

inżynieria środowiska

Podstawy geomorfologii
i morfodynamiki rzek

Zofia Gręplowska
Joanna Korpak
Anna Lenar-Matyas



Kraków 2022



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki

Podstawy geomorfologii i morfodynamiki rzek

inżynieria środowiska

**Podstawy geomorfologii
i morfodynamiki rzek**

Zofia Gręplowska
Joanna Korpak
Anna Lenar-Matyas

Kraków 2022

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO WYDAWNICTWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tomasz Kapecki

PRZEWODNICZĄCA KOLEGIUM REDAKCYJNEGO WYDAWNICTW DYDAKTYCZNYCH

Agata Zachariasz

REDAKTOR SERII - ŚRODOWISKO

Magdalena Jaremkiewicz

RECENZENCI

Leszek Książek

Łukasz Wiejaczka

KOORDYNATORZY PROJEKTU

Otmar Vogt

Małgorzata Kowalczyk

REDAKTOR WYDAWNICZY

Agnieszka Filosek

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Michał Stachowski

SKŁAD I ŁAMANIE

Małgorzata Murat-Drożyńska

PROJEKT OKŁADKI

Karolina Szafran

Tekst został opublikowany w ramach projektu „Programowanie doskonałości – PK XXI 2.0. Program rozwoju Politechniki Krakowskiej na lata 2018-2022”.

Dofinansowanie z Europejskiego Funduszu Społecznego: 18,048,774.96 PLN

© Copyright by Politechnika Krakowska

© Copyright by Zofia Gręplowska, Joanna Korpak, Anna Lenar-Matyas



<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Edycja online

eISBN 978-83-67188-05-0

7,5 ark. wyd.

Wydawnictwo PK, ul. Skarżyńskiego 1, 31-866 Kraków; 12 628 37 25, fax 12 628 37 60

wydawnictwo@pk.edu.pl

www.wydawnictwo.pk.edu.pl

Adres korespondencyjny: ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków



Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz Społeczny



SPIS TREŚCI

Wstęp	6
1. Geomorfologia koryt rzecznych	8
1.1. Wprowadzenie.....	8
1.2. Procesy fluwialne	8
1.3. Przestrzenna lokalizacja procesów fluwialnych w profilu podłużnym rzeki	21
1.4. Tendencje procesów fluwialnych w Polsce	24
1.5. Bieg (układ poziomy) rzeki	26
1.6. Doliny rzeczne.....	34
1.7. Terasy rzeczne	38
1.8. Hydrauliczna analiza hydromorfologii cieków.....	40
2. Procesy rumowiskowe w rzekach	45
2.1. Geneza rumowiska rzeczno-łupkowego.....	45
2.2. Klasyfikacja rumowiska	45
2.3. Charakterystyka rumowiska (ze szczególnym uwzględnieniem rumowiska karpackich dopływów Wisły)	47
2.4. Początek ruchu rumowiska	53
2.5. Natężenie transportu rumowiska wleczonego.....	58
3. Wpływ regulacji na morfologię koryta cieków	64
3.1. Budowle regulacyjne cieków karpackich.....	64
3.2. Historia regulacji cieków karpackich	71
3.3. Morfologiczna rola regulacyjnych budowli hydrotechnicznych	73
3.4. Zmiany morfologii odcinka koryta regulowanego wielokrotnie z zastosowaniem różnych systemów regulacji	102
3.5. Morfologiczna rola regulacji koryt w funkcjonowaniu całych systemów korytowych	113
3.6. Prawidłowości zmian systemów korytowych pod wpływem regulacji koryt.....	119
3.7. Ocena regulacji hydrotechnicznych i działalność renaturyzacyjna	122
4. Hydromorfologia jako wskaźnik jakości ekologicznej rzek	128
4.1. Ramowa dyrektywa wodna – stan wód płynących.....	128
4.2. Cele hydromorfologicznej waloryzacji rzek.....	131
4.3. Metody oceny morfologicznej i ich zastosowanie	132
4.4. Ocena stanu ekologicznego rzek Polski	136
Bibliografia	146

WSTĘP

Niniejszy podręcznik przeznaczony jest dla konkretnych odbiorców – studentów Politechniki Krakowskiej, studiujących na kierunku „gospodarka przestrzenna” i uczestniczących w kursie dotyczącym geomorfologii fluwialnej. Podręcznik jest również zalecany do użytku dla studentów kierunków „inżynieria i gospodarka wodna” oraz „inżynieria środowiska” (specjalność „hydroinżynieria”). Praca stanowi kompendium wiedzy przekazywanej na wymienionych kursach. Nie porusza zatem wszystkich zagadnień z zakresu geomorfologii koryt rzecznych. Czytelnik zainteresowany rozszerzeniem wiedzy z wybranego tematu ma do wyboru wiele różnych publikacji, których autorami są znakomici znawcy tematu z największych ośrodków naukowych świata. Spis najważniejszych z nich znajduje się w bibliografii.

Zebrany materiał ma w założeniu przybliżyć studentom podstawowe definicje, opisać procesy zachodzące w naturalnych ciekach, a także wskazać skutki prowadzonych prac hydrotechnicznych w korytach rzek i potoków. Autorki starały się przedstawić problemy w sposób interdyscyplinarny, wyróżniając aspekty przyrodnicze i hydrotechniczne. Znając przyczyny i skutki deformacji koryt, łatwiej jest podejmować decyzje przy planowaniu różnego rodzaju przedsięwzięć zlokalizowanych w pobliżu rzek i potoków.

Podręcznik składa się z czterech rozdziałów. Pierwszy dotyczy morfologii i morfodynamiki rzek. Omówiono tu zarówno formy korytowe, jak i procesy kształtujące koryta rzek w układzie pionowym i w planie. Drugi rozdział opisuje procesy rumowiskowe. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono genezę rumowiska rzecznego, jego klasyfikację i charakterystyki. Ważnym zagadnieniem omówionym w tym rozdziale jest transport rumowiska. Scharakteryzowano warunki umożliwiające początek ruchu danej frakcji, a także przedstawiono formuły empiryczne na natężenie transportu rumowiska wlezonego. Temat ten ma jedynie charakter informacyjny. Trzeci rozdział przedstawia wpływ regulacji technicznych na morfologię koryta cieku. Przedstawiono również różne działania renaturyzacyjne jako najnowsze podejście do ingerencji prowadzonych w rzekach górskich. Rozdział ten stanowi nowość w tego typu podręcznikach, ponieważ, oprócz teoretycznego opisu zjawisk wywołanych pracami hydrotechnicznymi lub renaturyzacyjnymi, przytoczone zostają wybrane przykłady zmian obserwowane w ciekach karpackich, dotyczące jedynie rzek górskich, co wynika z obszaru zainteresowań badawczych autorek. Czwarty i ostatni

rozdział ukazuje rolę elementów geomorfologii fluwialnej w ocenie jakości ekologicznej cieków i przedstawiono w nim metodę stosowaną w ocenie stanu hydromorfologicznego rzek.

Mamy nadzieję, że informacje zawarte w podręczniku pomogą zrozumieć złożoność procesów zachodzących w dnach dolin rzecznych i tym samym okażą się pomocne w podejmowaniu słusznych decyzji w ich zagospodarowywaniu.

Autorki

1. GEOMORFOLOGIA KORYT RZECZNYCH

1.1. WPROWADZENIE

Geomorfologia to nauka o rzeźbie powierzchni Ziemi. Zajmuje się ona opisem (morfografia), pomiarem (morfometria), rozmieszczeniem, rozwojem, genezą (morfogeneza) oraz prognozą ewolucji form powierzchni Ziemi. Ewolucja ta jest następstwem procesów kształtujących powierzchnię Ziemi. Rozróżnia się dwa typy tych procesów:

- endogeniczne, wywołane działaniem czynników pochodzących z wnętrza Ziemi, np. wulkanizm, trzęsienia ziemi,
- egzogeniczne, wywołane działaniem czynników zewnętrznych, np. **procesy fluwialne**, denudacyjne, eoliczne, glacialne, pływy, falowanie morskie.

1.2. PROCESY FLUWIALNE

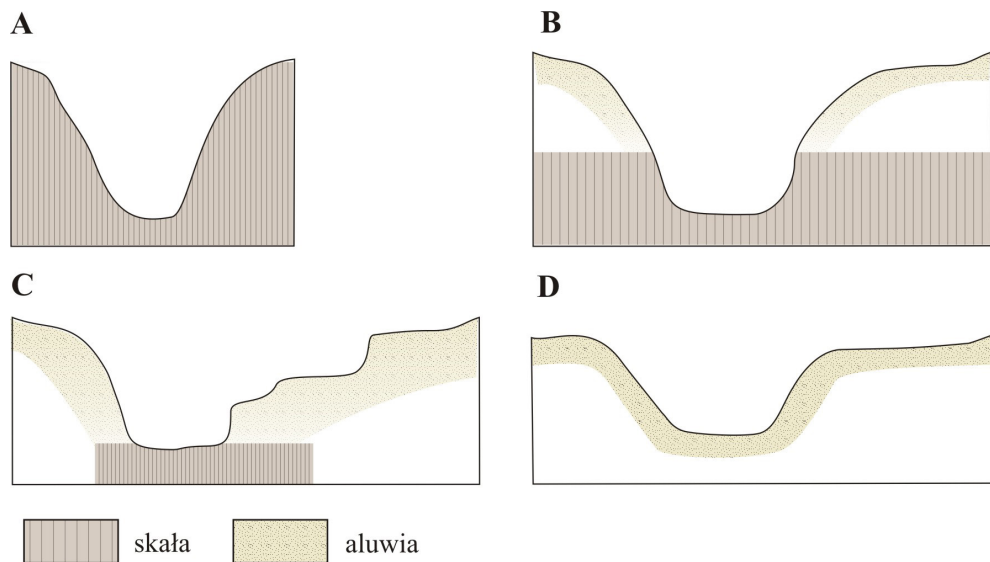
Wyjątkowo dużą rolę w kształtowaniu powierzchni Ziemi przypisuje się działalności rzek. Formy będące skutkiem działalności rzek obserwuje się na wszystkich kontynentach i we wszystkich strefach klimatycznych. Działalność rzek polega przede wszystkim na przekształcaniu – rozczłonkowywaniu form utworzonych przez siły wewnętrzne.

Morfogenetyczna działalność rzeki, czyli jej praca, polega na:

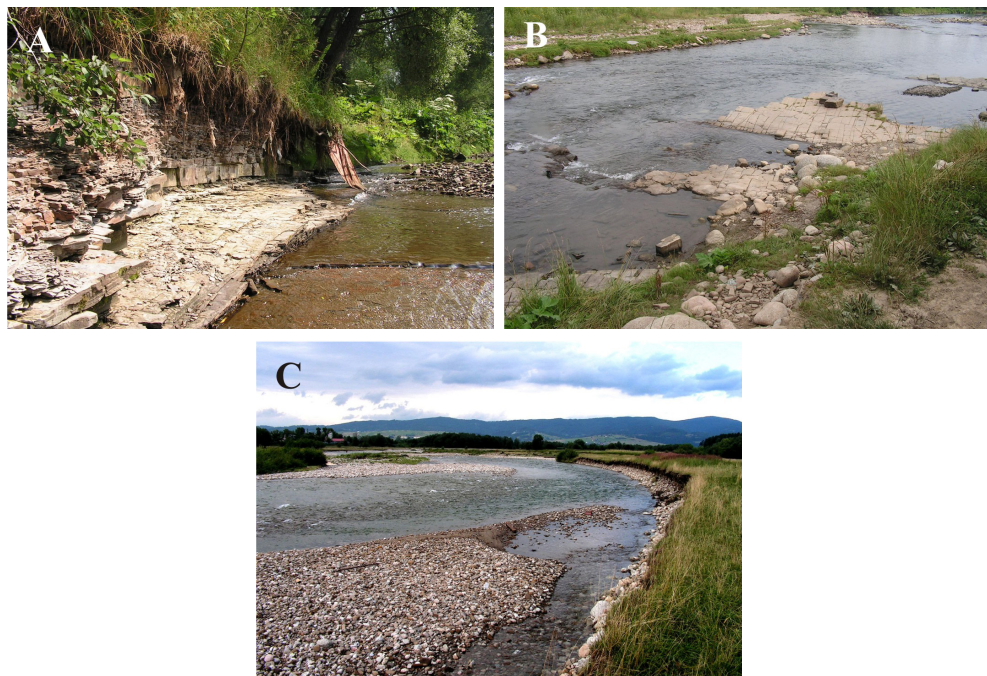
- erodowaniu (żłobieniu) dna i brzegów,
- transporcie materiału,
- osadzeniu niesionego materiału.

Ze względu na to, że proces erozji, a także formy będące jego skutkiem, zależy przede wszystkim od rodzaju materiału, w którym wycięte są koryta, należy zwrócić uwagę na to, że występują trzy typy koryt:

- **skalne**, w których dna i brzegi wycięte są w litej skale (rys. 1.1A, fot. 1.1A),
- **skalno-aluwialne**, w których dna wycięte są w skale, a brzegi (w całym przekroju lub w jego górnej części) w materiale rzeczonym, naniesionym w procesie akumulacji rzecznej (rys. 1.1B i C, fot. 1.1B),
- **aluwialne**, w których dna i brzegi wyżłobione są w uprzednio naniesionym materiale rzeczonym (rys. 1.1D, fot. 1.1C).



Rys. 1.1. Typy koryt ze względu na budujący je materiał: A) koryto skalne, B i C) koryto skalno-aluwialne, D) koryto aluwialne



Fot. 1.1. Różne typy odcinków koryta Białego Dunajca: A) odcinek skalny z podłogą skalną, B) odcinek skalno-aluwialny ze skalnym dnem i aluwialnymi brzegami, C) odcinek aluwialny (fot. J. Korpak)

1.2.1. EROZJA RZECZNA

Działalność rzeki, polegająca na pogłębianiu i poszerzaniu koryta, nosi nazwę erozji rzecznej¹.

Intensywność i przebieg/skutki tego procesu zależą od:

- energii/zdolności transportowej strumienia,
- odporności podłoża.

Obydwa powyższe czynniki mają taką samą wagę.

Strumień płynącej wody ma określoną zdolność transportową, zależną od natężenia przepływu i morfostatycznych własności koryta (np. spadku podłużnego koryta, kształtu jego przekroju poprzecznego), które to czynniki determinują wartości parametrów przepływu, takich jak prędkości przepływu, naprężenia styczne na dno i brzegi itp. Każdy ze strumieni dąży do wykorzystania swojej zdolności transportowej. Jeśli ilość rumowiska dopływającego z odcinka położonego wyżej jest niższa od zdolności transportowej w danym przekroju, to strumień pobiera materiał z koryta, oczywiście pod warunkiem, że podłoże ma odpowiednio niską odporność na wymienione dalej procesy przy danych parametrach przepływu wody.

Ze względu na kierunek przebiegu procesu erozji rzecznej rozróżnia się erozję:

- denną/wgłębną,
- boczną,
- wsteczną.

Erozja denną/wgłębną (*bed erosion*) – to pogłębianie dna koryta na skutek jego mechanicznego ścierania przez transportowany materiał (zwłaszcza w korytach skalnych) lub odrywania pojedynczych ziaren od podłoża (w przypadku koryt aluwialnych) [56]. Pojęcia „erozja denną” używa się w odniesieniu do koryt o dnie aluwialnym, natomiast „erozja wgłębną” – do koryt o dnie skalnym.

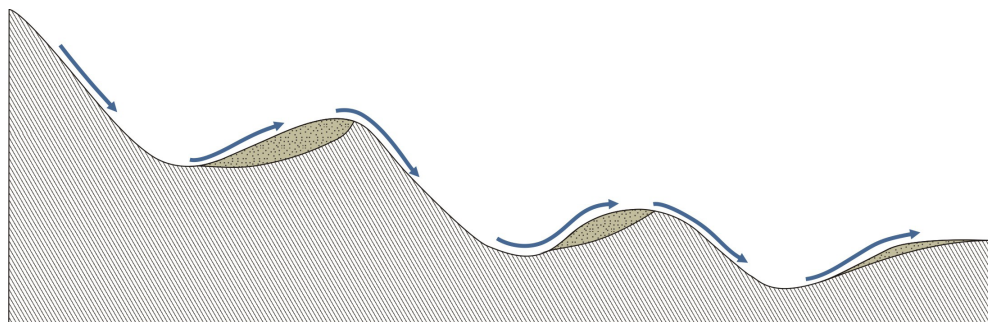
Pogłębianie może być skutkiem następujących mechanizmów:

- eworsji, polegającej na pogłębianiu w wyniku ruchu wirowego wody (wirry poziome i pionowe) obciążonej grubym rumowiskiem; skutkiem są misy i kotły oraz rynny eworsyjne; ich głębokość w potokach górskich wynosi od kilkudziesięciu centymetrów do kilku metrów;
- abrazji, jako wyniku uderzania materiałem wleczonym; skutkiem są rynny abrazyjne, nawiązujące do wychodni skał o niskiej odporności, a także podłogi skalne, odkrywane wówczas, gdy spadek koryta pokrywa się z upadem warstw;
- kawitacji, polegającej na wyrywaniu okruchów skalnych (np. przy krawędzi wodospadu) w strefie obniżonego ciśnienia (podciśnienia), towarzyszącego przepływowi strumienia wody o dużej prędkości;

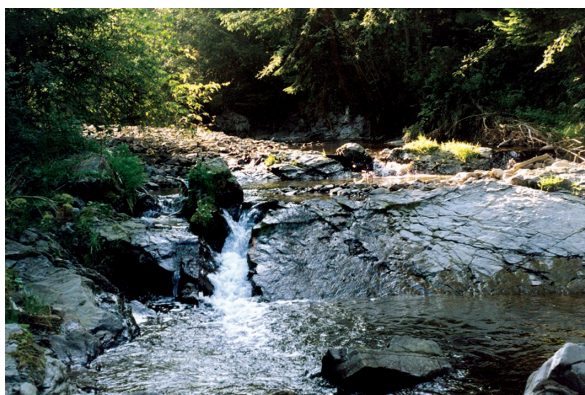
¹ Erozja rzeczna to jedna z postaci liniowej erozji wodnej (pozostałe to drogowa i wązowowa). Erozja wodna może mieć poza tym charakter powierzchniowy lub podpowierzchniowy.

- korozji, czyli chemicznego rozkładu skały w wyniku jej kontaktu z wodą (podlegają jej przede wszystkim skały wapienne i gipsowe);
- odrywania, gdy przekroczony zostanie warunek równowagi ziarna spoczywającego na powierzchni dna koryta.
- W wyniku erozji dennej tworzą się formy:
 - wypukłe: wodospady, progi i kaskady, czyli sekwencje niskich progów skalnych (rys. 1.2, fot. 1.2 i 1.3), żebra (wychodnie skał osadowych o zróżnicowanej odporności), kaskady (wychodnie skał krystalicznych) i ostrogi,
 - wklęsłe: misy, kotły eworsyjne (rys. 1.2), rynny abrazyjne, podłogi skalne (fot. 1.1A).

Najbardziej efektywnymi formami, charakterystycznymi dla koryt skalnych, są wodospady (wysokie, pionowe lub przewieszane progi, z których strumień wody spada bez kontaktu z podłożem) (fot. 1.4). Najwyższy wodospad na Ziemi to Santo Angel w Wenezueli (ok. 979 m), a w Polsce – Wielka Sikława w tatrzańskej Dolinie Roztoki (ok. 70 m). Wodospadom towarzyszą zwykle kotły eworsyjne – cylindryczne zagłębienia, których głębokość może sięgać do 10 m (w Polsce do 2 m) [56].



Rys. 1.2. Progi skalne i kociołki eworsyjne poniżej nich w korycie potoku górskiego



Fot. 1.2. Rozcięty próg skalny z kotłem eworsyjnym poniżej w górnym biegu koryta Porębianki (fot. J. Korpak)



Fot. 1.3. Kaskada w korycie Mszanki (fot. J. Korpak)



Fot. 1.4. Wodospad w Parku Narodowym Chapada Dos Veadeiros (Brazylia) (fot. J. Korpak)

Koryta skalne mają zwykle duży spadek, niewyrównane dno i ustabilizowany przebieg.

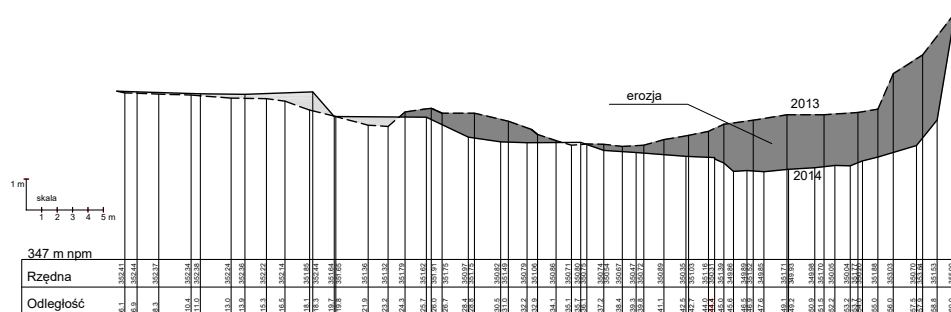
Koryta aluwialne są wycięte w materiale uprzednio naniesionym przez rzekę. Ze względu na to, że materiał ten jest mało zwięzły, koryta aluwialne podlegają znacznym zmianom (nawet w czasie pojedynczego wezbrania). Rodzaj osadów aluwialnych wpływa na wykształcenie koryta: rzeki wcinające się w pokrywy żwirowe mają koryta zmienne o dużej szerokości i spadku ($> 0,5\%$), natomiast rzeki wcinające się w pokrywy mułowe mają koryta głębsze i o mniejszym spadku ($< 0,5\%$) [81].

Erozja boczna to rozmywanie i podcinanie brzegów koryta rzecznego przez płynącą wodę.

Erozja boczna jest skutkiem:

- złobienia mechanicznego w korytach skalnych,
- rozmywania hydraulicznego w korytach aluwialnych.

Przykład zmian profilu poprzecznego koryta rzecznego, będących wynikiem erozji bocznej, pokazano na rysunku 1.3.



Rys. 1.3. Zmiana przekroju poprzecznego rzeki w wyniku erozji bocznej

Na fotografii 1.5 przedstawiono formę powstałą w wyniku działania procesu erozji bocznej – podcięcie erozyjne. Podcięcia erozyjne występują również w obrębie koryt skalnych.



Fot. 1.5. Podcięcie erozyjne (fot. J. Korpak)

Rzeka o biegu prostoliniowym podcina brzegi w niewielkim stopniu. W rzekach o biegu krętym następuje podcinanie brzegu wklęsłego. Wskutek jednostronnego podcinania i pogłębiania przekrój poprzeczny rzeki krętej jest asymetryczny. Materiał wyrwany z brzegów wklęsłych jest przenoszony i odkładany pod brzegiem wypukłym.

Warto zwrócić uwagę, że erozja boczna w korytach aluwialnych jest procesem złożonym. Wynika to z faktu, że materiał brzegów jest często bardziej zróżnicowany niż dna (nawet w przypadku cieków w zlewniach górskich stwierdza się obecność materiału drobnoziarnistego, takiego jak muł czy glina, który powoduje, że brzegi wykazują pewien stopień kohezji). Odporność na erozję boczną może zwiększać też system korzeniowy roślinności porastającej brzegi (skarpy) koryta. Wykaz najważniejszych procesów powodujących erozję boczną zawiera tabela 1.1 [96].

Tabela 1.1

Mechanizmy powodujące erozję boczną (wg [96], zmienione)

Mechanizm	Opis
przepływ wody	Usuwanie powierzchniowych cząstek gruntu przez płynący strumień wody.
abrazja	Przemieszczanie cząstek gruntu budującego skarpę na skutek uderzania przez cząstki niesione przez wodę lub przez płynącą krę lodową.
siła ciężkości	Staczanie się cząstek powierzchniowych po skarpach o nachyleniu większym od kąta stoku naturalnego.
zamarzanie – odmarzanie	Cykliczne zmiany temperatury powodujące pęknięcia skał na skutek nadmiernych skurczów i rozszerzeń, co prowadzi do rozdrobnienia tych skał.
opady atmosferyczne i falowanie	Powierzchniowa destrukcja spowodowana uderzeniami kropeł deszczu lub gradu, a także spływem wody oraz porywaniem cząstek gruntu na skutek falowania (wiatrowego lub powodowanego przez żeglugę).
działalność człowieka na obszarze przybrzeżnym i w samym korycie	Aktywność powodująca rozluźnienie materiału brzegowego, a także korytowego, np. pobór rumowiska rzecznego – piasku i żwiru, wypas zwierząt domowych na brzegach cieków. Zmiana warunków przepływu na odcinkach oddziaływania niektórych obiektów regulacji (skutek uboczny).
mechanizm biologiczny	Uszkodzenia skarpy przez zwierzęta ryjące, zmiana warunków przepływu (zwiększenie zawirowań) przez rumosze drzewny albo szczególną koncentrację roślinności.
mechanizm chemiczny	Rozpuszczanie w wodzie – oddziaływanie na wiązania międzycząsteczkowe gruntów spoiстых.

Powyższe mechanizmy pogrupować można w następujący sposób [96]:

- oddziaływania powierzchniowe:
 - erozyjne oddziaływanie strumienia na stopę skarpy brzegowej oraz wzdłuż powierzchni skarpy, a także erozyjne działanie falowania na wysokości powierzchni zwierciadła wody,
 - niestabilności powierzchni (pęknięcia), wynikające z wysychania gruntów spoiowych,

- przeciążenia gruntu w górnej części obszaru brzegowego, prowadzące do utraty stateczności;
- skutki zmian warunków wilgotnościowych skarp:
 - zanik okresowych czynników stabilizujących (np. napięcia kapilarnego) skarpy w gruntach niespoistych o nachyleniu większym od kąta stoku naturalnego,
 - przebicie hydrauliczne² i wypłukiwanie materiału spoistego wzdłuż uprzywilejowanej drogi filtracji,
 - upłynnienie drobnoziarnistego materiału sypkiego,
 - pęcznienie i kurczenie się gruntów spoistych,
 - obniżenie wytrzymałości na ścinanie gruntów gliniastych w odpowiednich warunkach ciśnienia porowego i stopnia nasycenia wodą;
- skutki różnorodności warunków gruntowych:
 - cienka warstwa gliny w stanie nasycenia wodą, powodująca poślizg wyżej położonych warstw skarpy brzegowej,
 - smarujące działanie wody i wysokie ciśnienie hydrostatyczne wzdłuż powierzchni styku różnych warstw materiału brzegowego jako przyczyna poślizgu i obsuwania się mas gruntu tworzącego brzeg.

Warto też dokonać systematyki mechanizmów erozyjnych (przyczyn niestateczności), charakterystycznych dla brzegów zbudowanych z różnych utworów [67]:

- brzegi zbudowane z materiałów spoistych:
 - nagłe obniżenie się poziomu wody,
 - upłynnienie lub poślizg w warunkach nasycenia wodą,
 - znaczna wysokość brzegu (większa podatność na skutki wymienionych mechanizmów);
- brzegi zbudowane z gruntów sypkich – podatne na erozję powierzchniową:
 - prędkość przepływu w strefie przybrzeżnej (wielkość i zmienność naprężeń stycznych),
 - pulsacje przepływu,
 - oddziaływanie falowania,
 - filtracja;
- brzegi zbudowane z gruntów uwarstwionych, podlegające erozji w wyniku złożonych mechanizmów, których efekt zależny jest od budowy brzegu (np. brzeg z materiału sypkiego może być chroniony przez warstwę materiału spoistego).

Jak widać, przyczyn powodujących erozję boczną w korytach aluwialnych jest wiele. Trudno określić udział poszczególnych czynników w efekcie końcowym i zdefiniować warunki graniczne odpowiadające początkowi rozmywania brzegu.

Z punktu widzenia praktycznego interesująca jest prędkość przesuwania się brzegu, czyli prędkość erozji. W literaturze przedmiotu znaleźć można związki empiryczne,

² Nagła utrata stateczności gruntu, spowodowana działaniem ciśnienia wody.

pozwalające na oszacowanie tej prędkości. Oczywiście mają one charakter lokalny – odnoszą się do rzek z obszaru, dla którego zostały skalibrowane i zweryfikowane.

Przykładowe zależności:

- dla zachodniej Kanady [28]:
 - a) maksymalną prędkość przemieszczania się brzegu v_e zaobserwowano, gdy: $2 < \frac{R}{B} < 3$. Za maksymalną prędkość erozji bocznej przyjęto prędkość przy $\frac{R}{B} = 2,5$. Prędkość tę oznaczono jako $v_{2,5}$. Wynosi ona od 0,73 m/rok do 9,41 m/rok, w zależności od rzeki,
 - b) dla $\frac{R}{B} > 3$: $v_e = 2,5 v_{2,5} \frac{B}{R}$,
im większe R , czyli mniejsza krzywizna, tym mniejsze v_e ,
 - c) dla $\frac{R}{B} < 2$: $v_e = 0,67 v_{2,5} \left(1 - \frac{B}{R}\right)$,
im mniejsze R , czyli większa krzywizna, tym mniejsze v_e , aż do 0 dla $R = B$.

W powyższych wzorach:

- v_e – prędkość erozji bocznej koryta [m/rok],
- B – szerokość koryta,
- R – promień krzywizny koryta;

- według S. Ikedy i in. [29]:

$$v_e = EU \left(\frac{U_{\text{brzeg}}}{U} - 1 \right) \quad (1.1)$$

gdzie:

- E – empiryczny współczynnik erozji bocznej [-],
- U – średnia w przekroju prędkość przepływu,
- U_{brzeg} – średnia w pionie prędkość przepływu przy brzegu.

Erozja wsteczna – wyróżnia się ją ze względu na kierunek przebiegu procesu (a nie ze względu na mechanizm), postępuje bowiem w górę biegu rzeki. Jej skutki są najbardziej widoczne (ale nie w skali długości życia człowieka!) przy wodospadach. Przez podcinanie dolnej części progu wodospadu i stopniowe obrywanie jego górnej części, formy te wykonują pozorną „wędrowkę” w górę biegu rzeki. Również mniejsze progi skalne podlegają nierównomiernemu „cofaniu się” w górę biegu rzeki, zależnemu od lokalnych różnic w odporności podłoża (fot. 1.6). Erozja wsteczna w ujściowym odcinku koryta dopływu jest często efektem pogłębienia koryta w korycie rzeki głównej. Wraz z jego pogłębieniem obniża się bowiem baza erozyjna dla dopływu.

Podsumowując wiadomości o erozji rzecznej, należy podkreślić, że intensywność procesów erozyjnych zależy od parametrów strumienia wody oraz cech materiału budującego koryto i spoczywającego na jego dnie. Największa efektywność erozji występuje tam, gdzie strumień ma dużą moc, a podłoże jest podatne na rozmywanie



Fot. 1.6. Erozja wsteczna w obrębie niewielkiego proggu skalnego (fot. J. Korpak)

(takie warunki występują np. w strefach przejściowych między obszarami górskimi i wyżynnymi a równinami przedgórkowymi czy nizinami i kotlinami, ponieważ koryta są już tam aluwialne, ale ich spadek jest nadal dość duży).

1.2.2. DZIAŁALNOŚĆ AKUMULACYJNA RZEK

Materiał transportowany przez rzekę jest trwale akumulowany (w zbiornikach) lub okresowo deponowany (w obrębie koryta lub łóżyska rzeki).

Depozycja może przebiegać w postaci [33]:

- sedymentacji, czyli powolnego opadania ziaren i ich stabilizacji na dnie,
- akrecji, czyli zwalniania procesu wleczenia ziaren aż do ich stabilizacji (jej wynikiem jest obrukowanie, czyli imbrykacja dna),
- inkursji, polegającej na staczaniu się ziaren do zagłębień,
- dekantacji, czyli wytrącaniu się zawieszin w wodzie stojącej lub płynącej bardzo powoli (prowadzi ona np. do tworzenia mad rzecznych).
- Procesy szczególne stanowią:
 - redepozycja czy resedymentacja,
 - sortowanie (selektywna erozja), prowadzące do laminacji frakcyjnej.

W czasie wezbrań materiał rumowiskowy jest przemieszczany i deponowany w postaci łach korytowych: środkowych (centralnych) oraz bocznych (marginalnych) (fot. 1.7).

Łachy środkowe (centralne) zbudowane są z piasków i żwirów. Przemieszczone są w czasie wezbrań i stabilizowane w okresach pomiędzy wezbrzeniami, kiedy to wynurzają się. Jeśli okres, w którym łacha jest wynurzona, trwa odpowiednio długo, może na nią wkroczyć roślinność, a wtedy łacha staje się **wyspą aluwialną**.



Fot. 1.7. Łachy korytowe: A) środkowa, B) boczna (fot. J. Korpak)

Łachy boczne (marginalne) powstają i rozwijają się zazwyczaj po wypukłej stronie zakola. Podcinane są w czasie dużych wezbrań. Usypywane są także w strefach występowania niskich prędkości przepływu. Charakteryzują się większą stabilnością niż łachy centralne.

W czasie dużych wezbrań depozycji korytovej towarzyszy depozycja w obszarze łóżyska. Podlega jej zarówno grubo-, jak i drobnoziarnisty materiał, łącznie z namułami i częściami organicznymi, co przyczynia się do powstawania mad rzecznych. Wielką rolę odgrywa w tym przypadku proces dekantacji.

W korytach skalnych czasem pojawiają się również formy akumulacyjne (fot. 1.8).



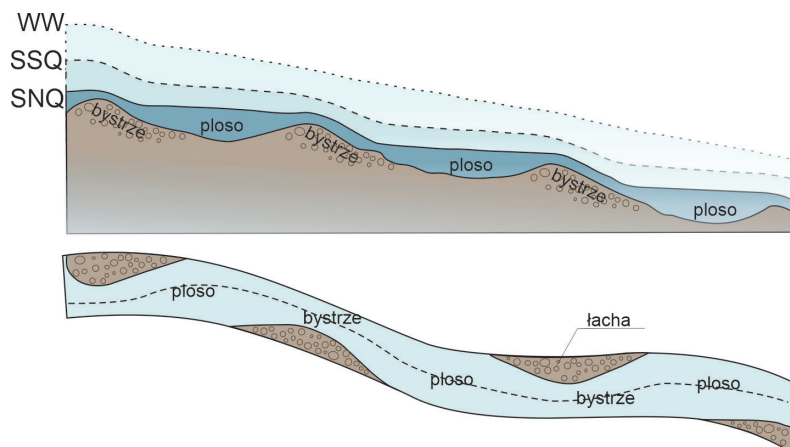
Fot. 1.8. Łachy w korycie skalnym (fot. J. Korpak)

Szczególnymi formami dna, związanymi z procesem depozycji, są bystrza i plosa.

Bystrze to odcinek koryta o większym spadku podłużnym, zatem charakteryzujący się większą prędkością przepływu i mniejszą jego głębokością. Tworzenie się bystrza jest skutkiem depozycji grubych frakcji rumowiska. W okresach niskich stanów wody bystrza mogą częściowo wystawać ponad jej zwierciadło.

Plosa to odcinki koryta pomiędzy bystrzami. Charakteryzuje je większa głębokość koryta i niższe prędkości przepływu niż te, jakie występują na bystrzach. Są też wyścielone drobniejszym materiałem.

Układ bystrz i plos jest zwykle regularny: odstęp pomiędzy kolejnymi bystrzami (albo plosami) równy jest na ogół $5\div 7$ szerokości koryta (rys. 1.4, fot. 1.9).



Rys. 1.4. Profil podłużny i plan koryta aluwialnego z sekwencją bystrzy i plos



Fot. 1.9. Sekwencja plosa-bystrze na rzece Białka (fot. J. Korpak)

Należy wspomnieć jeszcze o pozakorytowych formach akumulacyjnych. Powstają one w trakcie takich wezbrań, którym towarzyszy przepływ po terasach zalewowych. Są to:

- **wały brzegowe** – tworzące się na granicy z terasą (równiną) zalewową, gdzie występują największe różnice w prędkościach i siłach stycznych (tarcia),

– **krewały** – lokalne obniżenia w wałach brzegowych (powstałe na skutek ich rozmycia), przez które wody wezbraniowe przedostają się na terasę (równinę) zalewową. Wymienione wyżej formy występują w strefie przykorytowej (proksymalnej). W strefie bardziej oddalonej od koryta (dystalnej) prędkości przepływu wody są niewielkie. Strumień płynący po terasie zalewowej obciążony jest tylko rumowiskiem unoszonym, które stopniowo opada na powierzchnię terasy (struktura osadów wykazuje laminację poziomą). Wraz z oddalaniem się od koryta z powodu malejącego transportu maleje też grubość osadów (stąd obniżanie się powierzchni równiny w kierunku od rzeki).

Proces depozycji może zachodzić wzdłuż całego profilu podłużnego rzeki. Wyjątkowo sprzyjające temu warunki powstają w miejscach, gdzie zmniejsza się zdolność transportowa strumienia, a zatem tam, gdzie:

- zmniejsza się spadek koryta,
- koryto się rozszerza,
- rzeka jest podparta (podpiętrzona),
- rzeka uchodzi do odbiornika,
- zmniejsza się masa płynącej wody.

Depozycja występuje zatem poniżej każdego załamania dna, prowadzącego do zmniejszenia jego spadku, np. u wylotu dolin bocznych do doliny głównej czy u wylotu dolin górskich do podgórszych, gdzie powstają stożki napływowe.

Depozycja występuje też na skutek zmniejszenia masy wody (pobór wód na cele komunalne i przemysłowe, ucieczka wody w podłoże zwirowe lub krasowe). Taka przyczyna depozycji występuje na Wiśle centralnej, a także w wapiennych częściach Tatr (zjawiska krasowe) lub w Sudetach (ucieczka w podłoże zwirowe).

Podparcie wody może być skutkiem zatorów lodowych lub roślinnych (spływ rumoszu drzewnego). Ważna przyczyna to podparcie rzeką główną – depozycja następuje wówczas w widłach rzek.

Do sztucznych przeszkód powodujących depozycję należą: zapory zbiorników retencyjnych, jazy, ostrogi rzeczne itp.

1.2.3. FORMY POWSTAJĄCE WSKUTEK DŁUGOTRWAŁEJ DEPOZYCJI I KUMULACJI RZECZNEJ

Stożkiem napływowym nazywamy nagromadzenie osadów rzecznych, rozpościerające się promieniście od miejsca depozycji w korycie rzeczonym [33].

Rozmiary stożka są tym większe, im większa jest powierzchnia zlewni cieku. Kształt stożka zależy od mechanizmu i przebiegu jego formowania się.

Stożki napływowe potoków górskich mają powierzchnie nachylone od 2° do 12°. Zbudowane są z materiału zarówno otoczonego, jak i kanciastego. Tworzy je albo sam materiał korytowy, albo materiał korytowy z domieszką materiału stokowego.

W obszarach górskich i podgórskich stożki napływowe rosną szybko zarówno w dół, spychając koryto rzeki głównej, jak i w górę, zasypując odcinek wylotowy (agradacja) [33].

Płaskie stożki napływowe, tworzące się u wylotów koryt rzecznych do zbiorników (mórz, jezior, zbiorników retencyjnych), nazywane są **deltami**. Delta rośnie przede wszystkim pod wodą jako tzw. prodelta. Szybkość rośnięcia delty zależy od ilości przynieszonego materiału, konfiguracji dna oraz działalności morza (falowanie, przypływy i odpływy). Szybko rosną delty rzek górskich oraz delty usypywane przy wejściu do jezior, mórz zamkniętych, a zwłaszcza zbiorników retencyjnych.

Ze względu na usytuowanie delty w stosunku do wybrzeża rozróżnia się delty schowane (rozwijające się w estuarium lub zatoce) i wysunięte (rozpościerające się w kierunku morza). Delta Wisły jest deltą schowaną, zajmuje ok. 3600 km² (dla porównania delta Amazonki – 100 000 km²), a jej roczne zasilanie osadami wynosi ok. 1,2 mln t.

Rośnięcie stożka napływowego lub delty doprowadza do zwiększenia długości rzeki. Przesuwanie się ujścia rzeki związane jest z zasypywaniem koryta rzecznego, postępującego w górę rzeki. Proces ten nosi nazwę agradacji.

Jeśli rzeka agradująca płynie w dolinie, wówczas dno doliny jest zasypywane i podwyższane. Jeśli zaś rzeka agradująca płynie po płaskiej równinie, to po zalądowaniu opuszcza ona koryto, stale zmienia swój bieg i rozlewa się po znacznym obszarze, przede wszystkim przy dużych wezbraniach. W związku z tym tego typu rzeki są obwałowywane, zwłaszcza jeśli przepływają przez obszary zagospodarowane. Rzeka zasypuje wówczas międzywałę, co powoduje podnoszenie się jego dna, a jednocześnie koryta rzeki, która może płynąć powyżej terenu na zawalu. Przerwanie wałów przeciwpowodziowych w tym przypadku jest wyjątkowo groźne [33].

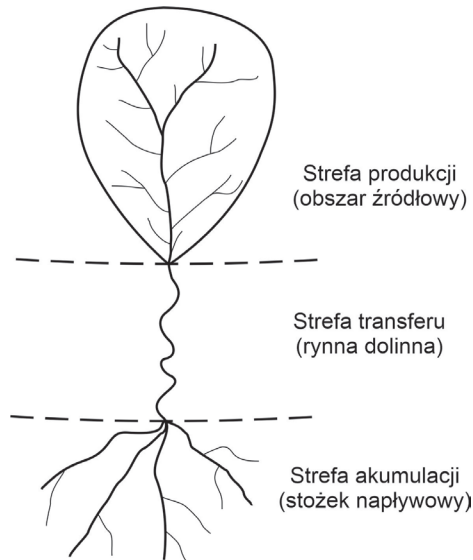
1.3. PRZESTRZENNA LOKALIZACJA PROCESÓW FLUWIALNYCH W PROFILU PODŁUŻNYM RZEKI

Omówione wyżej procesy zachodzą wzdłuż całego profilu podłużnego rzeki, choć zwykle z różną intensywnością na różnych odcinkach tego samego cieku. Wyróżnić można zatem trzy charakterystyczne odcinki rzeki:

- górny (źródłowy),
- środkowy,
- dolny (ujściowy),

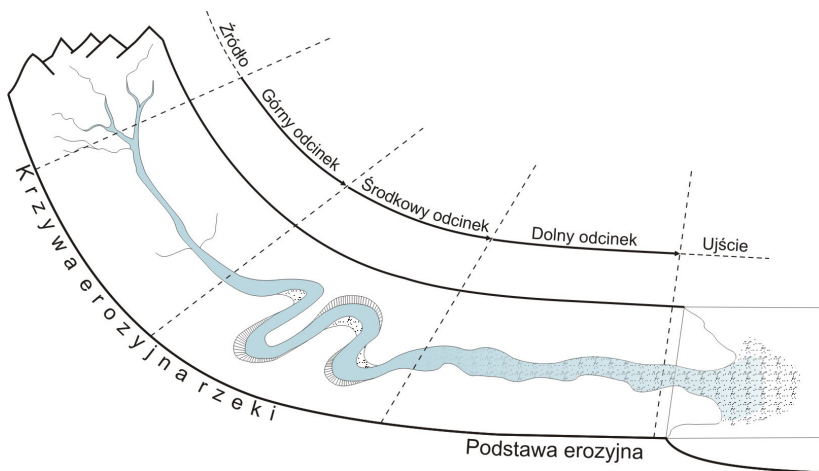
na których w dłuższym okresie zaobserwować można przewagę jednych procesów nad innymi. Wyidealizowany schemat systemu fluwialnego przedstawiono na rysunku 1.5. W takich idealnych warunkach procesami dominującymi w górnych odcinkach cieków są erozja denna i brzegowa. Strefę tę nazywamy strefą „produkcji” rumowiska rzecznego. Odcinek środkowy charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem form wykształconych przez zachodzące wzdłuż niego procesy. Dominuje tu transport i erozja boczna, wynikiem której są meandry oraz łachy i wyspy, powstające na

skutek procesu depozycji. W strefie tej może dochodzić do zmian nurtu rzeki, np. w wyniku przerwania szyi meandra podczas wezbrań powodziowych. Odcinek dolny (ujściowy) to strefa akumulacji. Na odcinku tym następuje wyraźne odkładanie się materiału rumowiskowego, związane z małymi prędkościami przepływu.



Rys. 1.5. Wyidealizowany schemat systemu fluwialnego

Profil podłużny rzeki wzdłuż całej jej długości nazywamy krzywą erozyjną rzeki (rys. 1.6). Obrazuje ona zróżnicowanie spadku oraz dominujących procesów w poszczególnych odcinkach biegu rzeki.



Rys. 1.6. Krzywa erozyjna rzeki

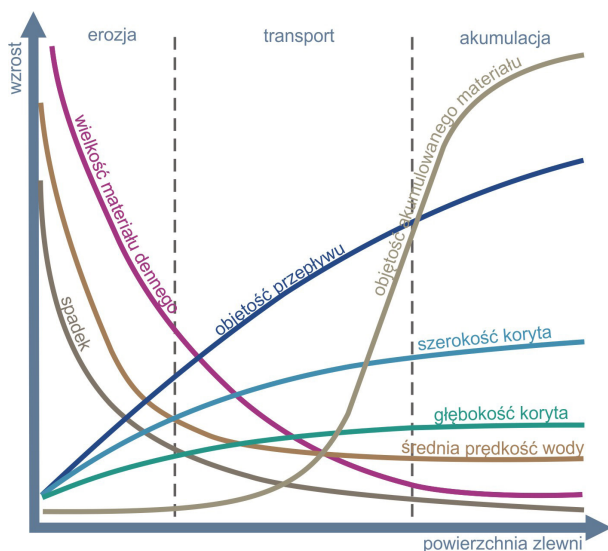
Krzywa erozyjna ma spadek zmniejszający się w kierunku ujścia rzeki. Można wyróżnić jej dwa odcinki: młody (skalisty, niewyrównany) i dojrzały (aluwialny, wyrównany). Wyrównywanie polega na ścinaniu progów i załomów [33]. Postępuje ono szybciej od dołu, czyli od bazy erozyjnej (erozja wsteczna), a wolniej od źródeł z biegiem rzeki. Najniższy punkt krzywej to ujście rzeki do morza. Jest to absolutna podstawa erozyjna, czyli tzw. baza erozyjna [65]. Może się ona zmieniać na skutek ruchów tektonicznych lub eustatycznych³. Rzeka stara się pogłębić koryto właśnie do poziomu bazy erozyjnej [33]. Krzywa, poniżej której rzeka nie może się już wcinać, nosi nazwę krzywej równowagi, a jej spadki odpowiadają bilansowi (równowadze) pomiędzy zdolnością transportową strumienia a dostępnością rumowiska. Teoretycznie rzeka, która osiągnęła profil równowagi, ani nie eroduje, ani nie akumuluje, a jedynie transportuje. W rzeczywistości mamy do czynienia z równowagą chwiejną, związaną z chwilowymi warunkami lokalnymi.

Oprócz absolutnej podstawy erozyjnej można wyróżnić dwa inne typy bazy erozyjnej [65]:

- dolną, którą stanowią dna dolin, kotlin, jeziora, równiny przedgórskie,
- lokalną, którą są odcinki koryt niepogłębiane w ciągu długiego czasu, np. progi twardestwowe, katarakty.

Teoretyczna krzywa równowagi, reprezentująca profil ostateczny, odpowiadający granicy wszelkiej erozji, nosi nazwę terminanty erozyjnej [62].

Zmienność parametrów charakteryzujących morfologię koryta rzeki oraz strumień (parametry przepływu) w profilu podłużnym cieką przedstawia rysunek 1.7.



Rys. 1.7. Zmienność parametrów koryta i strumienia w profilu podłużnym cieką (wg [20])

³ Długookresowe zmiany poziomu wód oceanicznych, spowodowane najczęściej zmianami klimatu.

1.4. TENDENCJE PROCESÓW FLUWIALNYCH W POLSCE

W dolinach górskich, zwłaszcza w Karpatach i Sudetach, przeważa proces pogłębiania się koryt, co spowodowane jest wieloma przyczynami. Do najistotniejszych zaliczyć należy: znaczne spadki podłużne, determinujące dużą zdolność transportową strumienia, antropogeniczne zaburzenia naturalnej gospodarki rumowiskiem w cieku (np. pobór rumowiska, obiekty hydrotechniczne), antropogeniczne zaburzenia naturalnego reżimu hydrologicznego (np. pobór wód, obiekty wyrównujące przepływy, deformacja naturalnej relacji pomiędzy infiltracją a odpływem), a także inne skutki działalności ludzkiej w zlewni (np. ograniczenie dostawy rumowiska na skutek wzrostu powierzchni lasów i łąk kosztem powierzchni gruntów ornych).

W dolinach rzek w obrębie pogórzy, wyżyn i kotlin obserwuje się tendencję do agradacji (akumulacji, depozycji) koryt, czego powodem jest znaczne wylesienie tych terenów, duże powierzchnie upraw roślin okopowych, a często także występowanie łatwo rozmywalnych gleb (lessów).

W dolinach rzek nizinnych stwierdza się tendencje do agradacji terenów zalewowych i jednoczesnego stopniowego pogłębiania koryt aluwialnych. Niektóre pradolinne odcinki rzek (Biebrza, Noteć) są w wielu miejscach wręcz basenami dekantacyjnymi.

1.4.1. ZMIANY POŁOŻENIA DNA KORYT KARPACKICH DOPŁYWÓW WISŁY W XX W.

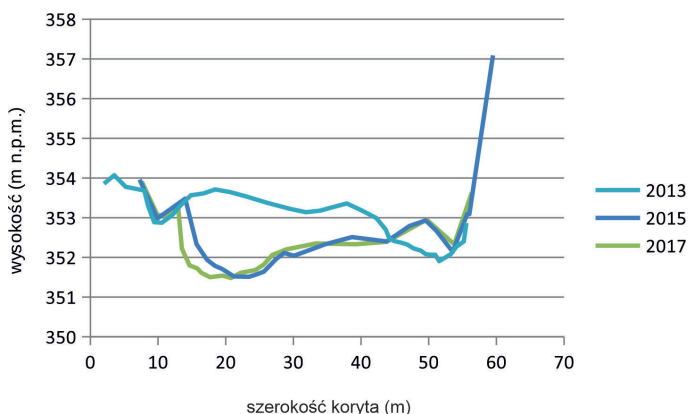
Rozmiar erozji dennej w korytach skalnych w Polsce ocenia się na 1 mm/rok. Od lat obserwuje się natomiast bardziej znaczącą tendencję do obniżania się dna aluwialnych koryt karpackich dopływów Wisły. Proces ten przebiega ze zmienną intensywnością. W wielu przypadkach koryta zostały wyczyszczone z aluwii i nastąpiło wcięcie w podłoże skalne (fot. 1.10). Nie ulega też wątpliwości, że pewne działania hydrotechniczne z zakresu regulacji rzek i zabudowy potoków górskich powodują uaktywnienie lub intensyfikację procesów erozyjnych.

Sledzenie rozmiarów erozji danego cieku wymaga dokonywania geodezyjnego zdjęcia jego zastabilizowanych przekrojów poprzecznych w określonych odstępach czasu. Przykłady zmian geometrii i położenia dna koryt karpackich dopływów Wisły pokazano na rysunku 1.8.

Tego typu monitoring nie jest w Polsce działaniem standardowym, a pomiary geometrii przekrojów koryt cieków nie są prowadzone systematycznie. Oceny (oszacowania) zmian położenia dna koryt cieków w wyniku procesów rumowiskowych w pewnym okresie można jednak dokonać metodą pośrednią – „hydrologiczną”. Badania J. Punzeta [68] wykazały, że zmiany układu stanów niskich rocznych w karpackich dopływach Wisły są obrazem zmian położenia dna koryta w danym okresie (rys. 1.9). Wynika to z zaobserwowanego faktu braku zmian głębokości przepływów



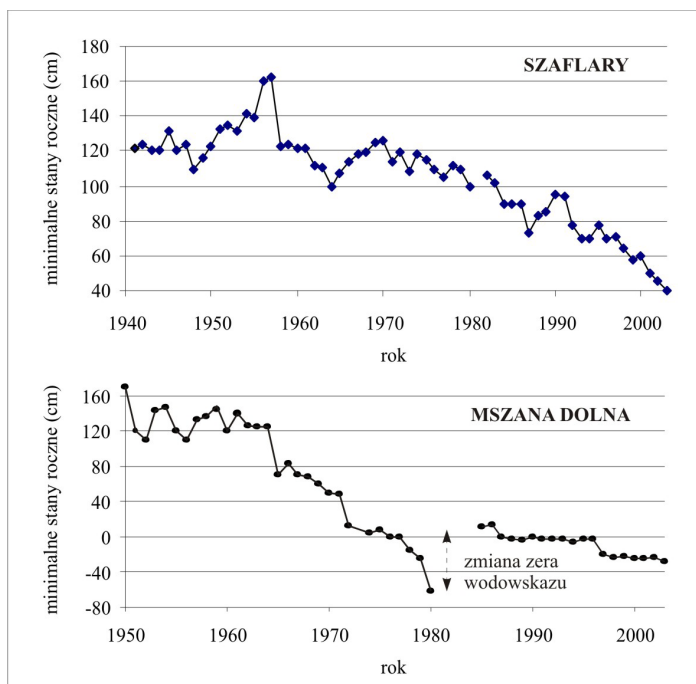
Fot. 1.10. Erozja denną – rozcinanie skalnego podłoża (fot. J. Korpak)



Rys. 1.8. Zmiany geometrii przekroju poprzecznego Krzczonówki – efekt erozji dennej

niskich. Metoda ma tę zaletę, że pozwala na zidentyfikowanie okresów, w których koryta wykazywały tendencje do erozji, akumulacji lub stabilności. Analizując zakresy ewentualnych prac regulacyjnych oraz reżim hydrologiczny (wezbrania) w danym okresie, można wnioskować o przyczynach zmian położenia dna.

