

PL ISSN 0373-6547

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

PRACE GEOGRAFICZNE NR 143

WOJCIECH FROEHLICH

MECHANIZM
TRANSPORTU FLUWIALNEGO
I DOSTAWY ZWIETRZELIN
DO KORYTA
W GÓRSKIEJ ZLEWNI FLISZOWEJ

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK · ŁÓDŹ
ZAKŁAD NARODOWY IM. OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

PRACE GEOGRAFICZNE IG I PZ PAN

100. Biegajło W., *Typologia rolnictwa na przykładzie województwa białostockiego*, 1973, s. 164, 30 il., zł 35,—
101. Werwicki A., *Struktura przestrzenna średnich miast ośrodków wojewódzkich w Polsce*, 1973, s. 168, 49 il., zł 30,—
102. Matusik M., *Próba typologii i regionalizacji rolnictwa na obszarze Dolnego Powiśla*, 1973, s. 152, 30 il., 6 fot., zł 32,—
103. Ziemońska Z., *Stosunki wodne w polskich Karpatach Zachodnich*, 1973, s. 124, 23 il., zł 25,—
104. Drozdowski E., *Geneza Basenu Grudziądzkiego w świetle osadów i form glacialnych*, 1974, s. 139, 41 il., 17 fot., zł 32,—
105. Pulina M., *Denudacja chemiczna na obszarach krasu węglanowego*, 1974, s. 159, 52 il., 10 fot., zł 36,—
106. Baumgart-Kotarba M., *Rozwój grzbietów górskich w Karpatach fliszowych*, 1974, s. 136, 39 il., 16 fot., 3 zał., zł 40,—
107. Tyszkiewicz W., *Rolnicze użytkowanie ziemi a formy własności i rozmiary gospodarstw rolnych na Kujawach*, 1974, s. 127, 17 il., zł 30,—
108. Leszczycki S., *Problemy ochrony środowiska człowieka*, 1974, s. 88, 7 il., 4 wkł., zł 22,—
109. Gawryszewski A., *Związki przestrzenne między migracjami stałymi i dojazdami do pracy oraz czynniki przemieszczeń ludności*, 1974, s. 155, 18 il., zł 35,—
110. Żurek S., *Geneza zabagnienia Pradoliny Biebrzy*, 1975, s. 107, 28 il., 22 fot., 10 wkł., zł 30,—
111. Jankowski W., *Land Use Mapping. Development and Methods*, 1975, s. 111, zł 35,—
112. Dramowicz K. K., *Symulacja cyfrowa i analiza systemowa w badaniach procesów urbanizacji wsi (model gromady Biała Stara, powiat płocki)*, 1975, s. 110, 38 il., zł 27,—
113. Żurek A., *Struktura przestrzenna przepływów ludności miast woj. kieleckiego*, 1975, s. 112, 33 il., zł 25,—
114. Froehlich W., *Dynamika transportu fluwialnego Kamienicy Nawojowskiej*, 1975, s. 122, 54 il., 12 fot., zł 35,—
115. Harasimiuk M., *Rozwój rzeźby Pagórów Chełmskich w trzeciorzędzie i czwartorzędzie*, 1975, s. 108, 43 il., 14 fot., zł 26,—
116. Węclawowicz G., *Struktura przestrzeni społeczno-gospodarczej Warszawy w latach 1931 i 1970 w świetle analizy czynnikowej*, 1975, s. 120, 41 il., zł 35,—
117. Dziewoński K., Gawryszewski A., Iwanicka-Lyrowa E., Jelonek A., Jerczyński M., Węclawowicz G., *Rozmieszczenie i migracje ludności a system osadniczy Polski Ludowej*, 1976, s. 343, 103 il., zł 80,—
118. Szczepkowski J., *Struktura przestrzenna regionu bydgosko-toruńskiego. Ewolucja i dynamika*, 1977, s. 89, 7 il., zł 22,—
119. Wiśniewski E., *Rozwój geomorfologiczny doliny Wisły pomiędzy Kotliną Płocką a Kotliną Toruńską*, 1976, s. 124, 32 il., 16 fot., zł 30,—
120. Kotarba A., *Współczesne modelowanie węglanowych stoków wysokogórskich (na przykładzie Czerwonych Wierchów w Tatrach Zachodnich)*, 1976, s. 128, 28 il., 4 fot., zł 32,—
121. Wójcik Z., *Charakterystyka siedlisk polnych na pogórzu Beskidu Niskiego metodami biologicznymi*, 1976, s. 111, 3 il., zł 25,—

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

•

PRACE GEOGRAFICZNE NR 143

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ТРУД

№ 143

ВОЙЦЕХ ФРОЕХЛИХ

МЕХАНИЗМ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА И ПОСТАВКА
ДРЕСВЫ В РУСЛО ГОРНОГО ФЛИШЕВОГО
ВОДОСБОРНОГО БАССЕЙНА

*

GEOGRAPHICAL STUDIES

NO. 143

WOJCIECH FROEHLICH

THE MECHANISM OF FLUVIAL TRANSPORT
AND WASTE SUPPLY INTO THE STREAM CHANNEL
IN A MOUNTAINOUS FLYSCH CATCHMENT

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

PRACE GEOGRAFICZNE NR 143

WOJCIECH FROELICH

MECHANIZM
TRANSPORTU FLUWIALNEGO
I DOSTAWY ZWIETRZELIN
DO KORYTA
W GÓRSKIEJ ZLEWNI FLISZOWEJ

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK · ŁÓDŹ
ZAKŁAD NARODOWY IM. OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

1982

Komitet redakcyjny

REDAKTOR NACZELNY: JANUSZ PASZYŃSKI
ZASTĘPCA REDAKTORA NACZELNEGO: ANDRZEJ WRÓBEL
CZŁONKOWIE: KAZIMIERZ DZIEWOŃSKI, ANDRZEJ S. KOSTROWICKI
MIECZYŚLAW KLUGE, ADAM KOTARBA, LECH ZAWADZKI
SEKRETARZ: IRENA STAŃCZAK

Redaktor Wydawnictwa Lidia Kwiecień

Redaktor techniczny Maciej Szłapka

© Copyright by Zakład Narodowy im. Ossolińskich — Wydawnictwo.
Wrocław 1982

PL ISSN 0373-6547
ISBN 83-04-012 78-2

Zakład Narodowy im. Ossolińskich — Wydawnictwo. Wrocław 1982.
Nakład: 700 egz. Objętość: ark. wyd. 11,20, ark. druk. 9 + 11 wkl.,
ark. A₁ - 12. Papier druk. sat. kl. IV, 70 g, 70 × 100. Oddano do
składania 24 III 1982. Podpisano do druku 19 X 1982. Druk ukoń-
czono w październiku 1982. Wrocławska Drukarnia Naukowa. Zam.
1087/82 — H-7. Cena zł 120.—

SPIS TREŚCI

Wstęp	7
Zarys problemu i cel pracy	7
Charakterystyka badanych zlewni i reżim hydrologiczny potoków	10
Metody badań i techniki pomiarów	21
Transport materiału rozpuszczonego	28
Parametry chemiczne wody na tle procesu kształtowania odpływu	28
Transport materiału rozpuszczonego w zlewniach różnej wielkości	32
Związek koncentracji i ładunku materiału rozpuszczonego z przepływem wody	32
Prawidłowości zróżnicowania parametrów transportu materiału rozpuszczonego z biegiem koryta	44
Powierzchniowa i podziemna dostawa materiału rozpuszczonego ze stoku do koryta	50
Transport klastycznych zwietrzelin w zawiesinie	59
Skład mechaniczny zwietrzelin transportowanych w zawiesinie	59
Mechanizm transportu zawiesiny w zlewniach różnej wielkości	62
Zmienność koncentracji zawiesiny w przekroju poprzecznym koryta	62
Związek koncentracji zawiesiny z przepływem wody	64
Transport zawiesiny podczas różnych typów wezbrań	70
Prawidłowości przestrzennego zróżnicowania transportu zawiesiny	76
Dostawa klastycznych zwietrzelin ze stoku do koryta	78
Transport materiału organicznego	92
Transport ładunku dennego	95
Cechy aluwiiów korytowych	95
Mechanizm transportu ładunku dennego w czasie wezbrań	79
Dostawa rumowiska z koryta w świetle natężenia erozji	102
Kształtowanie transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryt w zlewniach beskidzkich	107
Ocena metod wyników badań w świetle analizy błędów	110
Regulacja koryt potoków beskidzkich a mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin	119
Literatura	124
Механизм водного транспорта и поставка дресвы в русло горного флишевого водосборного бассейна (резюме)	134
The mechanism of fluvial transport and waste supply into the stream channel in a mountainous flysch catchment (summary)	139

WSTĘP

ZARYS PROBLEMU I CEL PRACY

Natężenie współczesnej denudacji chemicznej i mechanicznej jest oceniane na podstawie wielkości wynoszonego ze zlewni ładunku produktów wietrzenia i erozji. Podstawą tego klasycznego podejścia jest założenie, że zwietrzeliny wynoszone są równomiernie z całego heterogenicznego obszaru zlewni. Natężenie denudacji wyrażane jest w $t\ km^{-2}$ (denudacja jednostkowa) lub w $m^3\ km^{-2}$ i mm (wskaźniki denudacji). Wskaźniki te służą do porównywania natężenia denudacji w różnych obszarach, zarówno w skali małych zlewni (Hadley, Schumm 1961; Roehl 1962; Figuła 1966; Claves i in. 1970; Walling 1971, 1974; Bartnik, Gładki 1972; Prochal 1973; Lusby 1977), jak również poszczególnych kontynentów i całych sfer morfoklimatycznych (Schumm 1963; Corbel 1964; Douglas 1964; Strakhov 1967; Holeman 1968; Stoddart 1969; Pulina 1974). To powszechnie stosowane podejście uniemożliwiało identyfikację i ocenę ilościową źródeł dostawy transportowanego materiału. Wynoszony ze zlewni ładunek zwietrzelin tylko w niewielkim stopniu odzwierciedla natężenie denudacji w jej klasycznym pojęciu (Starkel 1972b; Gregory, Walling 1973; Selby 1974; Froehlich 1975, 1978; Gil 1976).

Natężenie współczesnej denudacji określane jest również w bezpośrednich pomiarach spływu powierzchniowego, ługowania chemicznego i spłukiwania na całych stokach lub izolowanych poletkach (Gerlach 1966, 1976; Ketcheson i in. 1973; Gil 1976; Welc 1978). Otrzymane wyniki są zazwyczaj mechanicznie ekstrapolowane na powierzchnię całej zlewni lub porównywane z wynikami otrzymanymi z pomiarów w przekrojach hydrometrycznych (Gerlach 1970, 1976; Gil 1976; Welc 1978). Ponadto natężenie denudacji w zlewniach określane jest również za pomocą formuł matematycznych, wyprowadzonych w trakcie badań terenowych i eksperymentalnych, bądź rozważań teoretycznych (Gil 1974). Trudności w ekstrapolacji wyników otrzymanych tymi metodami wynikają ze słabej znajomości: długości drogi transportowanego materiału po powierzchni stoku, roli spadku, wpływu wielkości poletka na otrzymaną wielkość spłukiwania lub ługowania, a w relacji stok—koryto z braku określenia udziału bezpośredniej dostawy z koryta oraz różnej częstotli-

wości pomiarów. Toteż na obecnym etapie badań bezpośrednie porównania wskaźników denudacji otrzymanych z pomiarów w korytach potoków i na stokach mogą prowadzić do błędnych wniosków (Ketcheson i in. 1973).

Procesy transportu zwietrzelin należy rozpatrywać łącznie z procesami krążenia wody. Woda jest bowiem czynnikiem erozji i nośnikiem transportowanego materiału (Gregory, Walling 1973). Klasyczna metoda oceny natężenia współczesnej denudacji oparta na pomiarach w przekroju hydrometrycznym ma swoje uzasadnienie w tradycyjnym modelu tworzenia się spływu powierzchniowego według Hortona (1945). Tymczasem spływ wezbraniowy kształtowany jest przez zmienne w czasie i przestrzeni źródła zasilania (Dunne, Black 1970). Przez analogię model ten winien być kluczem do poznania dynamicznego modelu przestrzennego zróżnicowania denudacji opartego na znajomości źródeł dostawy zwietrzelin do koryt. Poznanie prawidłowości przestrzennego zróżnicowania natężenia współczesnej denudacji pozwoli na dokładniejsze określenie kierunku i tempa ewolucji form rzeźby w obrębie zlewni.

Większość prac na temat transportu fluwialnego w korytach rzek i potoków beskidzkich oparta jest na wynikach pomiarów otrzymanych przy zastosowaniu metod o różnej dokładności, pomimo że badania rozpoczęto już przeszło 50 lat temu (Ziemska 1928). Ładunek klastycznych zwietrzelin transportowanych w zawieszinie określany jest głównie na podstawie pomiarów koncentracji zawiesiny i przepływu, wykonywanych w przekrojach hydrometrycznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (Kajetanowicz 1938; Jarocki 1957; Reniger 1959; Dębski 1959; Mikulski 1961; Cyberski 1969; Wiśniewski 1972; Brański 1975; Gładki, Madeyski 1975). Publikowane w ostatnich latach tego typu prace mają małą wartość ze względu na zbyt małą, jak na rzeki górskie, częstotliwość pomiarów oraz brak oceny wielkości i znaku błędów pomiarów (Froehlich 1975; Walling 1978). Wyniki te przybliżają jedynie rząd wielkości transportowanego ładunku, co na obecnym etapie znajomości tego procesu i potrzeb w zakresie projektowania budowli hydrotechnicznych jest niewystarczające. Dotyczy to również oceny transportu ładunku dennego. Wyniki uzyskane przez pomiary objętości aluwiiów w zbiornikach zaporowych lub basenach sedymentacyjnych powyżej zapór przeciwrumowiskowych, a także „świeżych” łach zwirowych po powodzi są trudne do porównania, gdyż brak jest pomiarów bezpośrednich oraz oceny dokładności stosowanych metod (Froehlich 1975).

Dotychczasowe stacjonarne badania transportu materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin w korytach małych zlewni beskidzkich miały na celu poznanie wielkości transportowanego ładunku zwietrzelin w nawiązaniu do litologii podłoża i użytkowania ziemi (Woźniak Strojna 1963; Kłus 1965; Polak 1965; Figuła 1966; Froehlich 1975; Gil 1976;

Krzemień 1976; Welc 1978). Niektóre studia zmierzały do porównania wielkości transportowanego w korycie ładunku materiału rozpuszczonego z ładunkiem klastycznych zwietrzelin (Figula 1966; Froehlich 1972, 1975, 1978; Gerlach 1970, 1976) bądź natężenia splukiwania na stokach z transportem klastycznych zwietrzelin w korycie (Welc 1972; Gerlach 1970, 1976; Gil 1976; Froehlich, Słupik 1980a, b). Badania transportu materiału rozpuszczonego miały na celu wyjaśnienie związku między budową geologiczną a składem jonowym wód (Stangenberg 1958; Bombówna 1960, 1965, 1969; Pasternak 1968; Maultz 1972; Welc 1972), jak również objaśnienie modelu różnicowania denudacji chemicznej w małej zlewni (Froehlich, Słupik 1979, 1980c).

W tak krótkim przeglądzie podstawowych zagadnień dotyczących transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryt w zlewniach beskidzkich nie sposób wymienić wszystkich publikacji. Kompletny przegląd literatury na temat procesów korytowych i stokowych w Karpatach fliszowych znajduje się w następujących pracach: Gerlach (1970, 1976), Starkel (1972b), Kaszowski i in. (1976), Froehlich i in. (1977).

W nowych opracowaniach należy uwzględnić kompleksową, ilościową ocenę udziału różnych źródeł dostawy zwietrzelin ze stosunku do koryta (relacja podsystemu stokowego i korytowego) oraz zmierzać do objaśnienia prawidłowości transformacji transportowanego ładunku w korytach zlewni różnej wielkości. Takie podejście jest zgodne z naturą procesów transportu zwietrzelin w zlewni i pozwala ustalić prawidłowości jego przestrzennej zmienności. Może też stanowić podstawę do ilościowego porównania aktywności procesów morfogenetycznych i ustalenia ilościowej reprezentatywności zlewni. Badania transportu zwietrzelin powinny określić źródła dostawy transportowanego materiału, czas i kierunek jego transportu oraz miejsca sedymentacji. Umożliwi to ilościową ocenę transformacji rzeźby w relacji między obszarami degradacji i sedymentacji. Dla określenia wiarygodności uzyskanych wyników konieczna jest ocena dokładności stosowanych metod oraz ustalenie granic błędów pomiarów. Jest to podstawowy warunek rzetelności pomiarów.

* * *

Celem pracy jest poznanie mechanizmu procesów transportu fluwialnego oraz ilościowa ocena źródeł dostawy materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin do koryta w zlewni beskidzkiej. W stosunku do poprzedniej pracy (Froehlich 1975) zwrócono uwagę głównie na poznanie prawidłowości przestrzennego różnicowania tych procesów w aspekcie geomorfologicznym, na tle transformacji opadu w odpływ, poprzez określenie:

— ilościowych związków między parametrami hydrologicznymi a parametrami transportu materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin,

— ilościowego udziału poszczególnych źródeł dostawy materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin ze stoku doświadczalnego do koryta w porównaniu z transportowanym w korycie ładunkiem,

— transformacji transportowego ładunku materiału z biegiem koryta (przyrostem powierzchni zlewni) w zlewniach różnej wielkości.

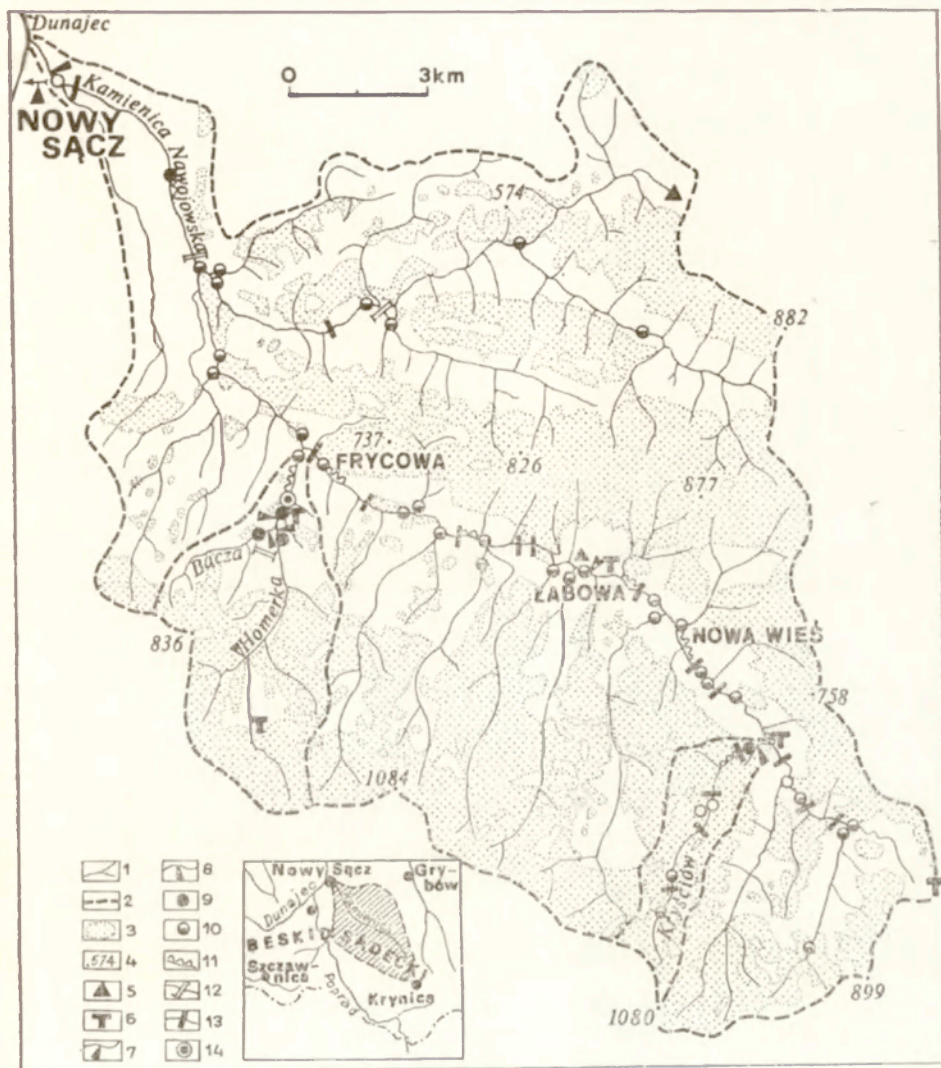
W niniejszej pracy zwrócono uwagę na ocenę dokładności stosowanych metod i uzyskanych wyników w świetle analizy błędów, bowiem podstawą rzetelnych porównań ilościowych, ekstrapolacji i prognoz mogą być tylko wyniki o znanej granicy błędów. Ponadto dane do porównań muszą pochodzić z odpowiednio długiego, reprezentatywnego okresu badań, który — zdaniem Pasławskiego (1960) — winien zależeć od średniego kwadratowego odchylenia transportowego ładunku materiału, obliczonego przy zastosowaniu prawa Gaussa z odpowiadającą mu całką Laplace'a. Toteż na obecnym etapie badań zrezygnowano z określenia średnich, ze względu na dużą zmienność transportowego ładunku zwietrzelin w poszczególnych latach. Dotychczasowe wyniki badań ilościowych transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryt w zlewniach beskidzkich są trudne do porównania głównie z uwagi na różną ich dokładność, metody i okresy badań. Dlatego zrezygnowano z bezpośrednich porównań wskaźników denudacji. Tego typu porównania wyników wcześniejszych badań ilościowych zawierają prace Gerlacha (1970, 1976).

Określenie źródeł i mechanizmu dostawy klastycznych zwietrzelin do koryt w małych zlewniach ma istotne znaczenie dla poznania przyczyn erozji lub agradacji w korytach dużych rzek oraz przyczyn szybkiego zamulania zbiorników zaporowych i basenów sedymentacyjnych powyżej zapór przeciwrumowiskowych. Może być również pomocne przy wyborze właściwego i prawidłowo zlokalizowanego systemu zabudowy hydrotechnicznej koryta oraz określenia miejsc eksploatacji aluwii.

CHARAKTERYSTYKA BADANYCH ZLEWNI I REŻIM HYDROLOGICZNY POTOKÓW

Praca oparta jest na wynikach 10-letniego (1969–1978) cyklu stacjonarnych badań procesów fluwialnych w zlewni Kamienicy Nawojowskiej oraz w zlewniach jej dopływów — potoków Kryściów, Homerka i Bącza (ryc. 1). Z uwagi na istniejące opracowania cech środowiska geograficznego badanych zlewni (Froehlich 1975, 1978, 1979a, b; Adamczyk, Słupik 1981; Niedziałkowska 1981; Niedźwiedź 1981; Staszkievicz 1981; Wit-Jóźwik 1981) w pracy ograniczono się do podania ich podstawowej charakterystyki.

Zlewnia Kamienicy Nawojowskiej o powierzchni 239 km² (1084–280 m n.p.m.) jest typową zlewnią beskidzką zbudowaną z kompleksów skał fliszowych o różnej odporności na wietrzenie. W krajobrazie dominuje rzeźba średniogórska z dużym udziałem wysokich i średnich pogórzy.

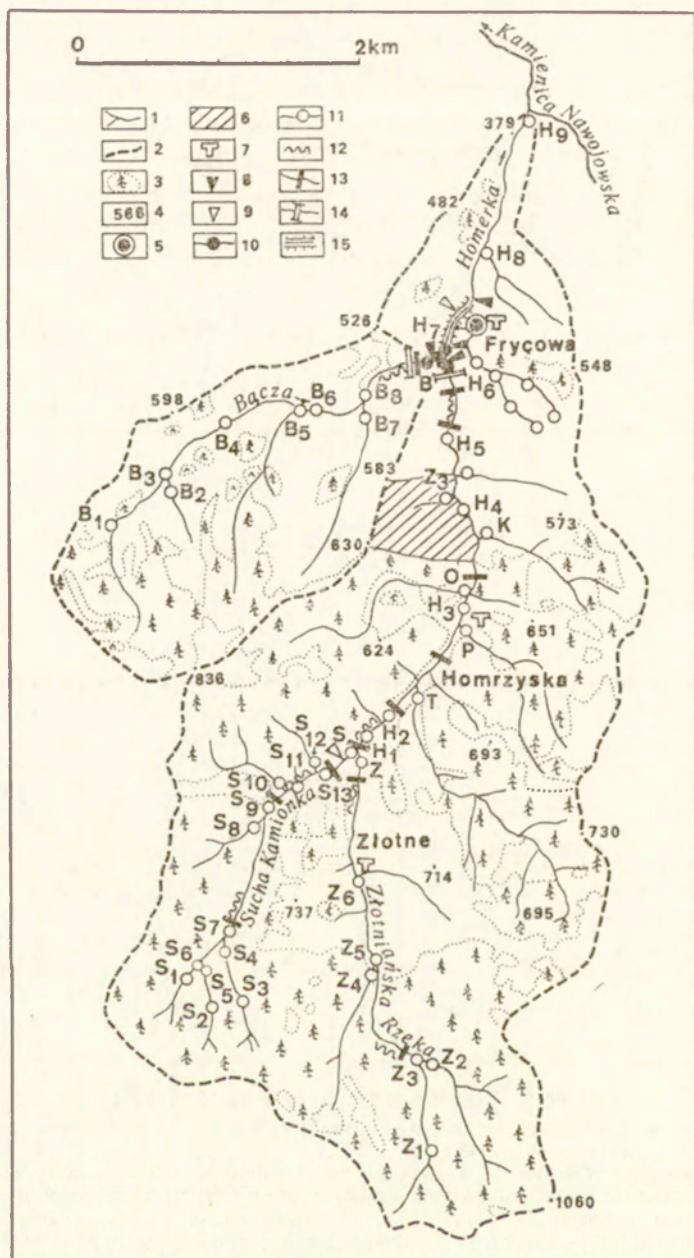


Ryc. 1. Zlewnia Kamienicy Nawojowskiej

1 — sieć rzeczna; 2 — działki wodne; 3 — lasy; 4 — punkty wysokościowe; 5 — stacje klimatyczne; 6 — stacje opadowe; 7 — limnigrafy; 8 — wodowskazy; 9 — punkty stałych pomiarów koncentracji materiału rozpuszczonego i zawiesiny; 10 — punkty okresowych pomiarów koncentracji materiału rozpuszczonego i zawiesiny; 11 — punkty pomiarów transportu materiału dennego za pomocą skrzyń łapaczy oraz metodą znaczonej kolorową emalią otoczków; 12 — zapory przeciwrumowiskowe; 13 — punkty pomiarów tempa erozji bocznej i wgłębnej; 14 — Stacja Badawcza Zakładu Geomorfologii i Hydrologii Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk

The Kamienica Nawojowska catchment basin

1 — drainage network; 2 — water divides; 3 — forest; 4 — altitude; 5 — climatic stations; 6 — rain gauges; 7 — water stage recorder; 8 — water stage gauge board; 9 — spots for permanent measurements of dissolved and suspended load; 10 — spots for periodical measurements of dissolved and suspended load; 11 — spots for measurements bed load transport using pit trap samplers and painting gravels; 12 — drop dams; 13 — spots for measurements channel erosion; 14 — The Research Station of the Department of Geomorphology and Hydrology, Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences



Ryc. 2. Zlewnia potoku Homerka

1 — sieć rzeczna; 2 — działy wodne; 3 — lasy; 4 — punkty wysokościowe; 5 — Stacja Badawcza Zakładu Geomorfologii i Hydrologii Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk; 6 — stok doświadczalny w Homrzkach; 7 — stacje opadowe; 8 — limnigrafy; 9 — wodowskazy; 10 — punkty stałych pomiarów koncentracji materiału rozpuszczonego i zawiesiny; 11 — punkty okresowych pomiarów koncentracji materiału rozpuszczonego i zawiesiny; 12 — punkty pomiarów transportu materiału dennego za pomocą skrzyń łapaczy oraz metodą znaczonych kolorową emalią otoczków; 13 — zapory przeciwrumowiskowe; 14 — punkty pomiarów tempa erozji bocznej i wgłębnej; 15 — koryto doświadczalne

Ogólny kierunek struktur geologicznych jest zgodny z osią doliny głównej i wydłużonym asymetrycznym kształtem zlewni. Kamienica Nawojowska uchodzi do Dunajca w obrębie tektoniczno-erozyjnej Kotliny Sądeckiej.

Długość Kamienicy Nawojowskiej wynosi 32,2 km przy średnim spadku 18,15‰, który w górnym biegu wynosi 43‰ i zmniejsza się do 8‰ na odcinku ujściowym. Spadki dopływów wynoszą 40–135‰. Dolina charakteryzuje się młodym, współcześnie kształtowanym przez erozję wgłębną profilem podłużnym, który odmładza dojrzały profil z okresu glacialnego.

Koryto Kamienicy Nawojowskiej składa się z prostych i wąskich, wyciętych w skale odcinków przełomowych i systemów koryt roztokowych związanych z dostawą rumowiska przez dopływy. Ujściowy odcinek typowego koryta roztokowego uregulowany został systemem stopni korekcyjnych. W ostatnim 20-leciu w korycie Kamienicy Nawojowskiej postępuje pogłębianie koryta — średnio ok. 3 cm/rok (Froehlich 1975, 1980), co jest typowe dla większości rzek beskidzkich (Osuch 1968; Klimek 1974a; Klimek, Starkel 1974; Soja 1977).

Stoki pokryte są gliniasto-pylastymi pokrywami o miąższości zwiększającej się u podnóży. Górską część zlewni o stromych stokach (15–30°) i bardziej szkieletowych płytkich glebach oraz strome stoki pogórzy zajmują lasy, które stanowią 42,7% całej powierzchni zlewni. Obszary leśne są współcześnie intensywnie eksploatowane i pocięte gęstą siecią dróg i rynien do transportu drewna. Przyspieszają one wydatnie spływ wód oraz formowanie fal wezbraniowych i są głównym źródłem dostawy klastycznych zwietrzelin, wynoszonych ze zlewni w postaci zawiesiny (Froehlich 1975, 1978; Froehlich, Słupik 1980a, b). Niższe części stoków zajmują pola uprawne (35,6% pow. zlewni), a dna dolin i miejsc wilgotniejsze — łąki i pastwiska (8,7% pow. zlewni) oraz nieużytki (13,0% pow. zlewni). Do szachownicy pól nawiązuje kratowy układ dróg polnych. System dróg przebiegający grzbietami wododziałów i dnami dolin połączony jest siecią bocznych dróg, biegnących najczęściej zgodnie ze spadkiem. Obok bruzd polnych przyspieszają one obieg wody w zlewni i dostarczają zwietrzelin do transportu w zawieszynie (Froehlich 1975, 1978; Froehlich, Słupik 1980a, b).

Osie dolin dopływów skierowane są prostopadle do biegu struktur

The Homerka catchment basin

1 — drainage network; 2 — water divides; 3 — forest; 4 — altitude; 5 — the Research Station of the Department of Geomorphology and Hydrology, Institute of Geography and Spatial Organization of Polish Academy of Sciences; 6 — the experimental slope in Homorzyska; 7 — rain gauges; 8 — water stage recorder; 9 — water stage gauge board; 10 — spots for permanent measurement of dissolved and suspended load; 11 — spots for periodical measurement of dissolved and suspended load; 12 — spots for measurement bed load transport using pit trap samplers and painting gravels; 13 — drop dams; 14 — spots for measurement channel erosion; 15 — the experimental channel

geologicznych, co przy niewyrównanym spadku koryt ułatwia dostawę i wynoszenie materiału.

Wąska i zalesiona w 82% zlewnia potoku Kryściów, o rzeźbie średniogórskiej i powierzchni 7,03 km², jest położona na wysokości 1080–520 m npm. Stoki o nachyleniu 15–30° okryte są glebami szkieletowymi. Porastają je typowe lasy regla dolnego (Staszkievicz 1981). Obszary leśne pocięte są gęstą siecią dróg i rynien do transportu drewna. Pogłębiane koryto potoku o długości 7,1 km i średnim spadku 53,3‰ jest wycięte przeważnie w skałach podłoża, a w środkowym biegu uregulowane niskimi stopniami korekcyjnymi.

Szeroka, w dużym stopniu wylesiona zlewnia potoku Homerka (375–1060 m npm.) o powierzchni 19,6 km², charakteryzuje się dużym udziałem średnich i wysokich pogórzy (Niedziałkowska 1981). Górna część zlewni o prostych lub wypukłych stokach jest głęboko porożcinana wciśłowymi dolinami i położona w piętrze lasów regla dolnego (Staszkievicz 1981). Lasy te rosną na szkieletowych glebach utworzonych z piaskowców magurskich (Adamczyk, Słupik 1981) i zajmują 52% powierzchni zlewni. Użytki rolne koncentrują się w niższych partiach zlewni, w których rzeźba ma charakter niskich gór i wysokich pogórzy. Przeważają tu wypukło-wklęsłe stoki, a okrywające je gliniasto-ilaste pokrywy zwietrzelinowe mają większą miąższość i mniejszą zawartość frakcji szkieletowych (Adamczyk, Słupik 1981). W tej strefie położona jest asymetryczna, wylesiona zlewnia potoku Bączka (3,95 km²).

Koryto potoku Homerka o długości 10,7 km i średnim spadku 57‰ w górnej i środkowej części zlewni wycięte jest w skałach podłoża, a na odcinku ujściowym, przed regulacją miało charakter akumulacyjno-erozyjny, miejscami roztokowy (Wit-Jóźwik 1981). W dolnym biegu potok przegrodzony jest obecnie zaporą przeciwrumowiskową (fot. 1), poniżej której koryto jest uregulowane systemem progów korekcyjnych (fot. 2). Nieuregulowany skalny odcinek koryta, o długości 400 m, położony między stopniami korekcyjnymi, które wykorzystano jako przelewy pomiarowe, służył jako koryto doświadczalne (fot. 3,4).

W zlewni Homerki, na granicy lasów regla dolnego i piętra użytków rolnych, na wysokości 458–608 m npm. położony jest stok doświadczalny w Homrzychach (26,5 ha), ograniczony naturalnym wododziałem (ryc. 2,3; fot. 5). Prowadzono tu badania nad dostawą wody i zwietrzelin do koryta potoku Homerka (Froehlich, Słupik 1977, 1980a, b; Słupik 1981). Jest to stok wypukło-wklęsły, który stanowi przyrzecze potoku Homerka. Zbudowany jest z warstw beloweskich o dużym udziale łupków i okryty gliniasto-ilastymi glebami użytkowymi rolniczo. Działki polne o powierzchni 0,2–0,95 ha uprawiane są w poprzek stoku i oddzielone od siebie bruzdami, terasami polnymi i drogami. Drogi polne biegną zgodnie ze spadkiem od działu wodnego do koryta potoku i pełnią rolę czynnej



Ryc. 3. Stok doświadczalny w zlewni Homerki

A — zlewnia rozcięcia holoceniowego; B — zlewnie dróg polnych; C — przyrzecza; 1 — działki wodne; 2 — drogi gruntowe; 3 — granice działek pól; 4 — punkty pomiarów przepływu wody oraz transportu materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin; 5 — punkty pomiarów spływu powierzchniowego i spłukiwania; 6 — piezometry; 7 — punkty pomiarów wydajności źródeł i parametrów chemicznych ich wód; 8 — punkty pomiarów wilgotności gleby

The experimental slope in Homerka catchment basin

A — watershed of a holocene hollow; B — watersheds of cart-roads; C — watersheds of inter-channel areas; 1 — water divide; 2 — cart-roads; 3 — field boundaries; 4 — spots for measurements of dissolved solid and suspended sediment load and water discharge; 5 — spots for measurements of overland flow and sheet erosion; 6 — observation wells and spots for measurements of water quality; 7 — spots for measurements of discharge and quality of spring water; 8 — spots for measurements of soil moisture

okresowo sieci hydrograficznej (fot. 6). Ciągłe pogłębianie wąwozów drogowych (głębokość wcięcia 0,2-7 m) zmusza rolników do tworzenia nowych, równoległych dróg, po obu stronach starej, głęboko wciętej drogi. Powoduje to wzrost gęstości dróg kosztem zmniejszania areału gruntów rolnych. Długość dróg wynosi 3,3 km (11,9 km ze zdjęcia lotniczego), przy przeciętnej gęstości dróg 5,34 km (z mapy topograficznej 1 : 25 000). W obrębie stoku występuje współcześnie pogłębiane rozcięcie holoceniskie o głębokości 2-9 m odwadniane przez stale płynący ciek (ryc. 3). U podnóża stoku i w dnie doliny występują trwałe użytki zielone.

Stok składa się z trzech zasadniczych części: przyrzeczy odwadnianych spływem rozproszonym oraz zlewni dróg polnych i zlewni rozcięcia holoceniskiego odwadnianych linijnie (ryc. 3; tabl. 1). Z hydrologicz-

Tabela 1. Elementy stoku doświadczalnego w zlewni Homerki
Elements of the experimental slope in Homerka catchment basin

	ha	%
Stok doświadczalny (experimental slope)	26,52	100,0
Droga (cart-road) nr 1 i 2 (Z1 + Z2)	2,93	11,0
Rozcięcie holoceniskie (Holocene hollow, Z3)	6,48	24,4
Droga (cart-road) nr 4 (Z4)	5,93	22,4
Droga (cart-road) nr 5 (Z5)	4,53	17,1
Przyrzecze (interchannel area) S1	2,27	8,6
Przyrzecze (interchannel area) S2	4,38	16,5

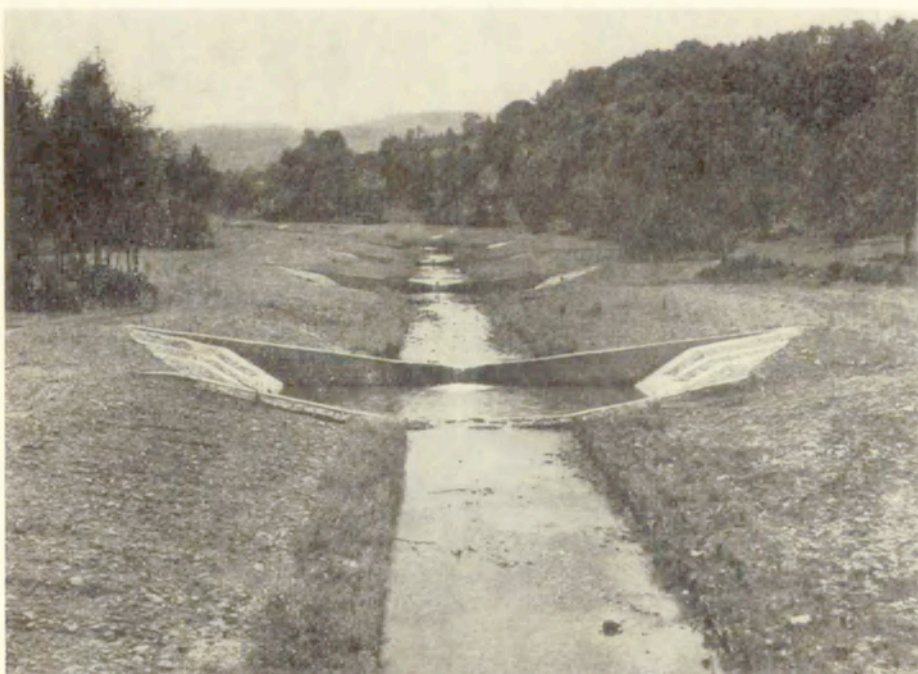
nego punktu widzenia są to podstawowe elementy stoków karpackich (Słupik 1981). Granice wododziałów między tymi zlewniami wyznaczono w terenie na podstawie mikrorzeźby i obserwacji kierunku płynięcia wody w bruzdach polnych.

Asymetryczna zlewnia Kamienicy Nawojowskiej jest średniej wielkości zlewnią beskidzką o rzeźbie średniogórskiej, z dużym udziałem wysokich i średnich pogórzy, zbudowaną przeważnie ze średnio i mało odpornych skał fliszowych. Pomimo „przejściowego” położenia w subsekwentnym pasie mniej odpornych skał na granicy Beskidu Sądeckiego i Niskiego, dolina Kamienicy Nawojowskiej wykazuje cechy dolin rzek zachodniobeskidzkich. Szczególnie dotyczy to szerokich, aluwialnych odcinków koryta, które miejscami mają charakter roztokowy. Przypominają one koryta: Koszarawy, Ochotnicy i Łososiny.

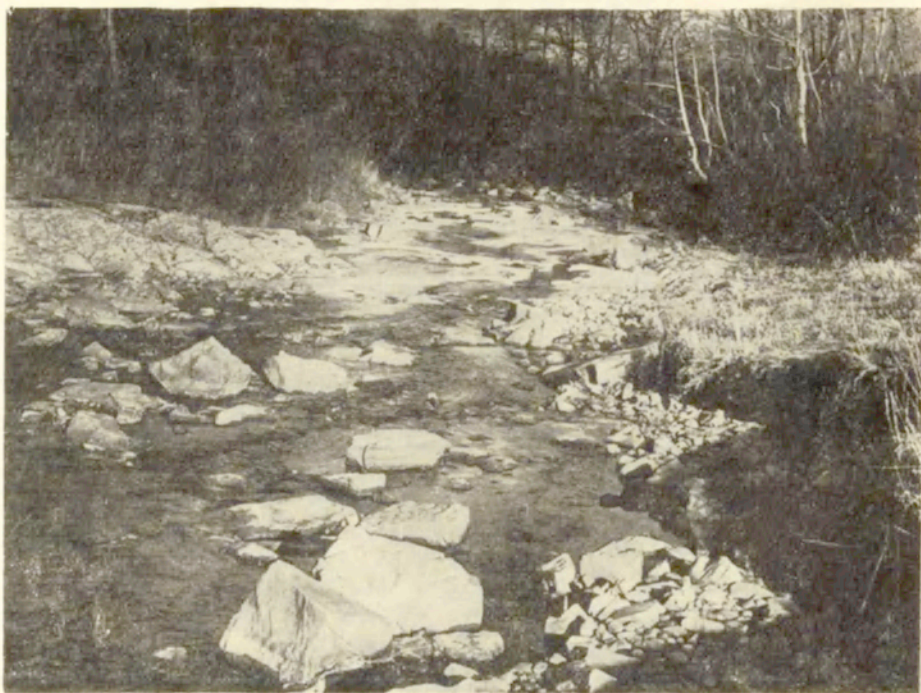
Wraz z przyrostem powierzchni zlewni generalnie wzrasta szerokość dna doliny. Wskutek tego zmniejszeniu ulega bezpośrednia dostawa zwietrzelin ze stoków do koryta, którą niejako „przejmują” na siebie dno doliny oraz dopływy. Z punktu widzenia dostawy zwietrzelin ze stoków do koryt w beskidzkich zlewniach średniej wielkości szerokie i miejscami płaskie dna dolin uniemożliwiają bezpośrednią dostawę ma-



Fot. 1. Zapora przeciwrumowiskowa w korycie potoku Homerka
Drop dam across channel of Homerka Stream



Fot. 2. Uregulowany odcinek koryta potoku Homerka
Regulated channel segment of Homerka Stream



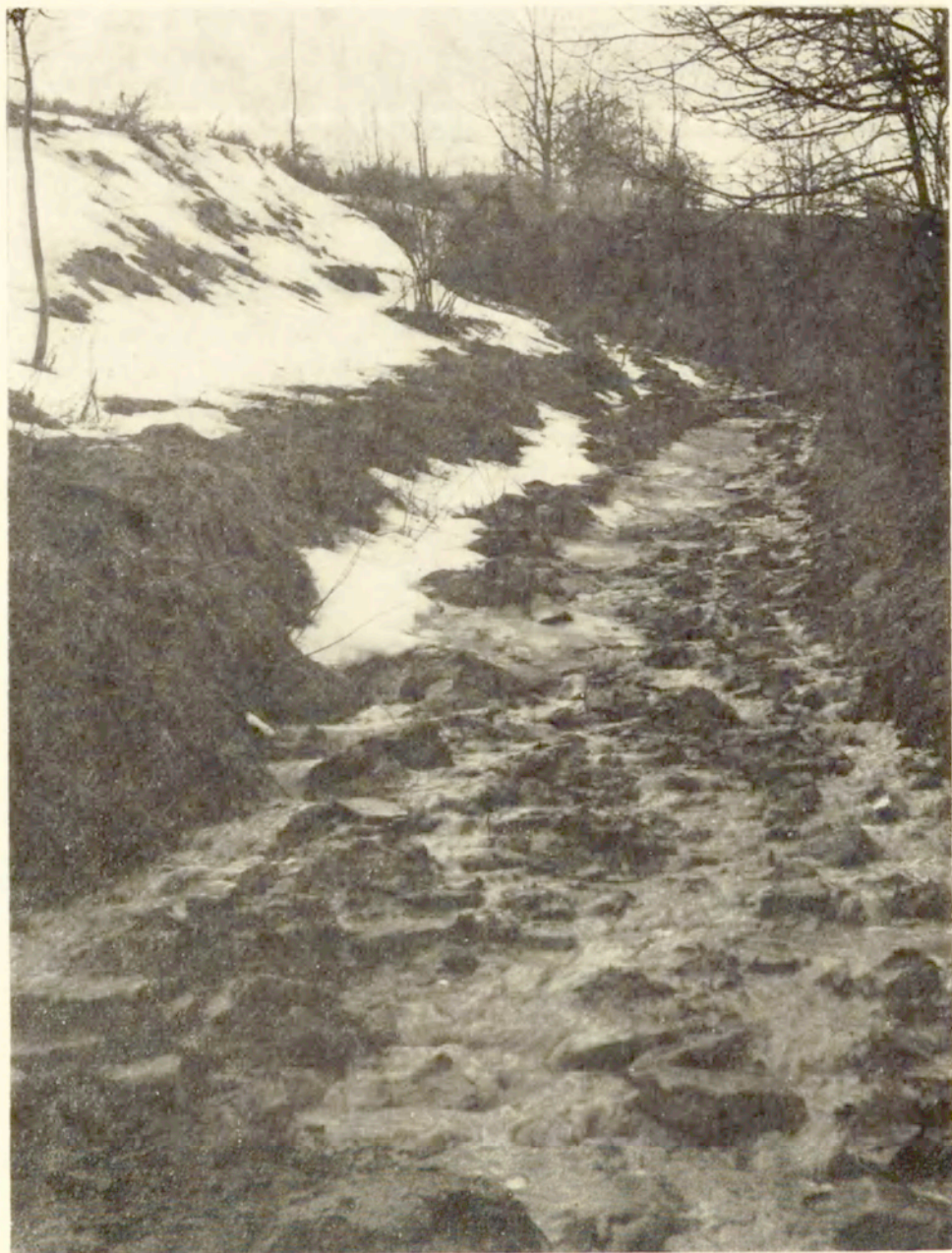
Fot. 3. Odcinek koryta doświadczalnego przy niskim stanie wody
Segment of the experimental channel during low water stage



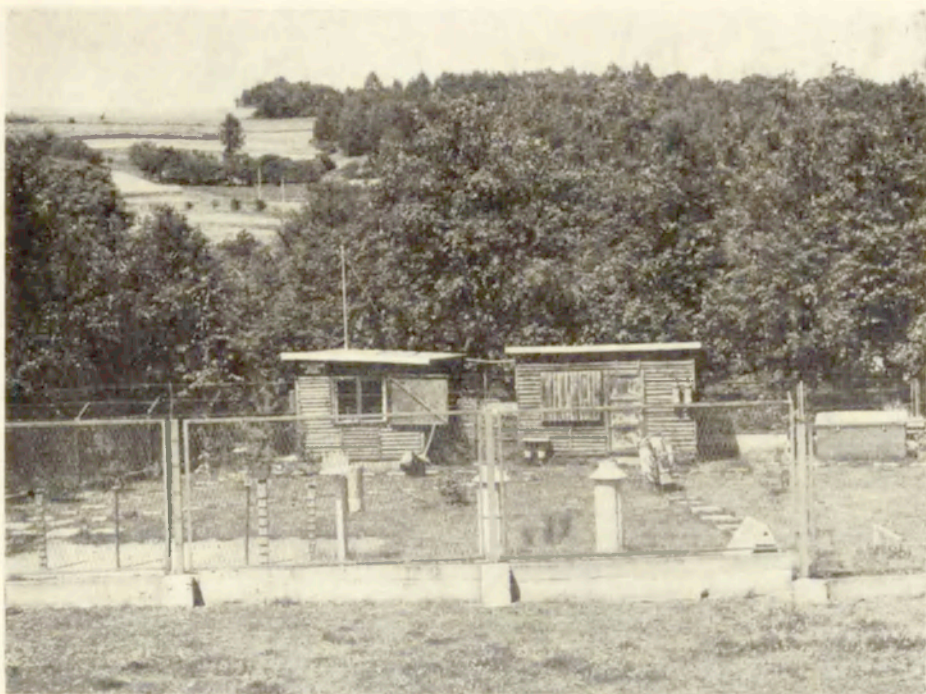
Fot. 4. Odcinek koryta doświadczalnego w czasie wezbrania
Segment of the experimental channel during high water stage



Fot. 5. Fragment stoku doświadczalnego w zlewni Homerki
Part of the experimental slope in Homerka catchment basin



Fot. 6. Spływ wody drogą polną w czasie roztopów
Concentrated flow in cart road during snow melt



Fot. 7. Stacja Badawcza Zakładu Geomorfologii i Hydrologii Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk

The Research Station of the Department of Geomorphology and Hydrology of the Institute of Geography and Spatial Organization of the Polish Academy of Sciences



Fot. 8. Reperowy przekrój hydrometryczny w korycie potoku Homerka
Main stream gauging station in channel of Homerka Stream



Fot. 9. Przelew pomiarowy do pomiarów spływu skoncentrowanego w drodze polnej na stoku doświadczalnym

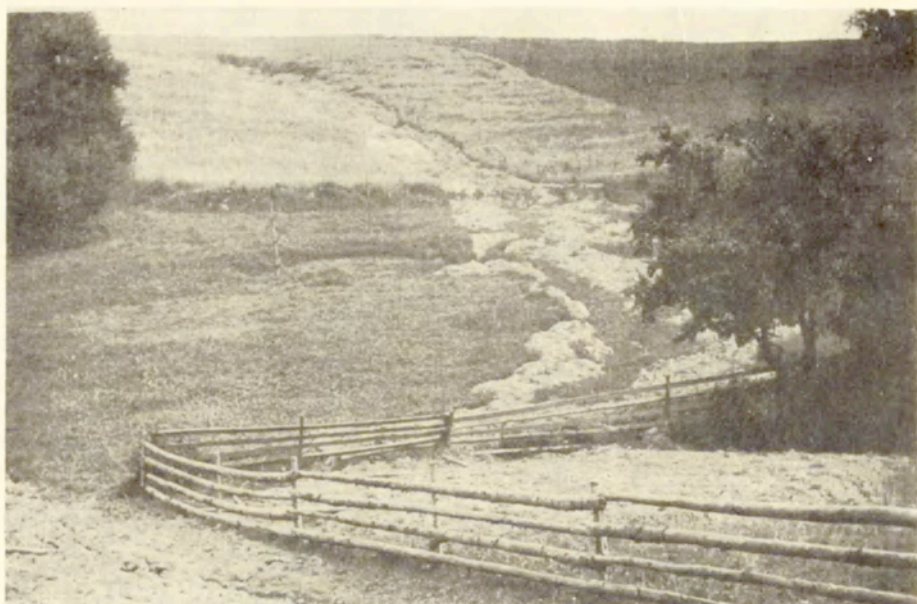
Sharp-crested weir for measurement of concentrated flow in cart road on the experimental slope



Fot. 10. Worli Słupika do pomiarów spływu powierzchniowego rozproszonego
Słupik's bags for measurement of overland sheet flow



Fot. 11. Pomia y pH i potencjału oksydacyjno-redukcyjnego wód glebowych w pie-
zometrach na stoku doświadczalnym
Measurements of pH and oxidation-reduction potential of soil water in observation
wells on the experimental slope



Fot. 12. Spływ gleby na stoku
Mud flow in micro-scale after heavy rain



Fot. 13. Przewiany materiał glebowy przykrywający zasneżoną
w drodze polnej
Snow bank covered by soil particles — effects of wind action in cart road



Fot. 14. Akumulacja gałęzi i pni drzew na filarach mostu w Maciejowej (Kamienica Nawojowska) podczas powodzi w 1973 r.

Branches and stems of trees accumulated beneath bridge over Kamienica Nawojowska River at Maciejowa village during flood in 1973



Fot. 15. Głazowo-żwirowe aluwia budujące terasę zalewową w ujściowym odcinku potoku Homerka

Boulders and gravels which built the flood plain in mouth of Homerka Stream



Fot. 16. Dostawa klastycznych zwierzelin z aktywnego podcięcia brzegu koryta potoku Homerka w wyniku działania lodu włóknistego
Delivery of sediment from active undercutting bank of Bącza Stream under influence of needle ice



Fot. 17. Zniszczenia budowli regulacyjnych w korycie Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) podczas powodzi w 1973 r.
Damage of regulation structures in channel of Kamienica Nawojowska River caused by flood in 1973

teriału ze stoków, tak charakterystyczną dla małych zlewni beskidzkich.

Badane małe zlewnie dopływów Kamienicy Nawojowskiej mają podobny rząd wielkości, a różnią się między sobą głównie rzeźbą i użytkowaniem ziemi. Proporcje typów rzeźby i powierzchni zajętej przez grunty orne i lasy oraz układ użytkowania sprawiają, że zlewnia Homerki może być uznana za fizyczny model zlewni Kamienicy Nawojowskiej. Zlewnie potoków Kryściów i Homerka reprezentują symetryczne małe zlewnie, a więc przeważającą część małych zlewni w Beskidzie Sądeckim. Natomiast wylesiona zlewnia potoku Bącza jest zlewnią asymetryczną, integrującą cechy zlewni położonych w obrębie niskich gór i wysokich pogórzy Beskidu Sądeckiego. Za zlewnie symetryczne uważa się te zlewnie, w których granice pięter morfogenetycznych przebiegają prostopadle do osi zlewni, a w zlewniach asymetrycznych ukośnie. Odcinek koryta potoku Homerka, wykorzystany jako koryto doświadczalne, jest typowym przykładem skalnego koryta potoku beskidzkiego, które współcześnie ulega pogłębianiu.

