powodziowych towarzyszyło skracanie czasu trwania fal. Wzrost kulminacji fali w odcinku Gdów-Proszówki był największy dla przepływów pełnokorytowych w górnym końcu odcinka i zmniejszał się przy coraz niższych przepływach korytowych lub coraz wyższych przepływach pozakorytowych.

EWOLUCJA SYSTEMU RZECZNEGO ŚRODKOWEJ I DOLNEJ RABY W OSTATNICH 200 LATACH

Na podstawie szczegółowych informacji zaprezentowanych w poprzednich rozdziałach, zostanie przedstawiona poniżej krótka charakterystyka rozwoju systemu rzecznego Raby w najmłodszym okresie historycznym.

Ewolucję Raby w XIX w. cechowało prostowanie, spłycanie i rozszerzanie się koryta rzecznego. Zaznaczało się wówczas stopniowe przemieszczanie się w dół rzeki transformacji koryta o dużej lub umiarkowanej krętości w koryto o małej krętości. W ciągu XIX w. szerokość koryta zwiększyła się dwu-trzykrotnie w środkowym i 1,5-2 razy w dolnym biegu rzeki. Urozmaicone facjalnie osady łach meandrowych zostały zastąpione lub zasypane przez dość jednorodne osady łach korytowych rzeki o małej krętości, bardziej gruboziarniste od osadów budujących łachy meandrowe. W XIX w.w korycie Raby deponowane były bardzo źle wysortowane żwiry o luźnym lub normalnym upakowaniu. Znaczny wzrost rozmiarów największych otoczaków zawartych w osadach łach świadczy o zwiększeniu się kompetencji rzeki. Zmiana osadów od deponowanych przez przepływy podkrytyczne do osadów przepływów nadkrytycznych wskazuje na agradację kontrolowaną od góry.

Przedstawione zmiany wskazują na zwiększenie się w XIX w. wielkości i/lub częstotliwości powodzi oraz udziału obciążenia dennego w całkowitym obciążeniu rzeki. Zwiększenie średniej rocznej powodzi przypisano znacznej wilgotności schyłkowej fazy małej epoki lodowej oraz zmniejszaniu się retencyjności dorzecza wskutek działalności człowieka. Rezultatem gwałtownego odpływu wód opadowych było formowanie się fal powodziowych o wysokich wartościach kulminacyjnych przepływów i małej objętości.

http://rcin.org.pl

Intensyfikacja aktywności rolniczej w górskiej części dorzecza musiała spowodować wzrost dostawy osadu ze stoków do koryta rzecznego. Efektem tego było rozszerzanie i spłycanie koryta zwiększające zdolność rzeki do przenoszenia materiału dennego i przywracające w ten sposób równowagę pomiędzy dostawą osadu a zdolnością transportową rzeki.

Wykształcony w ciągu XIX w. system korytowy Raby był dostosowany do przenoszenia wysokich przepływów. Fale gwałtownych powodzi, rodzących się w górskiej części dorzecza, uruchamiały znaczne ilości materiału dennego. Po przejściu szczytu fali ulegał on gwałtownej depozycji, a szybkie opadanie wód powodziowych uniemożliwiało przemywanie i sortowanie materiału dennego. Wysokie wartości naprężeń ścinających na dnie w czasie powodzi powodowały przenoszenie znacznie grubszych ziarn niż te, które były transportowane we wcześniej istniejącym korycie niskich przepływów.

W wyniku prowadzonych od początku obecnego stulecia prac regulacyjnych nastąpiło skrócenie biegu rzeki i zwężenie jej koryta. Jednocześnie, wskutek regulacji potoków górskich, budowy licznych zapór przeciwrumowiskowych, stopniowego zaniechania orki zgodnie z nachyleniem stoków oraz terasowania stoków, zaznaczyło się stopniowe zmniejszanie dostawy rumowiska z górskiej części dorzecza. Wzrost zdolności transportowej rzeki przy jednoczesnym zmniejszaniu się jej obciążenia spowodował stopniowe wymywanie drobniejszych ziarn z materiału dennego oraz pogłębianie koryta.

W wyniku zmniejszenia się dostawy materiału klastycznego i zmienionych warunków odpływu nastąpiło obniżenie udziału obciążenia dennego w całkowitym obciążeniu rzeki oraz przekształcenie układu facji osadów łach. Selektywne wymywanie drobnych ziarn z materiału dennego prowadziło do wzrostu średniej średnicy ziarna osadów korytowych. Ustało formowanie się żwirów luźno upakowanych, coraz większego znaczenia nabierała natomiast depozycja żwirów ciasno upakowanych oraz formowanie się bruków korytowych i skupień otoczaków na powierzchni łach. Morfologiczną konsekwencją obniżenia udziału obciążenia dennego w całkowitym obciążeniu rzeki było przekształcenie się koryta z wielonurtowego w koryto jednonurtowe o tendencji do meandrowania. Jednak możliwość meandrowania rzeki jest ograniczona przez budowle regulacyjne. Pogłębienie koryta, szczególnie szybkie w ostatnich trzech dekadach, wyniosło dotychczas około 2 m w dolnym biegu i około 3 m w środkowym biegu rzeki.

Faza wysokich przepływów powodziowych w XIX w. wywarła trwały wpływ na funkcjonowanie systemu rzecznego. Zwiększona kompetencja rzeki i skrócenie jej koryta spowodowały, że otoczaki o określonej wielkości zostały w czasie tej fazy przemieszczone na większą niż poprzednio, odległość od swych obszarów źródłowych. W rezultacie osady współczesnych łach meandrowych są znacznie bardziej gruboziarniste od osadów formowanych we wcześniejszym okresie dominacji niskich przepływów (ryc. 12). Zmiana ta znalazła bezpośrednie odzwierciedlenie w formach dna i strukturach sedymentacyjnych tworzonych przez te osady. Formowane na dawnych łachach meandrowych diuny i związane

http://rcin.org.pl

z nimi zestawy rynnowego warstwowania przekątnego dużej skali na łachach współczesnych już się nie tworzą. Ponadto zwiększone rozmiary materiału dennego umożliwiają rzece osiąganie stanu równowagi przy większym spadku (por. Lane 1955).

Rezultatem bocznej migracji rzeki w okresie dominacji wysokich przepływów powodziowych było usunięcie dotychczasowej grubej pokrywy mułowo-piaszczystych osadów pozakorytowych (ryc. 3). Agradujące osady korytowe zostały wówczas pokryte niezbyt grubą warstwą osadów piaszczystych. Dziewiętnastowieczna równina aluwialna została następnie głęboko rozcięta, współczesne brzegi rzeki są więc utworzone niemal wyłącznie z niekohezyjnego materiału, w znacznej mierze ze żwirów lub żwirów piaszczystych (ryc. 3, 6, 11; fot. 1). Taka budowa brzegów ułatwia ich erozję a także, poprzez dostarczanie na dno koryta stosunkowo grubych ziam, przyczynia się do zwiększenia oporu stawianego przepływowi przez powierzchnię dna i kształtowania w ten sposób spadku rzeki.

W wyniku regulacji koryta Raby w obecnym stuleciu i wywołanego przez nią pogłębiania koryta uformował się system rzeczny z wąskim i głębokim korytem o dużym spadku i małej krętości. Istnienie takiego systemu warunkowane jest obecnością budowli regulacyjnych. W miarę pogłębiania się koryta zaznaczała się postępująca koncentracja przepływów powodziowych w strefie korytowej, przy coraz mniejszym udziale przepływu poza korytem. Jednocześnie coraz wyraźniej zaznaczała się tendencja do zwiększania kulminacyjnych przepływów z biegiem rzeki. Uformowany wskutek regulacji system rzeczny Raby cechowała zdolność do zwiększania koncentracji odpływu w szczycie przemieszczających się nim fal powodziowych przy jednoczesnym skracaniu czasu trwania powodzi. Ta tendencja do szybkiego zwiększania się w pogłębionym odcinku rzeki koncentracji fal i ich kulminacyjnych przepływów w istotny sposób zmodyfikowała przebieg zmian maksymalnych rocznych przepływów Raby w ostatnich dekadach - ponad dwukrotnemu zmniejszeniu się maksymalnych przepływów w Gdowie w latach 1951-1980, uwarunkowanemu najprawdopodobniej klimatycznie (Stachy 1984), odpowiadała w Proszówkach redukcja rocznych kulminacji zaledwie o 22% (tab. 2).

ZMIANY FUNKCJONOWANIA SYSTEMÓW RZECZNYCH INNYCH KARPACKICH DOPŁYWÓW WISŁY W XX W.

Ocena reprezentatywności zaistniałych w ostatnich 200 latach zmian funkcjonowania systemu rzecznego Raby jest konieczna do sformułowania uogólnionych wniosków o roli człowieka w modyfikowaniu procesów fluwialnych kształtujących w bezpośredniej przeszłości systemy rzeczne karpackich dopływów Wisły. W obecnej pracy ocenę tę z konieczności ograniczono do tych aspektów zmian funkcjonowania systemów rzecznych, których porównanie nie wymagało badań terenowych.

Na podstawie opublikowanych wyników badań innych autorów można stwierdzić, że naturalne prostowanie się, rozszerzanie i spłycanie koryta rzecznego,

http://rcin.org.pl

połączone z formowaniem się roztokowego układu koryta oraz agradacją w obszarze równiny aluwialnej, było typowym kierunkiem ewolucji karpackich dopływów Wisły w XIX w. Taki trend rozwojowy stwierdzono w dolinach: Małej Wisły (Niedziałkowska i in. 1985), Dunajca (Klimek, Trafas 1972), Wisłoki (Klimek, Starkel 1974; Alexandrowicz i in. 1981) i Sanu (Szumański 1977, 1986).

POGŁĘBIANIE SIĘ KARPACKICH DOPŁYWÓW WISŁY W OSTATNICH KILKUDZIESIĘCIU LATACH

Dominującą w XX w. tendencją ewolucyjną karpackich dopływów Wisły było pogłębianie się ich koryt. Obniżanie się minimalnych rocznych stanów wody w posterunkach wodowskazowych w środkowym i dolnym biegu tych rzek rozpoczęło się z reguły z początkiem XX w. lub w końcu XIX w. i do 1980r. wyniosło od około 1,5 do ponad 3 m (ryc. 19). Analiza wielkości pogłębienia się rzek w obrębie karpackiej części dorzecza Wisły (ryc. 19) oraz przebiegu obniżania się minimalnych stanów w poszczególnych przekrojach wodowskazowych umożliwia sformułowanie następujących wniosków:

1. Wielkość wcięcia się karpackich dopływów Wisły w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat zwiększa się z zachodu na wschód. We wschodniej części przedpola Karpat krętość tych rzek w okresie poprzedzającym regulację koryt była znacznie większa niż w części zachodniej, tutaj też skrócenie ich biegu w XX w. było największe (Klimek 1987); ku wschodowi wzrasta także długość pogórskich i nizinnych odcinków karpackich dopływów Wisły. Zatem wielkość współczesnego wcięcia się rzek karpackich odzwierciedla najprawdopodobniej względny wzrost ich spadku w wyniku regulacji oraz sumowanie się, w drodze erozji wstecznej, degradacyjnego efektu pogłębienia kolejnych odcinków danej rzeki (pogłębienie jest więc proporcjonalne do długości uregulowanego biegu rzeki).

2. W ostatnich dziesięcioleciach zaznacza się wyraźne zwiększenie tempa wcinania się rzek (ryc. 15, 20; zob. też Klimek 1983, 1987). Przyczyny tego wzrostu można upatrywać w intensyfikacji prac regulacyjnych w tym okresie, na które lokalnie nałożyły się także inne formy ingerencji człowieka w przebieg procesów fluwialnych, takie jak: intensywna eksploatacja żwirów z koryta rzecznego (Wisłoka - Osuch 1968) czy przegrodzenie rzeki zbiornikiem zaporowym (Dunajec poniżej Czchowa, Wisła - przekrój Goczałkowice).

3. Bezpośrednio poniżej ujścia intensywnie pogłębianego dopływu w korycie rzeki głównej obserwuje się zahamowanie pogłębiania lub nawet powolną agradację. Widoczne jest to np. w Sanie poniżej ujścia Wisłoka, gdzie szybkie pogłębianie się rzeki na początku stulecia zostało następnie zahamowane wraz z rozpoczęciem się gwałtownego wcinania się Wisłoka w latach 50. Bezpośrednio poniżej ujścia Raby zaznaczyło się jedynie nieznaczne pogłębienie koryta Wisły, mimo że w odcinku krakowskim w ciągu ostatnich stu kilkudziesięciu lat wcięła się ona o ponad 3 m (Punzet 1981). Świadczy to, iż część materiału pochodzącego z rozmywania dna dopływu składana jest bezpośrednio poniżej jego ujścia

http://rcin.org.pl

w korycie rzeki głównej, której spadek - a tym samym i siła transportowa - jest z reguły znacznie mniejszy.

Pogłębianie się koryta Raby w ciągu XX w., wielkość wcięcia rzeki, a także wzrost tempa pogłębiania w ostatnich dekadach pozostają zatem w zgodzie ze współczesną tendencją ewolucyjną karpackich dopływów Wisły.

ZMIANY ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY MAKSYMALNYMI PRZEPŁYWAMI NOTOWANYMI WZDŁUŻ BIEGU INNYCH KARPACKICH DOPŁYWÓW WISŁY

Przedstawiona w rozdziale pt. *Zmiany przepływów powodziowych Raby w XX w.*, analiza zaistniałych w XX w. zmian zależności pomiędzy kulminacyjnymi przepływami Raby w przekrojach wodowskazowych Gdów i Proszówki wskazuje na istnienie związku przyczynowego pomiędzy obniżaniem się dna rzeki, w wyniku regulacji jej koryta, a wzrostem koncentracji fal powodziowych przemieszczających się pogłębionym korytem. Istnienie takiego związku przyczynowego postanowiono sprawdzić w odniesieniu do innych karpackich dopływów Wisły. Do analizy wybrano odcinki tych rzek spełniające dwa warunki: 1) znaczne pogłębienie się rzeki nastąpiło w kilku ostatnich dziesięcioleciach, a więc w okresie, dla którego istnieją wiarygodne oszacowania maksymalnych przepływów; 2) odcinek jest wystarczająco długi, aby zachodziła w nim zauważalna transformacja fali powodziowej, a jednocześnie przyrost powierzchni dorzecza, a tym samym objętości fali w odcinku jest jak najmniejszy.

Wymienione kryteria są spełnione dla kilku odcinków Skawy, Wisłoki i Wisłoka. Dla wszystkich tych odcinków obserwuje się czasową zbieżność gwałtownego pogłębiania się rzeki i zwiększania kulminacyjnych przepływów w dolnym końcu odcinka. Synchroniczność obu tych procesów wskazuje, że w warunkach ustabilizowanej krętości rzeki pogłębianie koryta znajduje odzwierciedlenie w zwiększaniu przepływów powodziowych. W istocie metodą prób i błędów można znaleźć taki współczynnik korekcji, przy którym krzywa kumulacyjna „poprawionego" ilorazu maksymalnych rocznych przepływów niemal naśladuje przebieg krzywej przedstawiającej zmiany pionowego położenia koryta rzecznego w odcinku. Jeśli natomiast użyje się niższych lub wyższych wartości współczynnika korekcji podobieństwo obu krzywych zanika. Wymienione prawidłowości zilustrowano na przykładzie odcinka Wisłoki pomiędzy Łabuziami a Brzeźnicą (ryc. 20) - widoczna jest tu bardzo duża zgodność przebiegu obu krzywych, a także fakt, iż właściwe dobranie współczynnika korekcji ułatwia dostrzeżenie zależności pomiędzy zmianami pionowego położenia koryta a zmianami transformacji kulminacyjnych przepływów w analizowanym odcinku rzeki.

Znajdowanie korekcyjnego współczynnika najlepszego dopasowania na drodze empirycznej świadczy, że użycie w toku analizy przepływów powodziowych Raby (ryc. 15) współczynnika korekcyjnego o wartości odpowiadającej wzrostowi średniego rocznego przepływu w odcinku Gdów-Proszówki przypadkowo zaowocowało uzyskaniem zadowalającego przebiegu krzywej „poprawionego" ilorazu maksymalnych przepływów. Powstaje zatem pytanie o znaczenie

http://rcin.org.pl

współczynnika korekcyjnego. Według autora wartość korekcyjnego współczynnika najlepszego dopasowania odpowiada przeciętnej zmianie kulminacyjnego przepływu średniej rocznej powodzi, jaka cechowała dany odcinek w czasie bezpośrednio poprzedzającym analizowany okres. Przyjęcie takiego wytłumaczenia pozwala wyjaśnić, dlaczego korekcyjny współczynnik najlepszego dopasowania różni się od średniej z analizowanego okresu wartości ilorazu maksymalnych rocznych przepływów, oraz dlaczego wartości współczynnika mogą być mniejsze od 1 w odcinkach, które musiała poprzednio cechować silna tendencja do spłaszczania się fal powodziowych (patrz: ryc. 20). Zastosowanie współczynnika korekcyjnego pokazuje zatem, jak zmieniły się od początku analizowanego okresu warunki transformacji maksymalnych rocznych przepływów w danym odcinku.

W niektórych z badanych odcinków karpackich dopływów Wisły wraz ze stabilizowaniem się dna rzeki na niższym poziomie po okresie gwałtownego pogłębiania koryta zaznacza się zmniejszanie się ilorazu maksymalnych rocznych przepływów (ryc. 20 - lata 80.). Prowadzi to do ustalenia się nowej zależności pomiędzy kulminacyjnymi przepływami w dolnym i górnym końcu pogłębionego odcinka rzeki, przy czym przeciętne wartości ilorazu maksymalnych rocznych przepływów są teraz niższe niż w okresie gwałtownego pogłębiania się koryta, lecz wyższe niż przed rozpoczęciem wcinania się rzeki.

PRZYCZYNY ZWIĘKSZANIA SIĘ KONCENTRACJI FAL POWODZIOWYCH W RZECE UREGULOWANEJ

Poszukując wyjaśnienia zaistniałych w ostatnich dziesięcioleciach zmian przepływów powodziowych Raby oraz innych karpackich dopływów Wisły należy zwrócić uwagę na dwa zjawiska. Po pierwsze, w miarę postępującego wcinania się Raby coraz bardziej wzrastała pomiędzy Gdowem a Proszówkami wielkość fali o określonej kulminacji w górnym końcu odcinka, a jednocześnie coraz bardziej rozszerzał się przedział wielkości fal, których koncentracja wzrastała w tym odcinku (tab. 6). Po drugie, w warunkach nadmiernie zwiększonego przez regulację koryta spadku rzeki, obniżanie się dna nie było kompensowane depozycją na brzegach koryta. W rezultacie, w miarę pogłębiania się koryta, określonemu stanowi wody odpowiadał coraz wyższy przepływ (tab. 5) lub, z kolei, ten sam przepływ mógł być osiągany przy coraz niższym stanie. Musiało zatem zachodzić stopniowe zmniejszanie się szerokości i wzrost średniej głębokości związanej z określonym przepływem oraz koncentracja coraz większej części danego przepływu pozakorytowego w strefie korytowej (pomimo pewnej redukcji pojemności samego koryta).

Według autora, zmiany transformacji fal powodziowych Raby i innych rzek karpackich, prowadzące do wzrostu ich koncentracji z biegiem rzeki, są łącznym efektem zmniejszania się retencji wód powodziowych w strefie pozakorytowej (por. Brookes 1987) i przyspieszania przepływu skoncentrowanego w pogłębionym korycie. Pierwszy z tych czynników wydaje się mieć ograniczone znaczenie, podlegając działaniu ujemnego sprzężenia zwrotnego - wzrost kulminacji fali

http://rcin.org.pl

w danym odcinku wskutek koncentracji przepływu w strefie korytowej spowoduje poniżej zwiększone zatopienie równiny aluwialnej, co z kolei będzie sprzyjać spłaszczaniu się fali. Ponadto zmniejszenie się retencji wód powodziowych w obszarze pozakorytowym nie tłumaczy, dlaczego w miarę postępującego wcinania się rzeki zaznaczał się wzrost koncentracji przepływów korytowych.

W głębokim i prostym korycie rzeki uregulowanej względna gładkość przepływu (ang. *relative smoothness of flow* - stosunek głębokości do średniej wysokości, na jaką ziarna materiału dennego wystają ponad dno) zwiększa się w miarę wzrostu przepływu szybciej niż w szerokim i płytkim korycie systemu wysokich przepływów lecz wynikające z tego względne zmniejszanie się oporu stawianego przepływowi nie jest tu kompensowane hamowaniem przepływu w obszarze pozakorytowym, typowym dla systemu niskich przepływów. Powoduje to szybszy spływ środkowych części fali o większej objętości, które nakładają się na niższe, poprzedzające cześci fali (por. Leopold, Miller 1956), co prowadzi do wzrostu kulminacyjnego przepływu z biegiem rzeki.