Korzystając z powyższej prawidłowości, M. Łapuszek i J. Ratomski [50] przeprowadzili analizę przebiegu stanów niskich rocznych w XX w. w kilkudziesięciu przekrojach wodowskazowych karpackich dopływów Wisły. Dla każdej rzeki wyróżnili oni w ciągu XX w. okresy z dominacją erozji i akumulacji oraz okresy względnej stabilizacji w położeniu pionowym dna koryta. Ogólnie większość koryt badanych rzek



Rys. 1.9. Tendencje zmian położenia pionowego dna koryta na podstawie analizy przebiegu wartości minimalnych rocznych stanów wody w wieloletniu w przekrojach wodowskazowych Szaflary (na Białym Dunajcu) i Mszana Dolna (na Mszance)

wykazywała w drugiej połowie XX w. tendencję do pogłębiania, a tempo tego procesu było zróżnicowane od kilku do kilkunastu centymetrów w ciągu roku. Jako powód pogłębiania koryta podano wezbrania, regulacje lub pobór rumowiska.

1.5. BIEG (UKŁAD POZIOMY) RZEKI

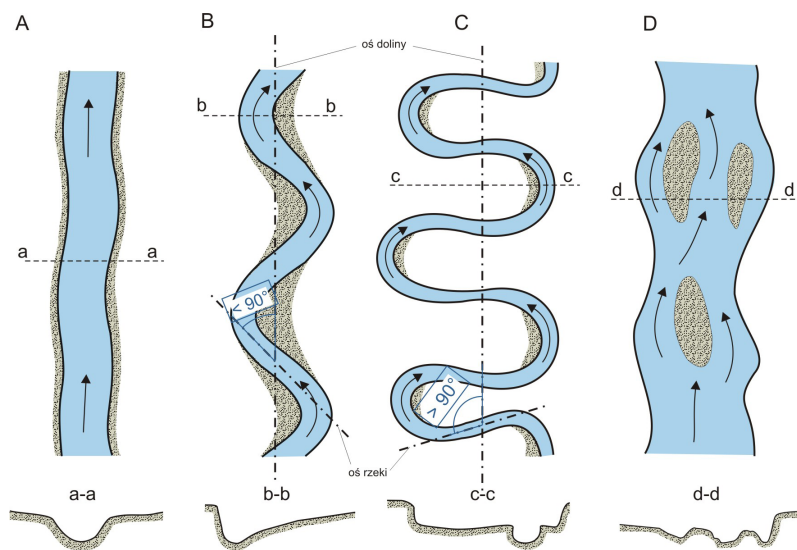
Wyróżniamy następujące rodzaje systemów korytowych [56]:

- a) system jednokorytowy o pojedynczym nurcie:
 - prosty,
 - kręty/meandrujący,
- b) system jednokorytowy o wielu nurtach, zwany roztokowym,
- c) system wielokorytowy, zwany anastomozującym.

W Polsce występują wszystkie typy rzek: np. w górach (zwłaszcza w Karpatach) spotykamy zwirowe rzeki roztokowe, a Wisła nizinna jest rzeką roztokową o dnie piaszczystym. Jednym z nielicznych przykładów rzeki anastomozującej jest Narew. W Polsce dominują rzeki jednokorytowe kręte lub meandrujące (co po części jest skutkiem prac regulacyjnych).

1.5.1. SYSTEM JEDNOKORYTOWY O POJEDYNCZYM NURCIE

Koryta o biegu prostym w naturalnych warunkach są rzadko spotykane. Taki przebieg mają tylko krótkie odcinki rzek nizinnych oraz rzeki o biegu wymuszonym strukturą podłoża. W takich ciekach nurt teoretycznie powinien znajdować się pośrodku koryta, a erozja przy brzegach powinna być najsłabsza [33]. W efekcie przekrój poprzeczny koryta o biegu prostym powinien być symetryczny. W rzeczywistości jednak nurt w tych korytach jest także kręty, a dno nierówne – występują tu naprzemiennie bystrza i plosa, w mniej lub bardziej regularnych odstępach. Formujące się ławice powodują odchylenia (defleksję) nurtu, co prowadzi do podcinania brzegu wklęsłego i depozycji materiału na brzegu wypukłym. Konsekwencją jest kształtowanie się krętego/meandrującego biegu rzeki o asymetrycznych przekrojach poprzecznych (rys. 1.10).



Rys. 1.10. Typy koryt ze względu na układ w planie wraz z profilami poprzecznymi:
A) koryto proste, B) koryto kręte, C) koryto meandrowe, D) koryto roztokowe

Krętość rzeki może być dodatkowo wymuszona przez [33]:

- dopływy spychające nurt w rzece głównej pod brzeg przeciwny, z siłą zależną od kąta, pod którym dopływ uchodzi (im kąt ostrzejszy, tym oddziaływanie mniejsze),
- stożki napływowe dopływów, usypywane w korycie rzeki głównej,
- obrywy i osuwiska o jezorach wkraczających w koryta,
- zróżnicowanie budowy podłoża skalnego o różnej odporności na erozję.



Fot. 1.11. Rzeka meandrująca (<https://pixabay.com>)

Koryta kręte/meandrujące odznaczają się występowaniem wyraźnych zakoli (fot. 1.11).

W zależności od kąta zawartego pomiędzy osią koryta a osią doliny koryta te dzielimy na (rys. 1.10):

- faliste (sinusoidalne) $\beta < 90^\circ$,
- o właściwych meandrach $\beta > 90^\circ$ (meandrowe).

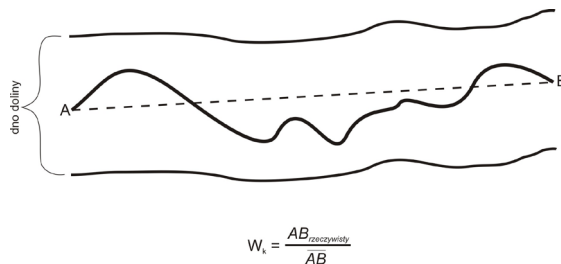
Podstawą rozgraniczenia tych dwóch typów koryt może być tzw. wskaźnik rozwinięcia rzeki lub wskaźnik krętości koryta rzecznego.

Wskaźnik rozwinięcia rzeki jest stosunkiem długości koryta do długości doliny:

$$P = \frac{L_{\text{koryta}}}{L_{\text{doliny}}} \quad (1.2)$$

Wartość tego wskaźnika poniżej 1,5 odpowiada rzece krętej, a powyżej 1,5 – rzece meandrującej.

Wskaźnik krętości koryta rzecznego to stosunek rzeczywistej długości koryta pomiędzy dwoma wybranymi punktami do długości odcinka prostego łączącego te punkty (rys. 1.11).

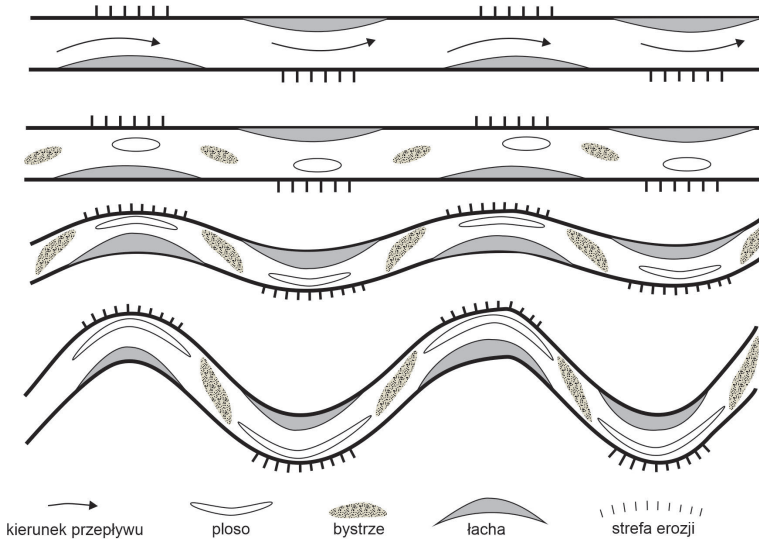


Rys. 1.11. Sposób obliczania wskaźnika krętości koryta rzecznego

Klasyfikacja koryt w oparciu o powyższy wskaźnik jest następująca:

- $1 < W_k \leq 1,05$ – koryto proste,
- $1,05 < W_k \leq 1,5$ – koryto kręte,
- $W_k > 1,5$ – koryto meandrowe.

Etapy powstawania meandrów obrazuje rysunek 1.12.



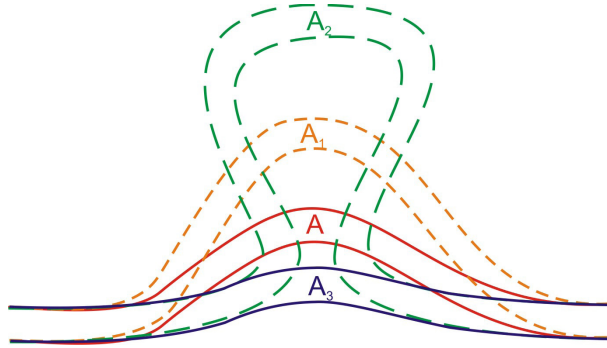
Rys. 1.12. Przebieg powstawania meandrów (wg [18], za: [56])

Koryta meandrowe powstają w szerokich dolinach o małych spadkach, zbudowanych z aluwii. Rzeki meandrujące charakteryzują się stosunkowo głębokimi korytami, wyrównanym spadkiem i niedociążeniem rumowiskiem.

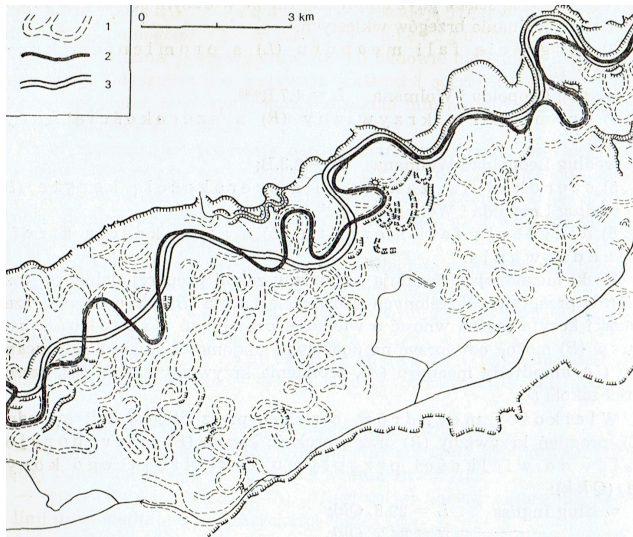
Pojedynczy meander składa się z dwóch zakoli o kształcie zbliżonym do podkowy i łączącego je odcinka prostego, stanowiącego przemiał (bród). Na odcinku przemiału koryto jest szersze, płytsze i asymetryczne. Przy niskim stanie wody brody są rozmywane i tworzą bystrza, a przy stanach wysokich są nadbudowywane.

W obrębie meandra nurt występuje przy brzegach wklęsłych i przerzuca się na odcinku przemiału spod jednego brzegu pod drugi. Obustronne podcinanie brzegu w zakolu prowadzi do zwężenia jego nasady i powstania tzw. szyi meandra (rys. 1.13), która może być przerwana albo wskutek dalszego podcinania, albo wskutek przelania się wody podczas wezbrania (również w ramach prac regulacyjnych dokonuje się niejednokrotnie ich likwidacji, czyli ścinania meandrów).

Odcięte meandry stanowią tzw. starorzecza (w dalszym ciągu wypełnione wodą), które z czasem, po wypełnieniu osadami mineralnymi i organicznymi, zaznaczają się jako podmokłe (często porośnięte wilgociolubną roślinnością) obniżenia w kształcie podkowy w obrębie równiny nadrzecznej (tzw. paleomeandry) (rys. 1.14).



Rys. 1.13. Rozwój meandra aż do przecięcia jego szyi (wg [13], za: [33])



Rys. 1.14. Paleomeandry Wisły na wschód od Krakowa (wg [95]): 1) stare koryta, 2) bieg Wisły pod koniec XVIII w., 3) współczesny bieg koryta

1.5.2. SYSTEM JEDNOKORYTOWY O WIELU NURTACH – ROZTOKOWY

Rzeki roztokowe nazywane są też warkoczowatymi, błędzącymi lub dzikimi [56]. Są to rzeki o dużych wahaniami przepływu, prędkości i transportu rumowiska. Płyną one w obrębie koryta (łożyska) kilkoma nurtami, na przemian łączącymi lub rozdzielającymi się. Koryta tych rzek są stosunkowo szerokie i płytkie. Najważniejszymi formami w korytach roztokowych są łachy środkowe (śródkorytowe). To one powodują rozdzielanie się nurtu. Łachy te mają wydłużony kształt, zgodnie z kierunkiem przepływu, zbudowane są ze żwirów oraz piasków i zwykle wznoszą się nieznacznie ponad średni poziom wody. Na ogół nie są porośnięte roślinnością. W okresie wysokich przepływów układ tych łach może ulegać całkowitej zmianie.



Fot. 1.12. Białka – rzeka roztokowa (fot. J. Korpak)

Współcześnie koryta roztokowe są w Polsce rzadko spotykane i występują przeważnie jedynie na krótkich odcinkach rzek górskich. Przykładem typowej rzeki roztokowej jest Białka (fot. 1.12).

1.5.3. SYSTEM WIELOKORYTOWY

System wielokorytowy (rzekę anastomozującą) tworzy kilka koryt rozdzielonych trwałymi wyspami, które nie są zalewane nawet podczas wezbrań. Koryta rzeki anastomozującej charakteryzuje bardzo niewielki spadek podłużny, a w konsekwencji niewielka zdolność transportowa i erozyjna. W rzekach tych dominuje transport rumowiska unoszonego, a przepływy wody są wyrównane [56]. Typowym przykładem rzeki anastomozującej w Polsce jest Narew na odcinku przebiegającym przez Narwiański Park Narodowy (rys. 1.15).



Rys. 1.15. Anastomozująca Narew w Narwiańskim Parku Narodowym

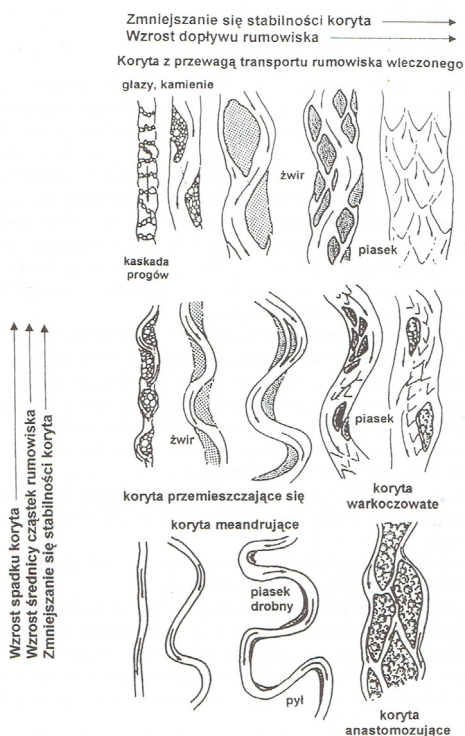
1.5.4. SYSTEMY KORYTOWE – PRAWIDŁOWOŚCI ROZWOJU

Koryta rzek (cieków) są kształtowane przez zespół procesów fizycznych związanych z klimatem, przepływem wody i transportem rumowiska. Formowanie koryt jest zatem efektem interakcji wielu czynników. Niektóre z nich można przyjąć za niezmiennicze (np. geologia, spadek ciek, obszar zasilania, w określonym zakresie również klimat), inne zaś podlegają zmianom zależnym od sposobu użytkowania terenu w zlewni oraz wynikającym z oddziaływania obiektów inżynierskich w obszarze spływu wód (np. zasilanie rumowiskiem i jego transport, charakter roślinności brzegowej, objętość odpływu i jego charakterystyka związana z czasem).

Do najważniejszych czynników wpływających na układ poziomy koryt należą:

- rodzaj materiału budującego koryto rzeki oraz przyległe do niej tereny,
- ilość rumowiska dostarczanego do koryta ze zlewni oraz jego rodzaj,
- spadek podłużny,
- reżim przepływu.

Związek powyższych czynników z układem koryta w planie przedstawiono na rysunku 1.16.



Rys. 1.16. Zależności między czynnikami kształtującymi koryto a układem koryta w planie (wg [12] za: [106])

Powtórzmy: topografia dna i układ poziomy koryta są rezultatem złożonego, wzajemnego oddziaływania płynącej wody oraz ruchu rumowiska. Wielu badaczy starało się i stara się nadal dociec istoty tych oddziaływań i odpowiedzieć na następujące pytania:

- Dlaczego koryta prostoliniowe o pojedynczym nurcie są niestabilne (cieki naturalne zawsze mają koryta kręte lub roztokowe)?
- W jakiej sytuacji z koryta prostego wykształca się koryto roztokowe, a w jakiej kręte?
- Kiedy dochodzi do wykształcania się meandrów?

Odpowiedzi na powyższe pytania mają charakter nie tylko czysto poznawczy, ale również praktyczny. Ich znajomość pozwala bowiem na prognozę zmian w układzie koryt rzecznych, zapoczątkowanych oddziaływaniem obiektów hydrotechnicznych, a w konsekwencji na racjonalny dobór środków zapewniających osiągnięcie określonych celów społeczno-gospodarczych, oparty również na świadomości skutków tychże działań w sferze kształtowania się koryta.

Wiele koryt wykazuje różny układ w planie wzdłuż swojego biegu. Typ danego koryta może też ulec zmianie w czasie, gdy zmieni się któryś z czynników warunkujących jego wykształcenie.

Zmiany koryt mogą obejmować:

- układ w planie (krętość, wieloramienność),
- szerokość, głębokość,
- skład granulometryczny rumowiska oraz formy korytowe,
- rozmiar oraz częstotliwość erozji brzegów,
- rozciągłość przestrzenną i stabilność terenów zalewowych i teras,
- obrywy, osuwiska stymulowane przez zjawiska powodziowe,
- transport martwych drzew,
- zmiany w pokryciu roślinnym,
- proces sedymentacji (lokalna depozycja lub erozja),
- budowle hydrotechniczne,
- obiekty infrastruktury drogowej.

Potencjalne odpowiedzi koryta na zmiany niektórych czynników przedstawiono w tabeli 1.2.

Tabela 1.2

Przykłady potencjalnych odpowiedzi koryta na zmiany w odpływie, zasilaniu rumowiskiem i roślinności (wg [98], zmienione)

Zmiana	Potencjalna odpowiedź koryta
wzrost natężenia dopływu wody	<ul style="list-style-type: none"> – wcinanie się koryta – kształtowanie się zatok – wzrost średnic materiału koryta (ubywanie drobnych frakcji) – nasilenie się erozji brzegów
redukcja natężenia dopływu wody	<ul style="list-style-type: none"> – agradacja (depozycja materiału) – wzrost ilości drobnego materiału koryta – redukcja szerokości koryta
wzrost zasilania rumowiskiem	<ul style="list-style-type: none"> – agradacja – większe i częściej występujące łachy piaszczyste lub żwirowe – wzrost ilości drobnego rumowiska w korycie – wzrost mobilności koryta – wzrost zagrożenia wylewami powodziowymi
usunięcie roślinności (wylesienie) górnej partii zlewni	<ul style="list-style-type: none"> – wzrost wezbrań – wzrost zasilania rumowiskiem
usunięcie roślinności brzegowej	<ul style="list-style-type: none"> – wzrost erozji brzegów – agradacja – wzrost drobnoziarnistości materiału dennego – wzrost mobilności koryta – poszerzanie się koryta

1.6. DOLINY RZECZNE

Doliny rzeczne są efektem:

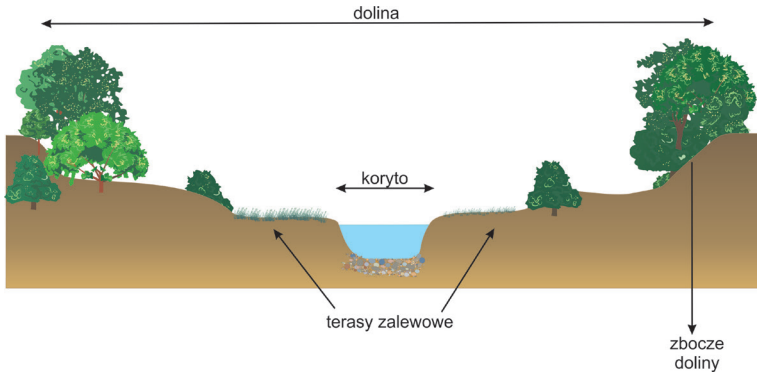
- erozyjnej działalności rzek (ogólnie – procesów fluwialnych),
- procesów denudacyjnych⁴.

W dolinie wyróżnia się dno i zbocza (rys. 1.17).

Dna dolin są kształtowane przez procesy fluwialne, natomiast zbocza przez procesy denudacyjne (stokowe), w wyniku których materiał zwietrzelinowy jest odprowadzany w dna dolin.

Procesy fluwialne kształtujące dna dolin mają dwojaki charakter: albo jest to obniżanie dna na skutek wcinania się rzeki (erozja), albo nadbudowa dna (agradacja), spowodowana przewagą dostawy i akumulacji osadów nad ich erozją. Dna dolin mogą także wykazywać stabilność pionową (takiemu stanowi na ogół towarzyszy poszerzanie koryt w wyniku erozji bocznej).

⁴ Denudacja – zespół procesów prowadzących do zrównania terenu przez przemieszczanie pokrywy zwietrzelinowej w dół; średnia prędkość „zdzierania kontynentów” wynosi ok. 6 mm/rok.

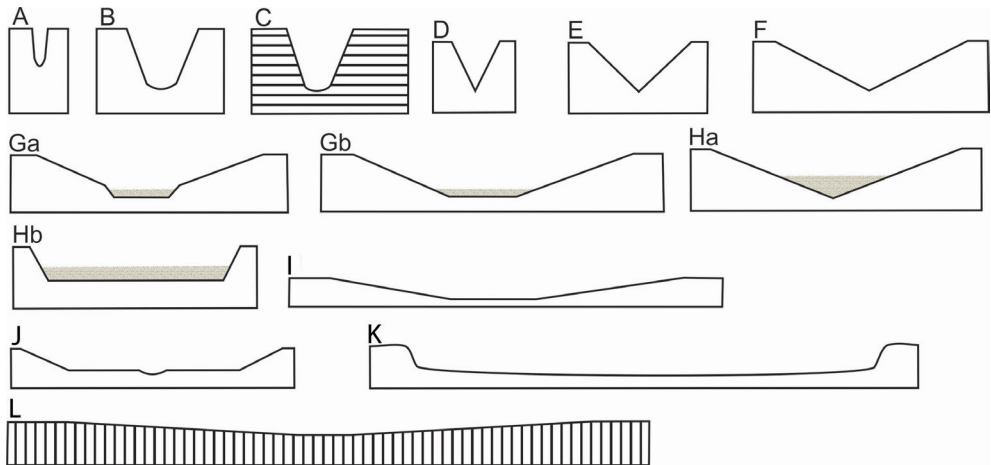


Rys. 1.17. Elementy doliny rzecznej (wg [56])

Koryto jest najniższą częścią doliny, wciętą w równinę zalewową. Na równinie tej mogą występować pozostałości dawnych koryt (starorzecza) oraz formy będące efektem wezbrań. Powyżej równiny zalewowej mogą występować pozostałości dna doliny z wcześniejszych etapów jej rozwoju, tzw. terasy rzeczne.

Kształtowanie doliny zależy od czynników:

- tektonicznych,
- klimatycznych (zasadnicze znaczenie),
- antropogenicznych (zmiany w użytkowaniu zlewni, prowadzące do przyspieszenia lub opóźnienia spływu powierzchniowego i odpływu),
- położenia bazy erozyjnej.



Rys. 1.18. Typy dolin rzecznych (wg [33]): A) gardziel, B) jar, C) kanion, D) wciós ostry, E) wciós prosty, F) wciós rozwartý, Ga) dolina płaskodenna skrzynkowa, Gb) dolina płaskodenna wannowa, Ha) dolina wciósowo-płaskodenna, Hb) dolina wannowo-płaskodenna, I) dolina nieckowata, J) dolina wklęsłodenna, K) dolina nieckowata z obrzeżeniem, L) dolina nieckowata tropikalna

Kształt doliny zmienia się w zależności od stadium jej rozwoju oraz odporności i ułożenia rozciny skał.

Formy dolinne, powstałe przede wszystkim w wyniku erozyjnej działalności rzek, to gardziele, jary oraz kaniony (odmiana jaru wyciętego w płycie ze skał osadowych). Formy powstałe z dużym udziałem procesów stokowych to doliny wciosowe, płaskodenne, wklęsłodenne i nieckowate (rys. 1.18).

Gardziel to dolina młoda, o szerokości dna równej szerokości koryta (fot. 1.13). Wycięta jest w skałach o dużej odporności (kwarcyty, skały krystaliczne) lub zwięzłych, ale przepuszczalnych (wapień, piaskowce). Przykładem gardzieli jest dolina poniżej Wodogrzmotów Mickiewicza (Tatry).

Jar jest również młodą doliną o wąskim dnie (ale koryto nie zajmuje całej jego szerokości) i bardzo stromych, częściowo skalistych zboczach. Jar powstaje na odcinkach zbudowanych ze skał o dużej odporności (np. Dunajec w Pieninach, Dolina Kościeliska) lub na odcinkach świeżo odmładzanych (Wiśłok koło Beska).

Szczególną odmianą jaru jest kanion – dolina na obszarach o budowie płytowej, wyłobiona w podłożu o naprzemiennych warstwach mniej i bardziej odpornych.

Dolina wciosowa powstaje ze złączenia jaru jako rezultat jednoczesnego pogłębiania dna i łagodzenia zboczy przez procesy denudacyjne. Charakterystyczny jest kształt przekroju poprzecznego takiej doliny, zbliżony do litery „V”, o nachyleniu zboczy zależnym od odporności skał. Jest to typ doliny powszechnie występujący na obszarach górskich.



Fot. 1.13. Gardziel w Parku Narodowym Chapada Dos Veadeiros (Brazylia) (fot. J. Korpak)



Fot. 1.14. Płaskodenna dolina Narwi (<http://sleepin.pl/atrakcje/3-krajobraz-doliny-narwi-6/>)

Dolina płaskodenna to dolina dojrzała. Ma ona płaskie, szerokie dno, w obrębie którego mieści się koryto i często także terasa zalewowa (a nawet systemy teras zalewowych) (fot. 1.14). Płaskie dno przechodzi załosem w zbocza. Doliny tego typu mogą powstać w wyniku intensywnej erozji bocznej przy stałej podstawie erozyjnej albo w wyniku zasypania doliny wciosowej na skutek podniesienia się poziomu bazy erozyjnej w efekcie zmniejszenia zdolności transportowej strumienia lub wzrostu dostawy rumowiska (np. ze stoków), co może być skutkiem działalności człowieka. Doliny płaskodenne spotyka się zarówno na obszarach górskich, jak i nizinnych.

Doliny nieckowate to wynik spłaszczenia zboczy dolin płaskodennych. Charakteryzują się one brakiem wyraźnego załomu pomiędzy dnem a zboczami. W Polsce ten typ dolin występuje w górach i jest charakterystyczny dla wielu małych potoków o dużym spadku i niskich przepływach. Najbardziej jednak powszechne doliny nieckowate w Polsce to doliny suche, w których nie występują koryta rzeczne i które prawdopodobnie wytworzyły się w plejstocenie w wyniku procesów innych niż fluwialne [33].

Ogólnie rozwój dolin rzecznych w obszarach pozatropikalnych o klimacie umiarkowanym i zimnym przechodzi następującą drogę ewolucji: wciós przekształca się w dolinę płaskodenną, a ta w dolinę nieckowatą (rys. 1.18).

Ponadto rozróżnić można doliny proste i złożone [33]. Doliny proste to doliny jednoczłonowe, mające na całej długości podobny charakter (np. wciós). Są to zwykle doliny krótkie. Doliny złożone, czyli wieloczłonowe, to doliny składające się z odcinków o różnym charakterze (np. niecka, wciós, dolina płaskodenna). Wieloczłonowość doliny jest skutkiem wynikających z litologii⁵ zróżnicowanych warunków powstawania i rozwoju.

⁵ Litologia – zbiór cech i właściwości skał obserwowanych makroskopowo, np. skład mineralny, tekstura – rozmieszczenie składników w skale, barwa.

Ze względu na nachylenie zboczy rozróżnia się doliny symetryczne i asymetryczne. Asymetria dolin jest częsta, a w niektórych regionach nawet powszechna. Przyczyny asymetrii dolin to:

- podcinająca działalność rzek – asymetria fluwialna,
- różna budowa litologiczna (różna odporność) i tektoniczna (różny upad warstw) – asymetria strukturalna,
- różna intensywność procesów tektonicznych – asymetria tektoniczna,
- różne warunki klimatyczne – asymetria klimatyczna.

Asymetria klimatyczna to wynik różnej ekspozycji zboczy w stosunku do słońca i wiatrów opadonośnych. Ze względu na ekspozycję w stosunku do słońca wyróżnia się zbocza:

- słoneczne, ciepłe, wysychające, głęboko odmarzające, o krótszym okresie zalegania śniegu i większej częstotliwości jego topnienia,
- cieniste, chłodne, bardziej wilgotne, płycej odmarzające, o dłuższym okresie zalegania śniegu i mniejszej częstotliwości jego topnienia.

Ze względu na ekspozycję na wiatry opadonośne wyróżnia się zbocza silniej i dłużej nasiąkające wodami roztopowymi oraz zbocza, na których gromadzi się więcej śniegu z powodu nawiewania (zawietrzne) i mniej śniegu z powodu przewiewania (dowietrzne) [33].

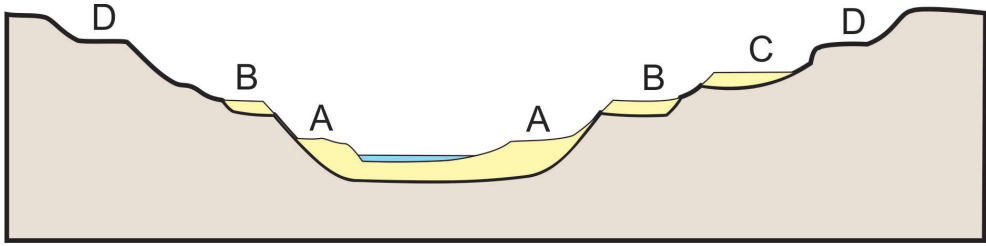
W strefie umiarkowanego klimatu bardziej niszczone są stoki wilgotne, eksponowane na wiatry deszczonośne. Z tego powodu w Polsce bardziej narażone są zbocza dolin wystawione na zachód, które dostają więcej opadu i są intensywniej niszczone przez wody roztopowe. Na zboczach tych procesy denudacyjne (np. splukiwanie, spelżywanie) przebiegają szybciej aniżeli na zboczach przeciwnych. Takie doliny występują np. na Wyżynie Śląsko-Krakowskiej.

Zauważyć można również, że na zboczach eksponowanych na północ dłużej występuje pokrywa śnieżna, a długo utrzymująca się wilgoć sprzyja powolnej degradacji w ciągu długiego czasu. Na zboczach wystawionych na południe pokrywa śnieżna zalega krócej, zatem w krótkim okresie dostarcza dużej ilości wody. Poza tym okresem (i poza okresami opadów) zbocza są bardziej wysuszone i mniej ruchliwe.

1.7. TERASY RZECZNE

Terasy rzeczne to fragmenty dawnych, rozciętych równin zalewowych, znajdujące się powyżej współczesnej równiny zalewowej [56]. Mają postać spłaszczeń różnych rozmiarów i składają się z dwóch elementów morfologicznych: równiny terasowej i stoku terasy, rozdzielonych załomem wypukłym. Równina terasy powstaje w wyniku erozji bocznej, a stok w wyniku erozji wgłębnej.

Dna dolin przeważnie są pokryte warstwą osadów rzecznych (żwir, piasek, muły) o różnej miąższości, które ciągną się zwykle wzdłuż całej długości doliny. Osady te



Rys. 1.19. Rodzaje teras rzecznych (wg [56], zmienione): A, B i D) terasy parzyste, C) terasa nieparzysta; A) terasa osadowa, B i C) terasy skalno-osadowe, D) terasa skalna

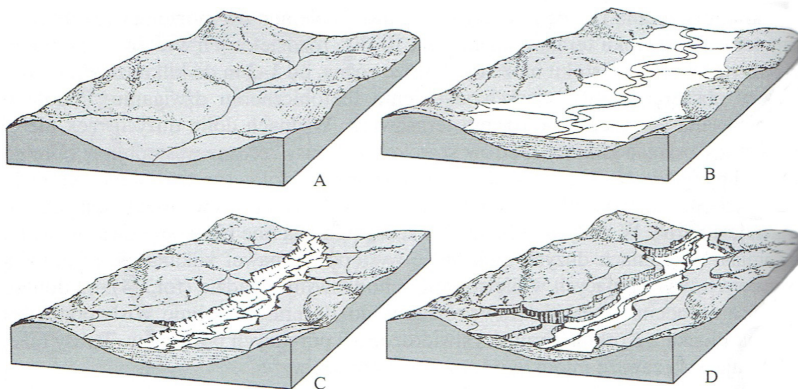
czasem tworzą kilka ciągów na różnych poziomach nad dzisiejszym dnem doliny. Spłaszczenia stanowiące jeden ciąg to fragment dna starej doliny, czyli jeden poziom terasowy. Najwyżej położone są terasy najstarsze, najniższe zaś najmłodsze.

Badania prowadzące do wyróżnienia teras tego samego wieku, a następnie systemów teras różnowiekowych pozwalają na odtworzenie przebiegu, szerokości i głębokości den dolin na różnych etapach ich rozwoju, a także na określenie przebiegu i intensywności ruchów tektonicznych [56].

Terasy występujące na obu brzegach na podobnych wysokościach nazywane są parzystymi, natomiast terasy występujące tylko na jednym brzegu – nieparzystymi [56] (rys. 1.19).

Ze względu na budowę rozróżnia się terasy skalne (wycięte w podłożu skalnym, występujące przeważnie na zboczach dolin rzecznych), osadowe (zbudowane z osadów rzecznych, występujące zwykle w obszarze den dolin) lub skalno-osadowe (ze skalnym cokołem przykrytym warstwą osadów rzecznych) (rys. 1.19).

Najprostszy scenariusz powstawania terasy przedstawia rysunek 1.20.



Rys. 1.20. Rozwój systemu terasowego (wg [56]): A) faza erozji dennej – powstanie doliny, B) faza erozji bocznej i depozycji – powstanie terasy zalewowej, C) faza erozji wzdłużnej – rozcięcie terasy zalewowej, D) faza erozji bocznej i depozycji – powstanie nowej terasy zalewowej na niższym poziomie

Wyróżnia się cztery etapy rozwoju terasy:

- a) w wyniku erozji powstaje dolina,
- b) transport i depozycja materiału prowadzą do powstania równiny zalewowej,
- c) ożywienie erozji wgłębnej skutkuje rozcięciem równiny zalewowej,
- d) erozja boczna prowadzi do tworzenia się nowej równiny zalewowej na niższym poziomie.

1.8. HYDRAULICZNA ANALIZA HYDROMORFOLOGII CIEKU

1.8.1. PODSTAWOWE POJĘCIA I DEFINICJE

Podstawy hydrauliki rzek, zwanej hydrauliką koryt otwartych, zostały przedstawione w wielu klasycznych podręcznikach przedmiotu.

W niniejszym rozdziale wykorzystywane jest przede wszystkim pojęcie stanowiące jedną z charakterystyk przepływu wody, zwane w hydraulice natężeniem lub objętością przepływu Q (w skrócie wielkość Q określa się terminem „przepływ”). Jest to objętość wody, która przepływa w jednostce czasu (s) przez przekrój poprzeczny ciekłu (rys. 1.20). Warto zwrócić uwagę, że:

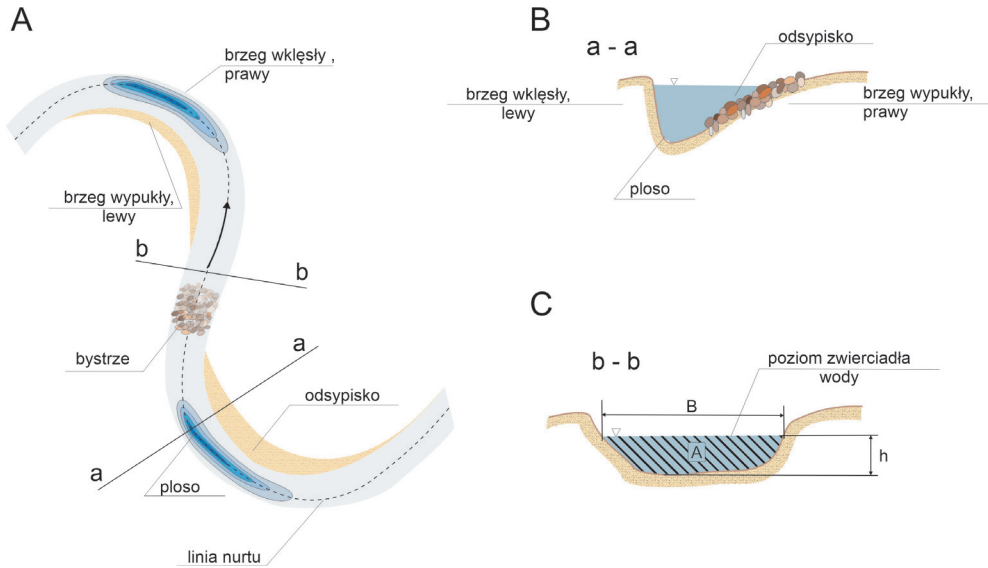
- przekrój poprzeczny na planie ciekłu wyznacza linia prostopadła do zasadniczego kierunku przepływu (rys. 1.21A i B),
- przekrój poprzeczny traktowany jest ogólnie jako przekrój przez łóżysko ciekłu, ale z punktu widzenia przepływu rozumiany jest jako tzw. przekrój zwilżony, liczony do poziomu zwierciadła wody Z (rys. 1.21C),
- podstawowe parametry przekroju poprzecznego ciekłu (zwilżonego) to: głębokość wody h – odpowiadająca maksymalnej głębokości przekroju zwilżonego, szerokość zwierciadła wody B oraz powierzchnia przekroju zwilżonego A (rys. 1.21C).

Innym parametrem charakteryzującym proces przepływu wody jest średnia w przekroju prędkość v , która jest ilorazem objętości przepływu Q i powierzchni przepływu A , czyli $v = Q / A$.

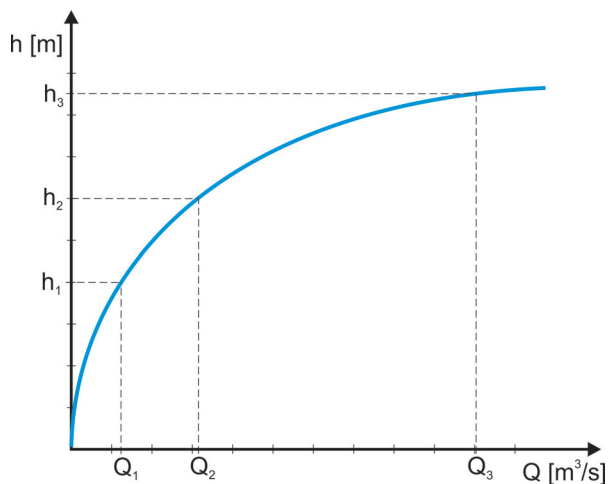
Przepływ Q jest zmienny zarówno w czasie, jak i na długości ciekłu. W danym przekroju zależność objętości przepływu od głębokości przepływu (lub związanego z nim tzw. stanu wody) przedstawia tzw. krzywa konsumcyjna (inaczej zwana krzywą przepływu) (rys. 1.22).

Badając procesy fluwialne, poszukiwano odpowiedzi na pytanie o przepływ (przepływy) istotny z ich punktu widzenia, czyli powodujący takie ich nasilenie, które skutkuje zmianami w morfologii koryta. Oczywiście jest, że znaczne zmiany morfologiczne zachodzą w wyniku wysokich wezbrań. Wezbrania takie zdarzają się jednak stosunkowo rzadko. Stąd dla geomorfologii fluwialnej bardziej interesujące są skutki przepływów o większej częstotliwości. Zdefiniowano w związku z tym następujące pojęcia:

- **Przeptyw brzegowy** – maksymalny przepływ mieszczący się w korycie, niewystępujący na terasy zalewowe; przyjmuje się, że jego wartość odpowiada przepływowi mieszczącemu się w zakresie od średniego rocznego z wieloletnia do wysokiego o prawdopodobieństwie przekroczenia ok. 44,5% (woda wysoka o teoretycznym okresie powtarzalności 2-3 lat). Stan brzegowy (odpowiadający przepływowi



Rys. 1.21. Morfologia i parametry koryta: A) koryto w planie, B) przekrój poprzeczny koryta, C) przekrój poprzeczny zwilżony



Rys. 1.22. Krzywa konsumcyjna (krzywa przepływu)

brzegowemu) może być określony na drodze obserwacji w naturze lub analitycznie. Najlepszym wskaźnikiem stanu brzegowego jest rzędna terasy zalewowej. Nie zawsze jednak rzędna ta jest łatwa do identyfikacji (m.in. w przypadku koryt cieków o dużych spadkach i gruboziarnistym rumowisku, roztokowych lub agradujących). Identyfikatorami stanu brzegowego mogą być (rys. 1.23):

- krawędź wyraźnej, płaskiej terasy zalewowej,
- granica w składzie granulometrycznym materiału – terasa pokryta jest materiałem drobniejszym (piasek) niż koryto (materiał gruboziarnisty),
- granica pomiędzy roślinnością odporną (lubiącą coroczne zalewy) a roślinnością wieloletnią typu łądowego, odporną na rzadkie i krótkotrwałe zalewy (określone gatunki drzew).

Analityczne metody wyznaczania stanu brzegowego (Wołoszyna, Wolmana, Riley, Woodyera) oraz przepływu brzegowego (Schumma, Browna i Warnera oraz Williamsa) opisano w literaturze (np. [85]).

- **Przepływ dominujący** – przepływ o stałym natężeniu, który spowodowałby wykształcenie takiej samej morfologii i morfometrii koryta, jakie są skutkiem rzeczywistego reżimu hydrologicznego. Wartość tego przepływu ocenia się jako trudną lub wręcz niemożliwą do określenia.
- **Przepływ korytotwórczy (efektywny)** – przepływ najsilniej wpływający na kształt koryta; jest to przepływ, który w przeciągu dłuższego czasu powoduje maksymalny transport rumowiska, a w konsekwencji znaczące zmiany w morfologii. Wartość przepływu korytotwórczego oscyluje pomiędzy przepływem średnim rocznym a średnim wysokim ($Q_{50\%}$).

Pojęcia „przepływ brzegowy” i „przepływ korytotwórczy” mają zatem inne znaczenie, ale, jak widać, ich wartości są do siebie zbliżone.



Rys. 1.23. Wskaźniki stanu brzegowego (na podstawie [37])

Pojęcie „przepływ brzegowy” jest istotne z punktu widzenia zagadnień ochrony przeciwpowodziowej, a w geomorfologii fluwialnej znaczenie ma „przepływ korytotwórczy”. Ze względu jednak na bliskość wartości obu wielkości przyjmuje się często, że są one równe przepływowi wysokiemu o prawdopodobieństwie przekroczenia 50% (woda wysoka dwuletnia) a wyżej wymienionych pojęć używa się wymiennie (np. [98]).

1.8.2. HYDRAULICZNE PARAMETRY CHARAKTERYZUJĄCE MORFOLOGIĘ KORYTA

Ze względu na to, że (jak wspomniano wyżej) z punktu widzenia procesów fluwialnych istotny jest przepływ korytotwórczy, morfologię cieku ilościowo charakteryzuje się przy użyciu parametrów hydraulicznych, wyznaczonych dla tego właśnie przepływu. Okresowa weryfikacja ich wartości pozwala też na kontrolę zmian morfologicznych.

Podstawowe parametry o charakterze hydraulicznym, charakteryzujące morfologię koryta, określane przy przepływie korytotwórczym, to:

- szerokość koryta mierzona na poziomie zwierciadła wody i odpowiadająca jej głębokość (maksymalna albo średnia w przekroju),
- spadek podłużny zwierciadła wody.

Parametrem ściśle związanym z parametrami hydraulicznymi jest skład granulometryczny materiału dennego. Powyższe dane są podstawą ilościowej analizy morfologii koryta. W jej ramach określa się następujące parametry:

1) stosunek szerokości do głębokości

Zmiany wartości tego parametru na długości cieku lub w czasie wskazują na zmiany w reżimie hydrologicznym lub w natężeniu transportu rumowiska. Przyczyny zmian omawianego parametru mogą być związane z wydarzeniami epizodycznymi (wezbranie) lub wynikać ze zmian zagospodarowania i użytkowania zlewni (zmiany reżimu hydrologicznego i dopływu rumowiska).

2) natężenie i prędkość przepływu

Wartość natężenia przepływu można określić, wykorzystując związki znane z hydrauliki lub empirycznie na drodze pomiaru rozkładu prędkości lokalnych w przekroju (pomiar rozkładu prędkości daje znacznie bardziej szczegółową informację o strukturze koryta). Wraz z rozwojem sprzętu pomiarowego pojawiły się metody pomiarowe, za pomocą których możliwy jest pomiar przepływu bez uciążliwego i czasochłonnego pomiaru punktowego. Taką metodą jest metoda pomiarowa, wykorzystująca zjawisko Dopplera do pomiaru prędkości wody w rzekach, nazywana w skrócie ADCP. Metoda ta wykorzystywana jest do pomiarów prędkości przepływu, co z jednoczesnym pomiarem pola przekroju poprzecznego pozwala na obliczenie przepływu [57].

3) moc strumienia, naprężenia styczne

Moc strumienia jest miarą zdolności strumienia do transportowania rumowiska.

Wyraża się ona zależnością:

$$\Omega = \rho g Q s \quad (1.3)$$

gdzie:

Ω – moc strumienia [kg m/s^3],

s – spadek podłużny.

Naprężenie styczne na dno:

$$\tau = \rho g R s \quad (1.4)$$

gdzie:

R – promień hydrauliczny (stosunek pola przekroju przepływu do obwodu zwilżonego).

Przyjmując, że głębokość średnia jest bliska promieniowi hydraulicznemu (co ściśle rzecz biorąc zachodzi w przypadku tzw. koryta szerokiego), otrzymujemy:

$$\omega = \tau \nu \quad (1.5)$$

gdzie:

ω – jednostkowa moc strumienia (na 1 m^2 powierzchni dna),

ν – prędkość przepływu.

Ze względu na to, że zmiany geomorfologiczne są ostatecznym wynikiem transportu rumowiska, analiza (prognoza) tych zmian wymaga dokonania bilansu między zasilaniem rumowiskiem a zdolnością transportową strumienia.

2. PROCESY RUMOWISKOWE W RZEKACH

Pod pojęciem „rumowisko” rozumie się cząstki mineralne transportowane przez płynącą wodę. Termin ten nie obejmuje zanieczyszczeń fizykochemicznych ani transportowanych przez płynącą wodę substancji organicznych [86].

2.1. GENEZA RUMOWISKA RZECZNEGO

Rumowisko rzeczne tworzy:

- materiał dostarczany do koryta z obszaru zlewni w wyniku:
 - erozji wiatrowej,
 - erozji wodnej, której dwa rodzaje: powierzchniowa i liniowa, są szczególnie istotne. Materiał pochodzący z powyższych źródeł nosi angielską nazwę *wash material load*;
- materiał własny koryta, stanowiący tzw. *bed material load*.

2.2. KLASYFIKACJA RUMOWISKA

Klasyfikacji rumowiska można dokonywać ze względu na różne kryteria i z różną szczegółowością. Poniżej omówione zostaną te klasyfikacje, które są istotne z punktu widzenia procesów zachodzących w korytach rzek.

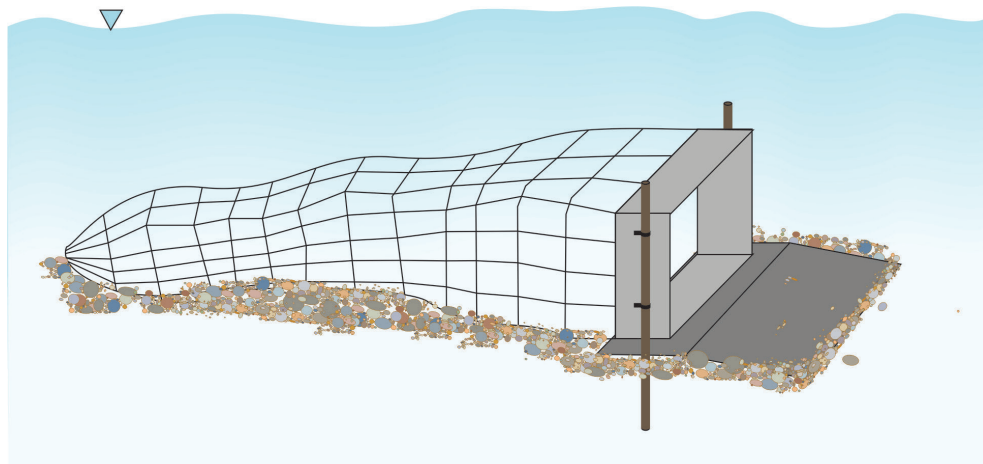
Podane wyżej informacje o źródłach rumowiska w rzekach można potraktować jako przykład jednej z klasyfikacji. Warto zwrócić uwagę, że wymienione dwa typy rumowiska (*wash* i *bed material*) różnią się zasadniczo składem granulometrycznym. Rumowisko zmywane składa się z frakcji znacznie drobniejszych niż materiał własny koryta. Przyjmuje się, że granicą między tymi dwoma rodzajami rumowiska jest średnica 6 μm (Einstein) – 10 μm (Raudkivi), charakterystyczna dla drobnych pyłów.

Z punktu widzenia przebiegu procesów rumowiskowych podział na materiał zmywany i własny koryta jest istotny dlatego, że mechanizm ruchu wymienionych typów rumowiska jest różny właśnie ze względu na wielkość ziaren.

W praktyce stosuje się podział rumowiska na dwa typy, różniące się mechanizmem ruchu (w konsekwencji matematycznym opisem tego ruchu) oraz metodą pomiaru natężenia transportu. Są to:

- rumowisko wleczone, zatem poruszające się przy zachowaniu kontaktu z dnem,
- rumowisko unoszone, transportowane w toni wodnej bez kontaktu z dnem (jego odpowiednikiem w zbiornikach wód stojących jest rumowisko zawieszane).

Klasyczne przyrządy do pomiaru transportu rumowiska wleczonego noszą nazwę łapaczek. Są to pojemniki różnej konstrukcji, umieszczane przy dnie lub wkopywane w dno cieku (rys. 2.1). Do pojemników tych wpada wleczone po dnie rumowisko. Na podstawie objętości lub masy tego rumowiska, jaka została wniesiona do pojemnika w danym okresie, można określić objętościowe lub masowe natężenie jego transportu.

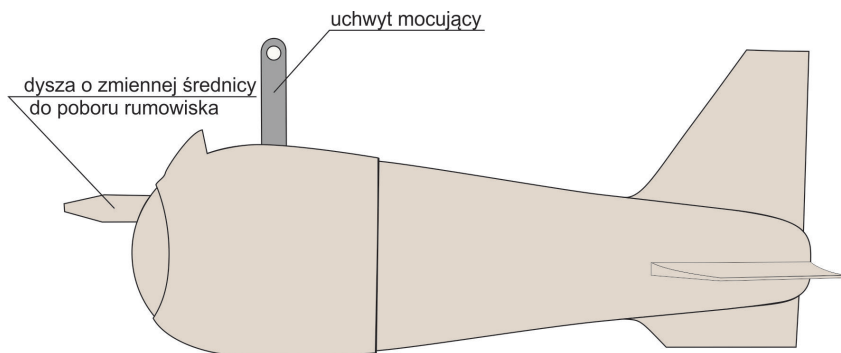


Rys. 2.1. Schemat łapaczki

Uwaga: Należy zaznaczyć, że stosowanie łapaczek w ciekach górskich napotyka na trudności (m.in. z powodu niewielkich rozmiarów koryt tych cieków), a wyniki pomiarów obarczone są znacznym błędem. Nowoczesne, radioizotopowe metody pomiaru natężenia transportu odpowiadają warunkom tych cieków, ale z kolei wymagają spełnienia określonych zasad ich prowadzenia ze względów sanitarnych i są kosztowne.

Klasyczne przyrządy do pomiaru transportu rumowiska unoszonego noszą nazwę batymetrów (batometrów). Są to pojemniki mocowane na wspornikach na różnych głębokościach, ustawione otworem ku napływającemu strumieniowi, do których woda wnosi transportowaną zawiesinę (rys. 2.2). Tak dokonany pomiar pozwala na bezpośrednie określenie natężenia transportu unosiny w przekrojach pomiarowych. Pomiar transportu rumowiska unoszonego może być wykonany również innymi metodami, np. metodą fotometryczną, elektrooporową, ultradźwiękową czy radioizotopową. W metodach tych wyznacza się inne wartości fizyczne (np. intensywność światła przenikającego przez wodę zawierającą unosinę), za pomocą których natężenie transportu zostaje wyznaczone pośrednio.

Niektórzy badacze zwracają uwagę, że klasyfikacja rumowiska na dwa typy (wleczone i unoszone) jest nieco ułomna. Zauważyć bowiem można zjawisko wzniesienia



Rys. 2.2. Schemat batymetru

rumowiska. Polega ono na tym, że niektóre ziarna (*excited load*), poruszające się w zasadzie po dnie, chwilowo transportowane są jako unoszone. Ze względu jednak na wspomniane techniki pomiarowe nie jest możliwe praktyczne wyodrębnienie tej kategorii transportu.