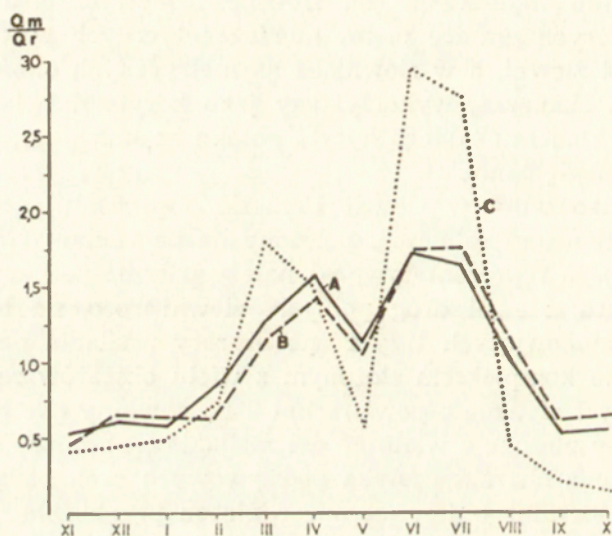
Stok doświadczalny w zlewni Homerki reprezentuje typowy stok beskidzki użytkowany rolniczo i położony na pograniczu średnich i niskich gór. Na jego reprezentatywność należy patrzeć pod kątem elementów składowych: zlewni dróg polnych, zlewni rozcięcia holocenińskiego i przyrzeczy stanowiących trzy różne obszary zasilania odpływu. Cały stok jest często kompleksem złożonym z wielu obszarów zasilania (Słupik 1981). Nawet zlewnie o powierzchni 2 ha powinny być rozpatrywane jako kompleksy złożone z wielu źródeł zasilania (Amerman 1965).

Przedstawiona charakterystyka podstawowych cech badanych zlewni i stoku doświadczalnego jest jedynie ogólnym przybliżeniem ich reprezentatywności jakościowej. Na ogół poprzestaje się na tego typu charakterystyce zlewni doświadczalnej i uważa się ją za wystarczającą podstawę do ekstrapolacji ilościowych wyników badań procesów transportu zwietrzelin. Tymczasem ekstrapolacja danych ilościowych powinna być poprzedzona „tarowaniem” zlewni określającym reprezentatywność ilościową. Jej składowymi elementami winny być związki między parametrami hydrologicznymi a parametrami transportu, pokazujące cały zakres natężenia procesów w różnych sytuacjach pogodowych oraz prawidłowości przestrzennego różnicowania parametrów transportu materiału wraz z przyrostem powierzchni zlewni.

W zlewni Kamienicy Nawojowskiej roczna suma opadów rośnie od 751 mm w Kotlinie Sądeckiej do 1084 mm na Jaworzynie Krynickiej (1040 mm n.p.m.). Te stosunkowo wysokie opady wiążą się z otwarciem zlewni w kierunku północno-zachodnim. Po przekroczeniu działu wodnego Kamienicy Nawojowskiej opady wyraźnie zmniejszają się w kierunku wschodnim (Niedźwiedź 1981). Toteż zlewnia Kamienicy Nawojowskiej pomimo „przejściowego” położenia ma reżim opadowy charakterystyczny dla Beskidów Zachodnich. Szczególnie wysokie sumy opadów prze-

kraczające 1010 mm występują między innymi w źródłowej części zlewni Homerki. Różnica w rocznej sumie opadów między ujściową częścią doliny Homerki a częścią źródłową przekracza 120 mm.

Co kilkanaście lat występują rozlewne deszcze z opadem przekraczającym 100 mm/dobę. Są one przyczyną gwałtownych powodzi, np. w latach 1970, 1972, 1973, 1974. Natomiast lokalne krótkotrwałe ulewy o dużym natężeniu wywołują nagłe wezbrania w małych zlewniach (np. w latach 1972, 1974). Pokrywa śnieżna występuje od 73 dni w Kotlinie Sądeckiej do 152 dni na Jaworzynie Krynickiej.



Ryc. 4. Stosunek średnich miesięcznych przepływów Q_m do średniego rocznego przepływu Q_r Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu

A — 1959-1978, B — 1969-1978, C — 1973

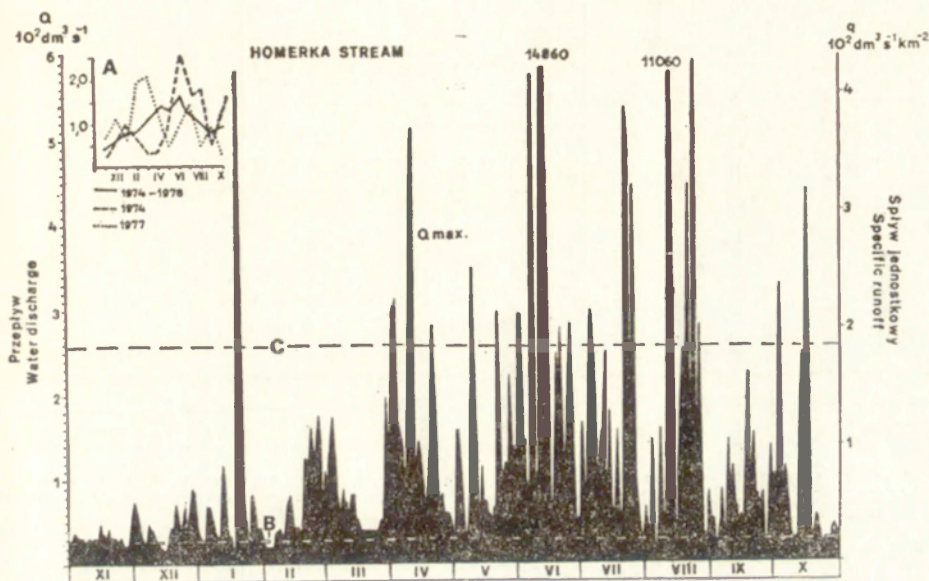
Ratio of mean monthly discharge Q_m to the mean annual discharge Q_r in Kamienica Nawojowska River at Nowy Sącz

A — 1959-1978, B — 1969-1978, C — 1973

Kamienica Nawojowska i jej dopływy charakteryzują się koncentracją odpływu w okresie wiosennych wezbrań roztopowych i letnich wezbrań deszczowych (ryc. 4-6). Dla wielolecia charakterystyczna jest przewaga odpływu w półroczu letnim, co jest typowe dla rzek zachodniobeskidzkich (Mikulski 1965; Dynowska 1971; Ziemońska 1973). W latach bez wielkich wezbrań deszczowych przeważa odpływ w półroczu zimowym.

Średni roczny przepływ Kamienicy Nawojowskiej w okresie badań (1969-1978) w Nowym Sączu wynosił $3930 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ ($12,2 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, tab. 2). Wartość ta nieznacznie różni się od średniej z dwudziestolecia (1959-1978), która wynosi $3710 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ ($11,3 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$). Dopływy Kamienicy Nawojowskiej charakteryzują się wyż-

szymi spływami jednostkowymi i szybką reakcją na opad. Średni roczny przepływ potoku Homerka w przekroju zamykającym zlewnię o powierzchni 14 km² w okresie badań wynosił 270 dm³ s⁻¹ (19,4 dm³ s⁻¹ km⁻²), a potoku Bącza (3,95 km²) — 58 dm³ s⁻¹ (14,6 dm³ s⁻¹ km⁻²).



Ryc. 5. Maksymalne przepływy dobowe potoku Homerka w latach 1974-1978

A — stosunek średnich miesięcznych przepływów do średniego rocznego; B — średni przepływ (1974-1978); C — przepływ uruchamiający żwirowy materiał denny

Maximum diurnal discharges in Homerka Stream in 1974-1978

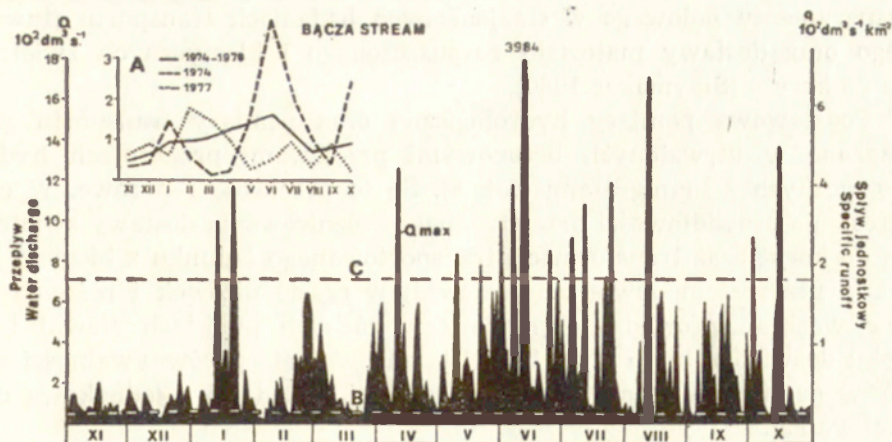
A — ratio of mean monthly discharge to the mean annual discharge; B — mean discharge (1974-1978); C — discharge commonly sets in motion coarse bed material

Miesiące wiosenne (marzec i kwiecień) oraz letnie (czerwiec-sierpień) charakteryzują się wyższymi średnimi przepływami związanymi z występowaniem wezbrań roztopowych i deszczowych. Głębokie niżówki jesienią i zimą są przyczyną niskich średnich miesięcznych przepływów. W przeważającej części roku występują przepływy zbliżone do średniego rocznego. Mniej niż 10% czasu roku przypada na przepływy wezbrań, które zasadniczo występują wiosną i latem (ryc. 5, 6). Co kilkanaście lat mają miejsce wezbrania, podczas których spływ jednostkowy przekracza 1200 dm³ s⁻¹ km⁻² (np. lata 1970, 1973, 1974). Niemal każdego roku, głównie jesienią i zimą, występują głębokie niżówki.

Okres badań (1969-1978) charakteryzował się dużą częstotliwością różnorodnych typów wezbrań i niżówek. Był on wystarczający do poznania mechanizmu procesów transportu i prawidłowości ich przestrzennego zróżnicowania. Jak wcześniej zaznaczono, celem pracy nie była

Tabela 2. Średnie miesięczne i roczne przepływy Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu (m^3s^{-1})Average monthly and yearly discharge in Kamienica Nawojowska river at Nowy Sącz (m^3s^{-1})

Rok Year	Miesiąc — Month												Średnia Mean
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
1969	1,92	0,86	0,70	2,22	2,21	4,42	1,00	2,20	2,60	4,22	0,751	0,472	1,96
1970	0,46	0,58	2,83	0,69	6,93	8,70	4,00	7,00	25,72	6,07	1,42	2,77	5,60
1971	3,27	3,07	3,06	2,78	5,65	2,61	2,34	1,92	3,62	1,069	1,26	0,805	2,62
1972	1,12	6,79	0,76	0,99	1,08	3,89	7,63	6,63	2,35	13,3	5,54	2,80	5,01
1973	2,00	2,14	0,50	3,58	9,02	7,50	2,88	14,7	13,80	2,20	1,01	0,77	5,00
1974	1,08	1,93	6,99	2,89	1,20	1,47	4,83	14,2	6,82	7,60	2,05	8,88	5,02
1975	4,06	4,34	3,45	0,68	2,24	7,70	5,95	12,1	6,53	2,58	1,78	2,54	4,51
1976	1,17	1,50	4,53	2,38	4,58	8,89	4,76	3,46	1,11	1,38	2,72	2,33	3,23
1977	1,94	3,22	1,86	6,14	7,15	4,17	1,70	1,88	2,86	1,95	2,66	0,87	3,01
1978	0,76	1,44	1,10	2,67	4,86	5,96	6,34	3,42	2,57	3,65	4,21	3,38	3,37
1969-1978	1,78	2,59	2,58	2,50	4,49	5,53	4,14	6,75	6,80	4,40	2,34	2,56	3,93
1959-1978	1,93	2,28	2,11	3,04	4,79	5,82	4,23	6,37	6,07	3,73	1,89	1,98	3,71



Ryc. 6. Maksymalne przepływy dobowe potoku Bącza w latach 1974-1978

A — stosunek średnich miesięcznych przepływów do średniego rocznego; B — średni przepływ (1974-1978); C — przepływ uruchamiający zwirowy materiał denny

Maximum diurnal discharges in Bącza Stream in 1974-1978 years

A — ratio of mean monthly discharge to the mean annual discharge; B — mean discharge (1974-1978); C — discharge commonly sets in motion coarse bed material

ocena natężenia transportu zwietrzelin w poszczególnych latach oraz określenie wartości średnich, toteż pominięto hydroklimatyczną charakterystykę poszczególnych lat.

METODY BADAŃ I TECHNIKI POMIARÓW

Podstawą pracy są wyniki 10-letniego (1969-1978) cyklu stacjonarnych badań terenowych i eksperymentalnych w zlewni Kamienicy Na wojowskiej oraz w zlewniach jej dopływów, w potokach: Kryściów, Homerka i Bącza (ryc. 1, 2). Od 1971 roku kompleksowe studia nad procesami fluwialnymi i hydrologicznymi prowadzono głównie w zlewniach potoków Homerka i Bącza w zorganizowanej przez autora Stacji Badawczej Zakładu Geomorfologii i Hydrologii Gór i Wyżyn Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk we Frycowej (fot. 7). Stacja wyposażona jest w laboratorium, które umożliwia wykonywanie fizycznych i chemicznych analiz transportowanych zwietrzelin.

Badania procesów fluwialnych prowadzono w korytach naturalnych i uregulowanych, a także w korycie doświadczalnym. W latach 1976-1978 badaniami objęto również dostawę wody i zwietrzelin ze stoku doświadczalnego w Homrzychach do koryta potoku Homerka (Froehlich, Słupik 1977, 1980a). Równolegle prowadzono studia eksperymentalne nad rozbrzygiem gleby na poletkach doświadczalnych (Froehlich, Słupik 1980b). Sposób prowadzenia badań w zlewni Homerki stanowi przykład

eksperymentu polowego w stacjonarnych badaniach transportu fluwialnego oraz dostawy materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin do koryta (Slaymaker 1980).

Podstawowe pomiary hydrologiczne oraz pomiary transportu prowadzono w utrwalonych betonowymi przelewami przekrojach hydrometrycznych z limnigrafami (fot. 8). Są to przekroje reperowe. W celu określenia prawidłowości przestrzennego zróżnicowania dostawy zwietrzelin do koryt oraz transformacji transportowanego ładunku z biegiem koryt (z przyrostem powierzchni zlewni) w czasie niżówek i różnych typów wezbrań prowadzono pomiary w różnych punktach zlewni i na stoku doświadczalnym (ryc. 1–3). Dla zapewnienia porównywalności wyników pomiary wykonywano tymi samymi metodami z jednakową częstotliwością.

Próby wody do analiz koncentracji materiału rozpuszczonego i zawiesiny pobierano barometrem butelkowym o pojemności 1 dm³. Czas jego napełnienia w stojącej wodzie wynosił 125 s. Przy niskich stanach próby wody pobierano jeden raz na dobę, a w czasie wezbrań co godzinę. Ciągłe pomiary koncentracji materiału rozpuszczonego (przewodnictwa elektrycznego wody) i koncentracji zawiesiny (zmęcenia) wykonywano okresowo od 1977 roku przy zastosowaniu standardowego konduktometru OK 102 RADELKIS ($\pm 2\%$) i elektronicznego mętnościomierza własnej konstrukcji.

Koncentrację zawiesiny określano głównie metodą filtracyjną (sączki ilościowe twarde ważone z dokładnością do $\pm 0,0005$ g), a także przez pomiary objętości materiału ulegającego sedymentacji w cechowanych cylindrach i za pomocą fotokolorymetru. Otrzymane różnymi metodami wyniki były porównywane za pomocą eksperymentów laboratoryjnych i metod statystycznych. Zawartość materiału organicznego w zawiesinie oznaczano jako ubytki masy po wyprażeniu próbek w piecu elektrycznym w temperaturze 550°C. Skład mechaniczny klastycznych zwietrzelin transportowanych w zawiesinie analizowano za pomocą wagi sedymentacyjnej oraz mikroskopu projekcyjnego z nasadką do badań statystycznych.

Zawartość materiału rozpuszczonego w przefiltrowanych próbach oznaczano przez odparowanie wody w parownicy kwarcowej na łaźni wodnej, a następnie określano zawartość substancji organicznych w osadzie po wyprażeniu w piecu elektrycznym (Guy 1969; Hermanowicz i in. 1976). Pomiary przewodnictwa właściwego wody wykonywano w laboratorium w temperaturze 25°C przy zastosowaniu standardowego konduktometru OK 102 RADELKIS ($\pm 2\%$), a pełny skład jonowy wód oznaczano okresowo, głównie metodą miareczkowania. Pomiary potencjału jonów wodorowych (pH) oraz potencjału oksydacyjno-redukcyjnego (redox) wykonywano bezpośrednio w terenie przy użyciu przenośnego pehametru bateryjnego ($\pm 0,05$ pH, ± 5 mV).

Transport ładunku materiału dennego oznaczano pośrednio poprzez pomiary niwelacyjne przyrostu objętości aluwii w basenach sedymentacyjnych powyżej zapór przeciwrumowiskowych i przepustów drogowych (por. Reniger 1955; Pietruszewski 1955; Bartnik, Gładki 1972; Prochal 1973; Froehlich, Klimek 1979). Bezpośrednie pomiary natężenia transportu dennego wykonywano za pomocą łapaczy z siatki oraz skrzyń zakopywanych w obrębie różnych części łóżyska powodziowego (por. Langer 1950; Hubbell 1964). Od 1978 roku do pomiarów transportu materiału dennego autor zastosował elektroniczny detektor akustyczny własnej konstrukcji, składający się z mikrofonu dynamicznego zatopionego w rurze plastikowej, który w układzie ze wzmacniaczem impulsów i rejestratorem umożliwiał określenie względnego natężenia transportu ładunku dennego i czasu jego trwania w stosunku do hydrogramu (por. Johnson, Muir 1969; Anderson 1976).

Transport poszczególnych frakcji żwirowego materiału dennego badano za pomocąznaczonych różnokolorową emalią otoczków (por. Dobija i in. 1970; Kaszowski 1973; Dudziak 1975; Froehlich 1975). Frakcje piaszczyste znaczone przy użyciu luminoforów (por. Marsz 1967). Zastosowane w pracy metody badań transportu ładunku dennego wymagają dalszego doskonalenia metod, aparatury i jej tarowania (Richards, Milne 1979). Otrzymane wyniki obarczone są błędami, które na obecnym etapie techniki pomiarów tego procesu są niemożliwe do uniknięcia i trudne do oceny przy zastosowaniu rachunku błędów. Toteż przy interpretacji wyników zachowano daleko idącą ostrożność.

Skład mechaniczny aluwii frakcji żwirowych określano przy zastosowaniu dużych sit umożliwiających analizę 50 kg próby, natomiast skład mechaniczny frakcji piaszczystych za pomocą standardowej wstrząsarki sitowej. Udział frakcji pylasto-ilastych oznaczano metodą areometryczną.

Natężenie okresowej sedymentacji frakcji ilasto-pylastych w miejscach zaprądowych oceniano za pomocą stalowych skrzyń łapaczy o wymiarach 500x300x40 mm. W korycie doświadczalnym oraz w reperowych przekrojach hydrometrycznych obserwowano oddziaływanie plech glonów na zatrzymywanie pylasto-ilastych zwierzdelin transportowanych w czasie średnich i niskich stanów wody, a także wpływ obumierania plech glonów na wzrost koncentracji materiału organicznego w zawieszynie (por. Froehlich 1975). Ładunek transportowanych makroszczątków organicznych w postaci liści i drobnych gałęzi określano za pomocą siatki plastikowej przegradzającej koryto. W czasie spływu kry oceniano rozmiary transportu materiału wmarznętego w lód, miejsca i rozmiary jego sedymentacji oraz strefy rozluźnienia bruku erozyjnego w korycie, spowodowanego uderzeniami kry.

Zmiany wysokości dna i szerokości koryta rejestrowano opierając

się na stałych reperach i pomiarach niwelacyjnych lub przy zastosowaniu stalowych prętów (por. Evans 1967; Froehlich 1975). Niszczenie ławic skalnych w brzegach i dnie koryta stwierdzano poprzez ubytki powierzchni znaczonej kolorową emalią (por. Kaszowski 1970, 1973; Niemirowski 1974; Froehlich 1975). Rozmiary dostawy materiału z aktywnych podcięć koryta określano łapaczami z siatki plastikowej.

Równoległe z badaniami w korytach naturalnych prowadzono obserwacje i pomiary procesów fluwialnych w korytach uregulowanych. Dolny odcinek koryta potoku Homerka był regulowany w latach 1973-1978. Porównanie wyników badań z okresów przed, w czasie i po regulacji umożliwia wyjaśnienie jej wpływu na zmiany w przebiegu procesów korytowych.

W korycie doświadczalnym badano tempo i mechanizm erozji cokołu skalnego, dostawę klastycznych zwietrzelin z koryta oraz transport zawiesiny i materiału dennego. Eksperymenty związane z transportem klastycznych zwietrzelin dotyczyły poprzecznej i podłużnej dyspersji zawiesiny, szybkości jej sedymentacji i długości drogi transportu poszczególnych frakcji w zależności od temperatury wody (lepkości). Transport materiału dennego badano pod wpływem szerokości strefy transportu i odległości przemieszczania poszczególnych frakcji otoczków podczas różnych typów wezbrań.

Badaniami na stoku doświadczalnym w Homrzychach objęto powierzchnię i podziemną dostawę materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin do koryta potoku Homerka. Pomiary skoncentrowano u podnóża stoku oraz w dnie doliny (ryc. 3), aby uchwycić wpływ całego stoku i dna doliny na dostawę wody i zwietrzelin do koryta (Froehlich, Słupik 1977).

Metody i częstotliwość pomiarów w przekrojach hydrometrycznych na stoku doświadczalnym były identyczne jak w przekrojach reperowych zamykających zlewnie potoków Homerka i Bącza. Przy zastosowaniu przelewu Thomsona mierzono przepływ na 5 drogach polnych (fot. 9), rozcięciu holocenijskim i w źródłach. Powyżej przelewów zainstalowano łapacze w postaci stalowych skrzyń, służące do określania rozmiarów transportu ładunku dennego i poboru prób do analiz składu mechanicznego transportowanego materiału.

Spływ powierzchniowy oraz splukiwanie na trwałych użytkach zielonych w obrębie przyrzecza mierzono u podnóża stoku oraz na kontakcie dna doliny z korytem. Stanowisko pomiarowe składało się z trzech „worków Słupika” (fot. 10). Po każdym opadzie wywołującym spływ powierzchniowy oznaczano objętości spływu oraz pobierano z każdego worka próby do analizy koncentracji materiału rozpuszczonego, organicznego i klastycznych zwietrzelin.

Na stanowiskach pomiarowych wyposażonych w piezometry o głębokości 0,5; 1; 1,5; 2 m i rozmieszczonych na stoku doświadczalnym od

wierzchowiny do dna doliny (ryc. 3) obserwowano stany wody w pokrywach zwietrzelinowych, oznaczano pH i potencjał redox (fot. 11) oraz pobierano próby wody do analiz chemicznych.

Badania erozji i transportu zwietrzelin na stoku doświadczalnym rozszerzono o eksperymentalne studia nad zróżnicowaniem natężenia rozbryzgu gleby na poletkach symulujących pole orne i drogę gruntową (Froehlich, Słupik 1980b). Systematycznie prowadzono dokumentację fotograficzną rejestrującą przebieg i skutki działania procesów morfogenetycznych.

Wyniki badań opracowano standardowymi metodami statystycznymi. Główną uwagę zwrócono na uchwycenie związków ilościowych przez obliczenie współczynników korelacji i równań regresji oraz na analizę błędów. Potraktowano to jako podstawę ilościowego opisu niektórych elementów mechanizmu procesów transportu i jego związków z parametrami hydrologicznymi. Określone równaniami regresji trendy poszczególnych procesów transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin ze stoków umożliwiają uchwycenie wzajemnej ilościowej oceny oraz ekstrapolowanie ich wektora na wartości nieobserwowane. W przyszłości mogą one być podstawą do skonstruowania ilościowego modelu przestrzennego zróżnicowania transportu zwietrzelin w małej zlewni beskidzkiej.

Ładunek transportowanego materiału rozpuszczonego i zawiesiny dla każdego okresu wyliczono ze wzoru:

$$L = \sum_{i=1}^n C Q \Delta t,$$

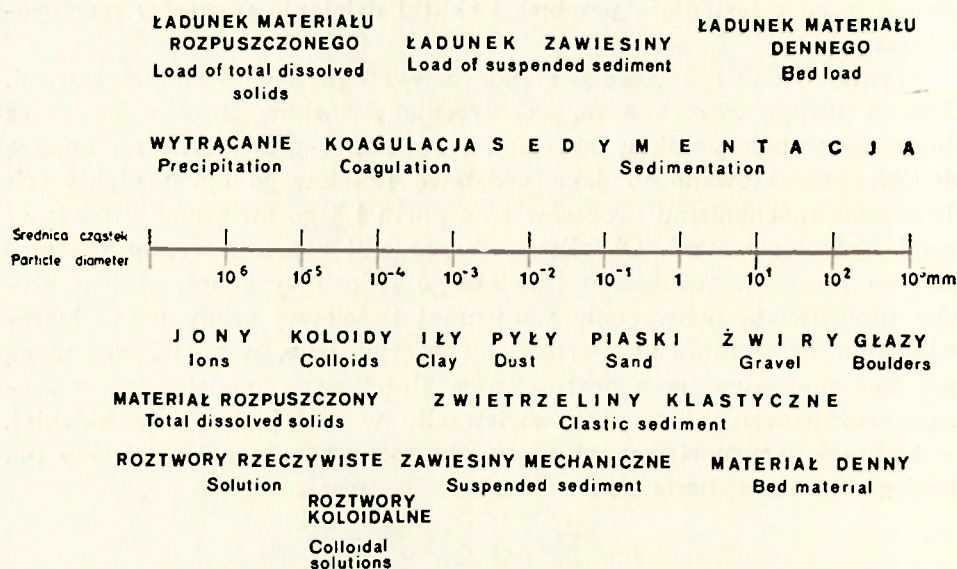
gdzie: L — transportowany ładunek materiału [$\text{mg } \Delta t^{-1}$];
 n — liczba pomiarów;
 C — koncentracja materiału [mg];
 Q — objętość przepływu w czasie pobierania próby [$\text{dm}^3 \text{s}^{-1}$];
 Δt — przedział czasu przypadający na dany pomiar [s].

Wartości splukiwania odniesiono do pasa szerokości 1 m, przyjmując za podstawę wartość średnią z pomiarów w trzech workach, i ekstrapolowano na całą długość przyrzecza bezpośrednio przylegającego do koryta.

Ilościową ocenę udziału różnych źródeł dostawy materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin do koryta oparto na porównaniach: (1) związków ilościowych między parametrami hydrologicznymi a parametrami transportu; (2) wartości ekstremalnych oraz wielkości transportowanego ładunku; (3) częstotliwości zjawisk. Porównano również skład mechaniczny zwietrzelin na stoku doświadczalnym z materiałem dostarczającym ze stoku do koryta oraz transportowanym w korycie potoku Homerka. Takie porównanie w powiązaniu z pomiarami ilościowymi transportowanego ładunku umożliwiło identyfikację źródeł dostawy zwietrzelin.

Wielkość cząstek zwietrzelin jest jednym z podstawowych paramet-

rów determinujących mechanizm ich transportu i stabilizacji. W warunkach zlewni beskiddzkich transportowane są produkty wietrzenia i erozji oraz materiał organiczny. Średnice transportowanych cząstek mieszczą się w przedziale 10^{-6} - 10^3 mm, co odpowiada płynnemu przejściu od rozтворów rzeczywistych poprzez koloidalne do mechanicznych zawiesin i żwirowo-głazowych aluwiiów facji korytowej (ryc. 7).



Ryc. 7. Schemat podziału produktów wietrzenia, sposobów ich transportu i stabilizacji na tle średnicy cząstek

Scheme of classification, manner of transportation and stabilization of weathering residue against a background of particles diameter

Podział na transport materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin wynika z wielkości transportowanych cząstek, mechanizmu transportu i związków między parametrami hydrologicznymi a parametrami transportu. Transport materiału rozpuszczonego w odróżnieniu od transportu klastycznych zwietrzelin wykazuje ścisły związek z przepływem i można go aproksymować za pomocą prostych zależności. Fluwialny transport klastycznych zwietrzelin odbywa się w zawiesinie lub w postaci ładunku dennego w zależności od średnicy cząstek i warunków hydrodynamicznych. Ta sama frakcja piaszczysto-pylastych zwietrzelin w zależności od prędkości wody może być transportowana w zawiesinie lub w postaci ładunku dennego (Hjulström 1935; Sundborg 1956). Natomiast transport cząstek poprzez saltację jest formą pośrednią między transportem w zawiesinie a transportem dennym.

W pracy zastosowano terminologię oraz oznaczenia dotyczące podstawowych parametrów transportu materiału ogólnie przyjęte w światowej literaturze geomorfologicznej (por. Froehlich 1975).

* * *

Praca wykonana została w Zakładzie Geomorfologii i Hydrologii Gór i Wyżyn Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. Pragnę wyrazić głęboką wdzięczność Kierownikowi Zakładu Prof. dr. hab. L. Starkłowi, pod którego życzliwą opieką i kierunkiem w 1969 roku rozpocząłem stacjonarne badania terenowe, będące podstawą niniejszej pracy. Z Jego inspiracji podjąłem trud organizacji Stacji Badawczej we Frycowej w zlewni potoku Homerka i badania procesów fluwialnych w zlewniach różnej wielkości. Profesor wspierał zawsze moje wysiłki, służył swoim doświadczeniem i zachęcał do dalszej pracy podkreślając wartość prowadzonych badań. Koledze dr. hab. J. Słupikowi wyrażam wdzięczność za przyjacielską pomoc i współpracę w czasie badań terenowych na stoku doświadczalnym w Homrzyskach, dzięki której transport fluwialny i dostawę zwietrzelin do koryt mogłem powiązać z mechanizmem krążenia wody w zlewni. Koleżankom i Kolegom z Zakładu Geomorfologii i Hydrologii Gór i Wyżyn w Krakowie dziękuję za pomoc i dyskusje. Mgr M. Klimek dziękuję za wykonanie rysunków do pracy.

TRANSPORT MATERIAŁU ROZPUSZCZONEGO

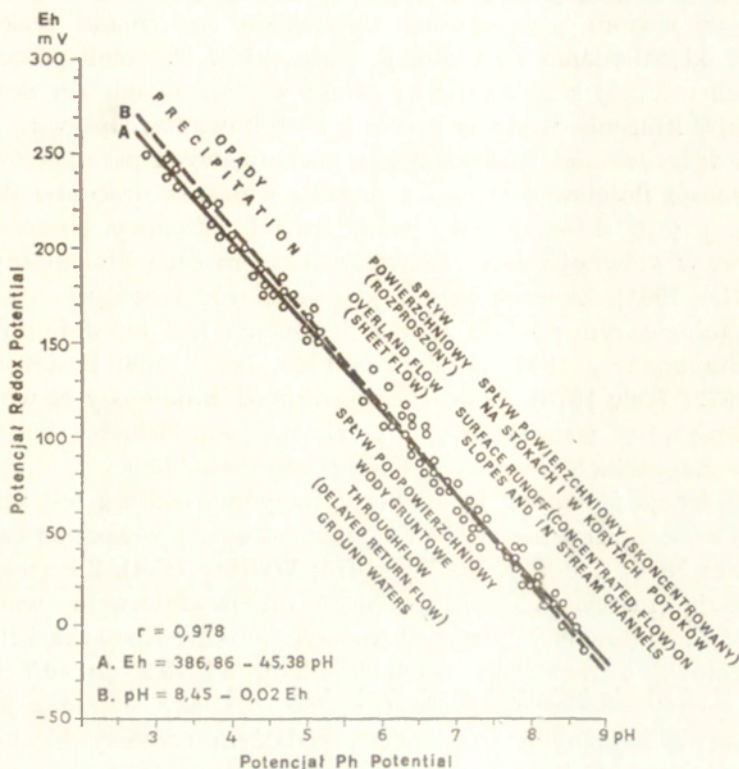
PARAMETRY CHEMICZNE WODY NA TLE PROCESU KSZTAŁTOWANIA ODPŁYWU

Parametry chemiczne wód biorących udział w procesie transformacji opadu w odpływ są nieodzowne do poznania przestrzennego zróżnicowania natężenia procesów denudacji chemicznej w zlewni. Stanowią one również podstawę oceny reprezentatywności ilościowej zlewni pod względem procesów transportu fluwialnego i dostawy do koryt materiału rozpuszczonego.

Natężenie procesów ługowania podłoża uzależnione jest głównie od agresywności krążących wód, którą określa potencjał jonów wodorowych (pH). Natomiast o właściwościach utleniających i redukcyjnych roztworów informuje potencjał oksydacyjno-redukcyjny (redox). W warunkach zlewni potoku Homerka potencjał jonów wodorowych różnych typów wód mieści się w przedziale 3-8,5 pH, a odpowiadający mu potencjał oksydacyjno-redukcyjny w przedziale od -50 do +280mV. Zróżnicowanie pH w Beskidach zamyka się w tym samym zakresie (Bombówna 1960, 1965, 1969; Pasternak 1968; Maultz 1972; Froehlich 1975).

Związek między potencjałem jonów wodorowych a potencjałem oksydacyjno-redukcyjnym krążących w zlewni Homerki wód ma postać zależności liniowej o wysokim współczynniku korelacji (ryc. 8). Zależność ta umożliwia prześledzenie zmienności tych parametrów w procesie transformacji opadu w odpływ i odnosi się do okresu pełni lata. W cyklu rocznym granice wartości dla poszczególnych typów wód ulegają stosunkowo niewielkim przesunięciom przy zachowaniu charakteru zależności. Potencjał oksydacyjno-redukcyjny zmienia się w zależności od pory roku. Najniższy jest w okresie wiosny i wzrasta w lecie i jesieni (Wróbel 1976a).

Silnie kwaśny odczyn (3-5 pH) i reakcje utleniania (> 150 mV) są charakterystyczne dla wód opadowych oraz wód spływu powierzchniowego rozproszanego. Pomimo silnej agresywności chemicznej czas oddziaływania tych wód na podłoże jest bardzo krótki (Kotarba 1972). Infiltracja wód w podłoże pociąga za sobą zmiany ich cech na bardziej obojętne. Powierzchnia gruntu stanowi granicę dla tej transformacji. Drugą grani-



Ryc. 8. Związek między potencjałem jonów wodorowych (pH) a potencjałem oksydacyjno-redukcyjnym (redox, Eh) dla różnych typów wód krążących w zlewni Homerki

Relation between hydrogen ion activity (pH) and oxidation-reduction potential (redox, Eh) for various types of water circulating within Homerka catchment basin

cę, poniżej której typowe są już reakcje o charakterze redukcyjnym, wyznacza migrujące w cyklu rocznym zwierciadło zawieszonych wód gruntowych w pokrywach zwietrzelinowych lub trwale zwierciadło wód gruntowych.

Wypadkową oddziaływania chemicznego wód powierzchniowych i podziemnych są cechy wód rzecznych, wykazujących wąski zakres pH w cyklu rocznym (7,2–8,5 pH). Wody korytowe charakteryzują się zatem małą agresywnością i buforowością, wskutek czego w korycie praktycznie nie zachodzi rozpuszczanie (Kotarba 1972). Zatem ocena agresywności wód w zlewni nie może się ograniczać do badań wód płynących w korytach.

Podczas transformacji opadu w odpływ zaznacza się wyraźnie ciągła zmiana parametrów chemicznych wód biorących udział w krążeniu: od silnie kwaśnych wód opadowych poprzez obojętne wody rzeczne ku

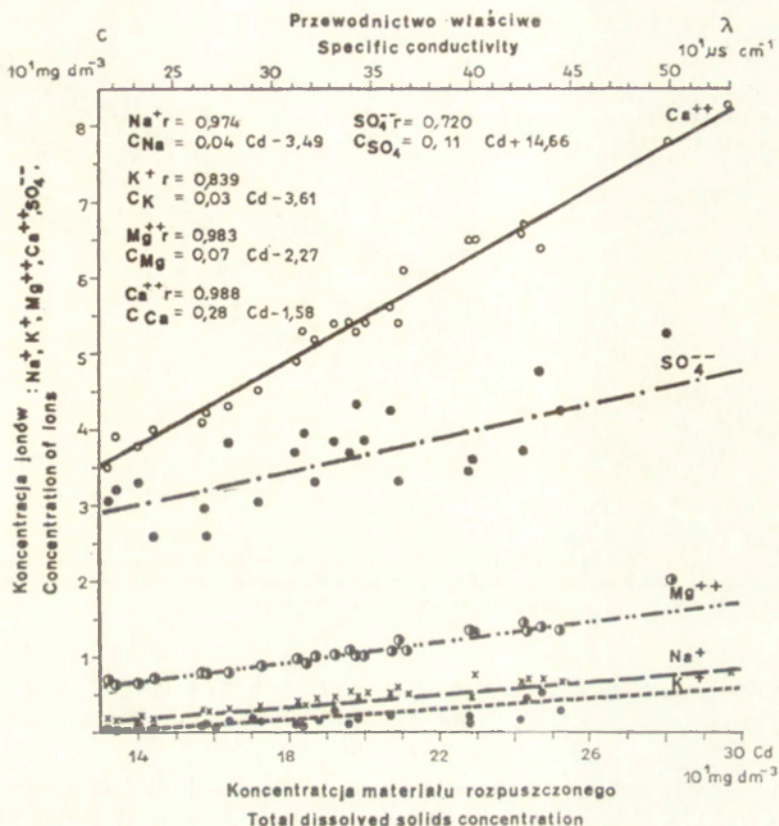
zasadowym wodom podziemnym. Odpowiada im zmiana reakcji chemicznych od utleniania do redukcji. Natężenie i kierunek procesów denudacji chemicznej regulowane są zatem wielkością udziału poszczególnych ogniw krążenia wody w procesie kształtowania odpływu.

Obok agresywności wód jednym z podstawowych parametrów reprezentatywności ilościowej zlewni z punktu widzenia procesów denudacji chemicznej jest skład jonowy wód. Udział ilościowy poszczególnych jonów jest w głównej mierze odzwierciedleniem cech litologicznych podłoża (Miller 1961). Związek składu jonowego wód rzecznych z wykształceniem litologicznym podłoża zlewni fliszowych jest już dość dobrze poznany (Stangenberg 1958; Bombówna 1960, 1965, 1969; Pasternak 1968; Maultz 1972; Welc 1978). Skład chemiczny wód Kamienicy Nawojowskiej i jej dopływów jest typowy dla zlewni beskidzkich zbudowanych z warstw magurskich i podmagurskich (Pasternak 1968).

Koncentracja głównych jonów pochodzących z podłoża jest proporcjonalna do koncentracji materiału rozpuszczonego i przewodnictwa właściwego (Hem 1970; Gregory, Walling 1973; Walling 1974). Związek między koncentracją materiału rozpuszczonego (przewodnictwem właściwym) a koncentracją głównych jonów w wodach potoków Homerka i Bącza ma postać liniową o współczynnikach korelacji od -0,9 do -0,7 (ryc. 9). Niski współczynnik korelacji dla jonu SO_4^{2-} należy wiązać z jego znaczną dostawą z różnych źródeł poza podłożem (procesy biochemiczne, ścieki gospodarcze). Wyprowadzony związek pozwala na wystarczająco dokładne oznaczenie stężenia głównych jonów w stosunku do koncentracji materiału rozpuszczonego (przewodnictwa właściwego). Umożliwia to bilansowanie ilości wynoszonych jonów w stosunku do ładunku materiału rozpuszczonego i ocenę stosunków ilościowych między poszczególnymi jonami.

Przewodnictwo właściwe jest dobrym wskaźnikiem koncentracji materiału rozpuszczonego (Gregory, Walling 1973). Z uwagi na szybkość i łatwość wykonywania analiz pomiar przewodnictwa właściwego jest obecnie szeroko stosowany do określania koncentracji materiału rozpuszczonego. Związek między przewodnictwem właściwym a koncentracją materiału rozpuszczonego dla różnych typów wód w zlewni Homerki przybliża równanie liniowe o wysokim współczynniku korelacji (ryc. 10). Wzrost koncentracji materiału rozpuszczonego nawiązuje do mechanizmu krążenia wody. Z analizy zależności wynika, że koncentracja materiału rozpuszczonego rejestrowana w korycie potoku jest wypadkową koncentracji składowych ogniw krążenia wody. Toteż na podstawie pomiarów w korycie nie można wnioskować o źródłach dostawy materiału rozpuszczonego, a tym samym o przestrzennym zróżnicowaniu procesów denudacji chemicznej w zlewni.

Poznanie właściwości chemicznych wody ułatwia określenie roli poszczególnych typów wód w procesie ługowania podłoża i dostawy do koryta materiału rozpuszczonego. Jest to klucz do poznania przestrzen-

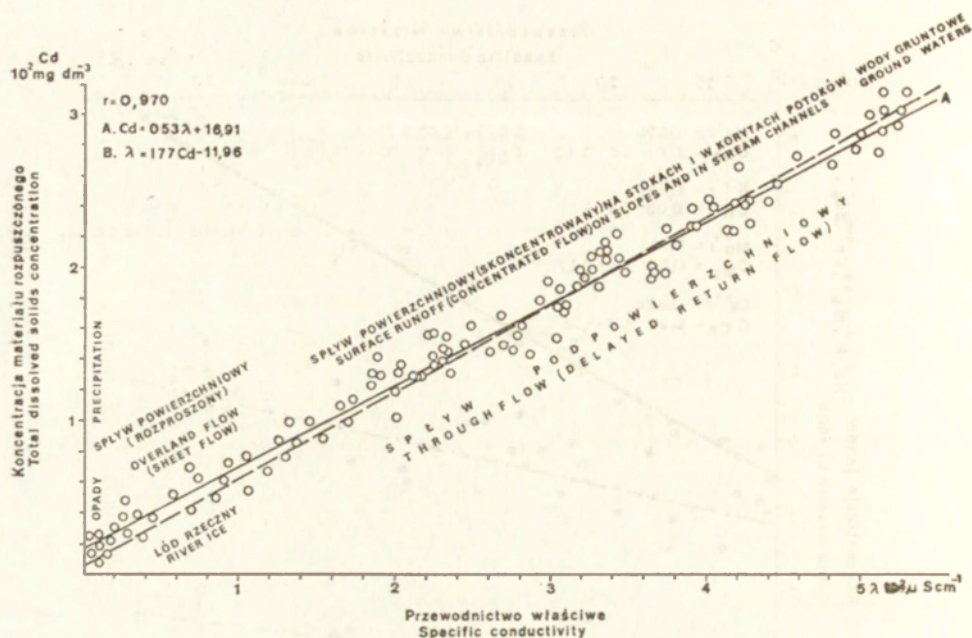


Ryc. 9. Związek między koncentracją materiału rozpuszczonego (Cd) a koncentracją głównych jonów (C): Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , SO_4^{--} w wodach zlewni potoku Homerka i Bączka

Relation between concentration of total dissolved solids and concentration of several ions (C): Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , SO_4^{--} in water of Homerka and Bączka catchment basins

nego zróżnicowania natężenia procesów denudacji chemicznej. Skład chemiczny wody można też wykorzystać jako naturalny traser w badaniach mechanizmu transformacji opadu w odpływ.

Stężenie elektrolitów w wodach zlewni beskidzkich (z wyjątkiem wód mineralnych) jest bardzo małe, a zawartość poszczególnych jonów jest często na poziomie mikroelementów, co wskazuje, że kompleksy skał fliszowych są trudno rozpuszczalne. Rejestrowane różnice koncentracji materiału rozpuszczonego w różnych punktach małej zlewni należy wiązać z czasem krążenia poszczególnych typów wód oraz z sumaryczną powierzchnią kontaktu wody z litą skałą lub zwietrzelinami (Alekin 1956; El Boushi, Davis 1969). Szybkość filtracji i powierzchnia kontaktu w litych skałach zależy od ich porowatości i uszczelnienia, a w przypadku zwietrzelin od ich składu mechanicznego. Istotny wzrost sumarycznej powierzchni kontaktu zaznacza się w obszarach zbudowanych z łatwo



Ryc. 10. Związek między przewodnictwem właściwym (λ) a koncentracją materiału rozpuszczonego (Cd) dla różnych rodzajów wód krążących w zlewni potoku Homerka i Bącza

Relation between specific conductivity (λ) and total dissolved solids concentration (Cd) for various water types circulating within Homerka and Bącza basins

wietrzejących warstw łupkowych (np. fragmenty zlewni potoku Bącza). Podobnie duże znaczenie dla ilości jonów ługowanych z podłoża mają również adsorpcyjne właściwości gleb związane z ich zasobnością w substancje ilaste i organiczne (Pasternak 1968). Właściwości fizyczne skał i zwietrzelin uwarunkowane są litologią i nawiązują do piętrowego zróżnicowania rzeźby w małych zlewniach beskidzkich (Starkel 1972b). Znajduje to odzwierciedlenie we wzroście koncentracji materiału rozpuszczonego w wodach płynących w korycie od źródeł do ujścia (Froehlich, Słupik 1979, 1980c).

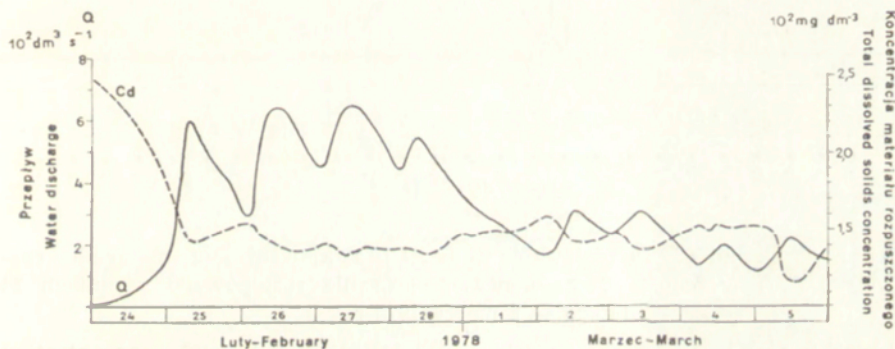
TRANSPORT MATERIAŁU ROZPUSTCZONEGO W ZLEWNIACH RÓŻNEJ WIELKOŚCI

ZWIĄZEK KONCENTRACJI I ŁADUNKU MATERIAŁU ROZPUSTCZONEGO Z PRZEPŁYWEM WODY

Pochodzenie materiału rozpuszczonego oraz natężenie denudacji chemicznej w zlewni określa się zwykle na podstawie pomiarów ładunku materiału rozpuszczonego w przekroju hydrometrycznym. Do oznaczenia

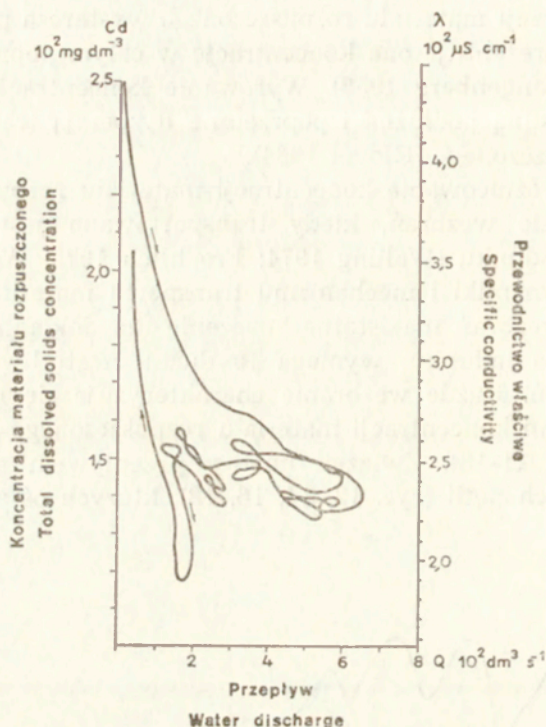
średniej koncentracji materiału rozpuszczonego wystarcza pobranie jednej próby wody. Reprezentuje ona koncentrację w całym poprzecznym przekroju koryta (Stangenberg 1958). Wyrównanie koncentracji w przekroju jest związane z silną podłużną i poprzeczną dyspersją transportowanego materiału rozpuszczonego (Glover 1964).

Największe zróżnicowanie koncentracji materiału rozpuszczonego występuje w okresie wezbrań, kiedy transportowana jest przeważająca część rocznego ładunku (Walling 1974; Froehlich 1975; Welc 1980). Dlatego poznanie dynamiki i mechanizmu transportu materiału rozpuszczonego w czasie wezbrań ma istotne znaczenie dla dokładnego określenia transportowanego ładunku; wymaga to dużej częstotliwości pomiarów w czasie wezbrań. Każde wezbranie charakteryzuje się indywidualnym przebiegiem zmian koncentracji materiału rozpuszczonego w stosunku do przepływu (ryc. 11-18). Związek między przepływem a koncentracją ma postać wąskich pętli (ryc. 12, 14, 16, 18), których oś symetrii można



Ryc. 11. Przepływ wody (Q) i koncentracja materiału rozpuszczonego (Cd) w potoku Bącza podczas wezbrania roztopowego w dniach 24 lutego — 5 marca 1978 r.
Water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (Cd) in Bącza Stream during snow-melt high water stage (February 24 — March 5, 1978)

opisać za pomocą równania regresji krzywoliniowej (por. Walling, Webb 1980). Pętle składają się z wyraźnych dwóch członów odpowiadających okresowi wzrostu i opadania fali wezbrania. Mała szerokość pętli świadczy o niewielkich różnicach w dostawie materiału rozpuszczonego w czasie wzrostu i opadania fali wezbrania. Podczas wezbrań następuje zmniejszenie koncentracji materiału rozpuszczonego (Glover, Johnson 1974). Najmniejsza koncentracja przypada w czasie kulminacji przepływu (ryc. 11, 13, 15, 17). Prawdliwość tę stwierdzono również w czasie wezbrań o kilku kulminacjach przepływu. Każdej kulminacji odpowiada wówczas inna generacja pętli. Wzrost koncentracji materiału rozpuszczonego po kulminacji wezbrania jest zwierciadlanym odbiciem krzywych regresji przepływu (ryc. 19, 20). Najwyższe wartości koncentracji rejestrowano w czasie głębokich nizin (por. Gatewood i in. 1964).



Ryc. 12. Związek między przepływem wody (Q) a koncentracją materiału rozpuszczonego (C_d) w potoku Bącza podczas wezbrania roztopowego w dniach 24 lutego — 5 marca 1978 r.

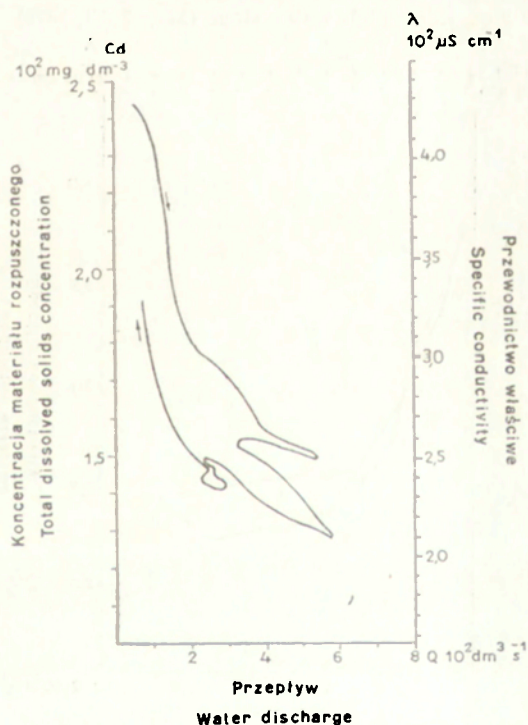
Relation between water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (C_d) in Bącza Stream during snow-melt high water stage (February 24 — March 5, 1978)

W cyklu rocznym najniższe wartości koncentracji materiału rozpuszczonego stwierdzono w czasie wezbrań roztopowych. Zmniejszenie koncentracji wywołuje woda pochodząca z topnienia pokrywy lodowej w korycie. Woda związana w lodzie rzeczny ma znacznie niższą koncentrację materiału rozpuszczonego niż płynąca w korycie. W czasie bowiem zamarzania wody następuje częściowe wytrącanie elektrolitów. Ponadto niska koncentracja materiału rozpuszczonego w czasie wezbrań roztopowych wiąże się z dużym udziałem spływu powierzchniowego rozproszonego w tworzeniu kulminacji wezbrania. Wody pochodzące z ablacji pokrywy śnieżnej i spływające po powierzchni gruntu charakteryzują się niską koncentracją soli rozpuszczonych (ryc. 10). Różnorodność typów roztopów, często kilku kolejno następujących po sobie (np. w latach 1977, 1978, 1979), powoduje istotne różnice w proporcjach udziału poszczególnych źródeł zasilania w tworzeniu wezbrania. Pociąga to za sobą indywidualny dla każdego wezbrania roztopowego przebieg



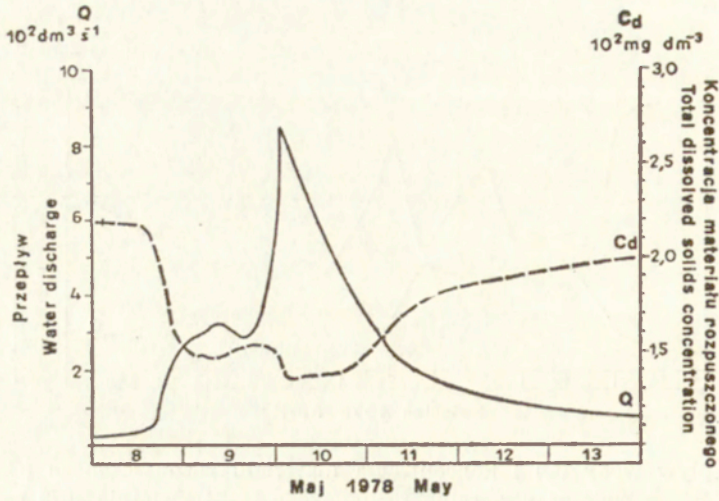
Ryc. 13. Przeptyw wody (Q) i koncentracja materiału rozpuszczonego (Cd) w potoku Bącza podczas wezbrania roztopowego 18-24 kwietnia 1978 r.

Water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (Cd) in Bącza Stream during snow-melt high water stage (April 18-24, 1978)

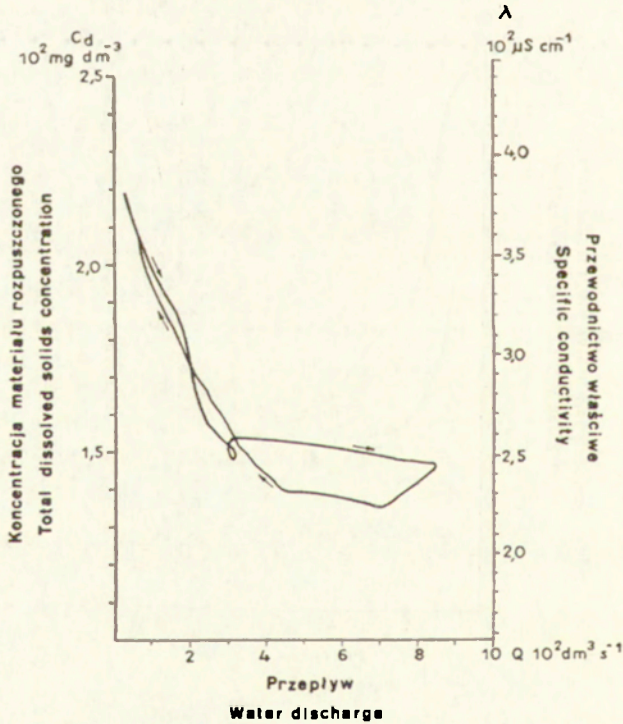


Ryc. 14. Związek między przepływem wody (Q) a koncentracją materiału rozpuszczonego (Cd) w potoku Bącza podczas wezbrania roztopowego w dniach 18-24 kwietnia 1978 r.