Zmniejszanie się ilorazu maksymalnych przepływów, towarzyszące stabilizacji dna rzeki po okresie gwałtownego pogłębiania koryta, może być spowodowane dwoma procesami. Wzrost frakcji osadów korytowych odgrywa ważną rolę w przywracaniu stanu równowagi, a względna gładkość przepływu będzie się zmniejszać wraz z rosnącymi rozmiarami ziarn w materiale dennym. Ponadto po okresie pogłębiania rzeka uregulowana przechodzi zazwyczaj w stadium formowania się łach w korycie i depozycji na jego brzegach (Simon 1989), co prowadzi do zmniejszenia pojemności koryta, a w dalszej konsekwencji do retrogresywnej zmiany relacji szerokość/średnia głębokość dla danego przepływu. Wyjaśnia to, dlaczego stopniowe wygasanie tendencji do pogłębiania się koryta Raby w latach 80. nie znalazło wyraźnego odzwierciedlenia w zmniejszaniu się ilorazu maksymalnych przepływów (zob. rys. 15) - przegrodzenie rzeki zbiornikiem zaporowym powyżej pogłębionego odcinka powstrzymało dopływ materiału dennego, uniemożliwiając akumulację osadu w korycie i zmniejszanie jego pojemności.

TRANSFORMACJA FAL POWODZIOWYCH W RÓŻNYCH TYPACH SYSTEMÓW RZECZNYCH

Charakter transformacji fal powodziowych zależy od typu systemu rzecznego (Burkham 1976b). Rozwijając idee D.A. Burkhama, w niniejszej pracy zaproponowano model wyjaśniający, jak różne typy systemów rzecznych oddziałują na przenoszone fale powodziowe oraz dlaczego system rzeki uregulowanej funkcjonuje odmiennie od naturalnych systemów rzecznych (ryc. 21). W rzekach strefy umiarkowanej, dla których infiltracja wód powodziowych w aluwia nie odgrywa istotnej roli, wpływ systemu rzecznego na charakter transformacji fal powodziowych wydaje się być uzależniony od zmian w układzie sił oporu towarzyszących zmianom przepływu.

http://rcin.org.pl

Istotnym czynnikiem wpływającym na transformację przepływów korytowych jest najprawdopodobniej wzrost średniej głębokości w miarę wzrostu przepływu. Zwiększanie się średniej głębokości powoduje, że maleje oddziaływanie elementów szorstkości dna (ziarn i form dennych), a wynikające z tego względne obniżenie się oporu sprawia, że wyższe części fali przemieszczają się szybciej od poprzedzających je niższych części fali. Efektem tego jest doganianie i translacyjne nakładanie się na siebie sąsiadujących części fali, co prowadzi do zwiększenia kulminacyjnego przepływu. Im wyższy przepływ korytowy (bliższy przepływowi pełnokorytowemu), tym bardziej kulminacja fali może zostać zwiększona (ryc. 17).

W korytach naturalnych systemów rzecznych opór wynikający z kształtu koryta musi być znacznie większy niż w prostym, płaskodennym i mającym wyrównany spadek korycie rzeki uregulowanej. W naturalnych systemach rzecznych duże siły oporu wynikającego z kształtu koryta przeciwdziałają szybkiemu obniżaniu się całkowitego oporu wraz ze wzrostem przepływu. W korycie rzeki uregulowanej określonej kulminacji fali w górze odcinka odpowiada zatem wyższy przepływ kulminacyjny w dolnym końcu odcinka niż w korycie naturalnego systemu rzecznego (ryc. 16).

Szorstkość hydrodynamiczna w obszarze pozakorytowym jest z reguły znacznie większa niż w korycie (Ven Te Chow 1959). Wywołuje to duże różnice prędkości przepływu pomiędzy strefą pozakorytową a korytem, co prowadzi do wydłużania czasu trwania fali i zmniejszania jej kulminacyjnego przepływu (Burkham 1976b). Stopień zatopienia równiny aluwialnej przez określony przepływ powodziowy jest jednak różny w poszczególnych typach systemów rzecznych. Warunkuje to odmienny charakter transformacji przepływów pozakorytowych w różnych systemach rzecznych (ryc. 21).

W systemie niskich przepływów stosunkowo znaczna część całkowitego przepływu powodziowego przenoszona jest w obszarze pozakorytowym. W systemie rzeki uregulowanej przepływ koncentruje się w strefie korytowej - w pogłębionym korycie i ponad nim - a ilość wody przenoszonej poza korytem jest stosunkowo mała. Ta różnica wynika nie tylko z większej pojemności pogłębionego koryta lecz również ze zwiększonego spadku rzeki uregulowanej. Powoduje on zwiększenie prędkości przepływu (zob. ryc. 10) kompensowane redukcją pola przekroju przepływowego. System wysokich przepływów charakteryzuje się warunkami przepływu pośrednimi między typowymi dla systemu niskich przepływów i systemu rzeki uregulowanej.

Dwa zasadnicze czynniki wpływają na transformację przepływów pozakorytowych. Pierwszym z nich są różnice oporu stawianego przepływowi w profilu podłużnym fali powodziowej, których efektem jest szybszy spływ wyższych części fali. Działanie tego czynnika zmierza do skracania czasu trwania fali powodziowej i zwiększania jej kulminacyjnego przepływu. Drugim czynnikiem jest różnica szorstkości, a tym samym i prędkości przepływu pomiędzy strefą pozakorytową a korytem, co prowadzi do wydłużania i obniżania fali powodziowej. Pierwszy czynnik odgrywa największą rolę w systemie rzeki uregulowanej, gdyż zwiększanie się przepływu pociąga tu za sobą

http://rcin.org.pl

największy przyrost średniej głębokości (a tym samym względnej gładkości przepływu). Natomiast znaczenie drugiego czynnika jest największe w systemie niskich przepływów, gdyż tutaj znaczna część całkowitego przepływu powodziowego przenoszona jest poza wąską strefą korytową.

W przedstawionym modelu rozpatrzono sytuację idealną, w której zmiana kształtu fali wynika wyłącznie z oddziaływania mechanizmów transformacji. Jednakże wpływ mechanizmów transformacji na zmiany kształtu fali powodziowej zależy także od tego, czy w danym odcinku ma miejsce boczny dopływ wody (por. Burkham 1976b).

Przy braku bocznego dopływu wody kulminacja fali powodziowej przenoszonej przez system niskich przepływów może zostać znacznie obniżona. Jeżeli istnieje boczny dopływ wody, to zdolność systemu niskich przepływów do redukcji wielkości fali zmniejsza się, jednakże oddziaływanie systemu zapobiega wzrostowi kulminacyjnych przepływów pomimo znacznego przyrostu objętości fali. W strefie półsuchej obserwowano utrzymywanie się wielkości i kształtu fal powodziowych przenoszonych przez system wysokich przepływów (Burkham 1976b), lecz boczny dopływ wody powinien nieco zwiększyć kulminacyjne przepływy fal przemieszczających się takim systemem. Wreszcie system rzeki uregulowanej zwiększa koncentrację fal powodziowych, a boczny dopływ wody przyczynia się tu do dodatkowego wzrostu kulminacyjnych przepływów.

REAKCJA RZEKI GÓRSKIEJ NA REGULACJĘ KORYTA

Przedstawiona w poprzednich rozdziałach charakterystyka procesów wzbudzonych przez regulację koryta Raby, a także innych karpackich dopływów Wisły, umożliwia sformułowanie modelu reakcji rzeki na regulację koryta (ryc. 22).

Zwiększenie spadku rzeki wskutek skrócenia jej biegu i zwężenie koryta wywołują wzrost średniej prędkości przepływu, naprężeń ścinających na dnie i mocy strumienia. By skompensować ten wzrost, rzeka uruchamia i transportuje większe ilości materiału dennego, co prowadzi do pogłębiania koryta. Wzrost pojemności koryta w miarę postępującego obniżania się dna rzeki umożliwia zmniejszanie się wymienionych parametrów (zgodnie z równaniem ciągłości przy określonym przepływie średnia prędkość maleje wraz ze wzrostem pola przekroju przepływowego), prowadzi zatem do przywracania stanu równowagi.

Zwiększenie spadku rzeki bezpośrednio powyżej pogłębionego odcinka uruchamia erozję wsteczną. W wyniku cofania się bystrz lub progów erozyjnych pogłębienie koryta może sięgnąć znacznie powyżej regulowanego odcinka zarówno w rzece głównej, jak i w jej dopływach (Daniels 1960; Emerson 1971; Simon 1989). Wzrost głębokości, a także zmniejszenie spadku koryta, wywołane erozją wsteczną, przyczyniają się do przywracania stanu równowagi.

http://rcin.org.pl

Zwiększanie się pojemności koryta w miarę obniżania dna ma dwojakie znaczenie. Z jednej strony zwiększanie się pola przekroju przepływowego koryta umożliwia obniżenie średniej prędkości przepływu związanej z określonym przepływem korytowym. Z drugiej strony wzrost pojemności koryta prowadzi do koncentracji coraz większych przepływów powodziowych w wąskiej strefie korytowej. Ta postępująca koncentracja przepływu zwiększa prędkości przepływu w korycie związane z określonym przepływem powodziowym. Uruchamia to mechanizm dodatniego sprzężenia zwrotnego - dokonane już pogłębienie koryta sprzyja dalszemu obniżaniu dna (por. Daniels 1960). Ponadto zmniejszenie retencji wód powodziowych w strefie pozakorytowej i przyspieszanie przepływu w miarę, jak fala powodziowa przemieszcza się pogłębionym korytem, prowadzi do szybkiego wzrostu kulminacyjnych przepływów w dół rzeki. Pojemność koryta poniżej regulowanego odcinka wzrasta, dostosowując się do przenoszenia zwiększonych przepływów (Brookes 1987). Tak daleko, jak te zwiększone przepływy są przenoszone przez uregulowane koryto, jedynie obniżanie dna umożliwia rzece zwiększenie pojemności koryta. Zatem koncentracja przepływu uruchamia także inny mechanizm dodatniego sprzężenia zwrotnego - pogłębienie koryta poniżej regulowanego odcinka obniża lokalną bazę erozyjną, co po jakimś czasie może wywołać obniżenie dna powyżej na drodze erozji wstecznej.

Efektem zwiększenia energii przepływu, wskutek regulacji koryta, jest wymywanie drobniejszych ziarn z materiału dennego. Prowadzi to do wzrostu średniej średnicy osadów korytowych oraz do formowania bruków korytowych na powierzchni dna. Prędkość przepływu zmniejsza się wskutek wzrastającego oporu wynikającego z szorstkości dna. Ponadto wraz ze wzrostem frakcji materiału dennego, zmianami upakowania osadu oraz rozwojem bruku korytowego i skupień otoczaków na powierzchni dna maleje podatność ziarn na uruchomienie. Jest to istotne, gdyż jakiekolwiek pogłębienie dna rzeki wskutek wzrostu prędkości przepływu może się dokonać jedynie poprzez wprawienie w ruch ziarn materiału dennego. Obniżenie się podatności ziarn na uruchomienie oznacza więc, że nowy stan równowagi może się ustalić przy wyższych niż przed regulacją koryta, wartościach prędkości przepływu i mocy strumienia. Zmniejszona mobilność ziarn na powierzchni dna może także spowodować, iż wtórny wzrost prędkości przepływu, wywołany koncentracją przepływu w pogłębionym korycie, nie znajdzie bezpośredniego odzwierciedlenia w kontynuacji obniżania dna rzeki. Jednakże retrogresywne zmiany charakteru osadów korytowych (np. zniszczenie bruku korytowego oraz obniżenie średniej średnicy materiału dennego w wyniku eksploatacji największych otoczaków z powierzchni łach) mogą spowodować dalsze obniżanie dna, uruchamiając mechanizm dodatniego sprzężenia zwrotnego pomiędzy pogłębieniem koryta i prędkością przepływu.

http://rcin.org.pl

UWAGI KOŃCOWE

Zawarte w poprzednich rozdziałach informacje wskazują, że ingerencja człowieka w przebieg procesów fluwialnych kształtujących w bezpośredniej przeszłości systemy rzeczne karpackich dopływów Wisły wywarła istotny wpływ na zmiany funkcjonowania tych systemów. Poniżej zamieszczono kilka uwag, w których sformułowano ocenę roli człowieka w modyfikowaniu współczesnych procesów fluwialnych w karpackiej części dorzecza Wisły oraz wskazano działania mogące złagodzić w przyszłości negatywne efekty dotychczasowej ingerencji.

ODRĘBNOŚĆ SYSTEMU RZEKI UREGULOWANEJ

Zwężenie koryta i zwiększenie spadku rzeki, w wyniku regulacji jej koryta, prowadzą do tworzenia się systemu rzecznego z prostym, wąskim i głębokim korytem o dużym spadku. Morfologia takiego systemu różni się więc od naturalnych systemów rzecznych - zarówno systemu niskich przepływów powodziowych, jak i systemu wysokich przepływów. W istocie istnienie takiego systemu warunkowane jest obecnością budowli regulacyjnych.

Odmienna charakterystyka morfologiczna systemu rzeki uregulowanej znajduje odzwierciedlenie w specyficznym działaniu mechanizmów transformacji przepływów powodziowych. Koncentracja przepływu w korycie znacznie ogranicza retencję wód powodziowych w obszarze pozakorytowym. Ponadto wraz ze wzrostem przepływu szybko zmniejsza się tu oddziaływanie szorstkich elementów na dnie, co prowadzi do przyspieszania przepływu skoncentrowanego w pogłębionym korycie. W efekcie, w trakcie spływu wód powodziowych pogłębionym korytem koncentracja fali powodziowej wzrasta - przepływ kulminacyjny zwiększa się, a czas trwania fali powodziowej maleje.

REGULACJA KORYT JAKO ISTOTNA PRZYCZYNA WSPÓŁCZESNEGO WZROSTU ZAGROŻENIA POWODZIOWEGO W DORZECZU GÓRNEJ WISŁY

W dorzeczu górnej Wisły znacznie wzrosła w obecnym stuleciu częstość występowania ekstremalnie wysokich stanów wody (Punzet 1981), a zarazem zwiększyło się prawdopodobieństwo pojawiania się powodzi o określonym przepływie kulminacyjnym (Punzet 1972, 1973, 1985). Ta zwiększona częstotliwość pojawiania się powodzi wywołana jest najprawdopodobniej obniżaniem się retencyjności zlewni, wskutek działalności człowieka, oraz regulacją koryt rzecznych (Punzet 1981; Klimek 1987). Analiza zmian wielkości przepływu kulminacyjnego o określonym prawdopodobieństwie na podstawie wieloletnich ciągów maksymalnych rocznych przepływów z danego przekroju, powszechnie stosowana w badaniach hydrologicznych, nie pozwala jednak ocenić,

http://rcin.org.pl

jaką rolę odegrał każdy z wymienionych czynników w zaistniałej zmianie warunków formowania się fal powodziowych.

Zaproponowana przeze mnie metoda umożliwia, poprzez porównanie maksymalnych przepływów w dolnym i górnym końcu odcinka rzeki, oddzielenie zmian przepływów powodziowych w analizowanym odcinku od zmian zaistniałych w wyższej cześci zlewni. Następnie, dzięki zastosowaniu tzw. współczynnika korekcji, możemy zobaczyć jak w ciągu badanego okresu zmieniły się przepływy powodziowe w danym odcinku (w wyniku transformacji fal oraz przyrostu ich objętości). Wreszcie porównanie czasowego przebiegu „poprawionego" ilorazu maksymalnych przepływów i zmian pionowego położenia koryta w badanym odcinku umożliwia oszacowanie wpływu zmian koryta na obserwowane zmiany wielkości powodzi.

W toku tak przeprowadzonej analizy dla badanych odcinków karpackich dopływów Wisły uzyskano dużą zbieżność przebiegu „poprawionego" ilorazu maksymalnych przepływów i zmian pionowego położenia koryta rzecznego. Świadczy to, że gwałtowne wcinanie się tych rzek, wskutek regulacji ich koryt, odegrało bardzo ważną rolę w obserwowanym współcześnie wzroście zagrożenia powodziowego. Zwiększenie się kulminacyjnych przepływów w pogłębionym odcinku rzeki jest największe dla przepływów pełnokorytowych. Maleje ono tym bardziej, im większy jest przepływ pozakorytowy w górze odcinka. Należy jednak pamiętać, że w dorzeczu górnej Wisły szkody spowodowane przez małe i średnie powodzie pojawiające się częściej niż raz na 10 lat wyniosły około 46% całkowitych szkód powodziowych w tym stuleciu (Roszkowski, Hennig 1991) - dlatego też znaczny wzrost wielkości takich powodzi nie jest bez znaczenia.

KONTYNUACJA POGŁĘBIANIA KORYT RZEK KARPACKICH - PROGNOZA I WSKAZANIA PRAKTYCZNE

W 1987r. nastąpiło napełnienie zbiornika w Dobczycach. Zbiornik ten będzie przechwytywał cały ładunek denny i prawie cały (96%) ładunek zawiesinowy donoszony z wyższego odcinka Raby (Łajczak 1986). Poniżej zapory można oczekiwać nasilonej erozji wgłębnej wskutek zwiększonej prędkości przepływu wód niedociążonych rumowiskiem (Petts 1979; Cyberski 1984; Williams, Wolman 1984). W dotychczas pogłębionym odcinku rzeki zaznaczać się będzie wpływ koncentracji przepływów powodziowych w strefie korytowej podtrzymujący nadal tendencję do erozji wgłębnej.

Dostosowanie się rzeki do zmienionych warunków przepływu wody i transportu rumowiska w jej korycie to proces długotrwały (Burkham 1972), dokonujący się w ciągu co najmniej kilkudziesięciu lat po ustaniu czynnika modyfikującego (Schumm, Lichty 1963; Lewin, Macklin, Newson 1988). Nie jest więc rzeczą zaskakującą, że w wielu odcinkach środkowego i dolnego biegu karpackich dopływów Wisły pogłębianie ich koryt nie zostało dotychczas zahamowane. W rzeczywistości jedynie zwiększenie spadku rzek karpackich w wyniku ich regulacji można uznać za proces zakończony. W dalszym ciągu trwa eksploatacja

http://rcin.org.pl

żwirów z koryt rzecznych i niszczenie bruków korytowych; w połączeniu z oddziaływaniem zbiorników zaporowych, koncentracją przepływu w korytach i erozją wsteczną powyżej dotychczas pogłębionych odcinków sprawia to, że kontynuacja pogłębiania karpackich dopływów Wisły w najbliższej przyszłości wydaje się nieuchronna.

Prognozowana kontynuacja pogłębiania koryt rzek karpackich stwarza konieczność podjęcia decyzji zmierzających do ograniczenia tempa tego procesu i wynikających z niego niekorzystnych zjawisk. Powinno temu sprzyjać wyeliminowanie eksploatacji żwirów z koryt rzecznych, która zaburza a niekiedy wręcz niweczy stopniowy wzrost przeciętnej średnicy ziarna w materiale dennym, oraz zaniechanie przez hydrotechników praktyki wytyczania płaskodennych koryt (powodującej niszczenie wewnętrznej struktury osadów i opancerzenia dna), niedostosowanej do obecnego reżimu tych rzek.

ZYSKI I STRATY OBECNEGO SYSTEMU REGULACJI KARPACKICH DOPŁYWÓW WISŁY

Zmniejszenie zagrożenia powodziowego w dorzeczu górnej Wisły było jednym z głównych celów regulacji koryt rzecznych (Kędzior 1928), lecz osiągnięty skutek jest przeciwny. Wprawdzie zagrożenie powodziowe zmalało w górnych częściach uregulowanych odcinków, gdzie przepływy powodziowe koncentrują się w pogłębionych korytach, jednakże znacznie wzrosło poniżej, w wyniku zwiększania się koncentracji fal powodziowych oraz agradacji zachodzącej poniżej pogłębionych odcinków.

Regulacja koryt wywołała szereg zjawisk niekorzystnych dla środowiska przyrodniczego oraz gospodarki człowieka, a także zwiększyła zagrożenie powodziowe, powstaje więc pytanie: czy obecny system regulacji Raby, a także innych karpackich dopływów Wisły powinien być utrzymany? Istniejące systemy regulacyjne chronią przed powodzią dna dolin rzek karpackich, gdzie ubogie gleby i stosunkowo surowe warunki klimatyczne nie sprzyjają rolniczemu wykorzystaniu terenów. Zarazem systemy te zwiększają możliwość wystąpienia powodzi w dolnych odcinkach tych rzek w obrębie Kotliny Sandomierskiej oraz w dolinie Wisły (patrz: Punzet 1985), gdzie zagrożona jest intensywna zabudowa miejska, przemysł i wydajne rolnictwo.

Gdyby zdecydowano się realizować alternatywną strategię, tj. zaniechanie utrzymywania systemów regulacyjnych rzek karpackich i umożliwienie im swobodnego kształtowania swego biegu, mogłoby to - przy obecnym reżimie tych rzek - prowadzić do uformowania się wąskich, głębokich i krętych koryt, a w konsekwencji do przywrócenia warunków retencji wód powodziowych na równinach aluwialnych i spłaszczania fal powodziowych. Kosztem takiej zmiany strategii gospodarki wodnej w dorzeczu górnej Wisły byłaby jednak utrata stabilności biegu rzek w obrębie den dolin karpackich. W odniesieniu do Raby można wskazać, jako miejsce porzucenia obecnego systemu regulacyjnego, jej środkowy bieg poniżej Dobczyc, w którym boczna migracja rzeki przy

http://rcin.org.pl

jednoczesnym pogłębianiu koryta spowodowała w XX w. wykształcenie się szerokiej strefy równiny aluwialnej o bardzo cienkiej pokrywie drobnoziarnistych osadów pozakorytowych i skąpej roślinności. Ta strefa teras żwirowych mogłaby stać się terenem swobodnej migracji rzeki.