Jedno z ilościowych kryteriów podziału na dwa podstawowe, wymienione wyżej rodzaje rumowiska, zostało określone przez W. Kressera [44] jako:

$$v > 59,43 d^{0,5} \quad (2.1)$$

W powyższym wzorze v to minimalna prędkość średnia przepływu wody, przy której ziarno o średnicy d [m] podlega unoszeniu. Warto podkreślić, że to samo ziarno może być transportowane jako wleczone lub unoszone w zależności od warunków hydrodynamicznych (prędkości strumienia wody).

2.3. CHARAKTERYSTYKA RUMOWISKA (ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM RUMOWISKA KARPACKICH DOPŁYWÓW WISŁY)

Wszystkie ciekły, w tym górna Wisła i jej karpackie dopływy, transportują zarówno rumowisko wleczone, jak i unoszone. Wzajemny udział obu typów rumowiska w ciekach o różnym charakterze jest jednak odmienny. W przypadku cieków górskich i podgórskich obserwuje się przewagę transportu rumowiska wleczonego. Ocenia się, że transport rumowiska wleczonego w stosunku do unoszonego, na przykład w przypadku Dunajca, stanowi ponad 70%, a w przypadku potoków (np. Poniczanka, Mszanka, Lubieńka, Targaniczanka itp.) ok. 80% [3]. Wynika to z dostępności materiału o określonym składzie granulometrycznym. Materiał denny koryt charakteryzują średnice miarodajne (definicję tego pojęcia podano niżej) takiej wielkości, że prędkości, które pozwoliłyby na unoszenie tych ziaren praktycznie nie występują (z wyjątkiem Sanu, Łęgu i Wisły poniżej Krakowa). Zgodnie ze wzorem Kressera w przypadku potoków prędkość ta musiałyby sięgać nawet 17 m/s. Przy rzeczywistych

prędkościach, rzadko przekraczających 3 m/s, unoszeniu podlegają ziarna o średnicy nie większej niż 2,5 mm.

Warto też zauważyć, że rumowisko unoszone w ciekach omawianego typu transportowane jest do odbiorników. Istotne z punktu widzenia ekologicznej funkcjonalności cieków morfologiczne zmiany koryt cieków górskich i podgórskich są zatem wynikiem ruchu przede wszystkim rumowiska wleczonego.

Rumowisko, zwłaszcza rumowisko wlezione cieków górskich i podgórskich, stanowi mieszaninę wielofrakcyjną, stąd pełna charakterystyka rumowiska obejmuje:

- charakterystykę pojedynczego ziarna,
- charakterystykę mieszaniny jako całości.

2.3.1. CHARAKTERYSTYKA POJEDYNCZEGO ZIARNA

Ciężar właściwy

Ze względu na to, że głównym minerałem budującym 70-90% ziaren rumowiska w ciekach polskich jest kwarc – minerał podstawowy zarówno skał osadowych (np. piaskowca), magmowych (np. granitu), jak i metamorficznych (np. gnejsu, kwarcytu) – przyjmuje się, że średnia wartość ciężaru właściwego rumowiska wynosi:

$$\gamma = 26,5 \text{ kN/m}^3$$

Wymiar cząstki

Ziarna tworzące rumowisko mają kształt nieregularny. Ich wielkość charakteryzuje się jednak przez podanie jednego wymiaru liniowego, który zależy w związku z tym od metody jego ustalenia. Dlatego też wielkość cząstki można scharakteryzować przez:

- **średnicę nominalną**, czyli średnicę kuli o objętości równej objętości cząstki,
- **średnicę trójosiową**:

$$d = \frac{(d_1 + d_2 + d_3)}{3} \quad (2.2)$$

lub:

$$d = (d_1 + d_2 + d_3)^{\frac{1}{3}} \quad (2.3)$$

- **średnicę z przesiewu**, czyli średnicę najmniejszego oczka sita, przez które przeszło dane ziarno.

Kształt ziaren

Ziarna rumowiska, zwłaszcza cieków górskich, wykazują dużą różnorodność kształtów i mimo obtaczania zachowują zasadniczą formę. Wygładzeniu ulegają tylko krawędzie ziaren. Parametrami pozwalającymi na scharakteryzowanie kształtu ziaren są [2]:

$$- \text{ tzw. współczynnik kształtu Coreya: } SF = \frac{c}{(ab)^{1/2}} \quad (2.4)$$

$$- \text{ tzw. współczynnik sferyczności: } \Psi_p = \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 - \frac{c}{a} \right]^{1/3} \quad (2.5)$$

gdzie: a , b , c – charakterystyczne wymiary ziarna.

W oparciu o powyższe współczynniki wyróżniono 10 podstawowych kształtów ziaren, np. kuliste, elipsoidalne, dyski, sześciiany, graniastosłupy itd.

Badania rumowiska cieków z dorzecza górnej Wisły, przeprowadzone przez W. Bartnika [2], wykazują, że kształt ziaren znacznie odbiega od kulistych ($SF = 0,75$). Zawartość ziaren tego kształtu nie przekracza 10%. Przeważają ziarna elipsoidalne ($SF = 0,50 \div 0,86$), dyski ($SF = 0,60 \div 0,74$) i zbliżone do graniastosłupa (tzw. wrzecionowate, $SF = 0,60 \div 0,75$).

Cecha hydrauliczna ziarna

Cecha hydrauliczna to inaczej końcowa prędkość opadania swobodnego, czyli ustalona prędkość opadania pojedynczego ziarna w wodzie stojącej w zbiorniku o nieograniczonych rozmiarach.

Wyjaśnienia wymaga określenie prędkości: „końcowa”. Po wrzuceniu pojedynczego ziarna do zbiornika ze stojącą wodą zaczyna ono opadać ze wzrastającą prędkością. Wzrostowi prędkości towarzyszy wzrost oporów ruchu. Wyrównanie sił działających na ziarno (ciężar, wypór i opór hydrodynamiczny) prowadzi do ustalenia się tzw. końcowej prędkości opadania, która np. dla ziaren kulistych wyraża się wzorem:

$$w = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \frac{d}{C_d}} \quad (2.6)$$

gdzie:

ρ_s – gęstość ziarna,

ρ_w – gęstość wody,

C_d – współczynnik oporu zależny od kształtu ziarna (dla kulistych $C_d = 0,44$).

Tak zdefiniowana cecha hydrauliczna ziarna jest miarą jego wielkości.

2.3.2. CHARAKTERYSTYKA RUMOWISKA JAKO CAŁOŚCI

Skład granulometryczny

Przedstawia go krzywa uziarnienia, którą określa się na drodze analizy sitowej. W przypadku rumowiska wleczonego cieków górskich skład granulometryczny obejmuje w przeważającej mierze frakcję żwirową z dodatkiem ok. 10% frakcji kamienistej i podobnym udziałem frakcji piaskowej⁶ (rys. 2.3).

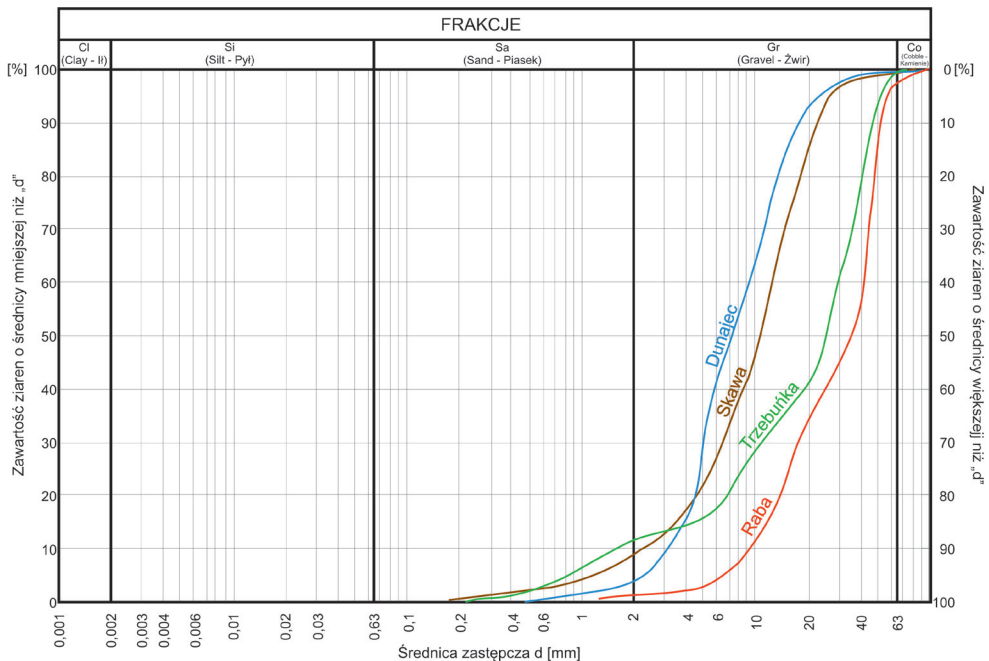
⁶ Dla przypomnienia: frakcja kamienista: $d > 63$ mm, frakcja żwirowa: $2 < d < 63$ mm, frakcja piaskowa: $0,063 < d < 2$ mm, frakcja pyłowa: $0,002 < d < 0,063$ mm.

Mówiąc o składzie granulometrycznym rumowiska wleczonego, warto zwrócić uwagę na dwa problemy:

- pobór prób do analizy sitowej,
- rozróżnienie pojęć „pokrywa” i „podłoże”.

Jeśli chodzi o pierwsze zagadnienie, to według badań H. Słoty i J. Szczęsnego [85] nie ma w przekroju poprzecznym miejsc „uprzywilejowanych”, a więc takich, w których rumowisko można określić jako miarodajne dla całego przekroju. Zatem pobór prób musi być prowadzony zgodnie z opracowanymi przez nich zasadami lub zgodnie z zaleceniami B. Osucha [60]. Ratomski [73] podaje, że pobór rumowiska dennego w celu określenia jego charakterystyk granulometrycznych powinien być wykonany na całej długości cieku lub na wybranym odcinku, w odległościach nieprzekraczających jednego kilometra. Należy uwzględnić odcinki dobrze utrzymujące się, miejsca znaczących dopływów oraz położenie budowli hydrotechnicznych. Poboru prób, w liczbie co najmniej trzech w przekroju, dokonuje się zazwyczaj na odsypiskach przy niskim stanie wody. Masa próby zależna jest od przeciętnej średnicy rumowiska. Dla bardzo grubego rumowiska masa próby może wynosić ok. 100 kg.

Drugi problem jest istotny w przypadku cieków górskich i podgórszych. W ciekach tych w wyniku tzw. selektywnej erozji, czyli wymywania (wynoszenia) ziaren drobniejszych podczas przepływów niewielkich, następuje proces obrukowania dna,



Rys. 2.3. Przykładowe krzywe składu granulometrycznego rumowiska wleczonego cieków karpackich

czyli tworzenia się warstwy rumowiska, składającej się z ziaren grubszych (fot. 2.1). Warstwa taka ulega zerwaniu podczas odpowiednio dużego wezbrania. Pobierając próby do analizy sitowej, należy pamiętać, że od sposobu poboru zależy to, czy określona krzywa będzie charakteryzować tzw. pokrywę, czy podłoże, a zatem, czy uzyskamy informację odpowiadającą potrzebom prowadzonych analiz lub obliczeń.



Fot. 2.1. Warstwa obrukowania dna koryta rzecznego (fot. A. Lenar-Matyas)

Średnica miarodajna

Pojedynczym parametrem charakteryzującym uziarnienie mieszaniny różnoziarnistej jest tzw. średnica miarodajna. Jest to średnica ziaren, których ruch jest reprezentatywny dla ruchu mieszaniny. Istnieją między badaczami rozbieżności dotyczące sposobu określania tej średnicy. Na przykład L. Rákóczy [71] za średnicę miarodajną uznaje średnicę d_{80} , czyli średnicę ziaren, które wraz z mniejszymi stanowią 80% próby pobranej do analizy sitowej. Najczęściej jednak wielkość średnicy miarodajnej ustala się jako średnią ważoną, zgodnie z zaleceniami Meyer-Petera i Müllera [14]:

$$d_m = \frac{\sum d_i p_i}{\sum p_i} \quad (2.7)$$

gdzie:

d_i – średnia wartość średnicy z rozpatrywanego przedziału,

p_i – procentowa zawartość ziaren przyjętego przedziału średnic w całej próbie.

Wraz z biegiem ciekłu następuje zmniejszanie się średnic ziaren rumowiska. Zjawisko to przypisuje się dwóm przyczynom, a mianowicie abrazji ziaren i selektywnej erozji. W przypadku polskich cieków, których rumowisko zbudowane jest, jak wspomniano, w przeważającej mierze z kwarcu, abrazja nie ma większego znaczenia.

Należy jednak wspomnieć, że zjawisko to ujął analitycznie Sternberg, podając równanie na średnicę ziarna po przebyciu drogi w postaci:

$$d_t = d_0 \cdot e^{\frac{-cs}{s}}$$

gdzie:

d_0 – średnica ziarna na początku odcinka [mm],

e – podstawa logarytmów naturalnych, $e = 2,71828$,

s – przebyta droga [km],

c – współczynnik ścierania [$N \cdot km^{-1}$].

Równanie Sternberga tylko częściowo odzwierciedla proces abrazji (szlifowania) rumowiska. W warunkach naturalnych szybszemu oszlifowaniu ulegają ziarna mniej odporne, o większym współczynniku ścierania, niż ziarna trwalsze, o mniejszym współczynniku c . Poza tym ziarna rumowiska wlezonego nie mogą ulec całkowitemu zeszlifowaniu, ponieważ przy pewnej średnicy przechodzą w rumowisko unoszone.

Większy wpływ na proces zmniejszenia się średnic ziaren na długości ciekłu ma selektywna erozja, czyli hydrauliczne sortowanie. Jest ono wynikiem zmniejszania się zdolności transportowej strumienia wraz z biegiem ciekłu na skutek m.in. zmniejszania się prędkości przepływu.

Średnice charakterystyczne

Średnice charakterystyczne to średnice ziaren, które wraz z mniejszymi stanowią odpowiedni procent próby poddanej analizie sitowej. Są to np. średnice d_{50} , d_{95} , d_5 itp. Wykorzystywane są one do określania wskaźników ilościowo charakteryzujących wielofrakcyjność rumowiska.

Wskaźniki charakteryzujące wielofrakcyjność rumowiska

Skład granulometryczny rumowiska wielofrakcyjnego charakteryzują następujące wskaźniki:

– wskaźnik wysortowania Hazena: $c_d = \frac{d_{90} \cdot d_{50}}{d_{50}^2}$ (2.8)

– wskaźnik różnoziarnistości Knoroza: $u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ (2.9)

– wskaźnik jednostajności (cecha dominacji) Kollisa: $\varepsilon = \frac{d_{95}}{d_5}$ (2.10)

O małej różnoziarnistości, czyli o dobrym wysortowaniu, świadczą następujące wartości powyższych wskaźników:

$$u < 5,$$

$$\varepsilon \leq 4 \div 5,$$

$$c_d \sim 1.$$

Rumowisko cieków górskich i podgórskich jest silnie różnoziarniste, ale lepsze wysortowanie wykazuje w dolnych biegach tych cieków.

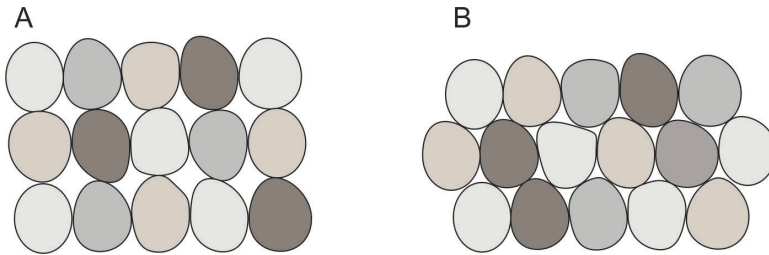
Porowatość warstwy dennej

Cecha ta charakteryzowana jest przez stosunek objętości porów V_p do objętości próby V rumowiska, pobranej w sposób nienaruszający jej struktury:

$$m = \frac{V_p}{V} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

Skrajne wartości w przypadku rumowiska jednorodnego o ziarnach kulistych wynoszą:

- 47,60% – przy układzie ziaren kolumnowym (rys. 2.4A),
- 25,95% – przy układzie ziaren dachówkowatym (rys. 2.4B).



Rys. 2.4. Układ ziaren: A) kolumnowy, B) dachówkowaty

2.4. POCZĄTEK RUCHU RUMOWISKA

2.4.1. POCZĄTEK RUCHU RUMOWISKA JEDNORODNEGO – TEORIA SHIELDSA

Jeśli siły wleczenia działające na ziarnisty materiał denny są mniejsze od pewnej ich krytycznej wartości, to ziarna rumowiska pozostają w spoczynku, a dno określane jest jako stałe. Jeśli natomiast siły te przekraczają wartość krytyczną, to rozpoczyna się ruch ziaren. Warunki rozgraniczające stan spoczynku cząstek rumowiska od stanu ich ruchu noszą nazwę granicznych (lub krytycznych). W zasadzie rozróżniamy:

- warunki, przy których ziarna zaczynają się ruszać (tzw. warunki początku ruchu),
- warunki, przy których ruch ziaren ustaje.

Badania laboratoryjne wykazują, że warunki graniczne w obu przypadkach nieco się różnią. Jednak ze względu na to, że różnice te są niewielkie, pod pojęciem warunków granicznych rozumie się warunki początku ruchu i przyjmuje się, że warunki końca ruchu są z nimi identyczne.

Jednoznaczne stwierdzenie początku ruchu rumowiska jest problematyczne, ponieważ nigdy w ruch nie są wprawiane jednocześnie wszystkie ziarna. Według J. Bogańdiego [8] wyróżnić można trzy stany warunków granicznych:

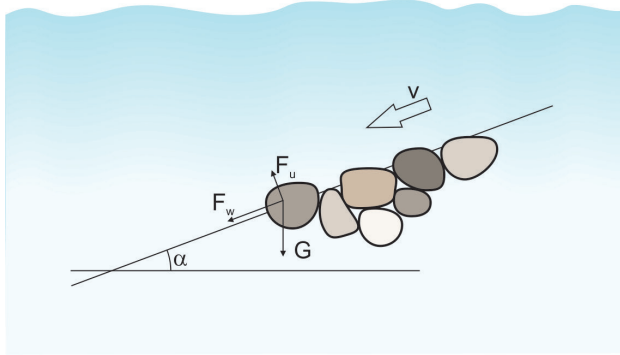
- stan równowagi krytycznej, przy którym zachodzą oscylacje cząstek prowadzące do wewnętrznej reorganizacji rumowiska,

- stan równowagi kinetycznej, któremu towarzyszy przemieszczanie się pierwszych cząstek,
- stan ruchu całej masy rumowiska.

Praktycznie za początek ruchu uznaje się moment, kiedy zaczynają się poruszać pierwsze ziarna.

Warto jeszcze zauważyć, że stwierdzenie początku ruchu rumowiska jest tym trudniejsze, im bardziej różnoziarniste jest rumowisko. Ze względu na ten fakt teorie opisujące początek ruchu w swojej podstawowej postaci dotyczą rumowiska jednorodnego.

Najbardziej rozpowszechniona i praktycznie wykorzystywana jest teoria tarciowa (*frictional drag theory*). Zakłada się w niej, że w warunkach granicznych siły hydrodynamiczne działające na ziarno (siła unoszenia F_u , siła wleczenia F_D i siła nadwyżki ciężaru nad wyporem W) są równoważone siłami oporu (tarcie T) [24] (rys. 2.5).



Rys. 2.5. Siły działające na ziarno rumowiska dennego (wg [24])

Równanie równowagi tych sił prowadzi do związku podanego przez Shieldsa [83]:

$$\frac{\tau_{okr}}{g(\rho_s - \rho)} = f_c \quad (2.12)$$

$$f_c = f(\text{Re}^*)$$

W równaniu tym:

τ_{okr} – krytyczne naprężenie na dno wywierane przez płynącą wodę,

ρ_s – gęstość rumowiska,

ρ – gęstość wody,

d – średnica ziaren rumowiska,

f_c – bezwymiarowe naprężenie krytyczne,

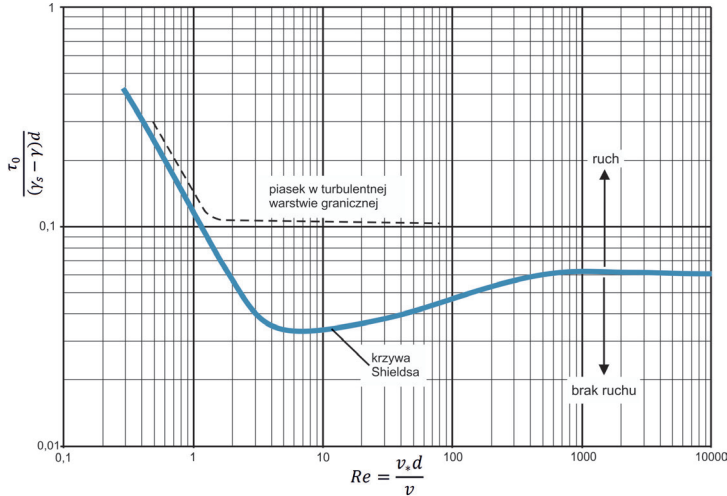
Re^* – tzw. tarciowa liczba Reynoldsa:

$$Re^* = \frac{v_* d}{\nu} \quad (2.13)$$

v_* – tzw. prędkość dynamiczna (tarcia):

$$v_* = (gRf)^{0,5} \quad (2.14)$$

Wykres przedstawiający powyższą zależność nosi nazwę krzywej Shieldsa (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Krzywa Shieldsa [83]

Dla $Re^* > 400$ wartość bezwymiarowego naprężenia krytycznego f_c jest stała i wynosi 0,6. Nazywa się ją stałą Shieldsa i oznacza często jako a_c lub A_c . Późniejsze badania Meyer-Petera i Müllera wykazały, że stała ta ma wartość 0,047. Biorąc pod uwagę tę wartość, można stwierdzić, że w przypadku rzek górskich, które charakteryzują się liczbami $Re^* > 400$, wartość krytycznego naprężenia na dno (wywieranego przez strumień wody), czyli takiego, które określa warunki początku ruchu rumowiska, określa zależność:

$$\tau_{okr} = 0,047 \cdot g(\rho_s - \rho)d = 0,047 \cdot (\gamma_s - \gamma)d \quad (2.15)$$

2.4.2. POCZĄTEK RUCHU RUMOWISKA WIELOFRAKCYJNEGO

Warunki początku ruchu dla tych samych ziaren są inne w zależności od tego, czy ziarna te tworzą rumowisko jednorodne, czy też wchodzi w skład mieszaniny wielofrakcyjnej. Wynika to stąd, że w mieszaninie ziarna duże przeszkadzają w ruchu

ziarnom mniejszym. Mówi się, że ziarna duże przesłaniają ziarna mniejsze, utrudniając im wejście w ruch. Ziarna drobne zaś, na których spoczywają grubsze, stanowią dla nich rodzaj łożyska ułatwiającego im ruch.

Zatem ziarna grubsze, stanowiąc składnik mieszaniny wielofrakcyjnej, wchodzi w ruch łatwiej niż wówczas, gdy stanowią rumowisko jednorodne. Ziarna drobne odwrotnie – stanowiąc składnik mieszaniny wielofrakcyjnej, wchodzi w ruch trudniej niż wówczas, gdy tworzą rumowisko jednorodne. Zależność tę opisuje tzw. współczynnik stabilności ziaren:

$$\varepsilon = \frac{f_i}{f_m} = f\left(\frac{d_m}{d_i}\right) \quad (2.16)$$

gdzie:

indeks „i” dotyczy ziaren dowolnej frakcji, a indeks „m” – ziarna miarodajnego, czyli:

f_i – bezwymiarowe naprężenie krytyczne ziaren o średnicy d_i , stanowiących składnik mieszaniny wielofrakcyjnej,

f_m – bezwymiarowe naprężenie krytyczne ziarna miarodajnego mieszaniny wielofrakcyjnej (w ogólnym przypadku $f_m = a_c = 0,047$ – wg Meyer-Petera i Müllera).

Badacze procesów rumowiskowych nadali powyższej funkcji różne postacie konkretne. W warunkach polskich cieków karpackich najlepiej sprawdza się funkcja Wanga [97]:

$$\frac{f_m}{f_i} = 1,786 \left(\frac{d_i}{d_m}\right)^{0,947} \quad \text{dla} \quad \frac{d_i}{d_m} < 0,4 \quad (2.17)$$

$$\frac{f_m}{f_i} = 1,786 \left(\frac{d_i}{d_m}\right)^{0,314} \quad \text{dla} \quad \frac{d_i}{d_m} \geq 0,4 \quad (2.18)$$

Zakład Budownictwa Wodnego, obecnie Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, od lat zajmujący się problemami transportu rumowiska w ciekach dorzecza górnej Wisły, zweryfikował powyższe wzory oraz wartości stałej Shieldsa dla niektórych karpackich dopływów Wisły [7].

Na przykład:

– dla Wisłoki i Dunajca:

$$\frac{f_m}{f_i} = \left(\frac{d_i}{d_m}\right)^{0,4} \quad f_m = 0,030 \quad (2.19)$$

– dla Raby:

$$\frac{f_m}{f_i} = \left(\frac{d_i}{d_m}\right)^{1,0467} \quad f_m = 0,032 \quad (2.20)$$

2.4.3. PRĘDKOŚĆ NIEROZMYWAJĄCA

W niektórych zagadnieniach inżynierii wodnej (np. określaniu tzw. przepływu nieszkodliwego) lub inżynierii lądowej (np. hydraulicznym projektowaniu mostów) wykorzystuje się pewne elementy innego podejścia do warunków początku ruchu (tzw. *impact theory*). W podejściu tym przyjmuje się, że warunki początku ruchu definiuje tzw. prędkość krytyczna. W zasadzie o wejściu ziarna do ruchu decyduje prędkość przydenne. Ze względu na trudności w precyzyjnym zdefiniowaniu tego pojęcia i trudności w pomiarze tej wielkości, praktycznie wykorzystuje się pojęcie tzw. prędkości nierozmywającej. Jest to średnia w przekroju prędkość przepływu, przy której jeszcze nie następuje ruch rumowiska. Trzeba zwrócić uwagę na to, że jest to taka prędkość średnia, przy której prędkości przydenne nie uruchamiają jeszcze ziaren. Zatem prędkości nierozmywające (mające charakter średniej w przekroju) zmieniają się (rosną) wraz z głębokością (!), co wynika z kształtu tachoidy (logarytmicznego rozkładu prędkości w pionie) [25]. Są one oczywiście zależne od uziarnienia materiału budującego koryto. Wartości prędkości nierozmywających można obliczyć odpowiednimi wzorami empirycznymi. Poniżej podano dwa przykłady stosunkowo popularnych wzorów:

– wzór Goncharova [22]:

$$v_n = \sqrt{\frac{2g(\gamma_s - \gamma)}{1,75\gamma}} d_{50} \lg \frac{8,8h}{d_{95}} \quad (2.21)$$

gdzie:

- γ_s – ciężar właściwy rumowiska [N/m^3],
- γ – ciężar właściwy wody [N/m^3],
- h – głębokość przepływu [m],
- d_{50}, d_{95} – średnice charakterystyczne [m];

– wzór Šamova [79]:

$$v_n = 4,4d^{1/3}h^{1/6} \quad d, h \text{ [m]} \quad (2.22)$$

Zakresy wartości prędkości nierozmywających, zarówno dla gruntów niespoistych, jak i spoistych, przy głębokości przepływu 1 m, można znaleźć w odpowiednich tablicach, zamieszczonych w przepisach dotyczących projektowania koryt lub obiektów infrastruktury drogowej.

2.5. NATĘŻENIE TRANSPORTU RUMOWISKA WLECZONEGO

2.5.1. UWAGI OGÓLNE O FORMUŁACH NA NATĘŻENIE TRANSPORTU RUMOWISKA WLECZONEGO

Natężenie transportu rumowiska wleczonego obliczyć można jedynie formułami o charakterze empirycznym lub półempirycznym. Związki czysto teoretyczne nie istnieją. Poniżej omówione zostaną formuły na intensywność (natężenie) transportu rumowiska gruboziarnistego, a zatem takie, które odpowiadają warunkom cieków górskich i podgórskich, z wyłączeniem formuł odnoszących się do potoków alpejskich, które charakteryzują się niespotykanymi w Polsce spadkami, dochodzącymi do 20%.

Wszystkie omówione poniżej formuły na natężenie transportu rumowiska wleczonego charakteryzują się tym, że:

- określają tzw. zdolność transportową strumienia, czyli maksymalne natężenie transportu rumowiska przy danych parametrach przepływu wody; oznacza to, że rzeczywiste natężenie transportu może być mniejsze, np. z powodu ograniczonej dostępności materiału w danym cieku;
- dotyczą jednostajnego ruchu wody (czyli ruchu, którego parametry są stałe w czasie i przestrzeni);
- podstawowe ich postaci odnoszą się do rumowiska jednorodnego; natężenie transportu rumowiska wielofrakcyjnego określane jest formułami będącymi pewnymi modyfikacjami związków podstawowych.

Należy zwrócić uwagę na to, że wzory określają tzw. jednostkowe natężenie transportu, czyli natężenie transportu na 1 mb szerokości koryta, oraz że ten jednostkowy transport określany jest masowo, czyli w [kg/s m] materiału suchego q_s lub mokrego $q_{s'}$, bądź objętościowo q_s [m³/s m].

Zależność pomiędzy jednostkowym transportem masowym materiału suchego i mokrego określa poniższy związek:

$$q_s = \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \right) q_{s'} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}} \right] \quad (2.23)$$

Związek pomiędzy jednostkowym transportem objętościowym i masowym materiału mokrego określa zależność:

$$q_s = \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \right) \frac{q_{s'}}{(1-m)} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}} \right] \quad (2.24)$$

gdzie:

m – porowatość warstwy podłoża.

2.5.2. FORMUŁY NA TRANSPORT RUMOWISKA WLECZONEGO

Istnieje bardzo wiele formuł na natężenie transportu rumowiska wleczonego. Można je zakwalifikować do sześciu grup, które tworzą wzory:

1. uzależniające transport od naprężeń ścinających na dnie koryta,
2. uzależniające transport od natężenia przepływu wody,
3. uzależniające transport od prędkości przepływu wody,
4. wyprowadzone w oparciu o stochastyczne podejście do transportu rumowiska,
5. wynikające z analizy wymiarowej,
6. opracowane dla konkretnych przekrojów poprzecznych określonych cieków.

Warto zauważyć, że jedynie formuła Einsteina i jej modyfikacje oparte są na teorii prawdopodobieństwa, a pozostałe mają charakter deterministyczny, choć samo zjawisko (proces) transportu ziaren ma charakter losowy.

Z punktu widzenia praktycznego zastosowania, zwłaszcza w odniesieniu do cieków górskich i podgórskich, najważniejszy jest wzór Meyer-Petera i Müllera, należący do grupy wzorów uzależniających intensywność transportu od naprężeń stycznych na dno koryta. Wzór ten zostanie zatem omówiony bardziej szczegółowo w podrozdziale 2.5.3. Poniżej natomiast podano kilka do niedawna również popularnych wzorów.

Wzór Schoklitscha [80]

Wzór ten należy do grupy wzorów uzależniających natężenie transportu rumowiska od natężenia przepływu. Ogólna postać tych wzorów jest następująca:

$$q_s = C(q - q_0) \quad (2.25)$$

gdzie:

q_s – jednostkowe natężenie transportu rumowiska,

q – jednostkowe natężenie przepływu wody [$\text{m}^3/\text{s m}$],

q_0 – jednostkowe natężenie przepływu wody w warunkach początku ruchu [$\text{m}^3/\text{s m}$].

Pochodząca z 1950 r. postać wzoru Schoklitscha ma następującą formę:

$$q_s = 2500 S_0^{1,5} (q - q_0) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right] \quad (2.26)$$

$$q_0 = 0,26 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{\frac{5}{3}} d^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{-7}{6}} d [\text{mm}] \quad (2.27)$$

Ze względu na to, że wzór ten został wyprowadzony na podstawie wyników badań laboratoryjnych dla rumowiska o średnicy $d = 0,3-7$ mm, przy dużych nachyleniach koryta badawczego, w przypadku rumowiska gruboziarnistego i przy łagodniejszych spadkach podłużnych koryt wzór ten może dawać zaniżone wartości.

Przykładami wzorów z grupy, w której transport rumowiska uzależniony jest od prędkości przepływu wody, są wzory Gončarova i Šamova.

Wzór Gončarova [22]

$$q_s = 2,95(1 + \varphi)v_n d_m \left(\frac{v^2}{v_n^3} - 1 \right) \left(\frac{v}{v_n} - 1 \right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right] \quad (2.28)$$

gdzie:

φ – parametr zależny od temperatury wody oraz średnicy ziarna; w przypadku ziaren o średnicy $d > 1,5$ mm jego wartość wynosi 1,

v_n – prędkość nierozmywająca:

$$v_n = \sqrt{\frac{2g(\gamma_s - \gamma)}{3,5\gamma}} d_{50} \lg \frac{8,8h}{d_{95}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (2.29)$$

Wzór Šamova [79]

$$q_s = k \left(\frac{v}{v_{0n}} \right)^3 (v - v_{0n}) \left(\frac{d_m}{h} \right)^{0,25} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right] \quad (2.30)$$

gdzie:

v_{0n} – prędkość końcowa ruchu rumowiska:

$$v_{0n} = 4d_m^{1/3} h^{1/6} \quad (2.31)$$

K – współczynnik proporcjonalności zależny od procentowej zawartości ziaren o średnicach $d > 1-2$ mm:

$$40 \div 70\%: k = 3d^{2/3},$$

$$20 \div 40 \text{ lub } 70 \div 80\%: k = 2,5d^{2/3},$$

$$10 \div 20 \text{ lub } 80 \div 90\%: k = 1,5d^{2/3},$$

$$\text{w pozostałych przedziałach: } k = 0,95d^{2/3}.$$

W powyższych zależnościach d jest średnią ważoną z frakcji grubszych o średnicach od 1 do 2 mm.

Według Šamova wzór ten jest słuszny dla rumowiska o średnicach $d > 0,15 \div 0,20$ mm.

Wszystkie podane powyżej wzory określają masowe natężenie transportu rumowiska suchego. Wzór Schoklitscha sformułowany jest dla rumowiska jednorodnego, natomiast wzory Gončarova i Šamova dla rumowiska wielofrakcyjnego. Obydwa wzory były wprowadzone przede wszystkim dla środkowych i dolnych biegów rzek rosyjskich.

2.5.3. FORMUŁA MEYER-PETERA I MÜLLERA (MPM)

Postać podstawowa

Formuła MPM należy do grupy wzorów uzależniających natężenie transportu rumowiska wlezonego od naprężeń ścinających na dno. Ogólna ich postać ma formę:

$$q_s = C\tau_0(\tau_0 - \tau_{0kr}) \quad (2.32)$$

gdzie:

C – stała liczbowa,

τ_0 – rzeczywiste naprężenie styczne na dno, wywoływane przez strumień płynącej wody,

τ_{0kr} – naprężenie styczne na dno w warunkach początku ruchu, czyli naprężenie krytyczne.

Formuła E. Meyer-Petera i R. Müllera [53], przekształcona do postaci użytkowej, odpowiadająca warunkom rzek górskich i podgórskich, ma formę:

$$q'_s = \left[\frac{1}{0,25} \left(\frac{g}{\gamma} \right)^{1/3} \right]^{3/2} (\gamma J - a_c \gamma'_s d_m)^{3/2} \quad (2.33)$$

gdzie:

$\gamma'_s = \gamma_s - \gamma$,

$a_c = 0,047$ – stała Shieldsa,

J – spadek hydrauliczny.

Wzór ten wyprowadzono na podstawie badań wykonanych na ciekach o szerokości od 15 cm do 2 m, przy spadkach podłużnych od 0,0004 do 0,02 i głębokościach od 1 cm do 1,2 m, dla rumowiska o średnicach od 0,4 mm do 30 mm.

Wzór ten określa jednostkowe natężenie transportu rumowiska wlezonego pod wodą, będącego mieszaniną wieloziarnistą, charakteryzowaną przez średnicę miarodajną.

Podstawiając do powyższego wzoru wartości:

$\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$,

$\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$,

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$,

otrzymujemy jednostkowe natężenie rumowiska pod wodą:

$$q'_s = 53,3(0,606hJ - a_c \cdot d_m)^{3/2} \left[\frac{\text{kN}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right] \quad (2.34)$$

a korzystając z podanych wcześniej zależności – objętościowe, jednostkowe natężenie rumowiska:

$$q_s = \frac{32,3}{(1-p)} (0,606hJ - a_c \cdot d_m)^{3/2} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m} \cdot \text{s}} \right] \quad (2.35)$$

Modyfikacje formuły

Na podstawie danych pomiarowych z sześciu rzek karpackich (Soła, Dunajec, Raba, Szreniawa, Skawa, Wisłoka) oraz górnej Wisły w Zakładzie Budownictwa Wodnego Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie opracowano modyfikację wzoru MPM, zwaną wzorem MPM dla rzek polskiego Podkarpacia (m.in. [2, 6, 54]). Użytkowa jej postać jest następująca:

$$q_s' = 14,284(0,606hJ - 0,013d_m)^{3/2} \left[\frac{kN}{m \cdot s} \right] \quad (2.36)$$

Traktując intensywność objętościowo, otrzymujemy:

$$q_s = \frac{8,66}{(1-m)}(0,606hJ - 0,013d_m)^{3/2} \left[\frac{m^3}{m \cdot s} \right] \quad (2.37)$$

Warto zwrócić uwagę na odmienną wartość współczynnika Shieldsa, który według MPM wynosi 0,047, natomiast w przypadku rzek górskich z obszaru dorzecza górnej Wisły jest mniejszy, a jego średnia wartość wynosi 0,013.

Powyzsza formuła jest słuszna przy:

$$h \leq 4,7 \text{ m,}$$

$$0,0004 \leq J \leq 0,0033,$$

$$0,017 \text{ m} < d < 0,0303 \text{ m.}$$

Przytoczone powyżej formuły dla rumowiska wielofrakcyjnego różnoziarnistość uwzględniają tylko przez wykorzystanie średnicy miarodajnej. Zatem natężenie transportu rumowiska wielofrakcyjnego jest traktowane jako natężenie rumowiska jednorodnego, składającego się z ziaren o średnicy d_m . W podrozdziale 2.4.2 omówiono problem zmiany warunków początku ruchu dla danych ziaren w sytuacji, gdy stanowią one składnik mieszaniny wielofrakcyjnej. Przypomnijmy: ziarna drobniejsze mają utrudnione, zaś ziarna grubsze ułatwione wejście w ruch, jeśli stanowią składnik mieszaniny, w porównaniu z warunkami dla rumowiska jednorodnego określonej frakcji. Można zatem powiedzieć, że ziarna mieszaniny odznaczają się zmienną stabilnością. Jej miarą jest współczynnik stabilności, którego wartość można obliczyć z ogólnych wzorów Wanga. Wprowadzając do formuły MPM w miejsce stałej Shieldsa a_c bezwymiarowe naprężenie krytyczne f_p , otrzymujemy formułę na jednostkowe natężenie transportu ziaren frakcji „i”, z uwzględnieniem wpływu pozostałych frakcji na stabilność rozpatrywanych ziaren:

– wagowo:

$$q_{si}' = 53,3(0,606hJ - f_i \cdot d_i)^{3/2} \left[\frac{kN}{m \cdot s} \right] \quad (2.38)$$

– objętościowo:

$$q_{si} = \frac{35,3}{(1-m)}(0,606hJ - f_i \cdot d_i)^{3/2} \left[\frac{m^2}{m \cdot s} \right] \quad (2.39)$$

gdzie:

$$f_m = 0,047$$

$$f_i = f_m \cdot 0,56 \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{-0,947} \quad \text{dla} \quad \frac{d_i}{d_m} < 0,4 \quad (2.40)$$

$$f_i = f_m \cdot \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{-0,314} \quad \text{dla} \quad \frac{d_i}{d_m} \geq 0,4$$

Sumaryczny, jednostkowy transport rumowiska, będącego mieszaniną wielofrakcyjną, należy obliczać, uwzględniając procentowy udział ziaren danej frakcji w mieszaninie:

$$q_s = \sum (q_{si} \cdot p_i) \quad (2.41)$$

gdzie:

p_i – procentowy udział ziaren danej frakcji w mieszaninie.

2.5.4. UWAGI OGÓLNE O PRZYTOCZONYCH WZORACH NA TRANSPORT RUMOWISKA

Wzór Schoklitscha daje zaniżoną wartość transportu ze względu na to, że formuła na q_0 daje wartość zbyt dużą. Wzór Gončarova jest bardzo dobry, ale dla rumowiska drobniejszego niż rumowisko cieków górskich. Wzór MPM z kolei najlepiej odpowiada ciekom górskim z obszaru dorzecza górnej Wisły, zwłaszcza w wersji zmodyfikowanej przez wprowadzenie wzorów Wanga.

3. WPŁYW REGULACJI NA MORFOLOGIĘ KORYTA CIEKU

Niniejszy rozdział poświęcony jest zmianom morfologii koryt cieków karpackich, wywołanym przez obiekty zrealizowane w ramach ich regulacji. Opis i analiza tych zmian ma przede wszystkim stanowić podstawę bardziej ogólnej wiedzy o tym, jak obiekty hydrotechniczne zmieniają przebieg procesów fluwialnych i jakie są długofalowe skutki procesów uruchamianych przez te obiekty i stosowane systemy regulacji. Świadomość rodzaju i zasięgu zmian morfologicznych, będących skutkiem technicznej ingerencji w koryta cieków, powinna ułatwić podejmowanie decyzji co do zakresu, typu i technicznych parametrów obiektów i systemów regulacji. Dobór właściwych inżynierskich rozwiązań jest ważny zarówno w kontekście społeczno-gospodarczym, jak również ekologicznym.

3.1. BUDOWLE REGULACYJNE CIEKÓW KARPACKICH

Regulację rzek karpackich realizowano, stosując dwa typy budowli:

- **podłużne**, do których zalicza się: tamy podłużne (kierownice), tamy poprzeczne (ostrogi), umocnienia brzegowe (opaski, mury oporowe),
- **poprzeczne**, takie jak: zapory wodne, jazy, zapory przeciwrumowiskowe, stopnie (bystrza, rampy kamienne), progi.

Ostrogi

Ostrogi są to budowle usytuowane poprzecznie do kierunku przepływu wody (rys. 3.1, fot. 3.1). Rozpoczynają się one w brzegu naturalnym tzw. wrzynką i kończą głowicą w linii regulacyjnej [15]. W zależności od kąta utworzonego przez kierunek ostrogi i kierunek stycznej do linii regulacyjnej rozróżnia się ostrogi podprądowe (gdy kąt jest ostry), prostopadłe (gdy kąt jest prosty) oraz zaprądowe (gdy kąt jest rozwarty) (rys. 3.1). Odstępy między kolejnymi ostrogami powinny być mniej więcej równe ich długości. Korona ostróg wznosi się na ogół do poziomu wody średniej rocznej lub niżej. Ostrogi zmniejszają prędkość przepływu w obrębie przegrodzonych przez nie przestrzeni wodnych. Dzięki temu następuje stopniowe wypełnianie rumowiskiem tych przestrzeni, a w konsekwencji zwężenie koryta.



Fot. 3.1. Pogłębione koryto Białego Dunajca na odcinku uregulowanym za pomocą ostróg siatkowo-kamiennych (fot. J. Korpak)

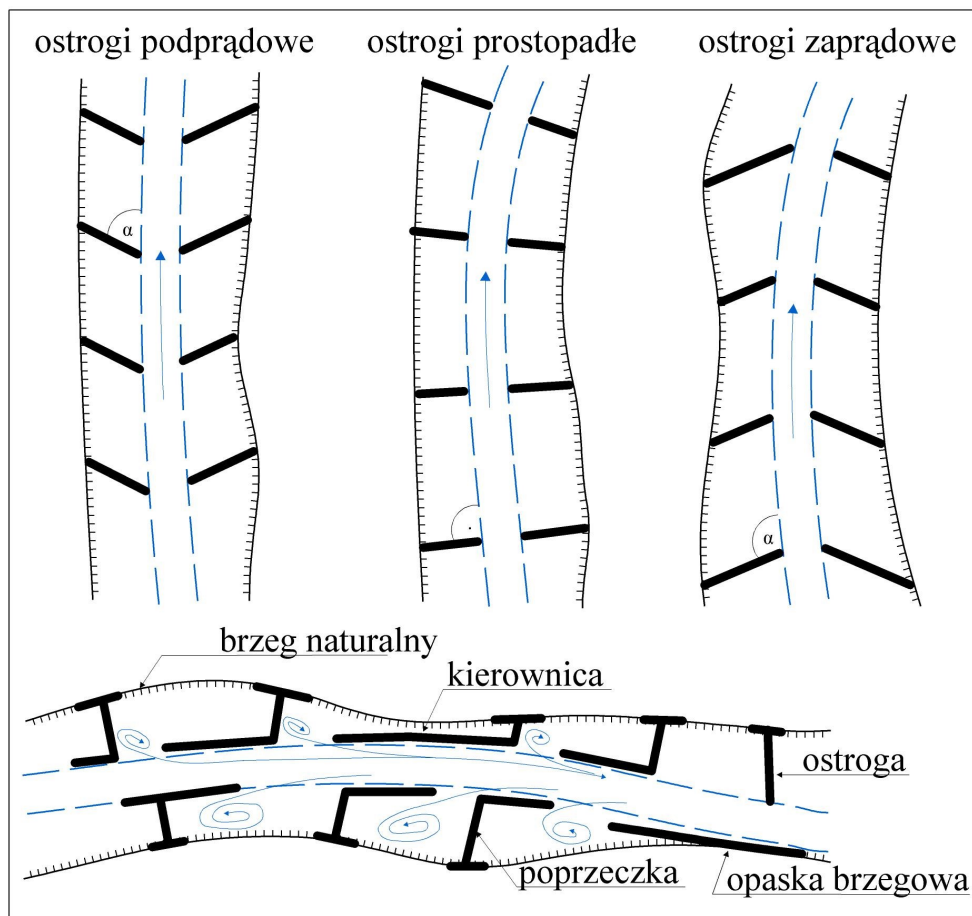
Podstawowymi zadaniami ostróg są [102]:

- zwężenie koryta (koncentracja strumienia) i wytworzenie nowej linii jego przebiegu, tzw. trasy regulacyjnej,
- ochrona brzegów przed erozją.

Tamy podłużne

Tamy podłużne (kierownice) to budowle usytuowane wzdłuż projektowanej linii trasy regulacyjnej (rys. 3.1). Wyznaczają one i utrwalają nową linię brzegową wzdłuż całej jej długości. Ich korona, tak jak korona ostróg, wznosi się zwykle do poziomu wody średniej rocznej lub niżej [102]. Regulacja za pomocą kierownic wymaga wykonania dodatkowych, pomocniczych budowli, takich jak poprzeczki (rys. 3.1). Jest ona z reguły znacznie kosztowniejsza niż regulacja za pomocą ostróg, zatem też rzadziej stosowana [15]. Odstępy między poprzeczkami przyjmuje się jako 2-, 3-krotną szerokość rzeki. Wypełnienie przestrzeni między starym brzegiem i nową linią regulacyjną w przypadku rzek górskich jest bardzo wolne, dlatego też obszar ten zostaje zasypany w trakcie wykonywania regulacji. W przypadku rzek nizinnych przestrzeń pomiędzy brzegiem właściwym a tamą podłużną pozostawia się niewypełnioną. Osadzanie drobnego rumowiska pomiędzy poprzeczkami odbywa się jedynie przy stanach wyższych, podczas których woda przenosi materiał ponad koronami tam i osadza go w miejscach, gdzie prędkość przepływu jest minimalna. W celu przyspieszenia załadunku odciętych obszarów można pozostawić przerwy w tamie podłużnej. Umożliwia to doprowadzenie drobnego materiału poza tamę również w okresie wystąpienia przepływów niskich.

Cel budowy tamy podłużnej, podobnie jak w przypadku ostróg, to: koncentracja przepływu i utrzymanie wymaganego napełnienia, np. w celu umożliwienia żeglugi,



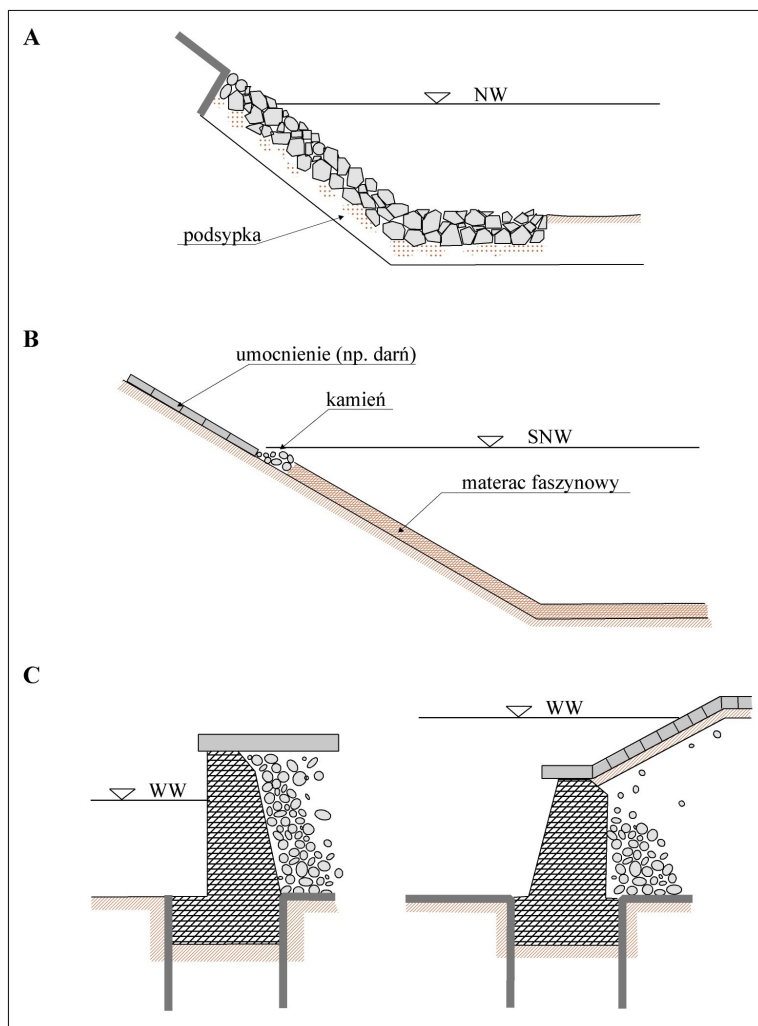
Rys. 3.1. Budowle podłużne: ostrogi i kierownice (wg [15 i 102], zmienione)

ochrona brzegów przed erozją albo utrzymanie zaprojektowanej trasy regulacyjnej w miejscach, gdzie wymagane jest np. złagodzenie istniejących łuków.

Umocnienia brzegowe

Ich głównym zadaniem jest ochrona brzegów (zwłaszcza wklęsłego) przed erozją. Umocnienia brzegowe występują jako budowle samodzielne albo towarzyszące innym obiektom inżynierskim (np. wzdłuż odcinków z korekcją stopniową, w rejonie mostów). Najczęściej stosowane są opaski z narztu kamiennego (rys. 3.2A, fot. 3.2), z koszy siatkowo-kamiennych oraz z gabionów. Mury oporowe są najskuteczniejszym i najbardziej trwałym sposobem zabezpieczenia brzegów przed erozją (rys. 3.2C). Zwykle stosuje się je w celu umocnienia brzegów stromych, na odcinkach, na których erozja brzegowa mogłaby wyrządzić wyjątkowo duże szkody (np. uszkodzić drogę) [102].

Oprócz technicznej obudowy brzegów stosuje się niekiedy obudowę biologiczną. Polega ona na obsiewaniu brzegów nasionami roślin wytwarzających darń, obsadzeniu wikliną itp. Rośliny jako jedyne umocnienia brzegów spotyka się rzadko, ponieważ takie rozwiązanie ma sens jedynie w małych ciekach, w korytach erodowanych w niewielkim stopniu [49]. W przypadku koryt górskich taka zabudowa jest mało skuteczna i może się sprawdzić jedynie na odcinkach o dnie wykształconym w obrębie odpornych warstw skalnych i przebiegających przez obszar zalesiony [39]. Zdecydowanie powszechniejsze jest połączenie zabudowy biologicznej z techniczną (np. wiklina między narzutem kamiennym czy darń w otworach kraty betonowej) (fot. 3.2).