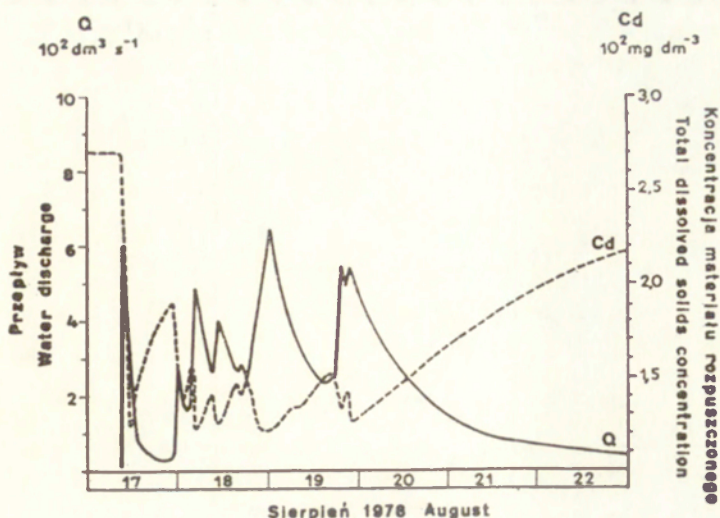
Relation between water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (Cd) in Bącza Stream during snow-melt high water stage (April 18-24, 1978)



Ryc. 15. Przepływ wody (Q) i koncentracja materiału rozpuszczonego (C_d) w potoku Bącza podczas wezbrania deszczowego w dniach 8-13 maja 1978 r.
 Water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (C_d) in Bącza Stream during rainy high water stage (May 8-13, 1978)



Ryc. 16. Związek między przepływem wody (Q) a koncentracją materiału rozpuszczonego (C_d) w potoku Bącza podczas wezbrania deszczowego w dniach 8-13 maja 1978 r.
 Relation between water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (C_d) in Bącza Stream during rainy high water stage (May 8-13, 1978)

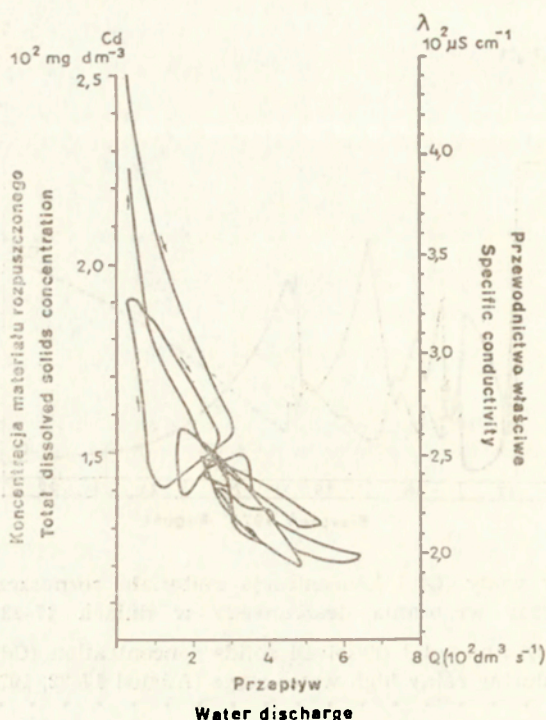


Ryc. 17. Przepływ wody (Q) i koncentracja materiału rozpuszczonego (Cd) w potoku Bączka podczas wezbrania deszczowego w dniach 17-22 sierpnia 1978 r.
Water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (Cd) in Bączka Stream during rainy high water stage (August 17-22, 1978)

koncentracji materiału rozpuszczonego w stosunku do przepływu (ryc. 11-14).

Koncentracja materiału rozpuszczonego podczas wezbrań deszczowych zależy od typu opadów. Wezbrania wywołane opadami rozlewnymi charakteryzują się na ogół wyższą koncentracją materiału rozpuszczonego w porównaniu z wezbraniem wywołanym ulewami. Jest to spowodowane dużym udziałem spływu śródpokrywowego, o wysokiej koncentracji materiału rozpuszczonego, w tworzeniu wezbrania wywołanego opadami rozlewnymi. Dlatego w czasie jesiennych, rozlewnych, długotrwałych opadów (np. 1974 r.) transportowana jest duża ilość materiału rozpuszczonego (por. Welc 1978, 1980). W początkowej fazie wezbrań deszczowych następuje spadek koncentracji materiału rozpuszczonego, który wiąże się z bezpośrednim opadem wody deszczowej na powierzchnię wody w korycie oraz z dostawą do koryta wód poprzez spływ powierzchniowy rozproszony i linijny z obszarów przykorytowych. Są to wody o małej koncentracji materiału rozpuszczonego (ryc. 10).

Jest niemal regułą, że przy podobnych przepływach kolejne, szybko następujące po sobie, podobnego typu wezbrania charakteryzują się coraz mniejszą koncentracją materiału rozpuszczonego. Należy to wiązać z chwilowym „niedoborem” rozpuszczalnych soli z tych samych obszarów zasilania. Dopiero dłuższy okres międzywezbraniowy lub wystąpienie innego typu wezbrania przerywa tendencję spadku koncentracji. W świetle tego zjawiska można sądzić, że procesy ługowania soli z pod-

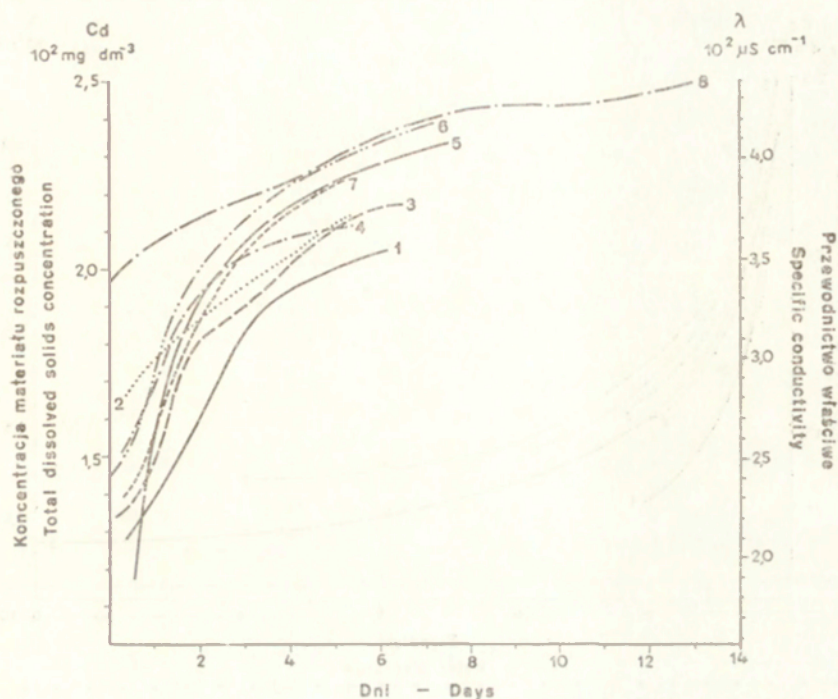


Ryc. 18. Związek między przepływem wody (Q) a koncentracją materiału rozpuszczonego (Cd) w potoku Bącza podczas wezbrania deszczowego w dniach 17-22 sierpnia 1978 r.

Relation between water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (Cd) in Bącza Stream during rainy high water stage (August 17-22, 1978)

łoża ściśle wiążą się z czasem krążenia wód. Dlatego w okresach przyspieszonej cyrkulacji wody procesy ługowania i dostawy nie nadążają za odprowadzaniem soli.

Przyjmuje się, że związek między przepływem wody Q a koncentracją materiału rozpuszczonego Cd w średnich i dużych rzekach przybliża równanie regresji krzywoliniowej (hiperboli lub paraboli), a w rzekach małych — równanie liniowe (Jaworska 1968; Kotarba 1972). Dla badanych potoków najlepszą aproksymację związku $Cd = f(Q)$ stanowi równanie $y = a^x - b$ (ryc. 21). W przebiegu tej zależności dają się wyodrębnić trzy wyraźne człony. Początkowa część krzywej odpowiadająca przepływowi niżówkowym i ich przejściu ku przepływowi średnim rocznym ma największe nachylenie z uwagi na duży gradient koncentracji materiału rozpuszczonego. W tym zakresie przepływów wysoka koncentracja materiału rozpuszczonego spowodowana jest dopływem wód z długotrwałego lub głębokiego krążenia. Z hydrochemicznego punktu widze-



Ryc. 19. Zmiany koncentracji materiału rozpuszczonego (Cd) po kulminacji różnych typów wezbrań w potoku Bącza

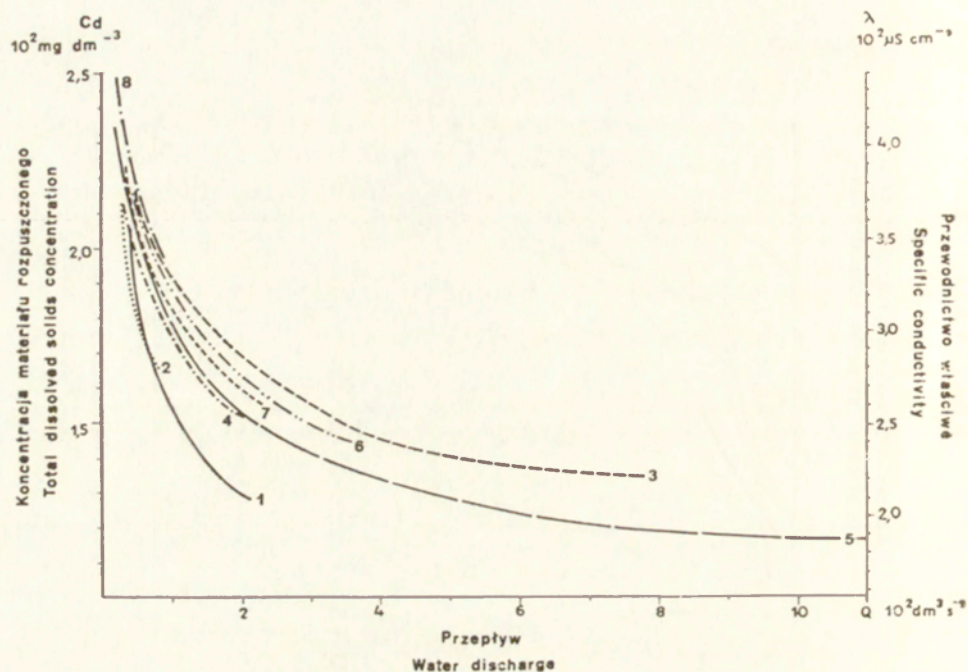
1,2 — wezbrania roztopowe; 3-8 — wezbrania deszczowe

Changes of total dissolved solids concentration (Cd) in Bącza Stream after peak discharge during various types of high water stages

1,2 — snow melt high water stages; 3-8 — rainy high water stages

nia są to wody „nasycone” (ryc. 10). Strefa przepływów średnich rocznych wzrastających ku przepływowi wezbraniowemu odpowiada charakterystycznemu zagięciu w przebiegu zależności i ma charakter przejściowy. Odzwierciedla zarówno długi czas krążenia, jak i głębokie zasilanie śródpokrywowe i powierzchniowe. Najdłuższy odcinek zależności $Cd = f(Q)$ o bardzo małym nachyleniu (można tu dla uproszczenia przyjąć zależność liniową) odpowiada całemu zakresowi przepływów wezbraniowych. Tego typu zależność może mieć zastosowanie do ilościowej, wstępnej oceny powierzchniowej i podpowierzchniowej dostawy materiału rozpuszczonego, a w badaniach odpływu stanowić podstawę genetycznego rozdziału hydrogramu wezbrania (Kunkle 1965; Newbury i in. 1969; Nakamura 1971).

W dorzeczu Kamienicy Nawojowskiej dla przekrojów hydrometrycznych, zamykających zlewnie różnej wielkości, graficznym obrazem zależności $Cd = f(Q)$ są linie proste, prawie równoległe względem siebie



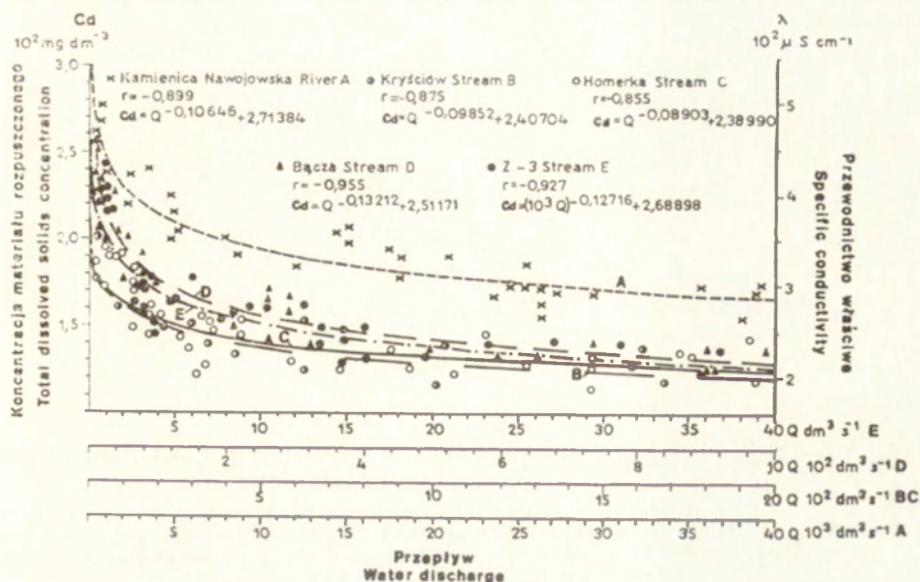
Ryc. 20. Związek między przepływem wody (Q) a koncentracją materiału rozpuszczonego (C_d) w potoku Bącza po kulminacji różnych typów wezbrań

1,2 — wezbrania roztopowe; 3-8 — wezbrania deszczowe

Relation between water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (C_d) in Bącza Stream after peak discharge during various types of high water stages

1,2 — snow melt high water stages; 3-8 — rainy high water stages

(ryc. 22). Najwyższe położenie w układzie zajmuje Kamienica Nawojowska. Znajduje to również odbicie w zależności między splywem jednostkowym a koncentracją materiału rozpuszczonego (ryc. 23). To hierarchiczne uszeregowanie zlewni wskazuje, że koncentracja materiału rozpuszczonego zmienia się w pewnym ustalonym porządku zależnym od wielkości zlewni cząstkowych i ich położenia względem cieku głównego. Koncentracja w cieku głównym jest znacznie wyższa niż w dopływach, co wiąże się z dużym udziałem zasilania z utworów aluwialnych wyścielających dno doliny Kamienicy Nawojowskiej. Zasobność zbiorników wód podziemnych w dnach dolin rzek beskidzkich wzrasta z biegiem rzek (Punzet 1978). W miarę wzrostu szerokości dna doliny maleje bezpośrednia dostawa wody i materiału rozpuszczonego ze stoków. W szerokich dnach dolin rolę stoków w dostawie przejmuję dno doliny. Należy jednak pamiętać, że zbiorniki wód podziemnych w wąskich dnach dolin potoków beskidzkich kontaktują się z wodami stoko-



Ryc. 21. Związek między przepływem wody (Q) a koncentracją materiału rozpuszczonego (Cd)

A — Kamienica Nawojowska; B — potok Kryściów; C — potok Homerka; D — potok Bącza; E — ciek odwadniający rozcięcie holocenne na stoku doświadczalnym Z3

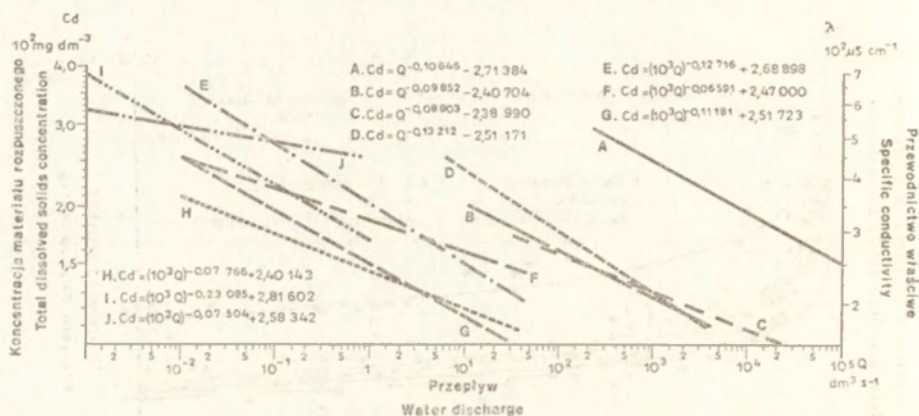
Relation between water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (Cd)

A — Kamienica Nawojowska River; B — Kryściów Stream; C — Homerka Stream; D — Bącza Stream; E — the stream drained a holocene hollow (Z3) at the experimental slope

wymi (Słupik 1981), co wskazuje na pierwotne źródło pochodzenia materiału rozpuszczonego.

W zlewniach beskidzkich wraz ze wzrostem powierzchni zlewni maleją wartości spływu jednostkowego (Ziemońska 1973; Punzet 1978), a koncentracja materiału rozpuszczonego rośnie odwrotnie proporcjonalnie do wartości spływu jednostkowego (por. Froehlich, Słupik 1979, 1980c).

Przy obliczeniach ładunku materiału rozpuszczonego Ld pomocny jest związek między przepływem wody a ładunkiem materiału rozpuszczonego. Związek ten ma postać wąskich pętli odpowiadających genetycznie związkowi między koncentracją materiału rozpuszczonego a przepływem wody. Najlepiej przybliża go równanie liniowe o współczynniku korelacji znacznie wyższym niż w przypadku związku $Cd = f(Q)$. Z charakteru zależności wynika, że transportowany ładunek materiału jest wprost proporcjonalny do przepływu wody (ryc. 24). Zatem reżim transportu materiału rozpuszczonego jest zgodny z reżimem hydrologicznym ciek (Froehlich 1975).

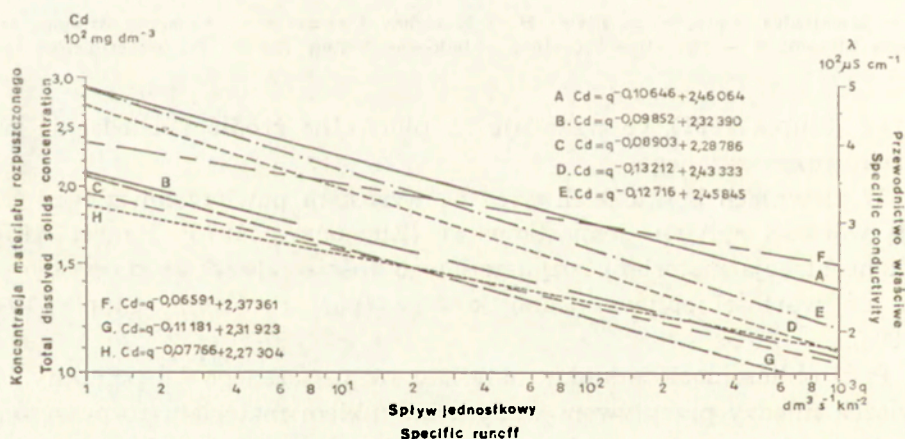


Ryc. 22. Związek między przepływem wody (Q) a koncentracją materiału rozpuszczonego (C_d)

A — Kamienica Nawojowska; B — potok Kryściów; C — potok Homerka; D — potok Bącza; E — ciek odwadniający rozcięcie holocenne na stoku doświadczalnym Z3; F — droga nr 1; G — droga nr 4; H — droga nr 5; I — źródło na stoku doświadczalnym; J — źródło w dnie doliny potoku Bącza

Relation between water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (C_d)

A — Kamienica Nawojowska River; B — Kryściów Stream; C — Homerka Stream; D — Bącza Stream; E — the stream drained a holocene hollow (Z3) at the experimental slope; F — cart road no. 1; G — cart road no. 4; H — cart road no. 5; I — spring on the experimental slope; J — spring in valley bottom of Bącza Stream

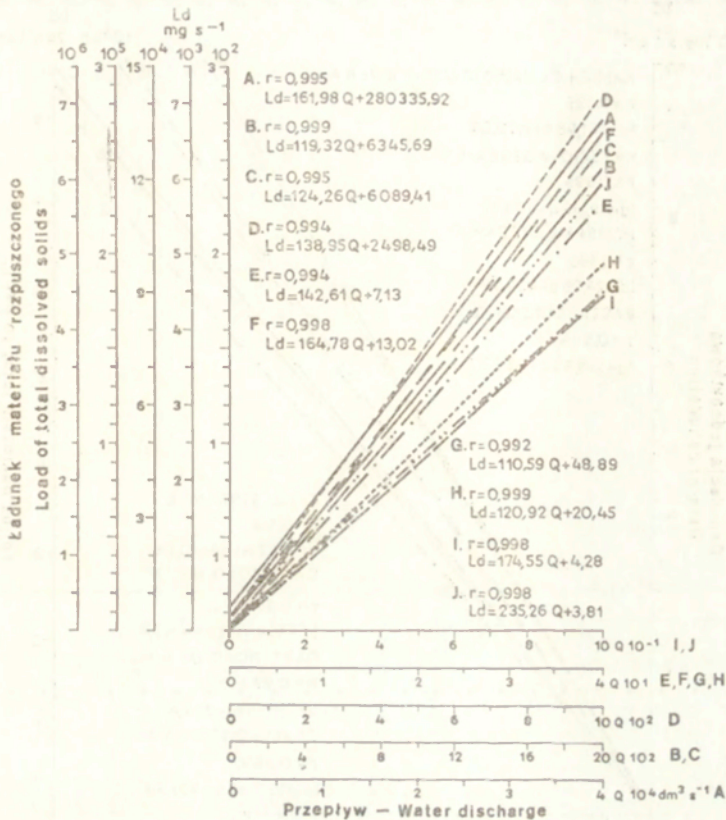


Ryc. 23. Związek między splywem jednostkowym (q) a koncentracją materiału rozpuszczonego (C_d)

A — Kamienica Nawojowska; B — potok Kryściów; C — potok Homerka; D — potok Bącza; E — ciek w rozcięciu holocenne na stoku doświadczalnym; F — droga nr 1; G — droga nr 4; H — droga nr 5

Relation between specific runoff (q) and total dissolved solids concentration (C_d)

A — Kamienica Nawojowska River; B — Kryściów Stream; C — Homerka Stream; D — Bącza Stream; E — the stream drained a holocene hollow (Z3) at the experimental slope; F — cart road no. 1; G — cart road no. 4; H — cart road no. 5



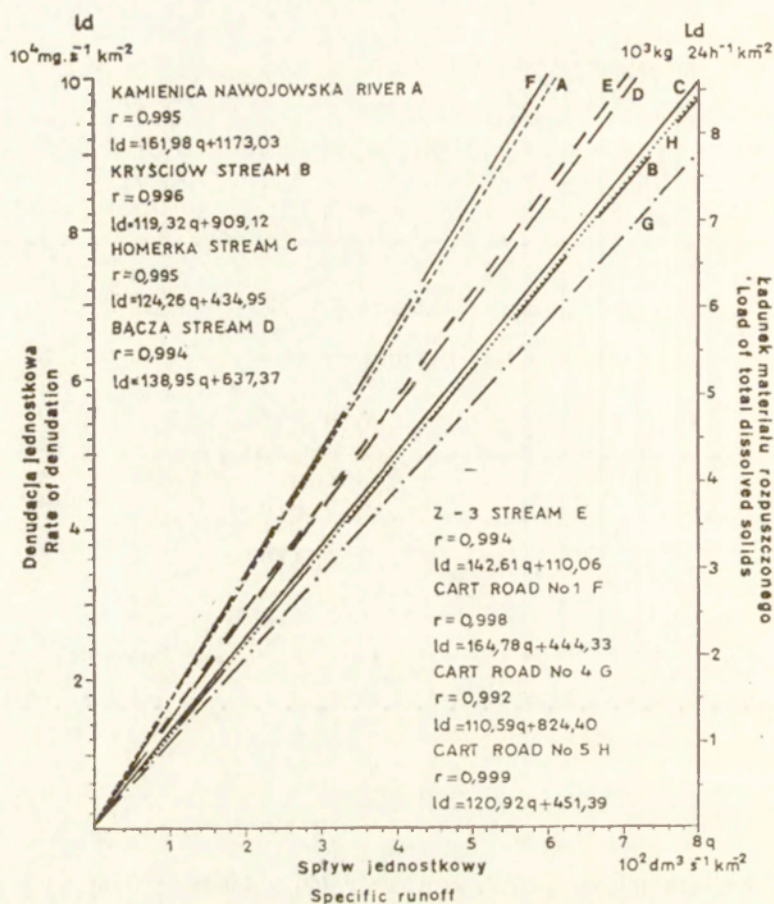
Ryc. 24. Związek między przepływem wody (Q) a ładunkiem materiału rozpuszczonego (L_d)

A — Kamienica Nawojowska; B — potok Kryściłów; C — potok Homerka; D — potok Bącza; E — ciek w rozcięciu holocenijskim na stoku doświadczalnym; F — droga nr 1; G — droga nr 4; H — droga nr 5; I — źródło na stoku doświadczalnym; J — źródło w dnle doliny potoku Bącza

Relation between water discharge (Q) and load of total dissolved solids (L_d)

A — Kamienica Nawojowska River; B — Kryściłów Stream; C — Homerka Stream; D — Bącza Stream; E — the stream drained a holocene hollow (Z3) at the experimental slope; F — cart road no. 1; G — cart road no. 4; H — cart road no. 5; I — spring on the experimental slope; J — spring in valley bottom of Bącza Stream

Odchylenia w przebiegu związku $L_d = f(Q)$ dla poszczególnych dopływów Kamienicy Nawojowskiej wskazują na duże zróżnicowanie wielkości wynoszonego ładunku z poszczególnych zlewni. Rzuca to światło na dokładność wyników i wartość wniosków przy bezpośredniej ekstrapolacji danych ilościowych z przekroju hydrometrycznego z małej zlewni na dużą i odwrotnie, nawet jeżeli dotyczy to w miarę jednorodnego dorzecza (ryc. 25). Toteż należy zachować ostrożność przy przestrzennej interpretacji wyników otrzymanych w tradycyjnych pomiarach denudacji chemicznej.



Ryc. 25. Związek między spływem jednostkowym (q) a denudacją jednostkową (ld)

A — Kamienica Nawojowska; B — potok Kryściów; C — potok Homerka; D — potok Bącza;
E — ciek w rozcięciu holocenijskim na stoku doświadczalnym; F — droga nr 1; G — droga
nr 4; H — droga nr 5

Relation between specific runoff (q) and rate of chemical denudation (ld)

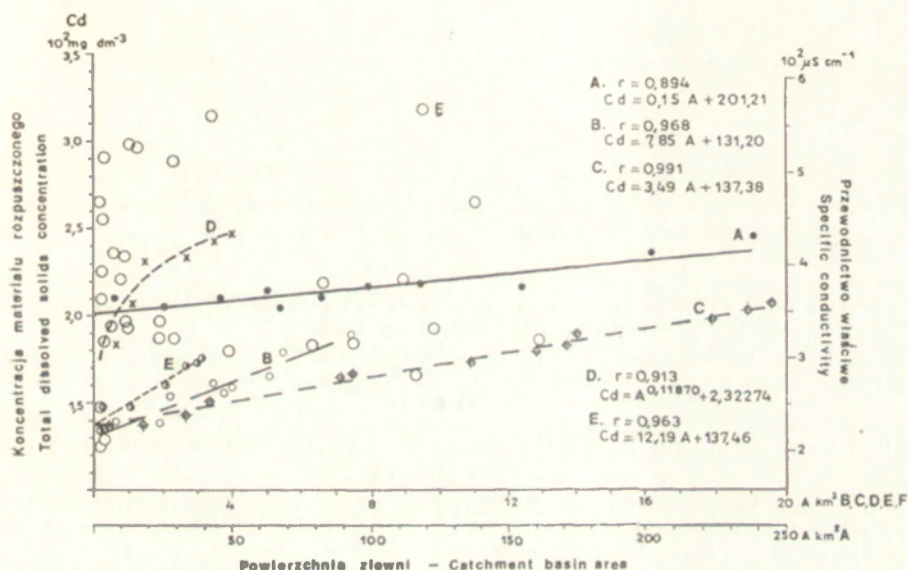
A — Kamienica Nawojowska River; B — Kryściów Stream; C — Homerka Stream; D —
Bącza Stream; E — the stream drained a holocene hollow (Z3) at the experimental slope;
F — cart road no. 1; G — cart road no. 4; H — cart road no. 5

PRAWIDŁOWOŚCI ZRÓŻNICOWANIA PARAMETRÓW TRANSPORTU MATERIAŁU ROZPUSZCZONEGO Z BIEGIEM KORYTA

Dla poznania reprezentatywności wyników badań transportu materiału w przekroju hydrometrycznym zamykającym zlewnię konieczne jest poznanie prawidłowości zróżnicowania parametrów transportu z biegiem cieków od źródeł do ujścia, w układzie zgodnym z przyrostem powierzchni zlewni. Tego typu badania wymagają porównywalnych, a zatem jedno-

rodnych hydrologicznie warunków w całej zlewni. Warunki takie spełniają okresy długotrwałych niszówek i wezbrań z deszczy rozlewnych.

Prawidłowością w rzekach i potokach beskidzkich jest ogólny wzrost koncentracji materiału rozpuszczonego od źródeł do ujścia (Stangenberg 1958; Bombówna 1960, 1969; Maultz 1972; Froehlich 1975; Froehlich, Słupik 1979, 1980c). Zaznacza się to wyraźnie w Kamienicy Nawojowskiej i jej dopływach (ryc. 26, 27). Gradient koncentracji między źródłem a ujściem dla różnej wielkości zlewni w dorzeczu Kamienicy Nawojowskiej jest bardzo podobny. W małych zlewniach wzrost koncentracji odbywa się na krótszej drodze niż w zlewniach większych. Wiąże się on



Ryc. 26. Związek między przyrostem powierzchni zlewni (A) a koncentracją materiału rozpuszczonego (Cd) w korytach potoków

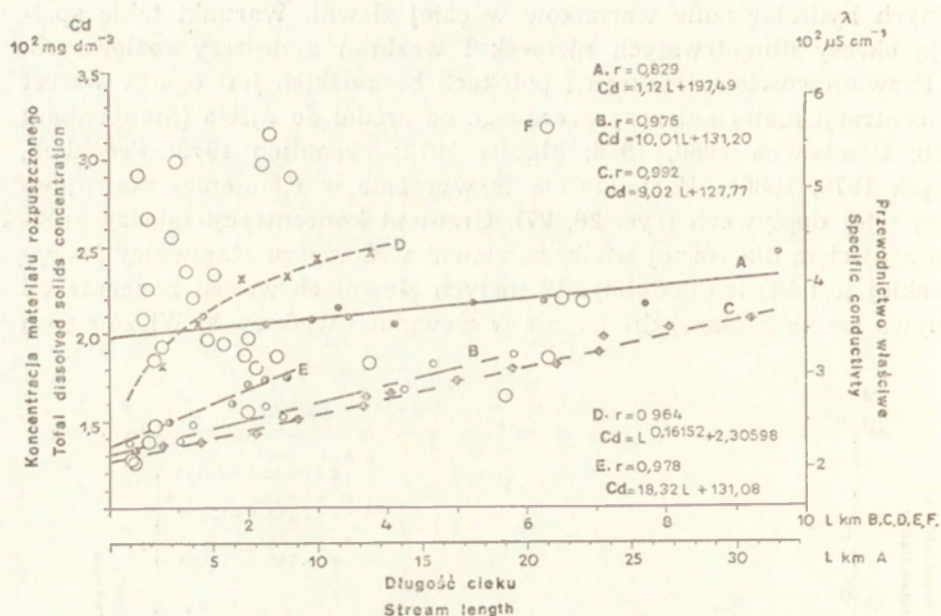
A — Kamienica Nawojowska; B — potok Kryściów; C — potok Homerka; D — potok Bącza; E — potok Sucha Kamionka; F — dopływy Kamienicy Nawojowskiej, potoku Homerka i Bącza

Relation between drainage area increase (A) and total dissolved solids concentration (Cd) in several streams

A — Kamienica Nawojowska River; B — Kryściów Stream; C — Homerka Stream; D — Bącza Stream; E — Sucha Kamionka Stream; F — tributaries of Kamienica Nawojowska River, Homerka and Bącza Streams

głównie z wykształceniem litologicznym podłoża, do którego nawiązują inne cechy środowiska decydujące o wydłużaniu się czasu krążenia wody (Froehlich, Słupik 1980c).

W badanych zlewniach związek między przyrostem powierzchni zlewni (długością cieku) a koncentracją materiału rozpuszczonego przybliża równanie regresji liniowej. Wyjątek stanowi potok Bącza, dla którego



Rys. 27. Związek między długością cieku (L) a koncentracją materiału rozpuszczonego (Cd) w korytach potoków

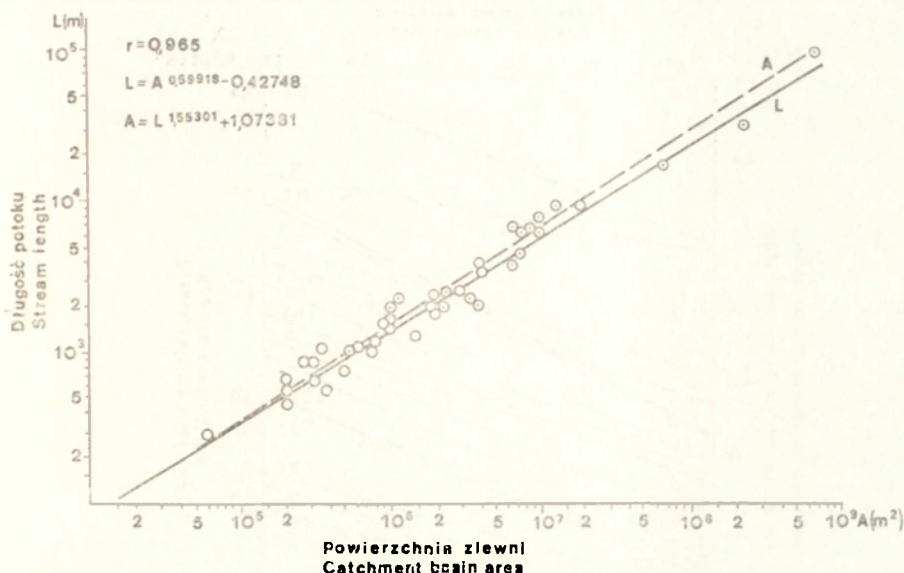
A — Kamienica Nawojowska; B — potok Kryściów; C — potok Homerka; D — potok Bącza; E — potok Sucha Kamionka; F — dopływy Kamienicy Nawojowskiej, potoku Homerka i Bącza

Relation between stream length (L) and total dissolved solids concentration (Cd) in several streams

A — Kamienica Nawojowska River; B — Kryściów Stream; C — Homerka Stream; D — Bącza Stream; E — Sucha Kamionka Stream; F — tributaries of Kamienica Nawojowska River, Homerka and Bącza Streams

zależność ta ma charakter krzywoliniowy (ryc. 26, 27). Wiąże się to z asymetrią zlewni tego potoku. W dalszej części pracy przedstawiono przykłady związków przyrostu powierzchni zlewni z parametrami transportu ze względu na silną zależność między powierzchnią zlewni a długością cieku (ryc. 28).

Graficznym obrazem związków między reperowym przekrojem hydrometrycznym a okresowymi punktami pomiarowymi, położonymi w obrębie głównego cieku, są proste równoległe (ryc. 29). Analogiczne związki z punktami pomiarowymi w dopływach ilustrują proste nachylone pod innym kątem (ryc. 29). Świadczy to o odmiennym reżimie transportu materiału rozpuszczonego w obrębie każdego dopływu. Tego typu związki dla asymetrycznej zlewni potoku Bącza przybliżają równania regresji krzywoliniowej o ogólnej postaci $y = ax - b$. W myśl zależności liniowej z przyrostem powierzchni zlewni następuje również wzrost koncentracji głównych jonów (ryc. 30). Największy przyrost koncentracji



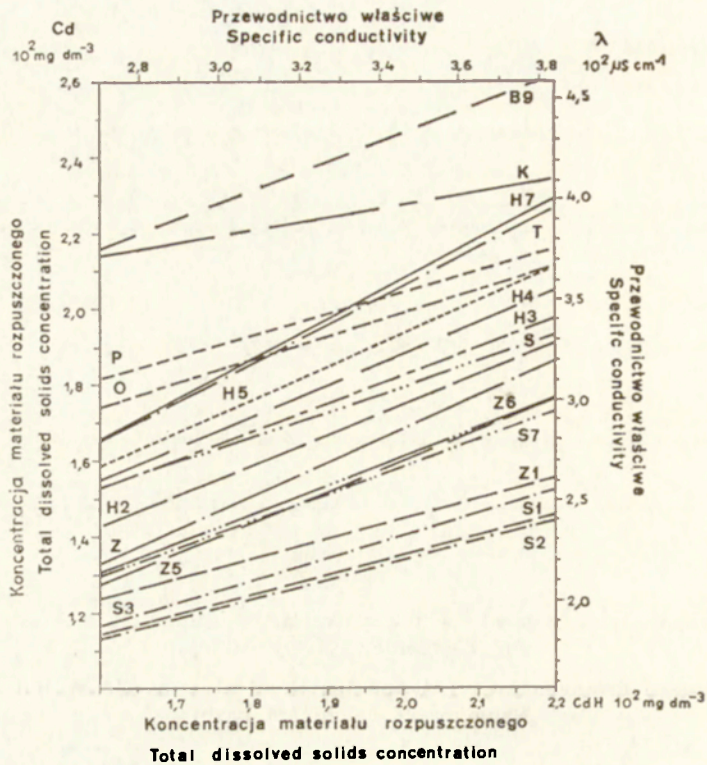
Ryc. 28. Związek między powierzchnią zlewni (A) a długością cieków (L) w zlewni Kamienicy Nawojowskiej

Relation between drainage area (A) and length of streams (L) within Kamienica Nawojowska catchment basin

dotyczy jonów Ca^{++} i SO_4^- — Wiąże się to niewątpliwie ze wzrostem udziału serii łupkowych o dużej zawartości węgla wapnia i siarczanów.

Przedstawione związki obowiązują dla okresów hydrologicznie jednorodnych. Nie można ich stosować dla okresów lokalnych ulew i roztopów obejmujących fragmenty zlewni. Stwierdzono, że w początkowej fazie roztopów zachodzi czasem nawet niewielkie zmniejszanie się koncentracji materiału rozpuszczonego od źródeł do ujścia. Wiąże się to z roztopami w dolnej części zlewni, przy dużym udziale spływu powierzchniowego i płytkiego śródpokrywowego krążenia. W tym samym czasie w wyższych częściach zlewni panują jeszcze warunki zimowe, z charakterystycznym dla nich zasilaniem cieków nasyconymi wodami gruntowymi. Toteż dla małych zlewni, o powierzchni rzędu kilku km^2 , ta różnorodność zasilania i koncentracji obowiązuje przez większą część roku. Natomiast w większych zlewniach jednorodne okresy hydrologiczne mają coraz mniejszą częstotliwość występowania.

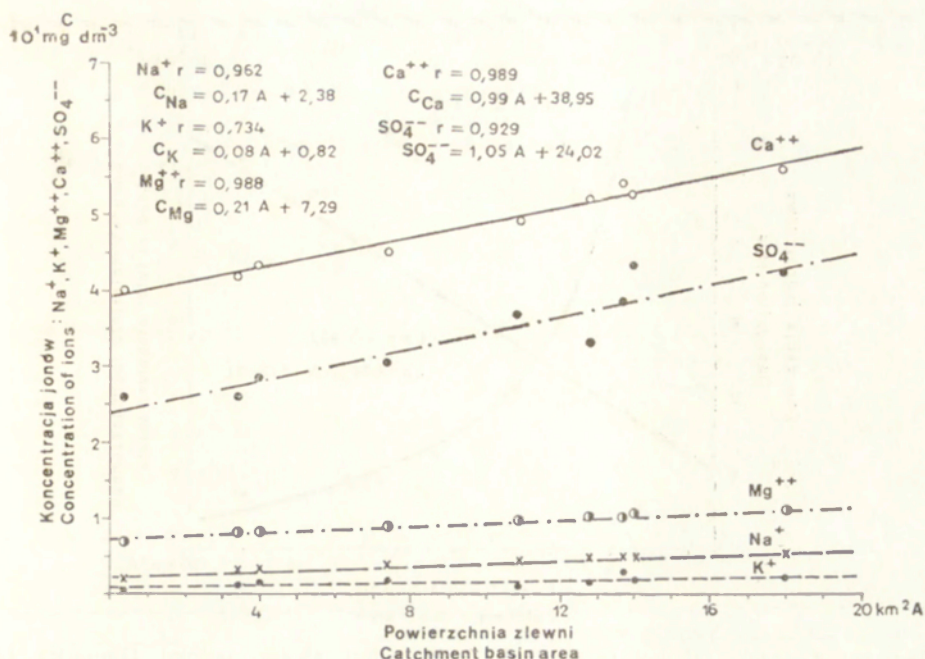
Wprost proporcjonalnie do przyrostu powierzchni zlewni wzrasta przepływ wody i transportowany ładunek materiału rozpuszczonego. Związek między przyrostem powierzchni zlewni Homerki a ładunkiem materiału rozpuszczonego przybliża równanie regresji liniowej (ryc. 31), a dla asymetrycznej zlewni potoku Bączka — równanie regresji krzywo liniowej. Sprowadzając wartości transportowanego ładunku do wskaźnika denudacji jednostkowej, prawidłowość zróżnicowania tego parametru



Ryc. 29. Przykłady związków między koncentracją materiału rozpuszczonego w re-perowym przekroju hydrometrycznym potoku Homerka (CdH) a koncentracją ma-teriału rozpuszczonego (Cd) w różnych punktach potoku oraz w jego dopływach (oznaczenia punktów pomiarowych patrz ryc. 2)

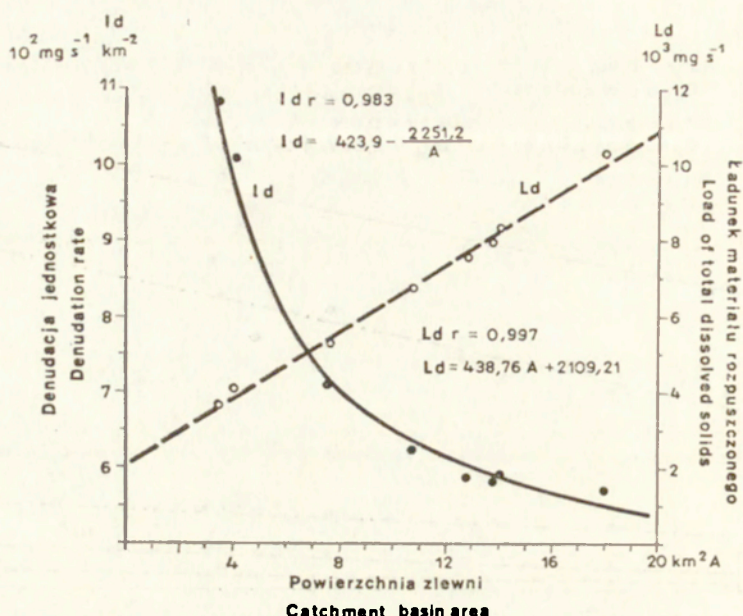
Examples of relationships between total dissolved solids concentration in the main gauging station of Homerka Stream (CdH) and total dissolved solids concentration in different points along Homerka Stream and its tributaries (explanations of points as in Fig. 2)

S1	$r = 0,93$	$Cd = 0,53 CdH + 29,18$
S2	$r = 0,94$	$Cd = 0,53 CdH + 28,18$
S3	$r = 0,97$	$Cd = 0,61 CdH + 18,70$
S7	$r = 0,97$	$Cd = 0,73 CdH + 12,74$
S	$r = 0,93$	$Cd = 0,66 CdH + 47,94$
Z1	$r = 0,94$	$Cd = 0,54 CdH + 37,39$
Z5	$r = 0,95$	$Cd = 0,61 CdH + 30,00$
Z6	$r = 0,95$	$Cd = 0,78 CdH + 5,34$
Z	$r = 0,95$	$Cd = 0,89 CdH - 9,34$
H2	$r = 0,98$	$Cd = 0,83 CdH + 9,25$
H3	$r = 0,99$	$Cd = 0,75 CdH + 32,79$
H4	$r = 0,99$	$Cd = 0,83 CdH + 22,05$
H5	$r = 0,98$	$Cd = 0,87 CdH + 19,51$
H7	$r = 0,99$	$Cd = 1,07 CdH - 6,30$
B9	$r = 0,76$	$Cd = 0,76 CdH + 94,54$
T	$r = 0,80$	$Cd = 0,63 CdH + 64,33$
P	$r = 0,91$	$Cd = 0,57 CdH + 90,48$
O	$r = 0,95$	$Cd = 0,63 CdH + 73,39$
K	$r = 0,66$	$Cd = 0,34 CdH + 159,61$



Ryc. 30. Związek między przyrostem powierzchni zlewni potoku Homerka (A) a koncentracją głównych jonów (C) Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , SO_4^{--} w korycie potoku
 Relation between drainage area increase of Homerka Stream (A) and concentration of main ions (C) Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , SO_4^{--} in the stream

z przyrostem powierzchni zlewni można opisać równaniem hiperboli o ogólnej postaci $y = (ax + b) / x$ (Froehlich, Słupik 1979, 1980c). Największy gradient denudacji jednostkowej zaznacza się na odcinku źródłowym zlewni Homerki, dla którego charakterystyczny jest wysoki spływ jednostkowy. Jest to typowy obszar o rzeźbie wysokich i średnich gór, mający duże nadwyżki wody opadowej przeznaczonej na odpływ. W środkowej części zlewni zmniejszanie się wartości denudacji jednostkowej zachodzi już znacznie wolniej i wiąże się z obszarami o rzeźbie niskich gór i wysokich pogórzy, z większym udziałem serii łupkowych i mniejszym spływem jednostkowym (ryc. 31). Z przebiegu tej zależności wynika jednoznacznie, że położenie przekroju hydrometrycznego w zlewni warunkuje otrzymywane wartości natężenia denudacji chemicznej w jej klasycznym ujęciu. Znajomość tego faktu jest bardzo istotna przy ekstrapolacji wyników z jednego przekroju hydrometrycznego na powierzchnię całej zlewni. Ponadto należy podkreślić, że przedstawione prawidłowości przestrzennego zróżnicowania parametrów denudacji chemicznej w zlewni są obrazem bardziej precyzyjnym niż różnego rodzaju mapy denudacji, na których granice przebiegają na linii wododziałów.



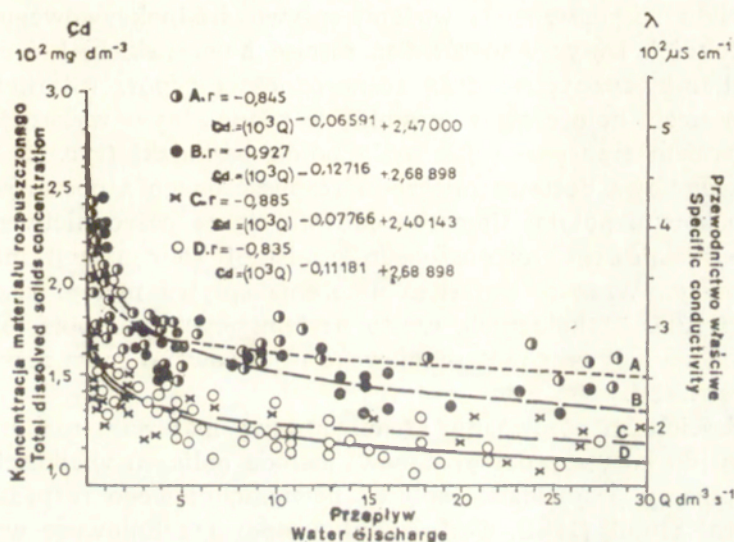
Ryc. 31. Związek między przyrostem powierzchni zlewni potoku Homerka (A) a ładunkiem materiału rozpuszczonego (Ld) i chemiczną denudacją jednostkową (ld)
 Relation between drainage area increase of Homerka Stream (A) and load of total dissolved solids (Ld) and rate of chemical denudation (ld)

W związkach przybliżających prawidłowości przestrzennego zróżnicowania parametrów denudacji chemicznej w małej zlewni zaznacza się wyraźna różnica między zlewniami symetrycznymi (zależności liniowe) i asymetrycznymi (zależności krzywoliniowe). Wynika stąd, że w badaniach porównawczych zlewni konieczne jest dobieranie zlewni tego samego typu i wielkości. Jest to bardzo istotny ogólny wskaźnik reprezentatywności zlewni z punktu widzenia prawidłowości przestrzennego zróżnicowania denudacji. Wiąże się z tym problem rozmieszczenia stanowisk pomiarowych w zlewni doświadczalnej zgodnie z mechanizmem przestrzennego zróżnicowania procesów morfogenetycznych, a nie w sposób przypadkowy.

POWIERZCHNIOWA I PODZIEMNA DOSTAWA MATERIAŁU ROZPUSZCZONEGO ZE STOKU DO KORYTA

Przedstawione dotychczas wyniki badań transportu materiału rozpuszczonego w zlewniach różnej wielkości miały na celu określenie przestrzennego zróżnicowania procesów transportu w korytach. Takie podejście nie wyjaśnia pochodzenia ładunku materiału rozpuszczonego wynoszonego ze zlewni. Rozwiązania tego problemu należy szukać w poznaniu źródeł dostawy materiału rozpuszczonego ze stoku do koryta.

Analogicznie jak w przekrojach hydrometrycznych badanych potoków, związki między przepływem wody a koncentracją materiału rozpuszczonego dla przekrojów pomiarowych w drogach polnych i cieku w rozcięciu holocenijskim mają postać pętli o odmiennym kształcie dla każdego wezbrania. Związki te można przybliżyć za pomocą równania regresji krzywoliniowej o ogólnej postaci $y=a^x-b$ (ryc. 22, 32). Przy podobnych przepływach zakres zmienności koncentracji materiału roz-



Ryc. 32. Związek między przepływem wody (Q) a koncentracją materiału rozpuszczonego (Cd) w przekrojach hydrometrycznych na stoku doświadczalnym w Homrzychach

A — droga nr 1; B — ciek w rozcięciu holocenijskim; C — droga nr 5; D — droga nr 4
Relation between water discharge (Q) and total dissolved solids concentration (Cd) in gauging station on the experimental slope at Homrzych village

A — cart road no. 1; B — the stream drained a holocene hollow; C — cart road no. 5; D — cart road no. 4

puszczonego w drogach polnych jest znacznie większy niż w cieku w rozcięciu holocenijskim. Znajduje to odbicie w wartościach współczynników korelacji dla związków $Cd=f(Q)$, które dla dróg polnych są niższe niż dla cieku w rozcięciu holocenijskim. Niski przepływ w drodze może odpowiadać zarówno początkowej fazie wezbrania o niskiej koncentracji zawiesiny związanej z liniowym spływem powierzchniowym, jak również końcowej fazie regresji odpływu wezbraniowego o wysokiej koncentracji związanej ze spływem śródpokrywowym. Wiąże się to z okresowym odpływem wody w drogach polnych. Następujące po okresie suszy wezbranie rozpoczyna cykl transportu niejako od początku. Kolejne wezbrania bez okresów przerw w przepływie charakteryzują się coraz niższą kon-

centracją materiału rozpuszczonego. Podobny mechanizm transportu stwierdzono w drogach gruntowych położonych w zalesionych partiach zlewni potoku Homerka.

Poszczególne drogi różnią się między sobą długością okresów występowania spływu oraz wykazują indywidualne cechy reżimu transportu materiału rozpuszczonego (ryc. 22-25, 32). Zróżnicowanie to wynika z indywidualnych cech morfometrycznych wąwozu drogi, głównie jego głębokości, od której zależy pojemność zlewni drogi, a zatem wielkość dostawy materiału rozpuszczonego wodami spływu śródpokrywowego z różnych głębokości. Dotyczy to również rozcięć holoceńskich, które w Beskidach charakteryzują się dużą różnorodnością typów (Starkel 1960). Ciek w rozcięciu holoceńskim na stoku doświadczalnym wykazuje podobny mechanizm transportu, jak mały potok beskidzki (ryc. 22-25, 32).

Powierzchniowa dostawa materiału rozpuszczonego z obszarów przyrzeczy do koryta potoku Homerka odbywa się za pośrednictwem spływu powierzchniowego rozproszonego o niskiej koncentracji materiału rozpuszczonego. Wraz ze wzrostem natężenia spływu maleje koncentracja i odwrotnie. W kolejnych, często następujących po sobie, okresach formowania się spływu powierzchniowego rejestrowano coraz niższe wartości koncentracji.

Przy ilościowym porównaniu źródeł dostawy materiału rozpuszczonego ze stoku do koryta problem stanowi metoda obliczeń wielkości dostawy z przyrzeczy przy udziale spływu powierzchniowego rozproszonego. Jak wykazał Słupik (1981), wartości spływu powierzchniowego wyrażone w postaci spływu jednostkowego zależą od wielkości poletka doświadczalnego lub powierzchni pasa stoku ciągnącego się od urządzenia pomiarowego (rynnny Gerlacha, worka Słupika) do działu wodnego, a nie od rzeczywistego natężenia procesu. Uwagi te w pełni odnoszą się do transportu materiału. Ponadto nieznana jest długość drogi spływu, wzdłuż której następuje faktyczne lugowanie.

W celu zapewnienia porównywalności ilościowych danych dotyczących dostawy materiału rozpuszczonego z przyrzeczy z dostawą z dróg polnych i rozcięcia holoceńskiego do koryta obszar przyrzecza uznano za zlewnię, dla której przekrojem pomiarowym jest pas przyrzecza przylegający do koryta. Wyniki pomiarów transportu materiału rozpuszczonego zarejestrowane w kontakcie dna doliny z korytem wyrażono w mg m^{-1} i ekstrapolowano na całą szerokość pasa przyrzecza.