REGULACJA PRZEPŁYWÓW PRZEZ ZBIORNIKI ZAPOROWE - WĄTPLIWOŚCI

Dalszych badań wymaga problem wpływu przegrodzenia rzeki zbiornikiem zaporowym na kształtowanie się przepływów powodziowych w jej niższym odcinku. Głębokie zbiorniki budowane w dolinach górskich zatrzymują całość materiału dennego transportowanego z wyższego odcinka rzeki, toteż zwiększona pojemność koryta wciętej rzeki poniżej zapory zostaje trwale zachowana. Ponadto poniżej zapory zachodzi zazwyczaj dalsze obniżanie się dna rzeki wskutek wypływu ze zbiornika wód niedociążonych rumowiskiem (Petts 1979; Cyberski 1984; Williams, Wolman 1984). Zatem po dłuższym okresie pogłębiania się koryta poniżej zapory może się okazać, że efektywna redukcja kulminacji fal powodziowych zaznacza się jedynie bezpośrednio poniżej zbiornika, a następnie kulminacyjne przepływy szybko wzrastają, w miarę przemieszczania się fal pogłębionym korytem. W celu uniknięcia tego niekorzystnego efektu, tworzone zbiorniki zaporowe powinny posiadać na tyle duże pojemności przeciwpowodziowe, aby osiągnięta regulacja przepływów zapewniała stabilizację dna rzeki poniżej zapory.

PROGNOZA WPŁYWU ZMIAN ŚRODOWISKOWYCH NA REŻIM RZEKI JAKO KONIECZNY WARUNEK PLANOWANIA SYSTEMU REGULACJI KORYTA

Od dostosowania systemu regulacyjnego do warunków przepływu wody i transportu rumowiska w rzece (reżimu rzeki) zależy, czy koryto w uregulowanej rzece pozostanie stabilne oraz czy regulacja koryta rzeczywiście stwarza korzyści dla człowieka. Zdarza się jednak często, że zmiany środowiskowe, wynikające z modyfikacji gospodarowania w dorzeczu lub z fluktuacji klimatycznych, prowadzą do niestabilności koryta (Lewin, Macklin, Newson 1988). Zasadniczą przyczyną niepowodzenia obecnego systemu regulacji koryt (jego niedostosowania do reżimu rzek) było nieuwzględnienie zmniejszenia się dostawy rumowiska z górnych części dorzeczy karpackich dopływów Wisły wskutek podjętej tam regulacji potoków górskich oraz zmian gospodarowania w dorzeczach. Na etapie planowania systemu regulacji koryta sprawą podstawową jest więc oszacowanie trendów zmian warunków formowania się fal powodziowych i dostawy osadu, dokonujących się pod wpływem przewidywanych zmian gospodarowania w dorzeczu.

http://rcin.org.pl

LITERATURA

Adamczyk M. J., 1981, *Rzeki Karpat Północnych w XVIII i XIX wieku*, Wierchy, 49, s. 227-240.

Alexandrowicz S. W. i inni, 1981, *The evolution of the Wisłoka Valley near Dębica during the Late Glacial and Holocene*, Folia Quatern., 53, s. 3-91.

Alexandrowicz S. W., Wyżga B., 1992, *Late Glacial and Holocene evolution of the Raba River valley floor in the vicinity of the Carpathian border, Southern Poland*, Quatern. Stud. Poland, 11, s. 17-42.

Allen J. R. L., 1983, *Gravel overpassing on humpback bars supplied with mixed sediment: examples from the Lower Old Red Sandstone, southern Britain*, Sedimentology, 30, s. 285-294.

Antczak B., 1978, *Zróżnicowanie facjalne osadów meandrowych łach wałowych Warty na północ od Śremu*, Bad. Fizjogr. nad Polską Zach., Ser. A, 31, s. 7-31.

Bagnold R. A., 1977, *Bed load transport by natural rivers*, Wat. Resour. Res., 13, s. 303-312.

Baker V. R., Ritter D. F., 1975, *Competence of rivers to transport coarse bedload material*, Geol. Soc. Am. Bull., 86, s. 975-978.

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

Beckinsale R. P., 1972, *The effect upon river channels of sudden changes in load*, Acta Geogr. Debrecina, 10, 181-186.

Bird J. F., 1980, *Geomorphological implications of flood control measures, Lang Lang River, Australia*, Australian Geogr. Studies, 18, s. 169-183.

Bluck B. J., 1971, *Sedimentation in the meandering River Endrick*, Scottish J. Geol, 7, s. 93-138.

Brayshaw A. C., Frostick L. E., Reid I., 1983, *The hydrodynamics of particle clusters and sediment entrainment in coarse alluvial channels*, Sedimentology, 30, s. 137-143.

Brookes A., 1987, *River channel adjustment downstream from channelization works in England and Wales*, Earth Surf. Proc. Landforms, 12, s. 337-351.

— 1988, *Channelized Rivers. Perspectives for Environmental Management*, John Wiley and Sons.

Bull W. B., 1979, *Threshold of critical power in streams*, Geol. Soc. Am. Bull., 90, s. 453-464.

Burkham D. E., 1972, *Channel changes of the Gila River in Safford Valley, Arizona 1846-1970*, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 655-G, s. 1-24.

— 1976a, *Hydraulic effects of changes in bottom-land vegetation on three major floods, Gila River in Southeastern Arizona*, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 655-J, s. 1-14.

— 1976b, *Effects of changes in an alluvial channel on the timing, magnitude, and transformation of flood waves, Southeastern Arizona*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 655-K, s. 1-25.

Carling P. A., 1983, *Threshold of coarse sediment transport in broad and narrow natural streams*, Earth Surf. Proc. and Landforms, 8, s. 1-18.

Carling P. A., Glaister M. S., 1987, *Rapid deposition of sand and gravel mixtures downstream of a negative step: the role of matrix-infilling and particle overpassing in the process of bar-front accretion*, J. Geol. Soc. London, 144, s. 543-551.

Church M., 1978, *Palaeohydrological reconstructions from a Holocene valley fill*, [w:] Miall A. D. (red.), *Fluvial Sedimentology*, Canad. Soc. Petrol. Geol. Memoir, 5, s. 743-772.

Church M., Jones D., 1982, *Channel bars in gravel-bed rivers*, [w:] Hey R. D., Bathurst J. C., Thorne C. R. (red.), *Gravel-bed Rivers*, s. 291-338, John Wiley and Sons.

Church M., McLean D. G., Wolcott J. F., 1987, *River bed gravels: sampling and analysis*, [w:] Thorne C. R., Bathurst J. C., Hey R. D. (red.), *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, s. 43-88, John Wiley and Sons.

Cyberski J., 1984, *Zjawiska akumulacyjno-erozyjne w rzekach objętych oddziaływaniem budowli piętrzących*, Czas. Geogr., 55, s. 355-363.

http://rcin.org.pl

Daniels R. B., 1960, *Entrenchment of the Willow Drainage Ditch, Harrison County, Iowa*, Am. J. Sci., 258, s. 161-176.

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

Fahnestock R. K., Haushild W. L., 1962, *Flume studies on the transport of pebbles and cobbles on a sand bed*, Geol. Soc. Am. Bull., 73, s. 1431- 1436.

Folk R. L., Ward W.C., 1957, *Brazos River bar: a study in the significance of grain size parametres*, J. Sediment. Petrol., 27, s. 3-26.

Frostick L. E., Lucas P. M., Reid I., 1984, *The infiltration of fine matrices into coarse-grained alluvial sediments and its implication for stratigraphical interpretation*, J. Geol. Soc., 141, s.955-965.

Gregory K. J., 1987, *River channels*, [w:] Gregory K. J., Walling D. E. (red.), *Human Activity and Environmental Processes*, s. 207-235, John Wiley and Sons.

Gustavson T. C., 1978, *Bed forms and stratification types of modern gravel meander lobes, Nueces River, Texas*, Sedimentology, 25, s. 401-426.

Harms J. C., Fahnestock R. K., 1965, *Stratification, bed forms, and flow phenomena (with an example from the Rio Grande)*, [w:] Middleton G. V. (red.), *Primary Sedimentary Structures and their Hydrodynamic Interpretation*, Spec. Publ. Soc. Econ. Miner. Paleont., 12, s. 84-115.

Hassan M. A., Reid I., 1990, *The influence of microform bed roughness elements on flow and sediment transport in gravel bed rivers*, Earth Surf. Proc. and Landforms, 15, s. 739-750.

Hess M., 1965, *Piętra klimatyczne w polskich Karpatach Zachodnich*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., 11, s. 1-262.

Hickin E. J., 1969, *A newly-identified process of point bar formation in natural streams*, Am. J. Sci., 267, s. 999-1010.

— 1974, *The development of meanders in natural river channels*, Am. J. Sci., 274, s. 414-442.

Hjulström F., 1949, *Climatic changes and river patterns*, Geogr. Ann., 31, s. 83-89.

Hooke J. M., 1986, *The significance of mid-channel bars in an active meandering river*, Sedimentology, 33, s. 839-850.

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

Klimek K., 1974, *The retreat of alluvial river banks in the Wisłoka Valley (South Poland)*, Geogr. Polonica, 28, s. 59-75.

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

— 1987, *Man's impact on fluvial processes in the Polish Western Carpathians*, Geogr. Ann., 69A, s. 221-226.

Klimek K, Starkel L., 1974, *History and actual tendency of flood-plain development at the border of the Polish Carpathians*, Abhandl. Akad. Wiss. Göttingen, 29, s. 185-196.

Klimek K., Trafas K., 1972, *Young-Holocene changes in the course of the Dunajec River in the Beskid Sądecki Mts. (Western Carpathians)*, Stud. Geomorph. Carp.-Balcan., 6, s. 85-92.

Kondracki J., 1978, *Geografia fizyczna Polski*, PWN, Warszawa.

Kotarba A., 1989, *On the age of debris flows in the Tatra Mountains*, Studia Geomorph. Carp-Balcan., 23, 139-152.

Lane E. W., 1955, *The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering*, Proc. Am. Soc. Civil Engrs, 81(745), s. 1-17.

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

Leeks G. J., Lewin J., Newson M. D., 1988, *Channel change, fluvial geomorphology and river engineering: The case of the Afon Trannon, Mid-Wales*, Earth Surf. Proc. Landforms, 13, s. 207-223.

Leopold L. B., Miller J. P., 1956, *Ephemeral streams - hydraulic factors and their relation to the drainage net*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 282-A, s. 1-37.

http://rcin.org.pl

Lewin J., Macklin M. G., Newson M. D., 1988, *Regime theory and environmental change - irreconcilable concepts?* [w:] White W. R. (red.), *International Conference on River Regime*, 18-20 May, 1988, s. 431-445.

Łajczak A., 1986, *Retencja rumowiska w zbiornikach zaporowych karpackiego dorzecza Wisły*, Czas. Geogr., 57, s. 47-77.

— 1988, *Impact of various land use on the intensity of sediment runoff in the Polish Carpathians flysch catchments*, [w:] Interpraevent 1988 - Graz, Tagungspubl., 3, s. 131-165.

McGowen J. H., Garner L. E., 1970, *Physiographic features and stratification types of coarse-grained point bars: modern and ancient examples*, Sedimentology, 14, s. 77-111.

Mikulski Z., 1954, *Katastrofalne powodzie w Polsce*, Czas. Geogr., 25, s. 380-396.

Moss A. J., 1972, *Bed-load sediments*, Sedimentology, 18, s. 159-219.

Niedziałkowska E., Gilot E., Pazdur M., Szczepanek K., 1985, *The Upper Vistula valley near Drogomyśl in the Late Vistulian and Holocene*, Folia Quatern., 56, s. 101-132.

Osuch B., 1968, *Problemy wynikające z nadmiernej eksploatacji kruszywa rzecznego na przykładzie rzeki Wisłoki*, Zesz. Nauk AGH, 219, s. 283-301.

Pasternak K., 1969, *Szkic geologiczno-gleboznawczy zlewni rzeki Raby*, Acta Hydrobiol., 11, s. 407-422.

Petts G. E., 1979, *Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction*, Prog. Phys. Geogr., 3, s. 329-362.

Pfister C., 1980, *The climate of Switzerland in the last 450 years*, Geogr. Helvetica, 35(5), s. 15-20.

Plumley W. J., 1948, *Black Hill terrace gravels: a study in sediment transport*, J. Geol., 56, s. 526-577.

Podwińska Z., 1970, *Rozmieszczenie wodnych młynów zbożowych w Małopolsce w XV wieku*, Kwart. Hist. Kult. Mater., 18, s. 373-402.

Punzet, J., 1969, *Charakterystyka hydrologiczna rzeki Raby*, Acta Hydrobiol., 11, s. 423-477.

— 1972, *Tendencje zmian przebiegu wielkich wód w dorzeczu górnej Wisły*, Wiad. Służby Hydrol. Meteorol., 8(3-4), s. 29-41.

— 1973, *Prawdopodobieństwo występowania wielkich wód w dorzeczu górnej Wisły w świetle obserwacji 100-letnich 1871-1970*, Wiad. Służby Hydrol. Meteorol., 9(1), s. 21-29.

— 1981, *Zmiany w przebiegu stanów wody w dorzeczu górnej Wisły na przestrzeni 100 lat (1871-1970)*, Folia Geogr., Ser. Geogr. Phys., 14, s. 5-28.

— 1985, *Wezbrania Wisły w obrębie Krakowa - dawniej i dziś*, Gosp. Wodna, 8, s. 190-193.

Reid I., Frostick L. E., 1984, *Particle interaction and its effect on the threshold of initial and final bedload motion in coarse alluvial channels*, [w:] Koster E. H., Steel R. J. (red.), *Sedimentology of Gravels and Conglomerates*, Canad. Soc. Petrol. Geol. Memoir, 10, s. 61-68.

Roszkowski A., Hennig J., 1991, *Ochrona przed powodzią*, [w:] Dynowska I., Maciejewski M. (red.), *Dorzecze górnej Wisły*. Część II., s. 147-153.

Rzebik T., 1985, *Gdów i okolice (Monografia historyczna)*.

Schumm S. A., 1968, *River adjustment to altered hydrologic regimen - Murrumbidgee River and paleochannels, Australia*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 598, s. 1-65.

— 1969, *River metamorphosis*, J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civil Engrs, 95, s. 255-273.

— 1972, *Fluvial paleochannels*, [w:] Rigby J. K., Hamblin W. K. (red.), *Recognition of Ancient Sedimentary Environments*, Spec. Publ. Soc. Econ. Paleont. Miner., 16, s. 98-107.

Schumm S. A., Lichty R. W., 1963, *Channel widening and flood-plain construction along Cimarron River in Southwestern Kansas*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 352-D, s. 71-88.

Simon A., 1989, *A model of channel response in disturbed alluvial channels*, Earth Surf. Proc. Landforms, 14, s. 11-26.

Simons D. B., Richardson E. V., Nordin C. F., 1965, *Sedimentary structures generated by flow in alluvial channels*, [w:] Middleton G. V. (red.), *Primary Sedimentary Structures and their Hydrodynamic Interpretation*, Spec. Publ. Soc. Econ. Paleont. Miner., 12, s. 34-52.

http://rcin.org.pl

Simons D. B., Simons R. K., 1987, *Differences between gravel- and sand-bed rivers*, [w:] Thorne C. R., Bathurst J. C., Hey R. D. (red.), *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, s. 3-15. John Wiley and Sons.

Smith D. G., 1976, *Effect of vegetation on lateral migration of anastomosed channels of a glacier meltwater river*, Geol. Soc. Am. Bull., 87, s. 857-860.

Sokołowski S. (red.), 1973, *Budowa Geologiczna Polski*. Tom I - Stratygrafia, Wyd. Geol.

Stachy J., 1984, *Odpływ rzek polskich w latach 1971-1980 na tle danych wieloletnich*, Gosp. Wodna, 5, s. 138-141, 6, s. 163-169.

Starkel L., 1986, *Holocene climatic changes reflected in the slope and valley floor evolution in European mountains*, Studia Geomorph. Carp.-Balcan., 20, s. 49-57.

Striclin F. L., 1961, *Degradation stream deposits of the Brazos River, Central Texas*, Bull. Geol. Soc. Am., 72, s. 19-36.

Strzemiecki S., 1988, *Zbiornik Dobczyce na Rabie - ogólna koncepcja techniczna*, Gosp. Wodna, 11, s. 242-248.

Szumański A., 1977, *Zmiany układu koryta dolnego Sanu w XIX i XX wieku oraz ich wpływ na morfogenezę tarasu łęgowego*, Studia Geomorph. Carp.-Balcan., 11, s. 139-153.

— 1986, *Postglacjalna ewolucja i mechanizm transformacji dna doliny Dolnego Sanu*, Zesz. Nauk AGH, Geologia, 12(1), s. 5-92.

Teisseyre A. K., 1985, *Mady dolin sudeckich. Część I. Ogólna charakterystyka środowiskowa (na przykładzie zlewni górnego Bobru)*, Geologia Sudetica, 20(1), s. 113-170.

Vanoni V. A., 1946, *Transportation of suspended sediment by water*, Trans. Am. Soc. Civil Engrs, 111, s. 67-133.

Ven Te Chow, 1959, *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book, New York.

Williams G. P., Wolman M. G., 1984, *Downstream effects of dams in alluvial rivers*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 1286, s. 1-83.

Wyżga B., 1989, *Pogłębianie koryta Raby i jego przyczyny*, Gosp. Wodna, 3, s. 72-73.

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

— 1991b, *Zmiany osadów korytowych Raby w XX wieku jako przykład sedymentacji w degradującej rzece górskiej*, Wszechwiat, 92(4), s. 70-73.

— 1992a, *Współczesne pogłębianie koryt karpackich dopływów Wisły (na przykładzie Raby)*, Wierchy, 56, s. 99-112.

— 1992b, *Zmiany w geometrii koryta i układzie facji jako odzwierciedlenie transformacji reżimu hydrologicznego Raby w ciągu ostatnich dwustu lat*, Czas. Geogr., 63(3-4), s. 3-18.

— 1992c, *Reakcja rzeki górskiej na regulację koryta (na przykładzie Raby)*, Gosp. Wodna, 11, s. 242-248.

— 1993a, *Present-day changes in the hydrologoc regime of the Raba River (Carpathians, Poland) as inferred from facies pattern and channel geometry*, [w:] Marzo M., Puigdefabregas C. (red.), *Alluvial sedimentation*, Int. Ass. Sedimet. Spec. Publ., 17, s. 305-316.

— 1993b, *River response to channel regulation: case study of the Raba River, Carpathians, Poland*, Earth Surf. Proc. Landforms, 18, s. 541-556.

— 1993c, *Regulacja rzek górskich a zagrożenie powodziowe*, Aura, 7, s. 16-19.

— w druku a, Wpływ regulacji koryt rzek karpackich na wzrost zagrożenia powodziowego w dorzeczu górnej Wisły (na przykładzie Raby), Czas. Geogr.

— w druku b, *Changes in magnitude and transformationof flood waves subsequent to channelization of the Raba River. Polish Carpathians*, Earth Surf. Proc. Landforms.

Ziemońska Z., 1973, *Stosunki wodne w Polskich Karpatach Zachodnich*, Prace Geogr. IG PAN, 103, s. 1-127.

http://rcin.org.pl

EVOLUTION OF THE FLUVIAL SYSTEM OF THE MIDDLE AND LOWER RABA RIVER (CARPATHIANS, POLAND) IN THE LAST 200 YEARS

Summary

During the latest historical time great changes have occurred in the operation of fluvial systems of Carpathian tributaries to the Vistula. This paper is a case study of the Raba (Fig. 1), a mountain gravel-bed river characterized by great variability of water stage and discharge (Tab. 1), and aims at reconstruction of the response of the river to environmental change.

The 19th century Raba evolution was characterized by straightening (Fig. 2, Tab. 3), shallowing and widening (Fig. 3, 4) of the river channel, the latter being progressively aggraded (Fig. 3). Point bar deposits showing a diversified facies pattern (Fig. 5, 6) were then replaced with and overlain by fairly uniform channel bar deposits of a low-sinuosity river (Photo 1, Fig. 6). The 19th century channel sediments were very poorly sorted (Fig. 12), overloose (Photo 12A, Fig. 13A, 14A) and normally loose gravels.

The growth in the frequency/magnitude of floods and the increase in bed load were the main factors responsible for the evolution of the Raba River system during the 19th century. The marked size increase of the coarsest clasts of the bar deposits testifies to the growth in river competence brought about by these flash floods. The rise in mean annual flood and sediment delivery is attributed to high humidity of the final part of the Little Ice Age, and to lowering retention potential of the basin due to human activity.

The river has been shortened and considerably narrowed in result of channelization works carried on since the beginning of the present century (Fig. 2, 4, 7, 8B, Photo 2, Tab. 3, 4). At the same time sediment delivery from the headwaters was reduced due to some variations in basin management. The increase in flow velocity (Fig. 10) and stream power owing to channelization, and the reduced sediment supply caused degradation of the channel and progressive outwashing of finer grains from bed material.