Rys. 3.2. Umocnienia brzegowe: A) opaska z narzutu kamiennego, B) opaska z materaca faszynowego, C) mury oporowe (wysoki i niski) (wg [102], zmienione)



Fot. 3.2. Opaska z narzutu kamiennego z wikliną w korycie Mszanki (fot. J. Korpak)

Zapory przeciwrumowiskowe

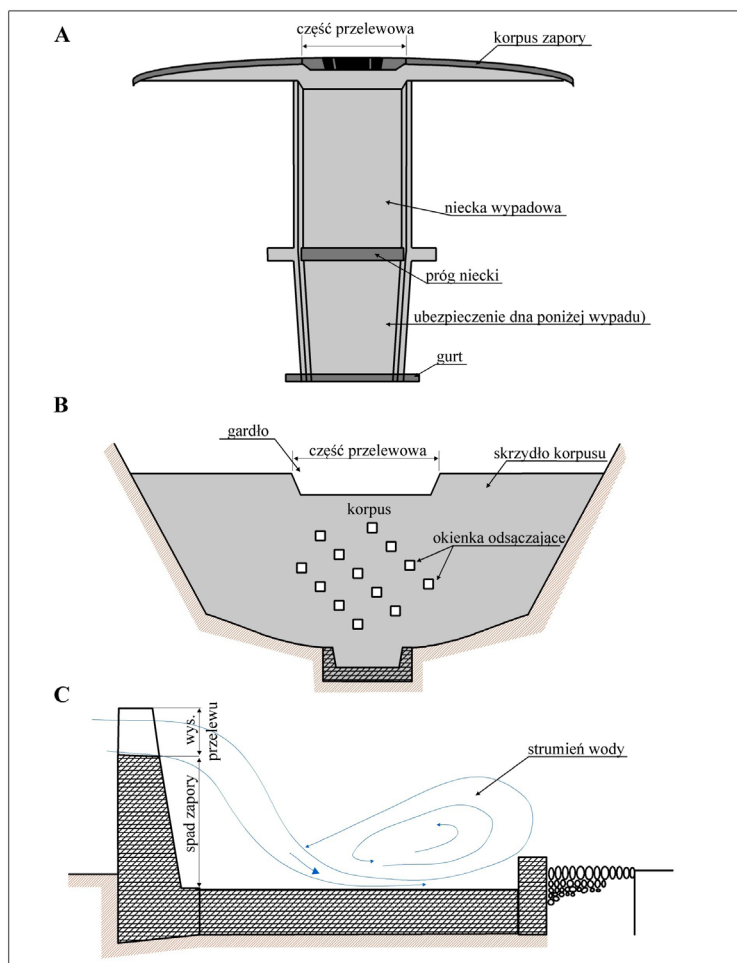
Budowle te lokalizowane są w górnych lub środkowych biegach rzek i przegradzają koryto na całej jego szerokości. Wysokość ich spadów⁷ wynosi przynajmniej 2 m, ale zwykle zawiera się w przedziale 3-6 m [72]. Bez względu na typ konstrukcja zapory przeciwrumowiskowej zawsze umożliwia odpływ wody i materiału unoszonego do dolnego stanowiska. Na rysunku 3.3 pokazano zaporę, w korpusie której umieszczone są służące do tego celu okienka odsączające. Zrzut wód wezbraniowych następuje przez przelew, którego konstrukcja pozwala na przeprowadzenie przepływów maksymalnych o prawdopodobieństwie przekroczenia 2-4%. Zapora przeciwrumowiskowa przepuszcza wody niskie i średnie, a piętrzy jedynie wody wysokie. W efekcie w zbiorniku zatrzymywane jest rumowisko wleczone, natomiast unoszone przedostaje się przez przegrodę. Przestrzeń retencyjna za zaporą wypełnia się wodą jedynie podczas wezbrań, a w innym czasie tworzy tzw. zbiornik suchy. W końcowym etapie pracy zapory przeciwrumowiskowej cała czasza zapory ulega załadowaniu [72].

Poniżej przelewowej części zapory lokalizowana jest niecka wypadowa, której zadaniem jest rozproszenie energii spadającej wody.

Podstawowe zadania zapór przeciwrumowiskowych to [102]:

- zatrzymywanie nadmiaru przemieszczającego się rumowiska,
- podniesienie dna koryta powyżej budowli,
- zmniejszenie nachylenia przyległych zboczy i zapobiegnięcie nadmiernej erozji brzegów,
- zmniejszenie spadku podłużnego koryta powyżej budowli, a w konsekwencji zmniejszenie prędkości przepływu.

⁷ Spad – różnica poziomów wody w stanowisku górnym (powyżej budowli) i stanowisku dolnym (poniżej budowli).



Rys. 3.3. Zapora przeciwrumowiskowa: A) w planie, B) w przekroju poprzecznym, C) w przekroju podłużnym (wg [102], zmienione)

Jazy

Jaz to budowla poprzeczna przegradzająca koryto rzeczne. Zadaniem jazów jest piętrzenie wody w korycie. Podstawowymi elementami budowli są: korpus i skrzydła jazu oraz niecka wypadowa. Rozróżnia się dwa podstawowe typy jazów: jazy stałe – utrzymujące określony poziom piętrzenia, oraz jazy ruchome – wyposażone w różnego rodzaju zamknięcia, których zadaniem jest również regulacja przepływu (fot. 3.3).

Cele piętrzenia wody, uzyskiwanego dzięki jazom, to [102]:

- podniesienie zwierciadła wody w rzece, aby możliwe było grawitacyjne wprowadzenie wody do kanałów lub rurociągów transportujących wodę w różnych celach,
- zahamowanie procesów erozyjnych w korycie, które doprowadzają do osuwania brzegów oraz odsłaniania fundamentów budowli regulacyjnych, mostów itp.,

- podniesienie zwierciadła wody gruntowej powyżej jazu,
- uzyskanie skoncentrowanego spadku, który umożliwia wykorzystanie wody do wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni wodnej (fot. 3.3),
- poprawa warunków rekreacji – efekt dodatkowy towarzyszący podstawowemu celowi budowy jazu.



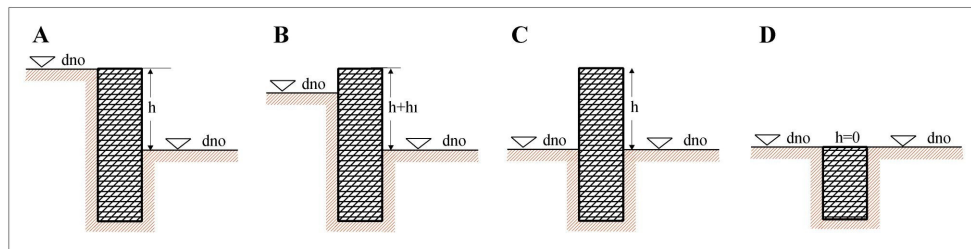
Fot. 3.3. Jaz ruchomy z elektrownią wodną w Szaflarach na Białym Dunajcu (fot. J. Korpak)

Stopnie

Stopnie są budowlami poprzecznymi, biegnącymi przez całą szerokość koryta rzeki. Ich wysokość wynosi przeważnie 0,5-2,0 m [102]. Wysokość stopni mieści się zatem na ogół w obszarze zmienności naturalnych stanów wody. Cechą charakterystyczną stopni jest różnica rzędnych dna koryta poniżej i powyżej budowli (rys. 3.4A i B). Poniżej korpusu stopnia usytuowana jest niecka wypadowa, zakończona progiem lub gurtem końcowym. Stopnie budowane są albo pojedynczo, albo (znacznie częściej) na dłuższych odcinkach koryta jako system zwany korekcją stopniową. Jednocześnie z korekcją stopniową następuje przeważnie umocnienie brzegów (za pomocą budowli podłużnych) w obrębie stopni i na odcinkach koryta między nimi [73]. Specjalnymi rodzajami stopni są sztuczne bystrza i rampy kamienne. Stanowią one nowoczesną konstrukcję, zbudowaną z kamienia łamanego umieszczonego w korycie luzem (bystrza) lub w przegrodach, np. z grodzisk stalowych (rampy).

Głównymi zadaniami stopni są [102]:

- zmniejszenie spadku podłużnego koryta,
- stabilizacja dna koryta.



Rys. 3.4. Progi i stopnie (wg [102], zmienione): A i B) stopień, C) próg, D) gurt

Progi

Progi, podobnie jak stopnie, są budowlami poprzecznymi, biegnącymi przez całą szerokość koryta. Są one niższe od stopni. Ich korona wznosi się ponad dno na wysokość maksymalnie 1 m (rys. 3.4C) lub pokrywa się z poziomem dna (rys. 3.4D). W tym drugim przypadku próg zwany jest gurtem. Po obu stronach budowli rzędne dna koryta mają taką samą wartość. Progi często występują pomiędzy kolejnymi stopniami na odcinkach z korekcją stopniową.

Zadaniem progów jest stabilizacja dna w korycie rzeki [102].

3.2. HISTORIA REGULACJI CIEKÓW KARPACKICH

Koryta rzek i potoków karpackich reguluje się od ok. 200 lat. Szczególnie intensywne prace regulacyjne przypadły na drugą połowę XX w. i polegały przede wszystkim na zmianie przebiegu koryt, wznoszeniu podłużnych i poprzecznych budowli hydrotechnicznych oraz umacnianiu dna i brzegów koryt. Dzisiaj większość koryt w polskich górach jest już w różnym stopniu uregulowana. Najwięcej prac regulacyjnych prowadzono na odcinkach koryt położonych w dolnych biegach rzek, co wiązało się z koniecznością zabezpieczenia terenów przybrzeżnych o najwyższym stopniu zasiedlenia i zagospodarowania. Zadaniem większości obiektów hydrotechnicznych była ochrona mienia ludzkiego, a więc ochrona przeciwpowodziowa terenów zalewanych czy też zapobiegnięcie erodowaniu tych brzegów, w sąsiedztwie których znajdowały się zabudowania, pola uprawne czy drogi. Ważnym celem „ujarzmiania rzek” było również zdobywanie nowych terenów pod zagospodarowanie. W górnych biegach rzek koryta są przeważnie wcięte w litej skale, co stanowi gwarancję ich stabilności.

Pierwszy okres regulacji koryt karpackich przypadł na lata 1910-1939. Już wtedy planowane były systematyczne prace na dłuższych odcinkach, powstawały jednak jedynie pojedyncze budowle. Projekty i prace wstrzymane zostały na skutek wybuchu II wojny światowej. Roboty wznowiono dopiero pod koniec lat 50. XX w.

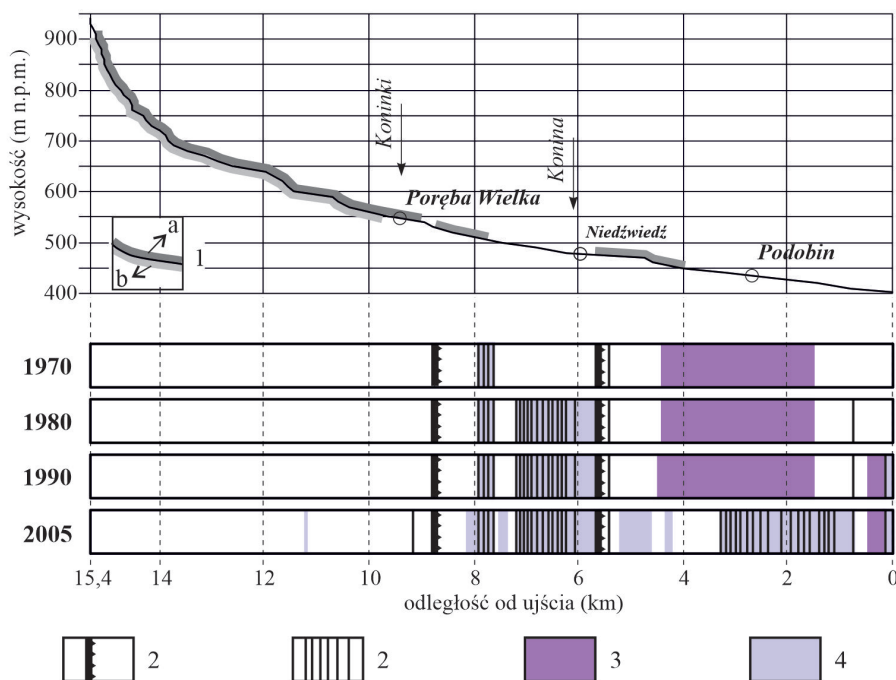
Okres najintensywniej prowadzonych prac regulacyjnych przypada na lata 60. i 70. XX w. Wtedy stosowano najbardziej „inwazyjne” systemy regulacji, przyczyniające

się do radykalnej zmiany układu koryt w planie, ich profili podłużnych i poprzecznych. Powstawały przede wszystkim budowle podłużne (ostrogi i kierownice), ale także poprzeczne, takie jak jazy i zapory przeciwrumowiskowe. Natomiast w tym okresie budowano stosunkowo niewiele stopni.

W latach 80. XX w. prace regulacyjne podejmowano już znacznie rzadziej. Niemal jedynym stosowanym wówczas typem zabudowy koryt była korekcja stopniowa. Lokalnie wykonywano też umocnienia brzegowe. Zastój w postępie prac hydrotechnicznych wynikał z jednej strony z braku funduszy, a z drugiej – z długoletniego okresu bez większych wezbrań (od ok. 1975 do 1997 r.).

Kolejny okres wzmożonych prac hydrotechnicznych rozpoczął się w latach 90. XX w., a właściwie dopiero po katastrofalnym wezbraniu w 1997 r. Realizowane wtedy projekty dotyczyły niemal wyłącznie napraw szkód po następujących po sobie w krótkim czasie wezbraniach w latach 1997, 1998 i 2001. Prace obejmowały przede wszystkim korekcje stopniowe i zabezpieczenia brzegów.

W tabeli 3.1 przedstawiono przykładowy postęp w zabudowie koryt Białego Dunajca, Mszanki i Porębianki do 2005 r., natomiast na rysunku 3.5 zobrazowano bardziej szczegółowo historię regulacji Porębianki.



Rys. 3.5. Historia regulacji koryta Porębianki:

- A) profil podłużny Porębianki: 1) koryto skalne: a – w 2004 r., b – w 1975 r.;
 B) zabudowa regulacyjna koryta Porębianki: 2) zaporę przeciwrumowiskową, 3) stopnie betonowe lub rampy kamienne, 4) budowle podłużne (ostrogi lub kierownice), 5) umocnienia brzegowe

Tabela 3.1

Postęp w zabudowie badanych koryt w poszczególnych okresach (BD – Biały Dunajec, M – Mszanka, P – Porębianka)

Okres	Długość koryta uregulowanego budowlami podłużnymi (% długości całego koryta)			Liczba zapór przeciwrumowiskowych lub jazów			Liczba stopni		
	BD	M	P	BD	M	P	BD	M	P
do 1970	24,7	4,2	20,8	3	2	2	8	1	5
1970-1979	38,4	24,2	32,4	3	3	2	8	11	19
1980-1989	48,8	33,2	35,5	2	3	2	19	20	20
1990-2005	39,1	49,4	46,1	3	3	2	19	29	39
plany	49,6	-	-	3	-	-	29	-	-

Studium przypadku. W korycie Porębianki do 1970 r. powstały wszystkie zapory przeciwrumowiskowe i większość budowli podłużnych. Do 1980 r. wybudowano 19 stopni betonowych (tab. 3.1). Intensywnie prowadzone zabiegi regulacyjne zostały przerwane na początku lat 80. XX w. Przerwa trwała aż do 1997 r. W ciągu tych prawie 20 lat niektóre budowle uległy zniszczeniu, inne przestały spełniać swe zadania, a koryto na wielu odcinkach „zdziczało”. Ponieważ zabudowa regulacyjna w korycie była stara i uszkodzona, seria powodzi na przełomie XX i XXI w. wywołała tu więcej szkód niż w pozostałych korytach. W związku z tym na początku XXI w. zrealizowano na Porębianie wiele nowych inwestycji regulacyjnych.

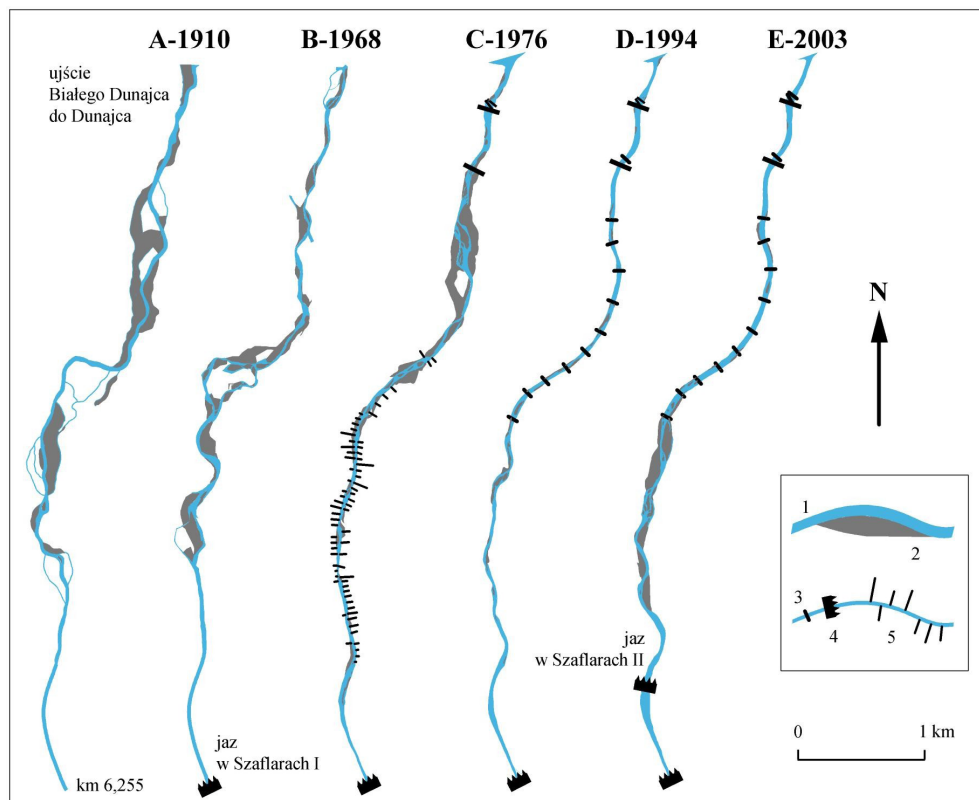
3.3. MORFOLOGICZNA ROLA REGULACYJNYCH BUDOWLI HYDROTECHNICZNYCH

Poniżej przedstawiono wpływ budowli regulacyjnych na morfologię koryt rzek karpackich, określony na podstawie analiz przeprowadzonych na wybranych ciekach.

Warto zwrócić uwagę nie tylko na opis przebiegu procesów uaktywnionych przez poszczególne typy obiektów regulacyjnych, ale również na informacje ilościowe, pozwalające na ocenę tempa i wagi tych procesów.

3.3.1. ZMIANY MORFOLOGII KORYT NA ODCINKACH Z BUDOWLAMI PODŁUŻNYMI

Budowa ostróg i kierownic wiąże się z **przekształcaniem koryt aluwialnych z roztokowych w jednonurtowe kręte lub proste**. Odcinki objęte tym typem ingerencji są **znacznie skracane i wyprostowywane oraz zwężane**.



Rys. 3.6. Zmiany przebiegu koryta Białego Dunajca pod wpływem regulacji za pomocą ostróg i korekcji stopniowej; przebieg koryta określony: A) na podstawie mapy austriackiej w skali 1:75 000, B i C) na podstawie projektów technicznych regulacji [114, 116], D i E) na podstawie ortofotomap; 1) koryto prowadzące wodę, 2) łącha, 3) stopień betonowy, 4) jaz, 5) ostrogi

Na rysunku 3.6 przedstawiono zmiany przebiegu koryta Białego Dunajca, wynikające z jego regulacji z wykorzystaniem budowli podłużnych.

Studium przypadku. Biały Dunajec opuszcza w Szaflarach przełomowy odcinek przez Pieniński Pas Skałkowy i wpływa na wyrównany obszar Kotliny Orawsko-Nowotarskiej, czemu towarzyszy nagłe zmniejszenie spadku i energii strumienia. W naturalnych warunkach, przed regulacjami, koryto było typowym korytem roztokowym, co widoczne jest na topograficznej mapie austriackiej z 1910 r. (rys. 3.6A). W obrębie koryta aktywnego⁸, którego szerokość wynosiła od 100 do 400 m, występowały duże łąchy środkowe i brzegowe. Jeszcze w 1968 r. koryto było prawie naturalne. Wzdłuż biegu rzeki wyróżnić można było odcinki roztokowe na przemian z krętymi (rys. 3.6B). Duże zmiany następowały od początku lat 70. XX w., od kiedy koryto na

⁸ Koryto aktywne – w ujęciu geomorfologicznym jest to część koryta wypełnionego wodą wraz z łąchami nieutrwalonymi roślinnością.

tym odcinku poddano etapowym regulacjom. Największe zmiany zaszły na skutek regulacji za pomocą ostróg siatkowo-kamiennych odcinka w km 5,101-2,182, przeprowadzonej w 1971 r. W wyniku tej regulacji, kręte, a miejscami roztokowe, szerokie do 350 m koryto zwężono do szerokości 30 m (rys. 3.6C). Zwężenie to było lokalnie aż dziesięciokrotne, a średnio wynosiło 73%. Trasa regulacyjna wyznaczona została niemalże w linii prostej, co spowodowało skrócenie koryta o 18%. Przesunięcie brzegów koryta wynosiło przeciętnie 100-140 m, a na odcinku najbardziej roztokowym nawet 240 m. Spadek koryta wzrósł z 7,7‰ do 8,6‰. W latach 80. XX w. uregulowano również ujściowy odcinek koryta rzeki (za pomocą korekcji stopniowej), tak że w 1994 r. było ono już wzdłuż całej długości wąskie i jednodzielne (rys. 3.6D).

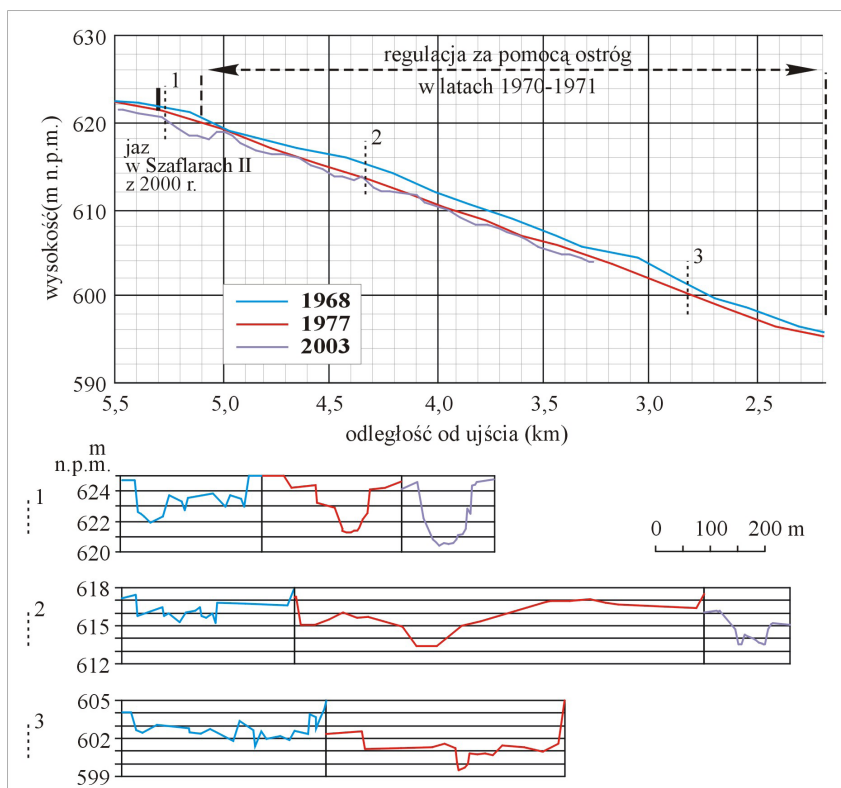
Koncentracja przepływu wód w tak zmienionym korycie, przy jednoczesnym zwiększeniu jego spadku, powoduje wzrost energii strumienia, a tym samym jego zdolności transportowej. W sytuacji redukcji dostawy rumowiska do koryta, spowodowanej ograniczoną efektywnością erozji bocznej umocnionych brzegów, następuje intensyfikacja erozji wglębnej i gwałtowne wcinanie się rzek [9]. Erozja wglębna jest najintensywniejsza bezpośrednio po regulacji. Znaczne obniżenie dna powoduje wzrost wysokości brzegów. Dawniej aktywne koryto wraz z przestrzeniami między ostrogami (które ulegają szybkiemu wypełnianiu) przekształcane jest w terasę, na którą wkracza roślinność (w tym drzewa). To dodatkowo redukuje dostawę materiału do rzeki, zatem utrwala tendencję do wcinania.

Z powodu znacznego pogłębienia koryt wody wezbraniowe rzadko występują z ich brzegów, ale ich oddziaływanie powoduje większe skutki morfologiczne niż w korytach nieuregulowanych. Zmniejszenie częstości zatapiań brzegów oraz wzrost prędkości przy danym natężeniu przepływu ograniczają możliwość akumulacji osadów w pozakorytowych obszarach dolin [103]. Większość rumowiska unoszonego przenoszona jest w niższej położone odcinki koryt, które w ten sposób ulegają spłyceniu, co zwiększa ryzyko powodzi w ich obrębie.

W tych warunkach jedynym sposobem wytworzenia przez rzekę nowego profilu równowagi jest zmniejszanie spadku na drodze erozji wstecznej i akumulacji przemieszczonych aluwii poniżej pogłębianego odcinka. Taka droga wyrównywania profilu podłużnego jest typowa dla wszystkich koryt, które na skutek regulacji zostały skrócone i zwężone, a ich brzegi zostały umocnione, co uniemożliwiło migrację boczną [84].

Tempo dostosowywania się koryt do zmienionych warunków po regulacji zależy od odporności ich dna i brzegów na erozję oraz od mocy strumienia (określającej energię ciekłu na jednostkowej powierzchni dna przy określonym przepływie) [9, 10]. Inny przebieg i tempo odzyskiwania równowagi cechuje koryto, które przed regulacją było szerokie, wieloramienne i wyścielone warstwą aluwii o znacznej miąższości, a inny koryto pierwotnie wąskie, jednoramienne, z cienką warstwą aluwii.

Dla przykładu na rysunku 3.7 przedstawiono zmiany profilu podłużnego i przekrojów poprzecznych uregulowanego odcinka koryta Białego Dunajca w latach 1968-2003. Analiza profili pozwala oszacować tempo pogłębiania, które jest zmienne w czasie.

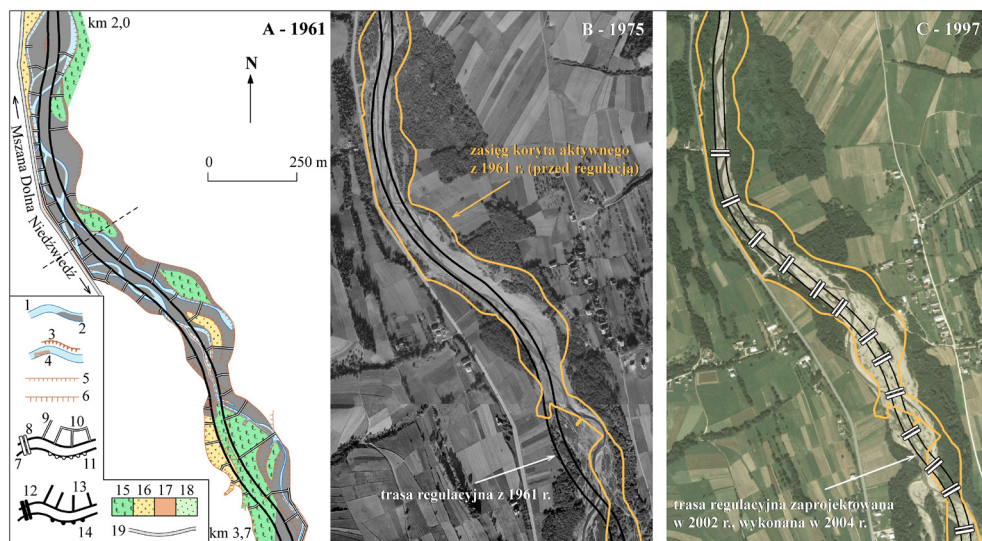


Rys. 3.7. Zmiany profilu podłużnego i przekrojów poprzecznych koryta Białego Dunajca na odcinku uregulowanym za pomocą ostróg w 1971 r. (na podstawie [114, 116, 127])

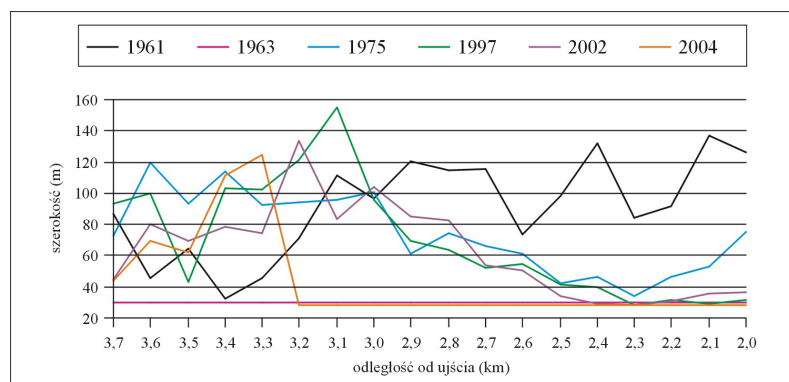
Studium przypadku. W ciągu pierwszych sześciu lat po regulacji za pomocą ostróg (do 1977 r.) dno koryta Białego Dunajca w Szaflarach obniżyło się o 1-2 m, a do 2003 r. wartość pogłębienia osiągnęła maksymalnie 3 m.

Zmiany morfologiczne w obrębie koryt pierwotnie szerokich, o miększej warstwie aluwów

Proces erozji wgłębnej przebiega w tych korytach szybko (zwłaszcza w krótkim czasie po uregulowaniu) i osiąga znaczne rozmiary. Konsekwencją pogłębienia koryt jest odsłanianie fundamentów ostróg i ich stopniowe uszkodzanie (fot. 3.1). Proces ten zostaje znacznie przyspieszony w wyniku dużych wezbrań, podczas których nie raz następuje całkowite zniszczenie budowli podłużnych. W miejscach, w których ostrogi są usunięte, brzegi przestają być chronione przed erozją. Rzeka zyskuje nowy sposób dostosowania swojego profilu do zmienionych warunków reżimu przez migrację boczną i zwiększanie długości, krętości i szerokości koryta [9, 99]. Dzięki erozji bocznej następuje wzrost obciążenia rzeki rumowiskiem, co znacznie redukuje intensywność procesu pogłębienia.



Rys. 3.8. Zmiany koryta Porębianki w Podobinie na skutek regulacji za pomocą budowli podłużnych ok. 1962 r.: A) na podstawie projektów technicznych [110, 126], B) trasa regulacyjna wg projektu [110], C) trasa regulacyjna wg projektu [126]; 1) koryto prowadzące wodę, 2) łacha, 3) podcięcie erozyjne, 4) wychodnie skalne, 5-6) krawędzie brzegów o wysokościach: 5 – 0-2 m, 6 – 2-5 m, 7-11) projektowane budowle regulacyjne: 7 – trasa regulacyjna, 8 – rampy kamienne, 9 – ostrogi, 10 – kierownice i opaski, 11 – narzut kamienny, 12-14) budowle występujące w korycie: 12 – rampy kamienne, 13 – ostrogi, 14 – narzut kamienny, 15) las, 16) łąka, 17) pole orne, 18) nieużytki, 19) droga asfaltowa



Rys. 3.9. Zmiany szerokości koryta Porębianki w Podobinie, uregulowanego w 1962 r. za pomocą ostrog (na podstawie projektów regulacji [110, 112, 126] oraz pomiarów na ortofotomapach i mapach (lata 1975, 1997 i 2004)

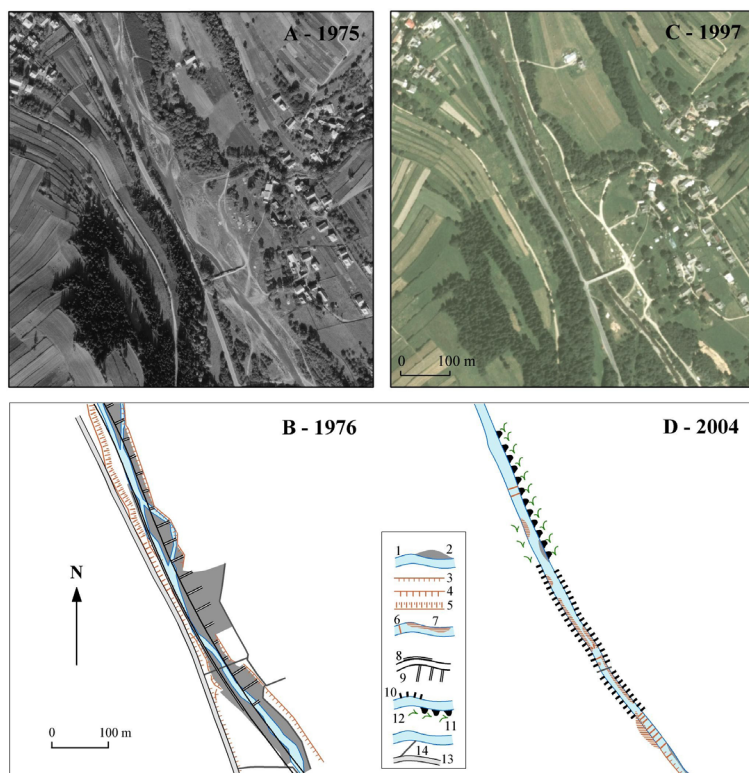
Koryto nie odzyskuje jednak pierwotnej szerokości. Jest to niemożliwe ze względu na znaczne pogłębienie i utrwalenie części brzegów młodym lasem. Rzeka nie odzwierciedla też przebiegu roztokowego, jaki cechował ją w przed regulacją, ale wykazuje

raczej tendencję do meandrowania, co jest typowym sposobem wykształcania profilu równowagi w warunkach zwiększonego spadku i zmniejszonego obciążenia rumowiskiem [82]. Opisane wyżej procesy zilustrowano na przykładzie koryta Porębianki (rys. 3.8 i 3.9), uregulowanego za pomocą budowli podłużnych.

Studium przypadku. Koryto Porębianki w Podobinie przed uregulowaniem było typu roztokowego (rys. 3.8A). Jego szerokość wynosiła średnio 94,8 m, ale lokalnie wzrastała do 130 m (rys. 3.9). Koryto było niestabilne i często zmieniało swój przebieg. Erodowane były brzegi, zwłaszcza lewy, wzdłuż którego przebiega droga Mszana Dolna–Niedźwiedz. W celu ochrony tej drogi przed zniszczeniem w 1962 r. koryto uregulowano za pomocą ostróg siatkowo-kamiennych (rys. 3.8A). Szerokość trasy regulacyjnej na całej długości była jednakowa i wynosiła 30 m. Rostokowe koryto skrócono i wyprostowano. Efektem tak dużego zwężenia koryta było zwiększenie energii strumienia wody, co spowodowało intensywne rozcinanie dna koryta. Podmywane i niszczone były też ostrogi. Lokalnie, tam gdzie rzeka je usunęła, następowało podcinanie brzegów. Po ostatecznym zniszczeniu ostróg w Podobinie (które nastąpiło prawdopodobnie podczas wezbrania w 1970 r.) do 1975 r. szerokość koryta wzrosła o 150% (średnio wynosiła 75 m, a lokalnie nawet 120 m) (rys. 3.8B, 9). Pomimo znacznego poszerzenia koryto nie odzyskało szerokości sprzed regulacji. Było to niemożliwe ze względu na znaczne pogłębienie koryta (o ok. 2-3 m). Część dawnego koryta przekształciła się w terasę zalewową i porośla darnią lub lasem. Rzeka nie zaczęła także roztokować. Choć lokalnie woda rozdzielała się na kilka nurtów, to jednak przeważnie koryto miało jednonurtowy, kręty przebieg. Dostawa materiału z brzegów była ograniczona ze względu na ich obudowanie i porośnięcie nowym lasem. Na zdjęciu lotniczym z 1997 r., wykonanym tuż po wezbraniu, widoczne są dalsze zmiany w wykształceniu koryta (rys. 3.8C). Od 1975 r. jego powierzchnia wzrosła jedynie o ok. 2%. Niewiele zmieniła się też szerokość koryta, która wynosiła 69,7 m (rys. 3.9). Zwiększyła się natomiast powierzchnia leśna wzdłuż obu brzegów. Prawdopodobnie zmiany te były w dużej mierze rezultatem kolejnego wezbrania, podczas którego rzeka miała większą energię i niosła więcej rumowiska. W 2004 r. koryto ponownie uregulowano, tym razem za pomocą korekcji stopniowej z ramp kamiennych (rys. 3.8C).

Zmiany morfologiczne w obrębie koryt pierwotnie wąskich, o cienkiej warstwie aluwiów

Po uregulowaniu za pomocą budowli podłużnych koryta z dnem o cienkiej warstwie aluwiów intensywna erozja wgłębna doprowadza do szybkiego rozcięcia aluwiów i odsłonięcia litego podłoża. Wtedy tempo pogłębienia znacznie się zmniejsza, ale proces wciąż trwa. Rzeka nie rozcina jednak skały na całej szerokości, ale przede wszystkim w nurcie, dlatego przy brzegach tworzą się wąskie listwy półek skalnych, będące częścią dawnego dna koryta. Stanowią one inicjalną formę terasy zalewowej, podczas gdy dawna terasa zalewowa przekształcana jest w nadzalewową. Wraz z pogłębieniem koryta następuje jego zwężanie. Ubezpieczenia nie są niszczone, gdyż



Rys. 3.10. Zmiany koryta Mszanki w Mszanie Górnej na skutek regulacji za pomocą ostróg ok. 1978 r. (B – na podstawie projektu [117], D – na podstawie kartowania terenowego): 1) koryto wypełnione wodą, 2) łacha, 3-5) krawędzie brzegów o wysokościach: 3 – 0-2 m, 4 – 2-5 m, 5 – >5 m, 6) próg skalny, 7) wychodnie skalne, 8-9) projektowane budowle regulacyjne: 8 – kierownice i opaski, 9 – ostrogi, 10-12) budowle regulacyjne występujące w korycie: 10 – opaski siatkowo-kamienne, 11 – narzut kamienny, 12 – zabudowa biologiczna (wiklina), 13) droga asfaltowa, 14) droga gruntowa

ich kontakt z wodą jest szybko przerwany po wcięciu się rzeki w skałę. „Wisząc” nad korytem, nie spełniają one żadnej funkcji.

Opisaną sytuację ilustruje przykład Mszanki (rys. 3.10, fot. 3.4).

Studium przypadku. Mszanka w Mszanie Górnej przed regulacją płynęła korytem aluwialnym (rys. 3.10A). Szerokość koryta aktywnego (wraz z łachami) osiągała wartości 30-90 m. Z biegiem rzeki koryto było coraz węższe, a jego poszerzanie ograniczała obecność wysokiego brzegu lewego i zalesionego prawego (rys. 3.10A i B). Podczas wezbrań woda płynęła całą szerokością koryta, które ulegało przeobrażaniu. Z czasem uszkodzony został betonowy mur oporowy na lewym brzegu, wzdłuż którego przebiega droga Mszana Dolna–Szcawnica. W tej sytuacji w 1978 r. uregulowano koryto za pomocą ostróg i kierownic. Nowe koryto miało profil trapezowy i jednakową szerokość w dnie równą 16 m (rys. 3.10B). Lewy brzeg w bezpośrednim sąsiedztwie drogi



Fot. 3.4. Mszanka wcięta w litą skałę w odcinku uregulowanym za pomocą budowli podłużnych – zawieszona, niefunkcjonująca opaska siatkowo-kamienna (fot. J. Korpak)

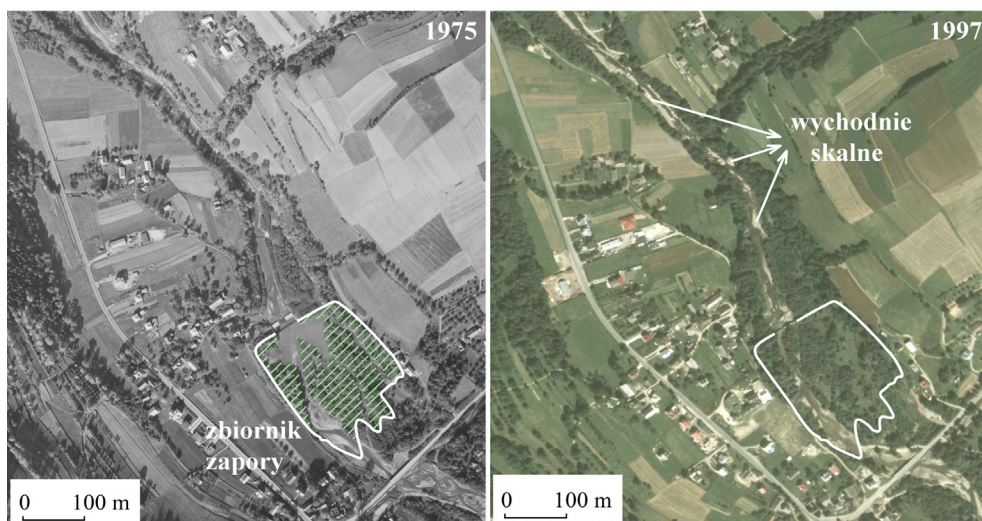
umocniono za pomocą tamy podłużnej siatkowo-kamiennej. Prawy, wklęsły brzeg zabudowano ostrogami siatkowo-kamiennymi, które zwężyły koryto. Znaczne zwężenie koryta (o 32%) spowodowało zwiększenie energii strumienia i intensyfikację procesu erozji wglębnej. Wraz z pogłębianiem koryta następowało dalsze jego zwężanie. Rzeka rozcięła aluwia, osiągając skalne podłoże i dalej się w nie wcinając. Po obu stronach koryta pojawiły się wąskie skalne listwy (rys. 3.10C i D), które osiągają wysokość do 1 m. Całkowita wartość pogłębienia koryta od 1978 r. do 2004 r. miejscami znacznie przekracza 1 m – rzeka rozcięła warstwę aluwii i jednometrową warstwę skały. Około 1,0-1,5 m ponad poziomem wychodni skalnych występuje poziom zadarnionej terasy, która przed regulacją była częścią koryta aktywnego (rys. 3.10A i C). Są to przestrzenie koryta między ostrogami, które zostały wypełnione i utrwalone. Same ostrogi są już przeważnie niewidoczne w terenie. Opaski i kierownice zabezpieczające lewy brzeg są zawieszane nad poziomem wody (fot. 3.4).

3.3.2. ZMIANY MORFOLOGII KORYT NA ODCINKACH Z JAZAMI I ZAPORAMI PRZECIWRUMOWISKOWYMI

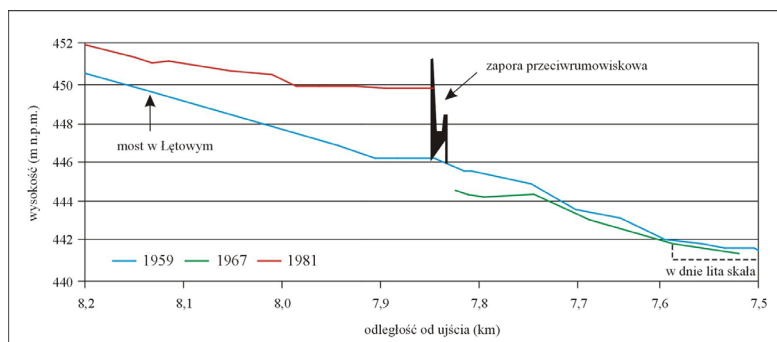
Z punktu widzenia przebiegu procesów geomorfologicznych rola jazów i zapór przeciwrumowiskowych jest podobna. Oba typy budowli zatrzymują bowiem rumowisko, przyczyniając się do jego niedoboru w niżej położonych odcinkach koryta.

Najważniejszym skutkiem wybudowania jazu lub zapory przeciwrumowskiej dla funkcjonowania ekosystemu jest przerwanie ciągłości systemu fluwialnego, w tym transportu materiału. Transportowane rumowisko jest zatrzymywane w zbiorniku, dlatego poniżej niego rzeka staje się niedociążona materiałem [36]. W efekcie poniżej i powyżej budowli zachodzą odmienne procesy, które kształtują koryto w odmienny sposób. Na odcinku powyżej budowli dominuje depozycja, natomiast poniżej – erozja wgłębna.

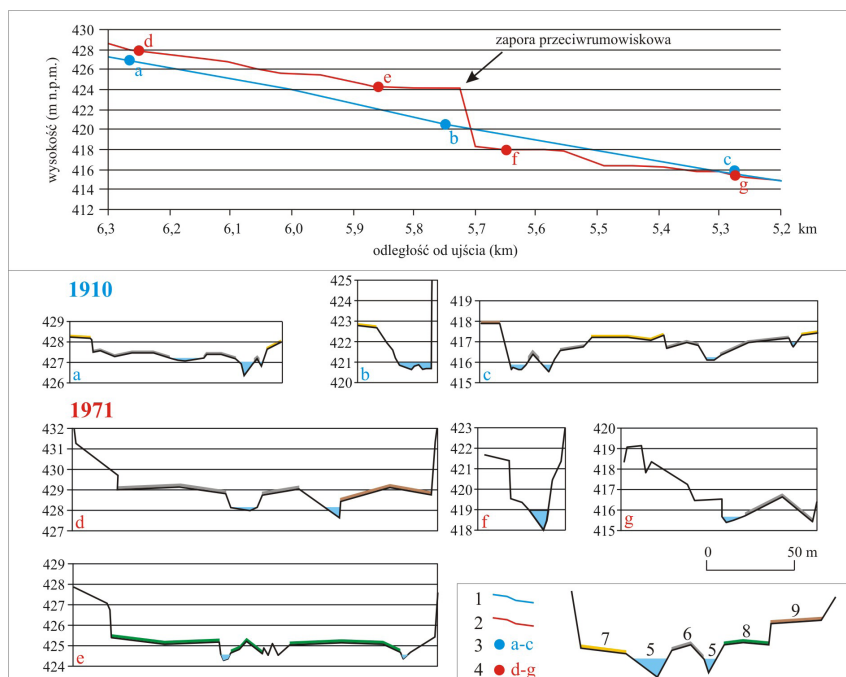
Efektym morfologicznym oddziaływania zapory przeciwrumowskiej lub jazu jest zmiana profilu podłużnego koryta z wyrównanego (przed zabudową koryta) w nieregularny, z wyraźnym załosem. Powyżej budowli dno koryta ulega podniesieniu, natomiast poniżej – obniżeniu.



Rys. 3.11. Odmienne wykształcenie koryta Mszanki powyżej i poniżej zapory przeciwrumowskiej w Mszanie Górnej II (wybudowanej w 1961 r.)



Rys. 3.12. Zmiany poziomu dna w korycie Mszanki na odcinku z zapórą przeciwrumowską w Mszanie Górnej II (na podstawie projektów technicznych regulacji [109, 113, 120])



Rys. 3.13. Zmiany profilu podłużnego i przekrojów poprzecznych koryta Mszanki na odcinku z zapora przeciwrumowiskową w Mszanie Górnej I (z 1934 r.) (na podstawie projektów regulacji [107, 115]): 1-2) profile podłużne w latach: 1 – 1910 r., 2 – 1971 r., 3) lokalizacja przekrojów poprzecznych wykonanych w 1910 r., 4) lokalizacja przekrojów poprzecznych wykonanych w 1971 r., 5) koryto prowadzące wodę, 6) łąka, 7) pastwisko, 8) zarośla, 9) pole orne

Przekształceniu ulegają również przekroje poprzeczne koryta. Zwykle przed wybudowaniem zapory szerokość koryta w różnych przekrojach poprzecznych danego odcinka jest podobna. Budowle lokalizowane są zazwyczaj w miejscach lokalnych przewężnień doliny. Po ich wybudowaniu koryto powyżej ulega przewężnieniu, natomiast poniżej – zwężeniu.

Powyższe zmiany wykazuje koryto Mszanki na odcinku z zapora przeciwrumowiskową w Mszanie Górnej II (rys. 3.11 i 3.12) i w Mszanie Górnej I (rys. 3.13).

Studium przypadku. Przed regulacją koryto Mszanki na odcinku poniżej zapory przeciwrumowiskowej w Mszanie Górnej II (rys. 3.11 i 3.12) było na całej długości szerokie i aluwialne. Wybudowanie zapory przeciwrumowiskowej w 1961 r. spowodowało przekształcenie profilu podłużnego koryta z wyrównanego w nieregularny, z załomem. Koryto podzieliło się na dwa odcinki, rozwijające się w odmienny sposób. Powyżej budowli dominował proces depozycji, który prowadził do stopniowego wypełniania rumowiskiem zbiornika powyżej zapory (rys. 3.11). Dno koryta podniosło się w latach 1959-1975 o 4 m w samym zbiorniku i o 1,5 m w odległości 300 m powyżej korpusu zapory (rys. 3.12). Poniżej zapory przeciwrumowiskowej

dominował proces erozji wgłębnej, co doprowadziło do pogłębienia koryta, rozcięcia pokrywy aluwialnej i odsłonięcia litego podłoża (rys. 3.11). W ciągu zaledwie sześciu lat dno koryta obniżyło się tuż poniżej korpusu zapory o 1,5 m, a w odległości 200 m w dół biegu rzeki o 0,5 m (rys. 3.12).

Studium przypadku. W latach 1911-1971 dno koryta powyżej zapory w Mszanie Górnej I podniosło się o ok. 4 m w samym zbiorniku i o ok. 1 m w odległości 500 m w górę biegu rzeki (rys. 3.13). Poniżej zapory dno koryta obniżyło się o 2 m tuż poniżej korpusu zapory i o ok. 1 m w odległości 200 m od niego. Jednocześnie zmieniły się profile poprzeczne koryta. Zapora została wybudowana w miejscu zwężenia doliny Mszanki (przekroje b oraz f). Powyżej zapory koryto pozostało wieloramienne, a nawet uległo poszerzeniu (przekroje a, d oraz e), zaś poniżej uległo znacznemu zwężeniu (przekroje c oraz g).

Powyżej przedstawiony został ogólny schemat zmian wywołanych przez jazy i zapory przeciwrumowiskowe. Uzupełniono go, przedstawioną dalej, szczegółową analizą procesów na odcinkach położonych powyżej i poniżej tych obiektów.

Zmiany morfologii koryt powyżej zapór przeciwrumowiskowych i jazów

Zmiany powyżej tych budowli obejmują ich zbiorniki i odcinki będące w obrębie cofki o przeciętnej długości kilkuset metrów. Na odcinkach tych następuje depozycja rumowiska. Miąższość zdeponowanego materiału wzrasta w kierunku korpusu zapory (rys. 3.12 i 3.13). Deponowanie materiału następuje najintensywniej w krótkim czasie po powstaniu budowli. Na początku okresu depozycji rzeka rozdziela się w obrębie zbiorników na wiele ramion. W miarę upływu czasu coraz więcej ramion przestaje funkcjonować i ulega osuszeniu i zarośnięciu (rys. 3.11). Najpierw na łachy wkraczają zespół trawiaste, a potem wiklina.

Wypełnianie czaszy osadami występuje tylko podczas trwania przepływów wysokich. Przy przepływach niskich i średnich ruch rumowiska wleczonego nie odbywa się, a materiał unoszony przenoszony jest przez wodę w niżej położone odcinki koryt [72]. Wody wezbraniowe nie mieszczą się w korycie, ulegają spiętrzeniu i powodują szybkie wypełnienie (załadowanie) zbiornika (fot. 3.5). Natomiast gdy zbiornik jest już załadowany, a naniesiony materiał utrwalony darnią lub wikliną, rwąca rzeka, występując z brzegów koryta, zrywa pokrywę roślinną i przemodelowuje powierzchnię zbiornika. Udrażniane są wtedy dawne ramiona koryt i zwiększa się powierzchnia aktywna zbiorników. W ten sposób wezbrania przyczyniają się do przedłużenia żywotności zbiorników.

Tempo załadowania zbiorników zapór przeciwrumowiskowych jest na ogół szybsze, niż zakłada się to w projektach. Spośród 20 zbiorników zapór przeciwrumowiskowych w dorzeczach Soły, Skawy i Raby, badanych w 1991 r., aż jedenaście było załadowanych w 100%, sześć w 80-95% i trzy w 60% [72].

J. Ratomski [72] podzielił zbiorniki zapór przeciwrumowiskowych na szerokie i wąskie. W zbiornikach o czaszach szerokich depozycja postępuje w kierunku ku

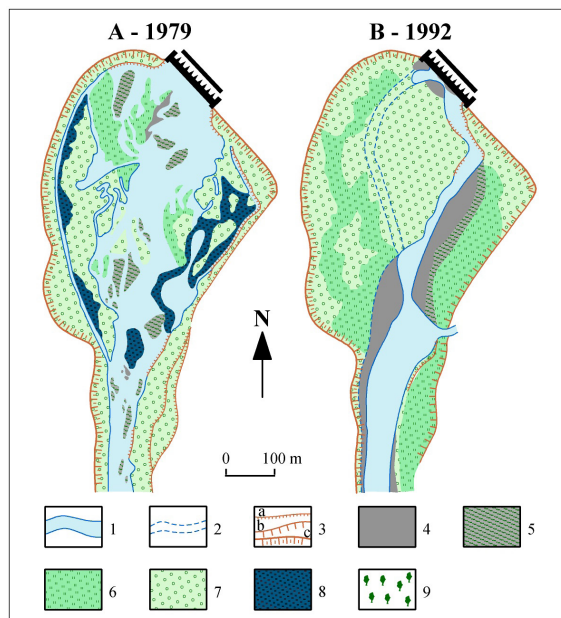


Fot. 3.5. Eksploatacja rumowiska ze zbiornika zapory przeciwrumowiskowej w Mszanie Górnej I, wypełnionego po wezbraniu w 1997 r. (fot. J. Korpak)

korpusowi zapory. Zbiorniki takie zatrzymują w początkowym okresie pracy grube rumowisko, które przemieszcza się korytem głównym aż do zapory. Jego depozycja stwarza dodatkowe opory ruchu i zmianę warunków przepływu, wskutek czego dalsze przemieszczanie się materiału dużej frakcji jest zahamowane. Materiał ten kumulowany jest w formie jezora w tylnej części czaszy. W głównej części zbiornika następuje osadzanie materiału unoszonego. Inny przebieg depozycji cechuje zbiorniki o czaszach wąskich. Przechwytyują one przede wszystkim grube rumowisko, które składa się z frakcji piaszczystej, żwirowej i kamienistej. Materiałem tym wypełniana jest równomiernie cała czasza. Z punktu widzenia funkcjonalności zapory przeciwrumowiskowej, która powinna z założenia zatrzymywać rumowisko wleczone, ale przepuszczać materiał unoszony, zbiorniki o czaszach wąskich są skuteczniejsze.