W powierzchniowej dostawie materiału rozpuszczonego ze stoku doświadczalnego do koryta potoku Homerka główną rolę odgrywa linijna dostawa z dróg polnych i rozcięcia holoceńskiego. Bezpośrednia dostawa z przyrzeczy wodami spływu powierzchniowego rozproszonego odgrywa mało istotną rolę (tab. 3). Wartości transportu materiału rozpuszczonego rejestrowane u podnóża stoku były od 3 do 15% wyższe od obserwowanych na kontakcie dna doliny z korytem. W dnie doliny następuje bo-

Tabela 3. Dostawa materiału rozpuszczonego ze stoku doświadczalnego do koryta potoku Homerka na tle transportu w korycie podczas wezbrania 8-13 V 1979

Delivery of total dissolved solid from the experimental slope to Homerka stream against a background of transport in stream channel during high water discharge between 8 and 13 of May, 1979

Przekrój hydrometryczny Stream gauging station	Przepływ Discharge Q_{\max} [dm ³ s ⁻¹]	Odptyw jednostkowy Specific runoff q_{\max} [dm ³ s ⁻¹ km ²]	Ładunek mate- riału rozpuszczo- nego Load of total dis- solved solids Ld [kg]	Denudacja jednostkowa Rate of denudation ld [kg km ²]
Homerka (stream)	3473	248,1	73 634	5259,5
Bącza (stream)	845	213,9	18 025	4563,2
Droga (cart-road) nr 1	14,7	501,4	260,9	8904,4
Droga (cart-road) nr 4	27,5	463,6	336,4	7426,0
Droga (cart-road) nr 5	3,0	67,0	43,4	958,1
Potok (stream) Z3	15,9	224,8	350,9	5415,1
Przyrzecze S1 (inter- channel area)	—	—	0,074	3,3
Przyrzecze S2 (inter- channel area)	—	—	0,070	1,6

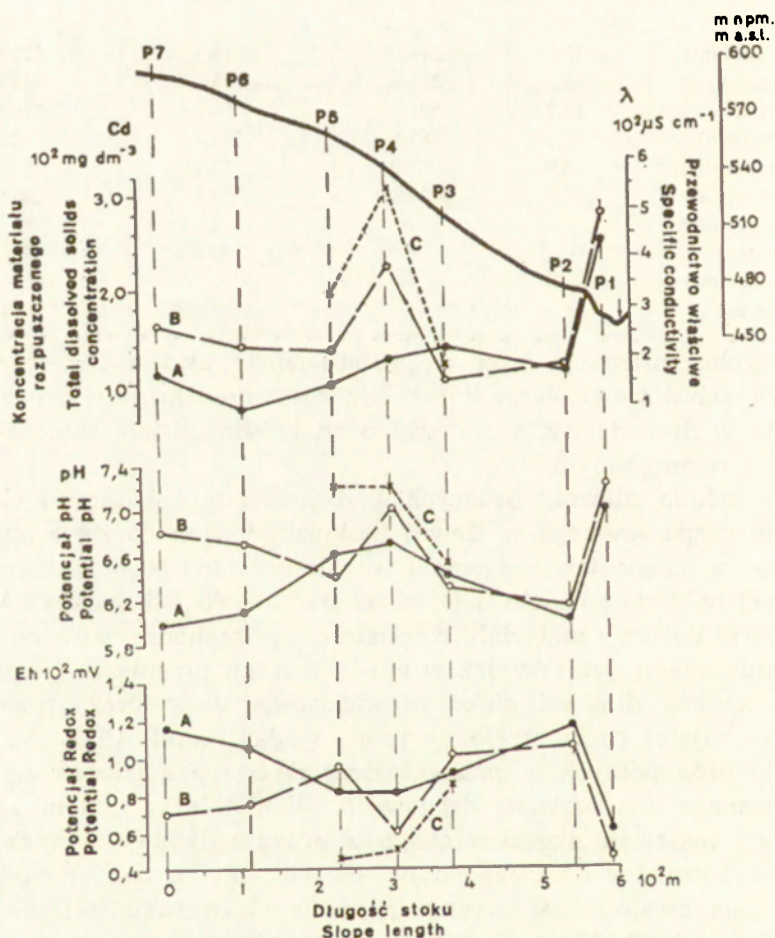
wiem szybka infiltracja wód w gruboziarniste aluwia i bezpośrednie podpowierzchniowe zasilanie koryta. Świadczy to o krótszej drodze spływu wody w dnie doliny, a zarazem o większym udziale samego opadu w spływie rozproszonym.

Powierzchnia zlewni, będących podstawowymi obszarami dostawy materiału rozpuszczonego w zlewni beskidzkiej, zmienia się z opadu na opad oraz w czasie trwania opadu w zależności od jego natężenia, początkowej wilgotności gleby i jej przepuszczalności. Ekspansja i kurczenie się stref dostawy materiału rozpuszczonego zachodzą zarówno w czasie trwania opadu, jak również w czasie regresji przepływu po opadach poprzez zmianę długości cieku prowadzącego wodę oraz zmiany powierzchni zajętej przez strefę nasyconą wodą (Słupik 1981). W odniesieniu do dróg polnych w przeważającej części roku odpływ ogranicza się do samego dna wąwozu drogowego. Włączenie w system zasilania i dostawy materiału rozpuszczonego z bruzd i działek polnych odbywa się wyłącznie w okresach pojawienia się spływu powierzchniowego. Jednak jego częstotliwość występowania w ciągu roku jest stosunkowo mała (Słupik 1973, 1981). Dynamika dostawy nawiązuje do zmiennych w czasie i przestrzeni obszarów i źródeł zasilania w wodę. Zatem dynamiczny, hydrologiczny model stoku — kształtowania odpływu (Dunne, Black 1970; Słupik 1981) można w pełni zastosować do objaśnienia mechanizmu dostawy materiału rozpuszczonego ze stoku do koryta.

W procesach dostawy materiału rozpuszczonego ze stoku do koryta bardzo istotną rolę odgrywa dostawa podziemna (Welc 1978). Jej bez-

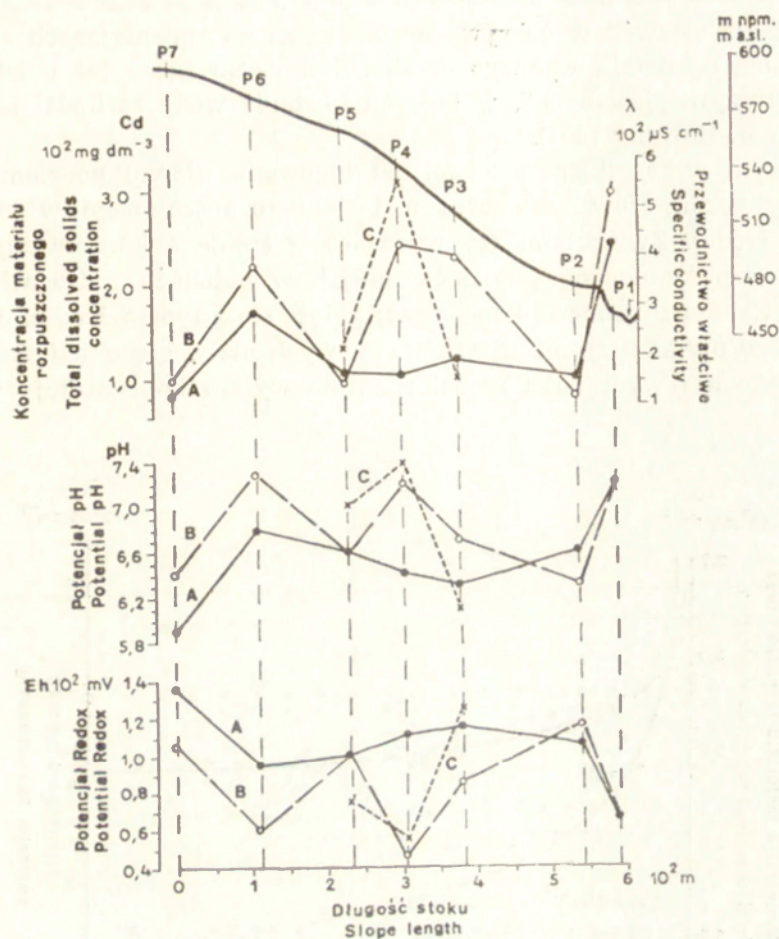
pośrednie pomiary ilościowe są obecnie trudne do zrealizowania. Zmierzając do poznania mechanizmu tej dostawy oparto się na badaniach cech chemicznych wód w piezometrach i źródłach.

Wody śródpokrywowe występujące na różnych głębokościach nie zmieniają równomiernie swoich cech chemicznych w profilu stoku od działu wodnego do dna doliny (ryc. 33, 34). Największe zaburzenia w ich przebiegu rejestrowano w strefach przedostawania się wód z długotrwałego lub głębokiego krążenia ku powierzchni terenu (ryc. 33, 34 — stanowisko P4) oraz w dnie doliny (ryc. 33, 34 — stanowisko P1). W dnie



Ryc. 33. Koncentracja materiału rozpuszczonego (Cd), pH i potencjał oksydacyjno-redukcyjny (redox, Eh) wód śródpokrywowych w profilu podłużnym stoku doświadczalnego na głębokości: A — 1 m, B — 1,5 m, C — 2 m w dniu 4 czerwca 1978 r.

Total dissolved solids concentration (Cd), hydrogen ion activity (pH) and oxidation-reduction potential (redox, Eh) changes in soil water on the experimental slope at a depth of: A — 1 m, B — 1,5 m, C — 2 m (June 4, 1978)



Ryc. 34. Koncentracja materiału rozpuszczonego (Cd), pH i potencjał oksydacyjno-redukcyjny (redox, Eh) wód śródpokrywowych w profilu podłużnym stoku doświadczalnego na głębokości: A — 1 m, B — 1,5 m, C — 2 m w dniu 22 sierpnia 1978 r.

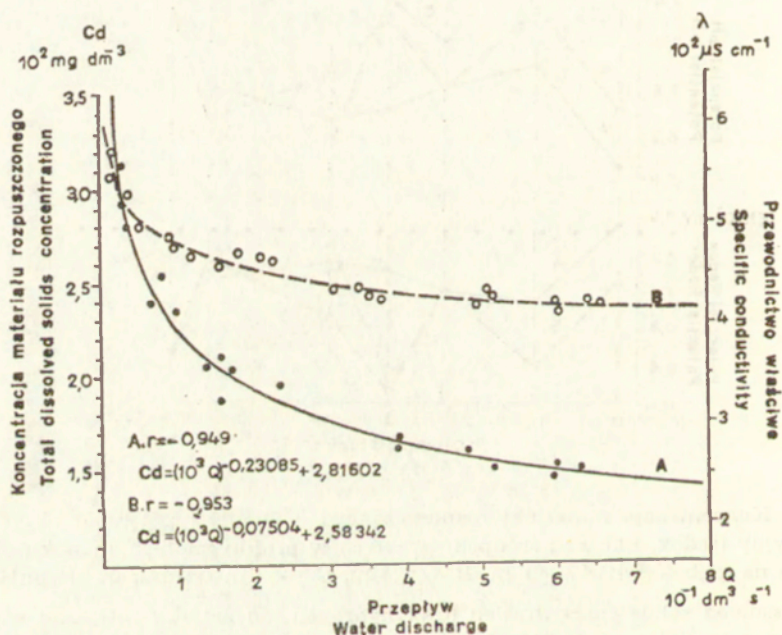
Total dissolved solids concentration (Cd), hydrogen ion activity (pH) and oxidation-reduction potential (redox, Eh) changes in soil water of the experimental slope at a depth of: A — 1 m, B — 1,5 m, C — 2 m (August 22, 1978)

doliny w ciągu całego roku obserwowano trwale zwierciadło wód gruntowych. Ma ono bezpośredni kontakt hydrauliczny z wodami stokowymi i wykazuje duży spadek w kierunku koryta (Ślupik 1981). Zatem bezpośrednie podziemne zasilanie koryta i dostawa materiału rozpuszczonego ze stoku odbywają się poprzez zbiorniki wód gruntowych w dnie doliny.

Brak wyraźnej tendencji zmian parametrów chemicznych wód śródpokrywowych w profilu stoku świadczy o złożonych mechanizmach krążenia tych wód i ługowania zlewni podziemnej. Potwierdza to koncepcję Ślupika (1981) o niejednorodnym, „falowym” charakterze prze-

mieszczania się wód w pokrywach stokowych na zmieniających się głębokościach od działu wodnego do dna doliny. Świadczy też o istnieniu stref „uprzywilejowanych”, w których krążenie wody zachodzi intensywniej (por. Bunting 1961).

Dobrym wskaźnikiem mechanizmu ługowania zlewni podziemnej są pomiary parametrów transportu materiału rozpuszczonego w różnych typach źródeł. Związki między wydajnością źródła a koncentracją materiału rozpuszczonego są analogiczne jak w potokach i drogach (ryc. 22, 35). Zakres zmienności koncentracji wiąże się z typem źródła. Jest on większy w płytkich źródłach zwietrzelinowych niż w głębokich skalnych. Przy podobnej wydajności źródeł znacznie wyższa koncentracja wystę-



Ryc. 35. Związek między wydajnością źródła (Q) a koncentracją materiału rozpuszczonego (Cd)

A — źródło na stoku doświadczalnym; B — źródło w dnie doliny potoku Bącza

Relations between water discharge of spring (Q) and total dissolved solids concentration (Cd)

A — spring on the experimental slope; B — spring in valley bottom of Bącza Stream

puje w źródłach skalnych. Wiąże się to z dłuższym czasem krążenia wód oraz zmniejszającym się z głębokością wylugowaniem podłoża (Adamczyk, Tokaj 1957). Toteż wraz z głębokością lub dłuższym cza-

sem krążenia wody maleje amplituda rocznych wahań koncentracji materiału rozpuszczonego.

Podstawowe parametry chemiczne są nośnikami cech hydrologicznych wody, a zatem mogą być dobrym wskaźnikiem ilościowym w badaniach hydrologicznych nad transformacją opadu w odpływ na stoku fliszowym. Porównując ze sobą związki między wydajnością źródeł a koncentracją materiału rozpuszczonego można wnosić o sposobie zasilania, a zatem o typie źródła.

Osobne zagadnienie stanowi dyskutowany problem wpływu nawożenia mineralnego na dostawę materiału rozpuszczonego ze stoków do koryt. Stwierdzono, że ilość wynoszonych ze zlewni soli pochodzących z nawożenia mineralnego jest bardzo mała i stanowi zaledwie kilka procent transportowanego w korycie ładunku materiału rozpuszczonego (Froehlich 1975). Większe ilości związków azotowych i detergentów mogą pochodzić z bezpośredniego spływu ścieków gospodarczych (Wróbel 1976b).

Wzrost koncentracji materiału rozpuszczonego w wodach płynących w korycie pod wpływem dostawy soli ze sztucznego nawożenia jest bardzo mały i zawiera się w granicach błędu tradycyjnej metody pomiaru w przekroju hydrometrycznym. Toteż przy zastosowaniu dotychczasowych metod pomiaru, ilościowa ocena tego procesu napotyka zasadnicze trudności. Również pomiary koncentracji poszczególnych jonów transportowych w korycie nie mogą dać jednoznacznej odpowiedzi na to pytanie, ponieważ jony pochodzące z rozpuszczania nawozów mineralnych są identyczne, jak jony pochodzące z podłoża. Dla rozwiązania tego problemu konieczne jest zastosowanie metod izotopowych oraz badań eksperymentalnych. Pomimo stosunkowo niewielkiej dostawy soli związanych z mineralnym nawożeniem, hydrobiolodzy zwracają uwagę na jego wyraźny wpływ, odzwierciedlający się we wzroście natężenia eutrofizacji wód w korytach rzek i potoków (Wróbel 1976b).

Zlewnia jest układem otwartym i wraz z opadami atmosferycznymi na jej powierzchnię spada pewna ilość soli (Maksimowicz 1953; Gorham 1961; Chojnacki 1967). Koncentracja materiału rozpuszczonego w wodach pochodzących z opadów atmosferycznych jest niewielka i dla punktów pomiaru opadów w zlewni Homerki w cyklu rocznym mieści się w granicach 3-12 mg dm⁻³ (średnio 6 mg dm⁻³). Wyraźnie obniża się w okresach długotrwałych opadów, a najwyższa była rejestrowana po okresach długotrwałej suszy. Jeżeli weźmiemy pod uwagę średni opad w zlewni Homerki, to na jej powierzchnię wraz z opadem spada przeciętnie 6-7 t km⁻² soli, co stanowi mniej niż 10% rocznego ładunku materiału rozpuszczonego wynoszonego ze zlewni (tab. 4).

Tabela 4. Transport materiału w korytach potoków Homerka i Bącza w tonach
 Transport of material in channels of Homerka stream and Bącza stream (in t)

Przekrój hydrometryczny Stream gauging station	Ładunek materiału rozpuszczonego Load of total dissolved solids		Ładunek zawiesiny Load of suspended sediment		Ładunek denny Bed load	
	1977	1978	1977	1978	1977	1978
Homerka (stream)	1106,5	1150,2	641,0	899,8	9,4	54,3
Bącza (stream)	283,6	339,4	232,8	356,9	2,8	16,3

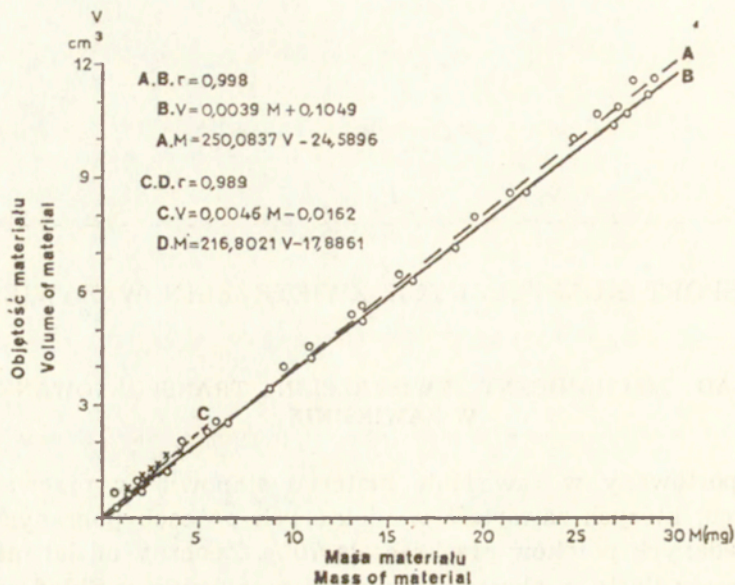
TRANSPORT KLASTYCZNYCH ZWIETRZELIN W ZAWIESINIE

SKŁAD MECHANICZNY ZWIETRZELIN TRANSPORTOWANYCH W ZAWIESINIE

Transportowany w zawiesinie materiał stanowią w przewadze ziarna kwarcu, których zawartość w niektórych próbach pobranych w korytach badanych potoków przekraczała 70%. Znaczny udział mają również minerały ilaste, a okresowo substancje organiczne. Skład zawiesiny wykazuje zmienność w cyklu rocznym, w czasie poszczególnych typów wezbrań i ich kolejnych faz. Proporcje udziału poszczególnych składników wywierają decydujący wpływ na ciężar właściwy i objętościowy transportowanego w zawiesinie materiału (ryc. 36). Toteż należy pamiętać, że wskaźniki denudacji (m^3km^{-2} , mm) dla zlewni beskidzkich obliczane przy zastosowaniu współczynnika $2,5 \text{ g cm}^{-3}$ są obarczone błędem.

W badanych zlewniach klastyczne zwietrzeliny transportowane w zawiesinie składają się w przewadze z frakcji pylasto-ilastych z domieszką różnoziarnistych piasków (ryc. 37). Taki skład mechaniczny zawiesiny jest typowy dla rzek beskidzkich (Cyberski 1969; Pasternak, Cyberski 1973; Froehlich 1975). Przy podobnych hydrologicznych parametrach wezbrań, w poszczególnych korytach zaznaczają się wyraźne różnice w składzie mechanicznym transportowanej zawiesiny. Nawiązują one do wykształcenia litologicznego podłoża i sposobu użytkowania ziemi. Kształt cząstek transportowanych w zawiesinie jest nieregularny i ostrokrawędzisty, co niewątpliwie utrudnia sedymentację i przyczynia się do dalekiego ich transportu (por. Froehlich 1975).

Skład mechaniczny zawiesiny transportowanej przez potok Homerka różni się od składu mechanicznego pokryw stokowych (ryc. 37). Szczególnie duże różnice zarejestrowano w frakcjach szkieletowych i plastycznych. Z przyrostem długości koryta od źródeł do ujścia wzrasta w zawiesinie udział frakcji spławialnych. Należy to wiązać ze zmniejszaniem się spadku, prędkości wody, jak również z budową pokryw stokowych. W czasie wezbrań, w pobliżu ujścia do koryta wielu dróg gruntowych, skład mechaniczny transportowanej w potoku zawiesiny jest bardzo podobny do składu mechanicznego zwietrzelin stokowych.



Ryc. 36. Związek między masą klastycznych zwierzelin transportowanych w zawieszinie (M) a ich objętością (V)

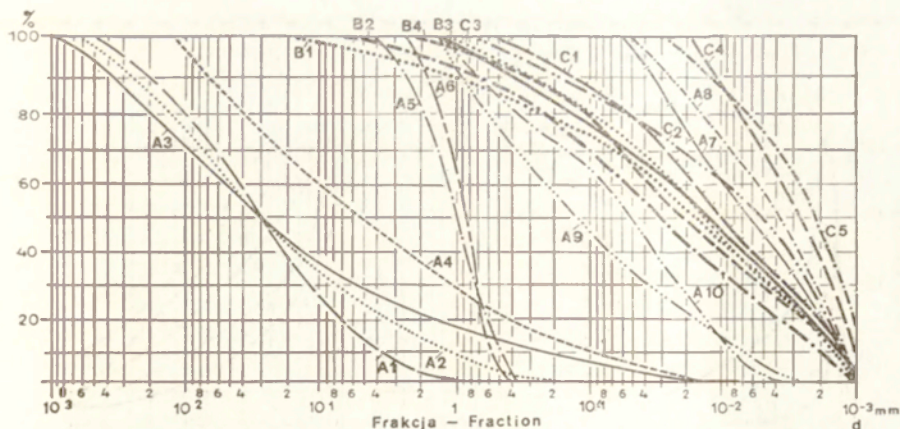
A, B — materiał transportowany w korytach potoków i w drogach polnych; C, D — materiał splukiwany na użytkach zielonych w obrębie przyrzeczy

Relation between mass (M) and volume (V) of the sediment transported in suspension: A, B — in stream channels and cart roads, C, D — in sheet flow on meadows within interchannel areas

Materiał splukiwany w obrębie przyrzeczy na użytkach zielonych i dostarczany do koryta spływem powierzchniowym rozproszonym składa się przeważnie z frakcji ilastych i koloidalnych o dużym udziale substancji organicznych. Różni się on znacznie od składu mechanicznego zawiesiny transportowanej w korycie (ryc.37).

Podczas niskich stanów wody w korytach transportowane są w zawieszinie wyłącznie cząstki spławialne, w których frakcje iłu koloidalnego stanowią często ponad 65% składu. Materiał ten częściowo ulega okresowej sedymentacji w miejscach zaprądowych. Jest on głównie zatrzymywany przez plechy glonów zasiedlających koryto (Froehlich 1975).

Podczas wzrostu przepływu typowe jest duże zróżnicowanie składu granulometrycznego zawiesiny oraz znaczny udział grubszych piaszczysto-pyłastych frakcji. W tej fazie wezbrania duża koncentracja zawiesiny zwiększa lepkość ośrodka transportu, co wraz z silną turbulencją ułatwia utrzymywanie się w zawieszinie frakcji piaszczystych (Simons, Richardson 1966). Największe zróżnicowanie składu mechanicznego zawiesiny przypada na kulminację jej koncentracji. Natomiast podczas opadania fali wezbrania transportowany w zawieszinie materiał staje się



Ryc. 37. Przykłady krzywych składu mechanicznego zwietrzelin stokowych, transportowanego materiału w zawieszinie oraz aluwiiów korytowych

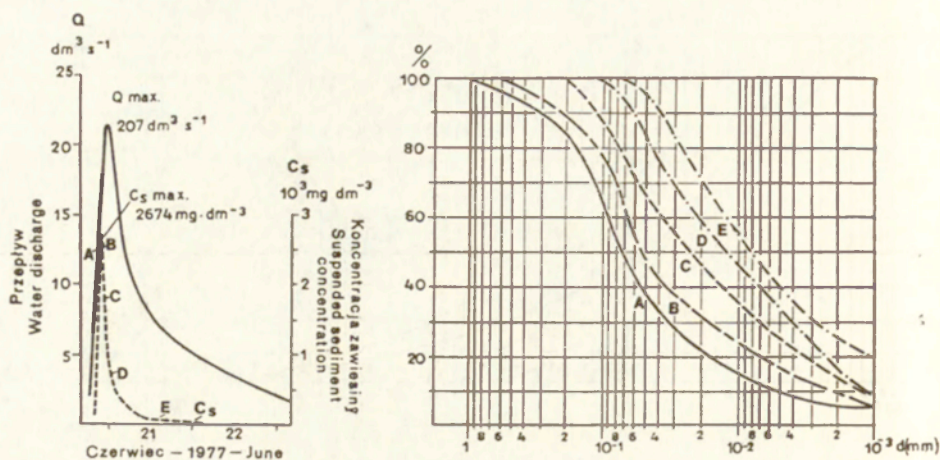
A1,A2 — strop aluwiiów korytowych w nurcie; A3,A4 — spąg bruku erozyjnego w dnie koryta; A5,A6 — aluwia w „cieniu” głazów w korycie; A7,A8 — strop aluwiiów korytowych w miejscach zaprawowych; A9,A10 — facja pozakorytowa. Pokrywy zwietrzelinowe na stokach: B1,B2 — szkieletowe pokrywy na płaskowcach magurskich; B3,B4 — pylasto-ilaste pokrywy na stoku doświadczalnym. Klastyczne zwietrzeliny transportowane w postaci zawiesziny: C1,C2 — w korycie potoku Homerka; C3 — w drodze polnej na stoku doświadczalnym; C4,C5 — splukiwane na użytkach zielonych w obrębie przyrzeczy na stoku doświadczalnym

Example curves of mechanical composition of the slope origin material transported in suspension and channel origin deposits

A1,A2 — top of alluvium layer in stream channel current; A3,A4 — floor of alluvial pavement in stream channel bottom; A5,A6 — alluvial deposits in shadow of boulder in stream channel; A7,A8 — top of alluvium layer beyond current in stream channel; A9,A10 — extra-channel facies. Waste covers on slopes: B1,B2 — skeletal covers on magura sandstones; B3,B4 — silty-clayey covers on the experimental slope. Sediment transport in suspension: C1,C2 — in Homerka Stream; C3 — in cart road on the experimental slope; C4,C5 — in sheet flow on meadows within interchannel areas of the experimental slope

coraz drobniejszy i jednorodny granulometrycznie (ryc. 38). W końcowej fazie dużych wezbrań transportowane są głównie cząsteczki iłu koloidalnego i koloidów. Świadczy o tym zjawisko Tyndalla obserwowane w pobranych próbach. To zróżnicowanie składu mechanicznego zawiesziny utrudnia zastosowanie metod kolorymetrycznych lub nefelometrycznych do ciągłej rejestracji mętności.

Skład granulometryczny zawiesziny nawiązuje również do typu wezbrań. W korycie potoku Homerka, podczas wezbrań wywołanych gwałtownymi ulewami, rejestrowano niejednorodny skład mechaniczny zawiesziny o dużym udziale frakcji piaszczystych (do 35%). Ulegał on zmianom nawet w czasie kilku sekund. Natomiast podczas wolno narastających fal wezbraniowych małych wezbrań, wywołanych opadami rozlewnymi, skład mechaniczny zawiesziny był prawie jednorodny w czasie całego wezbrania, z przewagą frakcji ilastych. Udział poszczególnych frakcji jest proporcjonalny do wielkości wezbrania. Podczas małych wez-



Ryc. 38. Skład mechaniczny klastycznych zwierzlin transportowanych w zawiesinie w reperowym przekroju hydrometrycznym potoku Bącza w różnych fazach wezbrania deszczowego w dniach 20-22 czerwca 1977 r.

Mechanical composition of sediment transported in suspension in the main gauging station of Bącza Stream in various phases of high water stage caused by rain between 20 and 22 of June 1977

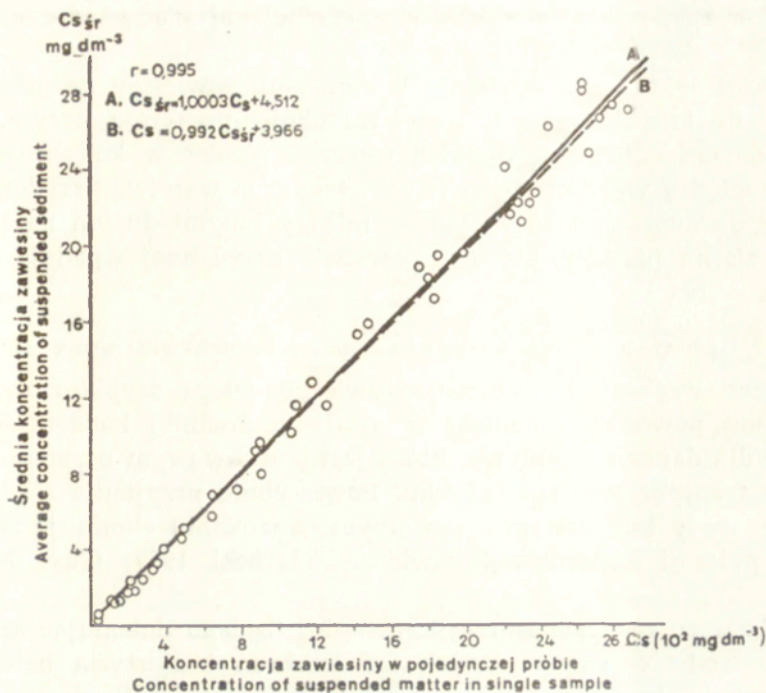
brań przeważnie transportowane są frakcje ilaste, w czasie średnich pylaste, a podczas dużych piaszczyste (por. Cyberski 1969; Froehlich 1975).

MECHANIZM TRANSPORTU ZAWIESINY W ZLEWNIACH RÓŻNEJ WIELKOŚCI

ZMIENNOŚĆ KONCENTRACJI ZAWIESINY W PRZEKROJU POPRZECZNYM KORYTA

Poznanie rozkładu koncentracji zawiesiny w przekroju poprzecznym koryta ma istotne znaczenie dla określenia średniej koncentracji, będącej podstawą obliczeń transportowanego ładunku. Koncentracja zawiesiny jest uzależniona od panujących na danym odcinku koryta warunków hydrodynamicznych i wykazuje nierównomierny rozkład poziomy i pionowy (Nordin, Dempster 1963; Jasiewicz 1973).

W celu określenia średniej koncentracji zawiesiny w badanych przekrojach hydrometrycznych obliczono równania regresji opisujące związek między koncentracją w pojedynczej próbie a średnią koncentracją w przekroju. Związek ten najlepiej przybliży równanie regresji liniowej (ryc. 39). Wysoki współczynnik korelacji wskazuje, że jednopunktowy pobór wody w badanych przekrojach hydrometrycznych z dużym przybliżeniem odzwierciedla średnią koncentrację zawiesiny w przekroju.



Ryc. 39. Związek między koncentracją zawiesiny oznaczoną w jednym punkcie re-perowego przekroju hydrometrycznego potoku Homerka (C_s) a średnią koncentracją zawiesiny w przekroju ($C_{s\bar{r}}$) określoną za pomocą jednoczesnych pomiarów wielopunktowych

Relation between suspended sediment concentration determined in one point (C_s) and average suspended sediment concentration in whole cross-section determined in several points ($C_{s\bar{r}}$) of the main gauging station of Homerka Stream

Jednakże przy wysokiej koncentracji zawiesiny odchylenia średniej koncentracji w przekroju od wielkości zarejestrowanej przez pomiar punktowy rosną. Przeciętnie mieściły się one w granicach $\pm 3-10\%$, a podczas ekstremalnych wezbrań nie przekraczały $\pm 28\%$. Należy nadmienić, że ze względów technicznych w czasie ekstremalnych wezbrań wielopunktowy pobór wody nie był równoczesny. Najmniejsze zróżnicowanie koncentracji w przekrojach hydrometrycznych rejestrowano w czasie małych wezbrań, a szczególnie podczas opadania przepływu.

Wyrównanie koncentracji zawiesiny w badanych przekrojach pozostaje w związku z brakiem źródeł dostawy zwietrzeli do koryta, położonych blisko przekroju pomiarowego, oraz świadczy o efektywnej dyspersji zawiesiny. Z eksperymentów przeprowadzonych w korycie doświadczalnym nad dyspersją zwietrzeli transportowanych w zawieszynie wynika, że wyrównanie koncentracji w przekroju poprzecznym koryta następuje na odcinku o długości 80-100 m. Wpływa na to niewielka sze-

rokość koryta potoku Homerka i silna turbulencja związana z urozmaiconą rzeźbą skalnego dna.

Na ogół zakres zróżnicowania koncentracji zawiesiny w pionie jest podobny do zróżnicowania na całej szerokości przekroju koryta. Natomiast podczas kulminacji wielkich wezbrań różnice w koncentracji zawiesiny między warstwami powierzchniowymi a warstwą przydenną dochodziły do 30%. Jest to wywołane między innymi dużym natężeniem saltacji ziaren piasków, które w warstwie przydennej wpadają do batometru.

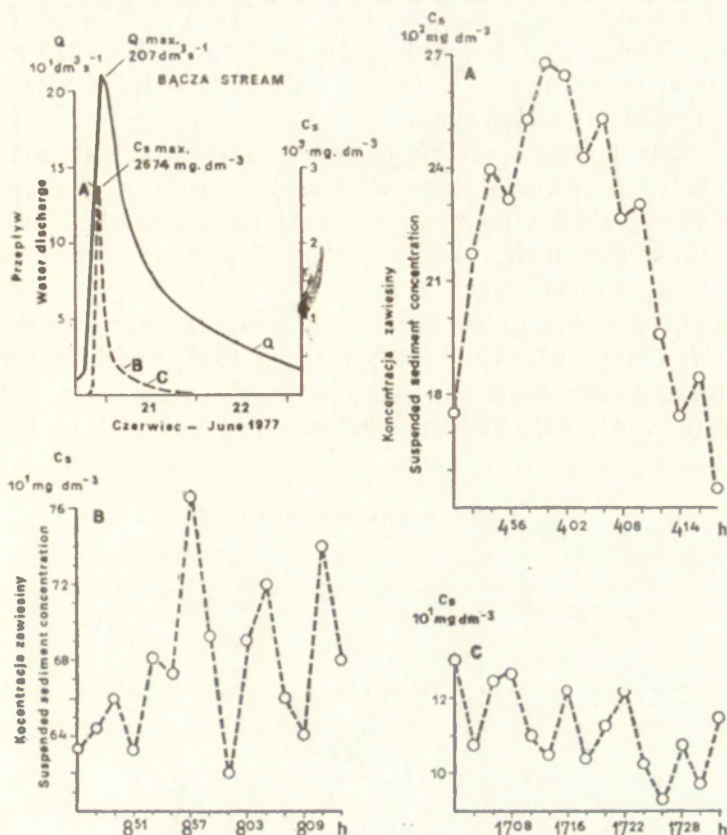
ZWIĄZEK KONCENTRACJI ZAWIESINY Z PRZEPŁYWEM WODY

Podczas wezbrań koncentracja zawiesiny ulega szybkim zmianom. Proces ten powoduje trudności w ustaleniu średniej koncentracji zawiesiny dla danego przepływu, która jest podstawowym parametrem do obliczeń transportowanego ładunku. Powszechnie przyjmuje się, że pobór prób wody batometrem o dowolnym napełnianiu eliminuje znacznie wpływ pulsacji koncentracji zawiesiny (Jarocki 1957; Guy, Norman 1970).

Przebieg pulsacji koncentracji zawiesiny badano dokonując szybkich poborów wody w czasie różnych faz wezbrań bez użycia batometru. Zróżnicowanie koncentracji zawiesiny w kolejnych próbach wody pobranych w czasie wzrostu przepływu gwałtownego wezbrania deszczowego dochodziło do $\pm 25\%$. Znacznie mniejsze różnice nie przekraczające $\pm 10\%$ zaznaczyły się w okresie opadania stanu wody (ryc. 40). Prawidłowości te obserwowano w czasie różnych typów wezbrań.

Obserwowana koncentracja zawiesiny w badanych potokach wynosiła 1-25 630 mg dm⁻³, a dla porównania w drogach polnych 1-147 889 mg dm⁻³. Zatem zmienność koncentracji zawiesiny jest wielokrotnie większa od nieregularności przepływów. Podczas niskich stanów wody koncentracja zawiesiny wynosiła 1-8 mg dm⁻³ i gwałtownie wzrastała w okresach wezbrań do wartości rzędu kilku tysięcy mg dm⁻³. Tylko w czasie ekstremalnych wezbrań przekraczała 10 000 mg dm⁻³. Tak wysoką koncentrację zawiesiny w potokach beskidzkich obserwuje się stosunkowo rzadko. Należy podkreślić, że zarejestrowane w 10-letnim cyklu pomiarowym wartości koncentracji zawiesiny są podobne do obserwowanych powszechnie w rzekach i potokach beskidzkich (por. Jarocki 1957; Cyberska, Cyberski 1964; Polak 1965; Cyberski 1969; Froehlich 1972, 1975, 1978; Biernat 1975; Barański 1975; Gil 1976; Krzemień 1976).

W okresach niżówek i małych wezbrań znaczna część transportowanej zawiesiny ulega sedymentacji w miejscach zaprawowych w korycie oraz przechwytywana jest przez plechy glonów. Ilość osadzonego materiału jest wprost proporcjonalna do czasu trwania okresu międzywezbrownego. Miąższość osadów jest silnie zróżnicowana z biegiem kory-



Ryc. 40. Zmiany koncentracji zawiesiny (C_s) na tle przepływu wody (Q) w potoku Bącza podczas wezbrania deszczowego 20-22 czerwca 1977 r.

A,B,C — pulsacja koncentracji zawiesiny w różnych fazach wezbrania

Changes of suspended sediment concentration (C_s) against a background of water discharge (Q) in Bącza Stream during high water stage caused by rain between 20 and 22 of June 1977

A,B,C — pulsation of suspended sediment concentration in various phases of high water stage

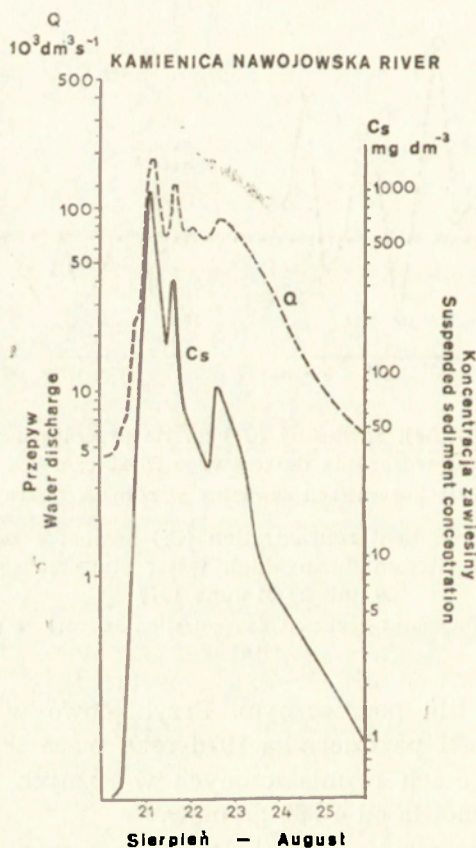
ta oraz w jego profilu poprzecznym. Przykładowo w czasie głębokiej niżówki w dniach 4-31 października 1976 roku masa tego typu aluwów osadzona w 25 łapaczach rozmieszczonych w różnych punktach koryta potoku Homerka wynosiła od 4-365 gramów.

Aluwia te nie ulegają kompaktacji, lecz tworzą w miejscach zaprądowych przy dnie rodzaj bardzo gęstej zawiesiny (pelogenu). Toteż we wstępnej fazie wezbrania przy niewielkim wzroście prędkości wody materiał ten zostaje wprowadzony w ruch i przyczynia się do wzrostu koncentracji zawiesiny. Stwierdzono to eksperymentalnie w korycie doświadczalnym. Przykładowo przy przepływie $65 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ i koncentra-

cji zawiesiny 4 mg dm^{-3} wprowadzenie w ruch tych osadów poprzez mieszanie wody dawało wzrost koncentracji zawiesiny od $48\text{--}215 \text{ mg dm}^{-3}$. Są to wartości rejestrowane w czasie małych i średnich wezbrań wywołanych opadami rozlewnymi.

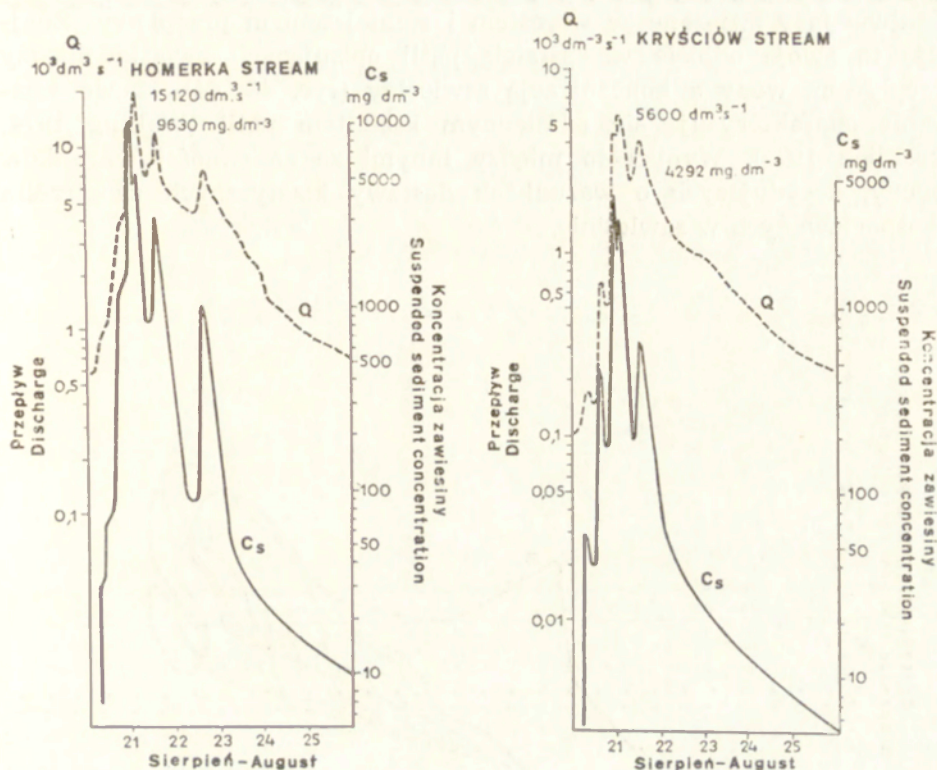
W początkowej fazie wezbrań następuje szybki wzrost koncentracji zawiesiny, który odpowiada okresowi trwania opadu, a w czasie roztopów intensywnej ablacji pokrywy śnieżnej (por. Froehlich 1972, 1975; Krzemień 1976; Froehlich, Słupik 1980b). Graficzne obrazy przebiegu przepływu wody i koncentracji zawiesiny w czasie wezbrania są zbliżone kształtem, lecz przesunięte względem siebie w czasie (Heidel 1956; Jarocki 1957; Colby 1963; Guy 1964; Walling 1974; Froehlich 1975).

Kulminacja koncentracji zawiesiny z reguły wyprzedza kulminację przepływu (ryc. 41, 42). Podczas ekstremalnej powodzi w lipcu 1970



Ryc. 41. Przepływ wody (Q) i koncentracja zawiesiny (C_s) w Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu podczas wezbrania wywołanego opadem rozlewnym w dniach 21–25 sierpnia 1972 r.

Water discharge (Q) and suspended sediment concentration (C_s) in Kamienica Nawojowska River at Nowy Sącz during high water stage caused by continuous rain between 21 and 25 of August 1972



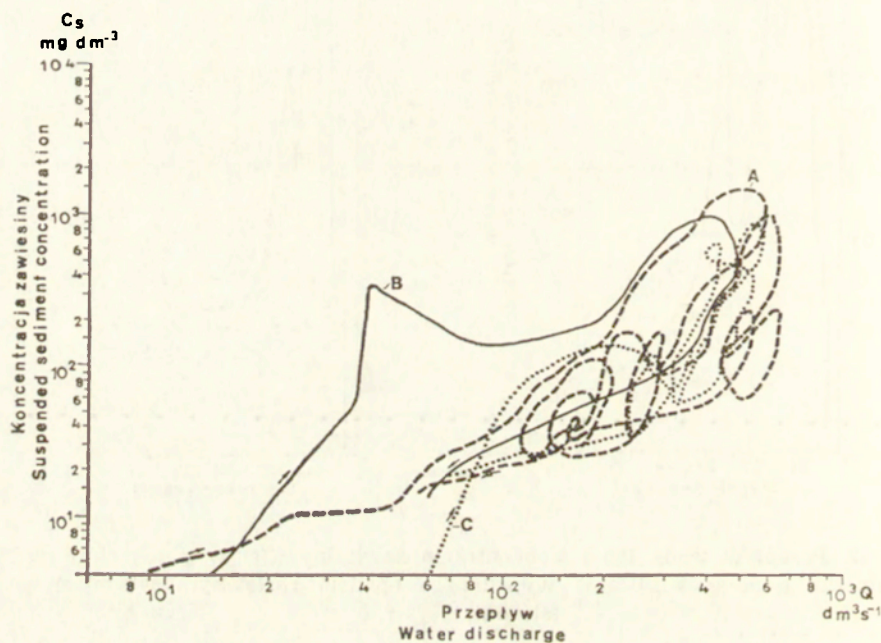
Ryc. 42. Przeływ wody (Q) i koncentracja zawiesziny (Cs) w potokach Kryściów i Homerka podczas wezbrania wywołanego opadem rozlewnym w dniach 21-25 sierpnia 1972 r.

Water discharge (Q) and suspended sediment concentration (Cs) in Kryściów Stream and Homerka Stream during high water stage due to continuous rain lasted between 21 and 25 of August 1972

roku kulminacja koncentracji zawiesziny w Kamienicy Nawojowskiej wystąpiła równocześnie z kulminacją przeływu. Wiązało się to z dużą dostawą zwietrzelin z koryta, ulegającego adaptacji do warunków hydrodynamicznych ekstremalnych przeływów (Froehlich 1975). Rzadko występują wezbrania, podczas których kulminacja koncentracji zawiesziny występuje po kulminacji przeływu. Tego typu wezbrania obserwowano w potoku Bącza. Związane to było ze zróżnicowaniem natężenia opadów w różnych częściach asymetrycznej zlewni i opóźnionymi procesami grawitacyjnymi.

Wraz ze zmniejszeniem przeływu następuje spadek koncentracji zawiesziny. Zachodzi on znacznie szybciej niż regresja przeływu (ryc. 41, 42). Wskazuje to, że dostawa zwietrzelin transportowanych w zawieszinie jest ograniczona do fazy wzrostu przeływu wezbrania. Zatem w przebiegu zmian koncentracji zawiesziny w czasie wezbrania można wyróż-

nić dwie fazy związane ze wzrostem i zmniejszeniem przepływu. Znajduje to swoje odbicie w kształcie pętli opisujących związki między przepływem wody a koncentracją zawiesiny (ryc. 43, 44). Każde wezbranie charakteryzuje się odmiennym kształtem pętli (Walling 1974; Froehlich 1975). Wynika to między innymi ze zmienności warunków pogody, decydujących o warunkach dostawy klastycznych zwietrzelin transportowanych w zawieszynie.



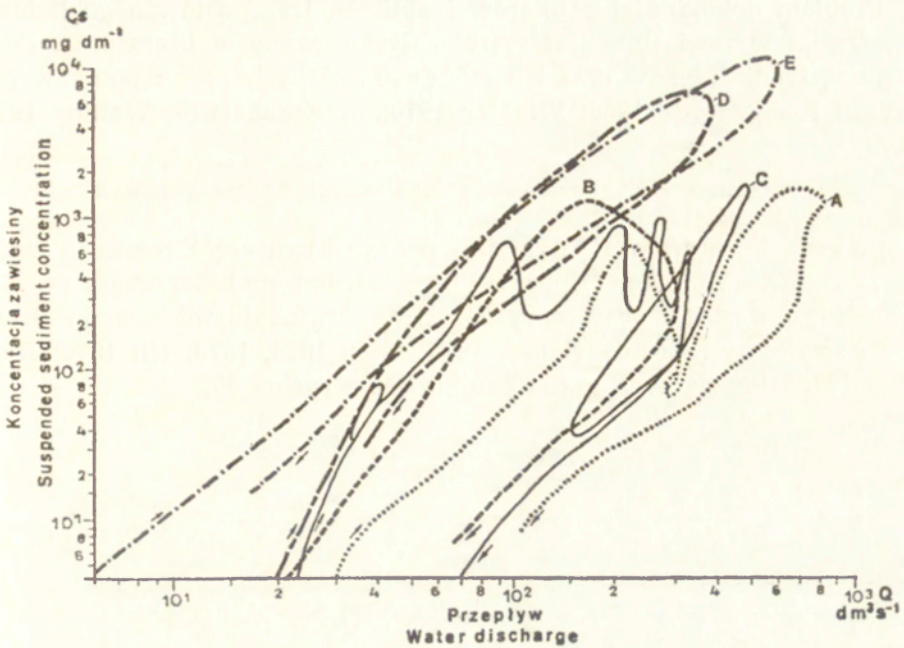
Ryc. 43. Związki między przepływem wody (Q) a koncentracją zawiesiny (C_s) w po-
toku Bącza podczas kolejnych wezbrań roztopowych

A — 24 luty - 7 marzec 1978; B — 13-16 kwietnia 1978; C — 19-25 kwietnia 1978 r.

Relations between water discharge (Q) and suspended sediment concentration (C_s)
in Bącza Stream during following high water stages caused by snow melt

A — February 24 - March 7, 1978; B — April 13-16, 1978; C — April 19-25, 1978

Skomplikowany ze względu na zjawisko histerezy przebieg związku między przepływem wody a koncentracją zawiesiny utrudnia zastosowanie prostych metod interpolacji wyników pomiarów. Z graficznego obrazu pętli różnych typów wezbrań wynika, że każde przybliżenie interpolacyjne dla okresów pozbawionych pomiarów będzie obciążone błędem. Dotychczas stosowano różne metody matematycznego opisu tego związku, od prostych regresji krzywoliniowych (Campbel, Bauder 1940; Walling 1977) aż po skomplikowane równania interpolacyjne wyższego stopnia (Sobczak 1965; Figuła 1966; Madeyski 1976). Dla rzek beskidzkich brak jednak oceny dokładności tych metod w stosunku do klasycznej metody,



Ryc. 44. Związki między przepływem wody (Q) a koncentracją zawiesiny (C_s) w potoku Bącza podczas wezbrań deszczowych wywołanych opadami rozlewnymi: A — 9-13 maj 1978; B — 31 sierpień-1 wrzesień 1978; C — 10-14 wrzesień 1978; i gwałtownymi ulewami: D — 19-20 lipiec 1978; E — 17-18 sierpień 1978 r.

Relations between water discharge (Q) and suspended sediment concentration (C_s) in Bącza Stream during high water stages due to continuous rains: A — May 9-13, 1978; B — August 31-September 1, 1978; C — September 10-14, 1978; and during high water stages due to short storms: D — July 19-20, 1978; E — August 17-18, 1978

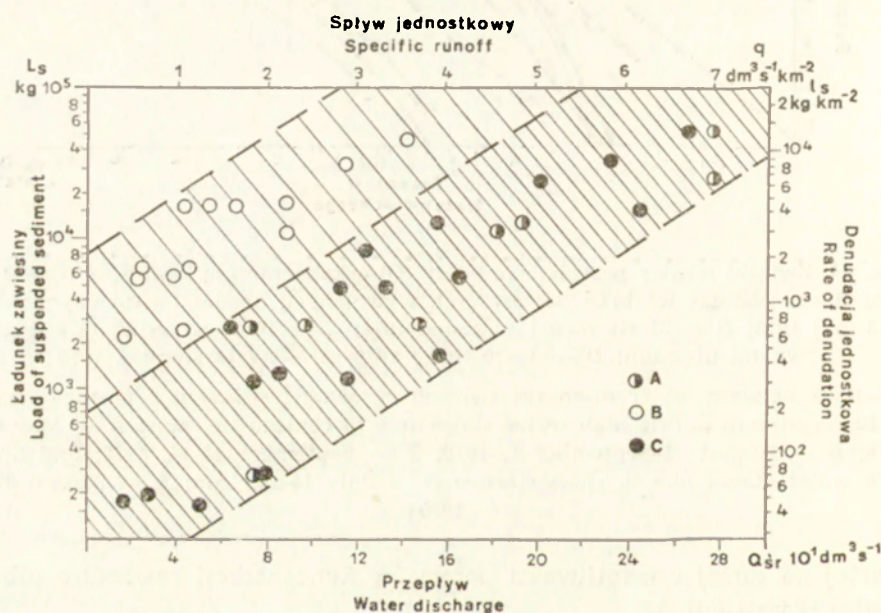
opartej na dużej częstotliwości pomiarów koncentracji zawiesiny lub jej ciągłej rejestracji.

Zdaniem autora, ekstrapolacja koncentracji zawiesiny w rzekach i potokach beskidzkich na okresy pozbawione pomiarów lub okresy o małej ich częstotliwości, może odbywać się jedynie poprzez porównywanie przebiegu koncentracji podczas wezbrań o podobnych parametrach hydrologicznych i warunkach dostawy zwietrzelin. Konieczne są do tego kilkuletnie, stacjonarne badania o dużej częstotliwości pomiarów, które umożliwiają opracowanie typologii związków przepływu z koncentracją zawiesiny dla różnych typów wezbrań w danym przekroju hydrometrycznym. Po tym okresie „tarowania” przekroju hydrometrycznego i sprawdzania zakresu dokładności metody można odpowiednio zmniejszyć częstotliwość pomiarów ograniczając się do prób reperowych. Wypracowanie takiej metody ekstrapolacji jest jednym z celów badań prowadzonych przez autora w doświadczalnej zlewni Homerki.

Problem dokładności pomiarów i obliczeń transportowanego ładunku zwierzelin w zawieszynie jest szeroko dyskutowany w literaturze. Podawane są źródła błędów oraz ich zakres dla różnych rzek i potoków (Paślowski 1965; Meade 1969; Winkler 1970; Froehlich 1975; Walling 1978).

TRANSPORT ZAWIESINY PODCZAS RÓŻNYCH TYPÓW WEZBRAŃ

Podczas wezbrań wynoszona jest przeważająca część rocznego ładunku zawiesziny (Wolman, Miller 1960). W zlewniach beskidzkich poszczególne typy wezbrań charakteryzują się indywidualnymi cechami transportu zawiesziny (Froehlich 1972, 1975; Welc 1972, 1973; Gil 1976; Krzemiń 1976). Przedstawia to dla potoku Bącza rycina 45.



Ryc. 45. Związek między odpływem wezbraniowym (Q) a ładunkiem zawiesziny (L_s) w potoku Bącza podczas wezbrań roztopowych (A), deszczowych wywołanych przez ulewę (B), deszczowych wywołanych przez opady rozlewne (C)

Relation between high water runoff (Q) and suspended sediment load (L_s) in Bącza Stream during high water stages caused by: snow melt (A), short storms (B), continuous rains lasting several days (C)

Typową cechą wezbrań roztopowych jest dobowy rytm zmian przepływu i koncentracji zawiesziny. Nawiązuje on do natężenia ablacji pokrywy śnieżnej, która może zachodzić wskutek napływu ciepłych mas powietrza (często z opadami deszczu) lub bezpośredniej radiacji (Starkel 1960; Słupik 1973). Najczęściej występuje mieszany typ roztopów. Ze względu na piętrowe zanikanie pokrywy śnieżnej wezbrania roztopowe

w zlewniach beskidzkich są mniejsze od corocznych letnich wezbrań deszczowych.