Up to 3 m of river incision has occurred till now (Fig. 4, 8A, 9). Gravel extraction from the channel (Photo 6, 7) and prolongation of flood flows (Tab. 2) have increased rates of incision over the last thirty years. The change from the slow and relatively steady degradation in the lower reaches to a set of separate degradation events in the higher ones (Fig. 9) is attributed to the differential rate of headcut retreat and to the control exerted by mid-channel bars upon the rate of river-energy dissipation.

Lowering of ground-water level on the valley floor, increase in river-bank susceptibility to erosion (Photo 9), decrease or cessation of overbank-sediment accretion (Photo 8, 10), and impoverishment of plant and animal communities of riverside biotopes (Photo 10) are the negative environmental effects of channel downcutting. Undermining bridge abutments (Photo 11) and regulation structures supplements the list.

The river responded to the abating sediment supply and the altered water run-off conditions with a decrease in bed load percentage and reorganization of facies pattern of the bar deposits. Selective outwashing of fine grains from bed material brought about the progressive increase in mean size of channel sediments (Fig 12). Overloose gravels ceased to originate in the channel and, instead, deposition of normally loose and underloose gravels (Photo 12B-E, Fig. 13B-E, 14B-E) was growing in significance, accompanied by the formation of pebble clusters and channel pavement (Photo 12). The channel was transformed from a multithalweg into a single-thread one (Fig. 2, 4). As, however, the increased river competence and the channel shortening caused grains of a given grade to have

http://rcin.org.pl

been moved into a more distal position during the 19th century high-flow phase, the point bar deposits are now much coarser then during the pre-19th-century low-flow period (Fig. 12).

Channel downcutting has been accompanied by the progressive concentration of flood flows in a channel zone (Tab. 5). Downstream magnification of peak discharges has become more and more pronounced with the advancing incision (Fig. 15, 16, 17, 18, Tab. 6, 7), the decrease in flood-plain storage and self-acceleration of flows passing the relatively deep and straight channel causing flood waves progressively more flashy (Fig. 18, Tab. 7). The change in shape of flood waves passing the deepened reach was greatest for bankfull flows and diminished for lower in-bank flows and higher overbank flows (Fig. 16, 17, Tab. 6).

Other Carpathian tributaries to the Vistula were also considerably degraded in the 20th century (Fig. 19) in response to channelization, and the rivers consistently reveal the tendency to magnification of peak discharges (Fig. 20). Introducing an empirically found correcting factor into the analysis of outflow/inflow peak-discharges ratio shows how the conditions of peak-flows transformation in a reach have changed since the beginning of a study period (Fig. 20). A marked coincidence between changes in vertical channel location and variations in the „corrected" peak-discharges ratio proves channel changes to be a very important reason for the growing flood hazard in Southern Poland.

Gradient oversteepening and channel narrowing, caused by channelization, lead to formation of a river system having a steep, straight, narrow and deep channel (Fig. 21). Such a morphology distinguishes the system from natural low-flow and high-flow systems. Reduced flood-plain water storage and self-acceleration of flow concentrated in a channel zone make flood waves progressively more flashy in their way downstream the channelization-formed system (Fig. 21).

Gradient oversteepening and channel narrowing due to channelization works increase mean flow velocity, mean bed shear stress and stream power, and this initiates readjustment of a river (Fig. 22). Channel-depth increase and gradient reduction caused by downward and backward erosion as well as bed-material coarsening promote reestablisment of an equilibrium. On the contrary, flow velocity increases due to flow concentration in the deepened channel. Reduction in grain mobility allows the river to attain a new equilibrium at flow-velocity and stream-power levels higher than before the channelization.

Numerous disadvantages of the applied regulation scheme of the Raba River (and other Carpathian rivers as well) and its failure to reduce flood hazard rise the question about its maintenance. To become successful, any regulation design must take into account changes in sediment supply and flood hydrographs resulting from the simultanous alterations in basin management.

Translated by the author

http://rcin.org.pl

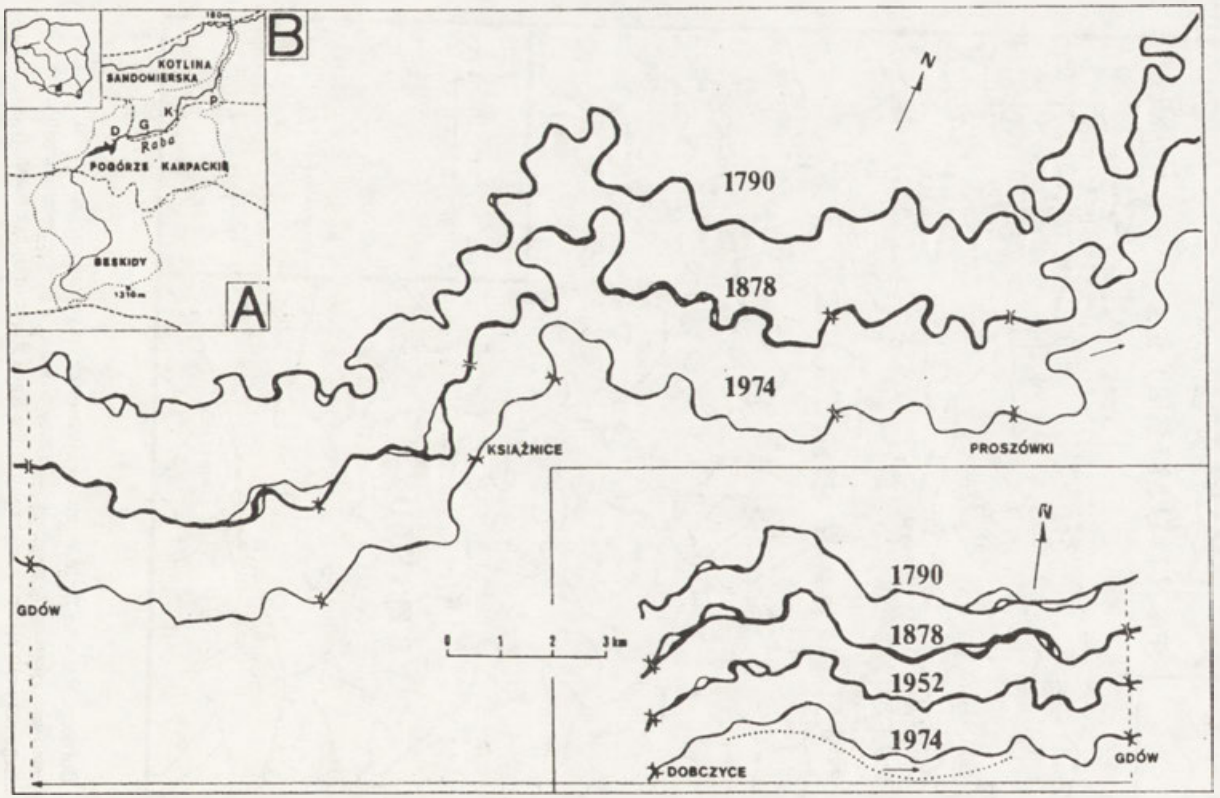
Ryc. 1. Dorzecze Raby na tle hipsometrii i jednostek fizycznogeograficznych

1 - omawiane posterunki wodowskazowe; 2 - granice dorzecza Raby; 3 - granice regionów fizycznogeograficznych.

Drainage network and physiography of the Raba River drainage basin

1 - water-gauge stations investigated; 2 - boundaries of the Raba River basin; 3 - boundaries of physiogeographic regions.

http://rcin.org.pl



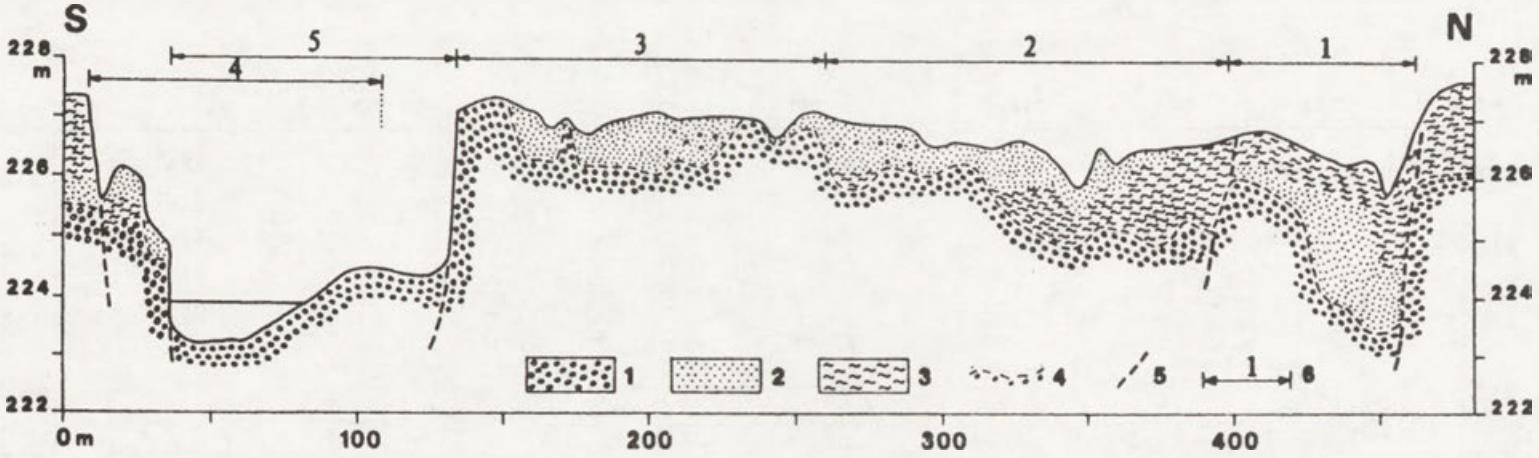
Ryc. 2. A. Lokalizacja obszaru badań
B. Zmiany biegu koryta Raby w ciągu ostatnich 200 lat

Pogrubiono odcinek pokazany na rycinie 2B. Linią kropkowaną wskazano odcinek doliny, z którego pobierano próby osadów do badań teksturalnych.

A. Location of the study area
B. Changes in the course of the Raba River channel during the last 200 years

The Raba River reach analysed in the Figure 2B is shown by the thick line. Extent of sampling channel sediments for textural analysis is indicated by the dotted line.

http://rcin.org.pl



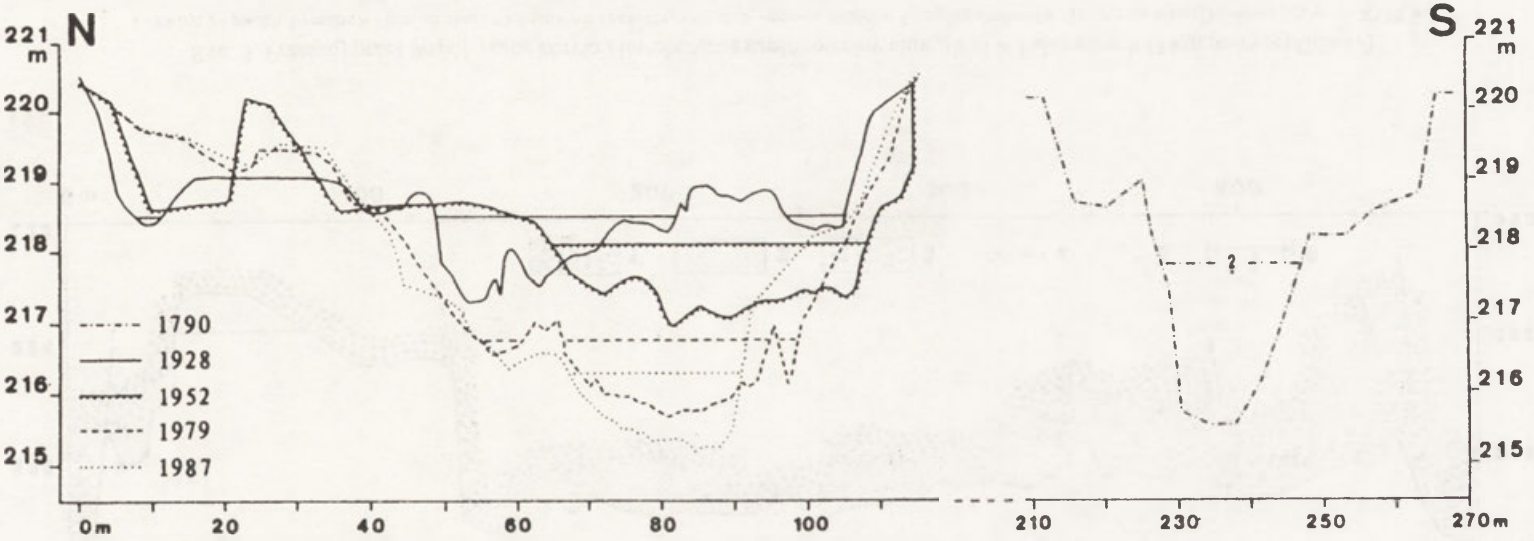
Ryc. 3. Przekrój przez współczesne koryto i lewobrzeżną część równiny aluwialnej w Fałkowicach (3 km powyżej Gdowa)

1 - żwiry; 2 - piaski; 3 - muły; 4 - granica osadów korytowych i pozakorytowych; 5 - granica erozyjna; 6 - zasięg elementów równiny aluwialnej utworzonych w: 1 - XVIII w., 2 - pierwszej połowie XIX w., 3 - drugiej połowie XIX w. (fragment), 4 - latach 50., 5 - współczesne koryto.

Cross-section of the present-day channel and the left-side alluvial plain of the Raba River at Fałkowice (3 km upstream of Gdów)

1 - gravels; 2 - sands; 3 - muds; 4 - boundary between substratum gravels and topstratum fines; 5 - erosional surfaces; 6 - extent of the alluvial-plain elements dating from: 1 - the 18th century, 2 - first half of the 19th century, 3 - second half of the 19th century (fragment), 4 - the 1950s, 5 - present-day channel.

http://rcin.org.pl



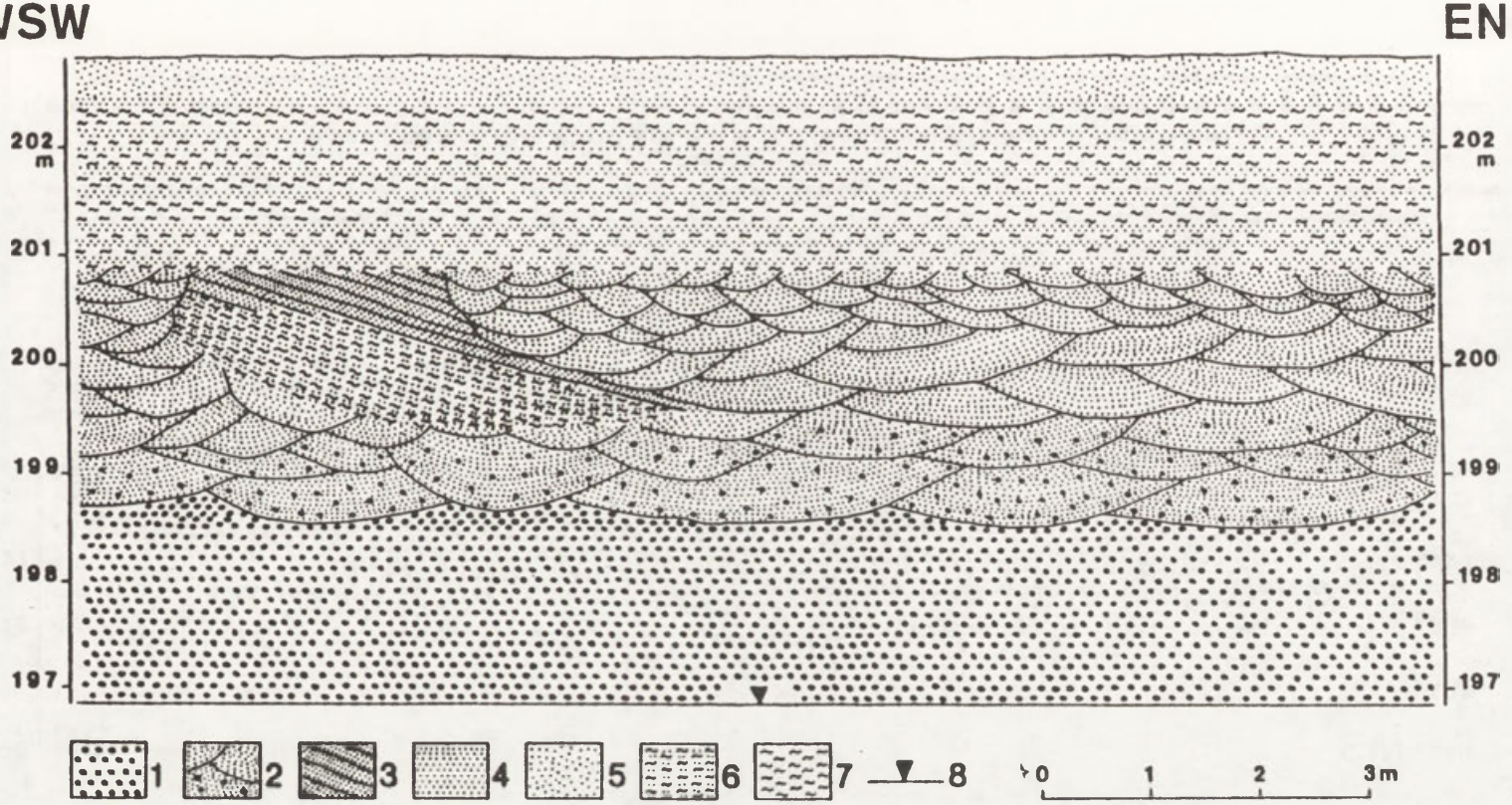
Ryc. 4. Zmiany poprzecznego przekroju koryta Raby w posterunku wodowskazowym Gdów w latach 1790-1987

Zaznaczono pozycję średniego rocznego stanu wody dla każdego roku, w którym wykonano niwelację przekroju. Dla koryta z 1790r. wskazano przypuszczalną pozycję średniego stanu w stosunku do stwierdzonej wysokości łachy żwirowej.

Changes in channel cross-section of the Raba River at the Gdów water-gauge station between 1790 and 1987

Elevation in metres a.s.l. of mean annual stage is marked for each year the cross-section was surveyed in the 20th century, and suggested for 1790 channel on the basis of the gravel bar position.

http://rcin.org.pl



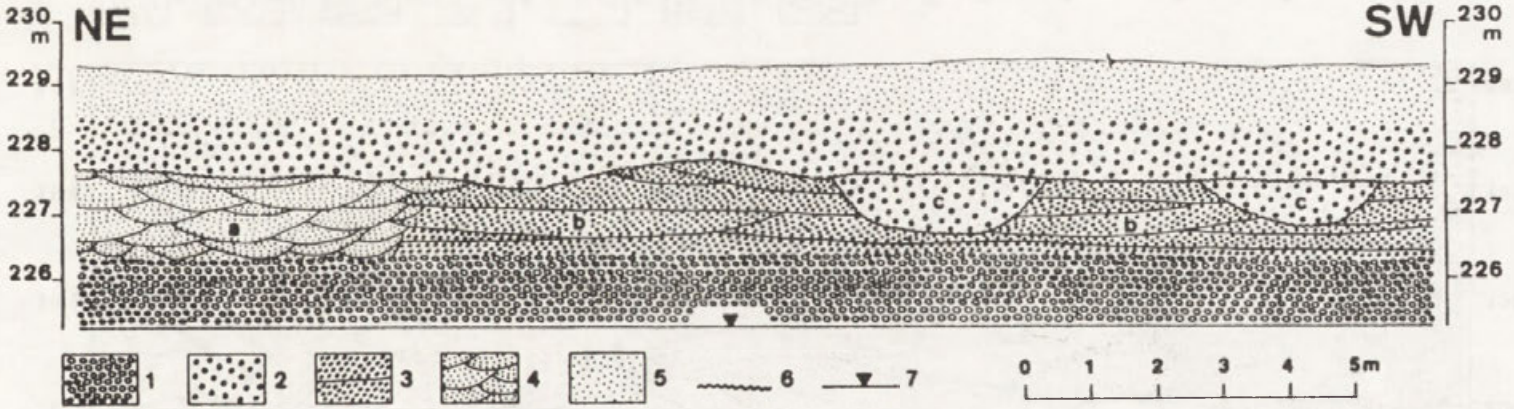
Ryc. 5. Budowa równiny aluwialnej Raby z XVIII w. w podcięciu brzegu w Łężkowicach (1 km poniżej Książnic)

1 - masywne lub niewyraźnie warstwowane poziomo żwiry drobnoziarniste; 2 - piaski grubo- i bardzo gruboziarniste, a w dolnej części piaski ze żwirem wykazujące rynnowe warstwowanie przekątne dużej skali, w dolnej części obecne toczeńce ilaste; 3 - piaski drobnoziarniste z riplemarkami wstępującymi; 4 - piaski drobnoziarniste i bardzo drobnoziarniste z laminacją równoległą; 5 - masywne piaski drobnoziarniste; 6 - masywne piaski pylaste; 7 - muły; 8 - średni poziom wody.