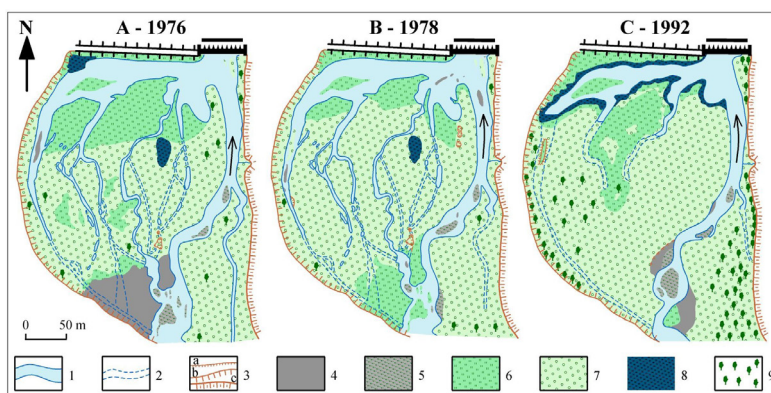
Poniżej przedstawiono szczegółowo przebieg zmian morfologicznych w obrębie wąskiej czaszy zbiornika zapory przeciwrumowiskowej w Porębie Wielkiej (rys. 3.14) oraz w obrębie szerokiej czaszy zapory przeciwrumowiskowej w Niedźwiedziu (rys. 3.15). Obie zapory zlokalizowane są na Porębiance – pierwsza w km 8,800, druga w km 5,409.

Studium przypadku. Powierzchnia zbiornika zapory przeciwrumowiskowej w Porębie Wielkiej wynosi ok. 12 000 m² (rys. 3.14). W 1979 r. rzeka płynęła, rozgałęziając się na kilka ramion. Prawie wszystkie łachy były utrwalone darnią lub zaroślami łęgowymi i tylko w małym stopniu poddawane przeobrażeniom. Znaczną powierzchnię zajmowała wiklina. Proces wypełniania zbiornika trwał nadal, a rumowisko depozytowane było równomiernie w całej objętości czaszy. W 1992 r. stale funkcjonowało już tylko jedno ramię koryta, przebiegające najkrótszą trasą. W korycie nie obserwowano łach środkowych, a jedynie rozległe, nieutrwalone łachy brzegowe. Zbiornik ten już prawie nie zatrzymywał materiału. Jednak na początku XXI w. kolejne powodzie doprowadziły do masowego transportu z czaszy zbiornika do niżej położonych



Rys. 3.14. Etapy załadowania wąskiego zbiornika zapory przeciurumowiskowej (z ok. 1960 r.) w Porębie Wielkiej (na podstawie zdjęć stolikowych¹ wykonanych przez studentów geografii w ramach ćwiczeń terenowych w 1979 r. oraz przez M. Komęderę [35] w ramach pracy magisterskiej w 1992 r.): 1) koryta prowadzące wodę, 2) koryta suche nieaktywne, 3a-c) skarpy brzegowe o wysokościach: a – 0-2 m, b – 2-5 m, c – >5 m, 4) ląki nieutrwalone roślinnością, 5) ląki utrwalone roślinnością, 6) rumowisko utrwalone darnią, 7) rumowisko utrwalone wikliną, 8) obszary podmokłe, 9) tereny zadrzewione

¹ Zdjęcie stolikowe to zdjęcie kartograficzne lub zdjęcie topograficzne przedstawiające obraz powierzchni Ziemi, powstały wskutek pomiarów i wykreślenia go w odpowiedniej skali na podstawie klasycznych badań terenowych (w przeciwieństwie do zdjęcia fotogrametrycznego uzyskiwanego na podstawie zdjęć lotniczych).



Rys. 3.15. Etapy załadowania szerokiego zbiornika zapory przeciurumowiskowej (wybudowanej w 1960 r.) w Niedźwiedziu (na podstawie zdjęć stolikowych wykonanych przez studentów geografii w ramach ćwiczeń terenowych w latach 1976 i 1978 oraz przez M. Komęderę [35] w ramach pracy magisterskiej w 1992 r.). Objasnienia jak na rysunku 3.14

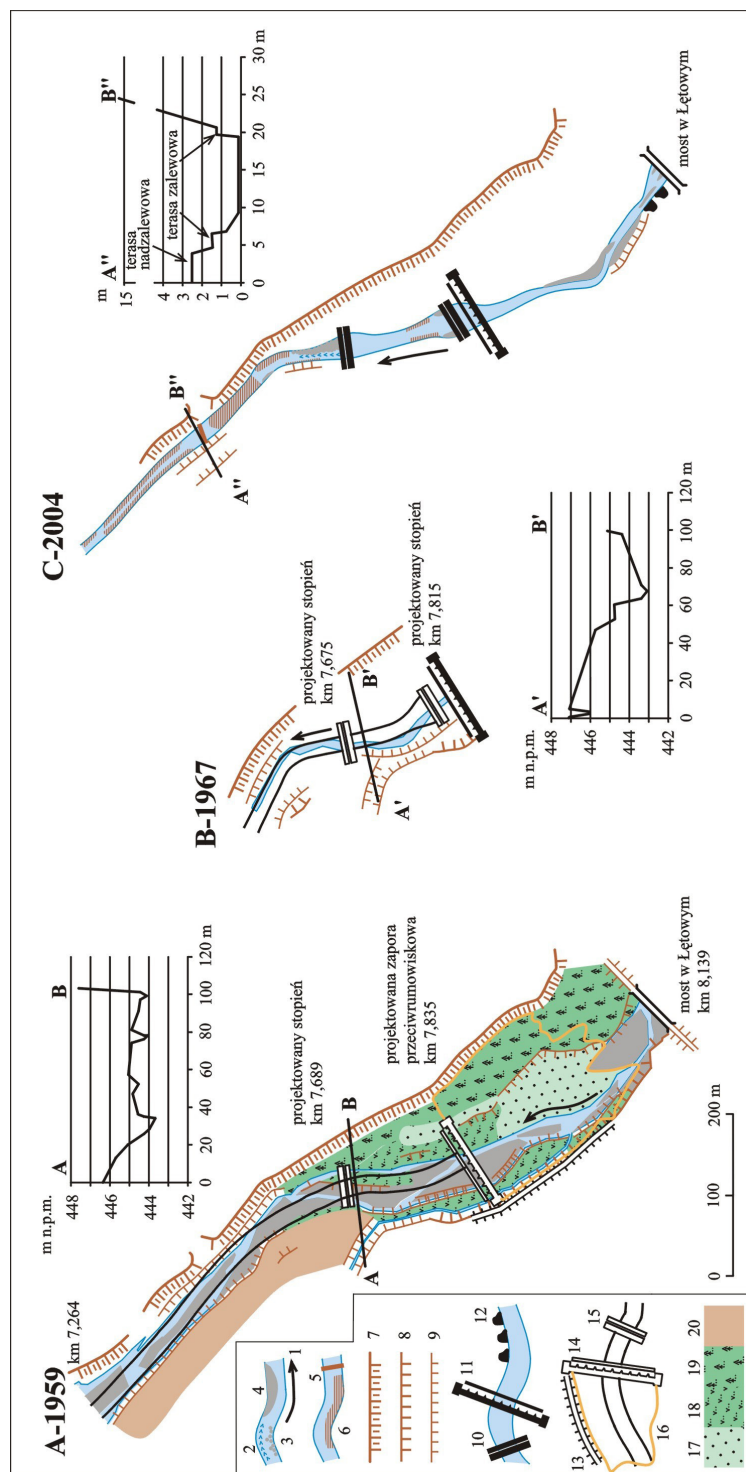
odcinków koryta. W ten sposób wezbrania przyczyniły się do przedłużenia okresu funkcjonalności zapory.

Studium przypadku. W 1960 r. żywotność zbiornika zapory przeciwrumowiskowej w Niedźwiedziu o pojemności 173,2 m³ i powierzchni 65 000 m² oszacowano na 55 lat (rys. 3.15). Podczas przepływów maksymalnych w zasięgu piętrzenia wody znajdował się odcinek koryta Porębianki o długości 500 m powyżej zapory i ujściowy fragment koryta Koniny (głównego dopływu Porębianki). Proces wypełniania zbiornika okazał się szybszy. W 1976 r. zbiornik był załadowany w 68%, w 1978 r. – w 76%, a w 1992 r. – w 81%. W 2006 r. zbiornik ten już prawie nie przyjmował rumowiska. Obliczone w projekcie szacunkowe tempo sedymentacji (3150 m³/rok) okazało się aż ponad dwukrotnie większe – wyniosło 7361 m³/rok. Na zdeponowane rumowisko najpierw wkraczała darnń, a następnie wiklina. Stopniowo wypełniane były części koryta coraz bliższe zapory. W tym kierunku postępowało też osuszanie już wypełnionych i utrwalonych terenów. W pierwszej kolejności rzeka wytrącała rumowisko u wąskiej nasady zbiornika, gdyż traciła tu energię, rozdzielając się na kilka ramion. W miarę osuszania i zarastania tych ramion materiał deponowany był w korycie głównym coraz bliżej korony zapory. Obecnie, po wypełnieniu zbiornika, zapora pracuje jako stopień regulacyjny. Powyżej zapory spadek dna jest dużo mniejszy niż początkowy, co ogranicza transport rumowiska.

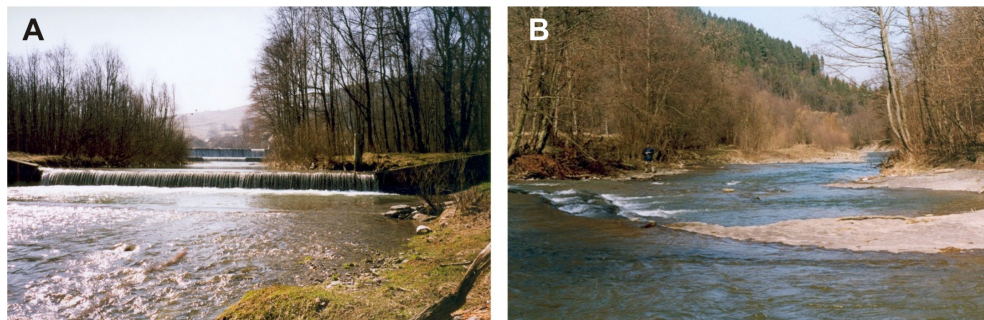
Zmiany morfologii koryt poniżej zapór przeciwrumowiskowych i jazów

Poniżej zapór przeciwrumowiskowych i jazów zmiany morfologiczne wywoływane przez te obiekty występują na odcinkach koryt o długości kilkuset metrów, a nawet dłuższych (np. w przypadku jazu w Poroninie długość przeobrażonego odcinka wynosi 1,5 km). Najważniejszym procesem kształtującym koryta jest tu erozja wgłębna. Następuje zmiana koryt w planie, niejednokrotnie z wielonurtowych w jednonurtowe proste lub kręte. Najbardziej intensywne pogłębienie występuje w krótkim czasie po wybudowaniu obiektu. Największe wartości osiąga erozja tuż poniżej budowli (rys. 3.12 i 3.13). Po okresie intensywnego pogłębienia tempo tego procesu wyraźnie się zmniejsza, zwłaszcza wtedy, gdy rzeka docina się do litej skały. Docięcie do litej skały nie oznacza jednak zahamowania pogłębienia, a tylko jego spowolnienie. Świadczą o tym liczne progi skalne, występujące w dnie koryta Białego Dunajca.

Zbiegiem rzeki następuje zjawisko przemieszczania się czoła strefy erozyjnej [1, 52], zatem w miarę upływu lat erodowany jest coraz dłuższy odcinek koryta, a intensywność tego procesu jest zróżnicowana. R. Malarz [52] uważa, że wzrasta ona po każdym wezbraniu. Badania tempa procesu pogłębienia poniżej dużej zapory we Włocławku wykazały, że niekoniecznie odznacza się ono stałą tendencją do wygasania [1]. W okresie początkowym rzeczywiście tempo to przeważnie się zmniejsza się [61, 100], potem jednak może na nowo wzrosnąć, co tłumaczy się zachwianiem równowagi pomiędzy reżimem hydrologicznym rzeki a zmieniającą się morfologią koryta [1]. Ponieważ poniżej zapór zachodzi przeważnie zwięzanie koryta, następuje



Rys. 3.16. Zmiany wykształcenia koryta Mszanki na odcinku z zaporą przeciwrumowiskową w Mszanie Górnej II (z 1961 r.): A-B) na podstawie projektów regulacyjnych [109, 113], C) na podstawie kartowania terenowego: 1) kierunek biegu rzeki, 2) przemieć, 3) płoś, 4) łacha, 5) próg skalny, 6) wychodnie, 7) skarpa wysokiego brzegu, 8) podcięcie erozyjne o wysokości 2-5 m, 9) podcięcie erozyjne o wysokości 0-2 m, 10-12) wykonane budowle regulacyjne: 10 – stopień betonowy, 11 – zapora przeciwrumowiskowa, 12 – narzut kamienny, 13-15) projektowane budowle regulacyjne: 13 – grobla ziemna, 14 – zapora przeciwrumowiskowa, 15 – stopień betonowy, 16) zasięg zbiornika zapory, 17) zarosnięte łachy, 18) olszyny, zarośla, 19) las, 20) grunty orne



Fot. 3.6. Zapora przeciwrumowiskowa w Mszanie Górnej II z 1961 r. (w oddali) wraz z dwoma stopniami betonowymi zmniejszającymi spadek koryta (A). Erozja wgłębna poniżej zapory doprowadziła do odsłonięcia skalnego podłoża, powstania wąskiej półki skalnej wzdłuż biegu rzeki (będącej inicjalną formą terasy zalewowej) oraz przekształcenia dawnej terasy zalewowej w terasę nadzalewową (B) (fot. J. Korpak)

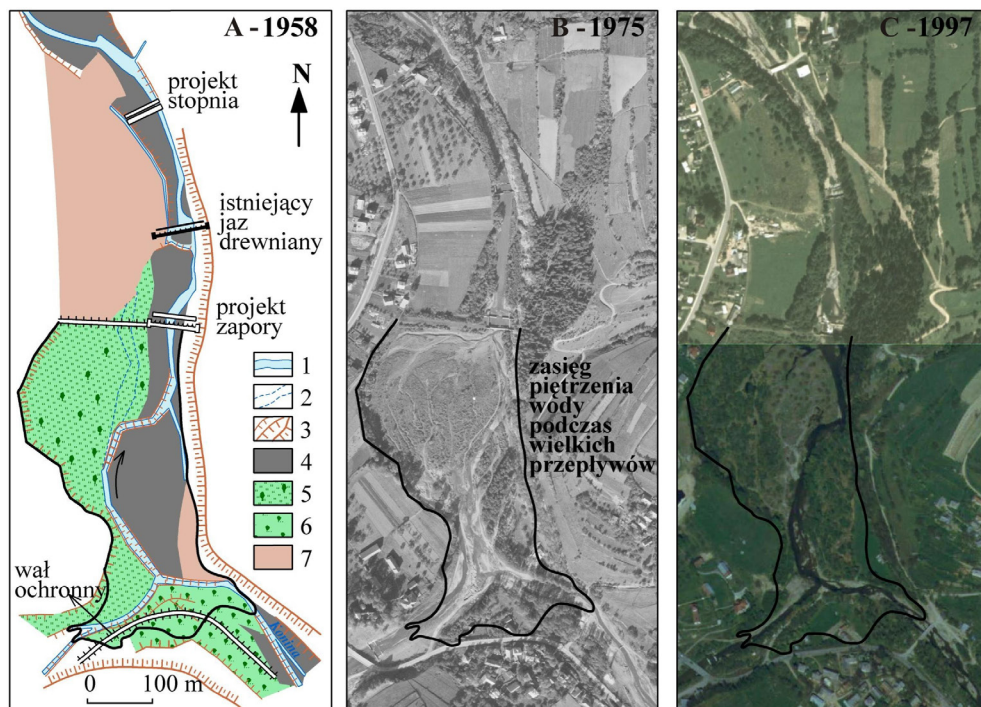
koncentracja wód płynących, które mają większą siłę erozyjną i mogą zintensyfikować wcinanie się rzeki. Taki przebieg procesu zaobserwowano w rzekach nizinnych o miększej warstwie aluwium. W warunkach koryt górskich pogłębianie prowadzi w stosunkowo krótkim czasie do odsłonięcia podłoża skalnego, co niewątpliwie ogranicza intensywność procesu.

Wraz z pogłębianiem zachodzi zwężanie koryta. Jest ono najszybsze w początkowym okresie istnienia budowli. Znaczne powierzchnie koryt dawniej aktywnych zarastane są roślinnością i przekształcane w terasy zalewowe. Gdy rzeka wciną się w litą skałę, koryto wciąż się zwęża, a wzdłuż jego biegu tworzą się wąskie skalne półki, będące również inicjalną formą terasy zalewowej. Dawna terasa zalewowa przekształca się w terasę nadzalewową.

Poniżej, dla przykładu, przedstawiono przebieg opisanych procesów i zmian w morfologii koryta Mszanki poniżej zapory przeciwrumowiskowej w Mszanie Górnej II (rys. 3.16, fot. 3.6).

Studium przypadku. Zadaniem zapory przeciwrumowiskowej w Mszanie Górnej II w km 7,835 było zatrzymanie rumowiska, bowiem w niżej położonym odcinku koryta zachodziła intensywne depozycja, wskutek czego zwiększało się ryzyko powodziowe na przyległych zagospodarowanych terenach. W 1959 r. szerokość koryta aktywnego wynosiła tu 30-50 m (rys. 3.16A). Koryto było wieloramienne, z licznymi łachami, a brzegi porośnięte przez darń lub olszynę, a także wykorzystywane pod uprawę. Na etapie projektu zapory zaplanowano wybudowanie poniżej niej stopnia betonowego, który miał zapobiec nadmiernej erozji wgłębnej (rys. 3.16A). Stopnia tego nie wykonano. W efekcie, już w ciągu sześciu lat od wybudowania zapory spadek dna na odcinku poniżej niej zamiast się zmniejszyć (jak planowano), wzrósł z 10,5‰ do 11,8‰. Tak duży spadek był powodem intensywnej erozji wgłębnej. Do 1967 r. dno koryta bezpośrednio poniżej zapory obniżyło się o 1,5 m, a w odległości ok. 200 m od budowli o ok. 0,5 m (rys. 3.12). Poniżej km 7,590 dno zostało rozcięte

do litej skały. Szerokość pogłębionego koryta Mszanki zmniejszyła się z 34 m do 9 m (o 73,5%) (rys. 3.16B). Przebieg koryta w planie przekształcił się z wielonurtowego w jedenonurtowy. Sama zapora ulegała niszczeniu, odsłonięty został gurt końcowy. Oprócz parametrów geometrycznych koryta zamienił się rodzaj dominującego procesu fluwialnego z akumulacyjnego na erozyjny. Chcąc zapobiec dalszej erozji, zaprojektowano wybudowanie dwóch stopni: jednego, o wysokości 1,8 m, bezpośrednio poniżej progu końcowego zapory, oraz drugiego, o wysokości 1,2 m, w odległości 140 m w dół rzeki (rys. 3.16B). Stopnie miały zmniejszyć spadek dna do 6,0‰. Zaplanowano również nieznaczną zmianę przebiegu koryta. Projekt ten wykonano (fot. 3.6A), co nie zatrzymało jednak procesu erozji wgłębnej – rzeka docięła się do litej skały i nadal pogłębia swoje koryto (rys. 3.16C). Poniżej stopnia betonowego w km 7,675 zarówno dno, jak i brzegi koryta są skalne (fot. 3.6B). W dnie występują podłogi skalne oraz próg o wysokości ok. 1 m (rys. 3.16C). Lokalnie wykształcone są na tym odcinku dwa poziomy wąskich teras, które wyznaczają dwa etapy wcinania, co jest widoczne na przekroju poprzecznym (rys. 3.16C). Niższy poziom występuje w postaci wąskich pól skalnych o szerokości kilku metrów i jest współczesnym



Rys. 3.17. Zmiany koryta Porębianki w Niedzwiedziu i terenów przyległych po wybudowaniu zapory przeciwrumowiskowej w 1960 r. (na podstawie projektu regulacji [108]):

- 1) koryto prowadzące wodę, 2) koryto nieaktywne, 3) krawędzie brzegów, 4) łachy nieutrwalone,
- 5) darni z pojedynczymi drzewami, 6) sad, 7) pole orne

poziomem zalewowym. Wyższy poziom jest już poza zasięgiem wielkiej wody i stanowi obecnie terasę nadzalewową (fot. 3.6B).

Jak wiadomo, z procesem pogłębiania koryta wiąże się zmiana uziarnienia rumowiska. Następuje selektywne wymywanie drobnych frakcji z aluwiołów. Na dnie zostają duże otoczaki, które są bardziej odporne na erozję. Tworzy się warstwa obrukowania, która powoduje zwiększenie odporności dna i opóźnienie masowego transportu rumowiska. Opancerzenie jest zrywane przy dużych prędkościach przepływu i wtedy do ruchu włączona zostaje gruba warstwa osadów. Następują kolejne fazy pogłębiania.

Pogłębianiu i zwięzaniu koryt poniżej zapór sprzyja nie tylko brak dostawy rumowiska z górnego biegu rzeki (zatrzymywanego w zbiornikach zapór), ale również z przylegających do koryta terenów. Na tereny te wkracza roślinność, co ogranicza dostawę materiału ze stoków. W wielu przypadkach w celu zapobiegnięcia nadmiernej erozji dno i brzegi koryta poniżej zapory są umacniane, a spadek podłużny zmniejszany (przeważnie za pomocą korekcji stopniowej). Takie zabiegi również uniemożliwiają dostawę materiału do koryta.

Ilustracją powyższego jest przypadek odcinka Porębianki z zaporą przeciwrumowiskową w km 5,409 rzeki w Niedźwiedziu (rys. 3.17).

Studium przypadku. Poniżej zapory rzeka docięła się do litej skały, a w dnie koryta występują niewielkie progi skalne. Brzegi wklęsłe są umocnione, co zapobiega dostawie rumowiska z podcięć. Pola uprawne, które znajdowały się w 1958 r. na lewym brzegu koryta, już w 1975 r. były częściowo zamienione na sady (rys. 3.17A i B). Współcześnie pola leżą odłogiem, sady są w zaniku, a cały obszar zajmują zadarnione nieużytki (rys. 3.17C). Te przeobrażenia w strukturze użytkowania zmieniły stosunki wodne na stoku i ograniczyły dostawę rumowiska do koryta.

Na skutek degradacji koryta stopniowemu niszczeniu ulegają same jazy i zapory przeciwrumowiskowe, a zwłaszcza umocnienia ich wypadów, niecki wypadowe i gurty końcowe (fot. 3.7). Stanowi to dowód na występowanie erozji wstecznej.

Problem ten pokazano na przykładzie jazu w Poroninie, wybudowanego na Białym Dunajcu w km 16,900 w 1929 r.



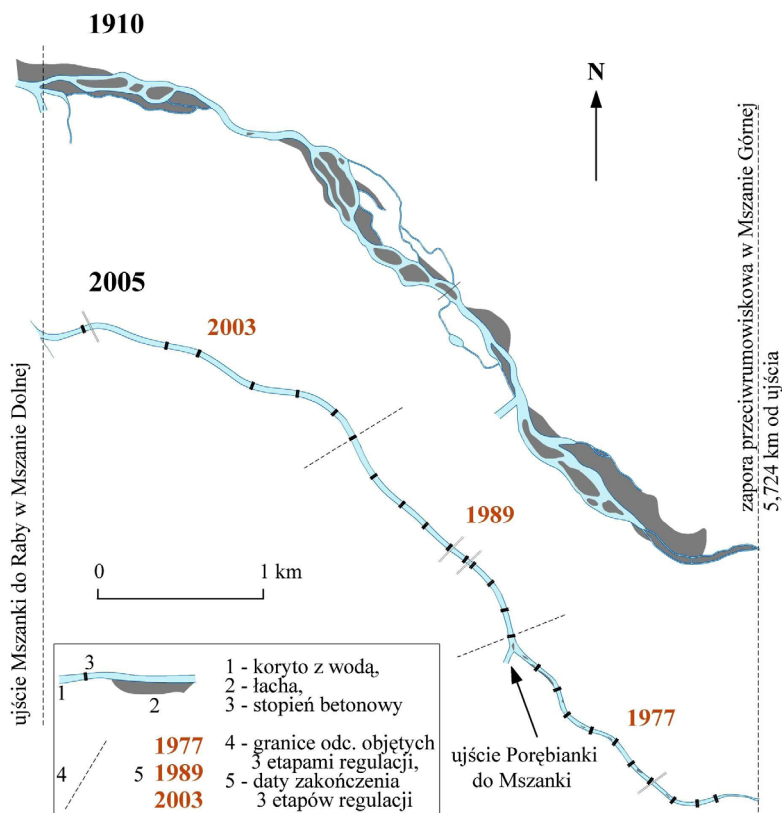
Fot. 3.7. Zniszczony korpus jazu w Poroninie (A) i jego mur boczny (B), zawieszony ok. 1,0-1,5 m nad dnem koryta (fot. J. Korpak)

Studium przypadku. Jaz w Poroninie wybudowany został w 1929 r. Wraz z nim powstało ujęcie wody dla fabryki tektury w Białym Dunajcu (nieistniejącej od wielu lat). W czasie powodzi w 1948 r. jaz został zniszczony, a następnie odbudowany w 1950 r. jako jaz stały, łukowy, kamiennie-betonowy, o spadzie 2,75 m (fot. 3.7A). Na lewym brzegu, w części przelewowej stałej, umiejscowiono przepławkę dla ryb typu komorowego. Dalej, na lewym brzegu, zlokalizowano spust płuczący. W lewym przyczółku wykonano ujęcie do kanału odprowadzającego wodę do fabryki tektury. Jaz w Poroninie od momentu powstania ulegał szybkiemu niszczeniu. Duży remont został przeprowadzony w 1966 r., kiedy to zabezpieczono spust płuczący i poniżej progu końcowego wypadu wybudowano stopień betonowy o długości 6,9 m. Poniżej stopnia wykonano wypad betonowy o długości 17 m, o bocznych ograniczeniach w postaci muru oporowego (fot. 3.7B), zakończony progiem. Lewy brzeg poniżej jazu umocniono murem oporowym, którego stopę fundamentową ubezpieczono kosztami siatkowo-kamiennymi. Wzdłuż odcinka od muru oporowego do spustu płuczącego skarpe koryta ubezpieczono kosztami siatkowo-kamiennymi i brukiem. Po upływie zaledwie ośmiu lat od remontu budowla znowu wymagała renowacji. Po przejściu kilku wzbrań dno koryta poniżej upustu jazu pogłębiło się w ciągu ośmiu lat o 1,14 m, a brzegi zostały oberwane. Zniszczony został wypad jazu i zachwiana została stabilność dodatkowych budowli i zabezpieczeń, wykonanych w 1966 r. W dniu pojawiły się wyrwy o głębokości dochodzącej do 1,5 m. W odległości ok. 80 m poniżej jazu różnica wysokości dna koryta przy brzegach prawym i lewym wynosiła ok. 4 m. Między 1974 r. a 1981 r. dno koryta poniżej spustu jazu pogłębiło się o dalsze 0,78 m. Widoczne były ubytki betonu w przelewie jazu stałego i w murze bocznym spustu. Próg końcowy wypadu jazu był bardzo uszkodzony i osuwał się do wyrwy o średniej głębokości 2 m. Jaz nie przeszedł jednak więcej remontów i obecnie grozi zawaleniem.

3.3.3. ZMIANY MORFOLOGII KORYT NA ODCINKACH Z KOREKCJĄ STOPNIOWĄ

Korekcja stopniowa jest najczęściej stosowanym systemem regulacji w korytach karpackich [94]. Wykonuje się ją na odcinkach modelowanych przez szczególnie intensywną erozję wgłębną, a więc np. poniżej zapór przeciwrumowiskowych lub wzdłuż odcinków uregulowanych za pomocą budowli podłużnych. Zadaniem niektórych korekcji stopniowych jest też stabilizacja koryta w sąsiedztwie mostów czy terenów zamieszkałych.

Morfologiczne efekty regulacji za pomocą korekcji stopniowej są podobne do tych z zastosowaniem budowli podłużnych. Koryto również jest wyprostowywane, skracane i zwężane. Odcinane są ramiona boczne koryt, co powoduje przekształcenie układu roztokowego w jednoramienny. Brzegi są umacniane na całej długości lub tylko na łukach wklęsłych. Aby zapobiec pogłębianiu koryta, które jest w takich warunkach wyjątkowo intensywne, stosowane są stopnie.

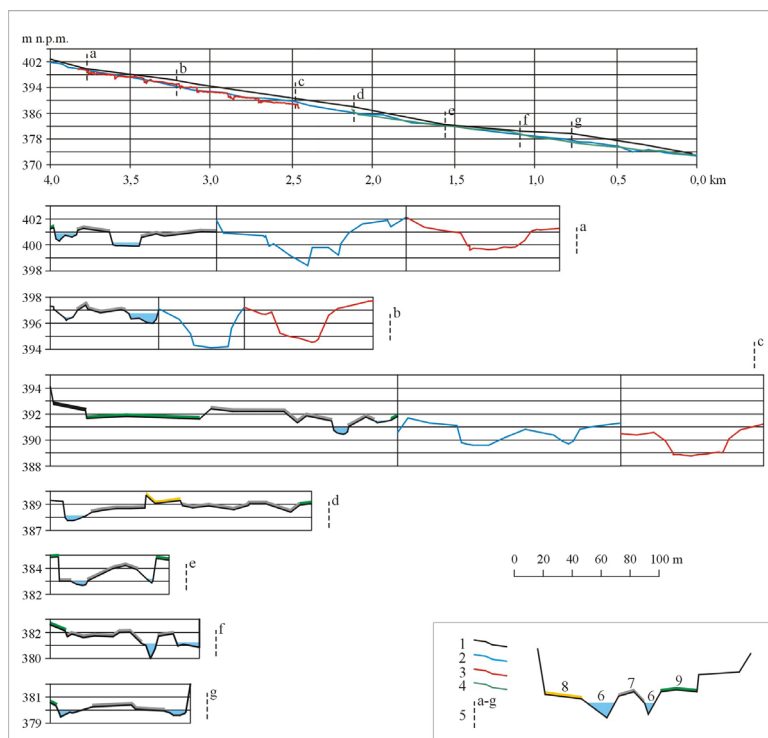


Rys. 3.18. Zmiana przebiegu koryta Mszanki w Mszanie Górnej i Dolnej w latach 1910-2005 (na podstawie topograficznej mapy austriackiej z 1910 r., ortofotomapy z 1997 r. i projektów technicznych [119, 125])

Korekcja stopniowa zmienia profil podłużny koryta z prostoliniowego w schodkowy oraz przekroje poprzeczne z nieregularnych (nieraz złożonych) w trapezowe zwarte (rys. 3.19).

Opisane powyżej zmiany ilustruje przykład Mszanki w jej ujściowym biegu (rys. 3.18 i 3.19).

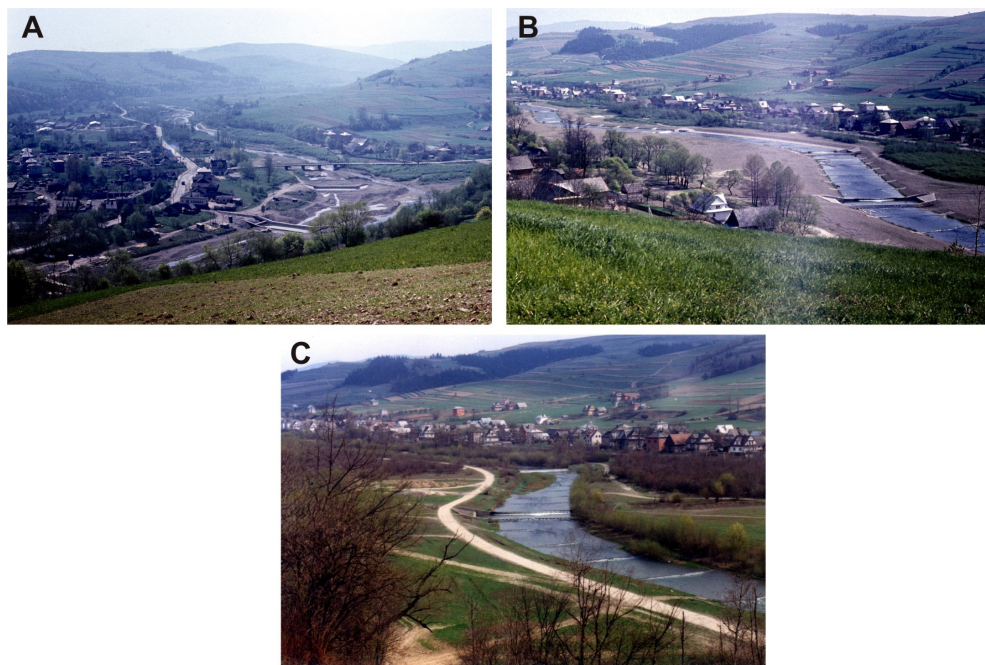
Studium przypadku. Na mapie austriackiej z 1910 r. koryto Mszanki widoczne jest jako roztokowe, aluwialne, z wielkimi łachami środkowymi i brzegowymi o maksymalnej długości 1 km (rys. 3.18). Szerokość koryta aktywnego wynosiła na ogół ponad 100 m, a miejscami przekraczała 300 m. W 2005 r. koryto było jednonurtowe, kręte, a jego szerokość nie przekraczała 35 m. Charakteryzował je prawie całkowity brak form fluwialnych. Brzegi były regularne, wyprofilowane i umocnione. Powierzchnia koryta aktywnego zmalała pięciokrotnie (z ok. 822 tys. m² do 163 tys. m²). Nieporównywalnie bardziej, bo aż 119 razy, zmniejszyła się powierzchnia samych



Rys. 3.19. Zmiany profilu podłużnego i przekrojów poprzecznych koryta uregulowanego za pomocą korekcji stopniowej w dolnym biegu Mszanki: 1-4) profile podłużne i przekroje poprzeczne koryta w: 1 – 1910 r. (na podstawie projektu [107]), 2 – 1977 r. (na podstawie projektu [119]), 3 – 1987 r. (na podstawie projektu [123]), 4 – 2000 r. (na podstawie projektu [124]), 5) lokalizacja kolejnych przekrojów poprzecznych, 6) koryto prowadzące wodę, 7) łącza, 8) pastwisko, 9) zarośla



Rys. 3.20. Koryto Mszanki w Mszanie Górnej w trakcie powstawania korekcji stopniowej w 1975 r. i zmiany koryta po 22 latach



Fot. 3.8. Korekcja stopniowa w Mszanie Górnej: A) realizacja prac regulacyjnych, B) koryto „świeżo” uregulowane, C) koryto „zabliźnione” w 1993 r. (A i B – fot. K. Krzemień, C – fot. M. Komędera)

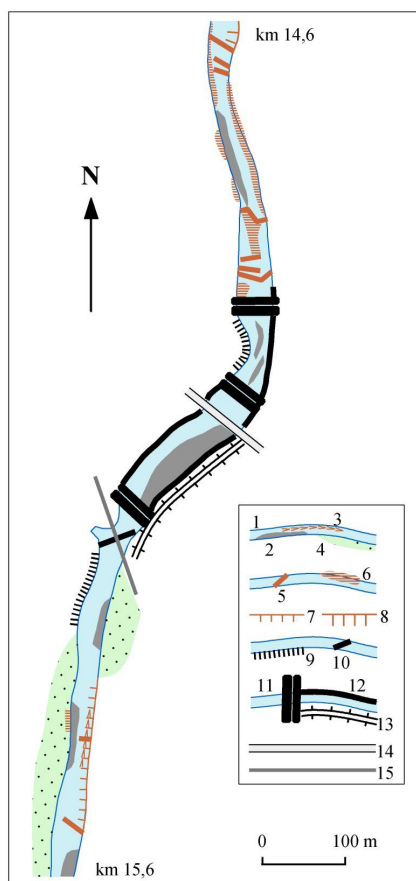
łach. Profil podłużny dna był schodkowy – wzdłuż całego odcinka występowało aż 26 stopni i kilkadziesiąt progów betonowych, rozmieszczonych w różnych odstępach, ogólnie rosnących z biegiem rzeki (rys. 3.18 i 3.19). Przekroje poprzeczne były kształtu trapezowego.

W korycie z korekcją stopniową erozja boczna i wglębna są ograniczone ze względu na obudowanie brzegów i redukcję spadku. Następuje stabilizacja układu koryta w planie, co ilustruje także przykład Mszanki (rys. 3.20, fot. 3.8).

Studium przypadku. Zdjęcie lotnicze z 1975 r. (rys. 3.20) oraz fotografia (fot. 3.8A) obrazują koryto Mszanki w trakcie przeprowadzania korekcji stopniowej. Widać, że dno koryta zrównano, niszcząc jego wykształcenie i strukturę. Trasie koryta nadano sztuczny przebieg i zwarty przekrój poprzeczny. Kolejno w kierunku ujścia budowano stopnie i progi. Zaraz po wykonaniu korekcji stopniowej w korycie nie występowały żadne formy fluwialne, a wyprofilowane brzegi były nieutrwalone roślinnością (fot. 3.8B). Po ok. 20 latach od powstania stopni odcinek był już „zabliźniony” (rys. 3.20, fot. 3.8C). Koryto było stabilne w planie, a brzegi zostały zagospodarowane i utrwalone darnią lub wikliną. Fragmenty dawnego koryta aktywnego, które wskutek regulacji i zwężenia koryta zostały „odcięte”, przekształciły się w terasę zalewową, a miejscami nawet nadzalewową (rys. 3.20).

Na odcinku poniżej regulacji obserwuje się pogłębienie koryta. Wcinanie się rzeki poniżej korekcji stopniowej jest po części efektem samego sposobu wykonywania robót regulacyjnych. Podczas budowy dno koryta zrównuje się spychaczami, niszcząc warstwę obrukowania, będącą jego naturalną ochroną przed rozmywaniem (rys. 3.20, fot. 3.8). Sama regulacja również powoduje pogłębienie koryta poniżej. Ponieważ stopnie zatrzymują rumowisko transportowane z górnych odcinków koryta, poniżej korekcji stopniowej występuje niedobór rumowiska. Niedociążone rzeki, które też nie otrzymują materiału z dna i brzegów odcinka ze stopniami, skierowują swoją energię na obniżanie dna koryta.

Procesy te ilustruje przykład Białego Dunajca w miejscowości Biały Dunajec (rys. 3.21, fot. 3.9).



Rys. 3.21. Wykształcenie koryta Białego Dunajca na odcinku z korekcją stopniową w Białym Dunajcu (na podstawie kartowania terenowego w 2005 r.): 1) koryto prowadzące wodę, 2) łącha, 3) przemiał, 4) dawna łącha przekształcona w terasę zalewową, 5) próg skalny, 6) wychodnie skalne, 7-8) podcięcia erozyjne o wysokościach: 7 – 0-2 m, 8 – 2-5 m, 9) opaska, 10) syfon betonowy, 11) stopień betonowy, 12) mur oporowy, 13) bulwar, 14) most drogowy, 15) most kolejowy



Fot. 3.9. Progi i wychodnie skalne w korycie tuż poniżej ostatniego stopnia betonowego w Białym Dunajcu (fot. J. Korpak)

Studium przypadku. Korekcja stopniowa w Białym Dunajcu została zrealizowana ok. 1960 r. w celu ustabilizowania koryta i ochrony przed erozją mostów: drogowego i kolejowego. Poniżej ostatniego stopnia koryto uległo znacznemu pogłębieniu. W pierwotnie aluwialnym korycie (miąższość aluwów przed regulacją wynosiła tu ok. 2 m) odsłonięte zostało skalne podłoże. W 2005 r. w dnie obecnych było wiele progów skalnych, z których część powstała w ciągu kilku lat na przełomie XX i XXI w. (rys. 3.21, fot. 3.9). Podłogi i progi skalne o wysokości 0,5-1,0 m występowały też w dnie koryta w odległości kilkuset metrów poniżej stopni (rys. 3.21). W profilu brzegów odsłaniały się w dolnej części skały fliszowe, a w górnej aluwia żwirowe. Brzegi były lokalnie podcinane. Na odcinku pomiędzy stopniami występowały duże łachy (rys. 3.21). Konstrukcje stopni i murów oporowych były lokalnie uszkodzone, a przelewy stopni zdarze i obniżone na skutek tarcia rumowiskiem. Uszkodzone były również filary mostów.

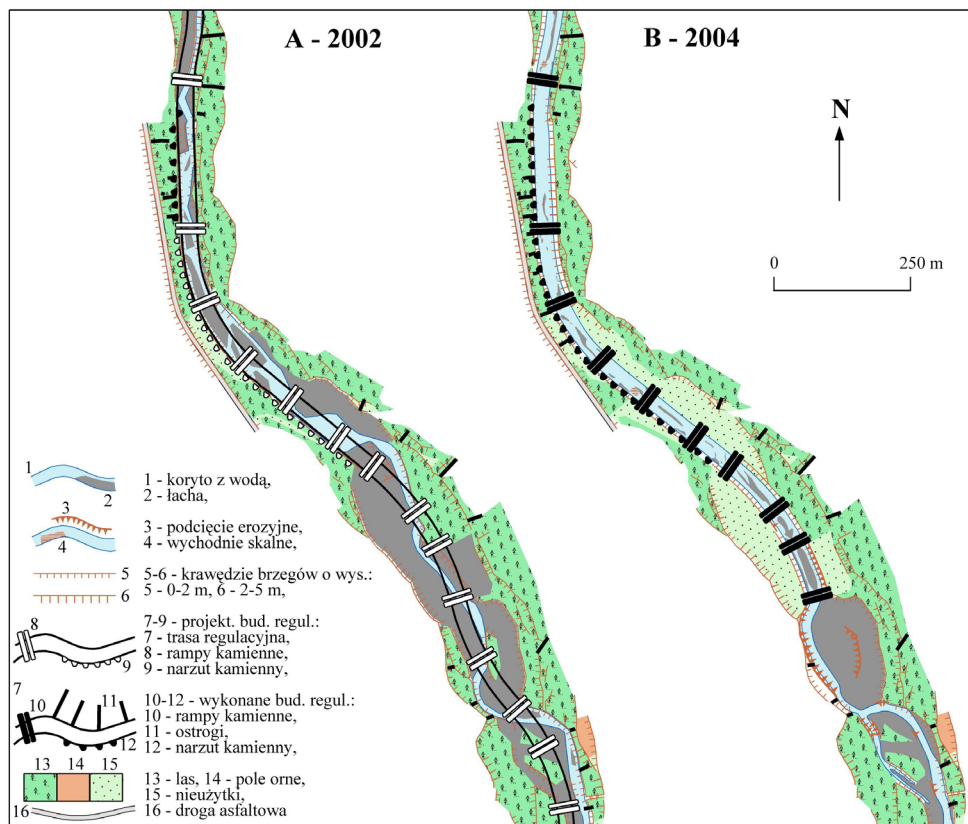


Fot. 3.10. Koryto Mszanki w Mszanie Dolnej, uregulowane w 2003 r. korekcją stopniową (A), i koryto Porębianki w Podobinie, uregulowane w 2004 r. za pomocą ramp kamiennych (B) (fot. J. Korpak)

W pierwszym okresie funkcjonowania korekcji stopniowej głównym procesem w jej obrębie jest zatem depozycja rumowiska za stopniami, która przyczynia się do jego niedoboru w niższych odcinkach koryt. Rozmiar i tempo tej depozycji zależą od dostępności rumowiska dostarczanego z odcinków położonych wyżej oraz z brzegów koryta.

Zagadnienie to zilustrowano poniżej na przykładzie Mszanki w Mszanie Dolnej i Porębianki w Podobinie (fot. 3.10, rys. 3.22).

Studium przypadku. Dostawa rumowiska do odcinka Mszanki ze stopniami betonowymi w Mszanie Dolnej jest minimalna, gdyż powyżej tego odcinka koryto jest uregulowane (za pomocą starszej korekcji stopniowej i zapory). Odcinek Porębianki w Podobinie otrzymuje natomiast dużo rumowiska, gdyż bezpośrednio powyżej niego koryto jest naturalne, szerokie i zdziczałe (rys. 3.22). W związku z tym po roku funkcjonowania stopni w Mszanie Dolnej nie stwierdzono obecności żadnych form akumulacyjnych (fot. 3.10A), natomiast korekcja w Podobinie była całkiem „zasypała” rumowiskiem (fot. 3.10B).

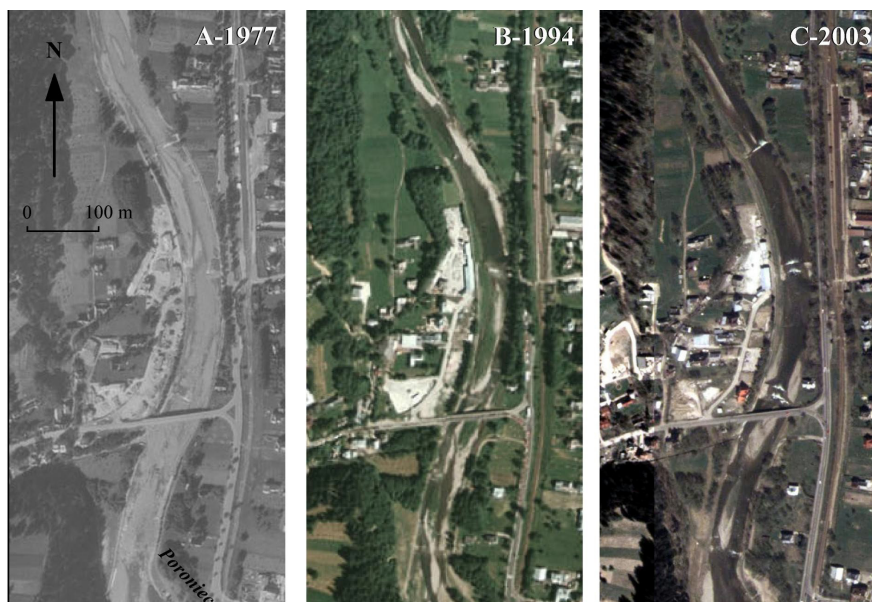


Rys. 3.22. Koryto Porębianki w Podobinie, uregulowane w 2004 r. za pomocą korekcji stopniowej z użyciem ramp kamiennych (na podstawie projektu regulacji [126] oraz kartowania terenowego w 2004 r.)

Studium przypadku. Koryto Porębianki w Podobinie uregulowane zostało ok. 1962 r. za pomocą budowli podłużnych – ostróg (rys. 3.8A). Po zniszczeniu ostróg koryto znacznie zwiększyło swoją szerokość i w 2002 r. średnia jego szerokość wynosiła 63 m. Po wezbraniach w latach 1997, 1998 i 2001 koryto postanowiono ponownie uregulować w celu stabilizacji dna i brzegów potoku dla ochrony przyległych gruntów, drogi asfaltowej Mszana Dolna–Niedźwiedz i budynków. Zdecydowano wytworzyć trasę regulacyjną o szerokości 28 m i zredukować spadek z 13‰ do 5,5‰ za pomocą 25 stopni-ramp kamiennych o wysokości 0,99 m (rys. 3.22A). Całość zabudowy zaprojektowano tak, aby w minimalnym stopniu ingerowała w otaczający krajobraz. Prace realizowano w latach 2003-2004. Trasę nowego koryta przekopano spychaczem. Najmniej zmieniono przebieg koryta w dolnej części, która była najlepiej zachowana i najwęższa, natomiast w górnej części nowy przebieg koryta zupełnie nie pokrywa się ze starym (rys. 3.22A). Mało nachylone brzegi o wysokości 1-2 m pozostawiono nieubezpieczone, a jedynie wklęsły lewy brzeg, przebiegający w niedużej odległości od drogi, umocniono narzutem kamiennym (rys. 3.22A i B). Rampy budowano od dołu w górę rzeki. Z jakichś powodów (przypuszczalnie finansowych) przedsięwzięcie przerwano i nie wybudowano ostatnich siedmiu ramp. Powyżej ostatniej rampy koryto jest nadal dzikie (rys. 3.22B). Ponieważ na odcinku nieuregulowanym spadek nie został zmniejszony, rzeka intensywnie erodowała dno i brzegi koryta (stan na 2006 r.), co było przyczyną dużej dostawy rumowiska do odcinka z rampami. Rumowisko deponowane było pomiędzy rampami, gdyż tu następuje znaczne zmniejszenie spadku. Zarówno na przelewach ramp, jak również między nimi usypanych było dużo łach o długości od 4 m do 90 m (rys. 3.22B, fot. 3.10B). W ten sposób, na skutek niedokończenia prac regulacyjnych, koryto zostało podzielone na dwa fragmenty o odmiennym wykształceniu i funkcjonowaniu: na odcinku, na którym nie wykonano ramp, dominujący był proces erozyjno-redepozycyjny, natomiast na odcinku z rampami – redepozycja.

Wypełnianie rumowiskiem przestrzeni za stopniami przyczynia się do wyrównywania schodkowego profilu podłużnego. Gdy profil jest już wyrównany, stopnie przestają spełniać swoją funkcję, a koryto zaczyna pełnić rolę „rynny” transportującej materiał. Funkcję redepozycyjną koryta zaczyna zastępować funkcja transportacyjna.

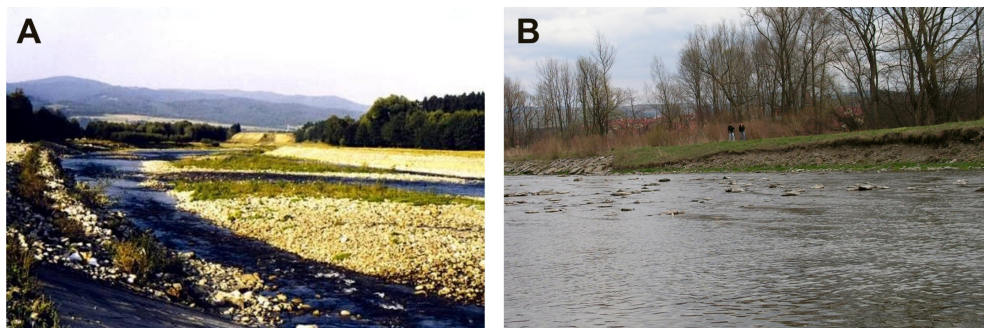
Regulacja za pomocą korekcji stopniowej jest „niedopasowana” do zróżnicowanych stanów i przepływów rzek w ciągu roku [41]. W czasie trwania niskich stanów koryto jest za szerokie. Tworzą się wtedy wąskie łachy brzegowe, które zwężają przekrój koryta. Niekiedy na łachy wkracza roślinność, która je stabilizuje. Podczas wezbrań w wyprostowanym korycie następuje przyspieszony odpływ wód, co powoduje przemodelowanie struktur dna, rozmycie starych łach i depozycję nowych. Koryto jest zwykle zasypywane rumowiskiem i staje się za wąskie. Rzeka dąży wtedy do zwiększania jego krętości, erodując dno i brzegi. Niszczony są obiekty regulacyjne (przede wszystkim część przelewowa stopni, progi niecek wypadowych i umocnienia brzegowe).



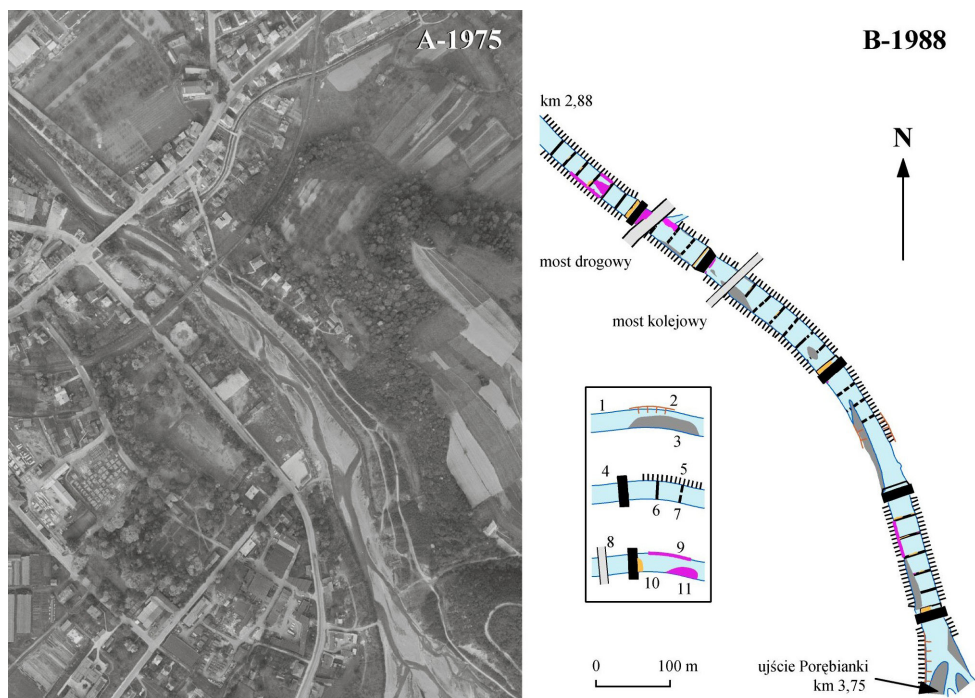
Rys. 3.23. Zmiany wykształcenia koryta Białego Dunajca w Poroninie na odcinku z korekcją stopniową, wykonaną ok. 1968 r.