W początkowej fazie tego typu wezbrań, przy zwartej pokrywie śnieżnej, która dopiero zaczyna oddawać wodę, transportowane w zawieszynie zwietrzelin pochodzą z koryta oraz z wytapiania materiału z pokrywy lodowej w korycie. Znaczna część drobnego materiału wmarzniętego w lód pochodzi z dna koryta potoku. Jest to głównie opisany wcześniej materiał ulegający okresowej sedymentacji w czasie jesiennych niżówek. Podczas zamarzania wody zostaje on związany z lodem dennym, który odrywa się od dna i rozpoczyna tworzenie zwartej pokrywy lodowej. Zawartość materiału w lodzie rzeczny zmienia się w poszczególnych fazach narastania pokrywy lodowej. Przeważnie najwięcej materiału występuje w jego spągu. W okresie badań w korycie potoku Homerka w 1 dm³ wody wytopionej z lodu rzeczny zarejestrowano od 15—93 mg pylasto-ilastych zwietrzelin.

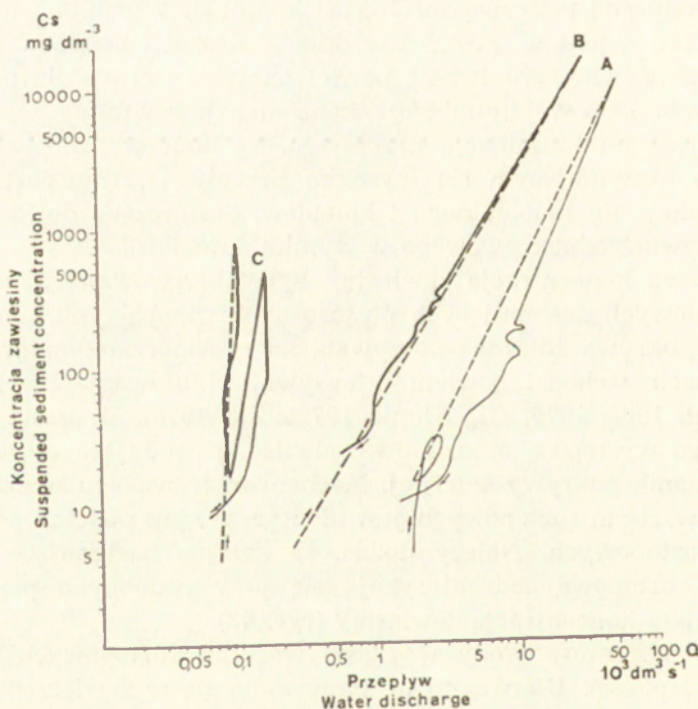
Wyraźny wzrost koncentracji zawiesiny w korycie następuje w fazie odpływu wody pod pokrywą śnieżną na kontakcie z gruntem oraz wiąże się z topnieniem płatów śniegu, głównie na drogach polnych. Następuje wówczas intensywne splukiwanie powierzchniowe i erozja liniowa w drogach polnych. Dobowe kulminacje koncentracji zawiesiny wyprzedzają odpowiadające im kulminacje przepływu. W końcowej fazie roztopów, przy długo utrzymującym się wysokim przepływie, transportowane są głównie frakcje ilu koloidalnego i koloidów, dostarczane do koryta przy udziale splywu śródpokrywowego w wyniku sufozji.

Największa koncentracja zawiesiny była obserwowana podczas wezbrań roztopowych następujących po mroźnych zimach typu kontynentalnego, gdy pokrywa śnieżna spoczywała na przemarzniętym gruncie. Po takich zimach zachodzi bowiem intensywne splukiwanie powierzchniowe (Gerlach 1966, 1976; Gil, Słupik 1972a; Gil 1976). W czasie zim typu oceanicznego występują śródzimowe odwilże, powodujące częściowy lub całkowity zanik pokrywy śnieżnej. Mechanizm transportu w czasie śródzimowych wezbrań roztopowych jest identyczny, jak podczas wiosennych wezbrań roztopowych. Należy dodać, że kolejno następujące po sobie wezbrania roztopowe charakteryzują się przy podobnych przepływach coraz mniejszą koncentracją zawiesiny (ryc. 43).

Niska temperatura wody w czasie wezbrań roztopowych powoduje wzrost jej lepkości. Ułatwia to utrzymywanie się w zawieszeniu cząstek klastycznych zwietrzelin i ich transport na znacznie większe odległości niż podczas deszczowych wezbrań letnich (Jarocki 1957; Hubbell, Al-Shaikh Ali 1961; Nordin 1963; Colby 1964; Simons, Richardson 1966). Toteż rzeki w klimatach zimnych, a w szczególności rzeki proglacjalne ze względu na niską temperaturę wody przenoszą znacznie większe ładunki zawiesiny niż podobne w strefie umiarkowanej (Klimek 1972). Z przeprowadzonych badań w korycie doświadczalnym wynika, że przy różnicy

temperatur 10-14°C droga transportu frakcji piaszczysto-pyłastych podczas wezbrań roztopowych jest dłuższa o 25-30% niż podczas deszczowych wezbrań letnich. Wprowadzenie zimą do koryta doświadczalnego zwietrzelin stokowych o masie 50 kg przy temperaturze wody 3,8°C, przepływie 72 dm³ s⁻¹ i koncentracji zawiesiny 5 mg dm⁻³ spowodowało wzrost koncentracji do 198 mg dm⁻³. Na odcinku 400 m koncentracja zawiesiny obniżyła się do 94 mg dm⁻³ (spadek 52,5%). Eksperyment powtórzono latem przy przepływie 74 dm³ s⁻¹, koncentracji zawiesiny 6 mg dm⁻³ i temperaturze wody 17,2°C. Początkowa koncentracja zawiesiny wywołana wprowadzeniem zwietrzelin wynosiła 174 mg dm⁻³ i na odcinku 400 m spadła do 33 mg dm⁻³ (spadek 81,0%).

Przy podobnych hydrologicznych parametrach wezbrań największa koncentracja zawiesiny występowała w czasie wezbrań wywołanych gwałtownymi ulewami (ryc. 46, 47). Opad o dużym natężeniu wywołuje silny rozbryzg gleby. Jest on impulsem do intensywnego splukiwania



Ryc. 46. Związki między przepływem wody (Q) a koncentracją zawiesiny (C_s) podczas wezbrania wywołanego ulewą w dniach 27-28 lipca 1972 r. w potokach: Kamienica Nawojowska (A), Homerka (B), Kryściów (C)

Relations between water discharge (Q) and suspended sediment concentration (C_s) during high water stage due to heavy rain in 27 and 28 of July 1972: Kamienica Nawojowska River (A), Homerka Stream (B), Kryściów Stream (C)



Ryc. 47. Związki między splywem jednostkowym (q) a mechaniczną denudacją jednostkową (ls) podczas wezbrania wywołanego ulewą w dniach 27-28 lipca 1972 r. w potokach: Kamienica Nawojowska (A), Homerka (B), Kryściów (C)

Relations between specific runoff (q) and rate of mechanical denudation (ls) during high water stage due to heavy rain in 27 and 28 of July 1972: Kamienica Nawojowska River (A), Homerka Stream (B), Kryściów Stream (C)

i transportu liniowego zwietrzelin w drogach polnych, które są głównym źródłem dostawy klastycznych zwietrzelin do koryt (Froehlich, Słupik 1980a, b). Przykładem może być wezbranie w zlewni Homerki w dniu 26 lipca 1972 roku wywołane opadem 84 mm w ciągu 115 minut. Nagły wzrost przepływu zaznaczył się przemieszczaniem wału wodnego o wyso-

kości około 1 m w korycie potoku. Kulminacja przepływu osiągnęła $34\,200\text{ dm}^3\text{ s}^{-1}$ ($1745\text{ dm}^3\text{ s}^{-1}\text{ km}^{-2}$), a maksymalna koncentracja zawiesiny $14\,584\text{ mg dm}^{-3}$ (ryc. 46, 47). Transport zawiesiny wyniósł wówczas 1902 tony, co w przybliżeniu odpowiada rocznemu ładunkowi zawiesiny transportowanemu w korycie potoku przy braku ekstremalnych wezbrań.

Na szczególną uwagę zasługuje przebieg transportu zawiesiny podczas powodzi wywołanych kilkudniowymi opadami o wysokich sumach dobowych, przekraczających niekiedy 100 mm (Niedźwiedź 1972, 1981). Tego typu wezbrania pojawiają się co kilkanaście lat i odgrywają istotną rolę w transporcie zwietrzelin i transformacji koryt rzek i potoków beskidzkich (Klimaszewski 1935b; Ziętara 1968, 1974; Brykowicz i in. 1972; Dobija 1972; Froehlich 1972; Froehlich i in. 1972; Niemirowski 1972; Starkel 1972a; Welc 1972; Gałka 1973).

W okresie badań wystąpiło kilka powodzi (1970, 1972, 1973, 1974), z których największe miały miejsce w 1970 i 1973 roku. Przepływ Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu przekroczył wówczas $300\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ (ponad $1200\text{ dm}^3\text{ s}^{-1}\text{ km}^{-2}$). Charakterystyczną cechą powodzi pojawiających się po długim okresie bez wielkich wezbrań (np. powódź w lipcu 1970 r.) jest równoczesność kulminacji przepływu z kulminacją koncentracji zawiesiny. Wiąże się to z dużą dostawą zwietrzelin z koryta, które ulega dopasowaniu do ekstremalnych warunków hydrodynamicznych (Froehlich 1972). Zdaniem autora, natężenie transportu zwietrzelin podczas powodzi, jak również rozmiary transformacji koryt są proporcjonalne do długości okresu międzypowodziowego. Powodzie w latach 1972, 1973, 1974 nie wywołały w korycie Kamienicy Nawojowskiej i jej dopływów takich zmian, jak powódź w 1970 r. Według Starkla (1979) powodzie wywołane opadami rozlewnymi modelują głównie koryta rzek i potoków, a krótkotrwałe, gwałtowne ulewę zaznaczają się w tworzeniu form na stokach.

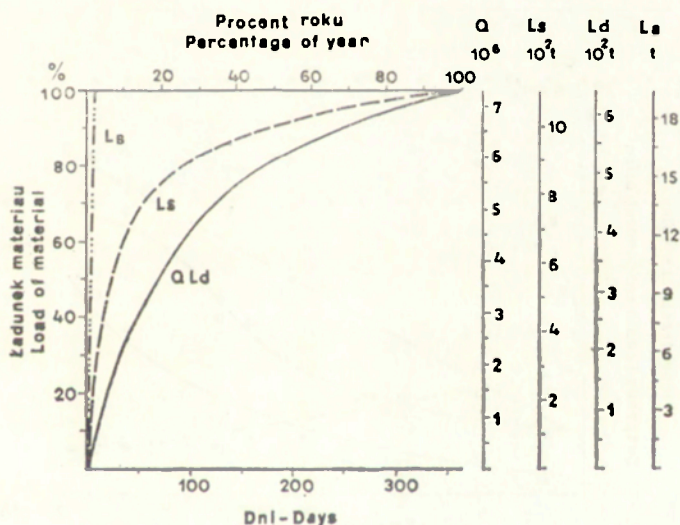
Niewielkie wezbrania z deszczy rozlewnych o wolno wzrastającym przepływie charakteryzują się małą zmiennością koncentracji zawiesiny, a często brakiem wyraźnej kulminacji koncentracji. Transportowane są wówczas głównie frakcje ilaste i koloidalne.

Przy podobnym przepływie w kolejnych, szybko następujących po sobie wezbraniach zaznacza się coraz niższa koncentracja zawiesiny (Lisicyna, Bogolubowa 1964; Walling 1974; Froehlich 1975). Wskazuje to, że główną rolę odgrywa czas działania procesów przygotowujących zwietrzelinę do transportu. Ilość zwietrzelin możliwych do wprowadzenia w ruch wzrasta proporcjonalnie do długości okresu międzywezbraniowego. Wezbrania rozdzielone długimi okresami suszy lub krótkotrwałych opadów o małym natężeniu charakteryzują się wysoką koncentracją zawiesiny. Dotyczy to szczególnie wezbrań wywołanych gwałtownymi ulewami po okresach suszy (por. Porterfield 1972; Froehlich 1975). Świadczy to o nie-

równomiernym obciążeniu rzeki w cyklu rocznym, a zatem o istnieniu okresowych nadwyżek energii w korytach rzek i potoków beskidzkich co wpływa na przyspieszenie tempa erozji wgłębnej.

Na wielu odcinkach koryt rzek i potoków beskidzkich obserwowano wzrost koncentracji zawiesiny związany z eksploatacją aluwioów z koryta, pracami regulacyjnymi, a w obszarach leśnych ze ściąganiem drzewa korytami potoków. Na przykład w 1976 r. w korycie Kamienicy Nawojowskiej w ciągu 24 dni eksploatacji aluwioów przy przepływach $2300\text{--}6700\text{ dm}^3\text{ s}^{-1}$ koncentracja zawiesiny wzrastała do 335 mg dm^{-3} . W korycie potoku Sucha Kamionka (dopływ potoku Homerka) w czasie ściągania drzewa zimą 1976 r. przy przepływie $16,3\text{ dm}^3\text{ s}^{-1}$ koncentracja zawiesiny wzrastała do 183 mg dm^{-3} . Wskazuje to, że działalność człowieka może mieć istotny wpływ na wielkość transportu zawiesiny.

Przeciętnie ponad 95% ładunku klastycznych zwietrzelin transportowanych w zawieszynie wynoszone jest ze zlewni beskidzkich w okresie wezbrań, na które przypada zaledwie kilka procent czasu roku (ryc. 48). W dużych i średniej wielkości zlewniach główną rolę w wynoszeniu



Ryc. 48. Transport ładunku materiału rozpuszczonego (L_d), zawiesiny (L_s) i materiału dennego (L_b) na tle odpływu wody (Q) w potoku Homerka w 1977 r.

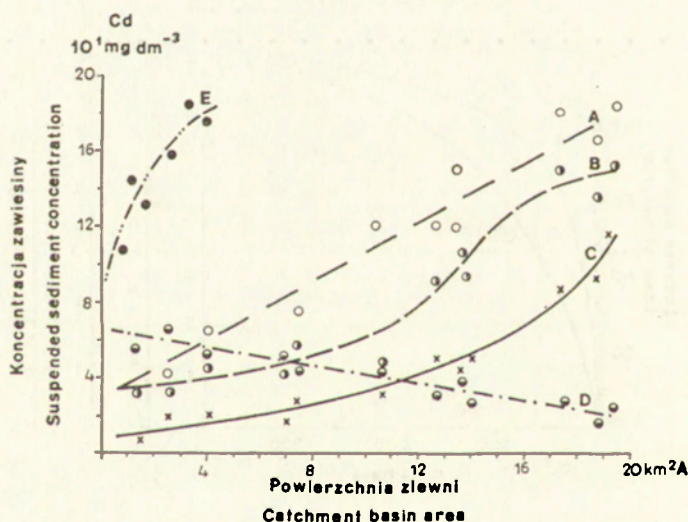
Load of total dissolved solids (L_d), suspended sediment (L_s) and bed material (L_b) against a background of runoff (Q) in Homerka Stream in year 1977

zwietrzelin w zawieszynie odgrywają ekstremalne wezbrania z deszczy rozlewnych (powodzie), a w małych zlewniach również wezbrania wywołane przez gwałtowne ulewy. W poszczególnych latach w czasie tego typu wezbrań wyniesione zostało ponad 90% rocznego ładunku (np. 1970, 1972, 1973, 1974). Toteż w cyklu rocznym zaznacza się wyraźna przewa-

ga wynoszenia ładunku zawiesiny w półroczu letnim. Ładunek zawiesiny transportowany w okresach niżówkowych stanowi przeciętnie 1-2% rocznego ładunku (Froehlich 1975).

PRAWIDŁOWOŚCI PRZESTRZENNEGO ZRÓŻNICOWANIA TRANSPORTU ZAWIESINY

Koncentracja zawiesiny w korytach rzek i potoków beskidzkich wzrasta od źródeł do ujścia (Brański 1975; Froehlich 1975; Klimek 1979). Podobnie jak w przypadku materiału rozpuszczonego wzrost koncentracji zawiesiny w badanych zlewniach zależy od cech środowiska oraz od typu wezbrania (ryc. 49). Podczas niskich stanów wody koncentracja zawiesiny na całej długości badanych potoków wynosiła 2-8 mg dm⁻³, z wyjątkiem okresów zakwitu planktonu latem. W czasie wezbrań wywołanych opadami rozlewnymi w korycie potoku Homerka obserwowano liniowy wzrost koncentracji i ładunku zawiesiny od źródeł do ujścia. Równocześnie w korycie potoku Bącza wzrost ten miał charakter krzywoliniowy (ryc. 49). Prawidłowości wzrostu parametrów transportu za-

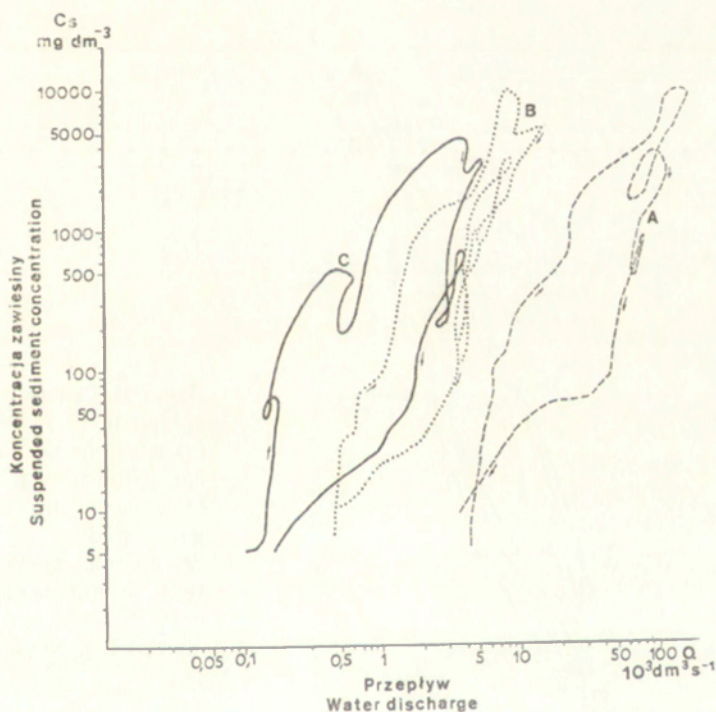


Ryc. 49. Zróżnicowanie koncentracji zawiesiny podczas wezbrań w korycie potoku Homerka w nawiązaniu do przyrostu powierzchni zlewni: A — wezbranie wywołane opadem rozlewnym; B — wezbranie wywołane ulewą; C — wezbranie roztopowe w początkowej fazie; D — wezbranie roztopowe w końcowej fazie; E — wezbranie wywołane opadem rozlewnym w potoku Bącza

Suspended sediment concentration changes in Homerka Stream against a background of drainage area increase during high water discharges caused by: A — continuous rain; B — short storm; C — snow melt (in initial phase); D — snow melt (in final phase); E — continuous rain in Bącza catchment basin

wiesiny z biegiem koryta ulegały „zakłóceniu” w czasie wezbrań wywołanych ulewami o lokalnym zasięgu. Rejestrowano wówczas nagły wzrost koncentracji zawiesiny na stosunkowo krótkich odcinkach koryta, wywołany przez gwałtowną dostawę zwietrzelin z dróg polnych. Natomiast w czasie wezbrań roztopowych zróżnicowanie koncentracji zawiesiny z biegiem potoku nawiązywało do piętrowego zanikania pokrywy śnieżnej. We wstępnej fazie roztopów duży wzrost koncentracji zaznaczał się w dolnym odcinku koryta, podczas gdy w źródłowych partiach potoku koncentracja zawiesiny była podobna do koncentracji w czasie zimowej niżówki. W dalszych fazach roztopów zasięg wód o podwyższonej koncentracji zawiesiny przesunął się w górę potoku.

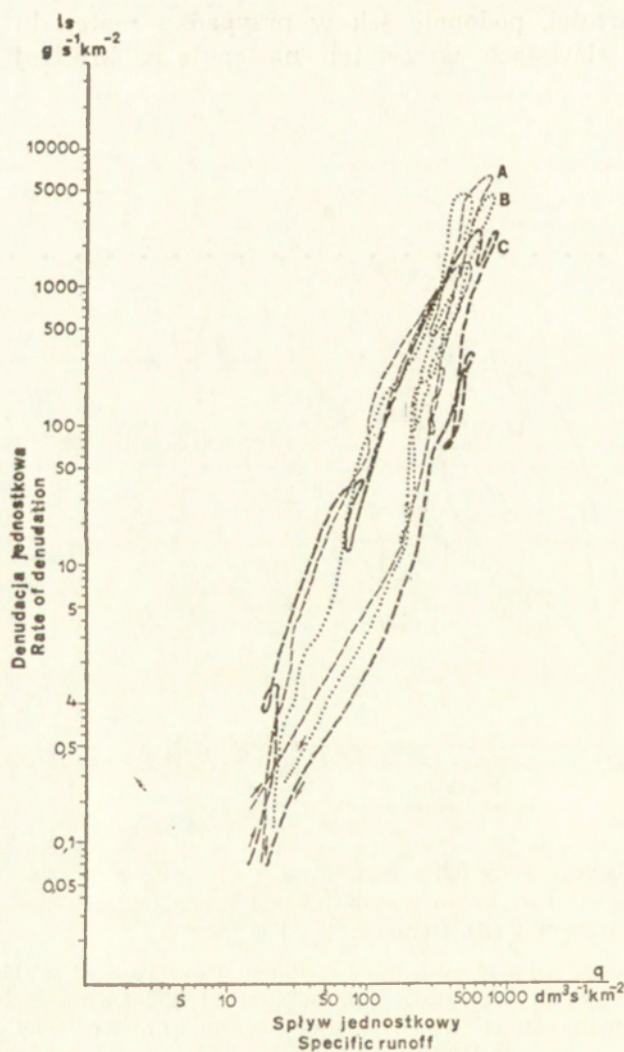
Wzrost ładunku transportowanej zawiesiny z biegiem koryta wskazuje, że w zależności od położenia przekroju hydrometrycznego w zlewni otrzymamy różne jego wartości, podobnie jak w przypadku materiału rozpuszczonego. W małych zlewniach wzrost ten następuje na krótszej



Ryc. 50. Związki między przepływem wody (Q) a koncentracją zawiesiny (C_s) podczas wezbrania wywołanego opadem rozlewnym w dniach 21-25 sierpnia 1972 w potokach: Kamienica Nawojowska (A), Homerka (B), Kryściów (C)

Relations between water discharge (Q) and suspended sediment concentration (C_s) during high water stage due to continuous rain lasting between 21 and 25 of August 1972: Kamienica Nawojowska River (A), Homerka Stream (B), Kryściów Stream (C)

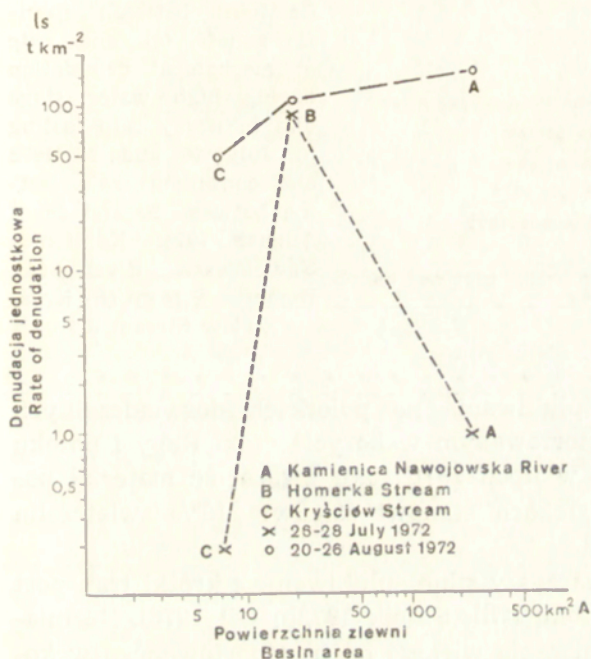
drodze niż w zlewniach większych, co wiąże się z szybko następującymi zmianami cech środowiska zlewni, a w szczególności zmianami użytkowania ziemi z przyrostem powierzchni zlewni. Dlatego w złożonej zlewni Kamienicy Nawojowskiej w czasie różnych typów wezbrań rejestrowano duże zróżnicowanie w dostawie ładunku zawiesiny przez poszczególne dopływy (ryc. 46, 47, 50, 51). W podobnych sytuacjach pogodowych każda niemal zlewnia wykazuje swój indywidualny reżim transportu zawiesiny. Toteż przy porównaniach małych zlewni pod kątem procesów denudacji mechanicznej tak ważnym elementem jest ocena reprezentatywności wyników z przekroju hydrometrycznego w stosunku do przestrzennego zróżnicowania.



Ryc. 51. Związki między splywem jednostkowym (q) a mechaniczną denudacją jednostkową (ls) podczas wezbrania wywołanego opadem rozlewnym w dniach 21-25 sierpnia 1972 w potokach: Kamienica Nawojowska (A), Homerka (B), Kryściów (C)

Relations between specific runoff (q) and rate of mechanical denudation (ls) during high water stage due to continuous rain lasting between 21 and 25 of August 1972: Kamienica Nawojowska River (A), Homerka Stream (B), Kryściów Stream (C)

Związek mechanicznej denudacji jednostkowej z przyrostem powierzchni zlewni ma charakter krzywoliniowy. Dla zlewni Homerki przybliży go równanie hiperboli o ogólnej postaci $y = (ax + b)/x$. Mechaniczna ekstrapolacja wskaźników denudacji nawet w obrębie jednego dorzecza z małej zlewni na dużą i odwrotnie, jak również na zlewnie o podobnej wielkości nie znajduje uzasadnienia w przestrzennym zróżnicowaniu procesów (ryc. 52, 53).



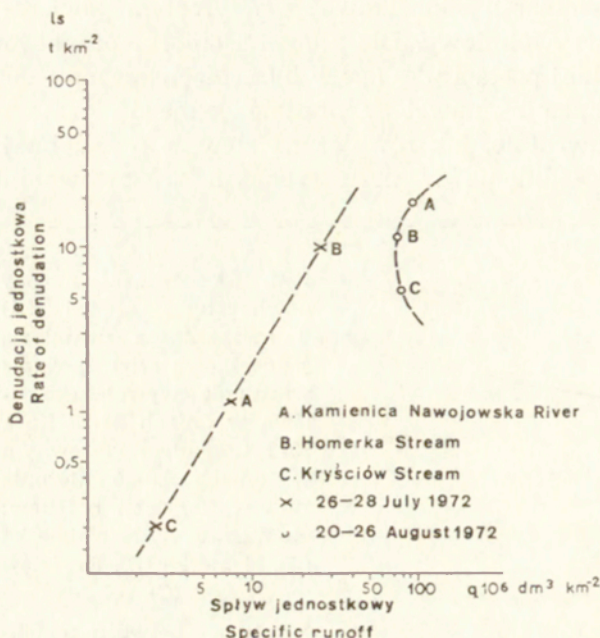
Ryc. 52. Związki między powierzchnią zlewni (A) a mechaniczną denudacją jednostkową (ls) podczas wezbrania wywołanego ulewą w dniach 26-28 lipca 1972 i opadem rozlewnym w dniach 20-26 sierpnia 1972 w korytach potoków: Kamienica Nawojowska (A), Homerka (B), Kryściów (C)

Relations between catchment area (A) and rate of mechanical denudation (ls) during high water stage caused by heavy rain lasting in July 26 and 28, 1972 and high water stage due to continuous rain lasting between 20 and 26 of August 1972: Kamienica Nawojowska River (A), Homerka Stream (B), Kryściów Stream (C)

DOSTAWA KLASTYCZNYCH ZWIETRZELIN ZE STOKU DO KORYTA

Dotychczasowe próby ilościowej oceny dostawy klastycznych zwietrzelin ze stoku do koryta w zlewniach fliszowych opierały się na porównaniach transportowanego w korycie potoku ładunku zawiesiny z rozmianami splukiwania na stokach (Gerlach 1976) lub izolowanych poletkach doświadczalnych (Welc 1972; Gil 1976) bądź z koncentracją zawiesiny w drogach polnych (Figula 1960; Froehlich 1975).

Na podstawie danych, pochodzących z różnych okresów i otrzymanych metodami o różnej dokładności, Gerlach (1976) porównuje wielkości splukiwania na stokach z transportem zawiesiny i ładunku dennego w zlewniach potoków Biała Woda (Iłaka) i Jaszcze (Ias). Wyciąga daleko idący wniosek, że natężenie procesów korytowych jest kilka razy większe od natężenia procesów stokowych. Podobnie Welc (1972) na podsta-



Ryc. 53. Związki między sypływem jednostkowym (q) a mechaniczną denudacją jednostkową podczas wezbrania wywołanego ulewą w dniach 26-28 lipca 1972 i opadem rozlewnym w dniach 20-26 sierpnia w potokach: Kamienica Nawojowska (A), Homerka (B), Kryściów (C)

Relations between specific runoff (q) and rate of mechanical denudation during high water stage due to heavy rain lasting in July 26 and 28 1972 and continuous rain lasting between 20 and 26 of August 1972: Kamienica Nawojowska River (A), Homerka Stream (B), Kryściów Stream (C)

wie porównania wielkości spłukiwania na poletkach doświadczalnych z ładunkiem zawiesiny transportowanym w korycie rzeki Ropy i potoku Bystrzanka podczas powodzi w lipcu 1970 roku uważa, że materiał pochodzący z erozji gleb na stokach stanowi zaledwie 10% zwietrzelin transportowanych w korycie.

Gwałtownym ulewom towarzyszy silne spłukiwanie i krótki transport zwietrzelin po powierzchni stoku (Gil, Słupik 1972b; Gil 1976). Rozmiary spłukiwania są wówczas znacznie większe od transportowanego w korycie ładunku zawiesiny. Natomiast w czasie opadów rozlewnych stosunkowo małemu spłukiwaniu towarzyszy duże natężenie transportu zawiesiny w korycie (Gil 1976). Wyniki spłukiwania pochodzą z pomiarów na izolowanych poletkach doświadczalnych w zlewni Bystrzanki i porównywane były z ładunkiem zawiesiny transportowanym przez potok na szóstym kilometrze jego długości. Na obecnym etapie badań, ze względu na nieznaną wpływ wielkości poletka na rejestrowaną wielkość spłukiwania wyrażoną w postaci denudacji jednostkowej, dane te są nieporównywalne z transportem zawiesiny w korycie.

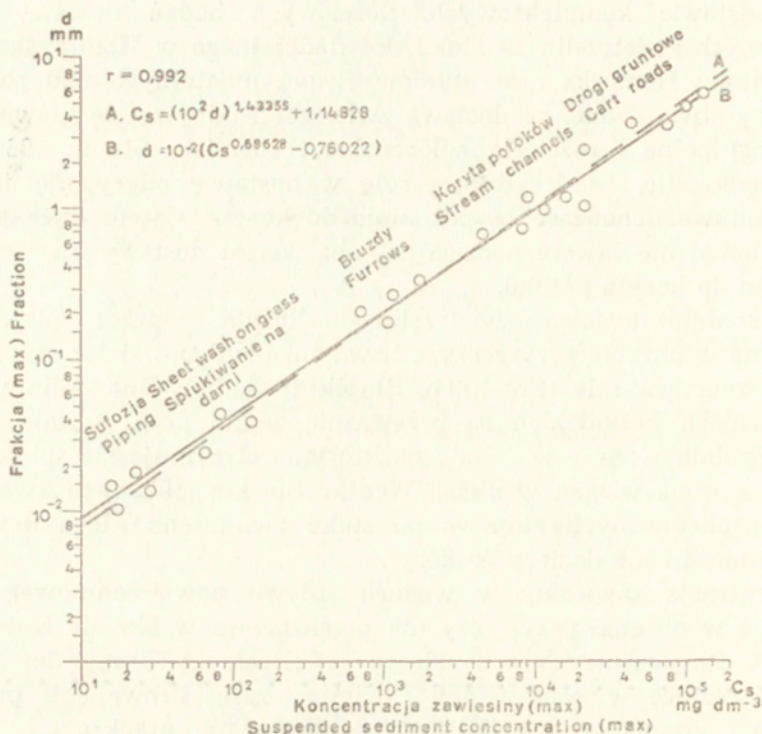
Wielu badaczy na podstawie obserwacji w różnych obszarach Beskidów i Pogórza już od dawna zwracało uwagę na dużą rolę dróg gruntowych w dostawie klastycznych zwietrzelin do koryt (m. in. Klimaszewski 1935a; Ziemnicki 1955; Starkel 1957; Prochal 1958; Figuła 1960; Polak 1965; Froehlich 1972, 1975; Welc 1972; Słupik 1973, 1976; Krzemień 1976).

Na podstawie kompleksowych, ilościowych badań dostawy wody i klastycznych zwietrzelin ze stoku doświadczalnego w Homrzyskach do koryta potoku Homerka oraz studiów eksperymentalnych nad rozbryzaniem gleby stwierdzono, że dostawa zwietrzelin odbywa się głównie poprzez drogi polne i rozcięcie holoceniskie (Froehlich, Słupik 1980a, b). Trzeba podkreślić, że decydującą rolę w dostawie odgrywają jedynie drogi gruntowe uchodzące bezpośrednio do koryta. Zatem duża gęstość dróg w zlewni nie zawsze pociąga za sobą wzrost dostawy klastycznych zwietrzelin do koryta potoku.

Bezpośrednia dostawa zwietrzelin do koryta poprzez splukiwanie rozproszone w obrębie przyrzeczy z trwałymi użytkami zielonymi odgrywa mało znaczącą rolę (Froehlich, Słupik 1980a, b). Dna dolin w małych zlewniach beskidzkich są przeważnie zajęte przez trwałe użytki zielone. Spełniają one rolę „sita”, na którym zatrzymuje się splukiwany materiał, a woda wsiąka w glebę. Według Starkla (1972b) przeważająca część transportowanych etapowo po stoku zwietrzelin ulega depozycji u jego podnóża i nie dociera do koryt.

Koncentracja zawiesiny w wodach spływu powierzchniowego rozproszonego w obrębie przyrzeczy nie przekroczyła w okresie badań 117 mg dm^{-3} . Przeważnie mieściła się w granicach $25\text{--}65 \text{ mg dm}^{-3}$. Maksymalne różnice w koncentracji zawiesiny zarejestrowane u podnóża stoku i na kontakcie dna doliny z korytem nie przekraczały $\pm 12\%$, a wartości splukiwania u podnóża stoku były od $3\text{--}10\%$ wyższe niż na kontakcie dna doliny z korytem. Koncentracja zawiesiny była wprost proporcjonalna do natężenia opadu, czasu jego trwania i długości okresu między kolejnymi przypadkami spływu. Podczas długotrwałych opadów rozlewnych wywołujących spływ powierzchniowy po pewnym czasie po zadarnionej powierzchni przyrzeczy płynęła woda o koncentracji zawiesiny poniżej 20 mg dm^{-3} (por. Gerlach 1966).

Koncentracja zawiesiny w wodach spływu powierzchniowego rozproszonego na kontakcie dna doliny z korytem była zawsze wielokrotnie niższa od obserwowanej w korycie potoku Homerka (ryc. 54). Toteż staje się oczywiste, że wysoka koncentracja zawiesiny w potoku, która przekraczała niekiedy $10\,000 \text{ mg dm}^{-3}$, nie mogła być wywołana dostawą zwietrzelin z przyrzeczy spływem powierzchniowym rozproszonym. Stwierdzono również, że ze względu na krótki transport materiał pochodzący z bardzo rzadko występującej w zlewni Kamienicy Nawojowskiej erozji liniowej (żłobiny), a nawet ze spływów błotnych w obrębie przyrzeczy tylko w niewielkiej ilości docierał do koryta (fot. 12). Bezpośrednia dostawa klastycznych zwietrzelin do koryta potoku poprzez spływ powierzchniowy rozproszony z przyrzeczy stanowi w ciągu roku poniżej 1% ładunku zawiesiny wynoszonego ze zlewni Homerki. Podobnie niskie wartości można wyliczyć z tabeli 30 zamieszczonej w pracy Gerlacha (1976), a dotyczącej porównania wielkości splukiwania z rozmiara-



Ryc. 54. Związek między maksymalną obserwowaną koncentracją zawiesiny (C_s) a maksymalną średnicą cząstek klastycznych zwietrzelin (d) transportowanych w zawieszynie podczas wielkich wezbrań na stoku doświadczalnym w Homrzychach i w korycie potoku Homerka

Relation between maximum suspended sediment concentration observed (C_s) and maximum diameter of mineral particles (d) transported in suspension during floods in the channel of Homerka Stream and on the experimental slope

mi transportu zawiesiny w korytach potoków Jaszce i Biała Woda.

Ważnym argumentem przemawiającym za stosunkowo niewielkim udziałem tego typu dostawy jest również mała częstotliwość występowania spływu powierzchniowego rozproszonego (Słupik 1973, 1981) w stosunku do ilości wezbrań o dużej koncentracji zawiesiny, zarejestrowanych w korytach badanych potoków. Materiał spłukiwany na użytkach zielonych składa się głównie z frakcji ilastych oraz koloidalnych przy dużym udziale substancji organicznych, przekraczającym niekiedy 40% masy. Stanowi on zaledwie 10-15% ładunku transportowanego w korycie i może także pochodzić z dróg polnych, rozcięć holocenijskich oraz bezpośrednio z koryta.

W okresach dużego nasycenia wodą pokryw zwietrzelinowych (roztopy, okresy długotrwałych opadów rozlewnych) pewna część ilasto-koloidalnych zwietrzelin ulega sufozji (por. Bunting 1961; Bryan i in. 1978)

i dostarczana jest przy udziale spływu śródpokrywowego do dróg polnych, rozcięć holocenijskich lub bezpośrednio do koryt. Koloidy mogą odbywać długą wędrówkę w środowisku wodnym aż do momentu, kiedy ulegną koagulacji i wytrąceniu jako żele. Szczególnie koloidy hydrofilne, np. krzemionka, absorbują na swojej powierzchni cząsteczki wody i są trwałe, co zwiększa możliwość ich dalekiego transportu. Stopień dyspersji koloidów glebowych zmienia się w zależności od okresu wegetacyjnego. Na wiosnę i w jesieni jest większy, a maleje latem. Toteż w wodach krążących w pokrywach glebowych w czasie roztopów i rozlewnych opadów jesiennych występuje największa koncentracja koloidów.

Ilość materiału uruchamianego przez sufozję jest dość znaczna, pomimo stosunkowo małej koncentracji materiału ($8\text{--}35 \text{ mg dm}^{-3}$). Decyduje o tym duża objętość spływu śródpokrywowego, który jest głównym składnikiem odpływu w korycie. Natężenie sufozji zależy głównie od składu mechanicznego pokryw stokowych. W pewnych warunkach efektem tego procesu są różnorodne kanały sufozyjne, lejki zapadliskowe, które po połączeniu mogą tworzyć nawet nieregularne dolinki (Czeppe 1960; Starkel 1960; Galarowski 1976).

Duże natężenie sufozji, przy wykorzystaniu nor zwierząt ryjących, obserwowano u podnóża stoku doświadczalnego w czasie wiosennych roztopów i długotrwałych opadów rozlewnych o dużym natężeniu. Wiosną 1978 roku wydajność wypływów wody z kilku nor wynosiła od $0,2\text{--}0,4 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ przy koncentracji zawiesiny $23\text{--}62 \text{ mg dm}^{-3}$. W pobranych próbach wody stwierdzono pojedyncze ziarna frakcji piaszczystych. U wylotu nor utworzyły się miniaturowe stożki napływowe zbudowane z frakcji piaszczysto-pylastych. Frakcje ilaste i koloidalne były transportowane na odległość kilkunastu metrów, aż do momentu zaniku przepływu wywołanego przez infiltrację wody w aluwia.

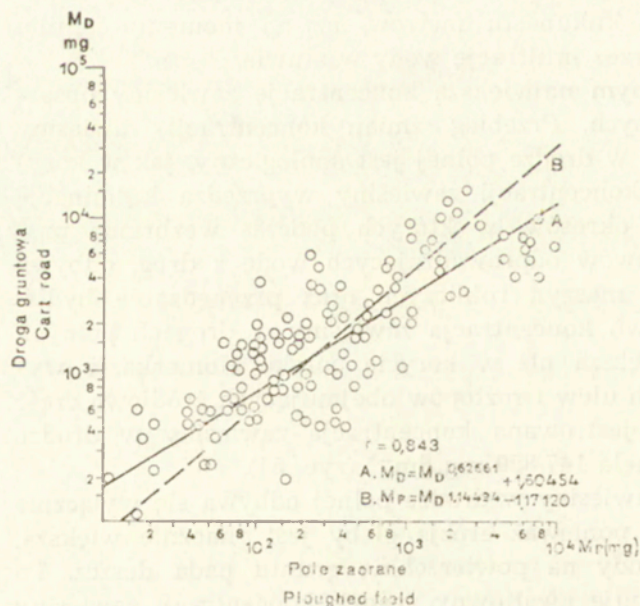
Na stoku doświadczalnym największą koncentrację zawiesiny obserwowano w drogach polnych. Przebieg zmian koncentracji zawiesiny w stosunku do przepływu w drodze polnej jest analogiczny, jak w korycie potoku. Kulminacja koncentracji zawiesiny wyprzedza kulminację przepływu, z wyjątkiem okresów, w których podczas wezbrania prowadzona jest naprawa rowów odprowadzających wodę z dróg, odbywa się przejazd wozów lub maszyn rolniczych oraz przepędzanie bydła. W fazie wzrostu przepływu koncentracja zawiesiny w drogach polnych była zawsze znacznie większa niż w korycie potoku Homerka, z wyjątkiem okresów lokalnych ulew i roztopów obejmujących źródłową część zlewni. Maksymalna zarejestrowana koncentracja zawiesiny w drodze polnej (droga nr 1) osiągnęła $147\,889 \text{ mg dm}^{-3}$ (ryc. 54).

Wzrost koncentracji zawiesiny w drodze polnej odbywa się wyłącznie w czasie trwania opadu, ponieważ erozja gleby jest znacznie większa, gdy w czasie spływu wody na powierzchnię gruntu pada deszcz. Po zakończeniu opadu następuje gwałtowny spadek koncentracji zawiesiny

i transportowane są coraz drobniejsze frakcje. W końcowej fazie dużych wezbrań drogami płynie woda zawierająca tylko ility koloidalne i koloidy. Jest to faza odprowadzania spływu śródpokrywowego. Podobnie jak w korytach potoków, kolejne, szybko następujące po sobie wezbrania charakteryzują się coraz mniejszą koncentracją zawiesiny.

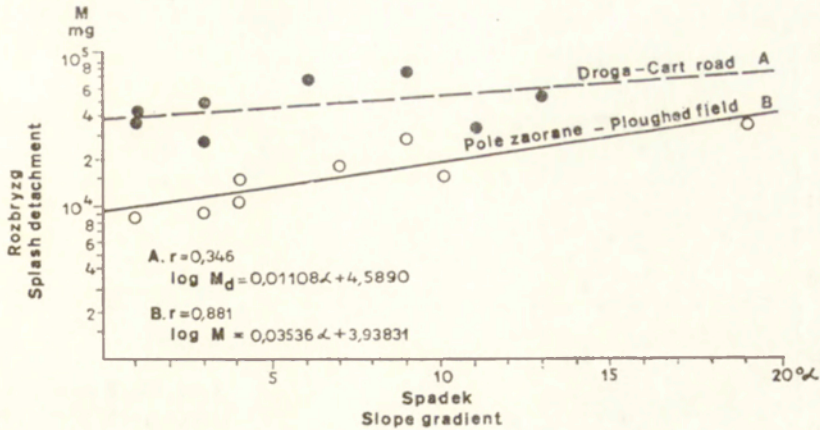
Wielkość koncentracji zawiesiny w drogach polnych wiąże się ściśle z natężeniem rozbryzgu gleby, wywołanego uderzaniem kropli deszczu (Froehlich 1975; Froehlich, Słupik 1980b). Zróznicowanie wielkości rozbryzgu gleby zależy od natężenia opadów, stanu powierzchni gruntu, a głównie wilgotności warstwy powierzchniowej i jej składu mechanicznego. Wyniki eksperymentalnych badań rozbryzgu gleby na poletkach doświadczalnych naśladowujących pole orne i drogę gruntową wskazują, że natężenie tego procesu może być 30-krotnie większe na drodze gruntowej niż na polu ornym (ryc. 55). Szybkie tworzenie się warstwy detencji powierzchniowej na drodze gruntowej powoduje wzrost natężenia rozbryzgu gleby. Wyjaśniają to eksperymenty wykonane przez Palmera (1965).

Wraz ze wzrostem spadku drogi zaznacza się tendencja do wzrostu natężenia rozbryzgu gleby (ryc. 56). Zatem należy unikać prowadzenia dróg gruntowych na dużych spadkach, co sprzyja również erozji liniowej i prowadzi do szybkiego pogłębiania wąwozów drogowych. Poruszane przez rozbryzg zwietrzliny podrzucane były nawet na wysokość 90 cm nad powierzchnię gruntu. Ponad 90% masy cząstek było podrzucane do wysokości 20 cm (ryc. 57). Ma to istotne znaczenie w bezpośredniej

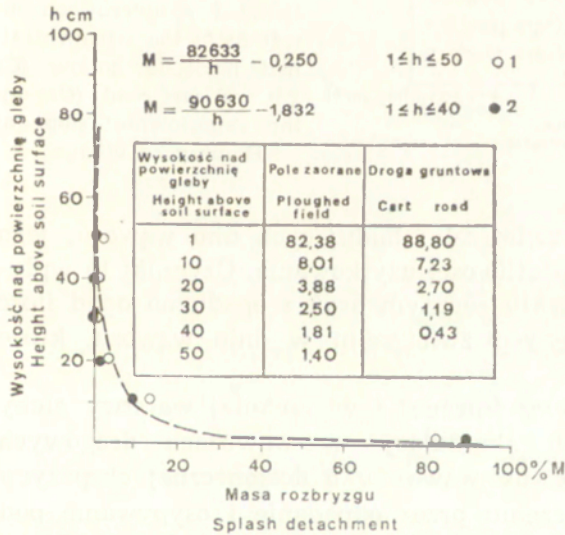


Ryc. 55. Związek między masą zwietrzlin przemieszczaną przez rozbryzg na polu zaoranym (M_P) i drodze gruntowej (M_D)

Relation between mass of waste material detached under rain-drop impact on ploughed field (M_P) and on cart road (M_D)



Ryc. 56. Związek między spadkiem (α) a masą gleby przemieszczonej przez rozbryzg (M)
 A — droga gruntowa; B — pole zaorane
 Relation between slope gradient (α) and soil mass detached in splash process (M)
 A — cart road; B — ploughed field



Ryc. 57. Związek między masą gleby (M) przemieszczanej przez rozbryzg a wysokością nad gruntem (h) dla drogi gruntowej i pola zaoranego
 Relation between soil mass (M) detached in splash process and height above soil surface (h) on cart road and on ploughed field

dostawie cząstek zwietrzelin do rowka odprowadzającego wodę z drogi i sprzyja szybkiemu wzrostowi koncentracji zawiesiny w wodach odprowadzanych z dróg polnych.

Wyniki równoczesnych pomiarów koncentracji zawiesiny wykonanych podczas różnych typów wezbrań wskazują, że była ona zawsze znacznie mniejsza w cieku odwadniającym rozcięcie holocenijskie niż w drogach polnych i zróżnicowana dla poszczególnych dróg (ryc. 58, 59, 60). Wynika to z indywidualnych cech każdej drogi, a głównie głębokości wą-



Ryc. 58. Porównanie równoczesnych pomiarów koncentracji zawiesiny w rozcięciu holocenijskim (Cs Z3) i drogach polnych (Cs) na stoku doświadczalnym w Homorzyskach

Comparison of simultaneously measurements of suspended sediment concentration in the stream drained holocene hollow (Cs Z3) and cart roads (Cs) on the experimental slope at Homorzyska village

wozu, składu mechanicznego zwietrzelin budujących dno wąwozu, jego wilgotności oraz sposobu i częstotliwości użytkowania. Czynniki te wpływają na zmieniającą się w cyklu rocznym oraz z opadu na opad ilość luźnych cząstek drobnoziarnistych zwietrzelin w dnie wąwozu, które mogą być wprowadzone w ruch.

Zimą, przewiewanie pokrywy śnieżnej i wierzchniej warstwy gleby powoduje lokalnie dużą ich akumulację w wąwozach drogowych w postaci zasp (fot. 13), a ściany wąwozów o dosłonecznej ekspozycji podlegają intensywnemu niszczeniu przez odpadanie i osypywanie pod wpływem zamarzającej w szczelinach wody oraz działania lodu włóknistego. Procesy te prowadzą do powstawania małych hałd usypiskowych u podnóża ścian wąwozów, złożonych często na płatach śniegu. Ponadto powierzchnia drogi pod wpływem mrozowych ruchów gruntu traci swą zwięźłość. Ten materiał wynoszony jest w okresie roztopów. Największą koncentrację zawiesiny w drogach polnych zarejestrowano w czasie wezbrań roztopowych, które nastąpiły po okresie mroźnej zimy z grubą pokrywą śnieżną (np. luty 1978 r.). W kolejno następujących po sobie wezbraniach roztopowych i deszczowych przy podobnych przepływach



Ryc. 59. Związek między przepływem wody (Q) a koncentracją zawiesiny (C_s) podczas wezbrania deszczowego w dniach 8-13 maja 1978 r.

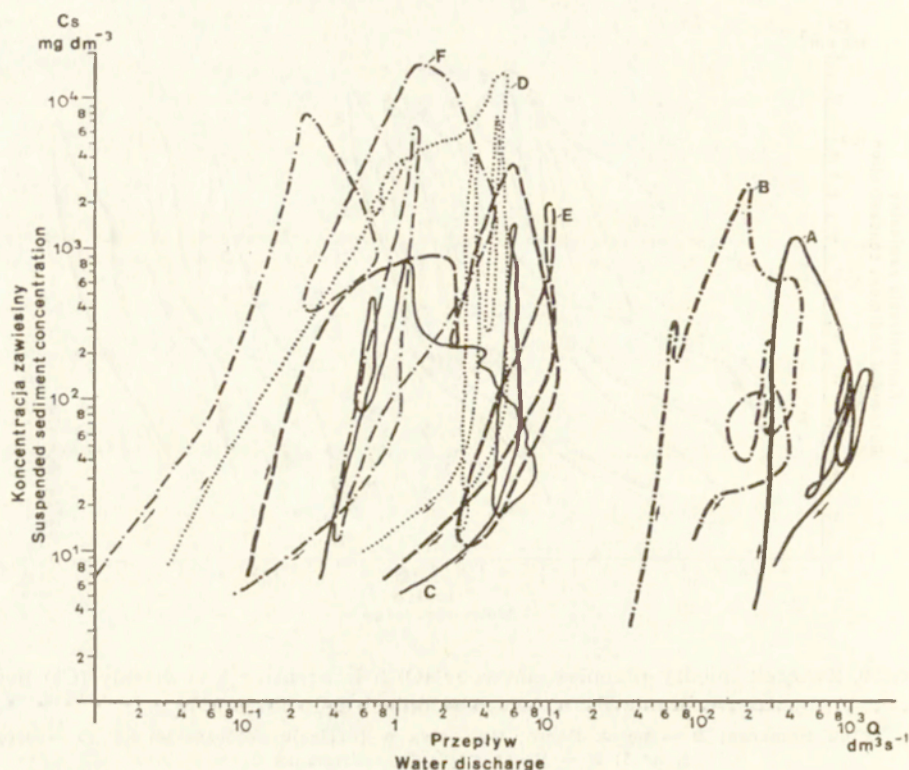
A — potok Homerka; B — potok Bączka; C — ciek w rozcięciu holocenijskim Z3; D — droga nr 1; E — droga nr 4; F — droga nr 5

Relation between water discharge (Q) and suspended sediment concentration (C_s) during high water stage due to rain lasted between 8 and 13 of May 1978

A — Homerka Stream; B — Bączka Stream; C — the stream drained a holocene hollow Z3; D — cart road no. 1; E — cart road no. 4; F — cart road no. 5

obserwowano coraz mniejszą koncentrację zawiesiny. Zatem ilość luźnych cząstek zwietrzelin na powierzchni drogi jest proporcjonalna do długości okresu międzywezbraniowego.

W okresach suszy, na skutek wysychania ścian wąwozów drogowych dochodzi do ich osypywania i tworzenia się u ich podnóży małych hałd usypiskowych, a na powierzchni drogi tworzy się warstwa luźnych pylastych cząstek. Toteż po długich okresach suszy, nawet podczas małych wezbrań, obserwowano wysoką koncentrację zawiesiny w drogach polnych. W czasie opadów następuje wyprzątanie luźnych cząstek zwietrzelin, a miejscami odsłania się zwięzła warstwa gruntu, ulegająca dodatkowo kompaktacji pod wpływem uderzeń kropli deszczu. Tworzy się też bruk, który chroni powierzchnię drogi przed wymywaniem i przemieszczaniem przez rozbryzg drobnych frakcji w czasie kolejnych opadów. Toteż analogicznie, jak w badanych potokach, każde wezbranie w drodze polnej charakteryzuje się indywidualnym przebiegiem związku między przepływem wody a koncentracją zawiesiny (ryc. 59, 60).



Ryc. 60. Związek między przepływem wody (Q) a koncentracją zawiesiny (C_s) podczas wezbrania deszczowego w dniach 24-27 maja 1978 r.

A — potok Homerka; B — potok Bącza; C — ciek w rozcięciu holocenijskim Z3; D — droga nr 1; E — droga nr 4; F — droga nr 5

Relation between water discharge (Q) and suspended sediment concentration (C_s) during high water stage due to rain lasting between 24 and 27 of May 1978

A' — Homerka Stream; B — Bącza Stream; C — the stream drained a holocene hollow Z3; D — cart road no. 1; E — cart road no. 4; F — cart road no. 5

Ilość luźnych cząstek zwietrzelin na powierzchni dróg polnych wzrasta również pod wpływem użytkowania drogi. Szczególnie w okresach suszy, u schyłku lata i w jesieni, podczas transportu płodów rolnych następuje rozkruszanie wierzchniej warstwy drogi przez koła wozów. Również ściąganie drzewa, przepędzanie bydła i owiec na pastwiska powoduje szybkie niszczenie ścian i dna wąwozów drogowych, ułatwiając dostawę zwietrzelin. Stare, głębokie wąwozy drogowe mają często bardziej łagodne zbocza, utrwalone przez krzewy i roślinność zielną (np. droga nr 4). Dno ich opancerzone jest ostrokrawędzistym rumoszem, który częściowo chroni przed wymywaniem drobnych frakcji. Przy podobnych przepływach koncentracja zawiesiny w takich drogach jest mniejsza niż w nowych.