Structure of the Raba River alluvial plain from the 18th century seen in the cutbank at Łężkowice (1 km downstream of Książnice)

1 - massive or crudely horizontally stratified pebble gravels; 2 - trough cross-stratified coarse and very coarse sands, in the lower part also gravelly sands, with numerous mud balls near the bottom; 3 - fine sands with climbing ripples; 4 - parallel laminated fine and very fine sands; 5 - massive fine sands; 6 - massive silty sands; 7 - muds; 8 - mean water table.

http://rcin.org.pl



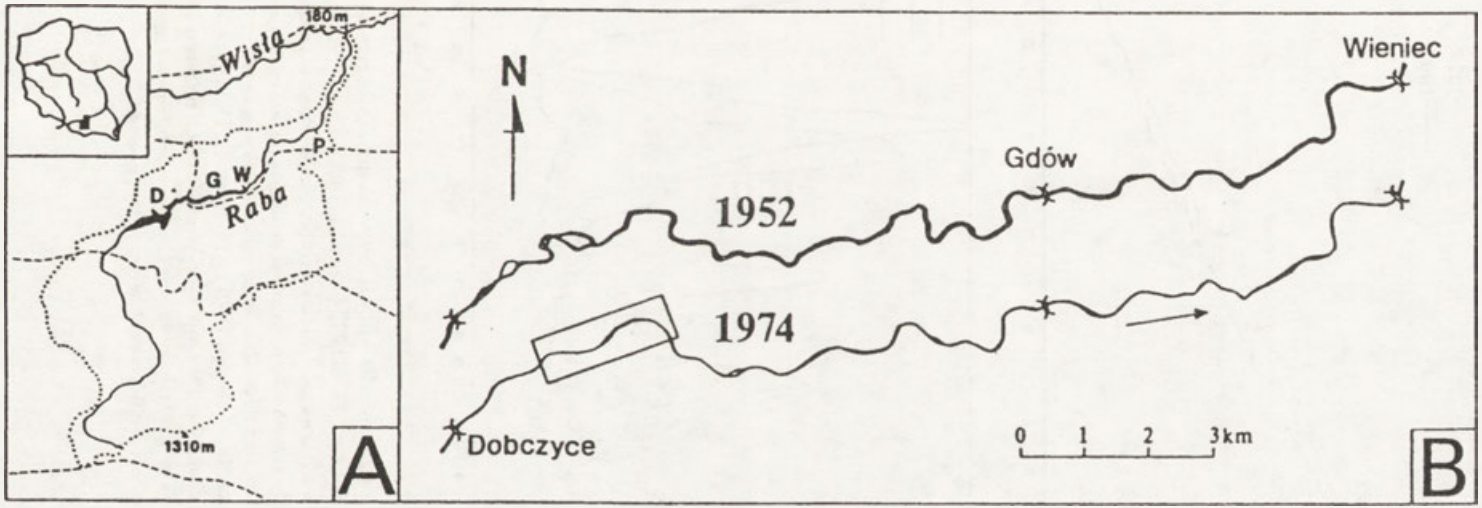
Ryc. 6. Budowa równiny aluwialnej Raby w podcięciu brzegu w Stadnikach (4 km powyżej Gdowa)

1 - masywne lub niewyraźnie warstwowane poziomo żwiry średnioziarniste; 2 - masywne żwiry drobnoziarniste; 3 - piaski ze żwirem wykazujące tabularne warstwowanie przekątne; 4 - piaski bardzo gruboziarniste wykazujące rynnowe warstwowanie przekątne; 5 - masywne piaski drobnoziarniste; 6 - ważniejsze powierzchnie erozyjne; 7 - średni poziom wody. Oznaczenia literowe objaśnione w tekście.

Structure of the Raba River alluvial plain seen in the cutbank at Stadniki (4 km upstream of Gdów)

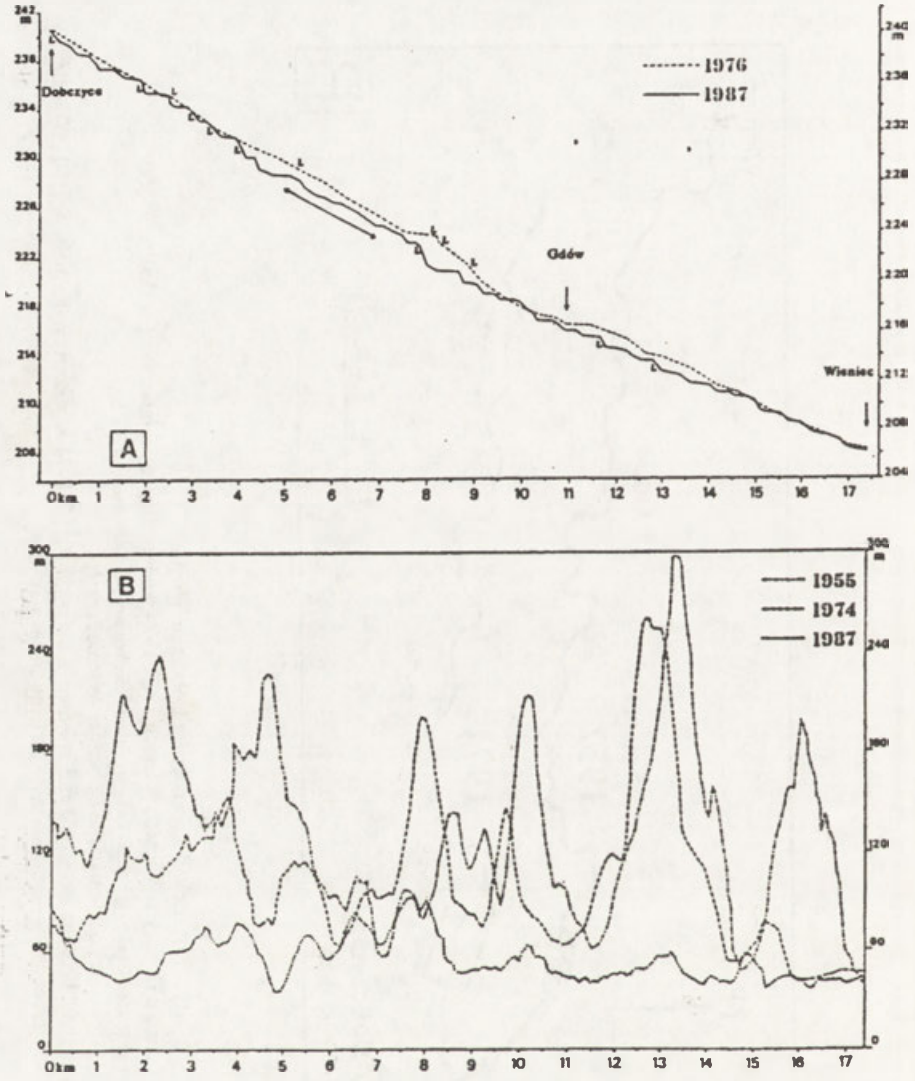
1 - massive or crudely horizontally stratified cobble gravels; 2 - massive pebble gravels; 3 - planar cross-stratified gravelly sands; 4 - trough cross-stratified very coarse sands; 5 - massive fine sands; 6 - major erosional surfaces; 7 - mean water table; a - deposits of a longitudinal ridge; b - deposits of a transverse bar; c - gravel-plug deposits filling a chute or an inner channel.

http://rcin.org.pl



Ryc. 7. A. Lokalizacja odcinka Dobczyce-Wieniec
B. Zmiany biegu koryta Raby w odcinku Dobczyce-Wieniec w latach 1952-1974 według map topograficznych w skali 1:50 000
Prostokątem oznaczono lokalizację odcinka Raby w miejscowości Winiary przedstawionego na Fot. 2.
A. Location of the Dobczyce-Wieniec reach
B. Changes in the course of the Raba River channel between Dobczyce and Wieniec in the period 1952-1974 as shown on the maps at 1:50 000 scale
Location of the reach shown on Photo 2 is indicated by the window.

http://rcin.org.pl



Ryc. 8. A. Zmiany położenia zwierciadła wody Raby w odcinku Dobczyce-Wieniec w latach 1976-1987 (stan niski)

B. Zmiany szerokości koryta powodziowego w odcinku Dobczyce-Wieniec w latach 1955-1987

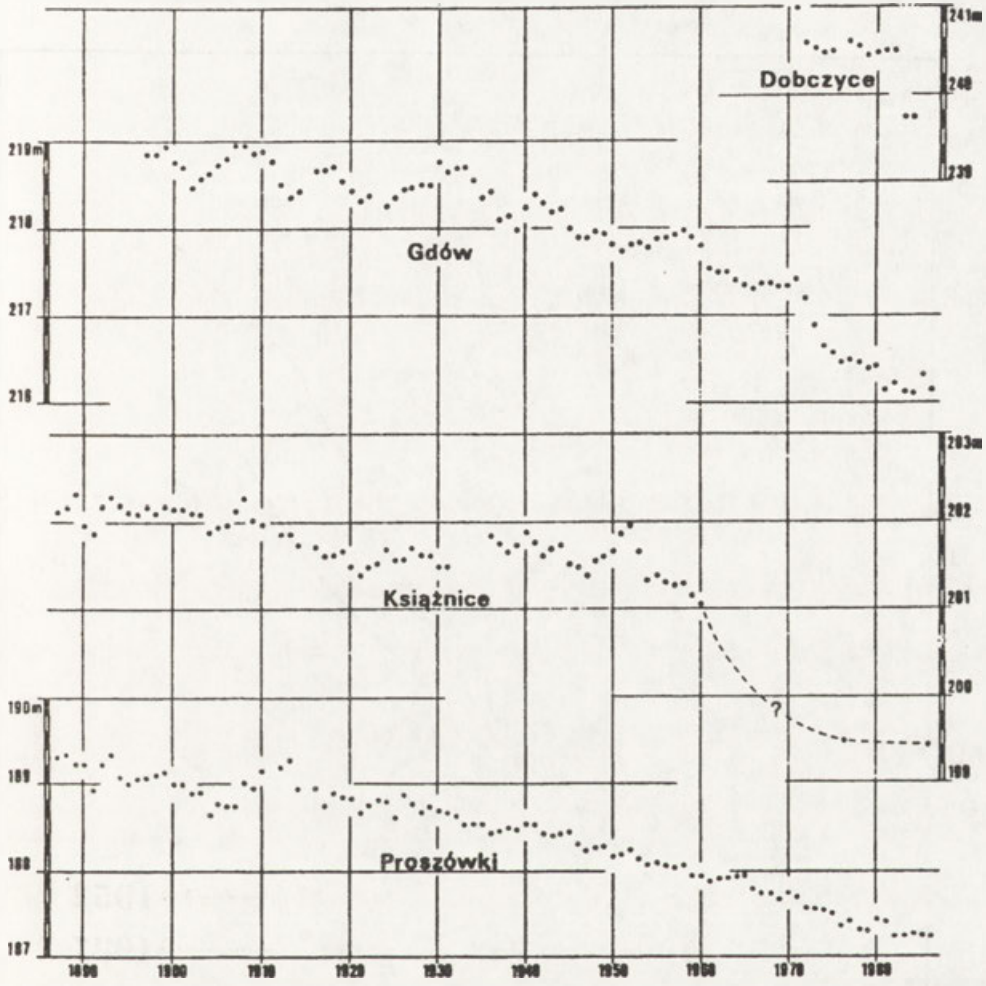
Literą Ł wskazano lokalizację łach śródkorytowych w korycie, a ukośną strzałką - zasięg prac regulacyjnych ponownie wykonanych w 1987r. , które zniszczyły istniejący układ bystrzy i przegłębień.

A. Changes in low-water table elevation between 1976 and 1987 in the Dobczyce-Wieniec reach

B. Changes in width of the flood channel in the Dobczyce-Wieniec reach between 1955 and 1987

Location of mid-channel bars in the channel is indicated by the letter Ł, and the extent of repeated regulation works that destroyed the pool-riffle pattern of the river by oblique arrows.

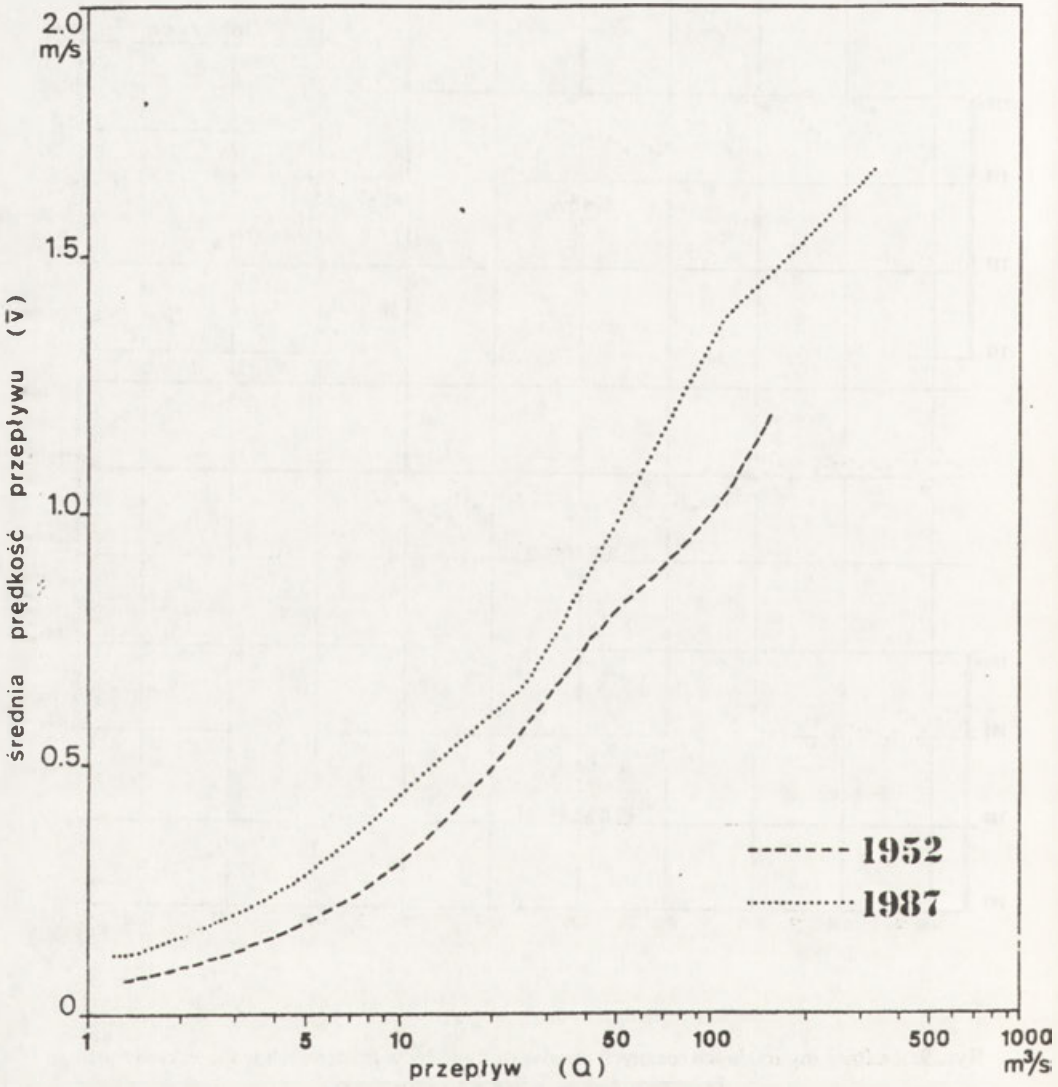
http://rcin.org.pl



Ryc. 9. Przebieg minimalnych rocznych stanów wody Raby w przekrojach wodowskazowych: Dobczyce, Gdów, Książnice i Proszówki

Changes in lowest annual stage of the Raba River since the end of the 19th century at the Dobczyce, Gdów, Książnice and Proszówki stations (Elevations in metres a.s.l.)

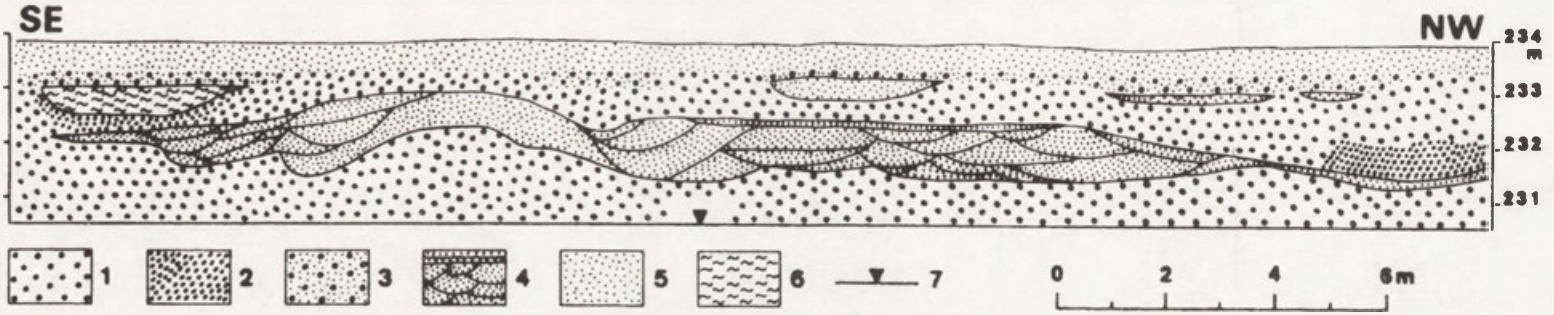
http://rcin.org.pl



Ryc. 10. Wykres zależności pomiędzy przepływem (Q) a średnią prędkością przepływu ($\bar{v}$) w przekroju wodowskazowym Gdów dla całego przedziału przepływów zaistniałych w ciągu wybranego roku hydrologicznego przed (1952r.) i po (1987r.) regulacji koryta z lat 50.-70.

Plot of mean flow velocity ($\bar{v}$) versus discharge (Q) for the range of flows that occurred at years the gauge cross-section at Gdów was surveyed before (1952) and after (1987) the channelization

http://rcin.org.pl



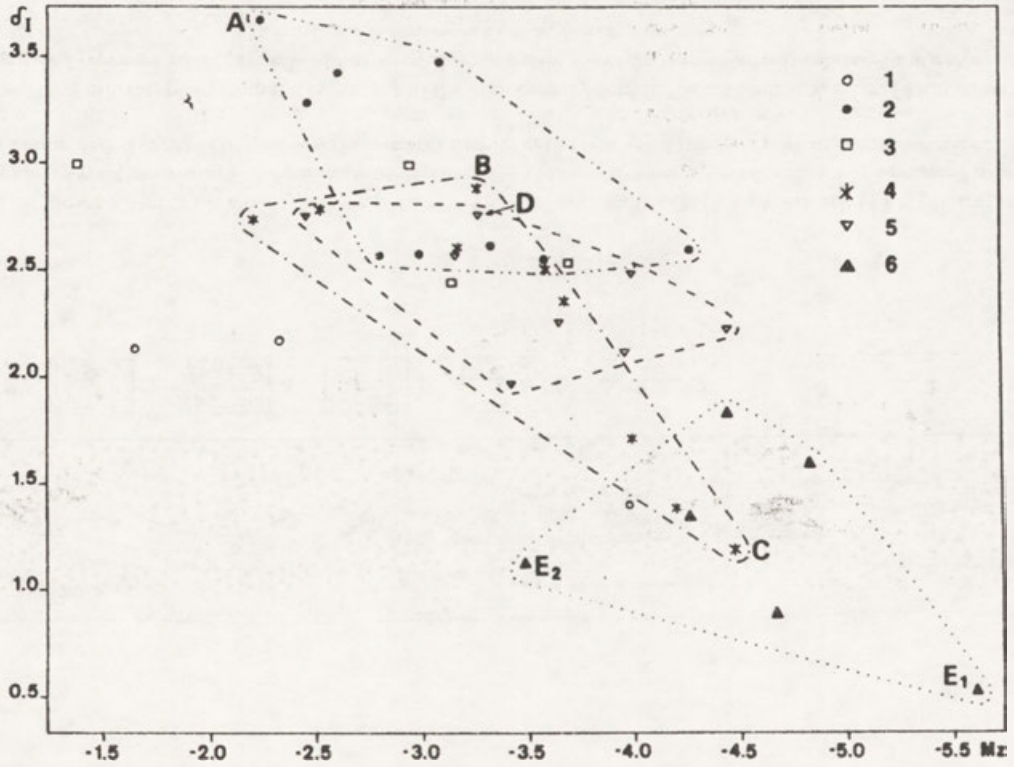
Ryc. 11. Budowa równiny aluwialnej Raby z początku XX w. w podcięciu brzegu w Winiarach (4 km poniżej Dobczyc)

1 - normalnie upakowane żwiry drobnoziarniste; 2 - drobnoziarniste, niewypełnione żwiry ciasno upakowane; 3 - drobnoziarniste żwiry o rozproszonym szkielecie ziarnowym; 4 - średnio - bardzo gruboziarniste piaski z rynnowym warstwowaniem przekątnym lub laminacją równoległą; 5 - masywne piaski drobnoziarniste; 6 - muły; 7 - średni poziom wody.

Structure of the Raba River alluvial plain from the beginning of the 20th century seen in the cutbank at Winiary (4 km downstream of Dobczyce)

1 - normally loose pebble gravels; 2 - openwork pebble gravels; 3 - dilated framework pebble gravels; 4 - trough cross-stratified and parallel laminated medium- to very coarse-grained sands; 5 - massive fine sands; 6 - muds; 7 - mean water table.

http://rcin.org.pl



Ryc. 12. Wykres zależności pomiędzy średnią średnicą (Mz) a standardowym odchyleniem (σ_I) dla osadów o różnym wieku

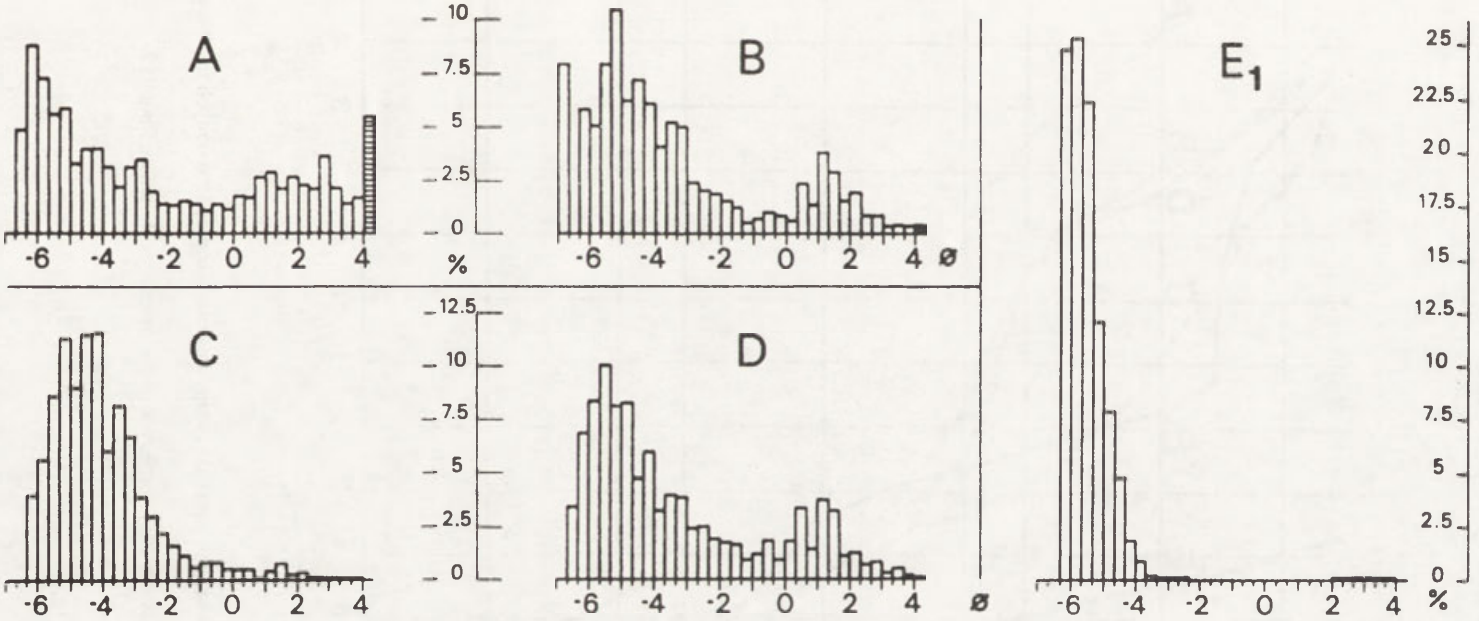
1 - XVIII w.; 2 - XIX w.; 3 - początek XX w.; 4 - lata 50.; 5 - współczesne odcinki o małej krętości; 6 - współczesne odcinki o dużej krętości. Literami oznaczono osady pokazane na fotografii 12.

Scatter diagram of mean size (Mz) versus standard deviation (σ_I) for the bar sediments of particular age

1 - the 18th century; 2 - the 19th century; 3 - beginning of the 20th century; 4 - the 1950s; 5 - present-day low-sinuosity reaches; 6 - present-day high-sinuosity reaches.

Letters denote sediments shown on Photo 12.

http://rcin.org.pl



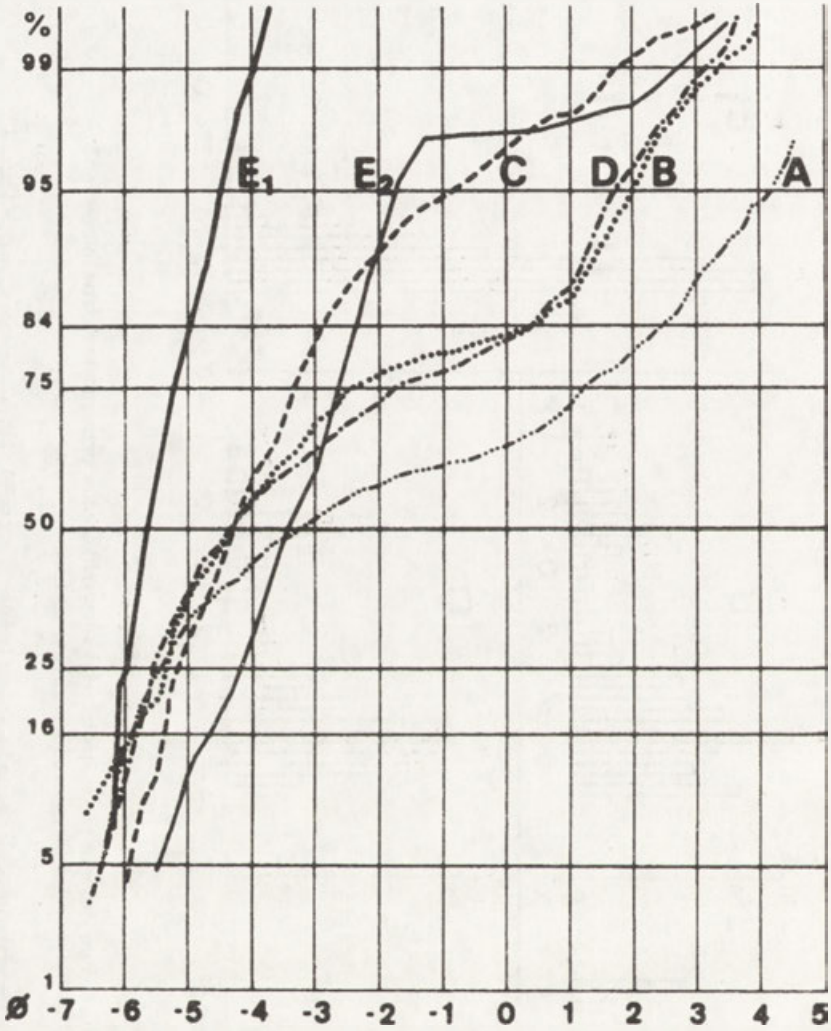
Ryc. 13. Histogramy uziarnienia (w procentach wagowych) osadów przedstawionych na fotografii 12

Zakreślone pola odpowiadają nie rozdzielonej frakcji najdrobniejszej.

Histograms of the grain-size distribution (in weight frequency per cent) of the sediments shown on Photo 12

Hatched areas represent percentage of undivided fines.

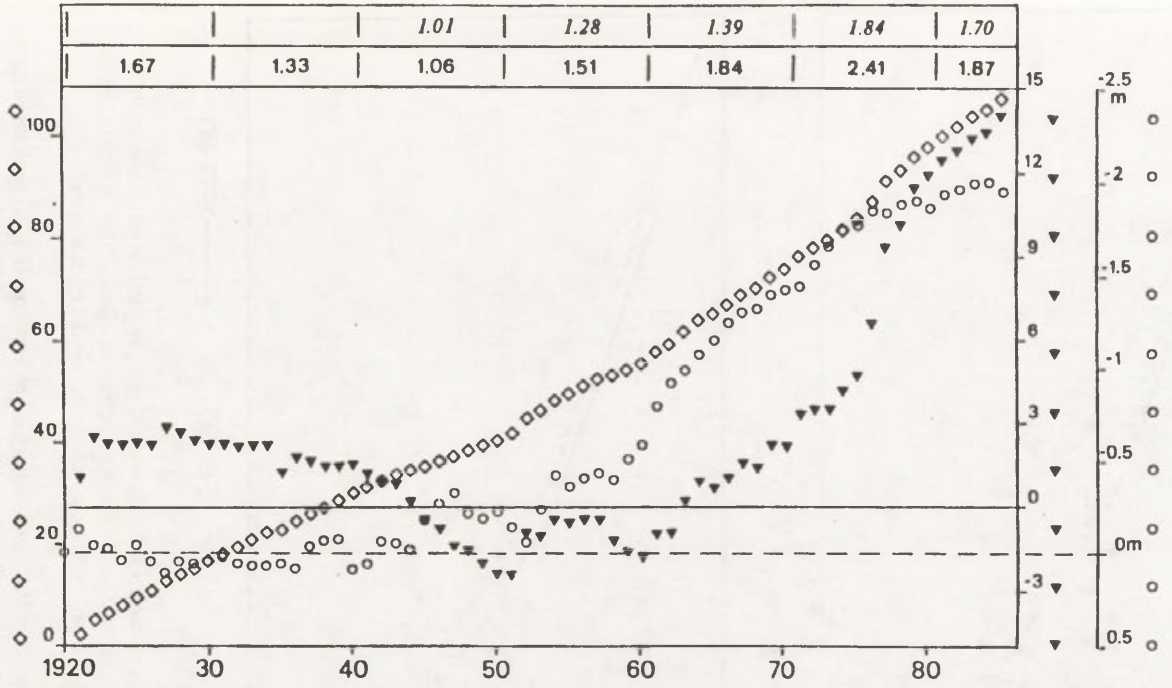
http://rcin.org.pl



Ryc. 14. Kumulacyjne krzywe rozkładu uziarnienia osadów przedstawionych na fotografii 12

Cumulative probability curves of the sediments shown on Photo 12

http://rcin.org.pl



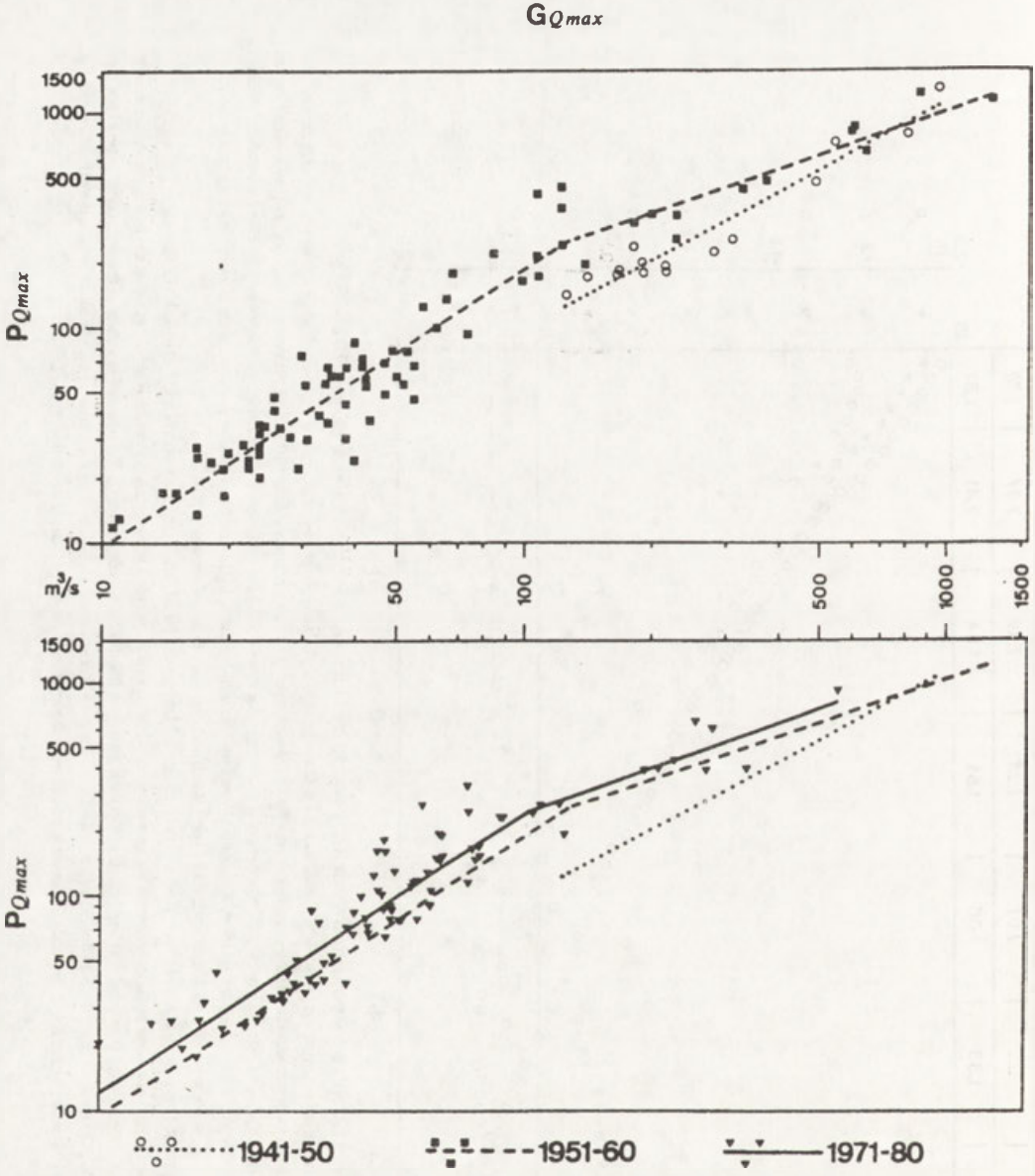
Ryc. 15. Zmiany przepływów powodziowych Raby pomiędzy Gdowem a Proszówkami w okresie 1921-1985

(◊) kumulowane wartości ilorazu maksymalnych rocznych przepływów w Proszówkach i w Gdowie: PQ_{max}/GQ_{max}: w górnej części rysunku podano średnie dekadowe wartości ilorazu maksymalnych przepływów obliczone dla maksimów rocznych (standardowa czcionka) oraz dla 10 największych fal z dziesięciolecia (*kursywa*); (▼) kumulowane wartości „poprawionego" ilorazu maksymalnych rocznych przepływów: PQ_{max}/GQ_{max} - 1,45; (O) zmiany pionowego położenia koryta Raby w odcinku Gdów-Proszówki od 1920r., przedstawione jako średnia ważona zmian minimalnych rocznych stanów wody w przekrojach wodowskazowych Gdów, Książnice i Proszówki - uznano, że zmiana położenia dna rzeki w posterunku środkowym (K) wyjaśnia połowę, a w posterunkach skrajnych (G i P) po 1/4 całkowitej zmiany położenia dna w odcinku.

Flood-flow changes in the middle and lower Raba River channel between 1921 and 1985 as shown by annual maxima

(◊) cumulative values of the ratio of maximum annual discharge at the downstream gauge station (Proszówki) to that recorded at the upstream station (Gdów); at top of the figure are shown decade averges of the ratio of peak flows at the both stations computed for annual maxima (standard font) and 10 largest floods of a decade (*italics*); (▼) cumulative values of the „corrected" ratio of the maximum annual discharges: PQ_{max}/GQ_{max} - 1.45; (O) changes in vertical channel location in the Gdów-Proszówki reach since 1920. The data are weighted means, alterations in the extreme stations (G and P) accounting for 1/4 of the total change each, and those in the middle of the reach (Książnice station) for 1/2.

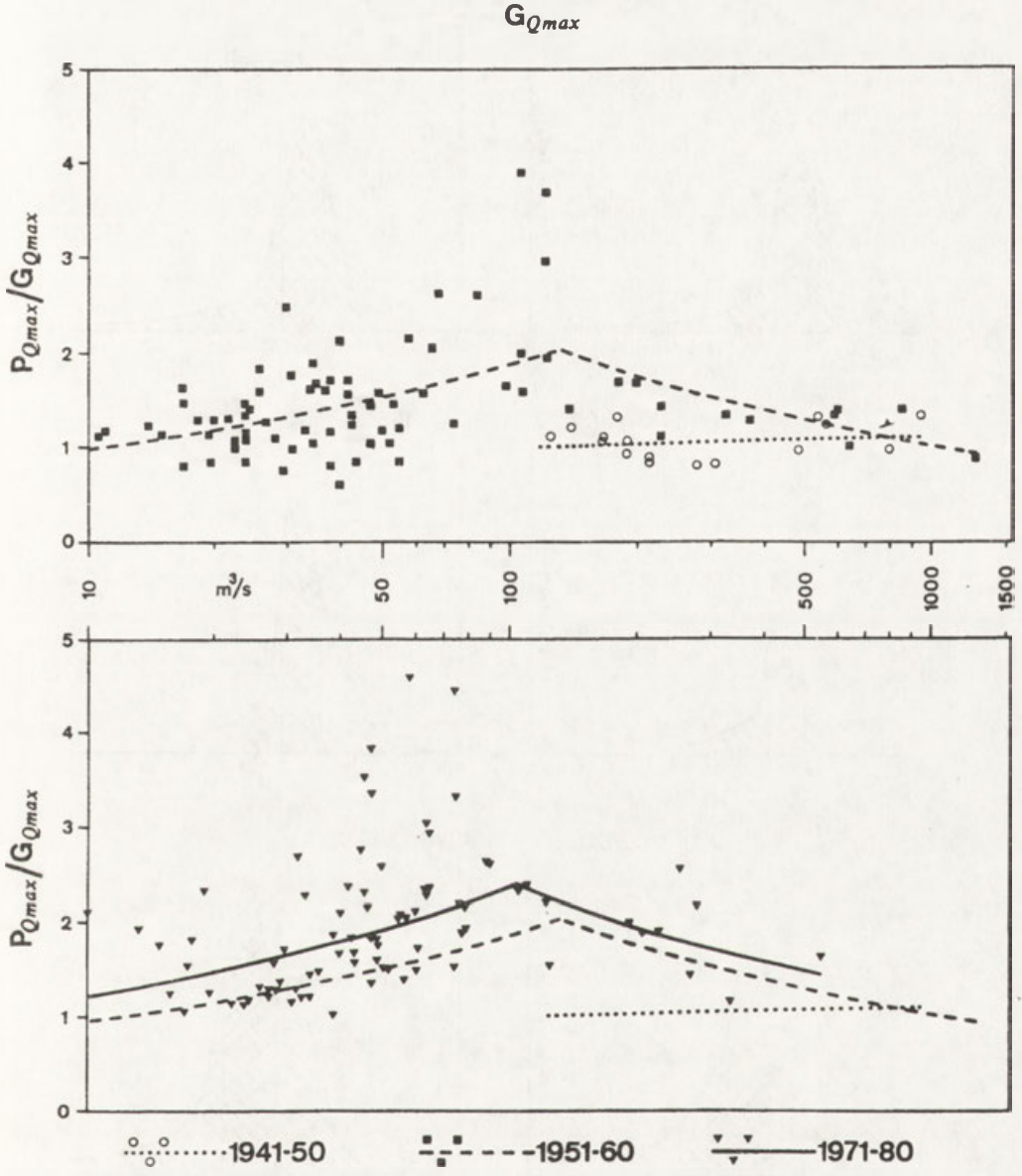
http://rcin.org.pl



Ryc. 16. Wykres zależności pomiędzy kulminacyjnymi przepływami fal powodziowych w Gdowie (G_{Qmax}) i w Proszówkach (P_{Qmax}) dla całego zakresu wielkości fal w poszczególnych dziesięcioleciach oraz średnie dekadowe linie regresji dla tej zależności

Temporal changes in the relation between the inflow (G_{Qmax}) and outflow (P_{Qmax}) peak discharges in the Gdów-Proszówki reach as shown by data for the whole range of flood flows occurring in the particular decades and by decade-average regression lines

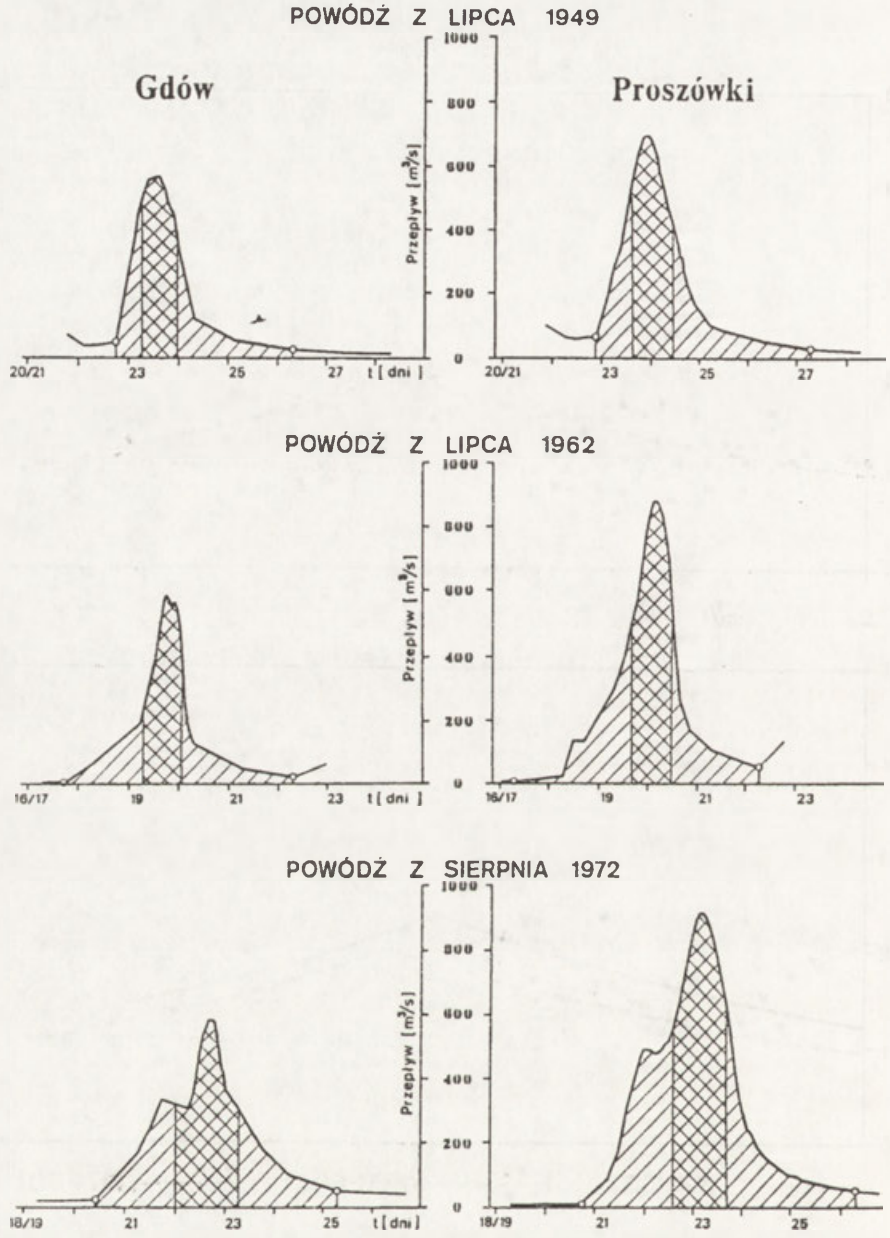
http://rcin.org.pl



Ryc. 17. Wykres zależności pomiędzy kulminacyjnymi przepływami fal powodziowych w Gdowie (G_{Qmax}) a wzrostem wielkości fali w odcinku Gdów-Proszówki (P_{Qmax}/G_{Qmax}) dla całego zakresu wielkości fal w poszczególnych dziesięcioleciach oraz średnie dekadowe linie regresji dla tej zależności

Temporal changes in the relation between the inflow peaks (G_{Qmax}) and the degree of magnification of peak discharges in the Gdów-Proszówki reach (P_{Qmax}/G_{Qmax}) as shown by data for the whole range of flood flows occurring in the particular decades and by decade-average regression lines

http://rcin.org.pl



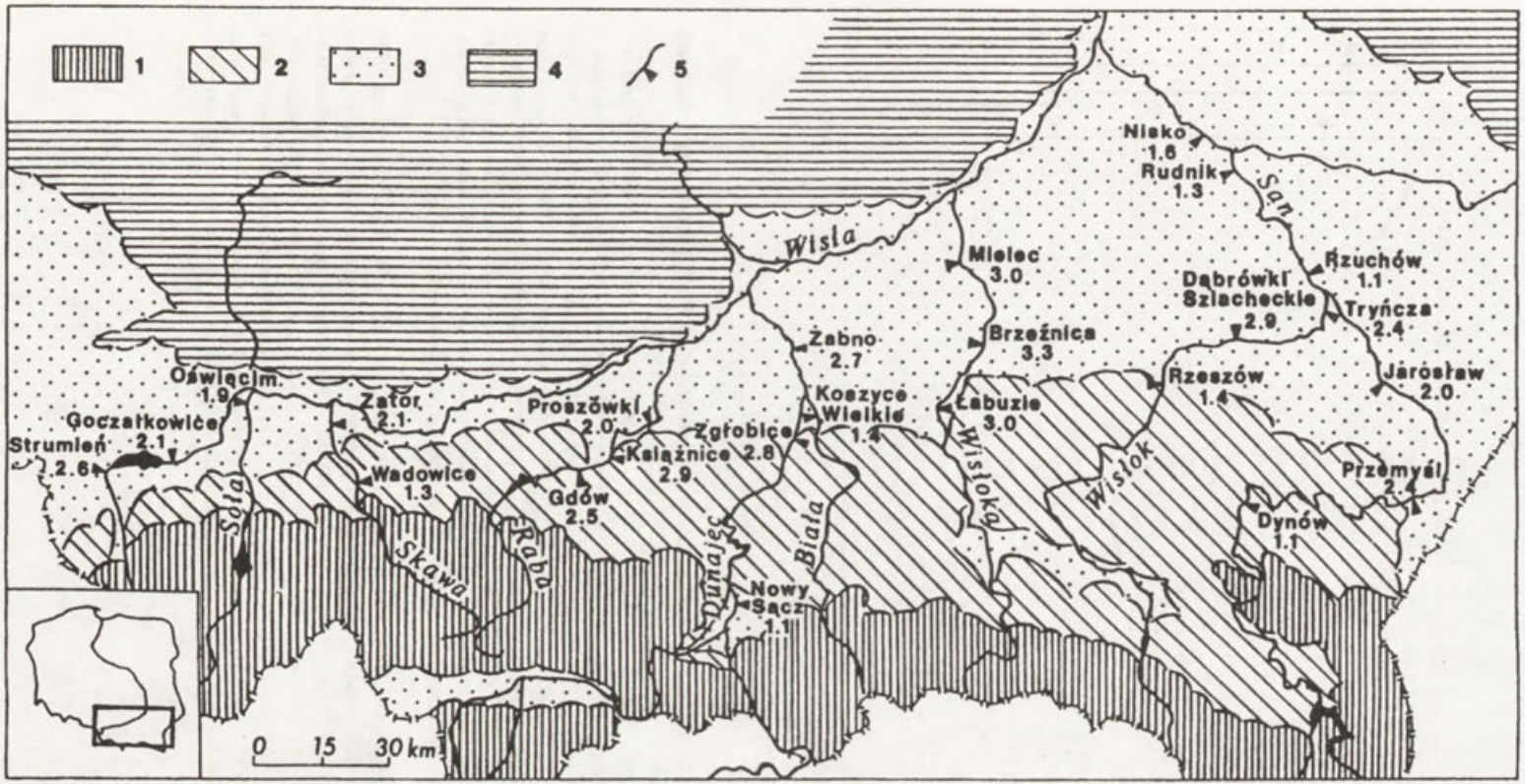
Ryc. 18. Hydrogramy fal powodziowych w przekrojach wodowskazowych Gdów i Proszówki z lat: 1949, 1962, 1972

Wybrano fale o podobnej wielkości w górnym posterunku. Odpływ powodziowy przedstawiono szrafurą ukośną, a szrafurą krzyżową - kulminacyjną połowę objętości fali.

Flood hydrographs at the Gdów and Proszówki gauge stations for the three flood waves (of July 1949, July 1962 and August 1972) with similar inflow peak discharge

Flood run-off is represented by obliquely hatched areas, and the peak half of the flood volume by crossed hatchure.

http://rcin.org.pl



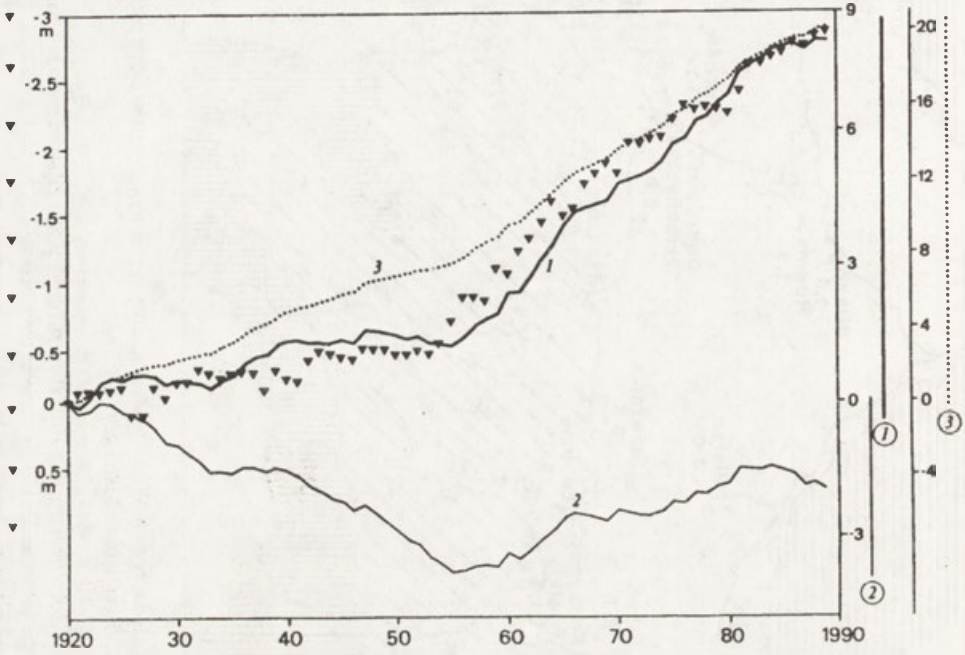
Ryc. 19. Obniżenie się (w metrach) minimalnych rocznych stanów wody karpackich dopływów Wisły w ich środkowym i dolnym biegu w ciągu ostatnich 70-100 lat (do 1980r.) jako wskaźnik pogłębienia ich koryt

1 - góry średnie i niskie; 2 - pogórza; 3 - kotliny przedgórskie i śródgórskie; 4 - wyżyny; 5 - posterunki wodowskazowe.

Dimensions (in metres) of channel degradation of Carpathian tributaries to the Vistula over the last 70-100 years (until 1980) inferred from lowering of lowest annual water stage at gauge stations of the lower and middle course of the rivers

1 - mountains of intermediate and low height; 2 - foothills; 3 - intramontane and submontane depressions; 4 - uplands; 5 - water-gauge stations.

http://rcin.org.pl



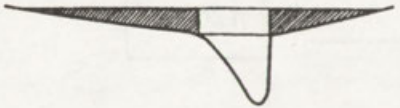
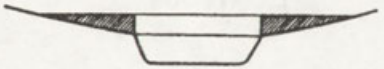
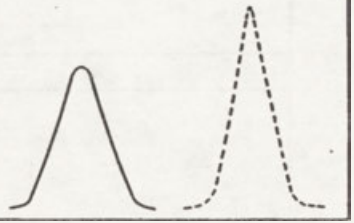
Ryc. 20. Pogłębianie koryta i zmiany przepływów powodziowych Wisłoki pomiędzy Łabuziami a Brzeźnicą w okresie 1920-1989

(▼) zmiany pionowego położenia koryta Wisłoki w odcinku Łabuzie-Brzeźnica od 1920r. przedstawione jako średnia arytmetyczna zmian minimalnych rocznych stanów wody w przekrojach wodowskazowych Łabuzie i Brzeźnica. Linie oznaczają krzywe kumulacyjne „poprawionego" ilorazu maksymalnych rocznych przepływów w obu posterunkach otrzymane przy użyciu: 1 - korekcyjnego współczynnika najlepszego dopasowania ($BQ_{max}/ŁQ_{max}$ - 0,93); 2 - wyższej ($BQ_{max}/ŁQ_{max}$ - 1,08); 3 - niższej ($BQ_{max}/ŁQ_{max}$ - 0,78) wartości współczynnika korekcji. Znaczenie korekcyjnego współczynnika najlepszego dopasowania - patrz tekst; liczba 1,08 to średnia z analizowanego okresu wartość ilorazu maksymalnych rocznych przepływów w obu posterunkach ($BQ_{max}/ŁQ_{max}$), a zatem krzywa 2 ukazuje okresy z wartościami ilorazu maksymalnych rocznych przepływów niższymi lub wyższymi od średniej z wielolecia.

Channel and flood-flow changes in the Łabuzie-Brzeźnica reach of the Wisłoka River since 1920

(▼) changes in vertical channel location in the reach as shown by the mean of changes in minimum annual water stage at the Łabuzie and Brzeźnica stations. Lines present cumulative curves of the „corrected" ratio of maximum annual discharge at the both stations obtained for the correcting factor of the best fitness ($BQ_{max}/ŁQ_{max}$ - 0.93; curve 1), and for the higher ($BQ_{max}/ŁQ_{max}$ - 1.08; curve 2) and lower ($BQ_{max}/ŁQ_{max}$ - 0.73; curve 3) values of the correcting factor. The significance of the correcting factor of the best fitness is explained in the text; the value of 1.08 is the average of the ratio $BQ_{max}/ŁQ_{max}$ for the study period, and thus the curve 2 shows time intervals with annual maxima-ratio lower or higher than the average.

http://rcin.org.pl

SYSTEM RZECZNY	MORFOLOGIA SYSTEMU	PRZEPŁYW POWODZIOWY W PRZEKROJU POPRZECZNYM	DOMINUJĄCY MECHANIZM TRANSFORMACJI FALI	ZMIANA KSZTAŁTU FALI POWODZIOWEJ
SYSTEM NISKICH PRZEPŁYWÓW POWODZIOWYCH	KRĘTE, WĄSKIE I GŁĘBOKIE KORYTO O MAŁYM SPADKU		HAMOWANIE PRZEPŁYWU W STREFIE POZAKORYTOWEJ	
SYSTEM WYSOKICH PRZEPŁYWÓW	PROSTE, SZEROKIE I PŁYTKIE KORYTO O DUŻYM SPADKU		HAMOWANIE PRZEPŁYWU W STREFIE POZAKORYTOWEJ RÓWNOWAŻONE PRZYSPIESZANIEM PRZEPŁYWU W KORYCIE	
SYSTEM RZEKI UREGULOWANEJ	PROSTE, WĄSKIE I GŁĘBOKIE KORYTO O DUŻYM SPADKU		PRZYSPIESZANIE PRZEPŁYWU SKONCENTROWANEGO W STREFIE KORYTOWEJ	

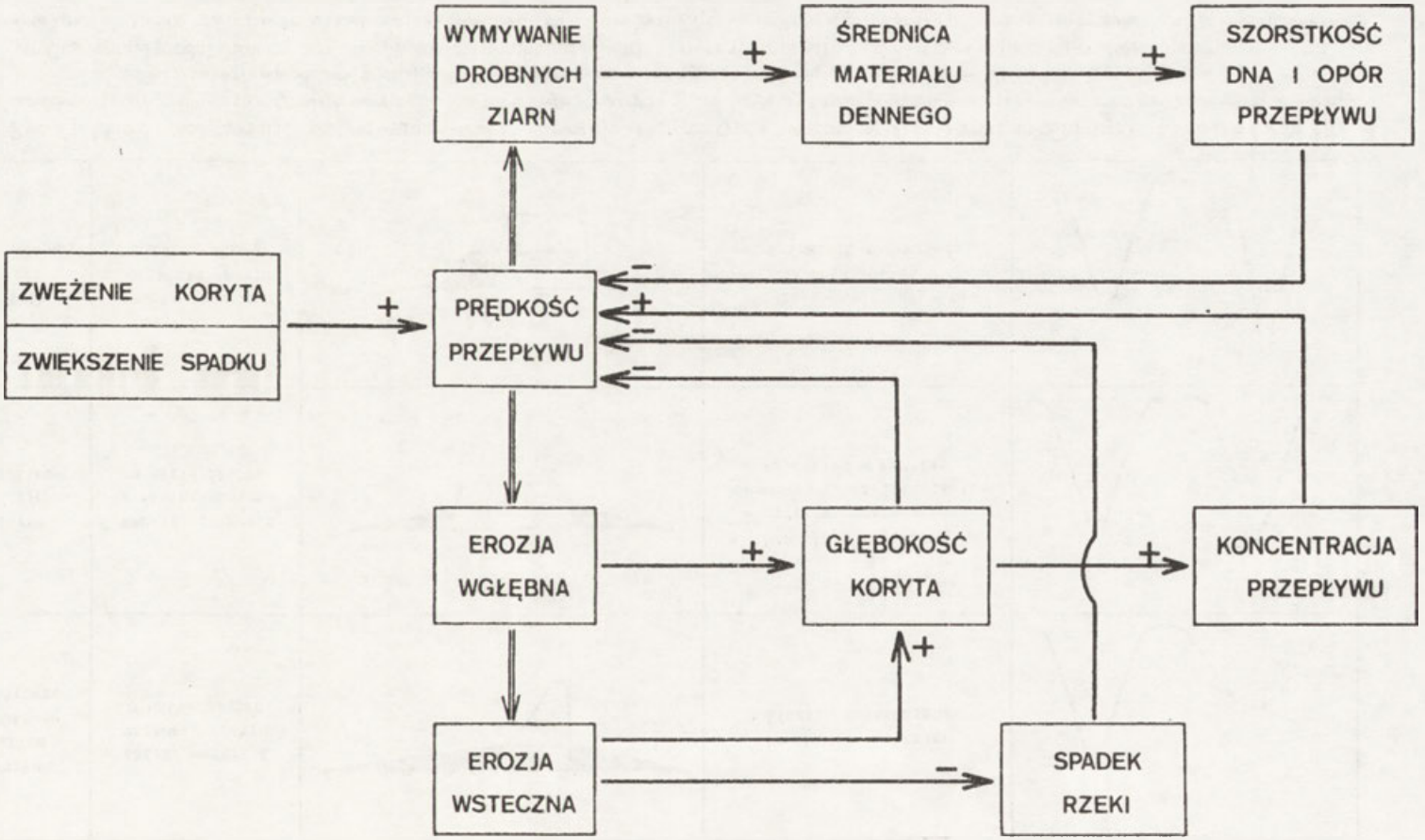
Ryc. 21. Model przedstawiający wpływ warunków morfologicznych różnych typów systemów rzecznych na transformację fal powodziowych

Szrafem zaznaczono tę część przepływu powodziowego, która przenoszona jest w strefie pozakorytowej. Linia ciągła - hydrogram początkowy; linia przerywana - hydrogram końcowy. Model obrazuje zmianę kształtu fali powodziowej wynikającą wyłącznie z oddziaływania mechanizmów transformacji, przy założeniu braku dopływu wody w odcinku.

Conceptual model showing how morphological conditions of various river systems affect flood waves in their downstream movement

Shaded areas - parts of a given overbank flow being transferred in an extra-channel zone; inflow hydrographs are shown by solid line and outflow hydrographs by dashed line. The model presents the changes in flood hydrograph reflecting only the action of transformation mechanisms, assuming there is no water addition in a reach.

http://rcin.org.pl



Ryc. 22. Model zmian prędkości przepływu wywołanych regulacją koryta rzecznego
Conceptual model of changes in flow velocity following channel regulation

http://rcin.org.pl

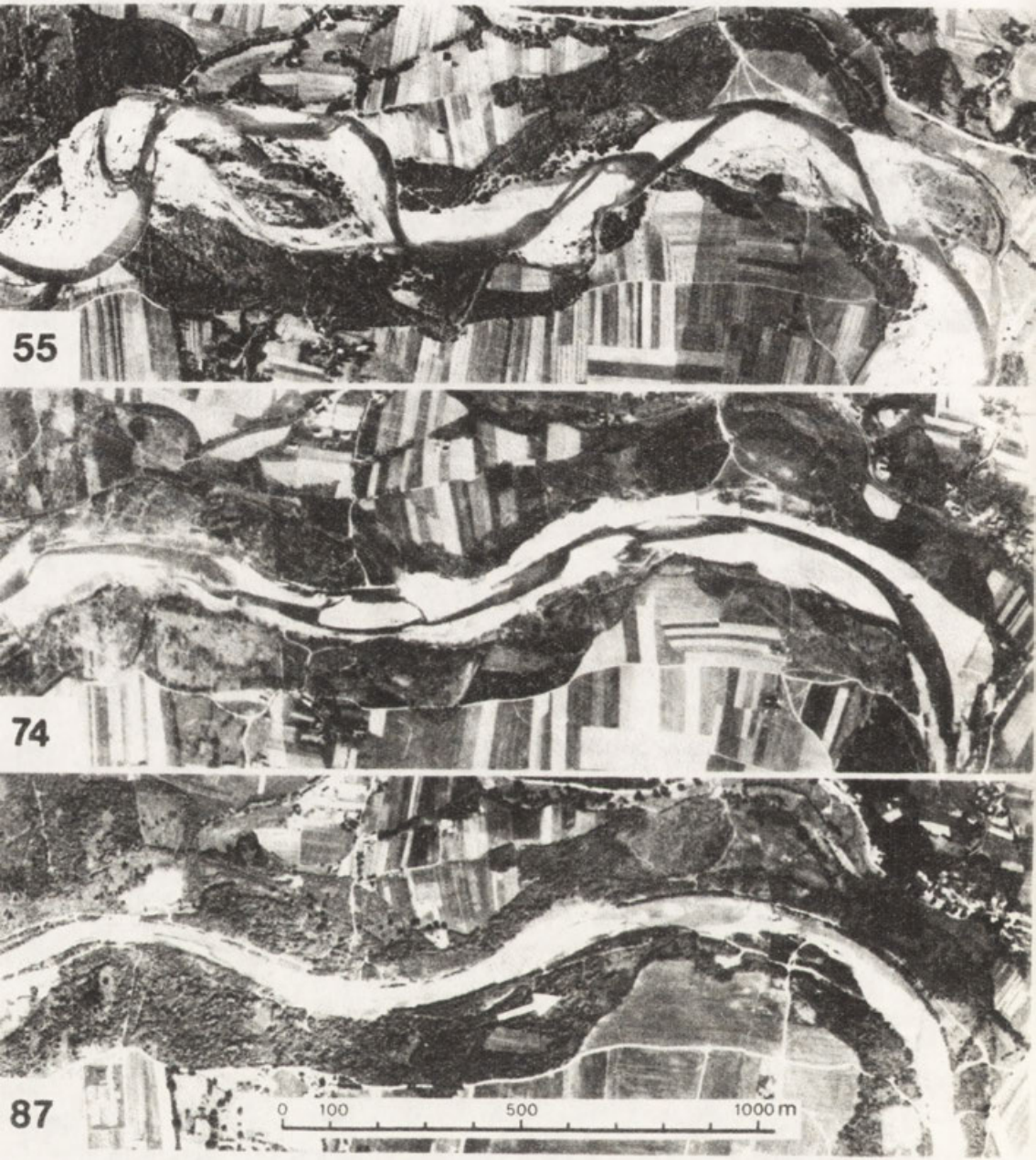
Fot. 1. Budowa równiny aluwialnej Raby z końca XIX w. w podcięciu brzegu w Siedlcu (0,5 km poniżej Książnic)

Opis profilu w tekście. Widoczny niewielki udział piaszczystych osadów pozakorytowych w budowie równiny aluwialnej. Na tyczce skala co 25 cm. Na pierwszym planie współczesne żwiry platformy łachy.

Structure of the Raba River alluvial plain from the end of the 19th century seen in the cutbank at Siedlec (0,5 km downstream of Książnice)

The horizontally stratified sandy gravels (deposits of the upper part of a channel bar) reach high above the present-day mean water table, and the sandy overbank deposits contribute little to the alluvial-plain formation. 25-cm scale on levelling rod. The present-day bar platform gravels in the foreground.

http://rcin.org.pl

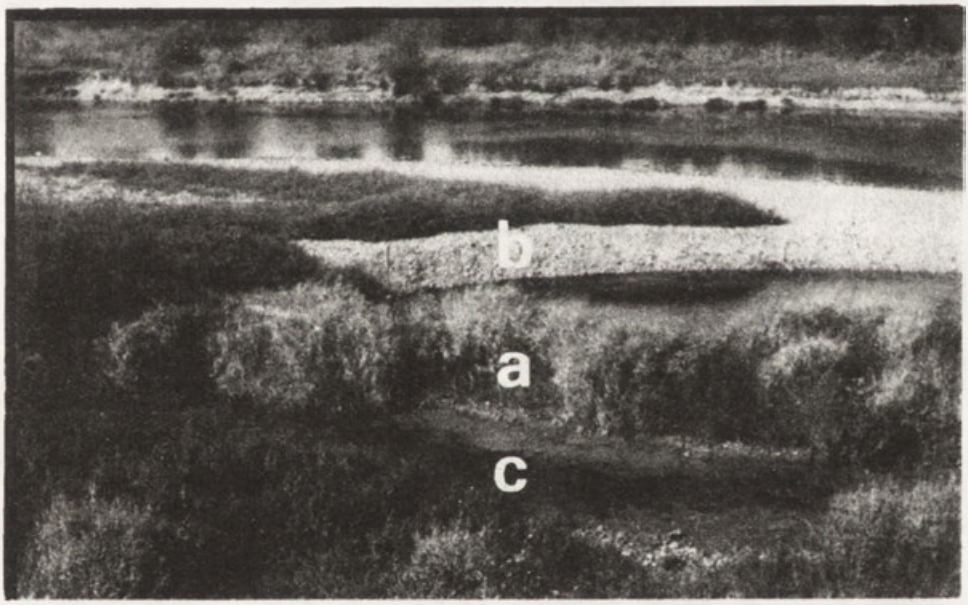


Fot. 2. Zdjęcia lotnicze odcinka środkowej Raby w Winiarach ukazujące zmiany koryta rzecznego w latach 1955-1987

Channel changes in the middle course of the Raba River between 1955 and 1987 as exemplified by aerial photos of the reach near Winiary taken in 1955, 1974 and 1987

http://rcin.org.pl

Fot. 3. Ogólny widok koryta Raby w odcinku roztokowym (Winiary, 3,5 km poniżej Dobczyc)
View of the Raba River channel in a braided reach at Winiary, 3.5 km downstream of Dobczyce



Fot. 4. Ogólny widok koryta Raby w krętym odcinku (Winiary, 3 km poniżej Dobczyc)
W obrębie łachy ponadplatformowej wyróżniono mezośrodowiska depozycyjne: a - podłużny grzbiet żwirowy, b - poprzeczny odsyp żwirowy, c - koryto wewnętrzne.
View of the Raba River channel in a high-sinuosity reach at Winiary, 3 km downstream of Dobczyce
Three depositional mesoenvironments are distinguished within the supraplatform bar: a - longitudinal gravel ridge, b - transverse gravel bar, c - inner channel.

http://rcin.org.pl

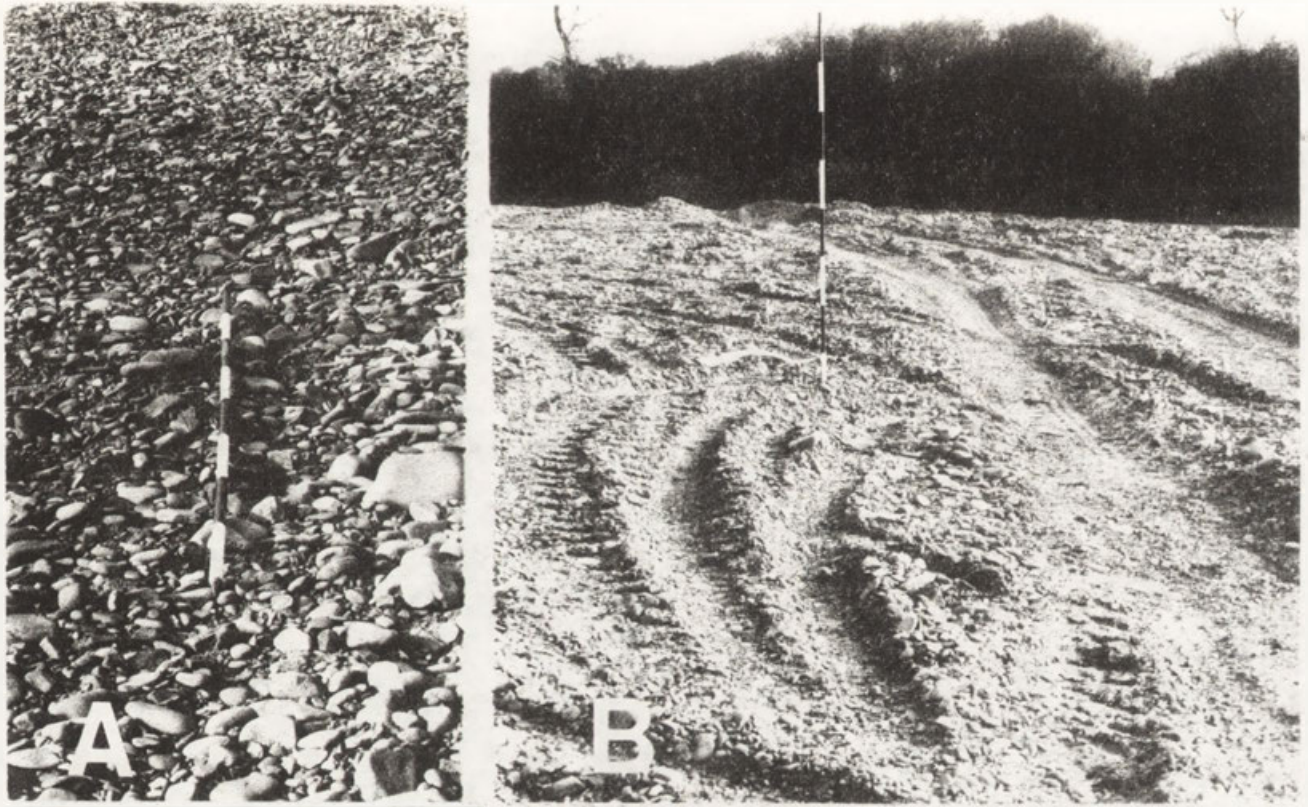
Fot. 5. Łacha meandrowa, która powstała w wyniku utworzenia się poprzecznego odsypu żwirowego

W trakcie progradacji czoła odsypu poprzecznego nieaktywna depozycyjnie łacha boczna ulega wbudowaniu w obręb łachy meandrowej, spełniając rolę inicjalnej platformy łachy.

Point bar origination due to formation of a transverse bar

Progradation of the transverse-bar front brings about the depositionally inactive side bar to be included into the point bar as an initial bar platform.

http://rcin.org.pl



Fot. 6. A. Powierzchnia łachy żwirowej pokryta brukiem korytowym (stan naturalny)
B. Zniszczona w trakcie eksploatacji żwirów naturalna struktura osadów

Widoczne zwiększenie szorstkości powierzchni łachy (wykop i koleiny) oraz odsłonięcie piaszczysto-drobnożwirowej masy wypełniającej umożliwiające jej wymywanie podczas przepływu wezbraniowego.

A. Paved surface of a gravel bar (a natural state)
B. Destruction of the natural sediment structure during a gravel exploitation

Visible an increase in channel-form roughness (ruts and excavation) and an exposure of sandy-granule matrix of the gravel to be outwashed during a flood flow.

http://rcin.org.pl

Fot. 7. Zniszczenie bruku korytowego w wyniku eksploatacji największych otoczaków z powierzchni łachy
Destruction of bed armouring through exploitation of cobbles from the bar surface

http://rcin.org.pl

Fot. 8. Powierzchnia czynnej od około piętnastu lat równi zalewowej (FP) ze żwirami nie przykrytymi drobnoziarnistymi osadami pozakorytowymi

We wkopie w górnej części zdjęcia widoczny kompleks osadów pozakorytowych o miąższości 1 m osadzonych w ciągu 15 lat funkcjonowania starszej równi zalewowej przekształconej przed piętnastu laty w terasę (T) w wyniku pogłębiania koryta.

Surface of a flood plain (FP), active for fifteen years, with substratum gravels lacking a cover of fine-grained topstratum deposits

An overbank-sediments complex, 1 m thick, visible in the outcrop, was deposited during the fifteen-years-long period of activity of the former flood plain, having been transformed into the terrace (T) fifteen years ago due to channel downcutting.

http://rcin.org.pl

Fot. 9. Zawieszenie gęstej strefy korzeniowej roślinności nadrzecznej wysoko ponad zwierciadłem wody w wyniku szybkiego pogłębiania koryta

Wystawienie na działalność wód powodziowych i spływającej kry dolnej, nie chronionej korzeniami części brzegów zwiększyło ich podatność na erozję.

Dense root network of riparian vegetation elevated highly above the water level

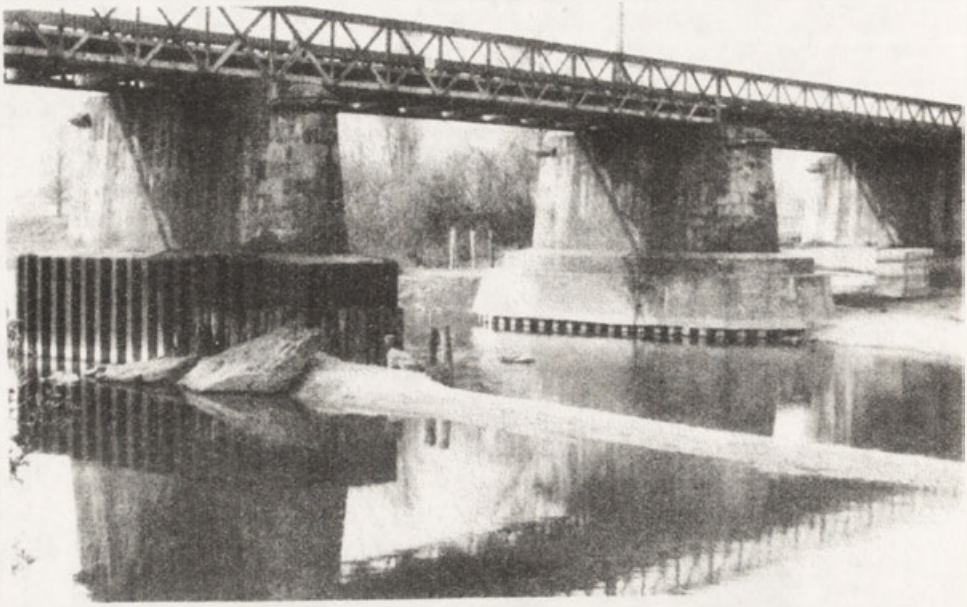
Undercutting the banks by flood water and flowing ice floes in their lower part lacking the root screen increases their susceptibility to erosion.

http://rcin.org.pl

Fot. 10. Rozległa terasa żwirowa zasiedlana jedynie przez roślinność trawiastą
Gęste zarośla łęgowe ograniczone są do brzegów rzeki i jej dopływu.

Wide gravel-supported terrace being overgrown only with grass
Alder and willow trees are confined to the banks of the river and its tributary.

http://rcin.org.pl



Fot. 11. Podmyte filary mostu na Rabie w Książnicach

W ciągu ostatnich 80. lat nastąpiło tu pogłębienie rzeki o 3 m.

Undermined pillars of a bridge at Książnice

In the last 80 years channel downcutting amounted to 3 m here.

Fot. 12. Zmiany cech teksturalnych i strukturalnych żwirów łach środkowej Raby począwszy od drugiej połowy XIX w.

A - masywne żwiry o rozproszonym szkielecie ziarnowym (druga połowa XIX w.); B - wypełnione ciasno upakowane żwiry, widoczna imbrykacja otoczaków (lata 50.); C - niewypełnione, ciasno upakowane żwiry, widoczne normalne frakcjonowanie, ziarna zapadają z prądem (lata 50.); D - masywne, normalnie upakowane żwiry (osady współczesnej łachy środkorytowej); E - niewypełnione ciasno upakowane żwiry wykazujące normalne frakcjonowanie i tabularne warstwowanie przekątne, deponowane na stoku osypiskowym współczesnego odsypu poprzecznego w krętym odcinku. Na tyczce skala co 25 cm.

Changes in texture and stucture of the Raba River bar gravels between the second half of the 19th century and the present

A - massive, dilated framework gravels (second half of the 19th century); B - filled underloose gravels, visible gravel imbrication (the 1950s); C - normally graded, openwork gravels, clasts dip downflow (the 1950s); D - massive, normally loose gravels (present-day mid-channel bar deposits); E - normally graded, planar cross-stratified, openwork gravels originating on the foresets of the present-day transverse bar in a high-sinuosity reach. 25-cm scale on levelling rod.

http://rcin.org.pl

http://rcin.org.pl

Fot. 13. Powierzchnia współczesnej łachy żwirowej w korycie środkowej Raby

Widoczny dobrze wykształcony bruk korytowy - warstwa stosunkowo gruboziarnistego osadu powstała w wyniku wypłukania drobniejszych ziarn ze złożonego osadu. W środku zdjęcia skupienie otoczaków. Kierunek przepływu od prawej ku lewej.

Surface of a gravel bar in the middle Raba River channel

Visible bed armouring and, in the centre of the photograph, a pebble cluster. Flow was from right to left.

http://rcin.org.pl

WYDAWNICTWA IG iPZ PAN
VARIA

Bibliografia Geografii Polskiej 1985/1986, 1993, 467 s.

Streszczenia prac habilitacyjnych i doktorskich 1986, 1987, 1988, 134 s.

Centralny katalog zbiorów kartograficznych w Polsce, zeszyt 5. Wieloarkuszowe mapy topograficzne Polski 1576-1870, 1984, cz 1, 109 s., cz. 2 tab. 220, zł 120 000,-

Katalog dawnych map Rzeczypospolitej w kolekcji Emeryka Hutten-Czapskiego i w innych zbiorach. Oprac. W. Kret, 1978, 164 s., 37 map; t. 2, Mapy XVIII wieku; Oprac. T. Paćko, D. Stachnal-Talanda, E. Gołąb-Jankowska, 1992, 250 s., 56 map, zł 250 000,-

WYKAZ ZESZYTÓW CONFERENCE PAPERS

1 Restructuring of economies and regional development, Warszawa 1988, 156 s.

2 Natural environment of suburban areas as development factor of big cities, Warszawa 1988, 184 s.

3 The state, modes of production and world political map, Warszawa 1989, s. 186,

4 Problemy współczesnej topoklimatologii / Problems of contemporary topoclimatogy, Warszawa 1990, 223 s.

5 Agricultural classifications. A review of methodology. Warszawa 1990, s. 69.

6 Global change regional research centres, Warszawa 1990, 181 s.

7 The impact of urbanization upon rural areas, Warszawa 1990, 272 s.

8 The processes of depopulation of rural areas in Central and Eastern Europe, Warszawa 1990, 322 s.

9 Przestrzenne problemy zdrowotności / Spatial problems of health, Warszawa 1990, 322 s.

10 Evolution of population and economic activities in urban regions, Warszawa 1990, 168 s.

11 Geograficzne badania nad płodnością / Geographical research on fertility, Warszawa 1991, 123 s., zł 5000,-

12 Restructuring and spatial strategy, Warszawa 1991, 203 s., zł 5000,-

13 Impact des mutations structurelles sur le developpement territorial en Europe, Warszawa 1991, 215 s., zł 20 000,-

14 Sesja naukowa IGiPZ PAN 1991 / Annual Conference 1991, Warszawa 1991, 156 s., zł 20 000,-

15 Housing and urban policy in transition, Warszawa 1992, 112 s., zł 20 000,-

16 Geographical issues of social and economic transformation of contemporary Japan and Poland, Warszawa 1992, 158 s., zł 20 000,-

17 Współczesna geografia polityczna / Contemporary political geography, Warszawa 1993, 128 s., zł 20 000,-

18 Geography of organic matter production and decay, SCOPE Seminar Szymbark September 11-18 1991, Warszawa 1993, 187 s., zł 30 000,-

http://rcin.org.pl

WYKAZ ZESZYTÓW DOKUMENTACJI GEOGRAFICZNEJ

za ostatnie lata

1990

1 A. KOTARBA (red.) - Współczesne procesy morfogenetyczne w Polsce. Wybrane zagadnienia, 84 s.
2-3 B. LUCHTER - Przestrzenne związki użytkowania ziemi w Krakowie, 90 s.
4 M. KUCZMARSKI - Usłonecznienie Polski i jego przydatność do helioterapii, 70 s.
5-6 M. DEGÓRSKI - Warunki siedliskowe kateny ekosystemów leśnych na Wysoczyźnie Rawskiej (ze szczególnym uwzględnieniem dynamiki wodno-troficznych właściwości gleb), 206 s.

1991

1 T. KOZŁOWSKA-SZCZĘSNA - Wyniki badań bioklimatu Polski. Cz. II, 83 s., zł 6500,-
2 M. KLIMASZEWSKI - Progi strukturalne - paralele geomorfologiczne, 62 s., zł 5000,-
3-4 Z. RYKIEL (red.) - Studia z geografii społecznej, 132 s., zł 13 000,-
5 P. SZELIGA - Międzynarodowa zależność gospodarcza w świetle ujęć komplementarnych, 84 s., zł 8000,-
6 M. ROŚCISZEWSKI (red.) - Zmiany światowej przestrzeni społeczno-gospodarczej, 72 s., zł 8000,-

1992

1 M. BANACH, R. GLAZIK - Zbiornik Włocławski - niektóre problemy z geografii fizycznej, 69 s., zł 9000,-
2 R. PRZYBYLAK - Stosunki termiczno-wilgotnościowe na tle warunków cyrkulacyjnych w Hornsundzie (Spitsbergen) w okresie 1978 - 1983, 107 s., zł 13 000,-
3 E. NOWOSIELSKA - Teoria Christallera - prawda i mity (w sprawie nieporozumień pojęciowych), 77 s., zł 15 000,-
4 R. SZCZĘSNY - Przemiany struktury przestrzennej rolnictwa indywidualnego Polski w latach 1938- 1988. Próba syntezy, 107 s., zł 24 000,-
5-6 A.S. KOSTROWICKI (red.) - Wpływ urbanizacji na układy ekologiczne strefy podmiejskiej Warszawy, 170 s., zł 45 000,-

SUPLEMENT - J.H. SZYRMER (red.) - Informator geografii polskiej, 180 s., zł 60 000,-

1993

1 T. LIJEWSKI - Koncentracja aktywności gospodarczej i społecznej w 150 większych miastach Polski, 94 s., zł 30 000,-
2 A. MISZCZUK - Wyludnianie się wsi a rolnictwo Wschodniej Lubelszczyzny, 86 s., zł 30 000,-
3 W. STOLA - Struktura przestrzenna i klasyfikacja funkcjonalna obszarów wiejskich Polski, 66 s., zł 30 000,-
4-5 A. KOTARBA (red.) - Z badań fizycznogeograficznych w Tatrach, 81 s., zł 40 000,-

http://rcin.org.pl