„Niedopasowanie” korekcji stopniowej do reżimu hydrologicznego rzek karpaccich ilustrują poniższe przykłady odcinków koryt Białego Dunajca (rys. 3.23, fot. 3.11) i Mszanki (rys. 3.24).

Studium przypadku. W 1977 r. w korycie Białego Dunajca z korekcją stopniową w Poroninie dominował proces depozycji i redepozycji materiału (rys. 3.23A). Usypywane były duże łachy nie tylko między istniejącymi stopniami, ale również na ich koronach. Stopnie te były niemal zasypane, co świadczy o tym, że nie spełniały już swojej funkcji – nie łamały spadku dna koryta. Profil podłużny koryta został wyrównany. Po okresie intensywnej depozycji rumowiska nastąpiła względna stabilizacja



Fot. 3.11. Formy depozycyjne i erozyjne po przejściu dużego wezbrania na odcinku koryta z korekcją stopniową na rzece Białym Dunajcu w Nowym Targu (fot. J. Korpak)



Rys. 3.24. Zniszczenia korekcji stopniowej (z 1987 r.) w korycie Mszanki w Mszanie Górnej po wezbraniu w 1988 r. (B – na podstawie projektu [119]): 1) koryto prowadzące wodę, 2) podcięcie erozyjne, 3) łacha, 4) stopień betonowy, 5) umocnienia brzegowe z elementów betonowych, 6) próg betonowy, 7) próg uszkodzony, 8) most, 9) podmyta skarpa brzegowa, 10) miejsce uszkodzenia stopnia betonowego, 11) kotły w dnie koryta

dna koryta. Łachy, zarówno boczne, jak i środkowe, a także te na koronach stopni, były utrwalane przez roślinność (rys. 3.23B). Przyczyną takiego stanu był długi okres bez większych wezbrań. Przekrój poprzeczny koryta był wtedy wyraźnie za szeroki dla niskich stanów wody. W wyniku wezbrania w 1997 r. łachy zostały rozmyte, a koryto uległo wielkim przeobrażeniom. Zniszczone zostały też stopnie, które w 1998 r. odbudowano. W 2006 r. stwierdzono, że w korycie następuje proces stopniowej depozycji materiału (rys. 3.23C), tak jak się to działo w 1977 r. Proces ten będzie dominował, dopóki profil dna koryta nie zostanie wyrównany. Wtedy koryto przejmie funkcję transportacyjną (jak w 1994 r.).

Studium przypadku. Podczas wysokich stanów woda rzeki Biały Dunajec w Nowym Targu nie mieści się w sztucznie zwężonym korycie z korekcją stopniową i eroduje dno oraz brzegi koryta, niszcząc przy tym obiekty regulacyjne (fot. 3.11B). Zerodowany materiał deponowany jest na koronach stopni i między stopniami (fot. 3.11A).

Studium przypadku. Celem regulacji Mszanki za pomocą korekcji stopniowej było zahamowanie erozji wgłębnej i brzegowej (bocznej), ograniczenie transportu rumowiska oraz ochrona przeciwpowodziowa przyległych terenów, obiektów komunalnych,

dróg i mostów w Mszanie Górnej. W 1975 r., przed rozpoczęciem prac, koryto rozdzielało się tu lokalnie na kilka ramion, a jego maksymalna szerokość osiągała 70 m (rys. 3.24A). Spadek koryta wynosił 10‰. W 1987 r. uformowano sztuczną, regularną trasę koryta o szerokości 32 m, przegrodzoną licznymi budowlami poprzecznymi. Prace wykonano nie całkiem zgodnie z projektem, w wyniku czego efekt końcowy różnił się od zakładanego. Wysokość stopni nie wynosiła, jak planowano, 1 m, ale była zróżnicowana od 0,63 do 1,21 m. Wartość spadku koryta, zamiast oczekiwanej 5,5‰ w całym odcinku, była pomiędzy poszczególnymi stopniami różna (2,7-4,7‰). Na skutki znacznego ograniczenia przepustowości koryta oraz niedbalstwa w wykonawstwie nie trzeba było długo czekać. Już w 1988 r., podczas przeprowadzania inwentaryzacji „świeżo” wykonanej korekcji, obserwowano znaczne uszkodzenia konstrukcji stopni, progów oraz umocnień brzegowych (rys. 3.24B). Były one efektem przejścia fali wezbraniowej w maju 1987 r. Powyżej przelewów niektórych stopni powstały kotły o głębokościach do 1,0 m. Niecki wypadowe stopni wypełniły się rumowiskiem, umocnienia den niecek z materaców siatkowo-kamiennych zostały uszkodzone lub całkiem zniszczone i w tych miejscach powstały wyboje o głębokościach 0,3-1,1 m, a w skarpach kilku wypadów utworzyły się wyrwy. Progi były podmywane i poniżej nich powstawały kotły o głębokościach 0,2-1,3 m. Niektóre progi zostały zniszczone, a inne przykryte rumowiskiem. Podcięte zostały brzegi pomiędzy progami.

Podsumowując, należy stwierdzić, że korekcja stopniowa stabilizuje koryta najskuteczniej, ale jest bardzo inwazyjna dla środowiska. Pomijając wątpliwą estetykę długich obetonowanych odcinków koryt w krajobrazie górskim, stwarzają one niekorzystne warunki dla migracji ryb. Dużo lepszym rozwiązaniem jest korekcja spadku za pomocą sztucznych bystrzy i ramp kamiennych. Obiekty te spełniają zadania stopni betonowych, gdyż zmniejszają spadek, ale ich konstrukcja ułatwia wędrówkę ryb i sprzyja korzystnemu napowietrzaniu wody [105]. W budowlach tych



Fot. 3.12. Regulacja koryta Porębianki w Podobinie za pomocą ramp kamiennych, wykonana w 2004 r. (fot. J. Korpak)

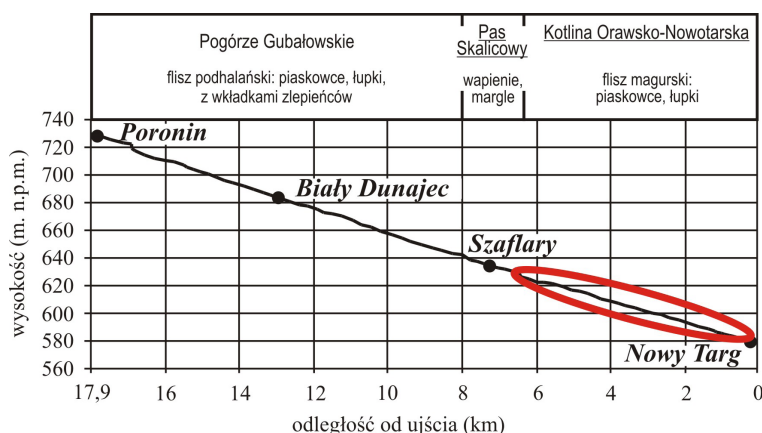
wykorzystuje się naturalne elementy zwiększające szorstkość koryta. Każda rampa składa się z dwóch rzędów ścian szczelnych i przestrzeni między nimi, która wypełniona jest narzutem z kamienia (fot. 3.12). W przypadku bystrzy nie stosuje się ścian szczelnych, tylko układa się bloki kamienne w dnie koryta w taki sposób, aby były stabilne i maksymalnie zwiększały szorstkość [93]. Oba systemy korekcji spadku są skuteczniejsze i w znacznie mniejszym stopniu ingerują w morfologię koryta i w środowisko [40]. Swym wyglądem naśladują naturalne bystrza, które są charakterystyczną formą w korytach rzek i potoków górskich [48, 63].

3.4. ZMIANY MORFOLOGII ODCINKA KORYTA REGULOWANEGO WIELOKROTNIENIE Z ZASTOSOWANIEM RÓŻNYCH SYSTEMÓW REGULACJI

W korytach rzek karpacckich istnieje wiele odcinków regulowanych wielokrotnie. Dotyczy to zwłaszcza odcinków w dolnych biegach rzek, w których przepływy powodziowe są przyczyną największych szkód i strat. Po zniszczeniu zabudowy hydrotechnicznej koryto jest przeważnie ponownie regulowane.

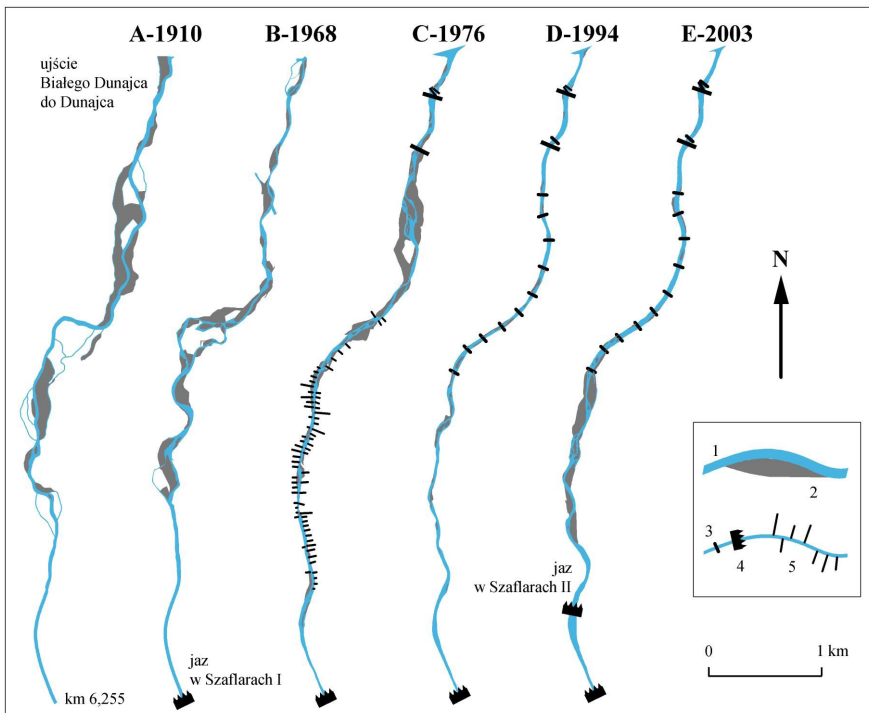
Przebieg zmian morfologicznych koryt regulowanych wielokrotnie ma indywidualny charakter. Zależy on zarówno od typu i sekwencji realizowanych działań, jak i od rozmaitych uwarunkowań przyrodniczych, charakteryzujących dany odcinek koryta i przylegające do niego tereny. Rodzaj i skala zmian morfologicznych w efekcie wielokrotnej regulacji jest zatem w każdym przypadku inna.

Poniżej opisano przebieg zmian morfologicznych, jakie zaszły w korycie Białego Dunajca w jego dolnym biegu (od jazu w Szaflarach w km 6,255 do ujścia rzeki do Dunajca) w wyniku wielokrotnej regulacji z zastosowaniem różnej zabudowy hydrotechnicznej (rys. 3.25).



Rys. 3.25. Profil podłużny koryta Białego Dunajca z naniesioną budową geologiczną (kolorem czerwonym zaznaczono odcinek koryta wielokrotnie regulowany)

Na rozpatrywanym odcinku rzeka opuszcza Pieniński Pas Skalkowy i wpływa na rozległe obniżenie Kotliny Orawsko-Nowotarskiej. W obrębie Pienińskiego Pasa Skalkowego Biały Dunajec płynie wąskim, przełomowym korytem, wykształconym w utworach węglanowych (wapieniach i marglach). Na tym odcinku rzeki zachodzi przede wszystkim transport materiału pochodzącego z wyżej leżących odcinków koryta. Opuszczając przełomowy odcinek, rzeka wpływa w obręb szerokiej i płaskiej doliny. Przed regulacjami towarzyszyło temu nagłe zmniejszenie spadku i energii strumienia oraz zmiana dominującego procesu z transportu na depozycję materiału. W naturalnych warunkach koryto było tu typowym korytem roztokowym, co widoczne jest na topograficznej mapie austriackiej z 1910 r. (rys. 3.26A). W korycie aktywnym, o szerokości zróżnicowanej od 100 m do 400 m, występowały duże łachy. Jeszcze w 1968 r. koryto było prawie naturalne, istniały jedynie lokalne umocnienia brzegów w okolicy Nowego Targu. Wzdłuż biegu rzeki wyróżnić można wtedy odcinki roztokowe na przemian z krętymi (rys. 3.26B). Gwałtowne zmiany w wykształceniu koryta następowały od początku lat 70. XX w., od kiedy koryto na tym odcinku poddano etapowym regulacjom. Najpierw wybudowano jaz w Szaflarach I w km 6,255.



Rys. 3.26. Zmiany przebiegu koryta Białego Dunajca pod wpływem regulacji za pomocą ostróg i korekcji stopniowej (A – na podstawie mapy austriackiej w skali 1:75 000, B i C – na podstawie projektów technicznych regulacji [114, 118], D i E – na podstawie ortofotomap): 1) koryto prowadzące wodę, 2) łacha, 3) stopień betonowy, 4) jaz, 5) ostrogi

Poniżej jazu, na odcinku km 5,101-2,182, przeprowadzono w 1971 r. regulację za pomocą ostróg, w wyniku której uformowano koryto zwarte, kręte i wąskie (rys. 3.26C). W latach 80. XX w. uregulowano również ujściowy odcinek koryta rzeki (z użyciem korekcji stopniowej), tak że w 1994 r. było ono już wzdłuż całej długości wąskie i jednonurtowe (rys. 3.26D). Później nastąpiło wyraźne zdziczenie i poszerzenie koryta, zwłaszcza w wyżej położonej części analizowanego odcinka (rys. 3.26E). W 2000 r. w km 5,475 został wybudowany jaz w Szaflarach II.

Jaz w Szaflarach I to jaz betonowy, ruchomy, z ujęciem wody dla Nowego Targu (fot. 3.13). Jaz przerwał ciągłość rzeki, uniemożliwił swobodny transport rumowiska i rozpoczął proces pogłębiania się koryta na rozpatrywanym odcinku. Erozja ta nie była zapewne zbyt intensywna, gdyż dotyczyła przede wszystkim odcinka koryta położonego bezpośrednio poniżej jazu, a więc jeszcze wyciętego w odpornych skałach węglanowych Pienińskiego Pasa Skalkowego (rys. 3.25). Morfologiczny wpływ jazu wyrażał się przede wszystkim w ograniczeniu dopływu rumowiska z wyższych odcinków koryta. Dodatkowym źródłem dostawy materiału do koryta były jednak wtedy stoki, w większości zajęte przez pola uprawne (rys. 3.27A i 3.28A), i dlatego rzeka niosła tu wciąż dużo rumowiska. Profil podłużny koryta był wyrównany, a spadek dna wynosił 7,7‰. Koryto charakteryzowało się podobnym wykształceniem na całej długości, było wielonurtowe i aluwialne (rys. 3.27A i 3.28A). Przekroje poprzeczne, wykonane wzdłuż biegu koryta, obrazują jego rozszerzanie się w kierunku ujścia (rys. 3.29).

W tych warunkach w 1971 r. przeprowadzono regulację za pomocą ostróg siatkowo-kamiennych. Prace objęły wielonurtowy odcinek koryta rzeki poniżej jazu w Szaflarach I, w km 5,101-2,192 biegu rzeki (rys. 3.26C), na którym wykonano sztuczne koryto regulacyjne o szerokości 30 m. Celem tych prac było zabezpieczenie przed erozją i obrywaniem brzegów, na których znajdowały się pola uprawne i łąki.



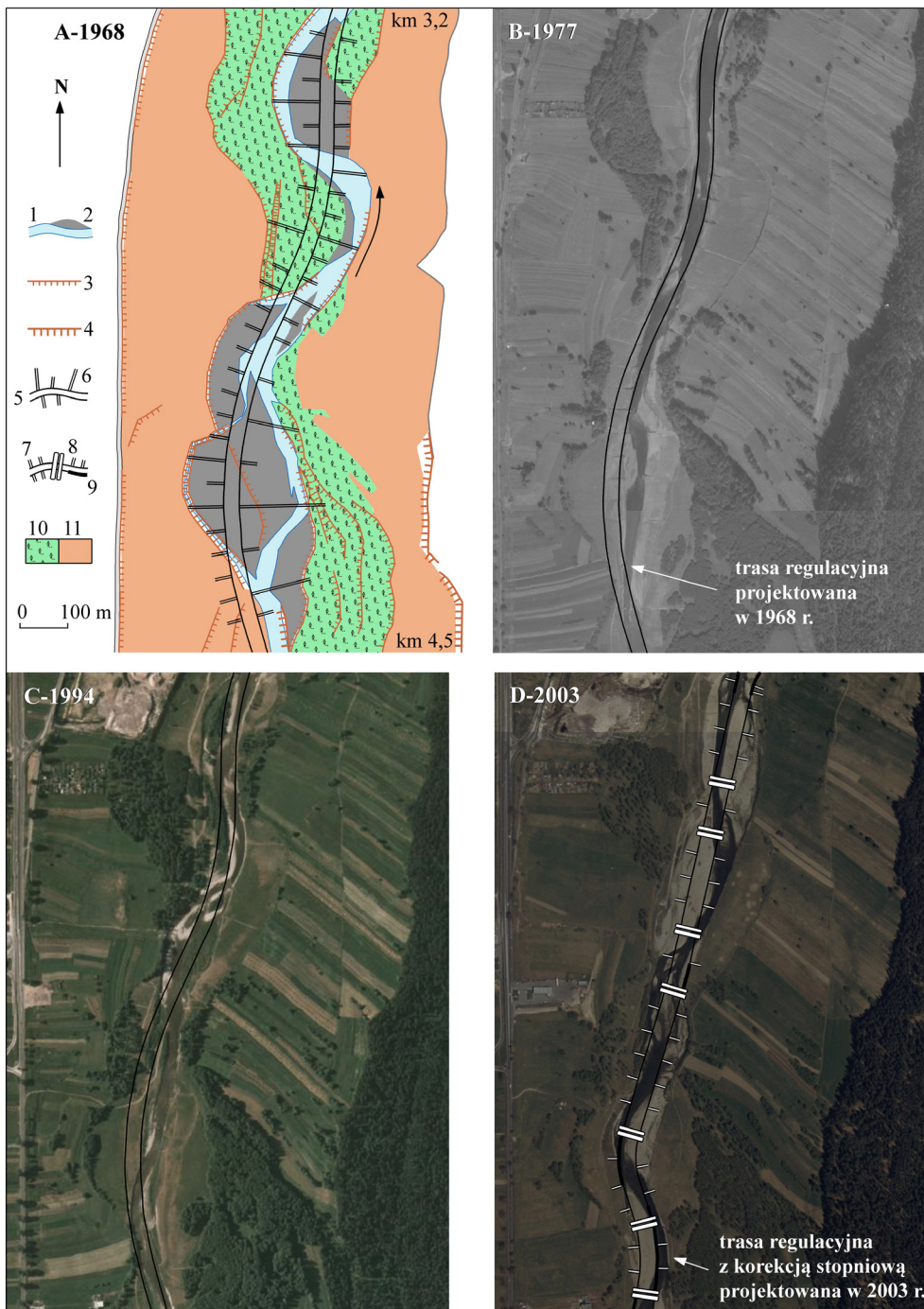
Fot. 3.13. Jaz w Szaflarach I, wykonany przed 1970 r. (fot. J. Korpak)

Na skutek tej regulacji kręte, a miejscami roztokowe, szerokie do 350 m koryto zwężono do szerokości 30 m (rys. 3.27A). Zwężenie to było lokalnie aż dziesięciokrotne. Trasa regulacyjna wyznaczona została niemalże w linii prostej, co spowodowało skrócenie koryta na długości ok. 2900 m o ok. 524 m, a więc o 18%. Odległości przesunięcia bocznego koryta wynosiły przeciętnie 100-140 m, a na odcinku najbardziej roztokowym nawet 240 m.

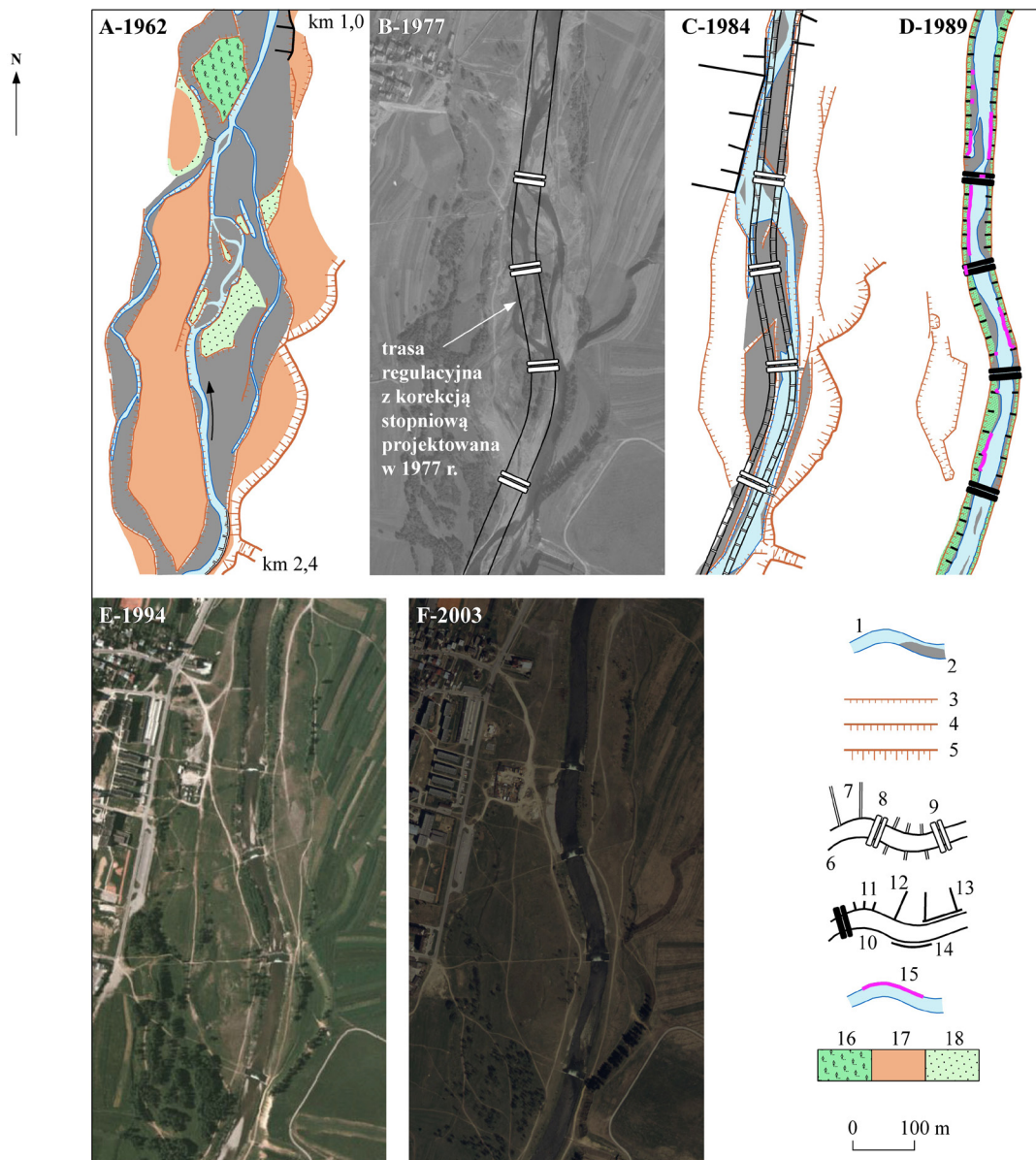
Na zdjęciach lotniczych z 1977 r. widoczne jest wykształcenie koryta Białego Dunajca po blisko sześciu latach funkcjonowania trasy regulacyjnej (rys. 3.27B). Szerokość koryta była na całej długości wyrównana i bardzo wąska (rys. 3.30). Przestrzenie między ostrogami zostały już wypełnione rumowiskiem i przeważnie zarośnięte darnią. W efekcie tak znacznego wyprostowania koryta jego spadek wzrósł z 7,7‰ do 8,6‰. Konsekwencją tego była silna erozja wgłębna. W latach 1971-1977 koryto pogłębiło się o 1,0-2,0 m (rys. 3.29). Tym samym zwiększyła się wysokość brzegów, wskutek czego były one rzadziej zalewane. Powierzchnia dawniej aktywnego koryta przekształciła się w terasę, na którą zaczęła wkraczać roślinność krzewiasta lub drzewiasta (rys. 3.27B). Tak skanalizowany i pogłębiony odcinek koryta stał się niejako przedłużeniem wyżej występującego odcinka przelomowego. Na skutek pogłębiania koryta ostrogi były konsekwentnie niszczone, a w miejscu ich usunięcia brzegi były lokalnie erodowane. Rzeka wykazywała zatem tendencję do zwiększania krętości. Duży spadek i znaczna energia strumienia były powodem wynoszenia całości materiału wyerodowanego z brzegów do ujściowego odcinka koryta rzeki. Odcinek ten był wtedy na przeważającej długości naturalny, a rzeka wykazywała tu tendencję do roztokowania (rys. 3.26C i 3.28B). Poziom dna koryta poniżej odcinka z ostrogami na ogół nie uległ większej zmianie, a miejscami nieznacznie się podniósł (rys. 3.29). Szerokość koryta aktywnego była podobna jak w 1962 r., choć niektóre ramiona boczne przestały funkcjonować i wkroczyła na nie roślinność drzewiasta (rys. 3.28A i B). Średnia szerokość koryta w odcinku km 3,3-0,0 w 1977 r. wynosiła 83,9 m, ale miejscami osiągała wartość nawet 230 m (rys. 3.30).

W celu ustabilizowania szerokiego koryta w okolicy Nowego Targu i zmniejszenia jego spadku z 8‰ do 4‰ zaprojektowano regulację na ostatnim, ujściowym odcinku o długości 3,3 km. Projekt ten realizowano w latach 1980-1986. Zakres robót obejmował budowę trasy regulacyjnej, przegrodzonej 11 stopniami betonowymi o wysokości 1 m (rys. 3.26D). Szerokość trasy regulacyjnej wynosi 50 m (rys. 3.28B). Ze względu na małe przepływy przy niskich stanach wody zastosowano dwudzielny przekrój stopni. Środkowa część stopni ma szerokość 20 m, a części boczne, o niewielkim nachyleniu – po 15 m. Głębokość niecek wypadowych wynosi 0,8 m. Stopnie budowane były kolejno w kierunku ujścia rzeki. Nowa trasa regulacyjna nie pokrywała się miejscami z naturalnym przebiegiem koryta (rys. 3.28B).

W 1984 r. podjęto prace mające na celu wskazanie koniecznych remontów i umocnień na odcinku już uregulowanym za pomocą stopni oraz opracowanie wytycznych do przeprowadzenia dalszej części robót w sposób przynoszący lepsze efekty. Do tego

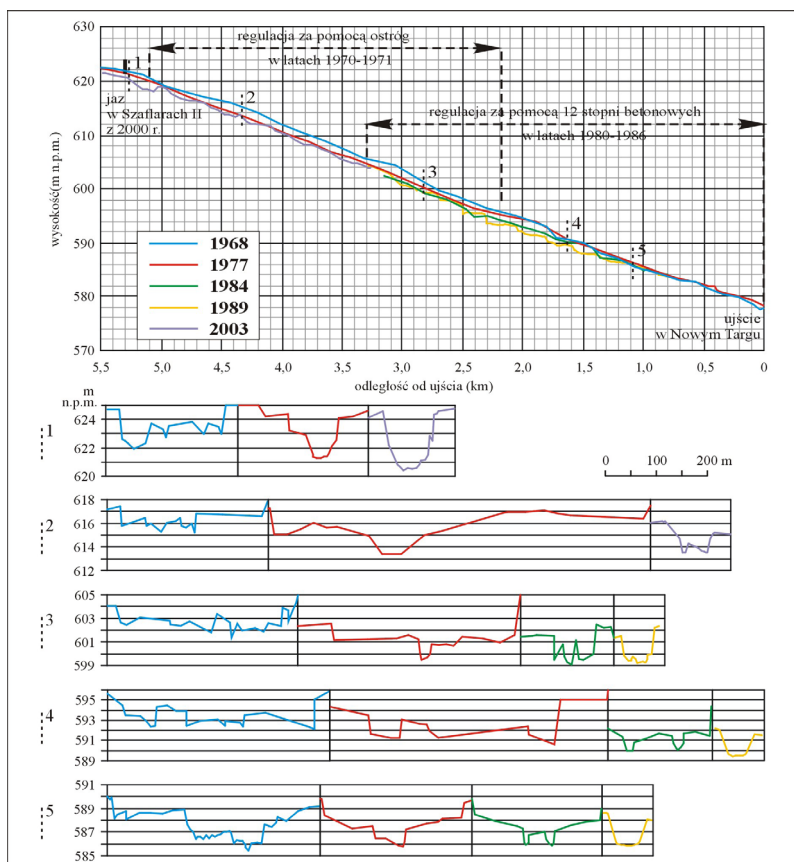


Rys. 3.27. Zmiany wykształcenia koryta Białego Dunajca na skutek regulacji za pomocą ostróg w Szaflarach (A – na podstawie projektu technicznego regulacji [114], D – plan regulacji na podstawie projektu technicznego [127]): 1) koryto wypełnione wodą, 2) łacha, 3-4) krawędzie brzegów o wysokościach: 3 – 0-2 m, 4 – 2-5 m, 5) trasa regulacyjna, 6) ostrogi, 7) poprzeczki, 8) stopień betonowy, 9) narzut kamienny, 10) las, 11) pole orne

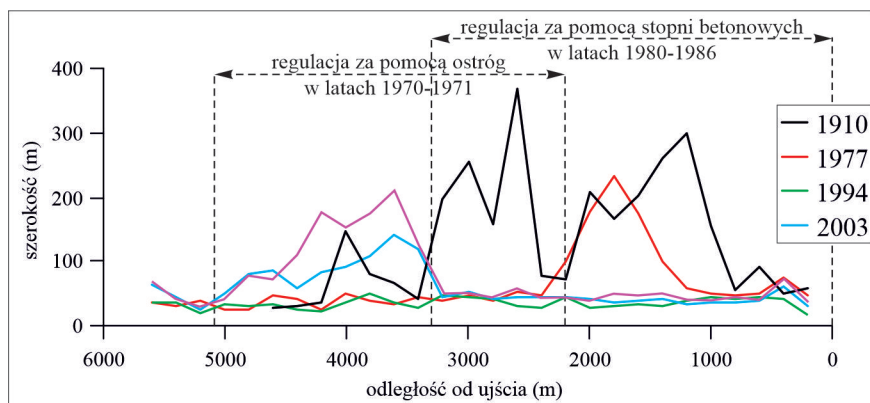


Rys. 3.28. Zmiany wykształcenia koryta Białego Dunajca w Nowym Targu na odcinku uregulowanym za pomocą korekcji stopniowej (A, C i D – na podstawie projektów technicznych [111, 121, 122], B – plan regulacji na podstawie projektu technicznego [116]): 1) koryto prowadzące wodę, 2) łacha, 3-5) krawędzie brzegów o wysokościach: 3 – 0-2 m, 4 – 2-5 m, 5 – >5 m, 6-9) projektowane budowle regulacyjne: 6 – trasa regulacyjna, 7 – ostrogi, 8 – poprzeczki, 9 – stopień betonowy, 10-14) wykonane budowle regulacyjne: 10 – stopień betonowy, 11 – poprzeczki, 12 – ostrogi, 13 – kierownica, 14 – opaska brzegowa, 15) miejsca uszkodzeń budowli regulacyjnych, 16) las, 17) pole orne, 18) nieużytki

czasu powstało zaledwie sześć stopni – ostatni w km 2,513 koryta. Przeprowadzona kontrola wykazała wiele nieprawidłowości, do jakich dochodziło podczas budowy tych stopni. Okazało się, że stosowano niewłaściwe materiały budowlane, stopnie lokalizowano w nieodpowiednich miejscach profilu podłużnego, a ich wysokość była zróżnicowana. Zaniechano też wykonania projektowanej zabudowy biologicznej skarp koryta. Zaniedbania te doprowadziły do tego, że dwukrotnie, podczas dużych wezbrań w 1980 i 1983 r., nurt wody zniszczył mur skrzydła pierwszego z wybudowanych stopni i skierował się w zlikwidowaną trasę koryta roboczego, omijając nowe koryto. Po wizji lokalnej stwierdzono, że parametry techniczne stopni i koryta zostały przyjęte właściwie. Zalecono jedynie dodatkowe utrwalenie trasy pomiędzy stopniami przez budowę poprzeczek siatkowo-kamiennych w linii ograniczającej szerokość dna do 20 m (rys. 3.28C) i obsadzenie przestrzeni między nimi wikliną. Postanowiono wykonać kierownicę siatkowo-kamienną, wprowadzającą wody na



Rys. 3.29. Zmiany profilu podłużnego i przekrojów poprzecznych koryta Białego Dunajca na odcinku uregulowanym za pomocą ostróg i korekcyj stopniowej (na podstawie projektów regulacji [114, 116, 121, 122, 127])



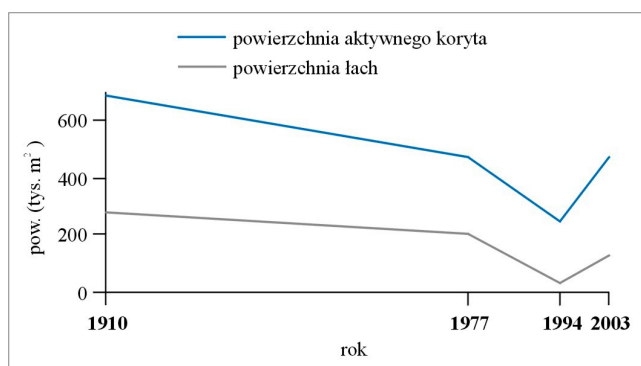
Rys. 3.30. Zmiany szerokości koryta aktywnego Białego Dunajca na odcinku uregulowanym za pomocą ostróg i korekcyj stopniowej (na podstawie pomiarów na mapie austriackiej z 1910 r. oraz ortofotomach)

przelew stopnia początkującego korekcję. Uznano, że zapobiegnie to w przyszłości omijaniu przez rzekę trasy regulacyjnej. Rysunek 28C przedstawia koryto na odcinku wciąż nieuregulowanym. Widoczne jest zwężenie koryta aktywnego w stosunku do stanu z 1977 r. Jego dno uległo też znacznemu pogłębieniu (do ok. 2 m), zwłaszcza bezpośrednio poniżej ostatniego wykonanego stopnia w km 2,513 (rys. 3.29).

W 1989 r. przeprowadzono ocenę całej korekcji stopniowej. Okazało się, że wykonawstwo i stan techniczny regulacji pozostawiały wiele do życzenia. Zamiast przyjętej w projekcie wysokości stopni 1 m, wysokość ta była zróżnicowana od 0,5 m do 1,0 m. W efekcie nie uzyskano planowanego spadku i jego wartość pomiędzy stopniami była zróżnicowana od 3,6‰ do 7,3‰. Dno uregulowanego koryta pogłębiło się w ciągu ostatnich pięciu lat nawet o 1 m (rys. 3.29). Pogłębienie to nastąpiło częściowo na skutek planowanego, mechanicznego wybrania rumowiska podczas przeprowadzania prac. Obniżanie się dna było też efektem znacznego (średnio prawie dwukrotnego, a lokalnie nawet pięciokrotnego) zwężenia koryta w stosunku do stanu z 1977 r. (rys. 3.30). Profile poprzeczne koryta uzyskały jednolity trapezowy kształt. Brzegi koryta były miejscami erodowane (rys. 3.28D). Wiele poprzeczek uległo podcięciu i załamaniu. Korony stopni i płyty wypadowe były niszczone, a pomiędzy stopniami występowały duże łachy boczne (rys. 3.28D). Brzegi były na ogół utrwalone darnią.

W 1994 r. koryto było już uregulowane wzdłuż całego dolnego odcinka biegu rzeki (km 5,1-0,0) (rys. 3.27C i 3.29E). Miało ono trapezowy kształt i było wąskie. Szerokość nie wzrastała z biegiem rzeki, jak to było w stanie naturalnym, ale była bardzo mało zróżnicowana (rys. 3.30). Średnia szerokość odcinka z ostrogami wynosiła 31,9 m, a odcinka ze stopniami 36,4 m. Średnia szerokość całego fragmentu koryta (od jazu w Szaflarach po ujście) zmniejszyła się od 1977 r. prawie dwukrotnie (z 63,5 m do 34,5 m). W takim samym stosunku zmniejszyła się powierzchnia aktywnego koryta (rys. 3.31). Pomimo niemal całkowitego obudowania koryta widoczne

były skutki działania procesów erozji wglębnej, erozji bocznej i akumulacji. Budowle regulacyjne ulegały powolnemu niszczeniu. W odcinku z ostrogami rzeka wyraźnie „dążyła” do zwiększenia krętości (rys. 3.27C). W niektórych strefach podcięła brzegi, uszkadzając ostrogi i zwiększając długość koryta. Wzdłuż całego odcinka długość koryta wzrosła o 100 m. Przy brzegach wypukłych występowały łachy. Przestrzenie między ostrogami zostały „zabliźnione” i utrwalone darnią. Zwiększyła się też powierzchnia lasów na obu brzegach, będących kiedyś częścią koryta aktywnego. Na odcinku uregulowanym za pomocą stopni zabudowa utrzymywała się w dość dobrym stanie (rys. 3.28E). Brzegi były lokalnie erodowane, a między stopniami występowały łachy. Powierzchnia dawnego koryta aktywnego została całkowicie utrwalone na darnią. Na lewym brzegu wybudowane zostało nowe osiedle mieszkaniowe.



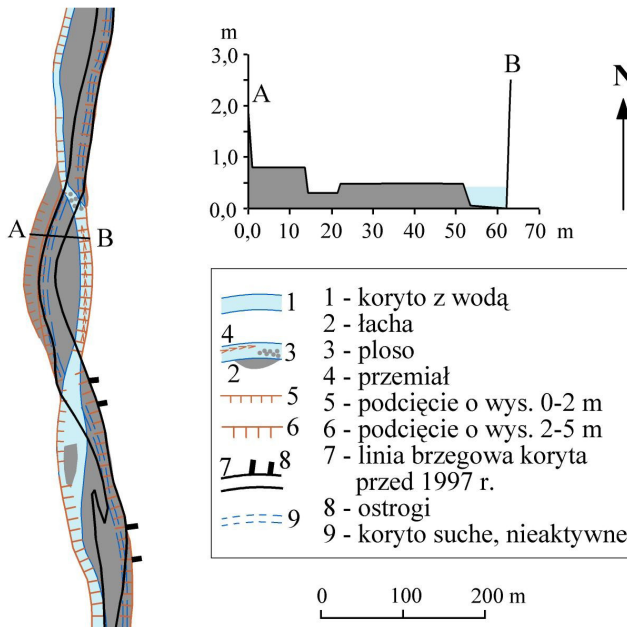
Rys. 3.31. Zmiany powierzchni koryta aktywnego i łach w latach 1910-2003 w ujściowym odcinku Białego Dunajca, uregulowanym za pomocą ostróg i stopni betonowych (na podstawie pomiarów na mapach i ortofotomapach)

Wyraźne zmiany w wykształceniu koryta widoczne są na zdjęciu lotniczym z 2003 r. (rys. 3.27D i 3.28F). Zmiany te dotyczą przede wszystkim odcinka uregulowanego za pomocą ostróg (rys. 3.27D). Średnia szerokość koryta wzrosła tu od 1994 r. z 35,4 m do 72,6 m (rys. 3.30). Szerokość na tym odcinku stała się też bardziej zróżnicowana – jej wartości wynosiły od 43,4 m do 141,9 m i ogólnie rosły w kierunku ujścia koryta, tak jak się to działo przed regulacjami. Na odcinku tym utrzymała się też tendencja do zwiększania przez rzekę krętości. W ciągu dziewięciu lat rzeka wydłużyła się dzięki temu o dalsze 60 m. Lokalnie koryto było zdziczałe. Właściwie nie było śladu po dawnej zabudowie.

Wydaje się, że tak nagle zmiany w korycie były przede wszystkim konsekwencją dużych wezbrań, do jakich doszło w 1997 r. i 2001 r. Potwierdzają to relacje świadków tych wydarzeń. Według nich głęboko wcięte koryto na odcinku uregulowanym ostrogami zapobiegło wystąpieniu wody z brzegów. Cała energia wody skoncentrowana została zatem w obrębie trasy regulacyjnej. Nurt wielkiej wody przerzucił się tu z jednego brzegu pod drugi, zabierając olbrzymie połacie terenu (fot. 3.14A). Podcinany

był zarówno porośnięty lasem prawy brzeg rzeki, jak i brzeg lewy. Szerokość zabranego przez wodę pasa terenu na prawym brzegu wynosiła od kilku do 45 m, a na brzegu lewym – od kilku do 60 m. Bezpośrednią pozostałością po wezbraniach było szerokie koryto wielkiej wody, odgraniczone od terenów przyległych wysokimi podcięciami (rys. 3.32, fot. 3.14B). Jego powierzchnia była nierówna, w niektórych miejscach wielostopniowa w przekroju poprzecznym. Wyróżnić w niej można stare koryta, zawieszone względem współczesnego, oraz wielkie, częściowo utrwalone łachy (fot. 3.14C). Gdzieś tam łachy te były w jednym przekroju poprzecznym położone na różnych wysokościach, oddzielone od siebie podcięciem erozyjnym (rys. 3.32, fot. 3.14D). Większość ostróg została usunięta przez rzekę, a te, które zostały, były całkowicie zniszczone i nie pełniły swojej funkcji (rys. 3.32, fot. 3.14E). Odcinek uregulowany za pomocą systemu stopni nie uległ tak dużym przeobrażeniom (rys. 3.28F). W trakcie wezbrań następowała w nim przede wszystkim depozycja materiału pochodzącego z erozji brzegów na odcinku z ostrogami (fot. 3.14F). Rzeka erodowała też brzegi wklęsłe, wykazując tendencję do migracji bocznej (fot. 3.14F). Uszkodzone zostały niektóre stopnie i umocnienia brzegowe.

Reasumując, należy podkreślić, że analizowany fragment koryta Białego Dunajca uległ wielkim przeobrażeniom. Zmieniono przebieg koryta z meandrowego, a miejscami roztokowego, na jednonurtowy, prosty lub kręty (rys. 3.26). Dno koryta zostało na prawie całej długości (oprócz ujściowego odcinka o długości ok. 0,5 km)



Rys. 3.32. Zmiany w korycie Białego Dunajca uregulowanym za pomocą ostróg po wezbraniach w 1997 i 2001 r. (na podstawie ortofotomapy i kartowania terenowego)



Fot. 3.14. Skutki wezbrań w latach 1997 i 2001 w wykształceniu koryta Białego Dunajca w Szaflarach: A) zniszczenie ostróg i poszerzenie koryta, B) podcięcia wysokich brzegów koryta, C) szerokie koryto wielkiej wody ze śladami nieaktywnych koryt i wielkimi, zarastającymi łąkami, D) koryto z kilkoma poziomami łąk, E) zniszczona, niefunkcjonująca ostroga w pogłębionym korycie, F) depozycja materiału i erozja brzegów oraz koron stopni w korycie z korekcją stopniową (fot. J. Korpak)

pogłębione o ok. 0,5-3,0 m (rys. 3.29). Intensywny proces erozji wglębnej był efektem nie tylko skanalizowania rzeki, ale również wybierania rumowiska z koryta. W latach 80. XX w. przez kilka lat eksploatowano rumowisko na wielką skalę (informacja ustna). Zapewne istniał również proceder poboru otoczków na lokalne cele budowlane. W 2006 r. obserwowano go nadal, mimo iż był prawnie zakazany. Wpływ na pogłębienie koryta miała też ograniczona dostawa rumowiska zarówno z wyższych odcinków koryta (na skutek zatrzymywania rumowiska przez konstrukcje jazów), jak i z brzegów, które sukcesywnie ulegały zarastaniu. Zmieniała się szerokość koryta (rys. 3.30). Najbardziej zmieniony został środkowy odcinek, pomiędzy km 3,3 i 2,3 biegu rzeki, który pierwotnie był najszerszy, a potem został dwukrotnie uregulowany. Tuż przed pierwszym stopniem, początkującym korekcję stopniową, koryto „odzyskało” po wielkich wezbraniach największą szerokość. Powierzchnia koryta

aktywnego w całym fragmencie zmalała drastycznie po 1977 r., ale od jakiegoś czasu równie szybko wzrasta (rys. 3.33). W 2003 r. szerokość ta nieznacznie przewyższyła stan z 1977 r., co było efektem zniszczenia ostróg.

3.5. MORFOLOGICZNA ROLA REGULACJI KORYT W FUNKCJONOWANIU CAŁYCH SYSTEMÓW KORYTOWYCH

W ciągu ostatnich dziesięcioleci zmieniały się poszczególne odcinki koryt. Rodzaj tych zmian, ich natężenie oraz tempo przebiegu było zróżnicowane w profilach podłużnych koryt. Zależało to nie tylko od sposobu uregulowania koryt, ale również od lokalnych uwarunkowań (np. od użytkowania przylegających terenów, eksploatacji w danym miejscu rumowiska dennego, rodzaju podłoża geologicznego itp.). Pomimo zróżnicowania zmian w skali odcinków koryta, w skali całego systemu korytowego widoczne są pewne ogólne tendencje. Dotyczą one przebiegu koryt w planie, szerokości koryt, ich położenia pionowego, rodzaju materiału dennego, liczby i rodzaju form korytowych oraz morfodynamicznych typów koryt.

3.5.1. ZMIANY SYSTEMU KORYTOWEGO W PLANIE

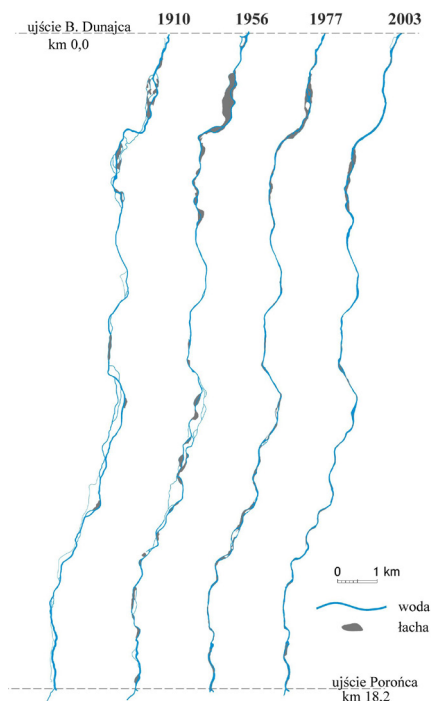
Zmiana systemu korytowego w planie polega przede wszystkim na:

1. przekształceniu układów wielonurtowych w jednonurtowe, proste lub kręte,
2. zmniejszeniu krętości koryt.

Zmiany te nie przebiegały w jednakowym tempie w ciągu ostatnich 100 lat. Zdecydowanie największe i najszybsze były przeobrażenia w drugiej połowie XX w., a zwłaszcza do ok. 1975 r.

Zmiany przebiegu koryt w planie w ciągu 100 lat (do 2003 r.) zobrazowano na przykładzie koryta Białego Dunajca (rys. 3.33).

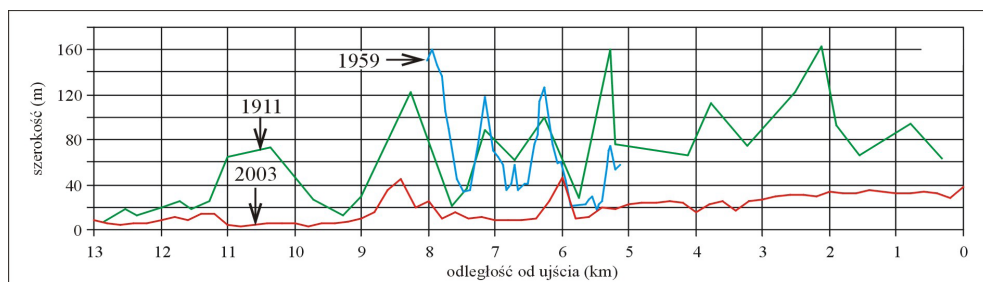
Studium przypadku. Do 1956 r. przeobrażenia zachodziły wolniej, a wzdłuż biegu koryt wciąż liczne były odcinki roztokowe. Większość ramion bocznych przestała funkcjonować do 1977 r., a pozostałe – w ciągu kolejnych 30 lat. Największe zmiany zaszły zatem na początku drugiej połowy XX w.



Rys. 3.33. Zmiana przebiegu koryta Białego Dunajca w latach 1910-2003
(1910 i 1956 r. – na podstawie map topograficznych w skali 1:75 000 i 1:25 000, 1977 i 2003 r.
– na podstawie ortofotomap w skali 1:10 000)

3.5.2. ZMIANY SZEROKOŚCI KORYT

Koryta, zwłaszcza w dolnych i środkowych biegach rzek, zostały znacznie zwężone. W ciągu 100 lat (do 2003 r.) zwężanie następowało w niejednakowym tempie. W pierwszej połowie XX w. zmiany były niewielkie, natomiast potem uległy znacznemu zintensyfikowaniu.



Rys. 3.34. Zmiany szerokości koryta Mszanki w XX w. (na podstawie projektów regulacji [107, 109] i ortofotomapy z 2003 r.)

Skalę i tempo zwężania przykładowego koryta Mszanki w ciągu ostatniego wieku prezentuje rysunek 3.34.

Studium przypadku. W 1911 r. szerokość koryta Mszanki w środkowym i dolnym biegu rzek była bardzo duża (rys. 3.34). Średnio wynosiła ona 62,2 m, choć lokalnie osiągała nawet 160 m. W ciągu 86 lat, do 1997 r., szerokość ta zmniejszyła się do 18,8 m (a zatem o 69,8%). Największe zmiany zaszły w dolnym biegu rzeki (zwłaszcza na odcinku km 5,3-2,0). W górnym biegu, powyżej km 11,3, różnice zanikają. Jest to zrozumiałe, gdyż koryto jest tu skalne i stabilne. Tempo zwężania koryta Mszanki było niejednostajne. Wartości szerokości koryta na odcinku km 8,0-5,2 były podobne w 1959 r. do tych zmierzonych w 1910 r., a w niektórych miejscach nawet je przewyższały. Średnia szerokość na tym odcinku wynosiła: 72,0 m w 1910 r., 66,5 m w 1959 r. i zaledwie 15,7 m w 1997 r. W 1975 r. wartość ta wynosiła 26,9 m. Tak więc intensywne zwężanie koryta Mszanki zaczęło się po 1959 r. Najszybciej, bo ok. 2,5 m/rok, malała szerokość do 1975 r., podczas gdy w latach 1975-1997 tempo wyraźnie się zmniejszyło – do 0,5 m/rok. Jednocześnie szerokość koryt uległa znacznemu ujednoczeniu w profilu podłużnym.

3.5.3. ZMIANY POŁOŻENIA PIONOWEGO KORYT

Zmiany te polegają przede wszystkim na pogłębianiu koryt i dotyczą niemal wszystkich koryt karpackich. Pogłębianie zachodzi wzdłuż prawie całych długości profili podłużnych. Stabilne w układzie pionowym są jedynie górne, skalne odcinki koryt. Wszędzie indziej obserwuje się liczne dowody wcinania się rzek w postaci:

1. wysokich podcięć brzegowych (fot. 3.15A),
2. zawieszonych koryt dopływów bocznych,
3. zniszczonych, wiszących nad wodą opasek brzegowych (fot. 3.15B),
4. zerodowanych koron budowli poprzecznych (fot. 3.15C),
5. podciętych filarów mostów (fot. 3.15D) itp.

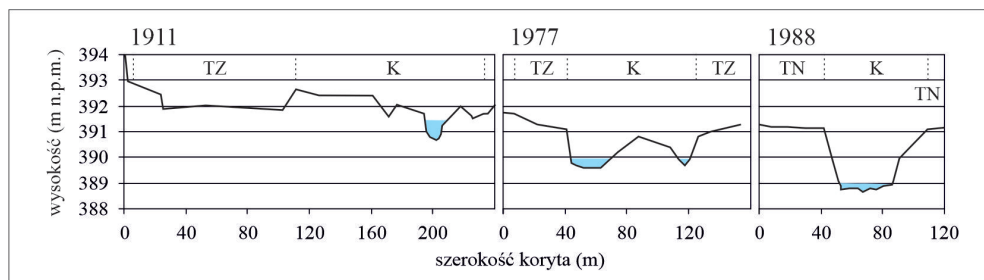
Pogłębianie koryt, przy jednoczesnym ich zwężaniu, spowodowało przekształcenie części koryt aktywnych w terasy zalewowe, a następnie nadzalewowe.

Powyższy proces zobrazowano na przykładzie koryta Mszanki (rys. 3.35).

Studium przypadku. Wcinaniu się Mszanki towarzyszyło zwężanie jej koryta aktywnego przy jednoczesnym poszerzaniu koryta małej wody (rys. 3.35). W 1988 r. szerokość koryta aktywnego była równa szerokości małej wody, czego skutkiem było spływanie rzeki. Nastąpiła też zmiana układu w planie – wieloramienne koryto z szeroką terasą zalewową przekształciło się najpierw w koryto dwuramienne, a potem jednonurtowe. Wcinanie się rzeki spowodowało wzrost wysokości brzegów i w rezultacie przekształcanie części koryta aktywnego w terasę zalewową, a następnie nadzalewową. Wielkość pogłębiania koryta Mszanki w analizowanym profilu wyniosła 2 m w ciągu 78 lat. Tempo wcinania się rzeki nie było jednostajne: w latach 1911-1977 koryto uległo pogłębianiu o 1 m i o taką samą wartość pogłębiło się zaledwie w ciągu kolejnych 11 lat (1977-1988).