W okresach opadów deszczu klastyczne zwietrzliny dostarczane systemem dróg ze stoku doświadczalnego do koryta potoku Homerka pochodziły w głównej mierze z samego wąwozu drogowego. Pewna część zwietrzelin splukiwanych na polach w okresach występowania spływu powierzchniowego dostarczana jest do dróg bezpośrednio lub poprzez system bruzd polnych. Należy podkreślić, że zarejestrowana wielkość koncentracji zawiesiny w bruzdach polnych była zawsze znacznie mniejsza niż w drogach (ryc. 54), co wskazuje, że przeważająca część materiału w tych okresach pochodzi z dróg. Należy również zwrócić uwagę, że czas trwania oraz częstotliwość występowania spływu powierzchniowego i splukiwania na polach są znacznie mniejsze niż spływu liniowego w drogach, który tworzy się w czasie niemal każdego opadu (Słupik 1981) i któremu towarzyszy wzrost koncentracji zawiesiny (Froehlich, Słupik 1980a, b).

Innym argumentem, przekonującym o decydującej roli samych dróg w dostawie klastycznych zwietrzelin do koryta, są wyniki porównawczych pomiarów transportu zawiesiny, wykonane w drogach gruntowych w źródłowej, zalesionej części zlewni potoku Homerka. W okresach występowania spływu powierzchniowego i splukiwania zarejestrowano tu podobne wartości parametrów transportu zwietrzelin w zawiesinie, jak w drogach polnych na stoku doświadczalnym. Należy podkreślić, że splukiwanie w obszarach leśnych regła dolnego jest bardzo małe (Gerlach 1976; Gil 1976). Toteż bezpośrednia dostawa zwietrzelin do dróg z powierzchni zalesionej może być pominięta. Zatem w obliczeniach denudacji jednostkowej w odniesieniu do dróg polnych dla przeważającej części roku można przyjąć, że powierzchnia zlewni drogi równa jest powierzchni samego jej wąwozu. Wówczas wskaźniki denudacji mechanicznej byłyby wielokrotnie wyższe i prawdopodobnie bliższe rzeczywistości.

Klastyczne zwietrzliny dostarczane systemem dróg polnych ze stoku doświadczalnego do koryta potoku Homerka stanowiły przeciętnie ponad 90% ładunku dostarczanego z całego stoku. Na podstawie szacunkowych obliczeń stwierdzono, że z dróg gruntowych dostarczane jest około 70-80% ładunku wynoszonego ze zlewni Homerki. Znacznie mniejszą rolę w dostawie odgrywa rozcięcie holocenijskie (tab. 5). Wiąże się to głównie z zadrzewieniem i brakiem dróg uchodzących bezpośrednio do koryta. Wielkość dostawy z pól w różnych częściach Beskidów uzależniona jest od kształtu stoków oraz wzajemnego układu działek polnych, bruzd i dróg. Bezpośrednia dostawa zwietrzelin z pól do dróg odbywa się zarówno bez, jak i przy udziale wody płynącej i wiąże się z procesami deflacji pokrywy śnieżnej i glebowej (fot. 13). Wielkość tej dostawy jest trudna do ilościowej oceny.

W okresach gwałtownych opadów z dróg gruntowych dostarczana jest do koryt również pewna część grubszych frakcji stanowiących 2-

Tabela 5. Dostawa zwietrzelin transportowanych w zawieszinie ze stoku doświadczalnego do koryta potoku Homerka na tle transportu w korycie podczas wezbrania 8-13 V 1979

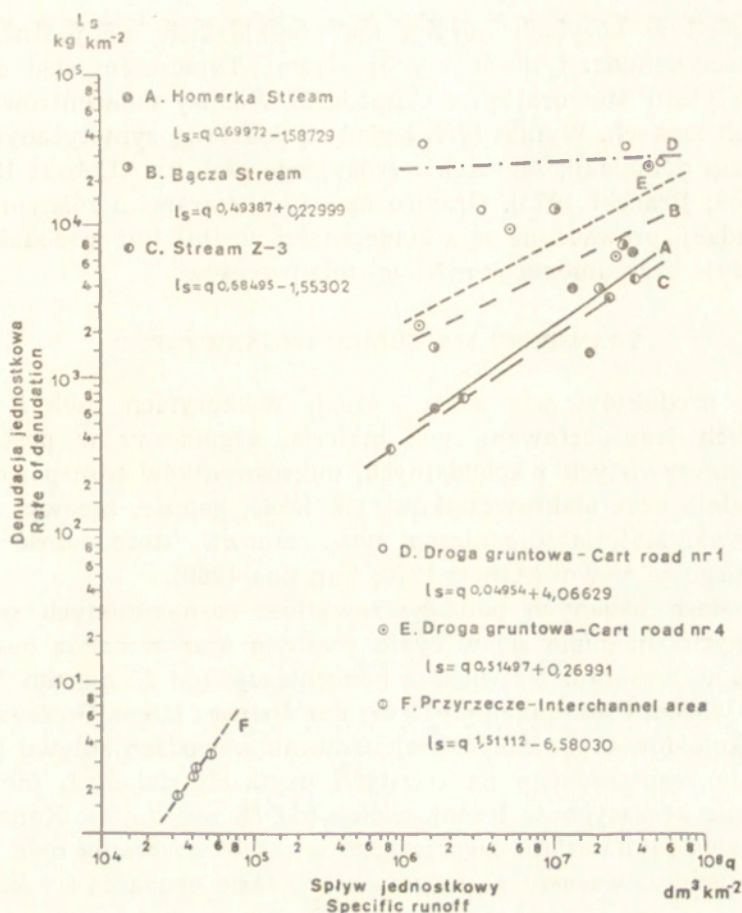
Delivery of sediment transported in suspension from the experimental slope to Homerka stream against a background of transport in stream channel during high water discharge between 8 and 13 of May, 1979

Przekrój hydrometryczny Hydrometrical cross-section	Przepływ Discharge Q_{\max} [dm ³ s ⁻¹]	Odpływ jednostkowy Specific runoff q_{\max} [dm ³ s ⁻¹ km ⁻²]	Ładunek materiału rozpuszczonego Load of total dis- solved solids L_d [kg]	Denudacja jednostkowa Rate of denuda- tion ld [kg km ⁻²]
Homerka (stream)	3473	248,1	95 124	5259,5
Bącza (stream)	845	213,9	31 195	4563,2
Droga (cart-road) nr 1	14,7	501,4	819,9	8904,4
Droga (cart-road) nr 4	27,5	463,6	1576,0	7426,0
Droga (cart-road) nr 5	3,0	67,0	190,2	958,1
Potok (stream) Z3	15,9	224,8	388,2	5415,1
Przyrzecze S1 (inter- channel area)	—	—	0,066	2,9
Przyrzecze S2 (inter- channel area)	—	—	0,062	1,4

80% ładunku klastycznych zwietrzelin. Materiał ten transportowany jest w korycie w postaci ładunku dennego. Podobnie jak w przypadku zawiesiny każda droga wykazuje indywidualne cechy w przebiegu i rozmiarach tego typu dostawy.

Przedstawiony mechanizm procesów dostawy klastycznych zwietrzelin ze stoku do koryta, podobnie jak w przypadku materiału rozpuszczonego, nawiązuje do kurczenia i ekspansji stref zasilania w wodę podczas wezbrań. Zatem za pomocą modelu zmiennych w czasie i przestrzeni źródeł i obszarów zasilania w wodę (Dunne, Black 1970; Słupik 1981) można objaśnić mechanizm dostawy klastycznych zwietrzelin ze stoków do koryt.

Współczesną cechą dostawy klastycznych zwietrzelin ze stoków do koryt w małych zlewniach Beskidu Sądeckiego jest zdecydowana przewaga dostawy liniowej nad bezpośrednią dostawą z obszarów przyrzeczy przy udziale spływu rozproszonego (ryc. 61). Wiadomo, że zamulanie zbiorników zaporowych odbywa się głównie przy udziale zwietrzelin transportowanych w zawieszinie (Jahn 1968; Cyberski 1969; Wiśniewski 1969). Toteż zmiana użytkowania ziemi, a w szczególności ograniczenie użytkowania istniejących dróg gruntowych, utwardzenie ich nawierzchni



Ryc. 61. Związki między splywem jednostkowym (q) a mechaniczną denudacją jednostkową (l_s) w zlewniach potoków Homerka i Bącza oraz zlewniach dróg polnych, rozcięciu holocenijskim i przyrzeczach na stoku doświadczalnym w Homrzychach

Relations between specific runoff (q) and rate of mechanical denudation (l_s) in catchment basin of Homerka and Bącza Streams, in cart roads watersheds, in holocene hollow watershed and in interchannel areas of the experimental slope at Homrzych village

i zaniechanie budowy nowych, przyczyni się do zmniejszenia dostawy klastycznych zwietrzelin do koryt, a zatem tempa sedymentacji zwietrzelin w misach zbiorników zaporowych. Dotyczy to również basenów sedymentacyjnych powyżej zapór przeciwrumowiskowych.

Dostawa klastycznych zwietrzelin ze stoków do koryt zależy od ich kształtu i szerokości dna doliny. W dużych dolinach o szerokim, płaskim dnie bezpośredni udział stoków w dostawie zamiera, a ich rolę przejmie dno doliny. Dlatego na podstawie ładunku zawiesiny trans-

portowanego w korytach dużych rzek beskidzkich nie można wnosić o wielkości denudacji mechanicznej zlewni. Tymczasem sieć obserwacyjna Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej skoncentrowana jest na dużych rzekach. Wyniki tych badań są podstawą syntetycznych opracowań map denudacji, zagrożenia erozyjnego gleb itp. (Dębski 1959; Reniger 1959; Brański 1975). Granice między obszarami o różnym natężeniu denudacji prowadzone są z konieczności wzdłuż linii wododziałów, co nie znajduje uzasadnienia w mechanizmie procesów.

TRANSPORT MATERIAŁU ORGANICZNEGO

Obok produktów wietrzenia i erozji w korytach rzek i potoków beskidzkich transportowany jest materiał organiczny w postaci roztworów rzeczywistych i koloidalnych, mikroszczątków transportowanych w zawiesinie oraz makroszczątków, jak liście, gałęzie, krzewy, a nawet całe drzewa. Materiał organiczny może stanowić istotną część ładunku wynoszonego ze zlewni (Arnett 1978; Van Zon 1980).

W wodach badanych potoków zawartość rozpuszczonych substancji organicznych zmieniała się w cyklu rocznym oraz w czasie poszczególnych typów wezbrań. Największą koncentrację (do 22 mg dm^{-3}) obserwowano wiosną i jesienią, a do 11 mg dm^{-3} zimą i latem. Szczególnie dużą ilość koloidów organicznych rejestrowano w wodach spływu powierzchniowego rozproszonego na trwałych użytkach zielonych (do 41 mg dm^{-3}) oraz krążących w leśnej ściółce (do 38 mg dm^{-3}). Koncentracja rozpuszczonego materiału organicznego w czasie wezbrania była o 5-25% większa podczas wzrostu przepływu niż w fazie opadania i sukcesywnie zmniejszała się w czasie kolejno następujących po sobie wezbrań. Rozpuszczony materiał organiczny stanowił przeciętnie 1-12% transportowanego ładunku materiału rozpuszczonego.

Zawartość rozpuszczonych związków organicznych, oznaczona metodą prażenia suchej pozostałości, jest nieco wyższa od rzeczywistej, ponieważ w temperaturze prażenia ulatnia się także pewna część azotanów i siarczanów (Hermanowicz i in. 1976). W wodach badanych zlewni udział tych jonów jest mały, zatem błąd oznaczenia jest niewielki.

Podczas niskich stanów wody materiał organiczny transportowany był głównie w postaci zawiesiny o koncentracji 1-8 mg dm^{-3} . Głównie stanowiły go szczątki obumarłych plech glonów zasiedlających koryto. W czasie wezbrań większa część materiału organicznego zawartego w zawiesinie była transportowana w początkowej fazie wzrostu przepływu. Świadczy to o dużej roli spływu powierzchniowego w dostawie.

W czasie opadania liści oraz zimą przy silnych wiatrach i braku pokrywy śnieżnej w korytach potoków obserwowano intensywny spływ liści. Miał on charakter „falowy”, co było spowodowane gromadzeniem się transportowanych liści na bystrzach, gdzie następowało spiętrzanie wo-

dy, a następnie gwałtowny spływ masy liści przesyconych wodą. Największy ładunek liści transportowany był w potoku Złotniańska Rzeka, którego znaczna część zlewni porośnięta jest przez lasy bukowe, oraz w potoku Bącza, gdzie wzdłuż dolnego biegu koryta ciągną się zarośla łęgowe. Toteż w korycie potoku Bącza główna faza transportu całych liści przypadała późną jesienią, podczas gdy w potoku Homerka największy ładunek szczątków liści był transportowany w późnej fazie roztopów, obejmujących zalesioną część zlewni Złotniańskiej Rzeki i dopływów Homerki. Szpilki drzew iglastych były transportowane w znacznie mniejszych ilościach. W okresie zimy i wiosennych roztopów były przenoszone głównie szczątki liści. Ich zawartość w transportowanej zawieszinie malała w czasie kolejnych wiosennych wezbrań roztopowych i deszczowych.

Pomiary natężenia transportu liści wykonywano za pomocą siatki plastikowej przegradzającej koryto. Przykładowo, jesienią (20 X 1978 r.) w korycie potoku Bącza przy przepływie $20,8 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$ w ciągu godziny transportowany ładunek liści wynosił 17,2 kg, natomiast w korycie potoku Homerka 37,8 kg podczas wezbrania roztopowego (28 II 1978 r.) przy przepływie $1057 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$.

O rozmiarach transportu szczątków organicznych świadczą również liczne, kilkucentymetrowe wkładki organiczne w postaci sprasowanych liści lub wkładki organiczno-mineralne w pylasto-ilastych aluwium złożonych w basenach sedymentacyjnych powyżej zapór przeciwrumowiskowych (Froehlich, Klimek 1979). W niektórych profilach zawartość substancji organicznych dochodzi do 35%. Wkładki organiczne występują również w osadach delty Dunajca w Zbiorniku Rożnowskim.

Podczas ekstremalnych powodzi w korytach potoków transportowane są często całe krzewy i drzewa, dostarczane z odcinków aktywnych podcięć brzegów porośniętych roślinnością łęgową, również z lasów reglowych w źródłowych partiach potoków. Transport ten jest szczególnie duży w dolnych odcinkach potoków i stanowi poważne zagrożenie dla mostów (fot. 14).

Po dużych wezbraniach w obrębie łóżysk powodziowych badanych potoków można wyróżnić dwie strefy wzmożonej akumulacji pni drzew i krzewów. W zalesionych źródłowych partiach potoków wąskie koryta barykadują gałęzie, krzewy i obalone drzewa. Powoduje to lokalne piętrzenie wody, a w powstałym plosie następuje sedymentacja transportowanego materiału, który uszczelnia powstałą „zapórę”. Tworzy się wyraźny próg, który obok wychodni skalnych daje charakterystyczny schodowy profil podłużny koryta w lejach źródłowych. Przy podwyższonych stanach wody na obrzeżeniu „zapory” aktywna erozja boczna prowadzi do poszerzania koryta, a w konsekwencji do zmniejszania stabilności zakotwiczonych pni i gałęzi. Przerwaniu zapory towarzyszy lokalny spływ dużych ilości rumowiska nagromadzonego w plosie oraz

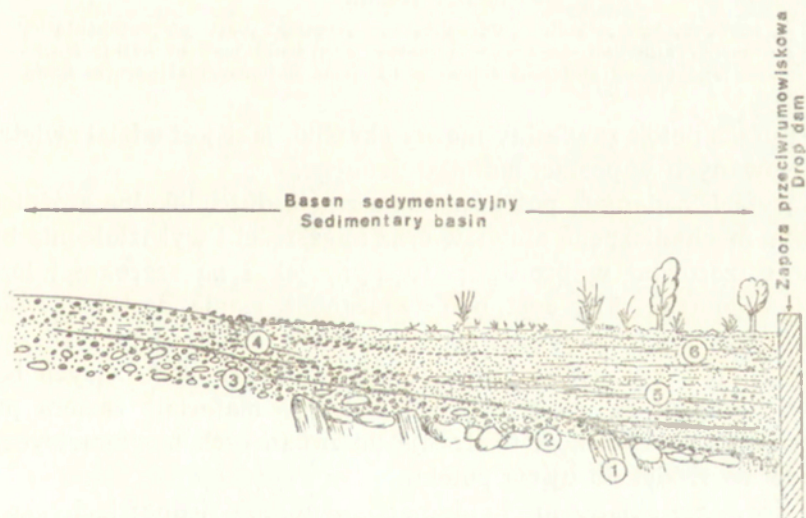
dostarczanego z brzegów koryta (por. Keller, Swanson 1979). Kolejne ustabilizowanie się transportowanego materiału rozpoczyna proces od nowa.

Drugim obszarem zakotwiczania się transportowanych drzew i krzewów są ujściowe odcinki aluwialnych koryt, często o charakterze roztokowym. Prowadzi to do zmniejszania przekroju łóżyska wielkiej wody i daje impuls do poszerzania i przerzucania koryt. Po gwałtownych wezbraniach ilość drzew i krzewów bywa tak duża, że pokrywają one prawie całe dno łóżyska powodziowego, wymuszając sedymentację transportowanego ładunku dennego w osi łóżyska, co przyczynia się do gwałtownego poszerzania łóżyska i powstawania szybko wecinających się koryt obwodowych na jego obrzeżeniu.

TRANSPORT ŁADUNKU DENNEGO

CECHY ALUWIÓW KORYTOWYCH

Skład mechaniczny rumowiska transportowanego w korytach małych zlewni beskidzkich można prześledzić w basenach sedymentacyjnych powyżej zapór przeciwrumowiskowych (ryc. 62, 63). Poprzez stałą obserwację przyrostu objętości aluwii w basenie oraz na podstawie struktur sedymentacyjnych złożonych aluwii i składu mechanicznego transpor-

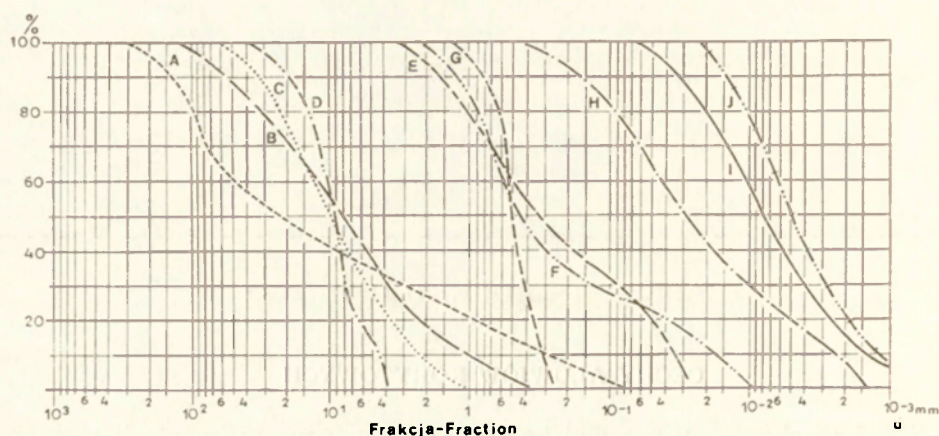


Ryc. 62. Struktura osadów wypełniających basen sedymentacyjny powyżej zapory przeciwrumowiskowej w korycie potoku Homerka

- 1 — cokół fliszowy; 2 — glazowo-żwirowe aluwia korytowe z okresu przed budową zapory;
 3 — żwirowo-piaszczyste aluwia złożone podczas powodzi w 1973 r.; 4 — żwirowo-piaszczyste aluwia złożone podczas powodzi w 1974 r.; 5 — soczewki osadów organiczno-mineralnych;
 6 — aluwia pylasto-ilaste

Structure of alluvium deposited upstream the drop dam across Homerka Stream

- 1 — flysch bedrock; 2 — coarse gravelly alluvium deposited before built up drop dam;
 3 — sandy-gravelly alluvium deposited during flood in 1973; 4 — sandy-gravelly alluvium deposited during flood in 1974; 5 — lenses of organic and mineral deposits; 6 — silty-clayey alluvium



Ryc. 63. Skład mechaniczny aluwium w basenie sedimentacyjnym powyżej zapory przeciwrumowiskowej w korycie potoku Homerka

A,B,C,D — zwirowo-piaszczyste aluwia w proksymalnej części basenu; E,F,G — piaszczysto-pyłaste aluwia w środkowej i dystalnej części basenu; H,I,J — pylasto-ilaste i ilaste aluwia dystalnej oraz brzeżnej części basenu

Mechanical composition of alluvium deposited upstream the drop dam across Homerka Stream

A,B,C,D — sandy-gravelly alluvium deposited in proximal part of sedimentation basin; E,F,G — sandy-silty alluvium deposited in middle and distal part of basin; H,I,J — silty-clayey and clayey alluvium deposited in distal and marginal part of basin

towanej przez potok zawiesiny można określić, jaki jest udział zwietrzelin transportowanych w postaci ładunku dennego.

W korytach badanych potoków zaznacza się duże, lokalne zróżnicowanie składu mechanicznego aluwium oraz miąższości i wykształcenia bruku erozyjnego, zarówno w profilu podłużnym jak i na szerokości łóżyska powodziowego (ryc. 37). Jest ono związane z ciągłą dostawą świeżego ostrokrawędzistego rumowiska pochodzącego z erozji cokołu fliszowego w korycie oraz z bocznych dolin i dróg gruntowych uchodzących bezpośrednio do koryta. Ta ciągła dostawa świeżego materiału zaciera proces „dojrzwiania” rumowiska i tendencję do zmian cech morfometrycznych otoczków od źródeł do ujścia potoku.

Zróżnicowanie składu mechanicznego w obrębie jednej łachy korytowej jest często takie same, jak zróżnicowanie w całym profilu podłużnym koryta. Zatem stosowana przez hydrotechników metoda oceny składu mechanicznego aluwium korytowych potoków beskidzkich na podstawie analizy pojedynczej standardowej próby jest niewystarczająca. Toteż konieczne jest opracowanie metod poboru prób aluwium i statystyczna ocena wielkości próby potrzebnej do analiz (por. Słota 1972).

Zróżnicowanie mechanizmu transportu ładunku dennego i warunków dostawy zwietrzelin w czasie różnych typów wezbrań znajduje swoje odbicie w strukturze i składzie mechanicznym aluwium korytowych. W ko-

rycie potoku Homerka aluwia złożone w czasie długotrwałych wezbrań roztopowych i letnich wezbrań deszczowych, wywołanych opadami rozlewnymi, charakteryzowały się stabilnymi brukami erozyjnymi o dobrze wyrażonej imbrykacji i lepszym wysortowaniu materiału. Aluwia złożone w czasie krótkotrwałych wezbrań wywołanych gwałtownymi ulewami były mniej stabilne i wykazywały duży udział drobnoziarnistych frakcji. Wskazuje to na gwałtowny i krótki transport przy dużej mętności w warstwie przydennej. W obrębie dna koryta obserwowano również strefy dobrze wysortowanych aluviów złożonych w postaci „cieni” za głazami lub innymi przeszkodami oraz pylasto-ilaste aluwia składane w czasie niskich i średnich stanów wody w miejscach zaprądowych (ryc. 37).

Opisane zróżnicowanie aluviów jest dobrze widoczne w osadach stożków złożonych u wylotu małych bocznych dolin uchodzących do doliny Kamienicy Nawojowskiej. W budowie niskich pokryw akumulacyjnych przeważają tu gładowo-żwirowe aluwia z dużą domieszką frakcji pylastych (fot. 15). Natomiast w dolinie Kamienicy Nawojowskiej są one lepiej wysortowane. Sugeruje to, że w małych zlewniach pokrywy akumulacyjne składane są głównie w czasie gwałtownych wezbrań wywołanych ulewami, przy dużej koncentracji w zawiesinie klastycznych zwietrzelin dostarczanych bezpośrednio do koryt z dróg polnych. Z uwagi na lokalny zasięg ulew wezbrania tego typu nie odgrywają większej roli morfogenetycznej w zlewni Kamienicy Nawojowskiej. Lepiej wysortowane aluwia Kamienicy Nawojowskiej wskazują, że były składane głównie w czasie powodzi wywołanych opadami rozlewnymi.

Daje się zauważyć ogólną prawidłowość, że ze wzrostem powierzchni zlewni wzrasta udział aluviów składanych w czasie powodzi wywołanych opadami rozlewnymi. Potwierdza to koncepcję Starkla (1979), że podczas gwałtownych ulew modelowane są głównie stoki i dna dolin w małych zlewniach beskidzkich, a w czasie powodzi, wywołanych opadami rozlewnymi, dna dużych dolin beskidzkich.

MECHANIZM TRANSPORTU ŁADUNKU DENNEGO W CZASIE WEZBRAŃ

Duże prędkości wody podczas wezbrań w rzekach górskich utrudniają przeprowadzenie bezpośrednich pomiarów transportu ładunku dennego. Dotychczas nie opracowano standardowych metod badań tego procesu w rzekach górskich (Hubbell 1964).

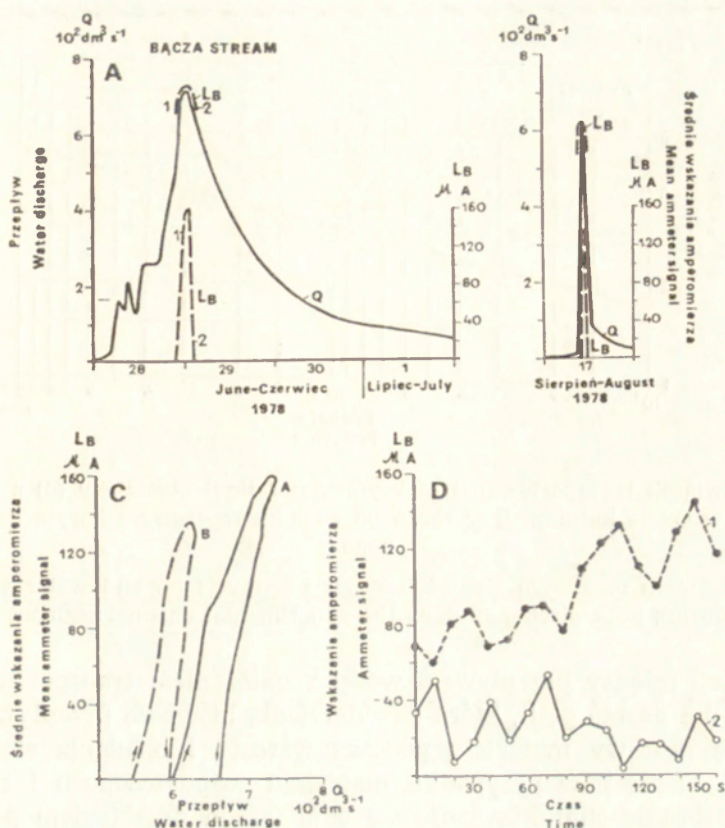
W rzekach i potokach beskidzkich pośrednie pomiary transportu ładunku dennego były prowadzone w różnych okresach, przy zastosowaniu metod o różnej dokładności, co uniemożliwia porównanie wyników. Pochodzą one z pomiarów: objętości „świeżych” łach żwirowych po wezbraniach (Prochal 1960; Ziętara 1968), objętości aluviów w basenach sedy-

mentacyjnych powyżej zapór przeciwrumowiskowych (Pietruszewski 1955; Reniger 1955; Bartnik, Gładki 1972; Prochal 1973) lub w zbiornikach zaporowych (Cyberski 1969; Brański 1971; Wiśniewski 1972) oraz danych szacunkowych (Niemirowski 1974) i obliczeń empirycznych (Pietruszewski 1955). Brak dokładnych danych dotyczących transportu ładunku dennego jest głównym źródłem błędów popełnianych przy projektowaniu regulacji koryt rzek i potoków beskidzkich.

Transport poszczególnych frakcji rumowiska dennego badany był metodą znaczonych kolorową emalią otaczaków (Dobija i in. 1970; Kaszowski 1973; Niemirowski 1974; Dudziak 1975; Froehlich 1975). Ponadto objaśniają go studia nad petrograficznymi i sedymentologicznymi cechami aluwii rzek karpackich (Unrug 1957; Bobrowski 1962; Nawara 1964, 1965; Rutkowski 1977).

Powszechnie uważa się, że w rzekach i potokach beskidzkich ładunek denny stanowią frakcje zwirowo-głazowe. Są one transportowane wyłącznie podczas dużych wezbrań. Tymczasem w zlewni Homerki stwierdzono, że w czasie mniejszych wezbrań ładunek denny stanowią frakcje piaszczysto-pylaste. Pochodzą one głównie z dróg polnych, gdzie transportowane są zarówno w postaci zawiesiny, jak i ładunku dennego. Natomiast frakcje zwirowe ładunku dennego transportowane były po przekroczeniu ok. $180 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ (ryc. 5, 6). Tej wielkości spływy jednostkowe występują niemal każdego roku. Przeciętnie co dwa lata mają miejsce wezbrania, które wywołują transport wszystkich frakcji rumowiska dennego.

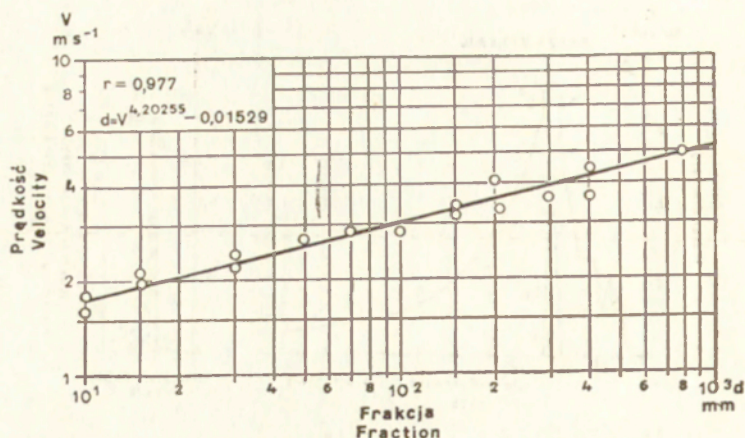
Transport ładunku dennego rozpoczyna się przed kulminacją wezbrania i trwa ze zmiennym natężeniem do momentu wyraźnego opadania przepływu (ryc. 64). W początkowej fazie wzrostu przepływu transportowane są piaszczysto-pylaste frakcje złożone w miejscach zaprądowych oraz dostarczane z dróg polnych. Dalszy wzrost prędkości wody w korycie powoduje ruch niestabilnego zwirowego rumowiska dennego, a następnie powszechny transport na całej szerokości koryta. Ze względu na zróżnicowanie składu mechanicznego aluwii korytowych i stabilności poszczególnych otoczaków transport ładunku dennego w poszczególnych odcinkach koryta rozpoczyna się w różnym czasie. Podlega on pulsacji związanej głównie z nierównomierną dostawą, wynikającą z rozmieszczenia form akumulacyjnych w korycie, i zmiennym natężeniem dostawy produktów erozji (ryc. 64). Największe natężenie transportu ładunku dennego przypada tuż przed lub w czasie kulminacji przepływu. W czasie opadania stanu wody na wielu odcinkach koryt akumulacyjnych transport ładunku dennego wiąże się z rozcinaniem form akumulacyjnych pod wpływem przejścia przepływu podkrytycznego w nadkrytyczny na bystrzach u czoła łach centralnych (Froehlich i in. 1972; Klimek 1972). Transportowane są wówczas głównie frakcje drobnych żwirów i grubych piasków, co wiąże się również z tworzeniem bruków erozyjnych w korycie.



Ryc. 64. Przeływ wody (Q) i wskazania amperomierza detektora akustycznego (L_B) w korycie potoku Bącza w czasie wezbrań: A — wywołanych opadem rozlewnym; B — wywołanych ulewą; C — związek między przepływem wody (Q) a średnimi wskazaniem amperomierza detektora akustycznego (L_B); D — pulsacja wskazań amperomierza w czasie wzrostu i opadania fali wezbrania wywołanego deszczem rozlewnym (A)

Water discharge (Q) and ammeter signal of acoustic detector (L_B) in channel of Bącza Stream during high water stages caused by: A — continuous rain lasting several days; B — short heavy rain; C — relation between water discharge (Q) and mean ammeter signal of acoustic detector (L_B); D — pulsation of ammeter signal during rising and falling limb of hydrograph creating by continuous rain

Związek między prędkością wody a transportem poszczególnych frakcji rumowiska dennego ma postać zależności krzywoliniowej, różnej dla poszczególnych odcinków koryta. Wynika to z różnic spadku, rzeźby dna koryta oraz wiąże się z cechami morfometrycznymi poszczególnych okruców. Istotną rolę odgrywa również głębokość koryta, temperatura wody i koncentracja zawiesiny. Na rycinie 65 przedstawiono zależności między prędkością wody a transportem otoczków spoczywających w osi nurtu w reperowym przekroju koryta doświadczalnego.



Ryc. 65. Związek transportowanej maksymalnej frakcji otoczków (d) z prędkością wody (V) w czasie kulminacji wezbrań na odcinku reperowym koryta doświadczalnego

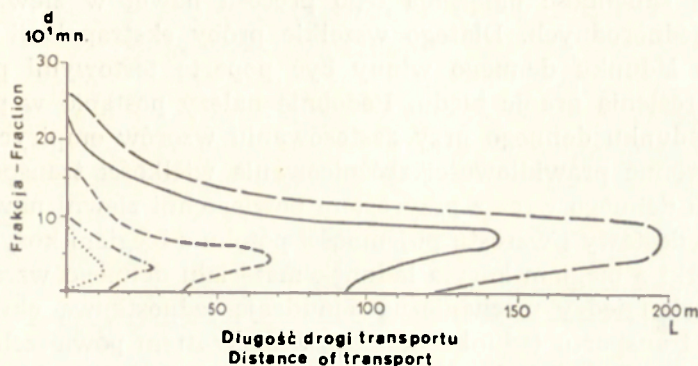
Relation between maximum size of transported gravels (d) and water velocity (V) during peak discharge along the experimental channel segment

Związek między przepływem wody a natężeniem transportu ładunku dennego ma postać pętli, która odzwierciedla histerezę przepływu i różnicowanie dostawy materiału podczas wzrostu i opadania stanu wody (ryc. 64). Tak jak w przypadku materiału rozpuszczonego i zawiesiny, każde wezbranie charakteryzuje się odmiennym przebiegiem pętli. Przy podobnych przepływach w różnych typach wezbrań zaznaczają się wyraźne różnice w natężeniu transportu, nawiązujące głównie do gwałtowności wzrostu przepływu, charakteru poprzedniego wezbrania i długości okresu międzywezbraniowego. Stwierdzono, że po długim okresie bez większych wezbrań transportowany jest znacznie większy ładunek denny, niż w kolejno po sobie następujących wezbraniach.

Podobnej wielkości wezbrania roztopowe i deszczowe, wywołane opadami rozlewnymi, przenoszą znacznie większe ładunki materiału dennego, niż gwałtowne wezbrania wywołane ulewami o dużym natężeniu. W czasie wezbrań wywołanych gwałtownymi ulewami z powodu dużej koncentracji zawiesiny, zwiększającej lepkość ośrodka transportu, kompetencja potoku jest na ogół znacznie większa, niż w czasie wezbrań wywołanych opadami rozlewnymi. Podczas takich wezbrań w korytach potoków Homerka i Bącza obserwowano przemieszczanie się wału wodnego o koncentracji zawiesiny przekraczającej $10\,000\text{ mg dm}^{-3}$, transportującego nawet wielkie glazy i dużą ilość makroszczątków organicznych.

Głazowo-zwirowe aluwia korytowe potoków beskidzkich charakteryzują się lokalnie zróżnicowaną stabilnością. Toteż podobne frakcje rumowiska dennego położone w różnych punktach koryta uruchamiane są przy nieco innych warunkach hydrodynamicznych. Ta sama frakcja znaczących

otoczków wprowadzona na całej szerokości koryta była przemieszczana na różną odległość (por. Dobija i in. 1970; Kaszowski 1973; Froehlich 1975; Krzemień 1976). Zjawisko to obserwowano głównie w czasie wezbrań, podczas których zachodził jedynie transport poszczególnych okruczków rumowiska dennego. Zróżnicowanie długości drogi przebywanej przez poszczególne otoczaki (ryc. 66) wiąże się z liniami prądowymi i ze strefami martwymi w korycie. Odległość przemieszczania niektórych otoczków nawet w czasie wielkich wezbrań jest stosunkowo mała. Na krót-



Ryc. 66. Maksymalne odległości przemieszczania poszczególnych frakcji otoczków znaczonych kolorową emalią w korycie doświadczalnym podczas wezbrania deszczowego w dniach 8-10 sierpnia 1976 r.

Maximum transport distance of particular sizes of painted gravels in the experimental channel segment during high water stage due to rain lasted between 8 and 10 of August 1976

kim dystansie są one przemieszczane w kierunku brzegu koryta i osiągają stabilne położenie (Kaszowski 1973; Krzemień 1976).

W akumulacyjnych, a szczególnie roztokowych odcinkach koryta kierunek transportu poszczególnych otoczków w czasie wezbrania ulega często wielokrotnym zmianom w zależności od migracji osi koryta. Położenie niektórych otoczków po wezbraniu wskazywało na transport poprzeczny w stosunku do osi pierwotnego koryta. Świadczy to o lokalnym „przerabianiu” aluwii w korytach roztokowych i powolnym ich transporcie z biegiem koryta (por. Klimek 1972; Froehlich 1975).

Podobnie jak długość i szerokość strefy transportu, również miąższość warstwy uruchamianych aluwii korytowych wykazuje lokalne zróżnicowanie. Stwierdzono, że jest ona wprost proporcjonalna do wielkości wezbrania i czasu trwania transportu ładunku dennego. W skalno-aluwialnych odcinkach koryta potoku Homerka nie przekraczała ona na ogół kilkunastu centymetrów. Maksymalną wartość 1,2 m stwierdzono metodą „łańcucha” w aluwialnym odcinku koryta Kamienicy Nawojowskiej we Frycowej po powodzi w 1973 roku.

Na podstawie pomiarów transportu ładunku dennego w korytach małych zalesionych zlewni (0,16-0,29 km²) położonych w źródłowej części zlewni potoku Homerka stwierdzono, że związek między powierzchnią zlewni a wielkością transportowanego ładunku jest bardzo słaby (współczynnik korelacji poniżej 0,68). Różnice w denudacji jednostkowej wynosiły ponad 35%, pomimo że cechy środowiska położonych obok siebie zlewni są bardzo podobne. Podobne różnice stwierdzono również przy porównaniach wyników z potoków Homerka i Bącza. Wskazuje to na dużą lokalną zmienność natężenia tego procesu nawet w zlewniach stosunkowo jednorodnych. Dlatego wszelkie próby ekstrapolacji natężenia transportu ładunku dennego winny być poparte testowymi pomiarami w celu określenia granic błędu. Podobnie należy postąpić w przypadku obliczeń ładunku dennego przy zastosowaniu wzorów empirycznych.

Przestrzenne prawidłowości zróżnicowania wielkości transportowanego ładunku dennego wraz z przyrostem powierzchni zlewni nawiązują do warunków dostawy i wzrostu pojemności potoku z biegiem koryta. W zlewni Homerki z biegiem koryta ładunek materiału dennego wzrasta liniowo. Związek między mechaniczną denudacją jednostkową określoną na podstawie transportu ładunku dennego a przyrostem powierzchni zlewni ma charakter krzywoliniowy. Zatem wartość wskaźnika denudacji jednostkowej zależy od położenia przekroju pomiarowego.

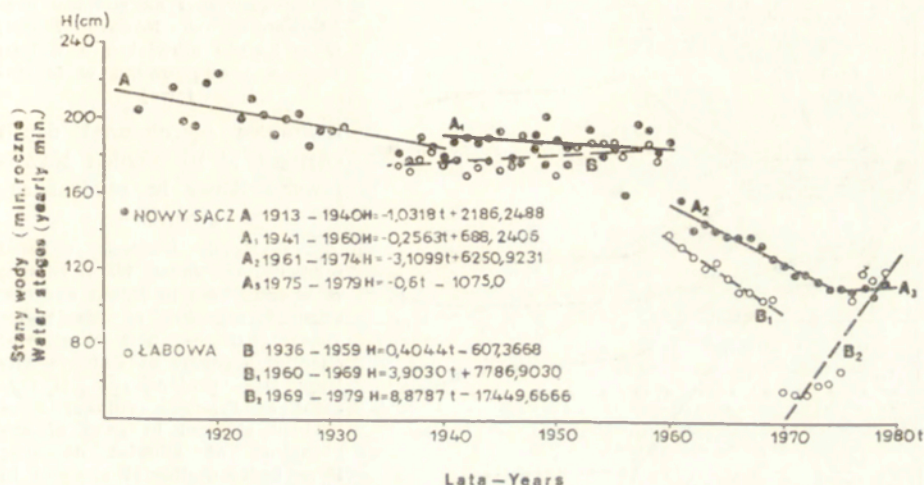
Natężenie transportu ładunku dennego w zlewniach beskidzkich należy wiązać z wielkością zlewni i gęstością naturalnych i sztucznych rozcięć prowadzących wodę, bowiem współczesna dostawa klastycznych zwietrzelin transportowanych w postaci ładunku dennego ma przeważnie charakter liniowy.

Transport ładunku dennego trwa przeciętnie mniej niż 1% roku (ryc. 48). Stanowi on 1 do 12% rocznego ładunku zawiesiny. Uwzględniając piaszczysto-pylaste frakcje transportowane w postaci ładunku dennego w czasie mniejszych wezbrań, jego wielkość można oceniać na 3-16% ładunku zawiesiny. Pomimo stosunkowo małego udziału tego typu transportu w wynoszeniu ładunku klastycznych zwietrzelin, odgrywa on główną rolę w procesach transformacji koryt i łóżysk powodziowych rzek i potoków beskidzkich.

DOSTAWA RUMOWISKA Z KORYTA W ŚWIETLE NATĘŻENIA EROZJI

Głównym źródłem dostawy rumowiska transportowanego w postaci ładunku dennego są aluwia korytowe i pozakorytowe oraz erodowany cokół fliszowy w korycie. Duże spadki podłużne koryt badanych potoków przy stosunkowo niewielkiej ich szerokości powodują duże prędkości wody podczas wezbrań. Przy małej odporności skał fliszowych stwarza to potencjalne warunki silnej erozji wgłębnej.

W wieloletnim natężeniu erozji wgłębnej można oceniać na podstawie trendu zmian minimalnych rocznych stanów wody (Osuch 1968; Klimek 1974a; Froehlich 1975, 1980; Soja 1977). Analiza trendu zmian minimalnych rocznych stanów wody w przekrojach hydrometrycznych Kamienicy Nawojowskiej w ciągu ostatnich siedemdziesięciu lat pozwala na wyróżnienie trzech okresów wyraźnie różniących się między sobą natężeniem erozji wgłębnej (ryc. 67). Okresy wzmożonej erozji następują po okresach jej osłabienia, a nawet tendencji do powolnej agradacji. Trend

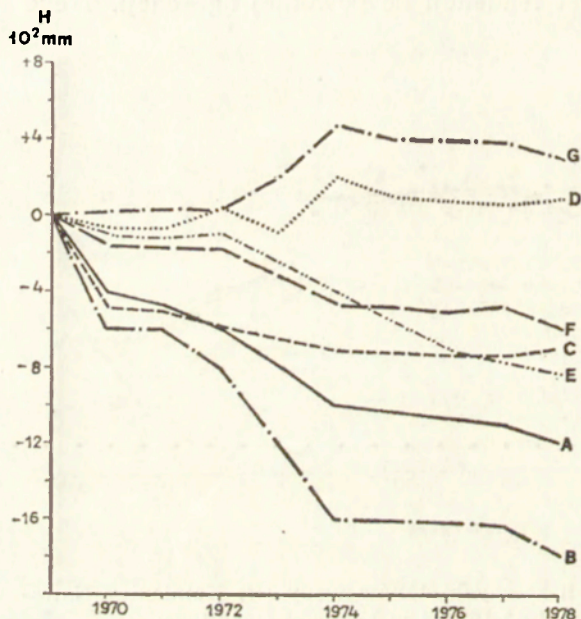


Ryc. 67. Trendy zmian minimalnych rocznych stanów wody (H) Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu (1913-1979) i w Łabowej (1936-1979)

Trends of changes of minimum annual water stages (H) in Kamienica Nawojowska River at Nowy Sącz (1913-1979) and Łabowa (1936-1979)

długookresowych zmian dna na danym odcinku koryta odzwierciedla prawdopodobnie sinusoida. Znajduje to częściowo potwierdzenie w zarejestrowanych zmianach dna koryta na różnych odcinkach (ryc. 68). Wiąże się one zarówno z naturalnym procesem ewolucji profilu podłużnego, jak i z wpływem działalności człowieka. Holocenska tendencja do rozcinania den dolin beskidzkich (Starkel 1960) jest wyraźnie widoczna w procesie kształtowania koryt. Świadczy o niej malejąca w górę rzeki głębokość rozcięcia cokołu skalnego oraz zmniejszenie się szerokości teras holocenskich. Czynnikiem wzrostu natężenia erozji wgłębnej w ostatnim stuleciu są: eksploatacja aluwii, regulacja koryt i zmiany użytkowania ziemi w zlewni (Osuch 1968; Klimek 1974a; Klimek, Starkel 1974; Froehlich 1975, 1980; Soja 1977).

Proces pogłębiania przebiega ze zmiennym natężeniem na całej długości koryta (ryc. 68). Największe wartości pogłębiania, sięgające 40-50 cm, zanotowano w latach 1970-1975 w uregulowanym odcinku koryta



Ryc. 68. Przykłady zmian głębokości koryta Kamienicy Nawojowskiej na różnych odcinkach

A — koryto skalne w Nowej Wsi; B — kocioł eworsyjny na odcinku skalnego koryta w Maciejowej; C — koryto skalno-aluwialne w Łabowej; D — koryto roztokowe we Frycowej; E — koryto roztokowe w strefie eksploatacji aluwii; F — koryto skalno-aluwialne na odcinku uregulowanym w Nowym Sączu; G — koryto aluwialne u wylotu odcinka przełomowego w Maciejowej

Examples of channel depth changes of Kamienica Nawojowska River in several segments

A — flysch bedrock channel segment at Nowa Wieś village; B — eddy hole in flysch bedrock channel segment at Maciejowa village; C — bedrock-alluvial channel segment at Łabowa village; D — braided channel segment at Frycowa village; E — braided channel in zone of exploitation of alluvial deposits; F — bedrock-alluvial channel in regulated river segment at Nowy Sącz; G — alluvial channel in outlet of gorge river segment at Maciejowa village

Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu. W tych latach występowały często duże wezbrania. Rozcięcia koryta sięgające 30-40 cm występowały powyżej miejsc intensywnej eksploatacji aluwii z koryta i łóżyska powodziowego. Nadmierna eksploatacja jest często impulsem wyzwalającym erozję wsteczną (a niekiedy bezpośrednią przyczyną pogłębiania) i prowadzi do zmian funkcji odcinka koryta z akumulacyjnego na erozyjny. Typowym przykładem takiego odcinka jest koryto Kamienicy Nawojowskiej między Nawojową i Zawadą, gdzie pokrywa aluwialna została wyeksploatowana i odsłonił się cokół fliszowy, obecnie rozcinany. Eksploatacja aluwii w odcinkach roztokowych prowadzi niekiedy do wcinania się całego systemu koryt i ich stabilizacji w planie. Natomiast w nie zaburzonych eksploatacją odcinkach tego typu koryt obserwowano tendencję do agradacji bądź dynamicznej równowagi (ryc. 68).

W górnym biegu rzeki pogłębianie zachodzi w litej skale i odbywa się z prędkością 2-5 cm/rok. Lokalnie wycięte kotły eworsyjne osiągały nawet 1,4 m. Podobne tempo pogłębiania rejestrowano w korytach dopły-

wów Kamienicy Nawojowskiej, niezależnie od różnic w sposobie użytkowania ziemi.

Obok długookresowej tendencji do pogłębiania koryta, w krótkich okresach (np. kolejne wielkie wezbrania) procesy erozji i akumulacji zachodzą niemal równocześnie na tym samym odcinku koryta (por. Niemirowski 1974). Wiąże się to z wycinaniem nowych i zasypywaniem starych kotłów lub rynien erozyjnych. Utrudnia to ilościową ocenę bezpośredniej dostawy świeżego materiału z koryta. Istotnym czynnikiem, wpływającym na natężenie dostawy świeżego nieobtoczonego rumoszu pochodzącego z erozji cokołu skalnego w korycie, jest przebieg osi koryta w stosunku do kierunku struktur geologicznych. Poprzeczny bieg warstw w stosunku do osi koryta ułatwia dostawę materiału (Froehlich 1975). W okresie badań ubytki cokołu skalnego na dziesięciometrowym odcinku koryta doświadczalnego wynosiły 0,8-2,9 m³, a maksymalne wartości pogłębiania (do 95 cm) zarejestrowano w pobliżu budowli regulacyjnych. Przeciętne obniżenie dna osiągnęło 15-20 cm.

Pogłębianie koryta prowadzi do zwiększenia jego pojemności przy równoczesnym ograniczeniu zasięgu łóżyska powodziowego. Kolejne, nawet coraz większe przepływy mieszczą się w korycie. Powoduje to wzrost koncentracji energii, która wyzwala tendencję do ciągłej erozji wgłębnej. Wzrost pojemności koryta i koncentracja energii zwiększają pojemność transportową i kompetencję potoku w czasie wezbrań, co przy dużej dostawie rumowiska pochodzącego z erozji koryta jest przyczyną wzrostu natężenia transportu ładunku dennego. Na wielu odcinkach koryt nadmierna eksploatacja aluwii powoduje zwiększenie pojemności koryta bez udziału wody płynącej. Tam na ogół zaznacza się „niedobór” rumowiska do transportu dennego i nadwyżki energii w czasie wezbrań przyspieszają tempo pogłębiania koryta (Osuch 1968; Klimek 1974a; Froehlich 1975, 1980).

Powiększanie pojemności koryta wskutek pogłębiania prowadzi do wzrostu wysokości względnej równiny zalewowej, która jest coraz rzadziej zalewana i nadbudowywana facją pozakorytową w czasie kolejnych powodzi. Z czasem zasięg łóżyska powodziowego pokrywa się z przebiegiem koryta. Toteż współcześnie coraz większa część ładunku klastycznych zwietrzelin transportowanych podczas powodzi w zawieszynie nie ulega sedymentacji na terasach zalewowych. Jest wynoszona daleko na przedpole gór bądź ulega sedymentacji w zbiornikach zaporowych przyczyniając się do ich szybkiego zamulania. Na przedpolu Karpat zachodzi współcześnie bardzo szybkie nadbudowanie równin zalewowych, głównie poprzez sedymentację zawiesiny (Klimek 1974b).

Bezpośrednia dostawa materiału z koryta, bez udziału erozji, jest następstwem cofania się brzegów aktywnych podcięć poprzez odpadanie, osypywanie i osuwanie. Procesy te, podobnie jak w drogach polnych, są bardziej aktywne zimą niż w cieplej porze roku. Zachodzą one głównie

pod wpływem działania lodu włóknistego, zamarzającej wody, wysychania i rozbryzgu gleby (fot. 16). Natężenie tej dostawy wykazuje duże lokalne zróżnicowanie. W ciągu 1978 roku tego typu dostawa zwietrzelin w obrębie aktywnych podcięć koryta doświadczalnego wynosiła $3-24 \text{ kg m}^{-1}$, a w korycie potoku Bącza $1-38 \text{ kg m}^{-1}$. Cofanie brzegów aktywnych podcięć w latach bez wielkich wezbrań zachodzi głównie w okresie zimy.

KSZTAŁTOWANIE TRANSPORTU FLUWIALNEGO I DOSTAWY ZWIETRZELIN DO KORYT W ZLEWNIACH BESKIDZKICH

Produkty wietrzenia i erozji są wynoszone ze zlewni beskidzkich głównie w postaci materiału rozpuszczonego i zawiesiny. Ładunek denny stanowi zaledwie kilka procent wynoszonej masy (ryc. 48). Przeważająca część materiału jest transportowana w czasie wezbrań, przy czym największe ładunki przenoszone są w czasie powodzi. W przekroju wieloletnim zaznacza się przewaga w wynoszeniu ładunku klastycznych zwietrzelin nad ładunkiem materiału rozpuszczonego. Tylko w latach bez wielkich wezbrań ładunek materiału rozpuszczonego może być większy od ładunku klastycznych zwietrzelin (Froehlich 1975).

Natężenie transportu fluwialnego zależy od typu wezbrania. Znajduje to odzwierciedlenie w zróżnicowanym kształcie pętli opisujących związki między przepływem wody a parametrami transportu zwietrzelin. Charakter zależności wiąże się ze zjawiskiem histerezy i zróżnicowaniem dostawy zwietrzelin w czasie wzrostu i zmniejszania się przepływu. Wąskie pętle są charakterystyczne dla transportu materiału rozpuszczonego (ryc. 12, 14, 16, 18) i dennego (ryc. 64), a szerokie dla transportu zawiesiny (ryc. 43, 44, 46, 50, 59, 60). Świadczy to o dużym zróżnicowaniu dostawy klastycznych zwietrzelin transportowanych w zawiesinie, które dostarczane są prawie wyłącznie w fazie wzrostu przepływu. Przy podobnych przepływach, kolejne, szybko następujące po sobie wezbrania charakteryzują się coraz mniejszą koncentracją materiału rozpuszczonego i zawiesiny. Wiąże się to z okresowym zmniejszeniem się możliwych do uruchomienia „zasobów” produktów wietrzenia w obrębie tych samych obszarów zasilania odpływu. Ze względu na gwałtowną zmienność koncentracji zawiesiny w czasie wezbrań i brak prostego związku między przepływem wody a koncentracją zawiesiny, konieczna jest duża częstotliwość pomiarów w celu dokładnego określenia transportowanego ładunku (Froehlich 1975).

Prawidłowości przestrzennego zróżnicowania parametrów transportu fluwialnego nawiązują do typu zlewni. W zlewniach symetrycznych charakterystyczny jest liniowy wzrost koncentracji i ładunku materiału z przyrostem powierzchni zlewni od źródeł do ujścia, podczas gdy w zlewniach asymetrycznych związek ten ma postać krzywoliniową (ryc. 26,

27, 29, 30, 31, 49). Natężenie tego wzrostu nawiązuje do cech środowiska zlewni i zmienia się w zlewniach różnej wielkości (ryc. 22, 24, 46, 50). Znajduje to swoje odbicie w wielkości ładunku materiału wynoszonego poza obręb zlewni. W przeliczeniu na denudację jednostkową nawet sąsiadujące ze sobą zlewnie wykazują znaczne różnice w wielkości wynoszonego ładunku (ryc. 24, 25, 52, 53). Zatem przy ekstrapolacji wyników należy zachować daleko idącą ostrożność, tym bardziej że związek denudacji jednostkowej z przyrostem powierzchni zlewni ma postać krzywo liniową. Dla zlewni symetrycznych najlepiej przybliża go równanie hiperboli (ryc. 31).

W małych zlewniach Beskidu Sądeckiego produkty wietrzenia w postaci materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin dostarczane są ze stoków do koryt głównie spływem liniowym z dróg polnych i holoceńskich rozcięć (ryc. 23, 24, 25, 54, 59, 60, 61). Bezpośrednia dostawa z przyrzeczy poprzez spływ powierzchniowy rozproszony jako efekt ługowania i splukiwania odgrywa małą rolę (ryc. 54, 61, tab. 3, 5). Obszary dostawy produktów wietrzenia ze stoków do koryt zmieniają się z opadu na opad w zależności od jego natężenia, początkowej wilgotności gleby i jej przepuszczalności. Ta ekspansja i kurczenie stref dostawy materiału zachodzi zarówno w czasie trwania opadu, jak i podczas regresji przepływu po opadach, wskutek zmiany długości cieku prowadzącego wodę oraz — w odniesieniu do dostawy materiału rozpuszczonego — zmiany powierzchni zajętej przez strefę nasyconą wodą. Dynamika dostawy zwietrzelin nawiązuje do zmiennych w czasie i przestrzeni źródeł zasilania odpływu (Dunne, Black 1970; Słupik 1981).

Postępujący w Beskidzie Sądeckim wzrost gęstości dróg gruntowych i rynien do transportu drewna, związany z intensywną eksploatacją lasów, powoduje, że beskidzkie piętro leśne pod względem mechanizmu i wielkości dostawy produktów wietrzenia do koryt potoków upodabnia się do wykorzystywanych rolniczo obszarów niskich gór i wysokich pogórzy. Powiększanie gęstości dróg prowadzi do wzrostu kulminacji przepływów wezbraniowych i wielkości transportowanego ładunku zawiesiny. W warunkach zlewni Homerki około 80% klastycznych zwietrzelin transportowanych w zawieszynie dostarczają do koryta potoku drogi gruntowe, a bezpośrednia dostawa poprzez spływ powierzchniowy rozproszony jako efekt splukiwania w obrębie przyrzeczy stanowi mniej niż 1% transportowanego ładunku (tab. 3,5).

Tendencja do pogłębiania koryt (ryc. 67, 68) powoduje wzrost ich pojemności oraz powiększanie względnej wysokości teras zalewowych. W czasie kolejnych powodzi są one coraz rzadziej zalewane i nadbudowywane facją pazakorytową. Toteż współcześnie coraz większa część ładunku klastycznych zwietrzelin transportowanych w zawieszynie podczas powodzi jest wynoszona na przedpole gór i przyczynia się tu do szybkiego wzrostu równin zalewowych bądź ulega sedymentacji w zbior-

nikach zaporowych zmniejszając ich pojemność. Poprzez powiększanie pojemności koryt następuje ich adaptacja do roli łożysk powodziowych. Powoduje to wzrost koncentracji energii w korytach w czasie wezbrań, co przy dużej dostawie rumowiska pochodzącego z pogłębiania koryta wyzwała tendencję do wzrostu natężenia transportu ładunku dennego. Wyjątek stanowią koryta charakteryzujące się niedoborem rumowiska dennego, co jest spowodowane nadmierną eksploatacją aluwii lub obecnością zapór przeciwrumowiskowych.

OCENA METOD I WYNIKÓW BADAŃ W ŚWIECIE ANALIZY BŁĘDÓW

Na obecnym etapie badań procesów transportu zwierzelin, zmierzających do ujęć ilościowych, często bilansowych, niezbędna wydaje się ocena metod i wyników w świetle analizy błędów. W myśl podstawowej zasady metrologii pomiar pewnej wielkości można wówczas uznać za zakończony, kiedy zostanie przeprowadzona analiza wyników pomiarów i oceniony zostanie błąd, jakim obarczone są poszczególne wyniki. Należy uwzględnić poprawki oraz obliczyć związki ilościowe między poszczególnymi wielkościami (Piotrowski 1977).

Istotne znaczenie dla możliwości szybkich porównań wyników badań ilościowych transportu zwierzelin ma również stosowanie jednolitego systemu jednostek miar, jak również jednostek miar odpowiadających metodzie pomiaru. Wprowadzony przed kilku laty i powszechnie już obowiązujący na świecie układ jednostek SI jest, niestety, wprowadzany bardzo wolno do prezentacji wyników badań współczesnych procesów morfogenetycznych.

W dotychczasowych opracowaniach dotyczących ilościowych metod badań współczesnych procesów morfogenetycznych w polskich Karpatach (Gerlach 1970; Kaszowski 1970; Gerlach i in. 1978) nie zwracano uwagi na ocenę metod i wyników z punktu widzenia ich dokładności. Wyjątek stanowią oceny dokładności niektórych metod i obliczeń transportu zawiesiny (Pasławski 1965; Brański 1967, 1968a, b; Wiśniewski 1972; Froehlich 1975). Jest to ważny aspekt warsztatu badawczego, decydujący o możliwościach prawidłowego porównywania wyników, a często wyciągania właściwych wniosków. Porównywalność i obiektywność wyników badań ilościowych, oprócz możliwości określenia wielkości i znaku błędów, umożliwia opracowanie standardowymi, powszechnie stosowanymi metodami statystycznymi, a nie mało precyzyjnym opisem słownym.

Brak szczegółowych informacji o stosowanej w pracy metodzie pomiarów, ich częstotliwości i ilości oraz sposobie obliczeń uniemożliwia ocenę dokładności prezentowanych wyników i pozbawia podstawy do ich właściwych porównań. Niektóre metody dają jedynie możliwość określenia rzędu wielkości transportu zwierzelin. Porównuje się często wyniki

pochodzące z różnych, nawet krótkich okresów badań, bez określenia ich reprezentatywności hydroklimatycznej. Budzi to zastrzeżenia, ponieważ wiadomo, że przeważająca część rocznego ładunku zwietrzelin wynosi na jest w krótkich okresach wezbrań, których częstotliwość występowania ulega dość poważnym odchyleniom w poszczególnych latach. Wiąże się z tym zagadnienie długości okresu badań, częstotliwości i ilości pomiarów wystarczających do uzyskania reprezentatywnej wartości średniej według wymagań statystyki (por. Paślowski 1960).

Nie mniej istotnym problemem są możliwości porównywania wyników badań transportu pochodzących z przekrojów hydrometrycznych, zamykających zlewnie o różnej wielkości. Jak wykazano, nie mogą to być porównania wprost, bez określania wpływu wielkości zlewni na otrzymany wynik. Podstawą tego typu porównań powinien być model przestrzennego zróżnicowania transportu zwietrzelin w zlewniach różnej wielkości. Poruszony problem sprowadza się do określenia reprezentatywności ilościowej otrzymanego wyniku pomiaru transportu zwietrzelin w danym przekroju pomiarowym w stosunku do zróżnicowania przestrzennego w całej zlewni.

Powszechnie stosowane są przeliczenia masy transportowanego w przekroju hydrometrycznym ładunku materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin na wskaźniki denudacji chemicznej i mechanicznej, wyrażone w $\text{m}^3 \text{ km}^{-2}$, lub na miąższość usuwanej warstwy zwietrzelin w milimetrach. Wielkości te podawane są niekiedy z „dokładnością” do kilku miejsc po przecinku. Tego rodzaju „zwiększanie dokładności” poprzez działania arytmetyczne (powiększanie liczby miejsc znaczących po przecinku) jest nieporozumieniem. Przy przeliczeniach ładunku zwietrzelin na wskaźniki denudacji należy mieć na uwadze różnice w ciężarze właściwym i objętościowym skał podłoża, pokryw zwietrzelinowych oraz transportowanego materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin, które zawierają substancje organiczne (por. ryc. 36). Ponadto ekstrapolacja wartości denudacji otrzymanych z pomiarów w ciągu kilku lub kilkunastu lat na okres 1000 lat (co jest powszechnie stosowane) z uwagi na zmienny rozkład prawdopodobieństwa zjawisk ekstremalnych, rolę człowieka itp. jest zbyt dużą operacją arytmetyczną i niepotrzebnym balastem w tabelach danych ilościowych (por. Meade 1969; Selby 1974).

W badaniach transportu klastycznych zwietrzelin, zmierzających do ujęć bilansowych, głównym źródłem błędów jest mała częstotliwość poboru prób wody w celu określenia koncentracji zawiesiny (Froehlich 1975). W wypadku pomiarów ładunku materiału rozpuszczonego mała częstotliwość pomiarów (np. raz na dobę) nie pociąga za sobą tak dużych błędów, jak w przypadku zawiesiny, z uwagi na stosunkowo małą zmienność koncentracji materiału rozpuszczonego (tab. 6,7, por. Froehlich 1975; Walling 1978). Ważnym problemem jest również sama technika poboru prób wody (batometr o dowolnym napełnianiu), objętość próby

Tabela 6. Błąd oznaczenia dobowych i miesięcznych ładunków materiału rozpuszczonego transportowanego w potoku Bącza przy pomiarach dokonywanych raz na dobę w stosunku do wielkości obliczonych na podstawie pomiarów co godzinę (%)

Error in estimation of diurnal and monthly load of total dissolved transported in Bącza stream — as a consequence of comparison daily and hourly measurement results (%)

Dni Days	Miesiące — months						
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1	20,8	9,5	0,5	17,4	29,9	3,1	48,8
2	-20,2	-5,2	12,5	10,5	67,5	3,9	22,1
3	-9,1	5,0	8,6	11,6	22,8	-33,6	7,0
4	11,1	6,3	7,8	5,4	18,6	11,3	6,0
5	-25,9	-20,0	6,0	6,0	-15,7	0,0	15,3
6	28,6	9,0	0,0	5,3	1,1	8,0	7,4
7	20,0	-14,2	-2,0	5,8	-66,7	8,0	0,0
8	7,4	2,1	-47,4	-39,4	46,7	0,0	-5,4
9	0,0	0,0	-18,7	12,0	20,4	0,0	12,9
10	5,6	5,6	10,4	11,5	11,7	0,0	-64,2
11	-11,3	0,0	44,7	11,7	6,2	0,0	16,7
12	0,0	-19,4	24,1	0,0	-71,4	0,0	47,3
13	2,0	-68,7	20,2	5,2	51,1	0,0	31,1
14	-15,8	34,3	11,8	0,0	26,2	0,0	11,6
15	-5,1	51,3	10,4	0,0	12,0	0,0	9,5
16	6,1	10,6	-5,1	0,0	12,6	0,0	18,9
17	-7,6	4,8	6,0	-40,0	5,1	-70,4	6,9
18	14,7	-16,2	-60,3	30,1	7,0	-18,2	6,5
19	4,9	-57,5	30,0	15,0	-41,7	46,6	-2,8
20	-2,2	-25,9	18,1	6,6	16,6	63,4	20,6
21	1,4	-7,7	6,3	0,0	9,5	43,8	-1,9
22	9,8	10,3	1,7	-5,6	-1,9	17,9	-10,2
23	-30,8	23,0	4,1	6,6	13,9	20,5	-26,2
24	-2,3	20,2	-82,2	2,5	5,2	-62,3	52,1
25	9,9	-21,4	51,3	0,0	0,0	35,4	26,9
26	-17,1	15,7	-32,3	-3,6	2,3	18,6	9,1
27	2,1	9,1	35,4	6,9	7,9	9,6	4,7
28	0,0	10,7	-20,9	-87,3	3,5	6,2	-6,8
29	-8,6	-7,1	-36,4	60,4	6,9	7,5	5,9
30	-2,0	-9,9	32,1	54,0	0,0	7,4	6,2
31	2,5		18,3		0,0	-82,7	
	-0,4	-4,0	-1,0	9,0	2,4	4,3	12,3

wody w zależności od wielkości koncentracji oraz znajomość rozkładu koncentracji zawiesiny w przekroju pomiarowym (Brański 1967, 1968a, b; Froehlich 1975, 1979a). Powszechnie stosowane standardowe analizy laboratoryjne koncentracji materiału rozpuszczonego i zawiesiny (metoda filtracyjna i odparowania) są powtarzalne i porównywalne pod warunkiem, że precyzja ich wykonania nie budzi zastrzeżeń (Hermanowicz i in. 1976).

Z uwagi na szybkie zmiany przepływu wody i koncentracji podczas wezbrań obliczenia transportowanego ładunku zawiesiny w korytach

Tabela 7. Błąd oznaczenia dobowych i miesięcznych ładunków zawiesiny transportowanej w potoku Bącza przy pomiarach dokonywanych raz na dobę w stosunku do wielkości obliczonych na podstawie pomiarów co godzinę (%)

Error in estimation of diurnal and monthly load of suspended sediment transported in Bącza stream – as a consequence of comparison daily and hourly measurement results (%)

Dni Days	Miesiące — months						
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
1	25,2	14,6	−60,9	23,0	120,1	5,3	151,1
2	−61,7	−8,7	57,1	13,9	838,5	11,1	29,6
3	−24,0	8,6	12,1	16,8	112,5	−99,7	10,6
4	−22,1	12,5	11,3	8,9	26,1	25,6	8,9
5	−65,2	−31,8	9,9	10,0	−98,9	0,0	25,0
6	41,2	14,3	0,0	9,1	−72,6	22,6	14,6
7	45,9	−25,4	−3,5	10,5	−98,2	25,0	0,0
8	10,3	4,4	−99,5	−99,9	−21,2	0,0	−9,2
9	0,0	0,0	5,4	171,2	34,5	0,0	22,2
10	7,9	12,2	284,1	−97,7	102,8	0,0	−99,9
11	−15,7	0,0	158,8	163,5	9,5	0,0	132,9
12	0,0	−34,8	60,9	0,0	−99,9	0,0	216,1
13	2,6	−99,2	24,2	10,2	−38,8	0,0	260,2
14	−20,6	385,0	15,6	0,0	129,9	0,0	14,9
15	−11,9	83,4	14,3	100,0	17,0	23,1	13,4
16	26,2	13,8	−97,3	100,0	19,0	0,0	28,3
17	−69,7	6,4	8,6	−99,6	7,9	−99,9	12,2
18	−69,7	−65,7	−99,5	124,6	11,6	245,7	9,1
19	7,6	−79,8	36,4	26,4	−99,9	146,3	−94,5
20	−3,5	−82,2	24,3	12,5	143,4	202,2	172,6
21	2,8	−82,0	8,5	0,0	15,5	107,1	−96,4
22	17,1	12,2	2,3	−10,9	−3,1	32,1	14,8
23	−53,0	44,3	7,0	15,1	23,1	31,4	19,6
24	−3,7	41,4	−99,9	4,2	9,1	−99,0	93,5
25	18,3	−67,4	42,1	0,0	0,0	77,4	157,0
26	−27,5	18,5	−33,8	−7,4	0,0	103,7	12,7
27	3,0	11,3	35,0	18,8	15,4	14,1	6,5
28	0,0	13,8	−95,9	−99,9	8,7	10,0	−9,8
29	−13,3	−95,5	−94,1	577,8	18,8	11,6	8,5
30	−3,2	−12,9	67,8	93,0	0,0	13,5	9,5
31	3,9		58,7		−33,3	−99,9	
	−23,4	−1,4	53,3	79,6	−66,6	61,5	62,3

rzek i potoków beskidzkich na podstawie pomiarów koncentracji zawiesiny raz na dobę (instrukcja poboru prób wody na zmańczenie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej) dają wartości znacznie odbiegające od rzeczywistych (por. tab. 7). Brak opracowań określających granice tego błędu w skali pojedynczych wezbrań, ładunków dobowych, miesięcznych i rocznych oraz średnich wieloletnich obniża wartość tych wyników. Syntetyczne opracowania dotyczące transportu zawiesiny oparte są głównie na tego typu materiale pomiarowym (Jarocki 1957; Dębski 1959;

Reniger 1959; Mikulski 1961; Cyberski 1969; Wiśniewski 1969; Brański 1975). Wyniki te są również podstawą opracowania map zagrożenia erozyjnego (Reniger 1959) lub denudacji (Dębski 1959; Brański 1975). Granice między obszarami o różnym natężeniu denudacji prowadzone są z konieczności na linii wododziałów. Z powodu braku oceny wielkości błędu metody (pomiar raz na dobę) oraz nieznajomości wpływu wielkości zlewni na otrzymaną wartość wskaźnika denudacji nasuwa się pytanie, w jakim stopniu prezentowane przestrzenne zróżnicowanie denudacji mechanicznej odpowiada rzeczywistości, a w jakim jest udziałem błędu metody oraz rozmieszczenia punktów pomiarowych. Konieczne jest zatem doskonalenie metod badawczych oraz zweryfikowanie rozmieszczenia przekrojów pomiarowych, tak aby umożliwiały one ocenę wpływu wielkości zlewni, użytkowania ziemi oraz przestrzennej zmienności środowiska geograficznego Karpat.

Podstawą obliczeń transportowanego ładunku zwietrzelin w zawieszinie są również pomiary objętości aluwiiów w zbiornikach zaporowych. Wyniki otrzymane tą metodą znacznie odbiegają od wartości uzyskanych za pomocą klasycznych pomiarów transportu zawiesiny w przekrojach hydrometrycznych dużych rzek beskidzkich (Cyberski 1969; Brański 1971; Wiśniewski 1972). Uważa się, że metoda ta daje dobre rezultaty (Bogolubowa, Kudriaszow 1964). Można zatem przypuszczać, że mała częstotliwość pomiarów, słaba znajomość rozkładu koncentracji zawiesiny w przekroju (w tym głównie jego wielkości w strefie przydennej), a ponadto niedokładności krzywych konsumpcyjnych spowodowane zmianami dna są głównymi przyczynami błędów klasycznej metody.

Transport ładunku dennego w dużych rzekach beskidzkich określany jest również za pomocą pomiarów objętości aluwiiów o frakcji powyżej 1 mm, złożonych w zbiornikach zaporowych. Uważa się, że frakcje drobniejsze (poniżej 1 mm) są transportowane w postaci zawiesiny (Cyberski 1969; Brański 1971; Wiśniewski 1972). Wielkości transportowanego ładunku dennego otrzymane przy tym założeniu charakteryzują się dużą rozbieżnością, co świadczy o małej dokładności tej metody. Kryterium wielkości ziarna musi odpowiadać rzeczywistym warunkom transportu. Ta sama frakcja piaszczystych aluwiiów, w zależności od prędkości wody, może być transportowana w zawieszinie lub wleczona po dnie. Skład mechaniczny osadów delty Dunajca w Zbiorniku Rożnowskim jest zróżnicowany zarówno w pionie, jak i w poziomie (Cyberski 1969; Pasternak 1973). W profilu pionowym zaznaczają się cienkie, kilkucentymetrowe warstwy zbudowane z frakcji pylasto-ilastych bądź piaszczystych. Odpowiadają one okresom poszczególnych wezbrań. Zasięg warstw jest zróżnicowany i zależny od przebiegu osi koryta i stanu wody w zbiorniku podczas wezbrania. Toteż dokładne określenie objętości aluwiiów o frakcji powyżej 1mm stosowaną dotychczas metodą jest niemożliwe.

Pomiar objętości aluwiiów złożonych w basenach sedymentacyjnych powyżej zapór przeciwrumowiskowych jest podstawą oceny natężenia transportu ładunku dennego w korytach małych zlewni beskidzkich (Pietruszewski 1955; Reniger 1955; Bartnik, Gładki 1972; Prochal 1973). Tymczasem w basenach ulega sedymentacji również część zwietrzelin transportowanych w postaci zawiesiny. Sprawność w przechwytywaniu zawiesiny szybko maleje po przejściu kilku większych wezbrań powodujących częściowe wypełnienie basenu aluwiami. Zależy ona również od typu zapory, a szczególnie basenu sedymentacyjnego. Często tworzą się w nim stałe przepływowe jeziora. Zatem potok w zależności od charakteru basenu może rzucać tylko ładunek denny (płytkie i krótkie baseny) lub ładunek denny i dużą część zawiesiny (długie i głębokie baseny). Z uwagi na częste zatykanie upustów przez gałęzie i transportowane rumowisko warunki sedymentacji są zmienne w czasie. Ponadto podczas ekstremalnych wezbrań następuje niekiedy zamiana dużej części „starych” aluwiiów na nowe. Konieczna jest więc ciągła obserwacja skutków wezbrań i okresowe pomiary tempa sedymentacji w nawiązaniu do stałych reperów i znaczonego rumowiska. Pomiary wykonane dopiero po wypełnieniu basenu sedymentacyjnego mogą prowadzić do błędnych wniosków. Objętość aluwiiów odnoszona jest zwykle do całego okresu istnienia zapory i przeliczana na wartość średnią roczną (Bartnik, Gładki 1972; Prochal 1973). Tymczasem natężenie transportu ładunku dennego zależy od częstotliwości dużych wezbrań, a tempo akumulacji w basenie jest funkcją czasu istnienia zapory. Należy pamiętać, że w skład osadów wypełniających niektóre baseny sedymentacyjne wchodzi detrytus roślinny, którego objętość w niektórych profilach sięga 35% (Froehlich, Klimek 1979). Z przeprowadzonych badań wynika, że metoda ta daje dobre rezultaty pod warunkiem stałej obserwacji basenu sedymentacyjnego i ograniczenia oceny natężenia transportu ładunku dennego do objętości aluwiiów frakcji żwirowo-głazowych. Z uwagi na trudności w ocenie mechanizmu transportu złożonych w basenie frakcji piaszczysto-pylasto-ilastych należy je pominąć.

Określenie wielkości transportu ładunku dennego na podstawie objętości „świeżych” łąch żwirowych po wezbraniach (Prochal 1960; Ziętara 1968) budzi zastrzeżenia z uwagi na założenia metody (Froehlich 1975). Powierzchnie „świeżych” łąch żwirowych mogą być pochodzenia akumulacyjnego lub erozyjnego i powstawać poprzez zdarcie pokrywy roślinnej, przemycie powierzchniowej warstwy aluwiiów lub akumulację świeżych żwirów (Froehlich i in. 1972). Przy braku powtarzalnych pomiarów niwelacyjnych łóżyska powodziowego niemożliwe staje się określenie przyrostu lub ubytku objętości aluwiiów. Badania transportu żwirów znaczonych kolorową emalią wykazały, że przemieszczanie otoczków polega głównie na ich ciągłej wymianie, często bez zmian morfologii dna. Toteż nie znajduje uzasadnienia przyjęcie w tej metodzie

średniej akumulacji aluwiiów na 0,5 m. Stwierdzenie krótkiego dystansu transportu ładunku dennego (Dobija i in. 1970; Klimek 1972; Kaszowski 1973; Niemirowski 1974; Froehlich 1975; Krzemień 1976) wskazuje, że objętość kamieńców należy odnosić do okresu znacznie dłuższego niż kilka lat. Dlatego szacunkowe pomiary objętości „świeżych” łach żwirowych po wezbraniach nie mogą być podstawą oceny transportu ładunku dennego. Mogą natomiast być dobrym wskaźnikiem zasięgu aktywnej strefy wód powodziowych.

Stwierdzono, że określanie natężenia transportu ładunku dennego metodą skrzyń łapaczy (Langer 1950; Hubbell 1964) daje wartości znacznie odbiegające od rzeczywistych (Froehlich 1975). Z uwagi na dążenie rzeki do wyrównywania dna wszelkie sztuczne zagłębienia w korycie są szybko niwelowane, nawet w czasie małych wezbrań. Znacznie lepsze rezultaty otrzymano przy zastosowaniu łapaczek z siatki przytwierdzonych do dna lub siatek plastikowych przegradzających koryto. Łapaczki powinny być zainstalowane na całej szerokości koryta z uwagi na duże różnicowanie natężenia transportu dennego w przekroju poprzecznym.

Do projektowania budowli hydrotechnicznych i regulacji koryt transport ładunku dennego oblicza się za pomocą wzorów empirycznych zaczerpniętych głównie z zagranicznej literatury (Jarocki 1957). Wzory te zostały wyprowadzone na podstawie badań teoretycznych i eksperymentalnych lub bezpośrednich pomiarów. Te ostatnie odnoszą się do rzek o innym niż rzeki beskidzkie reżimie hydrologicznym i mechanizmie dostawy klastycznych zwietrzelin transportowanych w postaci ładunku dennego. Za pomocą tych wzorów zostaje obliczony pewien „potencjalny” ładunek rumowiska dennego w danych warunkach hydraulicznych. Zakłada się bowiem stałą dostawę rumowiska, podczas gdy wiadomo, że w czasie różnych typów wezbrań zaznaczają się wyraźne różnice w warunkach i wielkości dostawy. Zatem wzorów tych nie należy stosować bez oceny dokładności otrzymanych za ich pomocą wyników.

Porównanie natężenia transportu fluwialnego w korytach z dostawą materiału rozpuszczonego i klastycznych zwietrzelin poprzez spływ powierzchniowy rozproszony (Welc 1972; Gerlach 1976; Gil 1976) jest trudne z uwagi na różną dokładność stosowanych metod pomiarów i obliczeń. Wyniki natężenia spłukiwania pochodzą głównie z pomiarów na stokach w zlewni Grajcarka i Ochotnicy (Gerlach 1966, 1976) oraz z doświadczalnych poletek w zlewni Bystrzanki (Gli, Słupik 1972a,b; Welc 1972; Gil 1976). Pomiary spłukiwania przy zastosowaniu rynny Gerlacha obarczone są błędami wynikającymi zarówno z samej metody pomiaru, jak i obliczeń. Gerlach (1966, 1976) stosował zbiorniki o pojemności 5 dm³, które opróżniane były jeden raz na kwartał. Z pomiarów spływu i spłukiwania wykonanych w zlewni Bystrzanki (Gil, Słupik 1972a, b; Słupik 1973; Gil 1976) oraz w zlewni Homerki (Froehlich, Słupik 1980a, b; Słupik 1981) wynika, że z pasa o szerokości urządzenia pomiaro-

wego (rynny Gerlacha, worka Słupika) w czasie jednego dużego opadu spływa często ponad kilkadziesiąt litrów wody. Zatem zbiorniki o pojemności 5 dm³ mogły być wypełniane nawet w czasie jednego opadu. Ponadto splukiwany na darni materiał przeważnie stanowią frakcje ilasto-pylaste i koloidalne, które bardzo wolno ulegają sedymentacji. Zatem w zbiornikach i rynnach pozostawała jedynie część splukiwanego materiału, a reszta wypływała wraz z nadmiarem wody.

Przy pomiarach metodą Gerlacha dodatkowym źródłem splukiwanego materiału jest pas gruntu o naruszonej zwięźłości na kontakcie blachy rynny z gruntem. Podczas pomiarów na stoku doświadczalnym w zlewni Homerki miejsce styku gruntu z folią politylenową zastosowaną zamiast blachy utwardzano żywicą organiczną lub lakierem. Przy braku takiego zabezpieczenia wielkości koncentracji materiału splukiwanego na darni były w początkowym okresie zainstalowania worków Słupika nawet o 45% większe niż w sąsiednich zabezpieczonych, a w pobranych próbach wody stwierdzono obecność pojedynczych cząstek frakcji piaszczystych.

Dalsze błędy tej metody wynikają z przeliczania natężenia splukiwania na powierzchnię 1 ha lub 1 km². Podstawą przeliczeń jest pas terenu o szerokości urządzenia pomiarowego, ciągnący się od rynny do działu wodnego. Są to mechaniczne przeliczenia nie uwzględniające rzeczywistej drogi spływu i długości drogi transportu cząstek. Parametry te zmieniają się w zależności od struktury opadu i wilgotności gruntu. Wartości przeliczane mechanicznie zależą zatem od odległości rynny od działu wodnego lub wielkości poletka doświadczalnego, a nie faktycznego natężenia procesu (Słupik 1981). Uwagi te w całości należy odnieść do ługowania i transportu materiału rozpuszczonego poprzez spływ powierzchniowy rozproszony. Wyniki pomiarów splukiwania i ługowania przy udziale spływu powierzchniowego rozproszonego najlepiej odnosić do szerokości pasa stoku objętego pomiarami (długość rynny Gerlacha, szerokość worka Słupika, szerokość poletka doświadczalnego). Unika się wówczas sztucznego i niezgodnego z rzeczywistością wyznaczania „zlewni” urządzenia pomiarowego. Przy porównaniach splukiwania na stokach z transportem w korycie takie podejście umożliwia bezpośrednio określenie powierzchniowej dostawy zwietrzelin na długości 1 m brzegu koryta.

Przeprowadzona powyżej analiza metod i wyników pomiarów transportu zwietrzelin w zlewniach beskidzkich wskazuje, że należy zachować ostrożność w wyciąganiu wniosków o rzeczywistej wielkości transportu zwietrzelin oraz w porównywaniu wyników badań pochodzących z różnych okresów, a często ze zlewni różnej wielkości. Zmierając do bilansowania procesów transportu zwietrzelin w zlewni należy dobrze poznać mechanizm procesów, aby do jego pomiarów zastosować właściwe metody ilościowe, o znanej dokładności. Bardzo istotne jest również poznanie prawidłowości przestrzennego zróżnicowania transportu flu-

wialnego i dostawy zwietrzelin do koryt, co wiąże się z oceną ilościowej reprezentatywności zlewni. Model przestrzennego zróżnicowania natężenia procesów transportu powinien być podstawą właściwego rozmieszczenia stanowisk pomiarowych w zlewni doświadczalnej, zgodnego ze zmiennością natężenia procesów.

REGULACJA KORYT POTOKÓW BESKIDZKICH A MECHANIZM TRANSPORTU FLUWIALNEGO I DOSTAWY ZWIETRZELIN

Koryta potoków beskidzkich charakteryzują się złożonymi układami różnych typów od prostych, poprzez kręte, meandrowe do roztokowych. Pomimo mozaiki typów, różnych tendencji ewolucji koryt i zróżnicowania natężenia procesów fluwialnych, do ich stabilizacji stosuje się na ogół jednolite systemy regulacyjne. Wynika to między innymi z mechanicznego transponowania na potoki beskidzkie systemu regulacji koryt potoków alpejskich opartego na alpejskim modelu zlewni, której głównymi elementami są: kocioł, szyja i stożek (Golczewski 1970). W świetle mechanizmu transportu fluwialnego i dostawy klastycznych zwietrzelin do koryt w małych zlewniach beskidzkich takie założenie jest nie do przyjęcia.

Obserwowana powszechnie krótkotrwała żywotność i mała skuteczność systemów regulacyjnych, a niekiedy wręcz potęgowanie skutków wezbrań na odcinkach uregulowanych koryt (Dobija 1972; Koniar-Schaeferowa 1972; Froehlich 1980), skłania do szukania przyczyn błędów popełnianych przy regulacji. Typ koryta wykształcony w warunkach naturalnych na danym odcinku potoku jest optymalny z punktu widzenia kompetencji i pojemności potoku w stosunku do dostawy zwietrzelin i nawiązuje do jego reżimu hydrologicznego (Leopold i in. 1964; Schumm 1977).

Podstawowym warunkiem zastosowania odpowiednich budowli inżynierskich jest poznanie funkcji, jaką pełni odcinek koryta przeznaczony do regulacji w całym systemie koryta. Nie można bowiem doprowadzać do całkowitej zmiany przewodnich funkcji danego odcinka koryta. Prowadzi to do nieodwracalnych zmian w przebiegu procesów korytowych i system regulacyjny przestaje spełniać swoją rolę. Jedną z podstawowych przyczyn niepowodzeń regulacji jest stosowanie tych samych metod regulacji do różnych typów koryt o odmiennych cechach i pełnionych funkcjach.

W korytach potoków beskidzkich na podstawowy system regulacyjny składają się zapory przeciwrumowiskowe, progi korekcyjne i betonowe lub kamienne żłoby. Zatem konieczne staje się opracowanie modeli za-

budowy hydrotechnicznej dla różnych typów koryt w zależności od ich tendencji rozwojowych. Dotychczas brak jednak porównywalnych wyników badań ilościowych procesów fluwialnych w korytach potoków beskiddkich, jak również danych hydrologicznych co do częstotliwości występowania i parametrów ekstremalnych wezbrań w małych zlewniach. Toteż przeważająca część danych wyjściowych do projektów regulacji koryt powstaje w teoretycznych obliczeniach.

Można podać liczne przykłady niewłaściwie przeprowadzanej regulacji, która wynika z nieznamości natężenia i kierunku działania procesów fluwialnych. Koryta o tendencji do erozji i koryta akumulacyjne zabezpiecza się zarówno przed erozją, jak i nadmiernym transportem ładunku dennego. Przykładem mogą być dopływy Kamienicy Nawojowskiej, potoki Królowka i Homerka w swoim dolnym biegu. Przed regulacją były to typowe koryta aluwialne z tendencją do tworzenia koryt roztokowych w czasie ekstremalnych wezbrań. Pomimo budowy licznych stopni korekcyjnych i towarzyszących im umocnień brzegów, koryto potoku Królowka jest nadal miejscami nadbudowane, co prowadzi do zasypywania basenów poniżej progów korekcyjnych, między którymi odradza się powoli system koryt roztokowych. Koryto zostało uregulowane w celu zmniejszenia tempa erozji, podczas gdy jego przewodnią cechą jest boczna migracja i tendencja do tworzenia roztok.

Obserwacje przebiegu i skutków ekstremalnych wezbrań wskazują, że regulacja samego koryta jest niewystarczająca. W niektórych odcinkach płytkich aluwialnych koryt ponad 40% objętości przepływu fali wezbraniowej przypada na łóżysko powodziowe obejmujące tereny leżące poza korytem. Często dochodzi tu do równoczesnej egzystencji różnych typów koryt na krótkim odcinku łóżyska powodziowego. Dlatego praktykowana regulacja samego koryta jednym systemem z pominięciem łóżyska powodziowego jest niewystarczająca. Przekroje muszą być optymalne zarówno dla średnich, jak i wielkich przepływów.

Przekroje uregulowanych koryt winny w większym stopniu naśladować morfometrycznie i dynamicznie cechy stabilnych koryt naturalnych występujących na danym odcinku koryta. Naturalne stabilne koryta mają w danych warunkach optymalną formę hydrauliczną, dostosowaną do wielkości transportowanego ładunku klastycznych zwietrzelin. Przekroje poprzeczne i łuki tras regulacyjnych określone są wyłącznie za pomocą obliczeń teoretycznych, które zakładają zmniejszenie oporów płynięcia oraz stateczność brzegów. Powszechnie obserwuje się zmniejszanie promienia łuku krzywizn uregulowanych koryt w stosunku do koryta naturalnego oraz tworzenie jednorodnych przekrojów poprzecznych. Przyczynia się to do wzrostu energii na uregulowanym odcinku i prowadzi do spotęgowania gwałtowności przepływu fal wezbraniowych, a w konsekwencji do szybkiego niszczenia budowli regulacyjnych (fot. 17).

W wielu przypadkach ciężkie budowle hydrotechniczne ulegają szybko „zawieszeniu” w stosunku do dna koryta, co wiąże się z przyspieszeniem erozji wgłębnej. Dlatego w większym stopniu powinno się uwzględniać przy projektowaniu obserwowany w ostatnich dziesięcioleciach wzrost tempa pogłębiania koryt, szczególnie na odcinkach o nadmiernej eksploatacji aluwii. Niszczenie budowli regulacyjnych jest niekiedy tak szybkie, że po ukończeniu regulacji całego odcinka zachodzi już potrzeba naprawy niektórych obiektów (np. potok Homerka we Frycowej, Kamienica Nawojowska w Nowym Sączu). Ciężkie budowle regulacyjne, trudne do zniszczenia, są podczas ekstremalnych wezbrań omijane przez potok, który poszerza swoje koryto. Prowadzi to do jeszcze większych niż w korytach naturalnych zmian morfologii dna doliny (por. Dobija 1972; Koniar-Schaeferowa 1972; Froehlich 1980). Tego typu zniszczenia wystąpiły powszechnie w uregulowanym korycie potoku Wierchomla (dopływ Popradu) podczas gwałtownego wezbrania w lipcu 1970 roku.

Poważne trudności przy projektowaniu regulacji koryt potoków beskidzkich wynikają z nieznajomości rozmiarów transportu ładunku dennego. Obliczenia jego rozmiarów opierają się z konieczności na wzorach empirycznych zaczerpniętych głównie z zagranicznej literatury. Odniesienie tych wzorów do potoków beskidzkich daje wartości znacznie odbiegające od rzeczywistych. Dotychczas z powodu braku bezpośrednich pomiarów nie określono granic błędu otrzymanych za ich pomocą wyników.

Jednym z istotnych parametrów we wzorach empirycznych na transport ładunku dennego jest tzw. średnica miarodajna aluwii korytowych, która określana jest w jednorazowym badaniu składu mechanicznego. Sposoby poboru prób do analiz składu mechanicznego nie uwzględniają w pełni zróżnicowania frakcji aluwii w przekroju poprzecznym całego łóżyska powodziowego na odcinku przeznaczonym do regulacji (Słota 1972; Froehlich 1975). Nie uwzględnia się również zmian składu mechanicznego aluwii korytowych na uregulowanym odcinku koryta, które następują po wybudowaniu zapory przeciwrumowiskowej. Po kilku dużych wezbraniach poniżej zapory przeciwrumowiskowej następuje generalny niedobór frakcji żwirowych przy obecności pojedynczych głazów stanowiących residuum z rozmycia aluwii korytowych. Transportowane są tu w postaci ładunku dennego głównie frakcje piaszczyste, które przedostają się przez zaporę przeciwrumowiskową. Toteż w odcinkach koryt poniżej zapór przeciwrumowiskowych transport ładunku dennego odpowiada warunkom znacznie odbiegającym od obliczeń opartych na składzie mechanicznym aluwii korytowych występujących w korycie przed regulacją. Niedobór żwirowego rumowiska dennego na odcinkach uregulowanych poniżej zapór przeciwrumowiskowych prowadzi, podobnie jak na odcinkach o nadmiernej eksploatacji aluwii, do powstawania

nadwyżek energii, co jest powodem wzmożonej erozji wgłębnej. Pociąga to za sobą szybkie niszczenie budowli regulacyjnych głównie poprzez odsłanianie ich fundamentów.

Mając na uwadze zmniejszenie gwałtowności wezbrań oraz wynoszenia klastycznych zwietrzelin w postaci zawiesiny, która głównie wypełnia bardzo szybko niektóre baseny sedimentacyjne powyżej zapór przeciwrumowiskowych, należy dążyć do zredukowania liczby dróg mających bezpośrednie połączenie z korytem. W basenach sedimentacyjnych aluwia zwirowo-głazowe stanowią najczęściej około 30 % całej masy i ulegają sedimentacji tylko w początkowej części basenu. Przeważającą część zwietrzelin stanowią piaszczysto-pylasto-ilaste frakcje, często z wkładkami materiału organicznego. Są one głównie efektem strącania transportowanej zawiesiny. Budowa kosztownych zapór przeciwrumowiskowych jest zatem często zbyt duża z uwagi na małą częstotliwość i stosunkowo niewielkie rozmiary transportu zwirowo-głazowego ładunku dennego.

Obok regulacji koryt, istotne zaburzenia w dostawie i transporcie ładunku dennego powoduje niewłaściwie zlokalizowana eksploatacja aluwów, przyczyniająca się wydatnie na wielu odcinkach koryt do przyspieszenia tempa ich pogłębiania. Obniżanie dna koryt zachodzi bezpośrednio poprzez eksploatację i tworzenie wyrobisk oraz pośrednio poprzez zmniejszanie dostawy aluwów do transportu dennego i powstawanie nadwyżek energii wykorzystywanych przez potok na pogłębianie koryta. Współczesna regeneracja złóż aluwów jest prawie niezauważalna z uwagi na niewielki podłużny transport materiału zwirowego, który stanowi zaledwie kilka procent transportowanych klastycznych zwietrzelin. Przyczynia się do tego w dużym stopniu regulacja koryt, a w szczególności budowa zapór przeciwrumowiskowych. Współcześnie zaznacza się zatem tendencja do powstawania deficytu zwirowych frakcji aluwów korytowych. Eksploatacja przeważa nad dostarczaniem rumowiska poprzez erozję i transport.

Eksploatacja aluwów winna być zlokalizowana głównie w cofkach projektowanych zbiorników retencyjnych, a lokalnie może obejmować baseny sedimentacyjne powyżej zapór przeciwrumowiskowych oraz starsze pokrywy aluwialne. Po złoża zalegające w obrębie łóżysk powodziowych należy sięgać w ostateczności. Szczególnie należy unikać całkowitego usunięcia pokrywy aluwialnej, prowadzi to bowiem do zdrenowania zbiorników wód podziemnych w dnie doliny, zaniku jej właściwości retencyjnych, a w konsekwencji wzrostu gwałtowności wezbrań i szybko następującej regresji przepływu. Z uwagi na rosnący deficyt czystej wody, której największe zasoby występują w górach, projektowanie eksploatacji aluwów i regulacji koryt winno w jednakowym stopniu uwzględniać zabezpieczenie przed erozją, jak i ochronę zasobów wodnych (Koniar-Schaeferowa 1976).

Regulacja koryt i eksploatacja aluwów powoduje w dnie doliny czę-

sto nieodwracalne zmiany obiegu wody, transportu zwietrzelin i krajobrazu. Toteż decyzje o regulacji winny być poprzedzone wszechstronnym poznaniem procesów hydrologicznych i geomorfologicznych zarówno w dnie doliny, jak i w całej zlewni. Przy projektowaniu regulacji koryt i eksploatacji aluwów należy w większym stopniu korzystać z wyników stacjonarnych badań terenowych, prowadzonych w zlewniach doświadczalnych, w celu weryfikacji wyników obliczeń otrzymanych przy zastosowaniu wzorów inżynierskich.

LITERATURA

- Adamczyk B., Słupik J., 1981, *Gleby*, [w:] *Warunki naturalne zlewni Homerki i jej otoczenia*. Dok. Geogr., 4, s. 51-72.
- Adamczyk B., Tokaj J., 1957, *Studia nad glebami góorskimi na terenie gromady Sieniawa*. Roczn. Gleb., 6, s. 163-192.
- Alekin O.A., 1956, *Podstawy hydrochemii*. Wyd. Geol., Warszawa, ss. 311.
- Amerman C. B., 1965, *The use of unit source watershed data for runoff prediction*. Water Resources Res., 1, s. 499-507.
- Anderson M. G., 1976, *An inexpensive circuit design for the acoustic detection of oscillations in bedload transport in natural streams*. Earth Surface Proc., 1, s. 213-217.
- Arnett R. R., 1978, *Regional disparities in the denudation rate of organic sediments*. Z. f. Geomorph. suppl., 29, s. 169-179.
- Bartnik W., Gładki H., 1972, *Próba określenia intensywności odkładania się rumowiska powyżej zapór przeciwrumowiskowych w zlewni Dunajca*. Gosp. Wod., 7, s. 253-254.
- Biernat S., 1975, *Denudacja i transport rumowiska w dorzeczu Dunajca*. Biul. Inst. Geol., 289, ss. 79.
- Bobrowski W., 1962, *Badania żwirów Dunajca od Tatr do ujścia*. Prz. Geol., 12 (117), s. 641-645.
- Bogolubowa I. W., Kudriaszow A. F., 1964, *Metodyka uczeta stoka wlekomych nanosów sumarycznym sposobem po otłóżeńiach w odstojnych соору́żenijach*. Tr. Gos. Gidrol. Inst., 111, s. 143-155.
- Bombówna M., 1960, *Hydrochemiczna charakterystyka rzeki Soły i jej dopływów*. Acta Hydrob., 2 (3-4), s. 175-200.
- 1965, *Hydrochemical characteristics of the Wielka Puszca stream*. Acta Hydrob., 7, suppl., 1, s. 1-7.
- 1969, *Hydrochemiczna charakterystyka rzeki Raby i jej dopływów*. Acta Hydrob., 4, 11, s. 479-504.
- Brański J., 1967, *Dokładność punktowego pomiaru zmaczenia wody*. Wiad. Służ. Hydrol. i Meteor., 1 (69), s. 19-30.
- 1968a, *Oznaczanie ilości unosin metodą wagową bezpośrednio przy użyciu sączków*. Pr. PIHM, 94, s. 13-21.
- 1968b, *Dokładność wielopunktowych pomiarów koncentracji rumowiska unoszonego w rzekach ustalona na podstawie analizy błędów przypadkowych*. Pr. PIHM, 94, s. 23-39.
- 1971, *Kilka uwag o wielkości transportu rumowiska wlezonego w rzekach górskich*. Gosp. Wod., 6, s. 204-206.
- 1975, *Ocena denudacji dorzecza Wisły na podstawie wyników pomiarów rumowiska unoszonego*. Pr. IMGiW, 6, s. 5-58.
- Bryan R. B., Yair A., Hodges W. K., 1978, *Factors controlling the initiation of runoff and piping in Dinosaur Provincial Park badlands, Alberta, Canada*. Z. f. Geomorph. suppl., 29 s. 151-168.

- Brykowicz K., Rotter A., Waksmundzki K., 1972, *Hydrographical and morphological effects of the catastrophic rainfall in July 1970 in the source area of the Vistula*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 199-201.
- Bunting B. T., 1961, *The role of seepage moisture in soil formation, slope development and stream initiation*. Am. J. Sc., 259, s. 503-518.
- Campbell F. B., Bauder H. A., 1940, *A rating curve method for determining silt-discharge of streams*. Trans. Am. Geoph. Un., 21, s. 603-607.
- Chojnacki A., 1967, *Badania składu chemicznego wód opadowych w Polsce*. Pam. Puławski, cz. I-III, 24, 29.
- Cleaves E. T., Godfrey A. E., Bricker O. P., 1970, *Geochemical balance of a small watershed and its geomorphic implications*. Geol. Soc. of America Bull., 81 (10), s. 3015-3032.
- Colby B. R., 1963, *Fluvial sediments — a summary of source transportation deposition, and measurement of sediment discharge*. U.S. Geol. Surv. Bull., 1181-A, ss. 47.
- 1964, *Discharge of sands and mean velocity relationships in sand-bed streams*. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper., 462-A, ss. 64.
- Corbel J., 1964, *L'erosion terrestre, étude quantitative (Méthodes — Techniques — Resultats)*. Ann. de Geogr., 398 (73), s. 385-412.
- Cyberska K., Cyberski J., 1964, *Wezbranie potoku Świdnik po ulewnych deszczach w maju 1963 r.* Gaz. Obs. PIHM, 2, s. 3-6.
- Cyberski J., 1969, *Sedymentacja rumowiska w Zbiorniku Rożnowskim*. Pr. PIHM, 96, s. 21-42.
- Czeppe Z., 1960, *Zjawiska sufozyjne w glinach zboczowych górnej części dorzecza Sanu*. Biul. PIG, 150.
- Dębski K., 1959, *Próba oszacowania denudacji na obszarze Polski*. Pr. Komis. Gosp. Wod., t. 2, cz. 1, s. 477-481.
- Dobija A., *Zniszczenia budowli regulacyjnych na rzece Zylicy podczas powodzi w lipcu 1970 r.* Gosp. Wod., 10-11, s. 418-421.
- Dobija A., Partyka J., Kramarz K., Miśków J., Ludian Z., 1970, *Zastosowanie metody malowanych otoczków do badań transportu rumowiska w potoku Rzepedka*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 4, s. 261-268.
- Douglas I., 1964, *Intensity and periodicity in denudation processes with special reference to the removal of material in solution by rivers*. Z. f. Geomorph., 4, s. 453-473.
- Dudziak J., 1975, *Wstępne wyniki badań nad transportem materiału dennego w Rabie*. Wiad. Meteor. i Gosp. Wod., 3, s. 13-23.
- Dunne T., Black R. D., 1970, *Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed*. Water Resources Res., 6, s. 1296-1311.
- Dynowska I., 1971, *Typy reżimów rzecznych w Polsce*. Zesz. Nauk. UJ, Pr. Geogr., 50, ss. 155.
- El Boushi I. M., Davis S. N., 1969, *Water retention characteristics of coarse rock particles*. J. of Hydrol., 8, s. 431-441.
- Ellison W. D., 1945, *Some effects of raindrops and surface-flow on soil erosion and infiltration*. Trans. Am. Geoph. Un., 26, s. 415-429.
- Evans R., 1967, *On the use of welding rod for erosion and deposition pins. Field methods for the study of slope and fluvial processes*. Rev. de Geomorph. Dynam., 4, s. 165-165.
- Figula K., 1960, *Erozja w terenach górskich*. Wiad. IMUZ., 4, s. 109-147.
- 1966, *Badania transportu rumowiska w ciekach górskich i podgórskich o różnej budowie geologicznej i użytkowaniu*. Wiad. IMUZ., 3, 6, s. 131-145.
- Froehlich W., 1972, *The carrying out of suspended and dissolved load in the Kamienica Nawojowska and Łubinka catchment basins during the flood in 1970*.

- Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 105—119.
- 1975, *Dynamika transportu fluwialnego Kamienicy Nawojowskiej*. Pr. Geogr. IGIPZ PAN., 114, ss. 122.
 - 1978, *The role of land use in varying the suspended load during continuous rainfall (Kamienica catchment, flysch Carpathians)*. Geogr. Pol., 41, s. 27—37.
 - 1979a, *Methods of investigations of fluvial processes in the catchment basins of the Kamienica Nawojowska and the Homerka*. Excursion Guide-book. Field Meeting of the IGU Commission on Field Experiments in Geomorphology, Poland, s. 135—141.
 - 1979b, *Characteristics of the catchment basins of the Kamienica Nawojowska and its tributary Stream Homerka Programme of permanent investigations of fluvial processes*. Excursion Guide-book. Field Meeting of the IGU Commission on Field Experiments in Geomorphology, Poland, s. 127—134.
 - 1980, *Hydrologiczne aspekty pogłębiania koryt rzek beskidzkich*. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 235, s. 257—268.
- Frøehlich W., Kaszowski L., Starkel L., 1977, *Studies of present-day and past river activity in the Polish Carpathians*, [w:] *River Channel-Changes* (ed. Gregory K. J.), John Wiley and Sons, Chichester — Brisbane — Toronto, s. 411—428.
- Frøehlich W., Klimek K., 1979, *Derbis sedimentation in overflowing mountain streamlets upstream drop dams*. Excursion Guide-book. Field Meeting of the IGU Commission on Field Experiments in Geomorphology, Poland, s. 135—141.
- Frøehlich W., Klimek K., Starkel L., 1972, *The holocene formation of the Dunajec valley floor within the Beskid Sądecki in the light of flood transport and sedimentation*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 63—83.
- Frøehlich W., Słupik J., 1977, *Metody badań transformacji opadu oraz erozji na stoku w zlewni Homerki (Beskid Sądecki)*. Seminarium: Zasoby wodne w małych zlewniach. Ocena i gospodarowanie. Fałenty. Komitet Gosp. Wodnej i IMUZ, s. 55—70.
- 1979, *Spatial differentiation of erosion during summer drought in the Homerka watershed (Flysch Carpathians)*. Proceedings of the Seminar on Agricultural Soil Erosion in Temperate Mediterranean Climate. Strasbourg — Colmar, s. 29—34.
 - 1980a, *Drogi polne jako źródła dostawy wody i zwietrzelin do koryta cieku*. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 235, s. 257—268.
 - 1980b, *Importance of splash in erosion process within a small flysch catchment basin*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 14, s. 77—112.
 - 1980c, *The pattern of the areal variability of the runoff and dissolved material during the summer drought in flysch drainage basins*. Quaestiones Geogr., 6, s. 11—34.
- Galarowski T., 1976, *New observations of the present-day suffosion (piping) processes in the Bereźnica catchment basin in the Bieszczady Mts*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 10, s. 115—124.
- Gałka M., 1973, *The course and size of fluvial processes in the Stryszawka channel during the catastrophic flood in July 1970*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 7, s. 143—152.
- Gatewood J. S., Wilson A., Thomas H. E., Kister L. R., 1964, *General effects of drought on water resources of the Southwest*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 372-B, ss. 53.
- Gerlach T., 1966, *Współczesny rozwój stoków w dorzeczu górnego Grajcarka (Beskid Wysoki — Karpaty Zachodnie)*. Pr. Geogr. IG PAN, 52, ss. 111.

- 1970, *État actuel et méthodes de recherches sur les processus morphogénétiques actuels sur le fond des étages climatiques et végétaux dans les Carpates Polonaises*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 4, s. 47–63.
- 1976, *Współczesny rozwój stoków w polskich Karpatach fliszowych*. Pr. Geogr. IGiPZ PAN, 122, ss. 116.
- Gerlach T., Kaszowski L., Kotarba A., 1978, *Metody badania współczesnych procesów morfogenetycznych w polskich Karpatach*. Zesz. Nauk. UJ, Pr. Geogr., 45, s. 21–37.
- Gil E., 1974, *An attempt to determine the size of washing in the Bystrzanka catchment basin near Szymbark*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 8, s. 105–114.
- 1976, *Splukiwanie gleby na stokach fliszowych w rejonie Szymbarku*. Dok. Geogr., 2, ss. 65.
- Gil E., Słupik J., 1972a, *Hydroclimatic conditions of slope wash during snow melt in the Flysch Carpathians*. Symposium International de Géomorphologie, Université de Liège, 67, s. 75–90.
- 1972b, *The influence of plant cover and land use on the surface run-off and wash down during heavy rain*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 181–190.
- Glover R. E., 1964, *Dispersion of dissolved or suspended materials in flowing streams*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 433-B, ss. 32.
- Glover B. J., Johnson P., 1974, *Variations in the natural chemical concentration of river water during flood flows and the lag effect*. J. of Hydrol., 22, s. 303–316.
- Gładki H., Madeyski M., 1975, *Transport rumowiska w korycie rzeki Raby w przekroju Stróża i Proszówki*. Probl. Zagosp. Ziem Górskich, 14, s. 117–131.
- Golczewski A., 1970, *O trudnościach metodycznych przy projektowaniu zabudowy potoków górskich*. Gosp. Wod., 4 (278), s. 130–133.
- Gorham E., 1961, *Factors influencing supply of major ions to inland waters, with special reference to the atmosphere*. Geol. Soc. of Am. Bull., 72, s. 795–840.
- Gregory K. J., Walling D. E., 1973, *Drainage Basin Form and Processes. A Geomorphological Approach*. Edward Arnold, Londyn, ss. 456.
- Guy H. P., 1964, *An analysis of some storm-period variables affecting stream sediment transport*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 462-E, ss. 46.
- 1969, *Laboratory theory and methods for sediment analysis*. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey (Laboratory Analysis), 5, C1, ss. 58.
- Guy H. P., Norman V. M., 1970, *Field methods for measurement of fluvial sediment*. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey (Applications of Hydraulics), 3, C2, ss. 59.
- Hadley R. F., Schumm S. A., 1961, *Sediment sources and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River basin*. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Pap., 1531-B, s. 137–197.
- Heidel S. G., 1956, *The progressive lag of sediment concentration with flood waves*, Trans. Am. Geoph. Un., 37, s. 56–66.
- Hem J. D., 1970, *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Pap., 1474, ss. 363.
- Hermanowicz W., Dożańska W., Dojlido J., Kozirowski B., 1976, *Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków*. Arkady, Warszawa, ss. 847.
- Hjulström F., 1935, *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris*. Bull. Geol. Inst. Uppsala, 25, s. 221–452.

- Holeman J. N., 1968, *The sediment yield of major rivers of the world*, Water Resources Res., 4, s. 737-747.
- Horton R. E., 1945, *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*. Geol. Soc. Am. Bull., 56, s. 275-370.
- Hubbell D. W., 1964, *Apparatus and techniques for measuring bedload*. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Pap., 1748, ss. 74.
- Hubbell D. W., Al-Shaikh Ali K. S., 1961, *Quantitative effects of temperature on flow phenomena in alluvial channels*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 424-D, ss. 21.
- Jahn A., 1968, *Gemorfologiczne wnioski z obserwacji dna basenu zaporowego*. Czas. Geogr., 2, s. 117-123.
- Jarocki W., 1957, *Ruch rumowiska w ciekach. Badanie oraz obliczanie ilości materiału wlezonego i unoszonego*. Wyd. Morskie, Gdynia, ss. 356.
- Jasiewicz R., 1973, *Badania rozkładu unosin w rzekach*. Gosp. Wod., 11-12, s. 417-422.
- Jaworska M., 1968, *Erozja chemiczna i denudacja zlewni rzek Wieprza i Pilicy*. Pr. PIHM., 95, s. 29-47.
- Johnson P., Muir T. C., 1969, *Acoustic detection of sediment movement*. J. of Hydrol., 7, s. 519-540.
- Kajetanowicz Z., 1938, *Untersuchungsmethoden der Sinkstoffbewegung in den Flüssen Südpolens*. VI Baltische Hydrologische Konferenz, Deutschland, August 1938, Bericht 19D (Polen), Berlin 1938, ss.19.
- Kaszowski L., 1970, *Methods of investigation of contemporary fluvial processes applied in the Kraków centre*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 4, s. 65-79.
- 1973, *Morphological activity of the mountain streams (with Biały Potok in the Tatra Mts. as an example)*. Zesz. Nauk. UJ, Pr. Geogr., 31, ss. 101.
- Kaszowski L., Niemirowski M., Trafas K., 1976, *Problems of the dynamics of river channels in the carpathian part of the Vistula basin*. Zesz. Nauk. UJ, Pr. Geogr., 43, s. 7-37.
- Keller E. A., Swanson F. J., 1979, *Effects of large organic material on channel form and fluvial processes*. Earth Surface Proc., 4, s. 361-380.
- Ketcheson J. K., Dickinson W. T., Chisholm P. S., 1973, *Potential contribution of sediment from agricultural land, [w:] Fluvial Processes and Sedimentation, Proceedings of Hydrology Symposium Held at University of Alberta*, Edmonton, s. 184-191.
- Klimaszewski M., 1935a, *Przyczynek do poznania morfologicznej działalności roztopów wiosennych*. Czas. Geogr., 13, s. 300-304.
- 1935b, *Morfologiczne skutki powodzi w Małopolsce Zachodniej w lipcu 1934 r.* Czas. Geogr., 13, s. 283-291.
- Klimek K., 1972, *Współczesne procesy fluwialne i rzeźba równiny Skeidarasandur (Islandia)*. Pr. Geogr. IG PAN, 94, ss. 139.
- 1974a, *The retreat of alluvial river banks in the Wistoka valley (South Poland)*. Geogr. Pol., 28, s. 59-75.
- 1974b, *The structure and mode of sedimentation of the floodplain deposits in the Wistoka Valley (South Poland)*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 8, s. 135-151.
- 1979, *Gemorfologiczne różnicowanie koryt karpackich dopływów Wisły*. Fol. Geogr. Ser. Geogr. -Phys., 12, s. 35-47.
- Klimek K., Starkel L., 1974, *History and Actual Tendency of Flood-plain Development at the Border the Polish Carpathians*: Nachr. Acad. Göttingen, Report of Commission on Present-day Geomorph. Proces (IGU), s. 185-196.

- Klus T., 1965, *Wpływ lokalnych warunków na odpływ w wybranych zlewniach górskich*. Zesz. Nauk. WSR w Krakowie, 25.
- Koniar-Schaeferowa J., 1972, *Niektóre przyczyny szkód powodziowych w regulowanych korytach potoków karpackich na przykładzie powodzi w lipcu 1970 r.* Spraw. z Posiedz. Komis. Nauk. PAN, styczeń-czerwiec 1971, 15/1, s. 207-208.
- 1976, *Ochrona środowiska geograficznego w zabudowie potoków górskich*. Materiały na konferencję w Jadwisinie k. Serocka: Wpływ melioracji wodnych na środowisko geograficzne. PAN, cz. II, Warszawa, s. 216-224.
- Kotarba A., 1972, *Powierzchniowa denudacja chemiczna w wapienno-dolomitowych Tatrach Zachodnich*. Pr. Geogr. IG PAN, 96, ss. 116.
- Krzemień K., 1976, *Współczesna dynamika koryta potoku Konina w Gorcach*. Fol. Geogr. Ser. Geogr. -Phys., 10, s. 87-122.
- Kunkle G. R., 1965, *Computation of ground-water discharge to streams during floods, or to individual reaches during base flow, by use of specific conductance*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 525-D, s. 207-210.
- Langer M., 1950, *Próby badania ruchu rumowiska na Sole i Dunajcu w roku 1929*. Wiad. Służ. Hydrol. i Meteor., 2, 1, s. 89-93.
- Leopold L. B., Wolman M. G., Miller J. P., 1964, *Fluvial Processes in Geomorphology*. W. H. Freeman and Company, San Francisco and London, ss. 522.
- Lisicyna K. N., Bogolubowa I. W., 1964, *Izuczenije stoka nanosow ruczjew*. Tr. Gos. Gidrol. Inst., 111, s. 5-33.
- Lusby G. C., 1977, *Determination of Runoff and Sediment Yield by Rainfall Simulation*, [w:] *Erosion, Research Techniques of Erodibility and Sediment Delivery*, red. T. J. Toy, Geo Book Great Britan by Headley Brothers, s. 19-30.
- Madeyski M., 1976, *Związek między ilością rumowiska unoszonego i przepływem w falach powodziowych dla przekroju Proszówki na rzece Rabe*. Probl. Zagosp. Ziem Górskich, 17, s. 167-178.
- Maksimowicz G. A., 1953, *O roli atmosferycznych osadków w pierienosie rastworiennych wieszczestw*. Dokl. Akad. Nauk SSSR, 2, s. 401-403.
- Marsz A., 1967, *O możliwości stosowania materiału znaczonego luminoforami do badania niektórych procesów sedymentologicznych*. Zesz. Nauk. UAM w Poznaniu, Geografia, 7, s. 81-87.
- Maultz S., 1972, *Chemizm wód dopływów górnej Wisty*. Fol. Geogr., Ser. Geogr. -Phys., 6, s. 5-101.
- Meade R. H., 1969, *Errors in using modern stream-load to estimate natural rates of denudation*. Geol. Soc. of Am. Bull., 80, s. 1265-1274.
- Mikułski Z., 1961, *Transport zawiesiny mineralnej w rzekach polskich*. Gosp. Wod., 10 (178), s. 461-462.
- 1965, *Zarys hydrografii Polski*. PWN, Warszawa, ss. 288.
- Miller J. P., 1961, *Solutes in small streams draining single rock types, Sangre de Cristo Range, New Mexico*. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Pap., 1535 F, ss. 23.
- Nakamura R., 1971, *Runoff analysis by electrical conductance of water*. J. of Hydrol., 14, s. 197-212.
- Nawara K., 1964, *Transport i sedymentacja współczesnych żwirów Dunajca i jego niektórych dopływów*. Pr. Muzeum Ziemi, 6, s. 3-111.
- 1965, *Transport i sedymentacja współczesnych piasków Dunajca i jego niektórych dopływów*. Acta Geol. Pol., 15, s. 501-520.
- Newbury R. W., Cherry J. A., Cox R. A., 1969, *Groundwater-streamflow*

- systems in the Wilson Creek Experimental Watershed, Manitoba. Canadian J. Earth Sc., 6, s. 613-623.
- Niedziałkowska E., 1981, *Rzeźba terenu*, [w:] Warunki naturalne zlewni Homerki i jej otoczenia. Dok. Geogr., 3, s. 13-21.
- Niedźwiedź T., 1972, Heavy rainfall in the Polish Carpathians during the flood of July 1970. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 194-198.
- 1981, *Klimat*, [w:] Warunki naturalne zlewni Homerki i jej otoczenia. Dok. Geogr., 3, s. 22-42.
- Niemirowski M., 1972, Comparison of the effects of floods in two catchment basins of the George Mts (Beskid Sądecki). Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica 6, s. 201-203.
- 1974, *Dynamika współczesnych koryt potoków górskich (na przykładzie potoków Jaszce i Jamne w Gorcach)*. Zesz. Nauk. UJ Pr. Geogr., 34, ss. 98.
- Nordin C. F., 1963, A preliminary study of sediment transport parameters of Rio Puerco near Bernardo, New Mexico. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 462-C, ss. 21.
- Nordin C. F., Dempster G. R., 1963, Vertical distribution of velocity and suspended sediment in middle Rio Grande, New Mexico. U.S. Geol. Surv. Prof., Pap., 462-B, ss. 20.
- Osuch B., 1968, Problemy wynikające z nadmiernej eksploatacji kruszywa rzecznoego na przykładzie rzeki Wisłoki. Zesz. Nauk. AGH w Krakowie., 219, s. 283-301.
- Palmer R. S., 1965, Waterdrop impact forces. Trans. Am. Soc. Agr. Eng., 8. 1, s. 69-70, 72.
- Pasławski Z., 1960, Dokładność rocznego modułu przepływu. Gosp. Wod., 2 (26), s. 99-99.
- 1965, Rozważania nad metodyką badań ilościowych unoszonego rumowiska rzecznoego. Wiad. Służ. Hydrol. i Meteor., 1 (61), s. 77-89.
- Pasternak K., 1968, Skład chemiczny wody rzek i potoków o zlewniach zbudowanych z różnych skał i gleb. Acta Hydrob., 10, s. 1-25.
- 1973, Analiza możliwości ograniczenia postępu zamulania górnej części zbiornika rożnowskiego i perspektywa innego wykorzystania jego zbyt wypłyconych obszarów. Probl. Zagosp. Ziem Górskich, 12, 93-129.
- Pasternak K., Cyberski J., 1973, Skład granulometryczny unosin wód rzek karpaccich na tle jakości podłoża ich zlewni. Probl. Zagosp. Ziem Górskich, 12, s. 131-152.
- Pietruszewski W., 1955, Określenie zasobów szutrów w cofkach zbiorników wodnych. Gosp. Wod., 1 (98), s. 31-33.
- Piotrowski J., 1977, Podstawy metrologii. PWN, Warszawa, ss. 242.
- Polak S., 1965, Erozja gleb w obrębie zlewni potoku Brzeźnianka w powiecie Nowy Sącz. Rocz. Gleb., 1, 15, s. 205-230.
- Porterfield G., 1972, Computation of fluvial-sediment discharge. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey (Applications of Hydraulics), 3, C3, ss. 66.
- Prochal P., 1958, Badania sieci hydrograficznej oraz stanu zlewni potoku Biała Woda w Jaworkach. Rocz. Nauk Rol., 72-F-3, s. 1273-1279.
- 1960, Przyrodnicze i techniczne podstawy walki z erozją gleb w górnym dorzeczu Soły. Rocz. Nauk Rol., 74-F-2, s. 287-329.
- 1968, Badania nad erozją gleb w terenach górskich. Procesy erozyjne i problemy ochrony gleb w Polsce. Katedra Melioracji WSR Lublin, 2, s. 51-92.
- 1973, Czynniki wpływające na natężenie zmywów i ruchu rumowiska w zlewni potoku Wierchomla Wielka. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 151, s. 31-48.

- Pulina M., 1974, *Denudacja chemiczna na obszarach krasu węglanowego*. Pr. Geogr. IGiPAN, 105, ss. 155.
- Punzet J., 1978, *Zasoby wodne dorzecza górnej Wisły*. IMGW, Materiały Badawcze, Warszawa.
- Reniger A., 1955, *Erozja gleb na terenie podgórskim w obrębie zlewni potoku Łukowica*. Roczn. Nauk Rol., 71-F-1, s. 149-210.
- 1959, *Zagadnienie erozji gleb w Polsce*. Pr. i Stud. Komis. Gosp. Wod., 1.
- Richrds K. S., Milne L. M., 1979, *Problems in the calibration of an acoustic device for the observation of bedload transport*. Earth Surface Proc., 4, s. 307-317.
- Roehl J. W., 1962, *Sediment source areas, delivery ratios, and influencing morphological factors*. Int. Ass. Sc. Hydrol., 59 s. 202-213.
- Rutkowski J., 1977, *On petrographic variability of Holocene gravels in the Polish Carpathians*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 11, s. 53-65.
- Schumm S. A., 1963, *The disparity between present rates of denudation and orogeny*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 454 H, ss. 13.
- 1977, *The Fluvial System*. Wiley Interscience Publications, New York — London — Sydney — Toronto, ss. 338.
- Selby M. J., 1974, *Rates of denudation*. New Zealand J. of Geogr., 56, s. 1-14.
- Simons D. B., Richardson E. V., 1966, *Resistance to flow in alluvial channels (Physiographic and hydraulic studies of rivers)*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 422-J, ss. 61.
- Slaymaker O., 1980, *Geomorphic field experiments inventory and prospect*. Zf. Geomorph. suppl., 35, s. 183-194.
- Słota H., 1972, *Zmienność lokalna rumowiska dennego rzeki Raby*. Mat. Bad. Inst. Gosp. Wod., ser. Budownictwo Wodne, 4, ss. 29.
- Słupik J., 1973, *Zróżnicowanie splywu powierzchniowego na fliszowych stokach górskich*. Dok. Geogr., 2, ss. 118.
- 1976, *Zastosowanie zdjęć lotniczych w określaniu wpływu bruzd i dróg polnych na strukturę bilansu wodnego stoków górskich*. Pr. Nauk Uniw. Sl., 126, Fotointerpretacja w Geografii, 11, s. 31-38.
- 1981, *Rola stoku w kształtowaniu odpływu w Karpatach fliszowych*. Pr. Geogr. IGiPZ PAN, 142, ss. 98.
- Smith D. D., Wischmeier W. H., 1957, *Factors affecting sheet and rill erosion*. Trans. Am. Geoph. Un., 38, 6, s. 889-896.
- Sobczak J., 1965, *Krzywe związków między wodostanem a masą transportowaną*, Zesz. Nauk. P. Krak., 10, Budownictwo Wodne, 9, ss. 44.
- Soja R., 1977, *Deepening of channel in the light of the cross profile analysis (Carpathian River as example)*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 11, s. 127-138.
- Stangenberg M., 1958, *Ogólny pogląd na skład chemiczny wód rzecznych Polski*. Pol. Arch. Hydrob., 4 (17), s. 289-359.
- Starkel L., 1957, *Rozwój morfologiczny progów Podgórz Karpackiego między Dębicą a Trzycianą*. Pr. Geogr. IG PAN, 11, ss. 152.
- 1960, *Rozwój rzeźby Karpat fliszowych w holocenie*. Pr. Geogr. IG PAN., 22, ss. 239.
- 1972a, *Observations on the morphological role of heavy rainfall in the Flysch Carpathians in July 1970*. Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 191-194.
- 1972b, *Charakterystyka rzeźby Polskich Karpat (i jej znaczenie dla gospodarki ludzkiej)*. Probl. Zagosp. Ziem Górskich, 10, s. 75-150.
- 1979, *On some questions of the contemporary modelling of slopes and valley*

- bottoms in the flysch Carpathians. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica*, 13, s. 191-206.
- Staszkiwicz J., 1981, *Zbiorowiska roślinne*, [w:] *Warunki naturalne zlewni Homerki i jej otoczenia*. *Dok. Geogr.*, 3, s. 43-50.
- Stoddart D. R., 1969, *World Erosion and Sedimentation*, [w:] *Water, Earth and Man*, red. R. J. Chorley, Methuen, London, s. 43-64.
- Strakhov N. M., 1967, *Principles of Lithogenesis*. I, New York, ss. 245
- Sundborg A., 1956, *The River Klaralven. A study of fluvial processes*. *Geogr. Ann.*, 38, s. 127-316.
- Unrug R., 1957, *Współczesny transport i sedymentacja żwirów w dolinie Dunajca*. *Acta Geol. Pol.*, 7, s. 217-257.
- Van Zon H. J. M., 1980, *The transport of leaves and sediment over a forest floor. A case study in the Grand Duchy of Luxembourg*. *Catena*, 7, s. 97-110.
- Walling D. E., 1971, *Sediment dynamics of small instrumented catchments in southeast Devon*. *Trans. Devonshire Ass.*, 103, s. 147-165.
- 1974, *Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization*. *Inst. of British Geogr. Spec. Publ.*, 6, s. 169-192.
- 1977, *Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin*. *Water Resources Res.*, 13, 3, s. 531-538.
- 1978, *Reliability considerations in the evaluation and analysis of river loads*. *Z. f. Geomorph. suppl.*, 29, s. 29-42.
- Walling D. E., Webb B. W., 1980, *The spatial dimension in the interpretation of stream solute behaviour*. *J. of Hydrol.*, 47, s. 129-149.
- Welc A., 1972, *Transportation of suspended matter in the rivers Ropa and Bystrzanka and magnitude of wash down during the flood in July 1970*. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica*, 6, s. 206-209.
- 1973, *Transport of material carried out the Bystrzanka catchment area during spring snow melting in 1971*. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica*, 7, s. 131-141.
- 1978, *Spatial differentiation of chemical denudation in the Bystrzanka flysch catchment (the West Carpathians)*. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica*, 12, 149-162.
- 1980, *Wpływ opadów na wielkość denudacji chemicznej w obszarze górskim na przykładzie badań w zlewni Bystrzanki*. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 235, s. 307-318.
- Winkler E. H., 1970, *Errors in using modern stream — load data to estimate natural rates of denudation: discussion*. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, s. 983-984.
- Wiśniewski B., 1969, *Zamulanie zbiorników wodnych w Polsce oraz próba jego prognozy na podstawie intensywności denudacji*. *Arch. Hydrot.*, 16, 4, s. 481-504.
- 1972, *Ilość rumowiska unoszonego i wleczzonego w rzekach polskich*. *Gosp. Wod.*, 10-11 (306), s. 381-386.
- Wit-Jóźwik K., 1981, *Wody podziemne i powierzchniowe*, [w:] *Warunki naturalne zlewni Homerki i jej otoczenia*. *Dok. Geogr.*, 3, s. 77-89.
- Wolman M. G., Miller J. P., 1960, *Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes*. *J. of Hydrol.*, 68, s. 54-74.
- Woźniak-Strojna Z., 1963, *Przebieg i rozmiary współczesnego modelowania zlewni potoku Błczyckiego przez procesy denudacyjne*. *Dok. Geogr.*, 5, s. 1-37.
- Wróbel S., 1976a, *Skład chemiczny wód śródlądowych ze szczególnym uwzględnieniem podstawowych składników pokarmowych*, [w:] *Hydrobiologia*. PWN, Warszawa, s. 135-175.
- 1976b, *Eutrofizacja wód*, [w:] *Hydrobiologia*. PWN, Warszawa, s. 176-213.

- Ziemnicki S., 1955, *Ochrona gleb przed erozją wodną stosowana przez rolników w niektórych rejonach Polski*. Ann. UMCS, ser. B, 10, 2, s. 109–178.
- Ziemońska Z., 1973, *Stosunki wodne w Polskich Karpatach Zachodnich*. Pr. Geogr. IG PAN, 103, ss. 126.
- Ziemska H., 1928, *Próba spostrzeżeń i badań nad erozją wód Wisłoka*. Czas. Geogr., 6, s. 102–106.
- Ziętara T., 1968, *Rola gwałtownych ulew i powodzi w modelowaniu rzeźby Beskidów*. Pr. Geogr. IG PAN, 60, ss. 116.
- 1974, *Uwagi o roli murów w modelowaniu rzeźby Karpat*. Roczn. Nauk. Dydak. WSP Kraków, Pr. Geogr., 6, s. 5–41.

МЕХАНИЗМ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА И ПОСТАВКА ДРЕСВЫ В РУСЛО ГОРНОГО ФЛИШЕВОГО ВОДОСБОРНОГО БАССЕЙНА

Резюме

Работа базируется на результатах 10-летнего (1969-1978) цикла стационарных, местных и экспериментальных исследований. Цель работы — изучение механизма процессов водного транспорта и количественной оценки источников поставки растворенного материала и клас-тической дресвы в русло Бескидского водного бассейна. Главное внимание обращено на изучение закономерностей пространственного дифференцирования этих процессов в геоморфологическом аспекте, на основании трансформации осадков в сток, путем определения:

- количественных связей между гидрологическими параметрами и параметрами транспорта материала,
- количественной доли отдельных источников поставки материала со опытного склона в русло в сравнении с транспортируемым в русле грузом,
- трансформации транспортированного груза с ходом русла (приростом поверхности водосборного бассейна) в водосборных бассейнах различной величины.

В работе обращено внимание на оценку точности применяемых методов и полученных результатов в свете анализа ошибок и связь результатов исследований с планировкой водосборного бассейна и регулированием русла потоков.

Исследования проведены в водосборном бассейне Навойовской Каменицы (Сондецкий Бескид — Западные Карпаты) и ее притоках (потоки: Крысцов, Хомерка с притоком Бонча; рис. 1, 2) и на опытном склоне (рис. 2, 3; табл. 3; фот. 5). Водосборный бассейн Навойовской Каменицы площадью 239 кв. км (1084-280 м над ур. моря) является Бескидским водосборным бассейном средней величины построенным с комплексов флишевых скал с различной устойчивостью на выветривание. В ландшафте доминирует среднегорный рельеф с большой долей высоких и средних взгорий. Склоны покрыты глинисто-пылистым покровом мощностью растущем у подножья. Горную часть водосборного бассейна с крутыми склонами (15-30°) и более скелетными мелкими почвами, а также крутые склоны взгорий занимают леса (42,7% поверхности водосборного бассейна). Лесные просторы порезаны густой сетью грунтовых дорог и желобов для транспорта древесины. Более нижние части склонов занимают пропашные поля (35,6% поверхности водосборного бассейна; фот. 5), а дна долин и более влажные места — луга и пастбища (8,7% поверхности водосборного бассейна). К мозаике полей навязывает решетчатая система полевых дорог (рис. 3; фот. 5).

Горную часть водосборного бассейна с среднегорным рельефом представляет симметрическая, узкая, в 82% обезлесенная водосборная площадь потока Крысцов (рис. 1) площадью 7,03 кв. км (1080-520 м над ур. моря). Широкая в большой степени обезлесенная водосборная площадь потока Хомерка (1060-375 м над ур. моря) площадью 19,6 кв. км характеризуется большим участием средних и высоких взгорий (рис. 1, 2). Леса здесь занимают 52% площади, а земельные угодья концентрируются в более низких партиях водосборного бассейна, где рельеф имеет характер низких гор и высоких взгорий. В этой зоне расположена асимметрическая обезлесенная водосборная площадь потока Бонча (3,95 кв. км) и опытный склон (рис. 2, 3; фот. 5; табл. 3).

Опытный склон в водосборном бассейне Хомерки предоставляет три основные, в Карпатах потенциальные, территории питания водотока водой, а также продуктами выветривания и эрозии: 1 — водосборный бассейн голоценового разреза линейно обезвоживающего вогнутую часть склона; 2 — водосборный бассейн полевых дорог на прямых или выпуклых частях склона; 3 — водосборный бассейн приречий обезвоживающих поверхностным рассеянным стоком.

Экспериментальные исследования проводились в опытном русле составляющем 400 м отрезок скального русла потока Хомерка (фот. 3,4) и разбрызга почвы на опытных участках симулирующих грунтовую дорогу и спашанное поле. Работу выполнено в Опытной станции геоморфологической лаборатории Института географии и планировки Польской академии наук (рис. 1, 2; фот. 7).

Основные измерения транспорта растворенного материала, суспензии и глубинного заряда проводились в гидрометрических сечениях с лимиграфами (рис. 1, 2; фот. 8). С целью изучения правильности пространственной неоднородности поставки материала в русла и трансформации транспортируемого груза вдоль русла (приростом поверхности водосборного бассейна) в период меженных вод и различного типа паводков, проводились измерения в различных пунктах водосборного бассейна и на опытном склоне (рис. 1, 2, 3). Точки измерений на опытном склоне концентрированы у подножия с целью учета влияния целого склона на доставку воды и дресвы в русло. Результаты исследований разработано стандартными статистическими методами.

В период трансформации осадков в отлив происходит непрерывное изменение химических параметров вод берущих участие в круговороте от сильно кислых осадочных вод, через нейтральные речные воды к щелочным подземным водам. Соответствует им изменение химических реакций от окисления до восстановительной реакции (рис. 8). Концентрация главных ионов происходящих из субстрата является прямо пропорциональной к концентрации растворенного материала (рис. 9), которая навязывает к механизму круговорота воды (рис. 10) Таким образом интенсивность и направление процессов химической денудации зависит от участия отдельных звеньев круговорота воды в процессе формирования оттока. Изучение химических особенностей вод облегчает определение роли отдельных типов вод в процессе выщелачивания субстрата и поставки в русло растворенного материала. Это ключ к изучению пространственной неоднородности интенсивности процессов химической денудации, а также составляет основу оценки количественной репрезентативности водосборного бассейна.

Связь между течением воды (Q) и концентрацией растворенного материала (Cd) имеет вид узких петель характеризующихся индивидуальной формой для каждого паводка (рис. 12, 14, 16, 18). В период паводков с несколькими кульминациями течения, каждой кульминации соответствует иная генерация петли. Петли состоят с двух отчетливых членов соответствующих периоду роста и понижения уровня воды. Наиболее низкая концентрация растворенного материала приходится на кульминацию течения (рис. 11, 13, 15, 17). Ход роста концентрации растворенного материала после кульминации является зеркальным отражением кривых регрессии течения (рис. 19, 20).

В годичном цикле самые низкие величины концентрации растворенного материала отмечено во время паводков из таяния снега. В период дождевых паводков концентрация растворенного материала зависит от типа осадков. Большое участие межпаводкового стока в образовании паводков созданных разливными осадками приводит к тому, что они характеризуются более высокой концентрацией растворенного материала, чем паводки вызванные ливнями с большим поверхностным стоком в образовании кульминации течения. Почти по правилу при подобных течениях, очередные быстро следующие друг за другом паводки характеризуются все меньшей концентрацией растворенного материала. Это следует взять с временным „недобором” растворенных солей с одних и тех же территорий снабжения, что указывает на существенную роль времени в процессе выщелачивания субстрата.

Связь между течением воды (Q) и концентрацией растворенного материала (Cd) можно описать при помощи уравнения криволинейной регрессии в виде $y = a^x - b$ (рис. 21, 22).

Эта зависимость может быть применена к количественной, вступительной оценке поверхностной и подповерхностной поставки растворенного материала. В приречья Навойовской Каменицы графическим образом этой зависимости в системе логарифмических координат являются простые линии почти параллельные между собой (рис. 22). Наиболее высокое положение в системе занимает Навойовская Каменица, а последовательно ниже водосборные бассейны ее притоков различной величины. Это иерархическое установление в ряд водосборных бассейнов указывает, что концентрация растворенного материала изменяется в определенном установленном порядке зависимым от величины водосборного бассейна и его расположения относительно главного водотока. Концентрация растворенного материала растёт обратно пропорционально к величине единичного стока.

Отклонения в ходе связи между течением воды (Q) величиной растворенного материала (L_d) для отдельных притоков Навойовской Каменицы указывают на большую неоднородность величины выноса груза с отдельных водосборных бассейнов (рис. 24). Поэтому следует сохранить осторожность при экстраполировании количественных данных полученных путем традиционных измерений интенсивности денудации с гидрометрического сечения с малого на большой водосборный бассейн и обратно, даже если это касается сравнительно однородного приречья (рис. 25).

Связь между приростом поверхности водосборного бассейна (длиной водотока) и концентрацией растворенного материала и отдельных ионов приближает уравнение линейной регрессии (рис. 26, 27, 30). Исключение составляет поток Бонча, для которого эта зависимость имеет криволинейный характер. Это связано с асимметрией водосборного бассейна этого потока. Прямо пропорционально к приросту поверхности водосборного бассейна возрастает течение воды и транспортируемый груз растворенного материала (рис. 31). Неоднородность единичной денудации с приростом поверхности водосборного бассейна можно описать при помощи уравнения гиперболы в виде $y = (ax + b)/x$. С хода этой зависимости следует, что в зависимости от расположения гидрометрического сечения в водосборном бассейне получатся различные величины интенсивности химической денудации в ее классическом виде.

В характере связей приближающих закономерности пространственной неоднородности параметров химической денудации в малом водосборном бассейне отмечается отчетливая разница между симметрическими водосборными бассейнами (Хомерка, Крысцув) и асимметрическими (Бонча). Отсюда следует, что в исследованиях сопоставляемых водосборных бассейнов необходимо добирать водосборные бассейны того же типа и величины. Это очень существенный показатель репрезентативности водосборного бассейна с точки зрения правильности пространственной неоднородности интенсивности денудации.

Механизм транспорта растворенного материала на полевых дорогах и водотоке обезживающим голоценомский разрез на опытном склоне похож к механизму транспорта в руслах потоков (рис. 22, 23, 24, 25, 32). Каждый путь характеризуется индивидуальными признаками режима транспорта, которые зависят от глубины оврага дороги, то есть объема ее водосборного бассейна. В поверхностной поставке растворенного материала с опытного склона в русло потока Хомерка главное значение имеет линейная поставка с полевых дорог и голоценомского сечения. Непосредственная поставка с приречий водами поверхностного рассеянного стока имеет небольшое значение (рис. 10; таб. 3).

Поверхность водосборных бассейнов, которые являются основными территориями поставки растворенного материала в Бескидском водосборном бассейне, меняется в зависимости от частоты осадков и во время осадков в зависимости от интенсивности, начальной влажности почвы и ее проницаемости. Эта экспансия и уменьшение зон доставки растворенного материала происходит, как во время осадков так и во время регрессии течения после осадков, через изменение длины водотока ведущего воду, а также изменение поверхности занятой зоной насыщенной водой. Эта динамика поставки навязывает к переменным во времени и пространстве территориям и источникам питания водой (Dunne, Black 1970; Slupik 1981).

Межпокровные воды находящиеся на различных глубинах не меняют равномерно своих химических признаков в профиле склона от водораздела до дна долины (рис. 33, 34). Это свидетельствует о сложных механизмах кругооборота этих вод и выщелачивания подземного водосборного бассейна. Диапазон изменчивости концентрации растворенного материала связан с типом источника. Этот диапазон больше в мелких источниках выветривания, чем в глубоких скальных (рис. 22, 35). Это связано с более длинным временем круговорота вод и уменьшающимся с глубиной выщелачиванием субстрата.

Кластическая дресва транспортированная в эмульсии состоит в большинстве случаев с илесто-пылистых фракций с примесью различнозернистых песков (рис. 37). Участие илистых фракций в эмульсии возрастает с ходом русла. Наибольшая неоднородность механического состава эмульсии приходится на период усиления течения. Зато во время опадения воды транспортируемый в эмульсии материал становится все мельче и гранулометрически однородный (рис. 38). Во время небольших паводков в большинстве транспортируются илистые фракции, во время средних паводков — пыльные, а во время больших — песчаные.

Кульминация концентрации эмульсии, как правило опережает кульминацию течения (рис. 41, 42). В ходе изменений концентрации эмульсии во время паводка можно отметить две фазы связанные с ростом и уменьшением течения. Это находит свое отражение в форме петель описывающих связи между течением воды и концентрацией эмульсии. Каждый паводок характеризуется иным видом петли (рис. 43, 44). Таким образом каждое интерполяционное приближение для периодов не имеющих измерений будет иметь ошибку.

Количество дресвы возможной для введения в движение растет прямо пропорционально к длине междупаводкового периода. Поэтому паводки, разделенные длинными периодами суши или кратковременными осадками небольшой интенсивности, характеризуются высокой концентрацией эмульсии.

В симметрических водосборных бассейнах с приростом их поверхности концентрация и груз эмульсии растет линейно, а в асимметрических водосборных бассейнах криволинейно. Криволинейный характер имеет также связь механической единичной денудации с приростом поверхности водосборного бассейна. Для водосборного бассейна Хомерки приближает его уравнение гиперболы. Каждый водосборный бассейн обнаруживает индивидуальный режим транспорта эмульсии. Поэтому экстраполяция показателей механической денудации даже в области одного прироста с малого водосборного бассейна на больший и обратно, а также на водосборные бассейны похожей величины не находит своего обоснования в пространственной дифференциации процессов.

Поставка кластической дресвы со склонов в русла происходит, главным образом, при участии полевых дорог входящих непосредственно в русло и голоценовых сечений. В водосборном бассейне Хомерки поставка с грунтовых дорог составляет 70-80% годового груза эмульсии выносимой с водосборного бассейна. Непосредственная поставка дресвы в русло через рассеянное полоскание в районе приростов с постоянными лугопастбищными угодьями не имеет большого значения (табл. 5) а в годовом масштабе составляет меньше чем 1% груза эмульсии вынесенного с водосборного бассейна Хомерки.

Высокая концентрация эмульсии в стекающих водах грунтовыми дорогами (максимальная наблюдаемая $147\,889\text{ мг. дм}^{-3}$) тесно связана с интенсификацией разбрызга почвы. Результаты экспериментальных исследований разбрызга почвы на опытных участках похожих к спашанному полю и грунтовой дороге указывают, что интенсификация этого процесса может быть в 30 раз больше на грунтовой дороге, чем на пахотном поле (рис. 55, 56, 57).

Механизм процессов поставки кластических выветриваний со склона в русло похоже, как в случае растворенного материала навязывает к уменьшению и экспансии зон питания водой во время паводков. Таким образом при помощи модели переменных во времени и пространстве источников и территорий питания водой можно объяснить механизм поставки кластической дресвы со склонов в русло.

Транспорт донного груза в отдельных отрезках русла начинается в различное время

перед кульминацией паводка и продолжается с переменной интенсивностью до момента отчетливого спада течения (рис. 64). Связь между течением воды и интенсивностью транспорта донного груза имеет вид петли (рис. 64). Каждый паводок характеризуется своеобразным ходом петли. После продолжительного периода без паводков транспортируемый донный груз является значительно больше, чем в очередных паводках. Похожей величины от тепельные и дождевые паводки вызванные разливными осадками, переносят значительно больше груза донного материала чем бурные паводки вызванные интенсивными ливнями. Неоднородность длины дороги преодолеваемой отдельными гальками (рис. 66) связана с линиями течения и мертвыми зонами в русле. С ходом русла груз донного материала разлет линейно.

Транспорт гравиевого донного груза продолжается в среднем меньше, чем 1% времени года (рис. 48). Составляет он от 1-12% годичного груза эмульсии. Учитывая песчано-пылистые фракции транспортируемые как донный груз во время меньших паводков, его величину можно оценить на 3-16% груза эмульсии.

Процесс углубления русла проходит с переменным напряжением на всей его длине (рис. 67, 68). Периоды усиленной эрозии наступают после периодов ее ослабления и даже тенденции к медленной аградации. Главной причиной роста усиления углубления за последние десятилетия является эксплуатация аллювия и регуляция русла.

Углубление русел вызывает рост их емкости и ведет к увеличению относительной высоты заливных террас. Во время последовательных паводков они почти не заливаются и застраиваются внерусловой фацией. В настоящее время все большая часть груза кластической дресвы транспортированной в эмульсии во время паводка переносится на подступы гор и способствует быстрому росту заливных равнин, или подвергается седиментации в плотинных водохранилищах. Путем увеличения объема русла происходит их адаптация к паводочным руслам. Это вызывает рост концентрации энергии в руслах во время паводков, что при большой поставке наноса, происходящего с углубления русла усиливает тенденцию к росту интенсивности транспорта донного груза. Исключением являются русла характеризующиеся нехваткой донного наноса, что связано с чрезмерной эксплуатацией аллювия или присутствием противонаносных плотин.

Автор провел оценку методов и результатов исследований в свете анализа ошибок. Он считает, что главным источником ошибок является слабое знакомство механизма процессов, малая частота измерений (табл. 6, 7), упрощенные подсчеты и несоответственно применяемые методы. Незнакомство с величиной и знаком ошибок затрудняет сравнения результатов и их экстраполяцию.

Слабое знакомство механизма и интенсивности флювиальных процессов является причиной успешности регуляции русел. Для отдельных типов русел следует запроектировать индивидуальные регуляционные системы выполняющие условия динамического равновесия.

Перевел Тадеуш Казьмерчак

THE MECHANISM OF FLUVIAL TRANSPORT AND WASTE SUPPLY INTO THE STREAM CHANNEL IN A MOUNTAINOUS FLYSCH CATCHMENT

Summary

This work is based on the results of a 10-year (1969–1978) cycle of at a station research and field experiments. It has two objects: to recognize fluvial transport mechanisms, and to make the quantitative distinction between different source areas of dissolved solids and clastic waste supply into the stream channel within a Beskidian catchment. Attention has been focused particularly upon the principles of spatial variations of the above processes in their geomorphological aspect. Against the background of the transformation of precipitation input into runoff, it was necessary to define:

- the quantitative relationships between hydrological parameters and those of the sediment transport;
- the quantitative share of the individual source areas in supplying sediment from the experimental slope into the channel, when compared with the transported load in the channel;
- the way in which the transported load is being transformed in a downstream direction (increasing basin area) within the different catchments varying in size.

Furthermore, the accuracy in the various methods used and results obtained has been validated by error analysis and the research results related both to land use patterns and to channel correction.

Studies have been undertaken in the drainage basins of the Kamienica Nawojowska River (the Beskid Sądecki Mts in the Western Carpathians) and of its tributaries, the streams Kryściów and Homerka with the Bącza (Fig. 1, 2), and on an experimental slope (Fig. 2, 3; Tab. 3, Phot. 5). The 239 km² Kamienica Nawojowska catchment (1084–280 m a. s. l.) is a medium-sized Beskidian drainage basin which is underlain by flysch rocks of varying resistance to weathering. The dominant relief type are mountains of intermediate height with a plenty of high and medium hills. The watershed slopes bear clay-silty sheets which increase in depths at the foot of slopes. The mountainous part of the catchment having steep slopes (15–30 °) and more skeletal shallow soils as well as the steep hill-sides are forested (42.7% of basin area). The woodlands show a dense network of unprepared roads and lumber tracks. The lower valley floors and moister places are occupied by meadows and pastures (8.7% of basin area). To the chequer wise fields the cross-lined pattern of the unprepared roads is adjusted (Fig. 3; Phot. 5).

The mountainous part of the catchment (situated in the mountains of intermediate height) is represented by the symmetrical and narrow 7.03 km² Kryściów watershed (1080–520 m a. s. l.) in which 82% of the area is covered by forests. The wide largely clearcut Homerka watershed (1060–375 m a. s. l.) has an area

of 19.6 km² with medium and high hills (Fig. 1,2). Forests occupy 52% of the area. The lower portion of the watershed, in which low mountains and high hills are found, is dominated by cultivated land. Within this zone there occurs the asymmetrical clearcut 3.95 km² Bączka watershed as well as the experimental slope (Fig. 2,3; Phot. 5; Tab. 3).

The experimental slope lying within the Homerka catchment represents the three basic, in the Carpatians at least, potential source areas of runoff production and of slope-derived material supply into the stream channel: 1 — the watershed of a Holocene gully draining linearly the concave slope portion; 2 — the watershed of the unprepared roads occurring in the straight and convex slope portions; 3 — the contributing areas proximate to the watercourse that are being drained by dispersed sheetflow.

Experimental studies have been carried out in an experimental channel, i. e. the rock-cut Homerka stream channel, 400 m long (Phot. 3,4). Rainsplash erosion has been observed on experimental plots simulating both an unprepared road and a ploughed field. The work was done at the Research Station of the Department of Geomorphology and Hydrology in Krakow, Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences (Fig. 1,2; Phot. 7).

The basic measurements of the dissolved solids, suspended sediment and bed-load transport were made at hydrometric sections equipped with a water stage recorder (Fig. 1,2; Phot. 8). In order to find the principles both of spatial variations in material supply into the channels and of transformations of the transported loads that takes place in a downstream direction (increasing basin area) at minimum and maximum discharges of different origins measurements were made at various spots situated within the catchment and on the experimental slope (Fig. 1-3). On the latter one the measurement spots were at its foot. Thus it was possible to determine the influence of the entire slope upon the supply of water and waste material into the stream channel. In the processing of data standard statistical methods were used.

The transformation of precipitation input into runoff is accompanied by a continuous change in the chemical properties of water involved in the water circulation cycle. These range from the slightly acid precipitation water through the neutral stream water to the alkaline underground waters. The corresponding changes of chemical reactions vary from oxidization to reduction (Fig. 8). Concentrations of the main ions contributed by the substratum are proportional to dissolved solids concentrations (Fig. 9) which in turn are controlled by the water circulation mechanisms (Fig. 10). It appears that both the intensity and trend of the chemical denudation processes depends upon the share within the runoff formation of the particular components members of water circulation cycle. A knowledge of the particular type of water in leaching of the substratum and in supplying the channel with dissolved solids. This is the key for the understanding of spatial variations in the chemical denudation rates. It also provides a basis for evaluating the quantitative representativeness of a watershed.

The plot for the relationship between discharge (Q) and total dissolved solids concentration (C_d) assumes the form of a tight loop varying in shape during the different high stages (Fig. 12, 14, 16, 18). At times of high stage with several peaks, each of the peaks exhibits another loop generation. Each loop consists of two distinct limbs corresponding to the rising and the falling stage. Minimum dissolved solids concentration is associated with maximum discharge (Fig. 11, 13, 15, 17). After the peak, the plot for the rising solute concentration is the hysteretic reflection of the discharge recession curve (Fig. 19, 20).

Within the year the minimum total dissolved solids concentration was associated with snowmelt floods. At times of rain flood the dissolved solids concentra-

tion depends upon the type of rainfall. Because of high share of the throughflow in producing floods during the prolonged rainfalls, total dissolved solids concentrations are higher than during the storm floods. As a rule a series of closely spaced and similar high discharges exhibits progressively lower dissolved solids concentrations. This feature should be explained by a temporary "deficit" of soluble salts contributed by the same source areas. Thus the process of leaching of the substratum is clearly time-dependent.

The relationship between discharge (Q) and total dissolved solids concentration (C_d) conforms to the curved-line regression equation, in the form $y = ax - b$ (Fig. 21, 22). This relationship can be applied to a preliminary quantitative evaluation of both surface and subsurface solute supplies. In the Kamienica Nawojowska catchment, the graph of this relationship plots as straight, nearly parallel lines on logarithmic coordinates (Fig. 22). The Kamienica Nawojowska River has the highest position on the graph, whilst the tributary watersheds varying in size have successively lower positions there. This hierarchical organization of the watersheds shows that changes in dissolved solids concentrations follow a certain pattern which is controlled by the smallest watershed areas and their relation to the trunk stream. The increase in dissolved solids concentration is inversely proportional to the specific runoff value.

Plotting discrepancies of discharge (Q) and dissolved load (L_d) relationships for the individual tributaries to the Kamienica Nawojowska river indicate a wide range in the magnitude of yields of the individual watersheds (Fig. 24). This variation must be born in mind when extrapolating the quantitative results of traditional denudation rate measurements, that have been made at a hydrometric station, from a small watershed to a larger one and vice versa, even in the course of a rather homogeneous drainage basin (Fig. 25).

The relationship between increase in basin area (stream length) and total dissolved solids and ions concentrations is approximated by the straight-line equation (Fig. 26, 27, 30), the exception being the asymmetrical Bączka watershed for which a curved-line relationship was found. A direct relationship was found between increase in basin area and increase in discharge and dissolved load transportation (Fig. 3). However, variations in unit denudation rates with increase in basin area can be expressed by the hyperbolic equation, in the form $y = (ax + b)/x$.

It appears univocally that the chemical denudation rates (in the classical interpretation) will vary with location of the particular hydrometric section in the drainage basin.

The nature of relationships that approximate the principles of spatial variations in the chemical denudation parameters in a small watershed reflects the distinct differences existing between symmetric watersheds (Homerka, Kryściów) and asymmetric watersheds (Bączka). Hence, comparative drainage basin studies warrant basins being equal in type and sitze. This is a very important general index of the representativeness of the particular catchment from the viewpoint of principles of spatial variations in the denudation rates.

The mechanism of dissolved sediment transport by streamlets draining both the unprepared roads and the Holocene gully on the experimental slope is similar to that in the stream channels (Fig. 22-25, 32). Each of the roads shows individual transport régime features being controlled by the depth of the sunken roads, i.e. the capacity of the contributing area. The linear supply from the unprepared roads and the Holocene gully playing the major role in the solute supply by overland flow from the experimental slope into the Homerka stream channel. The direct supply of the channel with solutes by dispersed sheetflow from the areas proximate to the watercourse is less important (Fig. 10; Tab. 3).

The extent of the basic source areas of solute supply in a Beskidian catchment varies from rain to rain and at the time of the particular rainfall, according to rainfall intensity and to the incipient moisture conditions of the soil and its permeability. This expansion and constriction of the zones of dissolved sediment supply takes place through changes both in streamlet length and in the extent of the saturated zone during and after the rainfall, at times of flow recession. The above supply dynamics is influenced by the time-controlled extent of the variable source areas of runoff production (Dunne and Black 1970; Słupik 1981).

The chemical properties of the throughflow water which occurs at different depths do not change gradually from the watershed line downslope to the valley floor (Fig. 33,34). This indicates the complex mechanisms of water circulation and of leaching of the underground drainage basin. The range of changes of dissolved solids concentrations depends upon the type of surface outflow. In the springs that emerge from the shallow waste mantle it is higher than in the rock-type springs issuing from great depths (Fig. 22,35). These changes in water quality parameters are due to a longer duration of water circulation in the underground, and to the tendency for the leaching of bedrock to decline with depth.

The clastic sediment being transported in suspension consists largely of fine clay-silt fractions with vari-grained sand (Fig. 37). The share within the suspended sediment of the fine clay fraction increases downstream. The greatest variations in the particle size occur on the rising stage of discharges, whereas the falling stage is marked by the progressive refinement of the suspended sediment which becomes homogeneous in granulometrical composition (Fig. 38). The dominant fractions transported at times of lower, moderate and higher peak flows are correspondingly fine clay, silt and sand. As a rule the suspended sediment concentrations reach faster a maximum than the discharges (Fig. 41, 42). Two phases can be recognized. For a given high discharge, suspended load concentrations will vary according to whether they are associated with the rising or the falling stage. This is reflected in the shape of the loop describing the discharge and suspended sediment concentration relationship. Each of the high discharges is marked by a different shape of the loop (Fig. 43, 44). Hence, every approximate interpolation to cover the periods for which measurements are lacking will exhibit errors.

The amount of waste available for dislodgement increases proportionally to the duration between two peak flows. For this reason, after longer dry spells or seasons with low-intensity rains of a short duration, the high discharges are marked by high suspended sediment concentrations. This is particularly valid for the stormflow discharges that occur after drought periods. Series of closely spaced and similar discharges exhibit progressively lower suspended sediment concentrations.

In the symmetrical drainage basins, the graph of suspended sediment concentration and load versus increase in basin area plots as a straight line, whereas in the asymmetrical drainage basins it will be a curved line. A curved-line relationship also is found for physical denudation rates per unit basin area versus increase in basin area. In the Homerka catchment, the above relationship is approximated by the hyperbola equation. Each of the watersheds has an individual suspended sediment transport regime. For this reason, the extrapolation of physical denudation indices, even within one drainage basin, from a small watershed to a larger one and vice versa, and to watersheds being equal in size is not founded in the spatial variability of the processes.

The supply of the channels with the slope-derived clastic waste material is predominantly from the Holocene gullies and unprepared roads that are joining directly the channel. These roads contribute 70-80% of the annual suspended sediment yield of the Homerka drainage basin. The direct supply of the stream

channel with waste by dispersed sheetflow from the grass-covered areas proximate to the watercourse is less important (Tab. 5). It does not exceed 1% of the annual suspended sediment yield of the Homerka catchment.

In the water running in the snuken roads the high suspended sediment concentration (the observed maximum was $147\,889\text{ mg dm}^{-3}$) is closely related to the intensity of rainsplash erosion. The results of experimental studies which have been carried out on the plots simulating both a ploughed field and an unprepared road revealed that on the latter the intensity of splash may be 30 times as great as that on the ploughed field (Fig. 55–57).

The mechanism of processes that supply the clastic waste material from the slope into the channel is controlled by the constriction or expansion of the zones runoff production at times of high discharge, as has been shown above by the solute supply. It appears that the time-dependent variable source area model of runoff production can be used to explain the mechanism of clastic waste supply from the slopes into the stream channels.

In the individual channel reaches the bedload transport begins at various moments before the streamflow peak. After the peak, it tends to continue with a varying intensity until the time of distinct recession of the discharge (Fig. 64). The rating plot for the relationship between stream discharge and magnitude of bedload movement assumes the form of a loop (Fig. 64). Each of the high discharges is marked by a different shape of the loop. After a longer flood-free period, the transported bedload is far greater than during a series of closely spaced streamflow peaks. Similar snowmelt floods and rain floods produced by prolonged rainfall are moving far more bedload than the violent stormflow discharges. The variable transport distance of the individual pebbles (Fig. 66) is controlled by the streamflow lines and still zones occurring in the channel. The graph of the increase in bedload with channel distance plots as a straight line.

The time taken to transport the gravelly bedload does not exceed 1% of the year (Fig. 48). The bedload comprises 1–12% of the annual suspended load. When the sand-silt fractions, that are carried as bedload at times of lower peak flow, are considered it is found that the total bedload is 3–16% of the suspended load.

The estimated intensity of the process of channel deepening is different for the different channel reaches (Fig. 67, 68). Periods of increased erosion are separated by periods of reduced erosion, and even of slow aggradation. Over the past ca 80 years the major cause of increased bed scour is the extraction of alluvia and channel correction.

The deepening of channels leads to an increase in channel capacity and in flood-plain height above mean water level in the channel. Consequently, both flooding and the building up of the flood-plain by overbank deposits during the successive peak flows is progressively less frequent now. Since more suspended clastic sediment is being removed at times of high stage the flood-plains are growing quite rapidly in the mountain foreland. Reservoir aggradation also occurs. Because of increasing channel capacity, the floods can be contained within the channel now. Thus in concentrating the stream power at times of high stage, the scoured channels which provide a massive source of debris tend to favour the increased bedload transportation, the exception being channels that show a deficit of bedload. This is due either to gravel extraction from the channel bed or to the presence of drop dams.

The accuracy in the various techniques employed and research results obtained is validated by error analysis. The opinion is expressed that the major source of errors is the poor knowledge of mechanism of processes and the unsatisfactory

frequency of measurements made (Tab. 6, 7) as well as the simple calculations. The comparison of results and their extrapolation is rendered difficult by the lack of knowledge of the magnitude of errors.

The unsatisfactory knowledge of mechanisms of the fluvial processes and their intensity is responsible for the low efficacy of channel correction in the drainage basin examined. Individual control measures should be applied to the particular channel type to satisfy the dynamic equilibrium conditions.

Translated by Sylwia Gilewska

122. Gerlach T., *Współczesny rozwój stoków w polskich Karpatach fliszowych*, 1976, s. 116, 22 il., 8 fot., zł 30,—
123. Hess M., Niedźwiedź T., Obrębska-Starkłowa B., *Stosunki termiczne Beskidu Niskiego (metoda charakterystyki reżimu termicznego gór)*, 1977, s. 101, 32 il., zł 25,—
124. Banach M., *Rozwój osuwisk na prawym zboczu doliny Wisły między Dobrzyniem a Włocławkiem*, 1977, s. 101, 36 il., 38 fot., 3 zał., zł 27,—
125. Praca zbiorowa pod redakcją L. Starkła, *Studia nad typologią i oceną środowiska geograficznego Karpat i Kotliny Sandomierskiej*, 1978, s. 165, 35 il., zł 36,—
126. Kozłowski S. J., *Zielona Góra, baza ekonomiczna i powiązania zewnętrzne*, 1977, s. 98, 24 il., zł 22,—
127. Praca zbiorowa pod redakcją J. Kostrowickiego, *Przemiany struktury przestrzennej rolnictwa Polski, 1950—1970*, 1976, s. 512, 304 il., zł 120,—
128. Rykiel Z., *Miejsce aglomeracji wielkomiejskich w przestrzeni społeczno-gospodarczej Polski*, 1978, s. 77, 21 il., zł 20,—
129. Rogalewska B., *Tendencje lokalizacyjne zakładowych ośrodków wczasowych w Polsce do 1971*, 1978, s. 109, 17 il., 5 zał., zł 34,—
130. Grześ M., *Termika osadów dennych w badaniu jezior*, 1978, s. 96, 38 il., zł 22,—
131. Krawczyk B., *Bilans cieplny ciała człowieka jako podstawa podziału bioklimatycznego obszaru Iwonicza*, 1979, s. 71, 11 il., zł 15,—
132. Drozdowski E., *Deglacjacja dolnego Powiśla w środkowym Würtmie i związane z nią środowiska depozycji osadów*, 1979, s. 103, 12 il., 25 fot., zł 30,—
133. Rozłucki W., *Modernizacja rolnictwa tradycyjnego na przykładzie „zielonej rewolucji” w Indiach*, 1979, s. 97, 20 il., zł 21,—
134. Szyrmer J., *Przemiany struktury przestrzennej produkcji towarowej rolnictwa indywidualnego w Polsce w latach 1960—1970*, 1980, s. 95, 25 il., zł 20,—
135. Dębski J., *Integracja wielkich miast w Polsce w zakresie powiązań towarowych*, 1980, s. 127, 22 il., zł 30,—
136. Praca zbiorowa pod redakcją K. Klimka i L. Starkła, *Vertical Zonality in the Southern Khangai Mountains (Mongolia)*, t. 1, 1980, s. 107, 22 il., 10 fot., zł 38,—
137. Praca zbiorowa pod redakcją L. Starkła i A. Kowalkowskiego, *Environment of the Sant Valley (Southern Khangai Mountains)*, t. 2, 1980, s. 104, 27 il., 21 fot., zł 45,—
138. Krzymowska-Kostrowicka A., *Terytorialny system rekreacyjny. Analiza struktury i charakteru powiązań*, 1980, s. 121, 34 il., zł 30,—
139. Praca zbiorowa pod redakcją A. S. Kostrowickiego, *Wybrane zagadnienia teorii i metod oceny oddziaływania człowieka na środowisko*, 1981, s. 119, 10 il., zł 30,—
140. Praca zbiorowa pod redakcją K. Dziewońskiego i P. Korcellego, *Studia nad migracjami i przemianami systemu osadniczego w Polsce*, 1981, s. 267, 63 il., zł 82,—
141. Praca zbiorowa pod redakcją M. Rościszewskiego, Y. S. Mashbitsa i Z. Siemek, *Third World, Geographical Problems of Development, Proceedings of the III Polish-Soviet Seminar, Warsaw, September 1979*, 1981, s. 121, zł 50,—
142. Słupik J., *Rola stoku w kształtowaniu odpływu w Karpatach fliszowych*, 1981, s. 98, 34 il., 10 fot., zł 32,—

Cena zł 120,—

W. FROELICH: MECHANIZM TRANSPORTU FLUWIALNEGO