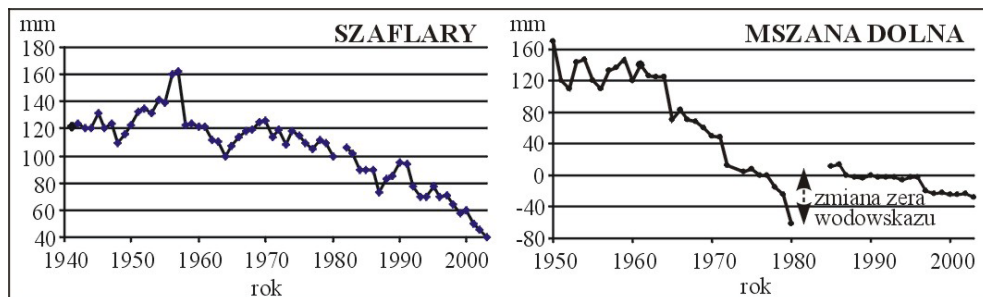
Fot. 3.15. Skutki pogłębienia koryt: A) wysokie, pionowe, niestabilne brzegi koryta, B) zniszczona, niespełniająca swych zadań podłużna zabudowa hydrotechniczna, C) zerodowane korony budowli poprzecznych, D) podcięte filary mostów (fot. J. Korpak)



Rys. 3.35. Pogłębienie koryta Mszanki i zmiana kształtu jego przekroju poprzecznego w km 2,5 km w latach 1911-1988 (na podstawie projektów regulacji [107, 119, 123]): K) koryto aktywne, TZ) terasa zalewowa, TN) terasa nadzalewowa

Na tendencję do pogłębienia się koryt wskazuje również analiza wykresów minimalnych rocznych stanów wody w przekrojach wodowskazowych rzek. Na wykresach tych wyraźnie widać moment intensyfikacji zmian, który przeważnie przypada na drugą połowę XX w.

Na poniższych wykresach minimalnych rocznych stanów wody można określić moment początku procesu pogłębienia się koryt Białego Dunajca i Mszanki (rys. 3.36).

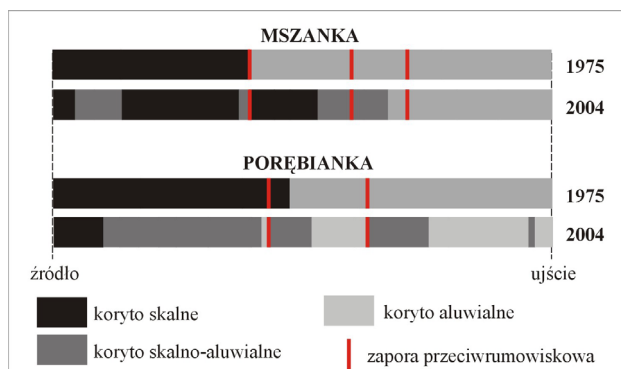


Rys. 3.36. Zmiana wartości minimalnych rocznych stanów wody w wieloleciu w przekrojach wodowskazowych Szaflary (na Białym Dunajcu) i Mszana Dolna (na Mszance)

Analiza minimalnych stanów rocznych Białego Dunajca i Mszanki wskazała, że intensywne pogłębianie rozpoczęło się ok. 1960 r. (rys. 3.36). Na podstawie przekrojów poprzecznych i profili podłużnych ustalono, że najszybciej proces ten zachodził w korycie Białego Dunajca w latach 1958-1964 (10 cm/rok), a w korycie Mszanki w latach 1964-1972 (14 cm/rok). Później tempo pogłębiania koryt zmniejszyło się odpowiednio do 2,3 cm/rok i 2,2 cm/rok.

3.5.4. ZMIANY RODZAJU MATERIAŁU W OBRĘBIE DEN KORYT

W korytach nastąpił wzrost udziału odcinków wykształconych w obrębie litej skały i jednocześnie spadek udziału odcinków typowo aluwialnych. Druga ważna zmiana dotyczy występowania odcinków skalnych w profilach podłużnych koryt – w naturalnych, niezmiennych systemach korytowych odcinki skalne występowały przede wszystkim w górnych biegach rzek, natomiast współcześnie spotyka się je również w środkowych, a nawet dolnych biegach rzek (zwłaszcza poniżej zapór przeciurumowiskowych, jazów lub wysokich stopni).



Rys. 3.37. Zmiana udziału koryt skalnych, skalno-aluwialnych i aluwialnych wzdłuż biegu Mszanki i Porębianki w latach 1975-2004 (na podstawie badań terenowych K. Krzemienia [46] i J. Korpak [41])

Tendencje te zauważyć można na przykład w korytach Mszanki i Porębianki (rys. 3.37).

Studium przypadku. W 1975 r. koryta typu skalnego stanowiły 39,5% długości profilu podłużnego Mszanki i 47,4% długości profilu podłużnego Porębianki [46] (rys. 3.37). Na pozostałej długości koryta były aluwialne. W 2004 r. udział koryt skalnych wynosił już 67,1% w przypadku Mszanki i 63,8% w przypadku Porębianki. W 1975 r. koryta skalne występowały w górnych biegach rzek, a poniżej nich wcinają się w swoje aluwia aż do samych ujść. Współcześnie koryta skalne występują w górnych i środkowych biegach rzek, poniżej zapór przeciwrumowiskowych lub wysokich stopni betonowych, co stanowi dowód na intensywną erozję wgłębną wywołaną tymi budowlami, która doprowadziła do rozcięcia aluwiów.

3.5.5. ZMIANY LICZBY I RODZAJU FORM KORYTOWYCH

W pierwszej połowie XX w. rzeki były obciążone dużą ilością rumowiska, deponowanego w postaci łańcuchów zwirowych. Koryta były wtedy szersze, płytsze i na wielu odcinkach wieloramienne. Te ich cechy zaczęły się szybko zmieniać w drugiej połowie XX w. W węższym i głębszym korycie, z reguły o większym spadku (spowodowanym skróceniem i wyprostowaniem koryt), istnieją mało dogodne warunki do deponowania materiału, którego zresztą było w rzekach coraz mniej. Przyczyniała się do tego zarówno zmiana użytkowania ziemi, eksploatacja rumowiska, jak i postępująca zabudowa koryt. W efekcie w ciągu ostatnich dekad zmniejszała się liczba i powierzchnia form akumulacyjnych, natomiast rosła liczba i powierzchnia form erozyjnych. Dominującym procesem była erozja wgłębną, a procesy akumulacyjne odgrywały drugorzędą rolę. Agradacja zachodziła jedynie w zbiornikach zapór i jazów oraz poniżej odcinków, w których doszło do erozji bocznej. Redukcja wartości wskaźnika zdziczenia (liczba łańcuchów i wysp środkowych na długości 1 kilometra koryta) świadczy o tendencji rzeki do wykształcania koryta jednonurtowego.

W tabeli 3.2 zamieszczono dane potwierdzające występowanie powyższych tendencji na Mszance.

Tabela 3.2

Zmiana liczby i powierzchni form korytowych Mszanki

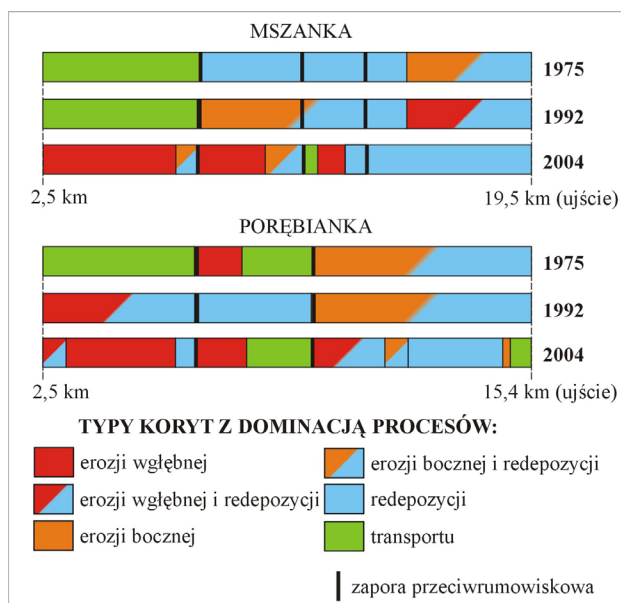
Formy korytowe	1975	2004
Liczba progów / km	8,2	19,1
Liczba podcięć / km	4,9	9,4
Powierzchnia podcięć [m ² /km]	473	1124
Liczba łańcuchów / km	30,1	6,7
Powierzchnia łańcuchów [m ² /km]	1843	439
Wskaźnik zdziczenia	20,9	1,8

3.5.6. ZMIANY TYPÓW MORFODYNAMICZNYCH KORYT

Typy morfodynamiczne odcinków koryta wyróżniane są w jego profilu podłużnym na podstawie podobieństw i różnic w wykształceniu i funkcjonowaniu tych odcinków [42]. Odcinki o podobnej budowie i modelowane przez ten sam proces lub zespół procesów reprezentują koryta jednego typu.

W ciągu ostatnich dekad wzrósł udział odcinków koryta modelowanych przez proces erozji dennej, zwłaszcza w górnych biegach rzek oraz poniżej wysokich poprzecznych budowli hydrotechnicznych. Znaczej redukcji uległ natomiast udział koryt z dominacją procesów erozji bocznej i redepozycji/depozycji. W korytach wyróżnia się obecnie więcej różnych typów odcinków niż kilkadziesiąt lat temu, ale są one współcześnie znacznie krótsze. Morfodynamika koryt uległa zatem znacznemu skomplikowaniu.

Ilustracją powyższych zmian są wyniki kartowania koryt Mszanki i Porębianki, przeprowadzone w latach 1975, 1992 i 2004 (rys. 3.38).



Rys. 3.38. Zmiana morfodynamicznych typów odcinków koryt Mszanki i Porębianki w latach 1975-2004 (na podstawie badań terenowych K. Krzemienia [45], M. Komędzy [35] i J. Korpak [41])

3.6. PRAWIDŁOWOŚCI ZMIAN SYSTEMÓW KORYTOWYCH POD WPŁYWEM REGULACJI KORYT

Zmiany systemów korytowych rozpoczęły się albo uległy przyspieszeniu synchronicznie z początkiem powstawania całych systemów regulacyjnych. Świadczy to o dominującej roli prac regulacyjnych w przekształcaniu koryt [42].

Przykładowo, w przypadku koryt Białego Dunajca, Mszanki i Porębianki zmiany ich systemów (polegające na przekształcaniu przebiegu wielonurtowego w jednonurtowy, zwężaniu i pogłębianiu koryt, rozcinaniu coraz dłuższych odcinków dna do litej skały, wzroście liczby i powierzchni form erozyjnych i wzroście morfologicznej roli procesu erozji) rozpoczęły się ok. 1960 r. W tym samym czasie zaczęły powstawać w tych korytach całe systemy regulacyjne. Największe i najszybsze zmiany zaszły do ok. 1975 r., a zatem w okresie powstawania takich budowli hydrotechnicznych, które powodują największe przeobrażenia koryt (ostrogi, kierownice, jazy, zapory przeciwrumowiskowe).

Mniejszą rolę w przekształcaniu koryt odgrywały [40, 42]:

1. Zmiany pokrycia terenu i użytkowania ziemi w zlewni

Od początku drugiej połowy XX w. następuje w polskich Karpatach stopniowa zamiana gruntów ornych na użytki zielone [27]. Proces ten został znacznie przyspieszony po 1989 r. w efekcie transformacji systemu politycznego. W nowych warunkach gospodarczo-ekonomicznych uprawa roli okazała się nieopłacalna, zwłaszcza w trudnych warunkach przyrodniczych Karpat. Większe zadarnienie stoków (a lokalnie ich zalesienie) stało się przyczyną zmiany stosunków wodnych w zlewni. Lasy i użytki zielone charakteryzują się dużymi zdolnościami retencyjnymi. W wyniku wzrostu ich powierzchni znacznie zmniejszony został spływ wód opadowych i roztopowych do koryt. Zmniejszenie powierzchni gruntów ornych, a zwłaszcza uprawy roślin okopowych, spowodowało dużą redukcję splukiwania materiału zwietrzelinowego do koryt. Przyczyniły się do tego również zarastanie nieużywanymi dróg polnych oraz zaniechanie orki zgodnie z nachyleniem stoków i terasowanie stoków. Niedociążone rzeki pogłębiały swoje koryta, a większość ramion bocznych przestało funkcjonować.

2. Eksploatacja rumowiska korytowego

Eksploatacja rumowiska z koryt rzek w Karpatach prowadzona była prawdopodobnie od początku historii osadnictwa w tych górach. Jej wyjątkowe nasilenie przypada na lata 1950-1970, kiedy w związku z rozwojem budownictwa i drogownictwa żwir pobierano na skalę przemysłową. Pobór materiału z dna powoduje zachwianie równowagi pomiędzy ilością rumowiska a zdolnością transportową rzek. Tempo eksploatacji i ilość wydobytego rumowiska są przeważnie nieporównywalnie większe niż tempo i wielkość dostawy materiału z wyższych partii koryta i ze zlewni [70]. Niedociążone rzeki skierowują nadwyżkę energii na erodowanie koryta. Erozja postępuje w górę i w dół biegu rzeki. Erozję wsteczną indukuje lokalne zwiększenie spadku dna w miejscu eksploatacji rumowiska. Postępuje ona w górę rzeki, obejmując zasięgiem odcinki nawet kilkukilometrowej długości i wkraczając w koryta dopływów bocznych [36]. Materiał transportowany z wyżej położonych odcinków koryta deponowany jest w poeksploatacyjnych zagłębieniach. Poniżej nich w rzece brakuje materiału, więc dla jego pozyskania eroduje ona dno i brzegi koryta.

Olbrzymie zmiany dokonywały się już podczas przeprowadzania prac regulacyjnych, gdyż wymagały tego same projekty. Zgodnie z nimi koryta były prostowane i zwężane, wykonywano też przekopy. Wtedy doszło do największych zmian w przebiegu koryt, a wiele odcinków skrócono lub przekształcono z roztokowych w kręte lub proste. Znacznie zmniejszyły się wtedy wartości wskaźników krętości i liczba koryt bocznych. Po uregulowaniu zmiany w układzie poziomym zachodziły w minimalnym stopniu.

Podczas prac regulacyjnych nie tylko zmieniano koryta w poziomie, ale również w pionie. Dna zrównywano spychaczami, przez co zaburzano ich strukturę, likwidowano wszelkie formy i nierówności i pogłębiano je. Mechaniczne zwężenie koryt i zniszczenie obrukowania dna inicjowało dalsze pogłębianie.

Tendencje rozwoju wszystkich koryt karpackich są podobne i związane przede wszystkim z radykalną redukcją ilości dostępnego do transportu materiału.

Parametry tras regulacyjnych nie są „dostosowane” do energii rzeki. Zmiany zachodzące w korytach uregulowanych są konsekwencją wykształcania przez rzekę nowego profilu równowagi po zaburzeniu stabilności jej systemu. Ponieważ większość regulacji doprowadza do zwiększenia spadku koryta, naturalnym „dążeniem” rzeki jest jego zmniejszenie. W pierwszym okresie po ingerencji następuje zwykle pogłębianie koryta na skutek działania procesów erozji wglębnej i wstecznej. Najszybsze jest tempo tych procesów zaraz po przeprowadzeniu prac, a potem stopniowo ono „wygasa”. Bardzo duży wpływ na ich przebieg mają powodzie, gdyż w ich efekcie może dojść do ponownego przyspieszenia erozji lub nawet do zmiany dominującego procesu. Ten drugi przypadek występuje wtedy, gdy wody wezbraniowe spowodują rozcięcie aluwii i odsłonięcie podłoża skalnego (w którym dalsze pogłębianie zachodzi na znacznie mniejszą skalę) lub zniszczenie zabudowy chroniącej brzegi koryta. Wtedy zwykle następuje zmiana tendencji w przekształcaniu koryta, w którym dalsza redukcja spadku zachodzi przez migrację boczną i zwiększanie krętości.

Zdarza się, że erozja wglębna, wsteczna i boczna doprowadzają z czasem do zniszczenia zabudowy regulacyjnej. Wtedy koryta są zazwyczaj regulowane na nowo. Paradoksalnie, konsekwencją regulacji jest zatem kolejna regulacja.

Regulacje powodują przerwanie ciągłości systemu korytowego. Koryto zostaje podzielone na sztuczne odcinki. Brakuje wyraźnego podziału na strefę erozji, transportu i akumulacji, jak to zwykle się dzieje w korytach naturalnych. Im bardziej urozmaicona jest zabudowa regulacyjna, tym krótsze są odcinki koryt o odmiennym wykształceniu i tym bardziej skomplikowany jest sposób funkcjonowania koryt. Procesy korytowe zależą bardziej od sposobu regulacji niż od położenia w danym miejscu profilu podłużnego rzeki. Bardziej podobne pod względem sposobu funkcjonowania (typu procesu korytowego) są odcinki koryt położone w różnych miejscach profilu podłużnego, a nawet w różnych korytach, ale uregulowane w ten sam sposób, niż odcinki sąsiadujące ze sobą w profilu podłużnym rzeki.

Kształtowanie się koryt uregulowanych zależy nie tylko od rodzaju zastosowanych budowli hydrotechnicznych, ale też od wielu innych czynników, takich jak: historia

ewolucji danego koryta, miąższość aluwii, wykształcenie teras zalewowych, rodzaj użytkowania w zlewni itp.

Przy projektowaniu regulacji konieczne jest traktowanie koryta rzeki jako systemu. Nawet wtedy, gdy regulowany ma być pojedynczy odcinek koryta, należy rozpatrzyć jego rolę w całym profilu podłużnym rzeki. Wszystkie odcinki koryta są bowiem połączone wieloma współzależnościami w jeden system, a wiele niepowodzeń dotychczas stosowanych regulacji wynikało z traktowania koryta jako zbioru niezależnych odcinków.

3.7. OCENA REGULACJI HYDROTECHNICZNYCH I DZIAŁALNOŚĆ RENATURYZACYJNA

Rzeki od zawsze miały duże znaczenie gospodarcze. Stanowiły źródło wody pitnej, dostarczały żywność, a także umożliwiały rozwój rolnictwa, hodowli, transportu i handlu. Były zarówno czynnikiem rozwoju, jak i przyczyną wielu tragedii, związanych z nadmiarem i niedostatkiem wody. Dlatego od wielu stuleci rzeki były przez człowieka wykorzystywane, zmieniane i zagospodarowywane. W Polsce właściwe regulacje rzek na dużą skalę rozpoczęły się w XIX w. i prowadzone były regularnie do lat 80. XX w. Rzeki zmieniane były ze względu na ówczesne cele gospodarcze, a także potrzebę zapewnienia bezpieczeństwa. Niestety, pierwsze prace regulacyjne wykonywano w okresie, gdy zasady ich prowadzenia nie były w pełni ustalone. Nikt też nie zastanawiał się, jakie skutki w środowisku naturalnym może przynieść taka ingerencja. Obecny stan wiedzy pozwala stwierdzić, że regulacja techniczna ma negatywny wpływ na koryto rzeki [49].

Zasadniczym błędem prowadzonych regulacji było wykonanie zbyt wielu przekopów prostujących i koncentrujących koryta rzek i potoków. Działania takie prowadziły do naruszenia naturalnych warunków przepływu i transportu rumowiska, zarówno na zmienionym odcinku, jak i na odcinkach zlokalizowanych powyżej i poniżej. Były one również odczuwane w całej zlewni. Ingerencje takie skutkowały najczęściej gwałtownym zwiększeniem spadku, co prowadziło do wzrostu prędkości przepływu i nadmiernej erozji dennej. Efektem tego jest obniżenie poziomu wód gruntowych i przesuszenie dna doliny. Kolejnym nieprzewidzianym skutkiem zmian w rzece jest wzrost zagrożenia powodziowego na terenach znajdujących się poniżej odcinka uregulowanego.

Uregulowana rzeka zmieniła również świadomość okolicznych mieszkańców, ponieważ stała się pozornie bezpieczna. Spowodowało to zbliżenie zabudowy do koryta cieku i zawężenie terenów zalewowych, czego efektem stał się wzrost zagrożenia erozją boczną na terenach zagospodarowanych. Dodatkowo wysokie brzegi pogłębionego koryta zapobiegają wylewaniu się wód na terasę zalewową podczas wezbrań. Ma to konsekwencje dla gospodarki człowieka w postaci redukcji żywności terenów nadrzecznych. Wymierają cenne przyrodniczo lasy łęgowe, które do rozwoju potrzebują cyklicznych wylewów. Pogłębione koryto, często rozcięte do litej skały, jest również

jednorodne morfologicznie, co stwarza niekorzystne warunki dla życia organizmów żyjących w wodzie, zwłaszcza ryb i dużych bezkręgowców bentosowych [34].

Nadal na wielu odcinkach cieków działania regulacyjne są koniecznością ze względu na bliską infrastrukturę, gdzie szybkie i bezpieczne odprowadzenie wód jest priorytetem. W wielu miejscach podejmowane przez dziesięciolecia prace regulacyjne były jednak niepotrzebne, a nawet szkodliwe. Zupełnie zbędne wydaje się z dzisiejszej perspektywy regulowanie odcinków rzek płynących w obszarach zalesionych czy niezagospodarowanych. Wielkie wezbrania na tych odcinkach nie przynoszą znaczących szkód gospodarczych. Pozwalając rzece w takich miejscach na swobodne kształtowanie koryta i występowanie z brzegów podczas wezbrań, redukujemy skutki powodzi w odcinkach niżej leżących.

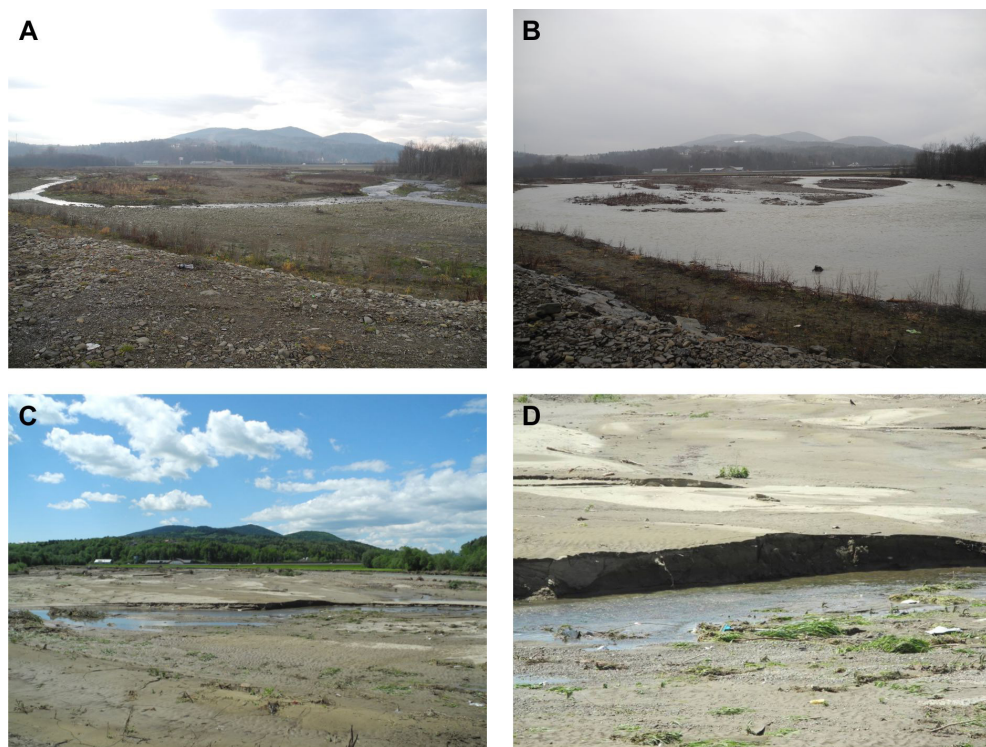
W wielu przypadkach regulacje nie przyniosły zatem spodziewanych efektów, natomiast pogorszyły jakość ekologiczną rzek, na którą zaczęto zwracać uwagę w ostatnich latach. W celu poprawy stanu ekologicznego potrzebne jest zupełnie nowe podejście do zarządzania zasobami wodnymi. Przyznano, że rzeki i potoki to element środowiska i krajobrazu, a przede wszystkim przestrzeń życiowa wielu gatunków



Rys. 3.39. Korytarz swobodnej migracji w dolinie Raby, utworzony samoistnie na skutek zniszczenia umocnień brzegowych i zabudowy podłużnej koryta podczas wielkiego wezbrania w 2010 r.: A) uregulowany odcinek koryta przed powodzią, B) korytarz swobodnej migracji po powodzi

fauny i flory. Dlatego też od blisko 30 lat w różnych częściach świata podejmuje się działania renaturyzacyjne, mające na celu przywrócenie ciągłości ruchu wody i transportu rumowiska w korytach rzecznych (np. [26, 101]). Ponieważ ingerencje takie są stosunkowo młode, nie zawsze ich efekty odpowiadają wyobrażeniom i oczekiwaniom projektantów.

Współcześnie promuje się metody opóźnienia odpływu wód rzecznych, mające na celu zmniejszenie zagrożenia powodziowego w dnach dolin [64]. Rozwiązania poszukiwane są w całej zlewni, a polegają na zwiększaniu zdolności retencyjnych zlewni, np. w efekcie zalesienia stoków. Tam, gdzie to możliwe, proponuje się likwidację wałów przeciwpowodziowych i umocnień brzegowych. W wielu miejscach są one bezcelowe i nie chronią niczego cennego [21]. Utworzenie w ten sposób „korytarza swobodnej migracji”, gdzie rzeka może się swobodnie rozlewać i kształtować swoje koryto, jest możliwe zwłaszcza w szerokich, niezamieszkałych dnach dolin [104] (rys. 3.39). W zależności od stanu wody rzeka zajmuje w takiej strefie mniej lub więcej przestrzeni (fot. 3.16A i B). Taki korytarz swobodnej migracji dodatkowo spowalnia odpływ wielkich wód oraz stanowi miejsce depozycji osadów powodziowych (fot. 3.16C i D).



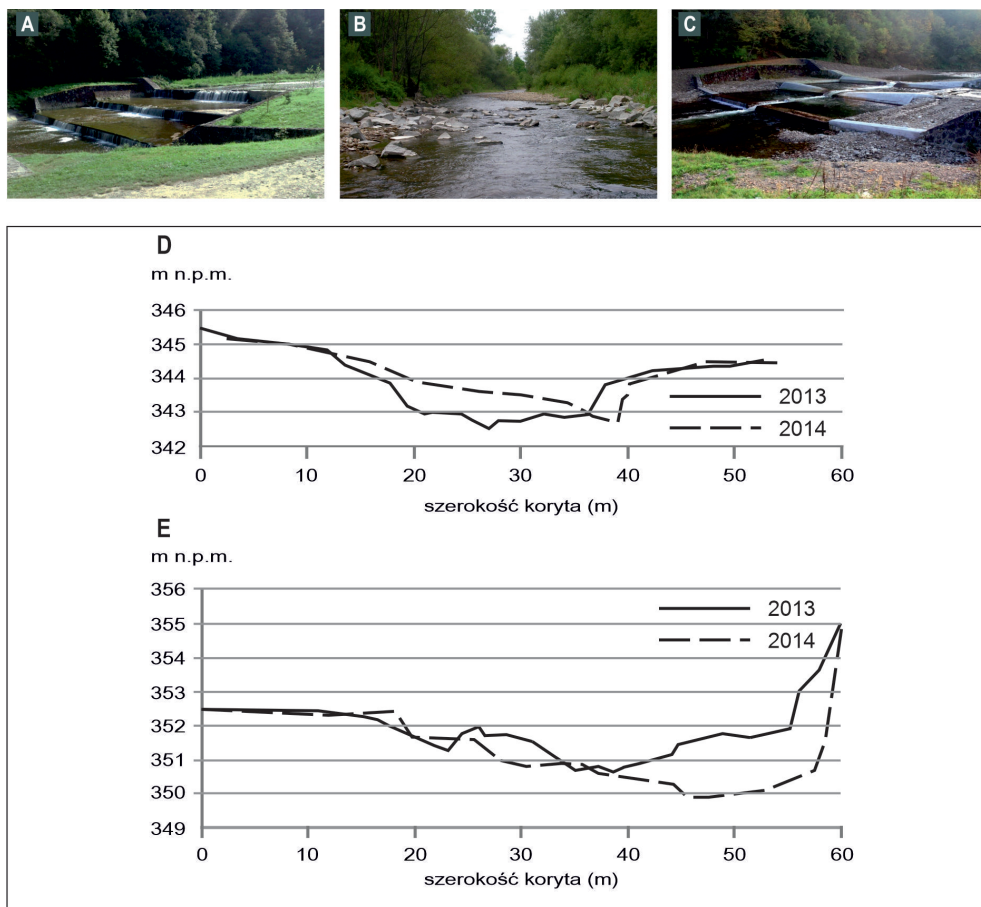
Fot. 3.16. Funkcjonowanie korytarza swobodnej migracji w dolinie Raby podczas różnych stanów wód: A) przy niskim stanie wody, B) przy wysokim stanie wody, C) podczas wielkiego wezbrania, D) depozycja osadów powodziowych

Występująca powszechnie w korytach rzek i potoków górskich różnej wielkości korekcja stopniowa jest systemem regulacji, ograniczającym ciągłość transportu materiału rzecznoego i stanowiącym nieprzekraczalną barierę dla ryb. Jednym ze stosowanych sposobów renaturyzacyjnych w tak zabudowanych odcinkach jest usuwanie zarówno samych stopni, jak i umocnień brzegowych pomiędzy nimi [101]. Tam, gdzie zabudowa znajduje się blisko koryta, takie rozwiązanie jest niemożliwe. Częściej stosowanym sposobem poprawy jakości ekologicznej rzeki uregulowanej sekwencją stopni jest ich zamiana na sztuczne bystrza [69]. Są to konstrukcje składające się z płyty spadowej o nachyleniu od 1:3 do 1:30, zbudowane najczęściej z kamienia łamanego o dużych średnicach, przekraczających maksymalne frakcje ziaren w korycie (rys. 3.40B). Redukują one spadek dna koryta, nie stanowiąc jednocześnie bariery dla transportu materiału i dla organizmów wodnych. Dodatkowo naśladują naturalne bystrza w korycie, wpływając korzystnie na urozmaicenie warunków morfologicznych i poprawiając warunki tlenowe w rzece [21, 48, 69].

Kolejne konstrukcje hydrotechniczne, powodujące znaczne zmiany w środowisku naturalnym, to różnego rodzaju zapory czy jazy piętrzące wodę. Budowle takie przegradzają rzekę na całej szerokości koryta (budowle mniejsze typu jaz) lub na całej szerokości doliny (wysokie zapory tworzące zbiornik retencyjny). Zapory powodują olbrzymie zmiany reżimu rzek górskich. Ich podstawową wadą jest zatrzymywanie większości rumowiska, również tego zawieszonoego, którego transport nie powinien być ograniczony. W ostatnich latach pojawiają się modernizacje istniejących obiektów, które mają złagodzić oddziaływanie budowli na koryto rzeki lub potoku. Powstaje też na świecie wiele projektów likwidacji lub obniżenia istniejących zapór różnej wielkości [23]. Problemem w tego typu działaniach może być skala i tempo przemieszczania osadów z czaszy zapory do odcinka poniżej niej oraz pogłębianie odcinka leżącego powyżej zapory [16].

Wiele potoków górskich zabudowanych jest za pomocą zapór przeciwrumowiskowych, które miały za zadanie zatrzymanie intensywnego transportu rumowiska i ochronę obiektów leżących poniżej budowli. Niestety, zatrzymanie rumowiska doprowadziło na tych odcinkach do gwałtownej erozji dennej. Obecnie powstają konstrukcje zapór przeciwrumowiskowych, które nie zatrzymują całego rumowiska wleczonoego, a tylko kontrolują przebieg jego przemieszczania przez sortowanie materiału, zatrzymywanie pni drzew lub regulację prędkości transportu [5]. Innym sposobem na poprawę stanu ekologicznego rzek przegradzonych zaporą przeciwrumowiskową jest uzupełnianie rumowiskiem koryta poniżej konstrukcji [38]. Niekiedy obiekty te usuwa się z koryta lub poddaje modernizacji tak, aby przywrócić ciągłość transportu materiału.

Studium przypadku. Projekt obniżenia i modernizacji zapory przeciwrumowiskowej został przeprowadzony w 2014 r. na potoku Krzczonówka, będącym dopływem Raby (projekt o nazwie „Tarliska Górnej Raby”). Wcześniej, w 2013 r., na odcinku poniżej niej wybudowano 12 sztucznych bystrzy (rys. 3.40A-C). Ich zadaniem było zmniejszenie spadku koryta i zatrzymanie w korycie rumowiska, które w założeniu



Rys. 3.40. Wpływ obniżenia zapory przeciwrumowiskowej i przejścia wezbrania na zmiany w morfologii koryta: A) zapora przeciwrumowiskowa przed obniżeniem, B) sztuczne bystrze – jedna z 12 „przyjaznych naturze” budowli poprzecznych, wybudowanych w 2013 r. poniżej zapory na Krzczonówce, C) obniżona zapora przeciwrumowiskowa w 2014 r., D) depozycja poniżej zapory, E) erozja wsteczna i boczna powyżej zapory (fot. J. Korpak)

projektu miało być tu przez lata transportowane z czaszy zmodernizowanej zapory. W trakcie prowadzenia prac na zaporze nastąpił ekstremalny przepływ, w wyniku którego całość rumowiska z czaszy przedostała się przez obiekt w ciągu jednej nocy [43, 48]. Koryto poniżej zapory wraz ze sztucznymi bystrzami zostało zasypane materiałem na odcinku ok. 1,2 km. Wielkość depozycji wynosiła tu od 0,21 m do 0,91 m i ogólnie zmniejszała się z biegiem rzeki (rys. 3.40D). Poniżej tego odcinka, tam gdzie materiał z czaszy nie dotarł, koryto doświadczyło erozji, a sztuczne bystrza zostały uszkodzone lub rozmyte. Powyżej zapory, na skutek obniżenia lokalnej bazy erozyjnej oraz braku materiału do transportu, widoczne są ślady erozji wgłębnej i bocznej (rys. 3.40E). W obrębie czaszy zapory dno koryta obniżyło się o 2 m.

Za przykład pozytywnych zmian w podejściu do morfologii koryt rzecznych może służyć projekt „Przywrócenie drożności korytarza ekologicznego rzeki Wisłoki i jej dopływów”, który obejmował kompleksowe działania przyrodnicze i inwestycyjne, mające na celu przywrócenie ciągłości korytarza ekologicznego rzek, odtworzenie siedlisk dla żwirolubnych gatunków ryb oraz wsparcie zagrożonych populacji ryb dwuśrodowiskowych przez zarybienia. Efekt realizacji tych działań to odtworzenie korytarza ekologicznego rzeki Wisłoki o długości 75 km, zmniejszenie fragmentacji zlewni oraz przywrócenie integralności obszaru NATURA 2000 „Wisłoka z Dopływami” [47].

Podjęte na świecie działania renaturyzacyjne mają szansę powodzenia pod warunkiem zrozumienia kilku istotnych kwestii. Po pierwsze, nie ma możliwości przywrócenia rzece stanu sprzed dokonanych w niej ingerencji, ponieważ w międzyczasie ulegają zmianie uwarunkowania środowiskowo-gospodarcze w całej zlewni [17]. Monitoring dotychczas przeprowadzonych projektów pokazuje, że właściwa renaturyzacja rzeki musi być poprzedzona gruntowym rozpoznaniem procesów fizycznych i ekologicznych w zlewni oraz interakcji zachodzących między nimi. Musi uwzględniać konieczność zachowania ciągłości podłużnej i poprzecznej systemu fluwialnego [17]. Kluczowe jest rozpoznanie funkcjonowania danego cieką i zbadanie ewolucji jego rozwoju w przeszłości. Badania powinny być prowadzone w skali nie odcinka, ale całej zlewni. Tak kompleksowe podejście do renaturyzacji wymaga współpracy badaczy z wielu dyscyplin naukowych z inżynierami praktykami [101].

4. HYDROMORFOLOGIA JAKO WSKAŹNIK JAKOŚCI EKOLOGICZNEJ RZEK

4.1. RAMOWA DYREKTYWA WODNA – STAN WÓD PŁYNĄCYCH

Zgodnie z zapisami Dyrektywy 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r., ustanawiającej ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej, czyli tzw. Ramowej Dyrektywy Wodnej (RDW), państwa należące do Unii Europejskiej mają obowiązek monitorowania stanu wód „w sposób systematyczny i porównywalny w całej Wspólnocie”. Artykuł 8 RDW mówi, że „Państwa Członkowskie zapewniają opracowanie programów monitoringu stanu wód w celu ustanowienia spójnego i kompleksowego przeglądu stanu wód na każdym obszarze dorzecza, [...] dla wód powierzchniowych, takie programy obejmują stan ekologiczny i stan chemiczny oraz potencjał ekologiczny” [76].

Stan ekologiczny to inaczej jakość struktury i funkcjonowania ekosystemu wodnego (Art. 2, pkt 21). Jest on określany dla naturalnych jednolitych części wód powierzchniowych. Dla wód sztucznych i silnie zmienionych określa się natomiast potencjał ekologiczny [58].

Jednolita część wód powierzchniowych (JCWP) to oddzielny i znaczący element wód powierzchniowych, stanowiący podstawową jednostkę gospodarowania wodami.

Sztuczna część wód (SCW) to część wód powierzchniowych, powstała na skutek działalności człowieka.

Silnie zmieniona część wód (SZCW) to część wód powierzchniowych, których charakter został znacznie zmieniony na skutek fizycznego oddziaływania człowieka [76].

W celu określenia stanu części wód powierzchniowych należy ustalić jej stan (lub potencjał) ekologiczny oraz stan chemiczny. Gorszy z tych dwóch stanów decyduje o ogólnym stanie wód. Wystarczy, że jeden ze stanów jest poniżej dobrego, a stan wód oceniony zostanie jako zły.

4.1.1. STAN (POTENCJAŁ) EKOLOGICZNY

Zarówno stan, jak i potencjał ekologiczny wód (naturalnych, sztucznych i silnie zmienionych) obejmuje pięć klas (Załącznik V do RDW, pkt 1.4.2 (i)):

- stan bardzo dobry,
- stan dobry,
- stan umiarkowany,
- stan słaby,
- stan zły.

Dyrektywa (Załącznik V, pkt 1.2) definiuje stany: bardzo dobry i dobry w sposób następujący:

– **stan bardzo dobry**

Wartości elementów jakości biologicznej cieków odpowiadają tym, jakie zwykle towarzyszą ciekowi tego typu w niezakłóconych warunkach i nie wykazują żadnych bądź wykazują tylko minimalne ślady zakłóceń. Są to warunki i zbiorowości charakterystyczne dla **danego typu cieków**. Brak lub istnieją bardzo niewielkie zmiany antropogeniczne wartości fizykochemicznych i hydromorfologicznych elementów jakości wód cieków danego typu w stosunku do tych, jakie zwykle towarzyszą ciekowi tego typu w niezakłóconych warunkach.

– **stan dobry**

Wartości elementów jakości biologicznej cieków danego typu wykazują niskie poziomy degradacji, wynikające z działalności człowieka, ale odchylają się niewiele od wartości, jakie zwykle towarzyszą ciekowi tego typu w niezakłóconych warunkach.

Jakość struktury i funkcjonowania ekosystemu wodnego (stan ekologiczny) odzwierciedlona jest zatem w stanie elementów biologicznych, który wyraża się:

- składem i liczebnością flory wodnej,
- składem i liczebnością bezkręgowców bentosu,
- składem, liczebnością i strukturą wiekową ichtiofauny.

Stan elementów biotycznych zależy od czynników abiotycznych, które obejmują **elementy fizykochemiczne** oraz **hydromorfologiczne**. Te ostatnie charakterystyzowane są przez:

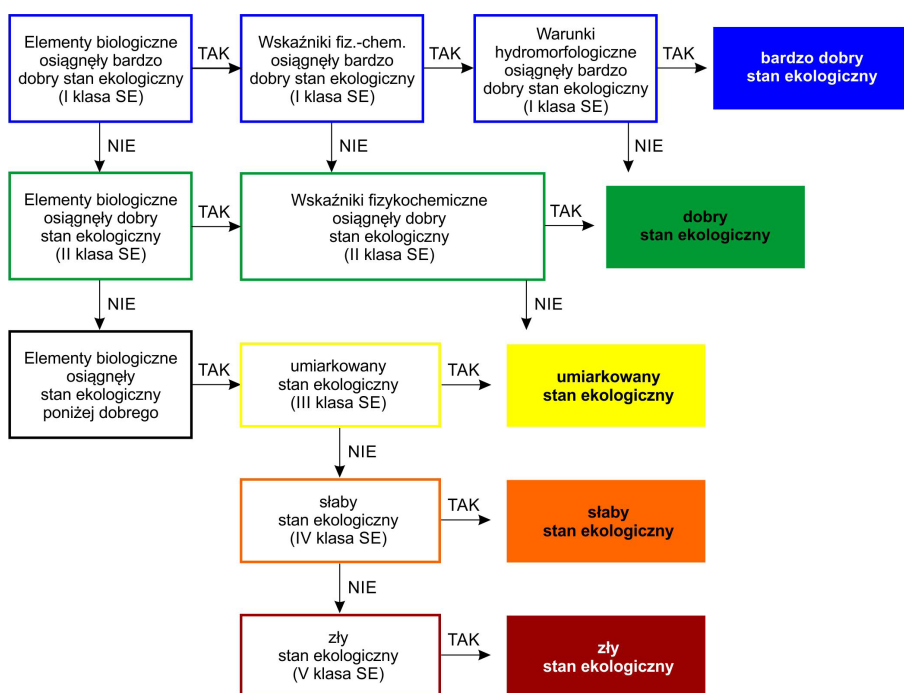
- reżim hydrologiczny,
- ciągłość rzeki,
- warunki morfologiczne.

Zgodnie z Ramową Dyrektywą Wodną obserwacje stanu elementów hydromorfologicznych służą jedynie potwierdzeniu bardzo dobrego stanu lub potencjału ekologicznego wód powierzchniowych (<http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/monitoring-wod>). Jeśli badania wykazują bardzo dobry stan elementów biologicznych i wspierających je elementów fizykochemicznych, a stan elementów hydromorfologicznych nie jest bardzo dobry, powoduje to obniżenie stanu ekologicznego wód. W sytuacji gdy stan ekologiczny został oceniony na podstawie elementów biologicznych i wspierających je elementów fizykochemicznych jako poniżej bardzo dobrego, stan elementów hydromorfologicznych nie ma wpływu na ocenę stanu ekologicznego. Wtedy przyjmuje się, że stan ekologiczny odpowiada stanowi elementów biologicznych. Zasady powyższe ilustruje rysunek 4.1.

Załącznik V do RDW precyzuje bliżej, jak należy rozumieć wymienione elementy hydromorfologiczne. I tak, zgodnie z zapisami w tym dokumencie:

- reżim hydrologiczny określony jest przez ilość i dynamikę przepływu wód, a zatem przez wartości przepływów charakterystycznych oraz sekwencję ich występowania;
- ciągłość rzeki to cecha zapewniająca sprawność (funkcjonalność) korytarza ekologicznego, jakim jest rzeka wraz z terenami lądowymi od rzeki zależnymi; jest to zatem cecha umożliwiająca wędrówkę organizmów lotycznych wodnych oraz z wodą związanych, a także nieprzerwaną koegzystencję charakterystycznych gatunków flory;
- warunki morfologiczne, istotne z punktu widzenia jakości ekologicznej rzek, to zmienność głębokości i szerokości strumienia, struktura i skład podłoża oraz struktura strefy nadbrzeżnej.

Odpowiedni dla danej rzeki stan powyższych trzech elementów łącznie stwarza warunki życia dla fauny i flory właściwej dla danego typu cieku (oczywiście przy odpowiednim stanie fizykochemicznym wody). Na przykład urozmaicona struktura (morfologia) koryta, przy odpowiednim zasilaniu pod względem ilości i sekwencji przepływów, daje takie zróżnicowanie prędkości i głębokości, które jest jednym z warunków umożliwiających życie ichtiofauny na różnych etapach rozwoju ryb. Podobnie,



Rys. 4.1. Związek pomiędzy elementami abiotycznymi i biotycznymi, stanowiącymi o stanie wód (na podstawie: <http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/monitoring-wod>)

odpowiedni reżim hydrologiczny i odpowiednia struktura i skład podłoża są warunkami koniecznymi do życia charakterystycznych dla danego ciek bezkręgowców bentosu.

Przytoczone przykłady mają za zadanie pokazać, że wymienione trzy rodzaje elementów hydromorfologicznych stanowią jedną grupę wskaźników jakości ekologicznej. Po pierwsze, o stanie ekologicznym decydują łącznie, a po drugie – wzajemnie na siebie oddziałują.

4.1.2. STAN CHEMICZNY

Klasyfikacja stanu chemicznego obejmuje analizę zgodności ze środowiskowymi normami jakości, ustalonymi w artykule 16 Załącznika IX do RDW oraz na mocy innego właściwego prawodawstwa wspólnotowego, ustanawiającego środowiskowe normy jakości [58]. Według RDW dobry stan chemiczny to taki, którego osiągnięcie jest konieczne do osiągnięcia celów środowiskowych wód.

Substancje zanieczyszczające, które uwzględnia się w ocenie stanu chemicznego, to m.in. substancje priorytetowe w dziedzinie polityki wodnej, czyli substancje szczególnie niebezpieczne dla środowiska wodnego, których eliminacja powinna być priorytetem w polityce ochrony wód. Spis tych substancji znajduje się w Załączniku X do RDW. Są to przede wszystkim węglowodory (np. antracen, benzen) i metale ciężkie (np. nikiel, ołów, rtęć) oraz ich związki.

Zaznaczyć należy, że znaczna część parametrów fizykochemicznych służy ocenie stanu ekologicznego, a nie chemicznego wód.

4.2. CELE HYDROMORFOLOGICZNEJ WALORYZACJI RZEK

Hydromorfologiczna ocena rzek pod kątem ich ekologicznej funkcjonalności dokonywana jest w wielu krajach europejskich (i pozaeuropejskich) od dawna. Działalność ta znacznie wyprzedziła aktywność związaną z wdrażaniem Ramowej Dyrektywy Wodnej w Europie.

Początkowo oceny dokonywane były w innych celach niż te zapisane w RDW, choć ostatecznie również służyły zachowaniu sprawności ekologicznej cieków. Związane były one z planowaniem działań inżynierskich, które bezpośrednio zmierzały do przywrócenia ekologicznej sprawności wód, bądź z zaspokajaniem potrzeb użytkowników w sposób, który nie powodowałby pogorszenia tej sprawności.

Obecnie ocena hydromorfologiczna wykorzystywana jest do:

- **realizacji procedur** wymaganych przez RDW, takich jak np. określenie warunków referencyjnych, ocena stanu ekologicznego przez stan hydromorfologiczny itp.,
- **planowania działań** stanowiących elementy zarządzania zlewnią (np. renaturyzacja rzek, ochrona przeciwpowodziowa itp.).

4.3. METODY OCENY MORFOLOGICZNEJ I ICH ZASTOSOWANIE

4.3.1. WPROWADZENIE

Nie istnieje uniwersalna metoda oceny hydromorfologicznej rzek, która sprawdziłaby się w przypadku każdej rzeki na terenie Unii Europejskiej. Poszczególne kraje członkowskie musiały opracować swoje własne metody, dostosowane do specyficznych warunków systemów fluwialnych występujących na ich obszarze (np. [32, 75, 77]). Europejski Komitet Normalizacyjny CEN (Comité Européen de Normalisation) opracował jedynie normę EN 14614:2004, zawierającą wytyczne, jakim ma odpowiadać hydromorfologiczna metoda oceny rzek [11, 19]. Polskim odpowiednikiem tej normy jest norma PN-EN-14614:2008 (Jakość Wody – Wytyczne do oceny hydromorfologicznych cech rzek) (tab. 4.1).

Stosowane w różnych krajach metody różnią się między sobą poziomem szczegółowości i sposobem określania wartości przyjętych wskaźników oceny. Ogólnie można wyróżnić dwie grupy metod:

- metody „przy biurku”, bazujące na dostępnej informacji, gromadzonej w różnych instytucjach (mapy w różnych skalach, ortofotomapy, wykazy obiektów hydrotechnicznych itp.),
- metody polowe, wymagające kartowania, czyli inwentaryzacji terenowej.

W Polsce do niedawna nie było obowiązującej metody oceny hydromorfologicznej rzek. W różnych regionach stosowano różne metody autorskie (np. [31, 59]) lub zapożyczone z innych krajów. Przeważnie wykorzystywano nieznacznie zmodyfikowaną i dostosowaną do warunków polskich rzek metodę River Habitat Survey, opracowaną w Wielkiej Brytanii [51, 74, 89-92].

W 2016 r. na zamówienie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ) przygotowana została metoda oceny rzek, oparta na Hydromorfologicznym Indeksie Rzecznym (HIR). Jest ona wykorzystywana przez służby i osoby odpowiedzialne za obserwacje hydromorfologicznych elementów jakości wód. Może też znaleźć zastosowanie do innych celów komercyjnych i naukowych [88].

Metoda ta jest zgodna z normą PN-EN-14614:2008, a zatem pozwala na ocenę wszystkich wymaganych elementów charakterystycznych dla trzech stref podlegających ocenie: koryta rzecznoego, brzegów rzeki wraz ze strefą nadbrzeżną oraz terasy zalewowej (tab. 4.1).

Tabela 4.1

Wykaz elementów oceny hydromorfologicznych cech rzek wg normy PN-EN-14614:2008 (wg [88], zmienione)

Lp.	Kategorie oceny	Cechy ogólne
KORYTO		
1.	Geometria koryta	Zarys – krętość, roztoki, przekształcenia zarysu
		Przekrój podłużny – różnicowanie, spadek
		Przekrój poprzeczny – profile brzegu, głębokość, szerokość
2.	Podłoża	Sztuczne typy podłoży
		Naturalne typy podłoży
		Zagospodarowanie / wpływ zlewni – stopień zamulenia lub zagęszczenia
3.	Roślinność koryta i organiczne szczątki	Postać strukturalna obecnych makrofitów – typy roślinności w korycie
		Szczątki liści i drewna – typ i rodzaj materiału
		Zabiegi dotyczące roślinności – wycinanie
4.	Erozja / charakter depozycji	Cechy w korycie i u podstawy brzegu – odsypiska, wyspy, podcięcia brzegowe
5.	Przepływ	Modele przepływu – typy nurtu
		Modele przepływu – wpływ budowli na przepływ
		Cechy przepływu – plosa, bystrza, odcinki o przepływie laminarnym i wartkim nurcie
		Reżim odpływu – odprowadzenia, przerzuty wody, zrzuty z zapór
6.	Wpływ sztucznych struktur na podłużną ciągłość	Sztuczne bariery ograniczające ciągłość przepływu, transport rumowiska i migracje organizmów – budowle piętrzące, przepusty
BRZEGI RZEKI / STREFA NADBRZEŻNA		
7.	Struktura brzegu i modyfikacje	Materiały tworzące brzeg – rodzaje
		Typy umocnień / ochrona brzegów – rodzaje
TERASA ZALEWOWA		
9.	Wykorzystanie terenu przyległego i cechy z tym związane	Typy użytkowania terenu, zasięg i rodzaje zagospodarowania
		Rodzaje otwartych wód / cechy obszaru podmokłego – cechy dotyczące terasy zalewowej
		Rodzaje otwartych wód / cechy obszaru podmokłego – cechy dotyczące wód nienaturalnych (kanały, stawy, żwirownie)
9.	Stopień bocznej łączności rzeki z terasą zalewową, możliwość zmiany położenia koryta rzecznego	Stopień ograniczenia potencjalnej mobilności koryta rzecznego i przepływu wody w poprzek terasy zalewowej – obwałowania
		Ciągłość terasy zalewowej

4.3.2. HIR – HYDROMORFOLOGICZNY INDEKS RZECZNY

Metoda oparta na HIR należy do grupy metod terenowych. Badania terenowe muszą być uzupełnione o analizę kameralną dostępnych materiałów kartograficznych, danych GIS i innych materiałów źródłowych [88]. W metodzie tej uwzględniono odrębne procedury terenowe dla rzek małych i średnich (o szerokości koryta ≤ 30 m) oraz dla rzek dużych (o szerokości koryta > 30 m).

Oceny stanu hydromorfologicznego cieką dokonuje się, w myśl RDW, dla poszczególnych jednolitych części wód powierzchniowych (JCWP).

W metodzie opartej na HIR, aby ocenić stan danej jednolitej części wód powierzchniowych, wybiera się najpierw w jej obrębie od jednego do trzech reprezentatywnych odcinków badawczych cieką, w zależności od zróżnicowania użytkowania terenu w dolinie oraz od szerokości koryta. Pojedynczy odcinek badawczy cieką ma długość 500 m (w przypadku koryt o szerokości ≤ 30 m) lub 1000 m (w przypadku koryt o szerokości > 30 m).

Badanie danego odcinka obejmuje ocenę trzech stref: koryta rzeki, strefy przybrzeżnej oraz doliny rzecznej [88]. Odbywa się ono w dwóch etapach.

W **pierwszym etapie** prowadzone są badania w 10 profilach kontrolnych, rozmieszczonych równomiernie na długości odcinka badawczego. W każdym profilu kontrolnym uwzględnia się parametry abiotyczne skarp i dna koryta (np. typ nurtu, rodzaj substratu, rodzaj erozji i akumulacji rumowiska czy typy przekształceń antropogenicznych). Rejestracji cech dokonuje się w transekcie o szerokości 1 m lub 10 m (dla rzek o szerokości koryt odpowiednio ≤ 30 m i > 30 m). Dodatkowo dla rzek wszystkich typów w transektach o szerokości 10 m określana jest struktura roślinności wodnej i przybrzeżnej oraz użytkowanie strefy przybrzeżnej o szerokości 5 m lub 10 m (rys. 4.2).

Drugi etap obejmuje opis syntetyczny całego 500- lub 1000-metrowego odcinka badawczego. Uwzględnia on wszystkie formy morfologiczne i przekształcenia, które nie zostały zarejestrowane w pierwszym etapie badań. Dodatkowo opis uzupełnia się o: jednostki hydromorfologiczne, przekroje poprzeczne brzegów, wymiary koryta, budowle hydrotechniczne, zadrzewienia i cechy im towarzyszące, szerokość nieużytkowanej strefy przybrzeżnej, typ i użytkowanie doliny (w pasie o szerokości 50 m lub 100 m, w zależności od szerokości koryta) (rys. 4.2) oraz łączność rzeki z doliną [88].

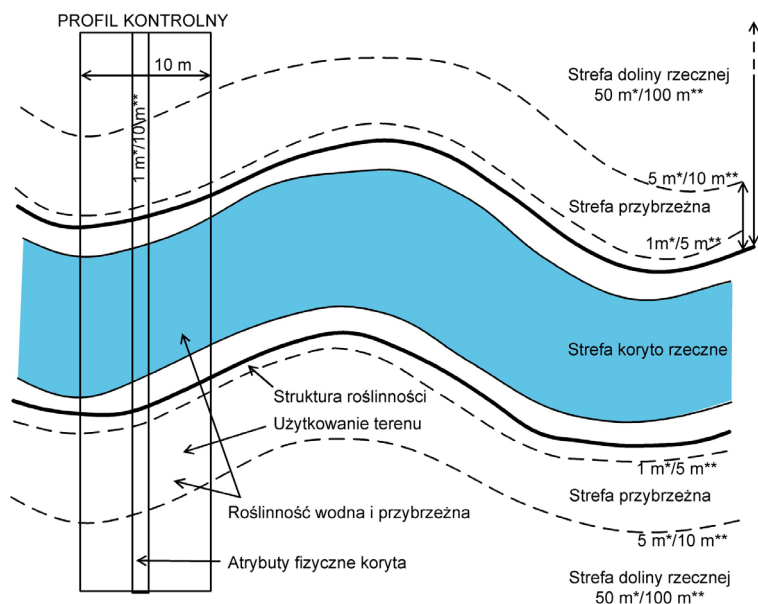
Wszystkie dane notuje się w protokole terenowym i na ich podstawie oblicza się dwa wskaźniki [88]:

- wskaźnik różnorodności hydromorfologicznej (WRH), który opisuje stopień heterogeniczności naturalnych elementów cieką i doliny rzecznej,
- wskaźnik przekształcenia hydromorfologii (WPH), który określa stopień antropogenicznych przekształceń morfologii cieką.

Na podstawie tych dwóch wskaźników wyliczany jest Hydromorfologiczny Indeks Rzeczny (HIR), którego wartość wynosi od 0 do 1. Wartości bliższe 1 oznaczają

stan hydromorfologiczny zbliżony do warunków referencyjnych, natomiast bliższe 0 – słaby lub zły stan hydromorfologiczny.

Warunki referencyjne cechuje duża heterogeniczność siedliska, przewaga terenów naturalnych w dolinie rzecznej oraz brak antropogenicznych przekształceń koryta. Warunki takie są określane odrębnie dla różnych typów koryt.



Rys. 4.2. Rzut pionowy transektu koryta w profilu kontrolnym oraz wymiary stref w obrębie doliny, podlegających ocenie w metodzie opartej na HIR (wg [88])

Na potrzeby oceny wód w Polsce wyróżniono pięć grup cieków (H1-H5):

1. H1 – małe i średnie rzeki wyżynne oraz górskie o szerokości koryta ≤ 30 m,
2. H2 – małe i średnie rzeki nizinne, inne niż w dolinach zatorfionych, o szerokości koryta ≤ 30 m,
3. H3 – małe i średnie rzeki nizinne w dolinach zatorfionych o szerokości koryta ≤ 30 m,
4. H4 – duże rzeki o szerokości koryta > 30 m,
5. H5 – sztuczne kanały o statusie sztucznych części wód.

Dla poszczególnych grup cieków zaproponowano wartości graniczne wskaźnika – multimetriksu HIR – dla pięciu klas stanu hydromorfologicznego (tab. 4.2). Dzięki temu, znając wartość HIR dla danej jednolitej części wód, jesteśmy w stanie określić jej stan hydromorfologiczny zgodnie z wymaganiami Ramowej Dyrektywy Wodnej.

Tabela 4.2

Wartości graniczne multimetriksu HIR dla pięciu klas stanu hydromorfologicznego (wg [88])

Typ rzeki	Status JCWP	Szerokość koryta	Typ wysokościowy	Zatorfienie doliny	Typy biotyczne	Wartości graniczne multimetriksu HIR właściwe dla klasy				
						I	II	III	IV	V
H1	naturalne i silnie zmienione	≤30 m	wyżynne i górskie	-	1-15 ¹	≥0,824	≥0,715	≥0,600	≥0,485	<0,485
H2			nizinne	nie	16-20, 22, 25 ¹	≥0,761	≥0,639	≥0,500	≥0,375	<0,375
H3				tak	23, 24, 26 ¹	≥0,725	≥0,592	≥0,459	≥0,326	<0,326
H4		>30 m	nizinne ²	-	21 ³	≥0,728	≥0,613	≥0,486	≥0,359	<0,359
H5	sztuczne ⁴	-	-	-	0	≥0,513	≥0,420	≥0,342	≥0,253	<0,253

¹ z wyłączeniem JCWP o szerokości koryta > 30 m² obejmuje też JCWP o szerokości koryta > 30 m, zlokalizowane w innych typach abiotycznych rzek³ obejmuje też pozostałe JCWP o szerokości koryta > 30 m⁴ nie obejmuje sztucznych zbiorników zaporowych, dla których utworzono JCWP rzeczne

4.4. OCENA STANU EKOLOGICZNEGO RZEK POLSKI

4.4.1. WPROWADZENIE

Jakość ekologiczna cieków w Polsce do niedawna szacowana była incydentalnie w celach poznawczych, badawczych, a czasem w celu uzyskania merytorycznych podstaw określonych działań inżynierskich. Stosowane metody były różne i niezwiązane z określonymi standardami.

W momencie przystąpienia Polski do Unii Europejskiej nasz kraj został zobowiązany do wdrożenia Ramowej Dyrektywy Wodnej. Jednym z głównych zadań było uruchomienie działań, które spowodują, że rzeki państw członkowskich UE wykazywać będą co najmniej dobry stan ekologiczny. Podstawą do opracowania planów i programów działań, mających doprowadzić do założonego celu, jest ocena aktualnego stanu ekologicznego rzek.

Badania i ocena jakości wód powierzchniowych w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska wynika z art. 349, ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne [66]. Zgodnie z ust. 3 tego artykułu badania jakości wód powierzchniowych należą do kompetencji właściwego organu Inspekcji Ochrony Środowiska.

W ramach monitoringu jakości wód powierzchniowych realizowane są następujące zadania:

- badania i ocena stanu rzek, w tym zbiorników zaporowych,
- badania i ocena stanu jezior,

- badania i ocena jakości osadów dennych w rzekach i jeziorach,
- badania i ocena stanu wód przejściowych i przybrzeżnych,
- wdrażanie wymagań znowelizowanej dyrektywy 2008/105/WE w sprawie środowiskowych norm jakości w dziedzinie polityki wodnej.

Przeprowadzenie pełnej, szczegółowej oceny wymagało wielu prac przygotowawczych. Należało do nich m.in. wyznaczenie jednolitych części wód powierzchniowych, wyróżnienie typów cieków, ustalenie warunków referencyjnych dla wszystkich typów cieków oraz określenie referencyjnych wartości wskaźników oceny.

4.4.2. JEDNOLITE CZĘŚCI WÓD POWIERZCHNIOWYCH W POLSCE

Jednolita część wód powierzchniowych to, przypomnijmy, oddzielny i znaczący element wód powierzchniowych, stanowiący podstawową jednostkę gospodarowania wodami. Na obszarze Polski wyróżniono łącznie 5643 JCWP, z czego 4586 dla rzek, 1038 dla jezior, 10 dla wód przybrzeżnych oraz 9 dla wód przejściowych. W tabeli 4.3 pokazano liczbę JCWP w poszczególnych dorzeczach (źródło: <http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/monitoring-wod>).

Tabela 4.3

Jednolite części wód powierzchniowych w dorzeczach w Polsce

Lp.	Obszar dorzecza	Jednolite części wód			
		rzeki	jeziora	wody przybrzeżne	wody przejściowe
1.	Wisły	2660	481	6	5
2.	Odry	1734	420	4	4
3.	Dniestru	3	-	-	-
4.	Dunaju	11	-	-	-
5.	Jarftu	6	-	-	-
6.	Łaby	8	-	-	-
7.	Niemena	40	35	-	-
8.	Pregoły	120	101	-	-
9.	Świeżej	4	1	-	-
10.	Ucker	-	-	-	-
Suma		4586	1038	10	9

4.4.3. TYPOLOGIA RZEK POLSKICH

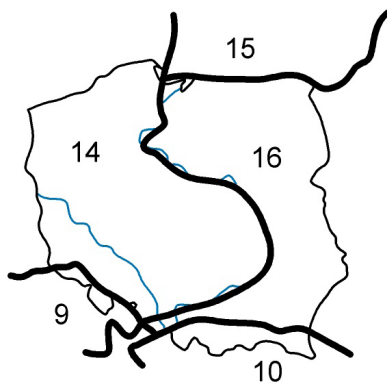
Typologia rzek w Polsce została dokonana w oparciu o tzw. system A, określony w Załączniku II do RDW. Jako pierwsze z kryteriów typologii występuje pojęcie ekoregionu.

Ekoregion jest to obszar lądu lub wody, który charakteryzuje się geograficznie odrębnym zespołem naturalnych biocenoz. Na świecie wyróżniono ok. 450 ekoregionów wodnych. Przynależność terytorium Polski do ekoregionów wodnych obrazuje rysunek 4.3.

Pozostałymi kryteriami typologii są:

- wysokość [m n.p.m.] – typy: górski, wyżynny, nizinny,
- wielkość powierzchni zlewni [km²] – typy: mały, średni, duży, bardzo duży,
- geologia – typy: wapienny, krzemianowy, organiczny.

Analizy przeprowadzone na podstawie powyższego systemu doprowadziły do wyróżnienia 26 typów rzek występujących w granicach Polski (tab. 4.4).



Rys. 4.3. Ekoregiony wodne w Polsce (wg [30]): 9) wyżyny centralne, 10) Karpaty, 14) niziny centralne, 16) niziny wschodnie

Tabela 4.4

Typy cieków w Polsce [78]

Typ cieków	Kod typu
Typ nieokreślony – kanały i zbiorniki zaporowe	0
Krajobraz górski	
Potok tatrzański krzemianowy	1
Potok tatrzański węglanowy	2
Potok sudecki	3
Krajobraz wyżynny	
Potok wyżynny krzemianowy z substratem gruboziarnistym – zachodni	4
Potok wyżynny krzemianowy z substratem drobnoziarnistym – zachodni	5
Potok wyżynny węglanowy z substratem drobnoziarnistym na lessach i lessopodobnych	6
Potok wyżynny węglanowy z substratem gruboziarnistym	7
Mała rzeka wyżynna krzemianowa – zachodnia	8
Mała rzeka wyżynna węglanowa	9
Średnia rzeka wyżynna – zachodnia	10
Potok wyżynny krzemianowy z substratem gruboziarnistym – wschodni	11
Potok fliszowy	12
Mała rzeka wyżynna krzemianowa – wschodnia	13
Mała rzeka fliszowa	14
Średnia rzeka wyżynna – wschodnia	15
Krajobraz nizinny	
Potok nizinny lessowy lub gliniasty	16
Potok nizinny piaszczysty	17
Potok nizinny żwirowy	18
Rzeka nizinna piaszczysto-gliniasta	19
Rzeka nizinna żwirowa	20
Wielka rzeka nizinna	21
Rzeka przyujściowa pod wpływem wód słonych	22
Niezależne od ekoregionów	
Potok lub strumień na obszarze będącym pod wpływem procesów torfotwórczych	23
Mała i średnia rzeka na obszarze będącym pod wpływem procesów torfotwórczych	24
Ciek łączący jeziora	25
Ciek w dolinie wielkiej rzeki nizinnej	26

4.4.4. WARUNKI REFERENCYJNE

Przykłady opisu warunków referencyjnych dla różnych typów cieków pokazano w tabelach 4.5-4.7.

Tabela 4.5

Przykład opisu warunków referencyjnych dla typu ciek nr 1

1. Potok tatrzański krzemianowy	
Lokalizacja:	EKOREGION 10 KARPATY Podprowinca: 514 <i>Centralne Karpaty Zachodnie</i> .
Utwory powierzchniowe:	Skąły magmowe i metamorficzne: granity, gnejsy i podobne.
Opis morfologiczny:	Dolina wciosowa (V-kształtna), korytkowa lub skrzynkowa. Bieg prosty lub łagodnie kręty (SI 1,01-1,25 (1,5)). Dno skaliste i kamieniste z dużymi głazami, osady drobnodziarniste nieliczne. Brzegi płaskie, mogą być z rozległymi kamieńcami. Profil podłużny wyrównany.
Charakterystyka abiotyczna:	Wielkość zlewni: 10-100 km ² ; wysokość: > 800 m n.p.m. Spadek koryta: > 25‰ (najczęściej 50‰ lub więcej). Prąd wody: szybki, turbulentny. Substrat dna: skały, duże kamienie, miejscami żwir i gruby piasek. Między kamieniami oraz w zakolach detrytus. Przewodnie wartości fizyczno-chemiczne: przewodnictwo [mS/cm]: 50-300, pH 6,0-8,5, twardość węglanowa [°dH] < 1-6, twardość ogólna [°dH] 1-10.
Charakterystyka biologiczna:	Makrozoobentos: duża różnorodność gatunkowa, głównie gatunki stenotermiczne, tlenolubne, dobrze dostosowane do szybkiego prądu. Duża liczba gatunków filtrujących. <u>Wybór gatunków specyficznych dla typu:</u> Ephemeroptera: <i>Baetis carpathicus</i> , <i>Epeorus assimilis</i> , <i>Ecdyonurus subalpinus</i> , <i>Rhitrogena semicolorata</i> , <i>Ameletus inopinatus</i> . Plecoptera: <i>Arcynopteryx compacta</i> , <i>Protonemura nimborum</i> . Trichoptera: <i>Rhyacophila dorsalis</i> , <i>Drusus biguttatus</i> , <i>Drusus discolor</i> . <u>Zalecany okres badań:</u> wiosna. Makrofity i fitobentos: makrofity nieliczne, reprezentowane przez <i>Fontinalis sp.</i> , <i>Mentha aquatica</i> . Fitobentos – głównie okrzemki. <u>Zalecany okres badań fitobentosu:</u> nie ma uzasadnienia dla badań makrofitów i fitoplanktonu. Ichtiofauna: skrajnie uboga w gatunki: <i>Salmo trutta fario</i> , <i>Cottus poecilopus</i> i/lub <i>Cottus gobio</i> albo brak ryb. Sporadycznie mogą występować <i>Phoxinus phoxinus</i> i <i>Barbatula barbatula</i> . Ogólnie powyżej 1000 m n.p.m. może być brak ryb. <u>Zalecany okres badań:</u> lato.
Uwagi:	Wykazuje tendencję do zakwaszania. Możliwe, że brak różnic w podstawowych zespołach organizmów pomiędzy typem 1 a 2 (potokiem tatrzańskim węglanowym).
Przykład:	Białka Tatrzańska, Rybi Potok.
Rzeka referencyjna:	Białka Tatrzańska, Rybi Potok. Białka Tatrzańska.

Tabela 4.6

Przykład opisu warunków referencyjnych dla typu ciek nr 15

15. Średnia rzeka wyżynna – wschodnia	
Lokalizacja:	EKOREGION 10 i 16 KARPATY i RÓWNINY WSCHODNIE Podprovincje: 343 Wyżyna Lubelsko-Lwowska, 514 Centralne Karpaty Zachodnie, 513 Zewnętrzne Karpaty Zachodnie, 522 Beskidy Wschodnie.
Utwory powierzchniowe:	Aluwia, terasy zalewowe > 300 m.
Opis morfologiczny:	W szerokiej dolinie U-kształtnej, z rozległymi terasami zalewowymi > 300 m, tylko na nielicznych odcinkach przelomowych terasy węższe. Bieg lekko kręty lub kręty, nawet meandrujący. Czasami koryta boczne. Dominuje żwir (gruz) i kamienie, możliwe osady drobnoziarniste.
Charakterystyka abiotyczna:	Wielkość zlewni: 1000-10000 km ² Spadki zlewni: > 3‰. Spadek koryta: 0,5-2‰. Prąd wody: długie odcinki bystrzyn o szybkim, turbulencyjnym nurcie i długie, nieckowate odcinki plos o nurcie spokojnym. Substrat dna: dominuje gruby żwir i kamienie, na plosach miejscami drobny żwir, a przy brzegach osady drobnoziarniste. Przewodnie wartości fizyczno-chemiczne: przewodnictwo [mS/cm]: 300-600, pH 7,0-8,5. Przeływ: zmienny, duże różnice w przepływach ekstremalnych.
Charakterystyka biologiczna:	Makrozoobentos: duża różnorodność mikrohabitatów warunkuje duże zróżnicowanie gatunkowe, fauna bezkręgowców jest reprezentowana przez gatunki prądotłubne i gatunki charakterystyczne dla spokojnego nurtu. W strefowości podłużnej typ odpowiada metaritrtonowi. <u>Wybór gatunków specyficznych dla typu:</u> Ephemeroptera: <i>Oligoneuriella rhenana</i> , <i>Oligoneuriella mikulskii</i> , <i>Epron virgo</i> , <i>Baetis rhodani</i> , <i>Baetis scambus</i> . Plecoptera: <i>Perla sp.</i> , <i>Dinocras cephalotes</i> , <i>Perlodes microcephala</i> , <i>Chloroperla tripunctata</i> . Trichoptera: <i>Goera sp.</i> , <i>Silo sp.</i> , <i>Hydropsyche sp.</i> Crustacea: <i>Gammarus pulex</i> . Mollusca: <i>Unio pictorum</i> , <i>Unio tumidus</i> . <u>Zalecany okres badań:</u> lato. Makrofity: roślinność kwiatowa: <i>Ranunculus fluitans</i> , <i>Myriophyllum alternifolium</i> , <i>Potamogeton sp.</i> <u>Zalecany okres badań makrofitów:</u> lato.

15. Średnia rzeka wyżynna – wschodnia	
Charakterystyka biologiczna:	<p>Ichtyofauna: głównie gatunki litofilne, reofilne: <i>Thymallus thymallus</i>, <i>Barbus barbus</i>, <i>Barbus carpathicus</i>, <i>Alburnoides bipunctatus</i>, <i>Leuciscus cephalus</i>, oraz psammoofilne: <i>Barbatula barbatula</i>. Towarzyszącymi gatunkami są: <i>Salmo trutta fario</i>, <i>Cottus gobio</i>, <i>Phoxinus phoxinus</i>. Towarzyszące prądolubne karpiowate: <i>Leuciscus leuciscus</i>, <i>Gobio gobio</i>, mogą sporadycznie należeć do grupy dominantów (zwłaszcza <i>G. Gobio</i>). Możliwość występowania stacjonarnej/potamodromicznej formy <i>Vimba vimba</i>. Możliwa jest obecność larw <i>Lampetra planeri</i> i/lub <i>Eudontomyzon mariae</i>. W Sanie <i>Gobio kessleri</i>. Liczne gatunki eurytopowe (np. <i>Rutilus rutilus</i>, <i>Esox lucius</i>, <i>Perca fluviatilis</i>). Górne i środkowe biegi rzek typu 15 mogą być tarliskami dla dwuśrodowiskowych łososiowatych <i>Salmo trutta trutta</i> lub/i <i>Salmo salar</i> oraz certy anadromicznej populacji <i>Vimba vimba</i>. <u>Zalecany okres badań:</u> lato.</p>
Uwagi:	Duża zasobność w węglany, duża zdolność buforowa.
Przykład:	San Dynów, Dunajec poniżej Rożnowa.

Tabela 4.7

Przykład opisu warunków referencyjnych dla typu cieków nr 23

23. Potok na obszarze będącym pod wpływem procesów torfotwórczych																
Lokalizacja:	NIEZALEŻNE OD EKOREGIONÓW:															
Utwory powierzchniowe:	Moreny staro i młodoglacjalne, sandry, dna dolin i niższe terasy rzeczne i równiny zastoiskowe, obszary torfowisk wysokich. Obszary pod wpływem procesów torfotwórczych.															
Opis morfologiczny:	Bieg kręty w szerokiej, płaskiej dolinie skrzynkowej, z tendencją do rozgałęziania koryta, dno głównie w substracie organicznym. Duża zawartość humianów, woda często o odcieniu brunatnym, przy wysokich stanach wody duże obszary zalewowe. W dwu wariantach: kwaśne i zasadowe (obojętne).															
Charakterystyka abiotyczna:	<p>Wielkość zlewni: 10-100 km². Spadki zlewni: 2-15‰. Spadek rzeki: <1-5‰. Prąd wody: Nurt spokojny, powolny, na zmianę z bystrym, turbulencyjnym przy większym nagromadzeniu martwego drewna. Substrat dna: dominuje substrat organiczny, z domieszką piasków lub żwirów. Przewodnie wartości fizyczno-chemiczne:</p> <table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Kwaśne</th> <th>Zasadowe (obojętne)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Przewodnictwo [mS/cm]:</td> <td>350-500</td> <td>350-800</td> </tr> <tr> <td>pH:</td> <td>6,5-7,5</td> <td>7,5-8,0</td> </tr> <tr> <td>Twardość węglanowa [°dH]:</td> <td>3-6</td> <td>ok. 16</td> </tr> <tr> <td>Twardość ogólna [°dH]:</td> <td>6-11</td> <td>ok. 25</td> </tr> </tbody> </table> <p>Przepływ: wahania przepływu średnie do dużych, latem możliwe duże deficyty.</p>		Kwaśne	Zasadowe (obojętne)	Przewodnictwo [mS/cm]:	350-500	350-800	pH:	6,5-7,5	7,5-8,0	Twardość węglanowa [°dH]:	3-6	ok. 16	Twardość ogólna [°dH]:	6-11	ok. 25
	Kwaśne	Zasadowe (obojętne)														
Przewodnictwo [mS/cm]:	350-500	350-800														
pH:	6,5-7,5	7,5-8,0														
Twardość węglanowa [°dH]:	3-6	ok. 16														
Twardość ogólna [°dH]:	6-11	ok. 25														

23. Potok na obszarze będącym pod wpływem procesów torfotwórczych	
Charakterystyka biologiczna:	<p>Makrozoobentos Gatunki typowe: Trichoptera: <i>Hydatphylax infumatus</i>, <i>Micropterna leateralis</i>. Plecptera: <i>Leuctra nigra</i>, <i>Nemoura sp.</i> Odonata: <i>Cordulegaster boltoni</i>.</p> <p>Makrofity i fitobentos: <i>Potamogeton polygonifolius</i>, <i>Isolepis fluitans</i>, mchy: <i>Scapnia undulata</i>.</p> <p>Ichtiofauna: <i>Pungitius pungitius</i>, <i>Gasterosteus aculeatus</i>.</p>
Uwagi:	Po uregulowaniu lub zmianach koryta przypominają potoki piaszczyste (nr 17).
Przykład:	Krakowianka (zlewnia Widawy), Postomia (zlewnia Warty), Mała Panew.

4.4.5. OCENA STANU RZEK W POLSCE W LATACH 2016-2018

Monitoring wód powierzchniowych, zgodny z wymogami Ramowej Dyrektywy Wodnej, prowadzony jest w Polsce od 2007 r. w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska. Badania jakości wód realizowane są przez Inspekcję Ochrony Środowiska [58].

Klasyfikacja elementów biologicznych, fizykochemicznych oraz hydromorfologicznych (przeprowadzana w ramach oceny stanu lub potencjału ekologicznego wód) opiera się na zasadzie „najgorszy decyduje”, co oznacza, że o końcowej klasyfikacji decyduje element w najgorszym stanie. Podobnie jest z klasyfikacją elementów chemicznych (dokonywaną w ramach oceny stanu chemicznego wód) – tu również o końcowej klasyfikacji decyduje wskaźnik chemiczny w najgorszym stanie. Ogólna ocena stanu wód jest wypadkową klasyfikacji stanu/potencjału ekologicznego oraz stanu chemicznego, przy czym tu również obowiązuje zasada „najgorszy decyduje”. Oznacza to, że dana część wód zostaje oceniona jako w stanie dobrym tylko i wyłącznie wtedy, kiedy zarówno jej stan/potencjał ekologiczny, jak i stan chemiczny są co najmniej dobre. W innym przypadku stan części wód oceniany jest jako zły.

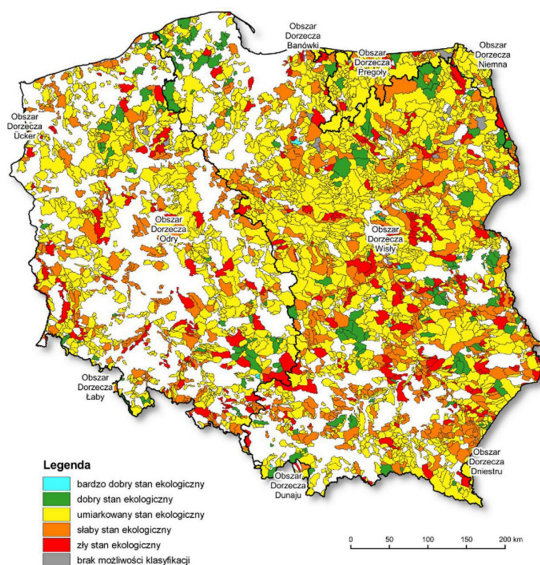
W 2020 r. opublikowano wyniki monitoringu wód powierzchniowych, przeprowadzonego w latach 2014-2019 [87].

Co najmniej dobry stan ekologiczny stwierdzono w 6% ocenianych naturalnych jednolitych części wód rzecznych, w tym stan bardzo dobry jedynie w 10 JCWP. Największy udział miały JCWP o stanie umiarkowanym, stanowiąc 63,1% wszystkich badanych. Stan słaby i zły prezentowało odpowiednio 30,9% części wód (rys. 4.4).

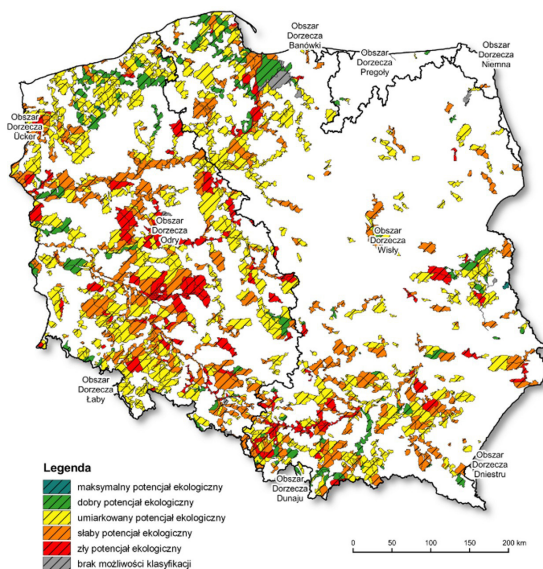
Największy udział w sklasyfikowanych silnie zmienionych i sztucznych JCWP stanowią te o umiarkowanym potencjale ekologicznym (51,2%). Maksymalny lub dobry potencjał ekologiczny odnotowano w 9,7%, natomiast słaby lub zły – w 39,1% części wód (rys. 4.5).

Stan chemiczny 11,7% badanych części wód określony został jako dobry, a 88,3% jako poniżej dobrego (rys. 4.6).

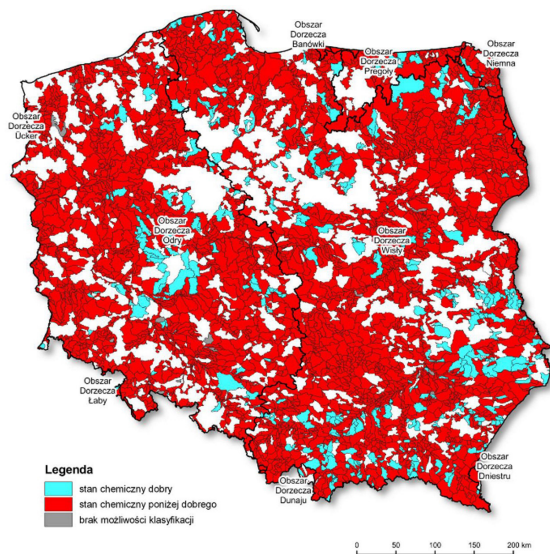
Ocena ogólna części wód rzecznych wykazała, że aż 99,9% z nich jest w stanie złym (rys. 4.7).



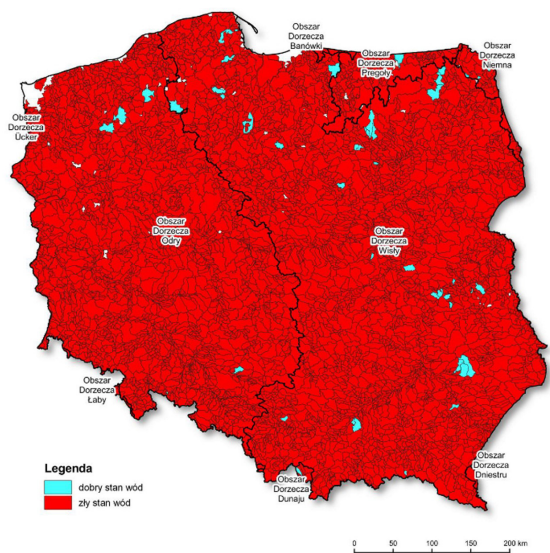
Rys. 4.4. Klasyfikacja stanu ekologicznego JCWP rzecznych w podziale na dorzecza – stan na rok 2019 [87]



Rys. 4.5. Klasyfikacja potencjału ekologicznego JCWP rzecznych w podziale na dorzecza – stan na rok 2019 [87]



Rys. 4.6. Klasyfikacja stanu chemicznego JCWP rzecznych w podziale na dorzecza – stan na rok 2019 [87]



Rys. 4.7. Ocena stanu JCWP rzecznych w podziale na dorzecza – stan na rok 2019 [87]

BIBLIOGRAFIA

- [1] Babiński Z., *Współczesne procesy korytowe dolnej Wisły*, Prace Geograficzne IGiPZ PAN, nr 157, Warszawa 1992.
- [2] Bartnik W., *Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym. Początek ruchu rumowiska wlezonego*, Rozprawa Habilitacyjna, nr 172, Akademia Rolnicza, Kraków 1992.
- [3] Bartnik W., Madeyski M., Banasik K., Górski D., *The suspended sediment and bed load in mountains streams*, Zeszyty Naukowe, Akademia Rolnicza, Wrocław 1992.
- [4] Bartnik W., Michalik A., *Rozwój badań rumowiska wlezonego i ich praktyczna weryfikacja*, XX Ogólnopolska Szkoła Hydrauliki, Wydawnictwo IBW, PAN, Gdańsk 2000.
- [5] Bartnik W., Michalik A., Bednarczyk T., *Równanie transportu rumowiska wlezonego dla rzek Podkarpacia*, Gospodarka Wodna, nr 7, Warszawa 1998.
- [6] Bartnik W., Strużyński A., *Deformation of river bed after flood at Tenczyński stream*, Science Conference in Cracow 7-9 May 1998: Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997, Polish Academy of Science, Cracow 1998, 155-167.
- [7] Bednarczyk T., Michalik A., Radecki-Pawlik A., *Some aspects of the bedload transport rate formula for mountains streams*, Zeszyty Naukowe Inżynierii Środowiska, nr 224, Akademia Rolnicza, Wrocław 1992.
- [8] Bogárdi J., *Sediment transport in alluvial streams*, Akadémiai Kiadó, Budapest 1974.
- [9] Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J., *Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich*, Ministerstwo Środowiska, Departament Zasobów Wodnych, Warszawa 2005.
- [10] Brookes A., *The distribution and management of channelized streams in Denmark*, Regulated Rivers, 1, 1987.
- [11] CEN TC 230/WG2/TG 5: N48 *Water quality – Assessing river quality based on hydromorphological features*.
- [12] Church M., *Channel morphology and typology*, [in:] P. Calow, G. Peets (eds.), *The river handbook*, Vol. 1, Blackwell Scientific Publications, Oxford 1992.
- [13] Czetwertyński E., *Hydrologia*, Arkady, Warszawa 1958.
- [14] Dąbkowski Sz.L., Skibiński J., Żbikowski A., *Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych*, Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1982.

- [15] Dębski K., *Regulacja rzek*, PWN, Warszawa 1978.
- [16] Doyle M.W., Stanley E.H., Harbor J.M., *Channel adjustments following two dam removals in Wisconsin*, *Water Resources Research*, 39, 2003, 1011-1026.
- [17] Dufour S., Piégay H., *From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: Forget natural references and focus on human benefits*, *River Research and Applications*, 25(5), 2009, 568-581.
- [18] Dury G., *Hydraulic geometry*, [in:] R.J. Chorley, *Introduction to Fluvial Processes*, 1969.
- [19] EN 14614:2004, *Water quality – Guidance standard for assessing the hydromorphological features of rivers*, CEN Brussels, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
- [20] FISRWG (10/1998), *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*, Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG).
- [21] Galia T., Hradecký J., Škarpich V., *Sediment Transport in Headwater Streams of the Carpathian Flysh Belt: Its Nature and Recent Effects of Human Interventions*, [in:] P. Heininger, J. Cullmann (eds.), *Sediment Matters*, Springer, 2015, 13-26.
- [22] Goncharov V.I., *Dinamika ruslovykh potokov (Stream flow Dynamics)*, Gidrometeoizdat, Leningrad 1962.
- [23] Gleick P.H., Cooley H., Cohen M.J., Morikawa M., Morrison J., Palaniappan M., *Dams removed or decommissioned in the United States, 1912 to present*, *The World's Water 2008-2009*, Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security, Island Press, Washington D.C. 2009.
- [24] Graf W.H., *Hydraulics of Sediment Transport*, McGraw-Hill, New York 1971.
- [25] Gręplowska Z., *Wybrane zagadnienia numerycznego modelowania deformacji koryt rzek górskich na skutek transportu rumowiska dennego*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1994, maszynopis.
- [26] Gumiero B., Mant J., Hein T., Elso J., Boz B., *Linking the restoration of river and riparian zones/wetlands in Europe: Sharing knowledge through case studies*, *Ecological Engineering*, 56, 2013, 36-50.
- [27] Guzik C., *Wieś podhalańska i jej gospodarcze przeobrażenia w historii regionu*, [w:] B. Izmańłow (red.), *Przyroda – Człowiek – Bóg*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków 2004, 209-218.
- [28] Hickin E.J., Nanson G.C., *Lateral migration rates of river bends*, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 1984, 11.
- [29] Ikeda S., Parker G., Sawai K., *Bed theory of river meanders. Part 1. Linear development*, *Journal of Fluid Mechanics*, 112, 1981.
- [30] Illies J., *Limnofauna Europaea*, wyd. 2, G. Fischer Verlag, Stuttgart 1978.
- [31] Ilnicki P., Lewandowski P., *Ekomorfologiczna waloryzacja dróg wodnych Wielkopolski*, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań 1997.
- [32] *Kartowanie struktury wód w Republice Federalnej Niemiec*, procedura przeglądowna, Zespół Roboczy Krajów Związkowych ds. Wody (LAWA), 2002.

- [33] Klimaszewski M., *Geomorfologia*, PWN, Warszawa 1981.
- [34] Kłonowska-Olejnik M., Radecki-Pawlik A., *Ocena jakości wody i warunków siedliskowych potoku Białego na podstawie metod biologicznych i parametrów hydrologicznych*, Polskie parki narodowe – ich rola w rozwoju nauk przyrodniczych, Konferencja Jubileuszowa z okazji 80-lecia Białowieskiego Parku Narodowego, 2002, 15.
- [35] Komędera M., *Zmiany systemu korytowego Mszanki*, praca magisterska, Uniwersytet Jagielloński, Kraków 1993.
- [36] Kondolf G.M., *Hungry water: effects of dam and gravel mining on river channels*, Environmental Management, 21 (4), 1997.
- [37] Kondolf G.M., Piégay H. (eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*, Wiley, 2003.
- [38] Kondolf G.M. et al., *Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents*, Earth's Future, 2, 2014, 256-280.
- [39] Koniar-Schaeferowa J., *Badania nad możliwością biologicznej zabudowy żwirowych koryt potoków karpackich*, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, nr 162, 1975.
- [40] Korpak J., *Human impact on mountains streams and rivers*, [in:] A. Radecki-Pawlik, S. Pagliara, J. Hradecký, E. Hendrickson (eds.), *Open channel hydraulics, river hydraulic structures and fluvial geomorphology: for engineers, geomorphologists and physical geographers*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton 2018.
- [41] Korpak J., *Morfologiczna rola budowli regulacyjnych w górskich systemach fluwialnych*, praca doktorska, Uniwersytet Jagielloński, Kraków 2007.
- [42] Korpak J., Krzemień K., Radecki-Pawlik A., *Wpływ czynników antropogenicznych na zmiany koryt cieków karpackich*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Monografia 4, Kraków 2008.
- [43] Korpak J., Lenar-Matyas, A., *Stream channel changes as a result of sudden sediment release due to check dam lowering (Polish Carpathians)*, Environmental Earth Sciences, 78, 2019, 404.
- [44] Kresser W., *Gedanken zur Geschiebe und Schwebstofführung der Gewässer*, Österreichische Wasserwirtschaft, 16, ½, 1964.
- [45] Krzemień K., *Współczesne zmiany modelowania koryt potoków w Gorcach*, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, nr 59, Kraków 1984.
- [46] Książek L., Jednoraj A., Strutyński M., *Ocena możliwości zmiany funkcji i przeznaczenia zapory przeciwrumowiskowej na potoku Wieprzówka*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, nr 4/1, 2007.
- [47] Książek L., Woś A., Wyrębek M., Strużyński A., *Habitat structure changes of the Wisłoka River as a result of channel restoration*, [in:] *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, Recent Trends in Environmental Hydraulics*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg 2020, 103-115.
- [48] Lenar-Matyas A., Korpak J., Mącałowski A., *Influence of extreme discharge on restoration works in mountain river – a case study of the Krzczonówka River (southern Poland)*, Journal of Ecological Engineering, 16/3, 2015.

- [49] Łapuszek M., Lenar-Matyas A., *Utrzymanie i zagospodarowanie rzek górskich*, Politechnika Krakowska, Kraków 2013.
- [50] Łapuszek M., Ratomski J., *Metodyka określania i charakterystyka przebiegu oraz prognoza erozji dennej rzek górskich dorzecza górnej Wisły*, Monografia 332, Politechnika Krakowska, Kraków 2006.
- [51] Ławniczak A.E., Gebler D., *Wspierające elementy hydromorfologiczne*, [w:] H. Soszka (red.), *Ocena stanu ekologicznego wód zlewni rzeki Wel. Wytyczne do zintegrowanej oceny stanu ekologicznego rzek i jezior na potrzeby planów gospodarowania wodami w dorzeczu*, Wydawnictwo Instytutu Rybactwa Śródlądowego, Olsztyn 2011.
- [52] Malarz R., *Powodziowa transformacja gruboklastycznych aluwioów w zwirodennych rzekach Zachodnich Karpatych fliszowych (na przykładzie Soły i Skawy)*, Akademia Pedagogiczna, Kraków 2002.
- [53] Meyer-Peter E., Müller R., *Formulas for Bed Load Transport*, Proceedings of 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, Delft 7 June 1948.
- [54] Michalik A., *Badania intensywności transportu rumowiska wleczonego w rzekach karpackich*, rozprawa habilitacyjna, nr 38, Akademia Rolnicza, Kraków 1990.
- [55] Michalik A., Książek L., *Drag force on individual particles on turbulent flow conditions*, 10th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Zeszyty Naukowe AR Wrocław, 382, 2000, 205-215.
- [56] Migoń P., *Geomorfologia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- [57] Nowak A., Książek L., *Effect of the accuracy of riverbed measurements using ADCP on the water surface level at discharge Q1%*, Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus, 4(4), 2018, 143-155.
- [58] *Ocena stanu rzek, jezior, wód przejściowych i przybrzeżnych w latach 2016-2018*, Inspekcja Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
- [59] Ogłędzki P., Pawłat H., *The index method of small lowland river environmental evaluation*, Annals of Warsaw Agricultural University – SGGW, Land Reclamation, No 30, 2000.
- [60] Osuch B., *Rozkład uziarnienia niespoistego materiału skalnego w przekrojach niektórych odcinków cieków karpackich*, Czasopismo Techniczne, nr 10, Kraków 1965.
- [61] Petts G.E., Pratts J.D., *Channel changes following reservoir construction on a lowland English rivers*, Catena, 10, 1983.
- [62] Philippson A., *Ein Beitrag zur Erosionstheorie*, Petermanns Geographische Mitteilungen, 1886.
- [63] Plesiński K., Radecki-Pawlik A., *Bystrza o zwiększonej szorstkości. Rodzaje, przykłady z praktyki, hydraulika, projektowanie i problemy eksploatacyjne*, Uniwersytet Rolniczy, Kraków 2018.

- [64] Poulard C., Szczęśny J., Witkowska H., Radzicki K., *Dynamic SlowDown: A flood mitigation strategy complying with the integrated management concept – implementation in a small mountainous catchment*, Journal of River Basin Management, 3(2), 2005, 75-85.
- [65] Powell J., *Exploration of the Colorado River of the West and its tributaries*, 1875.
- [66] Prawo Wodne – Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r., Dz.U. 2017, poz. 1566.
- [67] Przedwojski B., *Morfologia rzek i prognozowanie procesów rzecznych*, Akademia Rolnicza, Poznań 1998.
- [68] Punzet J., *Zmiany w przebiegu stanów wody w dorzeczu górnej Wisły na przestrzeni 100 lat (1871-1970)*, Folia Geographica, Series Geographica Physica, 14, 1981.
- [69] Radecki-Pawlik A., *On Using Artificial Rapid Hydraulic Structures (RHS) Within Mountain Stream Channels: Some Exploitation and Hydraulic Problems*, [in:] P. Rowiński (ed.), *Experimental and Computational Solutions of Hydraulic Problems*, Springer, Berlin–Heidelberg 2013, 101-115.
- [70] Radecki-Pawlik A., Skalski T., Plesiński K., Czech W., *On bankfull methods determination again – why we care?*, Journal of Water and Land Development, 27, 2015, 21-27.
- [71] Rákóczy L., *Selective erosion of noncohesive bed materials*, Geografiska Annaler, 69A (1), 1987.
- [72] Ratomski J., *Sedymentacja rumowiska w zbiornikach przeciwrumowiskowych na obszarze Karpat fliszowych*, Monografia 123, Politechnika Krakowska, Kraków 1991.
- [73] Ratomski J., Witkowska H., *Podstawy projektowania regulacji potoków górskich przy uwzględnieniu ruchu rumowiska*, wyd. 2, Politechnika Krakowska, Kraków 1992.
- [74] Raven P., Holmes N., Dawson H., Ławniczak A., Bulánková E., Topercer J., Lewin I., *River Habitat and Macrophyte Surveys in the High Tatra Mountains of Slovakia and Poland*, United Kingdom Environment Agency Report, Bristol 2011.
- [75] Raven P.J., Holmes N.T., Dawson H.F., Everard M., *Quality assessment using River Habitat Survey data*, [in:] *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, Vol. 8, John Wiley & Sons, New York 1998.
- [76] RDW, Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Ramowa Dyrektywa Wodna), 2000.
- [77] *River Habitat Survey in Britain and Ireland, Field Survey Guidance Manual*, SEPA, 2003.
- [78] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 listopada 2011 r. w sprawie klasyfikacji stanu ekologicznego, potencjału ekologicznego i stanu chemicznego jednolitych części wód powierzchniowych, Dz.U. 2011, nr 258, poz. 1549.
- [79] Šamov G.I., *Rečnyje nanosy*, Gidrometeoizdat, Leningrad 1959.
- [80] Schoklitsch A., *Handbuch des Wasserbaues*, Springer, Vienna 1950.

- [81] Schumm S., *The shape of alluvial channels in relation to sediment type*, U.S. Geological Survey Professional Paper, 352, 1960.
- [82] Schumm S.A., *River adjustment to altered hydrologic regimen – Murrumbidgee River and paleochannels*, U.S. Geological Survey Professional Paper, 598, 1968.
- [83] Shields A., *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung*, Mitteilungen der preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, 26, Berlin 1936.
- [84] Simon A., Rinaldi M., *Disturbance, stream incision, and channel evolution: The roles of excess transport capacity and boundary materials in controlling channel response*, *Geomorphology*, 79, 2006.
- [85] Słota H., Szczęsny J., *Metodyka poboru reprezentatywnych prób rumowiska dennego w warunkach górskich*, *Gospodarka Wodna*, nr 2, 1974.
- [86] Stelczer K., *Bed-load transport. Theory and practice*, Water Resources Publications, 1981.
- [87] *Syntetyczny raport z klasyfikacji i oceny stanu jednolitych części wód powierzchniowych wykonanej za 2019 rok na podstawie danych z lat 2014-2019*, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa 2020.
- [88] Szoszkiewicz K., Jusik S., Adynkiewicz-Piragas M., Gebler D., Achtenberg K., Radecki-Pawlik A., Okruszko T., Giełczewski M., Pietruczuk K., Przesmycki M., Nawrocki P., *Podręcznik oceny wód płynących w oparciu o Hydromorfologiczny Indeks Rzeczny*, Inspekcja Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 2017.
- [89] Szoszkiewicz K., Leśny J., Staniszewski R., Mendyk D., *Zróźnicowanie parametrów hydromorfologicznych w ocenie rzek niżowych metodą River Habitat Survey (RHS)*, *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, R. XIII, zeszyt specjalny nr 30. 2004.
- [90] Szoszkiewicz K., Zbierska J., Staniszewski R., Zgoła T., Jusik S., *Możliwości wykorzystania systemu River Habitat Survey w ocenie morfologii rzek na potrzeby Ramowej Dyrektywy Wodnej*, [w:] *Materiały konferencyjne I Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej pt. „Wdrażanie Ramowej Dyrektywy Wodnej: Ocena stanu ekologicznego wód w Polsce”*, Uniwersytet Łódzki, Łódź 2005.
- [91] Szoszkiewicz K., Zgoła T., Giełczewski M., Stelmaszczyk M., *Zastosowanie metody River Habitat Survey do waloryzacji hydromorfologicznej i oceny skutków planowanych działań renaturyzacyjnych*, *Nauka Przyroda Technologie*, T. 3, z. 3 (103), Poznań 2009.
- [92] Szoszkiewicz K., Zgoła T., Jusik S., Hryc-Jusik B., Dawson F.H., Raven P., *Hydromorfologiczna ocena wód płynących. Podręcznik do badań terenowych według metody River Habitat Survey w warunkach Polski*, Poznań–Warrington 2011.
- [93] Ślizowski R., Radecki-Pawlik A., *Badania bystrza o zwiększonej szorstkości na potoku Brennica w miejscowości Brenna*, *Zeszyty Naukowe AR w Krakowie*, nr 306, Kraków 1996.

- [94] Ślizowski R., Radecki-Pawlik A., Sambou N., *Badania porównawcze bystrzy z kamienia naturalnego – elementu ekologicznej zabudowy potoków górskich – z bystrzami betonowymi typu Peterki*, Zeszyty Naukowe AR w Krakowie, nr 17, Kraków 1997.
- [95] Trafas K., *Zmiany biegu koryta Wisły na wschód od Krakowa*, Prace Instytutu Geografii UJ, nr 62, Kraków 1975.
- [96] US Army Corps of Engineers, *Final report to Congress. The streambank erosion control evaluation and Demonstration Act of 1874*, 1981.
- [97] Wang F.Y., *Bed load transport in open channels*, Proceedings of IAHR, Baden-Baden 1977.
- [98] Watershed Analysis and Management (WAM), *Guide for States and Communities*, 2003 (www.epa.gov).
- [99] Wharton G., *Managing river environments*, Cambridge University Press, Cambridge 2000.
- [100] Williams G.P., Wolman M.G., *Downstream effects of dams on alluvial rivers*, U.S. Geological Survey Professional Paper, 1286, 1984.
- [101] Wohl E., Lane S.N., Wilcox A.C., *The science and practice of river restoration*, Water Resources Research, 51 (8), 2015, 5974-5997.
- [102] Wołoszyn J., Czamara W., Eliasiewicz R., Krężel J., *Regulacja rzek i potoków*, Wrocław 1994.
- [103] Wyźga B., *Impact of the channelization-induced incision of the Skawa and Wiśłoka Rivers, Southern Poland, on the conditions of overbank deposition*, Regulated Rivers: Research & Management, 17, 2001.
- [104] Wyźga B., Zawiejska J., *Hydromorphological quality as a key element of the ecological status of Polish Carpathian rivers*, Georeview, 21 (1), 2012, 56-67.
- [105] Żbikowski A., Żelazo J., *Ochrona środowiska w budownictwie wodnym*, Materiały Informacyjne, Ministerstwo Ochrony Środowiska i Zasobów Naturalnych, Warszawa 1993.
- [106] Żelazo J., Popek Z., *Podstawy renaturyzacji rzek*, SGGW, Warszawa 2002.

SPIS WYKORZYSTANYCH PROJEKTÓW REGULACJI

- [107] 11/90/8, Projekt regulacji potoku Mszanka w km 0,000-12,500, C.K. Namiestnictwo we Lwowie, 1910.
- [108] 1126, Projekt techniczno-roboty zabudowy potoku Poręba w km 5,068-6,000 w Niedźwiedziu, Rejon Dróg Wodnych w Krakowie, 1958.
- [109] 2196, Projekt koncepcyjnego rozwiązania zabudowy potoków Mszanka i Łostówka od km 8,165 do km 5,140, Hydroprojekt Oddział Kraków, 1959.
- [110] 4052, Dokumentacja techniczna dla robót regulacyjnych na potoku Poręba w km 1,5-4,4 w Podobinie, oprac. mgr inż. A. Miodoński, Nowy Targ 1961.

- [111] 3963, Opis techniczny do projektu robót regulacyjnych na potoku Biały Dunajec w km 1,000 do km 2,400 w Nowym Targu, Rejon Dróg Wodnych w Krakowie, 1962.
- [112] 1201, Projekt techniczno-roboczy zabudowy odcinka potoku Poręba w obrębie projektowanego mostu w km 0,374 drogi nr 19, Biuro Urządzania Lasu i Projektów Leśnictwa, Oddział Projektów Leśnictwa, 1963.
- [113] 1682, Projekt techniczno-roboczy zabudowy potoku Mszanka w km 7,834-7,500, Okręgowy Zarząd Wodny w Krakowie, 1967.
- [114] 3964, Projekt zabudowy potoku Biały Dunajec w km 2,182-5,101, Okręgowy Zarząd Wody w Krakowie, 1968.
- [115] 4039, Dokumentacja techniczna na wykonanie remontu zapory na potoku Mszanka w km 5,724 w Mszanie Górnej, 1971.
- [116] 101, Regulacja Białego Dunajca w odcinku 0,000-3,260, projekt techniczny, 1976.
- [117] 114, Zabezpieczenie brzegu potoku Mszanki w km 6,224-6,981 w Mszanie Górnej, Przedsiębiorstwo Budownictwa Wodnego w Krakowie, Pracownia Projektowa, 1976.
- [118] 135, Regulacja Białego Dunajca na odcinku Nowy Targ – Szaflary, projekt techniczny, 1976.
- [119] 3337, Regulacja potoku Mszanki wraz z dopływem potoku Poręba w miejscowościach Mszana Dolna – Poręba Wielka, Przedsiębiorstwo Budownictwa Wodnego w Krakowie, Pracownia Projektowa, 1977.
- [120] 3375, Analiza stosunków wodnych w węźle potoku Mszanka – ujście potoku Łętowego, Hydroprojekt Oddział Kraków, 1981.
- [121] 152, Ubezpieczenie brzegów pomiędzy stopniami na rzece Biały Dunajec od km 0,400 do 3,200, Projekt techniczny, Hydroprojekt Oddział Kraków, 1984.
- [122] 4170, Inwentaryzacja powykonawcza korekcji stopniowej na potoku Biały Dunajec w km 0,900-3,266, Okręgowa Dyrekcja Gospodarki Wodnej w Krakowie, 1987.
- [123] 4175, Inwentaryzacja powykonawcza korekcji stopniowej na potoku Mszanka, 1989.
- [124] 1750, Systematyczna zabudowa potoku Mszanka w km 0,000-2,140 w miejscowości Mszana Dolna, projekt budowlany i wykonawczy, Ośrodek Usług Inżynierskich „STAAND” sp. z o.o., 2000.
- [125] 1889, Korekcja stopniowa potoku Poręba km 2,150-4,200 w miejscowości Podobin, projekt techniczny, 2002.
- [126] 1992, Remont koryta regulacyjnego, potok Poręba km 4,450-5,025 w miejscowości Podobin, gmina Niedźwiedź, powiat limanowski, województwo małopolskie, projekt budowlany, 2002.
- [127] 2064, Usuwanie skutków powodzi z lipca 2001. Projekt budowlany regulacji koryta potoku Biały Dunajec w km 3,260-6,500 w miejscowości Szaflary, Hydroprojekt Oddział Kraków, 2003.

eISBN 978-83-67188-05-0



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki