

POLSKA AKADEMIA NAUK  
INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

PRACE GEOGRAFICZNE NR 114

WOJCIECH FROEHLICH

INSTYTUT GEOGRAFII  
PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA  
Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania  
00-630 Warszawa  
ul. Nowy Świat Nr 72

# DYNAMIKA TRANSPORTU FLEUWIALNEGO KAMIENICY NAWOJOWSKIEJ

WROCLAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK  
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH  
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

## PRACE GEOGRAFICZNE IG PAN

71. Szupryczyński J., *Niektóre zagadnienia czwartorzędu na obszarze Spitsbergenu*. 1968, s. 127 + 15 ilustr. + 35 fot. + 1 wkładka, zł 34,—
72. Kosiński L., *Migracje ludności w Polsce w latach 1950—1960*. 1968, s. 106 + 41 ilustr., zł 28,—
73. Korolec H., *Procesy brzegowe i zmiany linii brzegowej Jeziora Mikołajskiego*. 1968, s. 67 + 16 ilustr. + 6 fot. + 1 wkładka, zł 24,—
74. Praca zbiorowa. *Ostatnie zlodowacenie skandynawskie w Polsce*. 1968, s. 216 + 12 ilustr. + 11 fot., zł 67,—
75. Praca zbiorowa. *Procesy i formy wydmowe w Polsce*. Zbiór prac pod redakcją R. Galona. 1969, s. 386, 69 ilustr., 68 fot., zł 98,—
76. Iwanicka-Lyra E., *Delimitacja aglomeracji wielkomiejskich w Polsce*. 1969, s. 117 + 12 ilustr., zł 28,—
77. Praca zbiorowa. *Z zagadnień ludnościowych krajów gospodarczo słabo rozwiniętych*. 1969, s. 146 + 6 ilustr., zł 32,—
78. Korcelli P., *Rozwój struktury przestrzennej obszarów metropolitycznych Kalifornii*. 1969, s. 124 + 34 ilustr., zł 28,—
79. Koter M., *Geneza układu przestrzennego Łodzi przemysłowej*. 1969, s. 130 + 13 ilustr. + 2 wkładki, zł 34,—
80. Kaszowski L., Kotarba A., *Wpływ katastrofalnych wzbrań na przebieg procesów fluwialnych (na przykładzie potoku Kobylanka na Wyżynie Krakowskiej)*  
Nowak W. A., *Rzeźba podczwartorzędowa i ewolucja układu sieci dolinnej w północnośrodkowej części Wyżyny Małopolskiej*. 1970, s. 124 + 71 ilustr. + 1 załącznik kol. + 12 fot., zł 30,—
81. Stola W., *Próba typologii rolnictwa Pomorza*. 1970, s. 146 + 23 ilustr. + 7 wkładki + 9 fot., zł 39,—
82. Praca zbiorowa. *Studia z geografii średnich miast w Polsce. Problematyka Tarnowa*. 1971, s. 274 + 45 ilustr., zł 71,—
83. Wiśniewski E., *Struktura i tekstura sandru ostródzkiego oraz teras doliny górnej Drwęcy*. 1971, s. 95 + 33 ilustr., zł 24,—
84. Skoczek J., *Wpływ podłoża atmosfery na przebieg dobowy bilansu cieplnego powierzchni czynnej*. 1970, s. 96 + 49 ilustr. + 10 fot., zł 21,—
85. Jewtuchowicz S., *Rozwój rzeźby okolic Łęczycy po zlodowaceniu środkowopolskim*. 1970, s. 78 + 26 ilustr. + 5 fot., zł 18,—
86. Olechnowicz-Bobrowska B., *Częstość dni z opadem w Polsce*. 1970, s. 75 + 26 ilustr., zł 18,—
87. *Baza ekonomiczna i struktura funkcjonalna miast:*  
Dziewoński K., *Studium rozwoju pojęć, metod i ich zastosowań;*  
Jerczyński M., *Metody pośrednie identyfikacji i pomiaru*. 1971, s. 182 + 2 ilustr., zł 44,—
88. Rościszewski M., *Kierunki ewolucji rolnictwa w krajach Maghrebu*. 1970, s. 127 + 8 ilustr., zł 30,—
89. Adrjanowska E., *Przestrzenne powiązania produkcyjne stoczni gdańskich*. 1971, s. 105 + 16 ilustr., zł 22,—
90. Różycka W., *Metody oceny warunków fizjograficznych dla potrzeb planowania przestrzennego miast*. 1971, s. 203 + 16 ilustr., zł 40,—
91. Ciolkosz A., Miszański J., *Wykorzystanie zdjęć lotniczych w geografii stosowanej*. 1972, s. 86 + 23 ilustr., zł 15,—

POLSKA AKADEMIA NAUK  
INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

PRACE GEOGRAFICZNE NR 114

INSTYTUT GEOGRAFII  
I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA  
Polskiej Akademii Nauk  
Zakład Przemysłowego Zagospodarowania  
05-330 Warszawa  
ul. Nowy Świat Nr 72

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ТРУДЫ

№ 114

ВОЙЦЕХ ФРОЕХЛИХ

ДИНАМИКА ФЛЮВИАЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В РЕКЕ  
КАМЕНИЦА НАВОЙОВСКА

GEOGRAPHICAL STUDIES

No 114

WOJCIECH FROEHLICH

THE DYNAMICS OF FLUVIAL TRANSPORT  
IN THE KAMIENICA NAWOJOWSKA

POLSKA AKADEMIA NAUK  
INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA

---

PRACE GEOGRAFICZNE NR 114

WOJCIECH FROELICH

DYNAMIKA  
TRANSPORTU FLUWIALNEGO  
KAMIENICY NAWOJOWSKIEJ

WROCLAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK  
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH  
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

1975

Komitet Redakcyjny

REDAKTOR NACZELNY: M. KIELCZEWSKA-ZALESKA  
ZASTĘPCA REDAKTORA NACZELNEGO: K. DZIEWOŃSKI  
CZŁONKOWIE: R. GALON, L. STARKEL  
SEKRETARZ: I. STAŃCZAK

Praca doktorska wykonana pod kierunkiem  
prof. dr hab. LESZKA STARKLA

Redaktor Wydawnictwa: Barbara Bober

Redaktor techniczny: Helena Repa

*Printed in Poland*

Zakład Narodowy im. Ossolińskich — Wydawnictwo. Wrocław 1975.  
Nakład: 800 egz. Objętość: ark. wyd. 9,80, ark. druk. 7,63 + 5 wkł.,  
ark. A1 12. Papier druk. sat. kl. III, 80g, 70 × 100. Oddano do składania  
30 IV 1975. Podpisano do druku 25 XI 1975. Druk ukończono w grudniu 1975.  
Wrocławska Drukarnia Naukowa. Zam. 2219/75—A-11. Cena zł 35.—

## SPIS TREŚCI

Wstęp .....	7
Zarysowanie problemu .....	7
Cel pracy .....	9
Metody badań terenowych .....	9
Metody opracowania materiałów .....	13
Teren badań .....	15
Charakterystyka hydrologiczna okresu badań na tle wielolecia .....	20
I. Dynamika trzech rodzajów transportu rzecznoego .....	37
Transport w roztworze .....	37
Związek transportu z przepływem wody .....	37
Mechanizm transportu w czasie wezbrań .....	40
Zmienność transportu w ciągu roku .....	45
Pochodzenie materiału transportowanego w roztworze .....	50
Transport zawiesiny .....	51
Skład granulometryczny zawiesiny .....	51
Rozkład koncentracji zawiesiny w przekroju poprzecznym koryta .....	53
Związek transportu z przepływem wody .....	56
Transport w czasie wezbrań .....	59
Zmienność transportu w ciągu roku .....	66
Źródła dostawy drobnej zwietrzeliny .....	69
Transport poprzez wleczenie po dnie .....	72
Skład granulometryczny aluwiiów .....	72
Związek transportu z przepływem wezbrań .....	74
Tendencje zmian koryta i równiny zalewowej jako rezultat współczesnej dynamiki transportu fluwialnego .....	76
II. Roczny cykl wynoszenia materiału ze zlewni .....	79
Udział wezbrań w wynoszeniu materiału .....	79
Typologia wezbrań w świetle transportu .....	79
Morfogenetyczne pory roku w świetle transportu .....	89
Bilans transportu .....	93
Stosunek reżimu odpływu do reżimu wynoszenia materiału .....	98
Uwagi końcowe .....	102
Literatura .....	105
Динамика флювиального транспорта в реке Каменица Навојовска (резюме) .....	113
The dynamics of fluvial transport in the Kamienica Nawojowska (summary) .....	118





## WSTĘP

### ZARYSOWANIE PROBLEMU

Produkty wietrzenia skał transportowane są przez rzeki w postaci materiału rozpuszczonego, zawiesiny i materiału wlezonego. W rzekach o niewyrównanym w ciągu roku odpływie w czasie wezbrań wynoszona jest przeważająca część rocznego ładunku materiału (K. Klimek 1972; M. G. Wolman i J. P. Miller 1960). Ładunek wynoszony ze zlewni materiału może służyć za wskaźnik współczesnej denudacji (J. Corbel 1964; R. B. Dole i H. Stabler 1905; I. Douglas 1964; J. N. Holeman 1968; S. Judson i D. F. Ritter 1964; H. W. Menard 1961; S. A. Schumm 1963).

Rzeki Karpat fliszowych o deszczowo-śnieżno-gruntowym zasilaniu charakteryzują się koncentracją odpływu w okresie wiosennych wezbrań roztopowych i letnich wezbrań deszczowych (I. Dynowska 1971; B. Fal i J. Stachy 1967; Z. Mikulski 1965; Z. Ziemońska 1973). Transportują w poszczególnych porach roku i latach zmienne ładunki materiału rozpuszczonego, zawiesiny i materiału wlezonego.

Transport materiału rozpuszczonego jest znany jedynie od strony zmian koncentracji jonów w poszczególnych porach roku oraz jego związku z budową geologiczną zlewni (M. Bombówna 1960, 1968, 1969; I. Gieysztorowa 1971; S. Maultz 1972; K. Pasternak 1968; M. Stangenberg 1958).

Określone przez K. Figułę (1966) rozmiary współczesnej denudacji chemicznej Karpat fliszowych, szacowane na 50–90 t/km<sup>2</sup>, oparte są na skąym materiale pomiarowym. Nieliczne prace bazujące na dużej ilości pomiarów przedstawiają mechanizm transportu materiału rozpuszczonego w krótkich okresach czasu (W. Froehlich 1972, 1973; I. Gieysztorowa 1971).

Większość prac z zakresu transportu zawiesiny oparta jest na materiale obserwacyjnym ze stacji batometrycznych PIHM (J. Brański 1968 a, 1971; J. Cyberski 1969; K. Dębski 1959; W. Froehlich, K. Klimek i L. Starkel 1972; W. Jarocki 1957; Z. Mikulski 1961; A. Reniger 1958; J. Sobczak 1965, 1966; B. Wiśniewski 1972). Obowiązująca instrukcja obserwatorów stacji batometrycznych PIHM (J. Golek i H. Kostrzewa 1960) przewiduje zbyt małą częstotliwość poboru prób wody na zmęczenie (J. Brański 1966, 1968a, 1971; W. Froehlich 1972; Z. Paślowski 1965; B. Wiśniewski 1972). Prace oparte na szczegółowych pomiarach informują jedynie o roli pojedynczych wezbrań lub krótkich okresów roku w wynoszeniu zawiesiny

ze zlewni (K. Cyberska i J. Cyberski 1964; W. Froehlich 1972, 1973; I. Gieysztorowa 1971; Z. Kajetanowicz 1938; A. Welc 1972, 1973; H. Ziemska 1928).

Podstawą niektórych obliczeń rozmiarów transportu mechanicznego są pomiary objętości złożonych aluwii rzecznych w zbiornikach przeciwrumowiskowych (W. Bartnik i H. Gładki 1972; W. Pietruszewski 1949; P. Prochal 1958, 1973; A. Reniger 1955) lub zaporowych (J. Brański 1971; T. Chomiak 1960; T. Chomiak, J. Cyberski i Z. Mikulski 1969; J. Cyberski 1969, 1970; Z. Mikucki i B. Wiśniewski 1960; A. Sowiński 1961; B. Wiśniewski 1967, 1969, 1972). Metoda ta daje średnie szacunkowe wartości z wielolecia, które znacznie odbiegają od wartości otrzymanych na podstawie bezpośrednich pomiarów zmaczenia na stacjach batometrycznych PIHM położonych przy ujściu do zbiorników. Wiąże się to z małą częstotliwością pomiarów zmaczenia na stacjach batometrycznych, jak również z przeliczaniem objętości silnie zróżnicowanego ciężaru objętościowego złożonych w zbiornikach aluwii na transport zawiesiny wyrażony w jednostkach masy (J. Brański 1971; B. Wiśniewski 1972). Uważam, że podstawowym błędem jest podział aluwii zbiornika na materiał pochodzący z transportu w zawieszynie i z wleczenia po dnie przez przyjęcie stałej granicznej wielkości ziarna. Ta sama frakcja drobnego materiału w zależności od szybkości wody może być transportowana w zawieszynie lub wleczona po dnie (F. Hjultström 1935; A. Sundborg 1956, 1967). Wahania cofki zbiornika wywołują przesunięcia odcinków o różnej szybkości wody, która warunkuje zasięg stref sedymentacji zawiesiny i materiału wleczonego. Dlatego oddzielenie poszczególnych kompleksów aluwii powinno być, moim zdaniem, oparte na sposobie transportu, jakiemu podlegał złożony materiał. Można go odtworzyć ze struktur sedymentacyjnych aluwii (J. R. L. Allen 1968; F. J. Pettijohn, P. E. Potter i R. Siever 1972).

Rozległe kamieńce w dolinach beskidzkich sugerują, że transport materiału wleczonego ma wielkie rozmiary. Pomiary objętości świeżych żwirowisk po wezbraniach (P. Prochal 1960; T. Ziętara 1968) informują jedynie o rozmiarach powierzchni dna doliny modelowanego przez erozję (zdarcie pokrywy roślinnej na utrwalo-nych łachach korytowych lub powierzchniach niskich teras), lub o sedymentacji nowego materiału. (W. Froehlich, K. Klimek, L. Starkel 1972). Nie upoważniają one moim zdaniem, do określania rozmiarów transportu materiału wleczonego.

Dla celów projektowania hydrotechnicznego i eksploatacji aluwii transport materiału wleczonego określa się na podstawie wzorów empirycznych (H. Gładki i J. Myczka 1968; W. Jarocki 1957; W. Pietruszewski 1955), zaczerpniętych głównie z literatury zagranicznej, wyprowadzonych dla rzek o innym reżimie hydrologicznym i innych parametrach geologiczno-morfologicznych zlewni. Zastosowanie ich w warunkach karpaccich bez wyprowadzenia regionalnych współczynników oraz wzięcia pod uwagę występujących budowli regulacyjnych, miejsc i rozmiarów eksploatacji aluwii, jest jedną z przyczyn niepowodzeń w regulacji rzek.

Szczegółowe studia nad mechanizmem transportu i obróbką poszczególnych frakcji materiału dennego oparte są o metody sedymentologiczno-petrograficzne (W. Bobrowski 1962; W. Bobrowski i G. Kociszewska-Musiał 1959; J. Dudziak

1971; L. Kaszowski 1965, 1973; G. Kociszewska-Musiał 1961; J. Kossakowska-Such 1961; B. Krygowski 1964; M. Kucharska-Słupikowa 1964; K. Nawara 1960, 1964; R. Unrug 1957; T. Zawora 1967), a ostatnio stosuje się znaczenie rumowiska emalią (L. Dauksza et al. 1970; A. Dobija et al. 1970; L. Kaszowski 1973; M. Niemirowski 1970). Studia te są jednak prowadzone w oderwaniu od badań mechanizmu transportu zawiesiny i materiału rozpuszczonego.

Większość wyników badań współczesnych procesów fluwialnych odnosi się do wielkich rzek karpackich. Zasadniczo brak informacji o ich przebiegu w średniej wielkości rzekach beskidzkich. Szerokie łóżyska powodziowe tych rzek wyścielone glazowo-żwirowymi aluwiami i intensywna erozja w odcinkach skalnego koryta sugerują, że zachodzą tu szczególnie intensywne procesy fluwialne.

Dotychczasowe opracowania rocznego bilansu wynoszenia materiału rozpuszczonego, zawiesiny i materiału wlezonego, wykonane na podstawie różnych, często mało dokładnych metod, dają w efekcie pewne średnie lub ekstremalne wartości, przeważnie obciążone dużymi błędami. Zacierają one złożoną dynamikę rocznego cyklu wynoszenia materiału. Uniemożliwiają porównania ilości odprowadzanego w różnych okresach materiału rozpuszczonego, zawiesiny i materiału wlezonego oraz porównania reżimu hydrologicznego rzeki z reżimem wynoszenia materiału.

#### CEL PRACY

Celem pracy jest poznanie w cyklu rocznym dynamiki transportu materiału rozpuszczonego, zawiesiny i materiału wlezonego w Kamienicy Nawojowskiej. W szczególności chodziło o: 1) poznanie dynamiki zmian natężenia transportu podczas wezbrań oraz ich udziału w wynoszeniu produktów wietrzenia ze zlewni w ciągu roku; 2) wyprowadzenie związków matematycznych między przepływem wody a transportem, które umożliwią prześledzenie mechanizmu procesów; 3) określenie wzajemnego stosunku ilościowego wynoszonego materiału rozpuszczonego, zawiesiny i materiału wlezonego w różnych okresach roku oraz reżimu wynoszenia materiału w stosunku do reżimu odpływu.

Poznanie rozmiarów transportu mechanicznego w Kamienicy Nawojowskiej może częściowo wyjaśnić jej rolę w zamulaniu Zbiornika Rożnowskiego.

W pracy, obok badań przestrzennych, oparto się zasadniczo na jednym przekroju pomiarowym położonym w odcinku ujściowym Kamienicy Nawojowskiej. Założono, że panujące tam warunki są odbiciem reżimu hydrologiczno-morfologicznego całej zlewni.

#### METODY BADAŃ TERENOWYCH

Poznanie rocznego cyklu transportu materiału rozpuszczonego, zawiesiny i materiału wlezonego wymagało zastosowania szczegółowych metod badań stacjonarnych. Badania rozpoczęto jesienią 1969 r. Praca oparta została na wynikach pomiarów z lat 1970 i 1971, które są nadal kontynuowane.



Punkty wodowskazowe PIHM o długim cyklu obserwacji (Łabowa od 1939 r., Nowy Sącz od 1894 r.) oraz blisko położone stacje klimatyczne: Nowy Sącz, Ptaszkowa, Jaworzyna Krynicka i opadowe: Łabowa, Huta (ryc. 1) umożliwiały prześledzenie zmian zjawisk hydroklimatycznych w ostatnich dziesięcioleciach. Stwarzało to korzystną bazę wyjściową dla prowadzenia stacjonarnych badań nad transportem fluwialnym w Kamienicy Nawojowskiej.

Podstawowe badania hydrologiczne i pomiary transportu oparto o przekrój wodowskazowy PIHM Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu, położony około 1 km od ujścia do Dunajca (ryc. 1).

Codziennie pomiary polegały na odczytach stanu wody na wodowskazie o godz. 7<sup>00</sup>, mierzeniu temperatury wody i określaniu koncentracji jonów wodorowych pH metodą kolorymetryczną. Podczas wezbrań pomiary stanu wody zagęszczano wykonując je w odstępach 1–3 godzin, w zależności od szybkości przyboru wody i rozmiarów wezbrania. Przy różnych stanach wody wykonano pomiary prędkości, które obok wyników pomiarów PIHM wykorzystano do obliczania krzywych konsumpcyjnych. W okresie zimowym rejestrowano terminy występowania i rodzaj zjawisk lodowych, natomiast w okresie wegetacji wzrost i obumieranie plech glonów (celem obserwacji było wyjaśnienie transportu zawiesiny pochodzenia organicznego przy niskich stanach wody). Zanik glonów po wezbraniu na otoczkach i w skalnym korycie był dowodem na ruch materiału dennego.

W terminach pomiarów stanu wody pobierano jej próbki o objętości 1 l batometrem butelkowym. Zróżnicowanie koncentracji zawiesiny w przekroju poprzecznym koryta ustalono na podstawie kilkakrotnego równoczesnego pobrania trzech prób wody w strefie nurtu i jednej przy brzegu w czasie dwóch wezbrań. Obliczono związek między średnim zmaczeniem w przekroju a pobieraną pojedynczą próbą. Duża prędkość, mała głębokość wody, brak odpowiedniego sprzętu i stanowiska po-

Ryc. 1. Szkic zlewni Kamienicy Nawojowskiej: 1 – sieć rzeczna; 2 – dział wodny; 3 – lasy; 4 – punkty wysokościowe; 5 – stacje klimatyczne; 6 – stacje opadowe; 7 – limnigrafy; 8 – wodowskazy; 9 – punkty stałych pomiarów zawiesiny i materiału rozpuszczonego; 10 – punkty pomiarów zawiesiny i materiału rozpuszczonego podczas wezbrań; 11 – punkty pomiarów transportu materiału wlezonego za pomocą skrzyń łapaczy oraz metodą malowanych otoczek; 12 – zapory przeciwrumowiskowe; 13 – punkty pomiarów tempa erozji bocznej i wglębnej przy pomocy stalowych prętów; 14 – miejsca pomiarów składu granulometrycznego aluwii korytowych i terasowych

Fig. 1. Map of the Kamienica Nawojowska catchment basin: 1 – river network; 2 – watershed; 3 – forests; 4 – height points; 5 – climatic stations; 6 – precipitation stations; 7 – limnographs; 8 – water-gauges; 9 – sites of constant measurements of suspended and dissolved material; 10 – sites where suspended and dissolved material was measured during raised water-stages; 11 – measurement sites of the transport of dragged material by means of catching-boxes and using the method of painted pebbles; 12 – debris-catching bars; 13 – measurement sites of the rate of lateral and deep erosion by means of steel rods; 14 – measurement sites of the grain-size composition of bed and terrace alluvia

miarów uniemożliwiły określenie koncentracji zawiesiny podczas wezbrań na różnych głębokościach.

Podczas trzech wezbrań (20 III, 4 VII, 24 VIII 1971) pobrano próbki wody w różnych punktach koryta Kamienicy Nawojowskiej (od źródła do ujścia) oraz z ujść jej dopływów. Znaczna długość rzeki uniemożliwiała szybkie pobranie próbek wody; jedno pobranie trwało przeciętnie 35 minut, co przy małej długości dopływów nie upoważnia do wiązania niesionego ładunku przez poszczególne dopływy z parametrami środowiska geograficznego ich zlewni. Pomiarzy miały na celu uchwycenie rzędu wielkości koncentracji materiału rozpuszczonego i zawiesiny, która obok temperatury decyduje o lepkości wody i ma duży wpływ na transport materiału dennego (B. R. Colby 1964; C. F. Nordin 1963; D. B. Simons i E. V. Richardson 1966).

Koncentrację zawiesiny oznaczano metodą sączkową (por. J. Brański 1968 b). Przesączoną wodę o objętości 200 ml odparowywano w parownicy dla oznaczenia suchej pozostałości (residue filtered). Wybrane sączki z zawiesiną i parownice z suchą pozostałością poddawano prażeniu w temperaturze 550° C dla oznaczenia strat przy prażeniu, na które składają się głównie substancje organiczne (J. Just i W. Hermanowicz 1955).

Kilkanaście prób wody pobranych podczas wezbrań, przesączono i wykonano analizy granulometryczne materiału zawiesinowego. Kształt i skład petrograficzny cząsteczek zawiesiny analizowano pod mikroskopem (por. N. G. Maczawariani i E. A. Dżawachiszwili 1972).

Ładunek wyniesionego materiału wleczonego obliczano po każdym wezbraniu na podstawie pomiarów objętości złożonych aluwiów na początku uregulowanego betonowymi stopniami odcinka koryta koło Nowego Sącza. Przyrost form akumulacyjnych nanoszono na plan sytuacyjno-wysokościowy w skali 1:1000.

Tempo wzrostu stożków napływowych małych bocznych dopływów określano przez pomiary wysokości zasypania wbitych kołków drewnianych i stalowych prętów.

Rozmiary erozji w wytypowanych odcinkach koryta obliczano po każdym wezbraniu przez nanoszenie zmian zasięgu form erozyjnych i akumulacyjnych na podkładzie planu sytuacyjno-wysokościowego w skali 1:1000. Z różnicy objętości form erozyjnych i akumulacyjnych obliczano rozmiary erozji (por. L. Kaszowski 1973; L. Kaszowski i A. Kotarba 1970; M. Niemirowski 1970). Tempo erozji bocznej i wgłębnej mierzono w różnych przekrojach za pomocą stalowych i drewnianych prętów o długości 0,5–1,5 m wbijanych równo z powierzchnią dna i podcinanych brzegów koryta (por. R. Evans 1967; M. Niemirowski 1970). Wychodnie ławic skalnych w dnie koryta malowano kolorową emalią dla stwierdzenia ubytku litej skały (por. L. Kaszowski 1970; M. Niemirowski 1970).

Skład granulometryczny aluwiów korytowych i terasowych oznaczano przy zastosowaniu sit konstrukcji E. Gila ze Stacji Naukowej Instytutu Geografii PAN w Szymbarku koło Gorlic.

Transport poszczególnych frakcji materiału dennego badano za pomocą znaczo-nych emalią otoczków (por. L. Dauksza et al. 1970; A. Dobija et al. 1970; R. Frecaut 1968; L. Kaszowski 1970, 1973; L. B. Leopold, W. W. Emmet, R. M. Myrick 1966, 1967; M. Niemiowski 1970; A. P. Schick 1967).

W odcinku ujściowym Kamienicy Nawojowskiej oraz w dopływach Kryściców i Homerka zainstalowano łapacze materiału dennego w postaci drewnianych i metalowych skrzyń wkopanych w powierzchnie niskich łąch żwirowych i dno koryta (por. D. W. Hubbel 1964; M. Langer 1950).

Pomimo zastosowania różnorodnych metod badań nad ruchem rumowiska wlezonego otrzymane wyniki należy traktować jako orientacyjne. Rozmiary erozji bocznej miejscami przekraczały długość możliwych do zastosowania prętów stalowych. Boczna migracja koryta w odcinkach akumulacyjnych uniemożliwiała często odnalezienie znaczo-nych otoczków. Łapacze materiału dennego były zapelniane w całości nawet podczas średniej wielkości wezbrań.

#### METODY OPRACOWANIA MATERIAŁÓW

Właściwe opracowanie wyników pomiarów polega na uwzględnieniu poprawek, określeniu błędu i obliczeniu związków ilościowych między poszczególnymi wielkościami.

Dwuletnią serię pomiarów (ok. 3200 analiz koncentracji materiału rozpuszczonego i zawiesiny oraz ok. 2800 szt. malowanych otoczków) opracowano przy zastosowaniu metod statystyki matematycznej, co umożliwiło uchwycenie związków między parametrami transportu przez obliczenie korelacji. Obliczenie współczynników równań regresji metodą najmniejszych kwadratów częściowo wyeliminowało błędy pomiarowe. Graficzny obraz równań regresji umożliwia prześledzenie mechanizmu transportu materiału i jego prognozę dla różnych wartości przepływu.

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

$$L = \sum_1^n C \cdot Q \cdot \Delta t,$$

gdzie:  $L$  — wynoszony ładunek materiału;  $n$  — liczba próbek;  $C$  — koncentracja materiału;  $Q$  — objętość przepływu w czasie pobierania próbek;  $\Delta t$  — przedział czasu przypadający na dany pomiar.

Dokładność obliczonego ładunku zależy zasadniczo od zmienności koncentracji  $C$  w czasie  $\Delta t$ . Przy średniej częstotliwości pobierania prób wody co 3 godz. i założeniu zmienności koncentracji zawiesiny w granicach 30—50% względny błąd obliczonego ładunku w czasie dużego wezbrania waha się w granicach 15—30%.

Przyjmując średnią dokładność wyznaczonej masy zawiesiny w 1 l wody na  $\pm 0,0002$  g, w kolejnych przeliczeniach otrzymujemy nieznaczne błędy wynikające z uproszczeń, które w skali roku nie przekraczają 0,001% obliczonej masy i są nie-

znaczne w porównaniu z błędami wynikającymi z małej częstotliwości pomiarów zmaczenia.

Rozmiary transportu dennego, określone na podstawie pomiarów objętości złożonych aluwów powyżej uregulowanego odcinka koryta koło Nowego Sącza, przeliczono na jednostki masy. Jako podstawę przeliczeń przyjęto ciężar  $1 \text{ m}^3$  aluwów, który w przekroju pomiarowym wynosił średnio 1652 kg. Otrzymane wartości transportu nie obejmują części drobnego materiału piaszczystego, który mógł być przenoszony poprzez budowle regulacyjne w dół rzeki.

Pomimo wprowadzenia do wszystkich dziedzin nauki i techniki Międzynarodowego Układu Jednostek SI (H. Chmielewski 1969) autor pozostał częściowo przy tradycyjnym układzie stosowanym powszechnie na świecie do określania bilansu denudacyjnego (ułatwia to porównania).

W pracy zastosowano ogólnie przyjętą w światowej literaturze geomorfologicznej terminologię dotyczącą podstawowych parametrów transportu:

- kompetencja rzeki (competence) — zdolność rzeki do transportu określonej frakcji materiału dennego;
- pojemność rzeki (capacity) — zdolność rzeki do transportu określonej masy (lub objętości) materiału;
- obciążenie rzeki materiałem, ładunek materiału, natężenie transportu (load) — masa materiału przepływająca przez poprzeczny przekrój koryta w jednostce czasu;
- koncentracja materiału rozpuszczonego ( $C_D$  — concentration of dissolved material); koncentracja zawiesiny, zmaczenie, mętność ( $C_S$  — concentration of suspended material, turbidity) — masa materiału w jednostce objętości, wyrażona w  $\text{mg/l}$ ,  $\text{g/m}^3$ ,  $\text{kg/m}^3$ ;
- ładunek materiału rozpuszczonego ( $L_D$  — discharge of dissolved load); ładunek zawiesiny ( $L_S$  — discharge of suspended load) — masa materiału przepływająca przez poprzeczny przekrój koryta w jednostce czasu, wyrażona w  $\text{g/s}$ ,  $\text{kg/s}$ ,  $\text{t/24h}$ ,  $\text{t/rok}$ .

\*

\*                      \*

Praca wykonana została w Zakładzie Geografii Fizycznej Instytutu Geografii PAN w Krakowie pod kierunkiem prof. dr hab. L. Starkła, któremu za wielkie starania, które doprowadziły do zatrudnienia mnie w Instytucie Geografii PAN (co umożliwiło szybkie opracowanie materiałów), za trud opieki, okazywaną życzliwość i wielogodzinne dyskusje składam wyrazy serdecznego podziękowania. Szczególną wdzięczność winien jestem doc. dr hab. K. Klimkowi, który zachęcił mnie do napisania tej rozprawy. Cenne rady i wskazówki, które zechciał mi przekazać oraz wielka życzliwość przyczyniły się do szybkiego ukończenia pracy, za co składam Mu w tym miejscu wyrazy serdecznego podziękowania. Koleżankom i Kolegom z Zakładu Geografii Fizycznej Instytutu Geografii PAN w Krakowie, a w szczególności



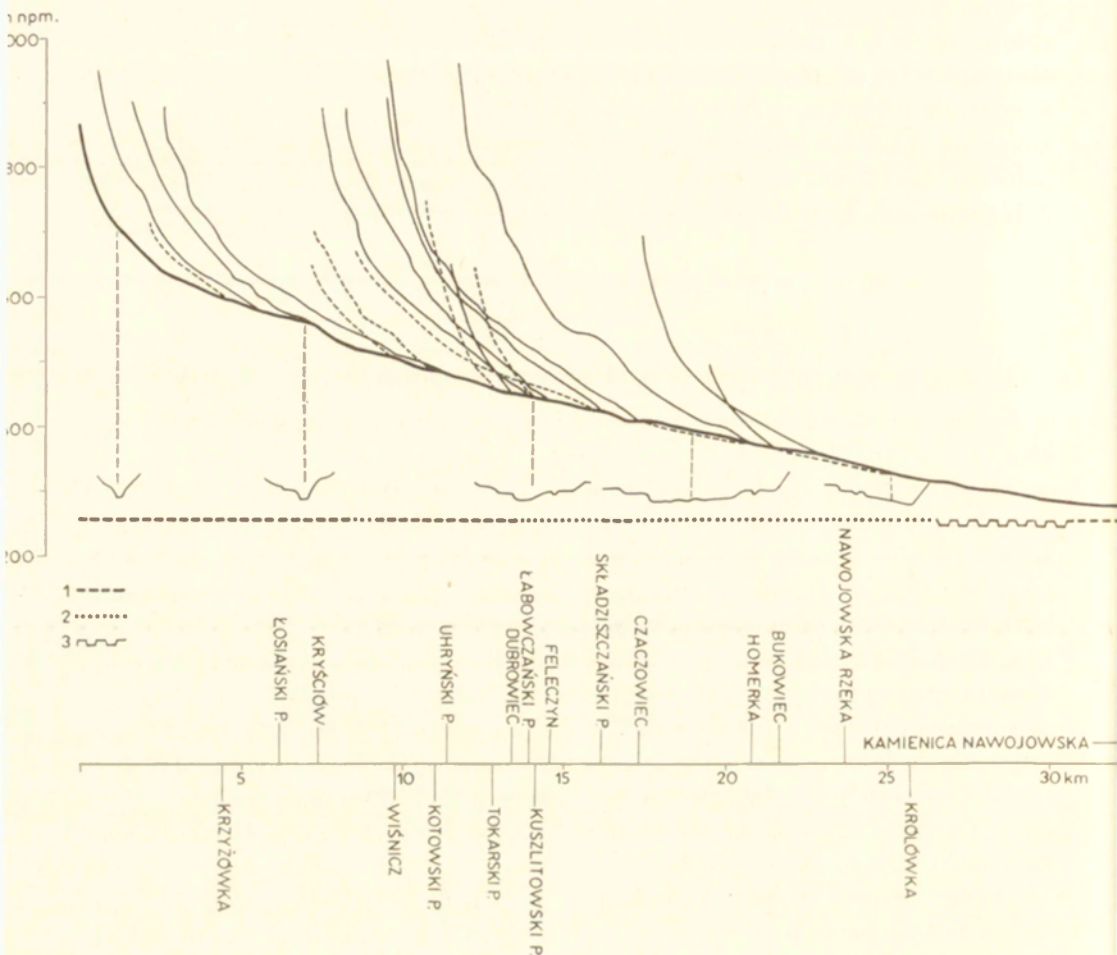
dr A. Kotarbie, dr T. Gerlachowi oraz dr J. Słupikowi z Instytutu Geografii UJ, dziękuję za cenne wskazówki i dyskusje. Mgr E. Gilowi ze Stacji Naukowej Instytutu Geografii PAN w Szymbarku k. Gorlic składam podziękowanie za umożliwienie korzystania z instrumentów pomiarowych i laboratorium. Rysunki do pracy wykonała mgr M. Klimek, a zdjęcia zawiesiny doc. dr hab. S. Geroch. Bardzo wdzięczny jestem również Żonie mojej, Jolancie, która wykonała analizy laboratoryjne materiału rozpuszczonego i zawiesiny, oraz Rodzicom za pomoc w badaniach terenowych.

#### TEREN BADAŃ

Kamienica Nawojowska jest prawobrzeżnym dopływem Dunajca uchodzącym w Kotlinie Sądeckiej. Jej dopływy rozcinają wschodnią część wału Beskidu Sądeckiego i brzeżne grzbiety Beskidu Niskiego.

Zlewnia o powierzchni 239 km<sup>2</sup> leży na wysokości 1084–280 m npm. Zbudowana jest z fliszowej serii magurskiej. Pod względem odporności przeważają tu skały średnio i mało odporne, typowe dla obszarów beskidzkich położonych na wschód od doliny Dunajca (L. Starkel 1972a). Do odpornych należą gruboławicowe, średnioziarniste i gruboziarniste piaskowce magurskie z cienkimi przewarstwieniami łupków. Piaskowce mają spoiwo przeważnie ilaste, ilasto-wapienne lub krzemionkowo-ilaste; często występują strzałki kalcytu. Średnio odporne cienkoławicowe piaskowce warstw belowskich (dolny eocen), przewarstwione łupkami, łatwo wietrzejąc rozpadają się na płyty. Podobnie wietrzeją mało odporne twarde margle łąckie (dolny i środkowy eocen) z wkładkami średnio- i drobnoziarnistych piaskowców glaukonitowych, rogowców i piaskowców magurskich. Bardzo szybkiemu wietrzeniu ulega seria mało odpornych pstrych łupków (paleocen — dolny eocen).

Ogólny kierunek struktur geologicznych jest zgodny z osią doliny głównej i z wydłużonym kształtem zlewni w kierunku SE–NW. Doliną Kamienicy Nawojowskiej (k. Nawojowej), założonej w osi antykliny, przebiega granica tektoniczno-facjalna między dwoma strefami płaszczowiny magurskiej: środkową-gorlicką (synklinalne pasmo Czerszli 877 m npm.) i wewnętrzną tzw. sądecką (zachodnia część zlewni). Granica ta ma prawdopodobnie charakter tektoniczny (W. Sikora 1970; S. Węławik 1969). Serie paleogeńskie strefy sądeckiej zawierają liczne wkładki mało odpornych margli łąckich, których brak w strefie środkowo-gorlickiej. Zróżnicowanie litologiczne tych stref znajduje swoje odbicie w rzeźbie. W południowo-zachodniej części zlewni wyrównane wododzielne grzbiety pasma Jaworzyny Krynickiej o rzeźbie średniogórskiej i maksymalnej wysokości 1084 m npm. (Runek) budują odporne piaskowce magurskie wypełniające synkliny. Dominują tu proste i strome stoki o spadkach 15–30°, które schodzą do den wąskich V-kształtnych bocznych dolin. Przylegają do nich spłaszczone niższe grzbiety (poziom śródgórski 650–800 m npm., 250–300 m nad dna dolin) i wysokie pogórza zbudowane z paleogeńskich serii o dużym udziale mało odpornych margli łąckich. Opadają one stopniami w dolinę



Ryc. 2. Profil podłużny Kamienicy Nawojowskiej i jej dopływów (dopływy prawobrzeżne – linia przerywana): 1 – odcinki erozji wglębnej; 2 – odcinki akumulacji; 3 – odcinek uregulowany betonowymi stopniami

Fig. 2. Long-profile of the Kamienica Nawojowska and its tributaries (right-bank tributaries -broken line): 1 – reaches of deep erosion; 2 – reaches of accumulation; 3 – reaches regulated by means of concrete steps

Kamienicy Nawojowskiej i ku Kotlinie Sądeckiej. Przeważają tu wypukłe lub wypukło-wklęsłe stoki o nachyleniach 12–18°.

Północno-wschodnią część zlewni stanowi wododzielny zwarty synklinalny grzbiet Czerszli (877 m npm.), zbudowany z odpornych piaskowców magurskich, który opada w dolinę stromymi do 30° prostymi stokami.

Dolna część zlewni sięga w Kotlinę Sądecką, która jest obniżeniem tektonicznym współcześnie wginanym, odpreparowanym i przemodelowanym przez erozję rzeczną (L. Starkel 1972). Na utworach fliszowych zalegają tu miejscami płyty ilasto-piaszczystych utworów miocenijskich z wkładkami węgla brunatnego, a na powierzchni aluwia czwartorzędowe budujące akumulacyjne stopnie terasowe.

Do stylu budowy geologicznej dowiązuje asymetryczny kształt dorzecza (ryc. 1, 2). Krótkie, 1,9–3,7 km (oprócz Królówki: 17,1 km przy spadku 20,5°/00), i liczne dopływy prawobrzeżne płyną w płytkich dolinach o dużym spadku (58–135°/00). Liczne i dłuższe (2,2–9,1 km) dopływy lewobrzeżne o mniejszym spadku (46–100°/00) płyną w głębokich V-kształtnych dolinach o niewyrównanym spadku z wieloma wodospadami na wychodniach skał piaskowcowych. Dopływy koncentrują się w środkowym biegu rzeki między Nową Wsią a Frycową (ryc. 1). Osie dolin dopływów skierowane są prostopadle do biegu struktur geologicznych, co przy niewyrównanym spadku ułatwia dostawę i wynoszenie materiału. W rozszerzeniach występują wąskie listwy pokryw akumulacyjnych, które zalegają na wysokich cokołach skalnych. W kierunku ujścia przechodzą w niewielkie stożki napływowe. Typowym procesem kształtującym koryta jest erozja wgłębna, a w odcinkach o mniejszym spadku erozja boczna.

Długość Kamienicy Nawojowskiej wynosi 32,2 km, przy średnim spadku 18,15°/00, który w górnym biegu (do ujścia Kryściowa) wynosi 43,13°/00, a w środkowym (do ujścia Homerki) 12,45°/00 i zmniejsza się w Kotlinie Sądeckiej do 7,95°/00.

Górny odcinek doliny przypomina dopływy lewobrzeżne. W odcinku źródłowym ma charakter głębokiego V-kształtnego wciosu. Koryta o szerokości 1–5 m przechodzi wąskimi 1–10 m szerokości listwami terasowymi w strome stoki o nachyleniu do 25°. Występują tu liczne progi skalne (prostopadle i skośnie do biegu koryta) i odcinki wymuszonej akumulacji powyżej obalonych w korycie pni drzew. Dostawa materiału ogranicza się do stref aktywnych podcięć i dna skalnego koryta. Duży spadek podłużny przy niewielkiej szerokości koryta powoduje dużą prędkość nurtu nawet przy małych przepływach. Toteż istnieją tutaj potencjalne warunki silnej erozji dna i brzegów oraz transportu. Dominującym procesem jest erozja wgłębna przy niewielkim udziale erozji bocznej.

Poniżej Nowej Wsi dolina ma płaskie sterasowane dno. Wzdłuż koryta występują wąskie pokrywy akumulacyjne terasy zalewowej i nadzalewowej, złożone na cokołach skalnych, które ograniczają boczną migrację koryta. Do ujścia potoku Feleczyńskiego jest to typowy odcinek erozji wgłębnej. Przeważnie proste koryta, o szerokości 5–20 m, wycięte jest w litych skałach, a niekiedy w pokrywach akumula-

cyjnych (fot. 1, 2). W dnie koryta występują równoległe, a miejscami skośne lub poprzeczne w stosunku do osi koryta wody, wypreparowane żebra piaskowcowe (berda), progi skalne i eworsyjne rynny. Duże progi są najczęściej rozcinane marginalnie w powiązaniu z erozją boczną. U podnóży progów działa eworsja, a kotły eworsyjne osiągają głębokość do 2,5 m. W rezultacie tego środkowy bieg Kamienicy Nawojowskiej składa się ze względnie wyrównanych odcinków pooddzielanych progami lub odcinkami o zwiększonym spadku. Nieliczne aktywne podcięcia cokołów skalnych teras z leżącą na nich żwirowo-piaszczystą pokrywą akumulacyjną dostarczają niewielkich ilości materiału. Przeważa tu proces erozji wgłębnej skalnego koryta, który wraz z dopływami składa się na główne źródło dostawy nieobtoczonego rumoszu lub słabo obtoczonych żwirów.

Poniżej wylotu potoku Feleczyńskiego koryto Kamienicy Nawojowskiej o szerokości 10–50 m wycięte jest przeważnie w żwirowo-głazowych osadach aluwialnych. Występują w nim liczne łachy centralne i przybrzeżne, z których największe mają 15–70 m długości (fot. 3–5). Są to zarówno osadzone niedawno i pozbawione roślinności łachy żwirowo-głazowe, jak i starsze, występujące w poziomie terasy zalewowej utrwalone przez roślinność i nadbudowywane osadami piaszczystymi. Spadek podłużny koryta, jak również zwierciadła niskiej wody, ma profil schodowy. Występują w nim bystrza przedzielone odcinkami o mniejszym spadku. Niskie kamieńce przybrzeżne i łachy korytowe są zalewane podczas wielkich wezbrań o przepływach ponad 70 m<sup>3</sup>/s. Przepływy pełnokorytowe (bankfull stage) w tym odcinku pojawiają się raz na kilka lat w czasie katastrofalnych wezbrań o przepływach ponad 200 m<sup>3</sup>/s. Podczas średnich i wielkich wezbrań koryto dzieli się na liczne ramiona i przypomina typowe roztoki. Jego kręty przebieg zostaje wyprostowany jedynie podczas katastrofalnych powodzi. Dominującym procesem jest boczna migracja koryta i wsteczne rozcinanie łach korytowych przy niewielkim transporcie w dół rzeki. Wzdłuż koryta występuje często szeroka do 450 m równina zalewowa o wysokości 1–2,5 m. W jej obrębie widoczne są ślady koryt przelewowych (chutes) uruchamianych w czasie katastrofalnych powodzi. Równinę zalewową zajmują zarośla łęgowe lub łąki. Jest ona współcześnie nadbudowywana w czasie katastrofalnych powodzi o przepływach przekraczających 200 m<sup>3</sup>/s (fot. 6).

Dolny odcinek koryta w Kotlinie Sądeckiej przed regulacją charakteryzował się akumulacją i tendencją do silnej migracji bocznej koryta. W ostatnim dziesięcioleciu został on wyprostowany przez regulację i zabudowę stopniami betonowymi. W skalnym odcinku ujściowym (poniżej betonowych stopni) przeważa intensywna erozja wgłębna, która między stopniami ma charakter eworsji prowadzącej do powstawania kotłów.

Mała odporność utworów fliszowych na wietrzenie spowodowała, że stoki okryte są gliniasto-pyłastymi pokrywami z domieszką ostrokrawędzistego gruzu o miąższości rosnącej u podnóży. W strefie pogórzy są one bardziej gliniaste i zawierają mniej części szkieletowych. Utwory te są rezultatem procesów wietrzenia i soliflukcji w zimnych okresach czwartorzęd. Rozwinięte na nich gleby są typowym

przykładem płytkich gleb górskich z dużą zawartością szkieletu, którego udział wzrasta z głębokością. Należą do gatunku glin średnich i ciężkich. Niewielki procent powierzchni zajmują gleby pylaste i piaszczysto-żwirowe mady w dnie doliny (B. Dobrzański i A. Malicki 1949). Są to przeważnie gleby bielcowe i brunatne, umiarkowanie wilgotne, o małej zdolności retencji wody. Ich podatność na splukiwanie zmienia się w ciągu roku i zależy od stanu zwięzłości agregatów glebowych i wilgotności; silnie wzrasta w okresie bezśnieżnych zim i okresów długotrwałej suszy.

Górską część zlewni powyżej 550 m npm. oraz bardziej strome stoki pogórzy zajmują lasy (42,7%). W strefie pogórzy są to zespoły *Querceto-Carpinetum*. W wyższych partiach przeważają typowe lasy jodłowo-bukowe należące do regła dolnego (*Fagetum carpaticum*) z fragmentami pierwotnej puszczy karpackiej w źródłowych odcinkach potoków: Łosie, Uhryń, Łabowiec, Czaczów. Obszary leśne, wspólnie intensywnie eksploatowane, są pocięte gęstą siecią dróg i rynien do transportu drzewa. Jak wykazały wstępne badania autora w zalesionej zlewni Kryściów (ryc. 1), zmniejszają one wydatnie ochronną rolę lasu w formowaniu fał wezbraniowych i są źródłem dostawy dużych ilości drobnej zwietrzliny transportowanej w zawiesinie (por. K. Figuła 1966).

Dna dolin i niższe części stoków zajmują pola uprawne — 35,6%, a miejsca wilgotniejsze łąki i pastwiska — 8,7% oraz nieużytki — 13,0% (M. Kędziora 1954). Wśród upraw przeważają zboża (żyto, pszenica, owies) i ziemniaki, których znaczny areal stwarza szczególnie sprzyjające warunki dla splukiwania (J. Słupik 1973).

Do szachownicy pól w obszarach pogórzy dowiązuje kratowy układ dróg. System dróg przebiegających grzbietami wododziałów i dnami dolin połączony jest gęstą siecią bocznych dróg, biegnących najczęściej zgodnie ze spadkiem. Obok bruzd polnych zwiększa on wielokrotnie gęstość naturalnych cieków, przyspiesza obieg wody w zlewni i dostarcza dużych ilości drobnej zwietrzliny. W ostatnim dziesięcioleciu występuje tu typowe dla przeważającej części dużych dolin beskidzkich intensywne pogłębianie koryta, związane z jego regulacją i eksploatacją na skalę przemysłową aluwii Dunajca poniżej ujścia Kamienicy Nawojowskiej (Marcinkowice) oraz z jej koryta w Łabowej, Frycowej i Nawojowej. Wywołało to zakłócenie naturalnego rytmu pracy rzeki.

Niektóre współczesne tendencje w kierunku i natężeniu zmian hydrologicznych i procesów fluwialnych mogą mieć związek ze zmianą użytkowania ziemi po II wojnie światowej, spowodowaną przesiedleniem Łemków zamieszkujących górną i środkową część zlewni.

Zlewnia Kamienicy Nawojowskiej reprezentuje średniej wielkości zlewnię beskidzką o rzeźbie średniogórskiej z dużym udziałem wysokich i średnich pogórzy, zbudowaną w przewadze ze średnio i mało odpornych skał. Dolina charakteryzuje się młodym, współcześnie rozwijającym się intensywnie przez erozję wgłębną profilem podłużnym, który odmładza dojrzały profil z okresu glacialnego. Zmniejszanie się zasięgu młodych teras w górę rzeki oraz głębokości rozcięcia cokołu skalnego jest świadectwem pogłębiania postępującego od dołu, które w ostatnich latach

jest bardzo intensywne. Prawdopodobnie ma to też zapewne swą przyczynę w trwających nadal tendencjach podnoszących, o których świadczy młodość form Beskidu Sądeckiego (proste i wypukłe stoki), spazzone poziomy i terasy w anteceden-nych przełomach oraz koryta intensywnie pogłębiane w litych skałach (L. Starkel 1972a).

Położenie doliny w subsekwentnym pasie mniej odpornych skał na granicy Beskidu Sądeckiego i Beskidu Niskiego (L. Starkel 1977a) wyraża się między innymi w „przejściowym” stylu budowy skalnego koryta, w którym odcinki z berdami i progami skalnymi przypominają analogiczne części koryt rzek Beskidu Niskiego (Białej Dunajcowej, Ropy, Wisłoki). Szerokie roztokowe odcinki aluwialnego koryta z siecią zapasowych koryt na terasach zalewowych, związane z gwałtownym wpływem wód lewobrzeżnymi dopływami, można porównać do akumulacyjnych koryt rzek zachodnio-beskidzkich (pn. dolny bieg Ochotnicy, Grajcarka, Łososiny, Mszanki, Koszarawy).

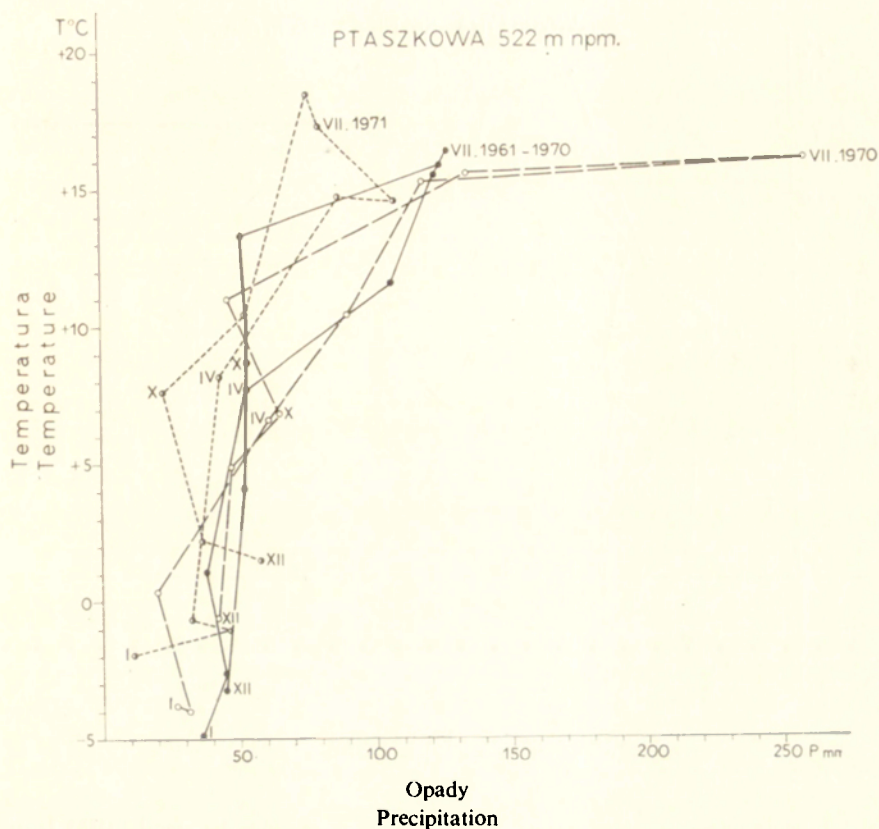
#### CHARAKTERYSTYKA HYDROLOGICZNA OKRESU BADAŃ NA TLE WIELOLECIA

Zlewnia Kamienicy Nawojowskiej otrzymuje rocznie średnio 947 mm opadów, których największe nasilenie występuje latem w postaci deszczu (Z. Kajetanowicz i B. Osuch 1962). W zimie opady występują w postaci śniegu. Pokrywa śnieżna w środkowej części zlewni (Łabowa 452 m n.p.m.) o maksymalnej grubości 61 cm utrzymuje się przez 99 dni w ciągu roku (W. Milata 1937). W poszczególnych latach rozkład i suma opadów rocznych ulega wahaniom od 1270 w 1962 r., do 650 mm w 1969 r. (ryc. 3, 4). Znajduje to odbicie w indywidualnych cechach hydrologicznych niemal każdego roku (tab. I–IV). Dolna część zlewni do wysokości 650 m n.p.m. leży w piętrze klimatycznym umiarkowanie ciepłym — średnia roczna temperatura od  $+6$  do  $+8^{\circ}\text{C}$ , a górna (650–1082 m n.p.m.) w umiarkowanie chłodnym — średnia roczna temperatura od  $+4$  do  $+6^{\circ}\text{C}$  (M. Hess 1965).

Charakterystyka hydrologiczna Kamienicy Nawojowskiej została oparta na wartościach przepływu z pominięciem stanów wody, które skutkiem silnej erozji głębszej (szczególnie w ostatnich latach) są trudne do porównania w wieloleciu (ryc. 5, 6).

Kamienica Nawojowska jest typową rzeką beskidzką o deszczowo-śnieżno-gruntowym reżimie zasilania i koncentracji odpływu w okresie wiosennych wezbrań roztopowych i letnich wezbrań deszczowych (ryc. 7). Średni roczny przepływ (1961–1970) w Nowym Sączu (tab. I, II) wynosił  $3,36\text{ m}^3/\text{s}$  ( $14,1\text{ l/s}$  z  $\text{km}^2$ ), a w Łabowej  $1,198\text{ m}^3/\text{s}$  ( $17,8\text{ l/s}$  z  $\text{km}^2$ ). W poszczególnych latach w przekroju Nowy Sącz średni roczny przepływ ulegał wahaniom od  $1,86$  w 1961 r. do  $5,60\text{ m}^3/\text{s}$  w 1970 r. (ryc. 8).

Miesiące wiosenne (marzec i kwiecień) oraz letnie (czerwiec — sierpień) charakteryzują się wyższymi średnimi przepływami, związanymi z występowaniem wezbrań



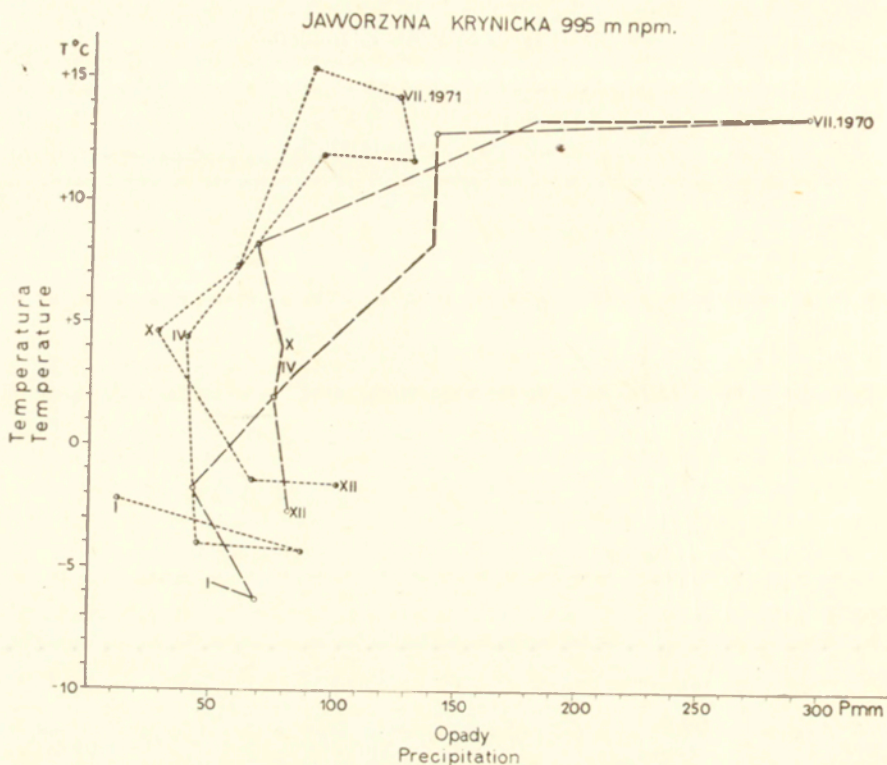
Ryc. 3. Średnie miesięczne temperatury powietrza i sumy opadów dla stacji PIHM Ptaszkowa (522 m n.p.m.) w 1970 i 1971 r. na tle dziesięciolecia 1961–1970

Fig. 3. Mean monthly air temperatures and precipitation totals for the PIHM station at Ptaszkowa (522 m a.s.l.) in 1970 and 1971 on the background of the decade 1961–1970

roztopowych i deszczowych. Głębokie niżówki jesienią i zimą są przyczyną niskich średnich miesięcznych przepływów (tab. I–III).

W wieloleciu zaznacza się wyraźna przewaga odpływu w półroczu zimowym, związana z utrzymującymi się przez długi okres czasu wysokimi przepływami wzebrań roztopowych, zasilanych ze stopniowo zanikającej w poszczególnych piętrach wysokościowych pokrywy śnieżnej (ryc. 9–11).

W przeważającej części roku (około 200 dni) występują przepływy zbliżone do średniego rocznego (ryc. 12). Tylko niewielki procent roku przypada na przepływy wzebraniowe, które zasadniczo występują wiosną i latem (ryc. 9; tab. III). Za wzebranie uważam skokowy wzrost przepływu Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu do wartości  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , związany z ablacją pokrywy śnieżnej lub opadami deszczu (ryc. 13), który jest przyczyną zmian stabilności i ilości transportowanego materiału



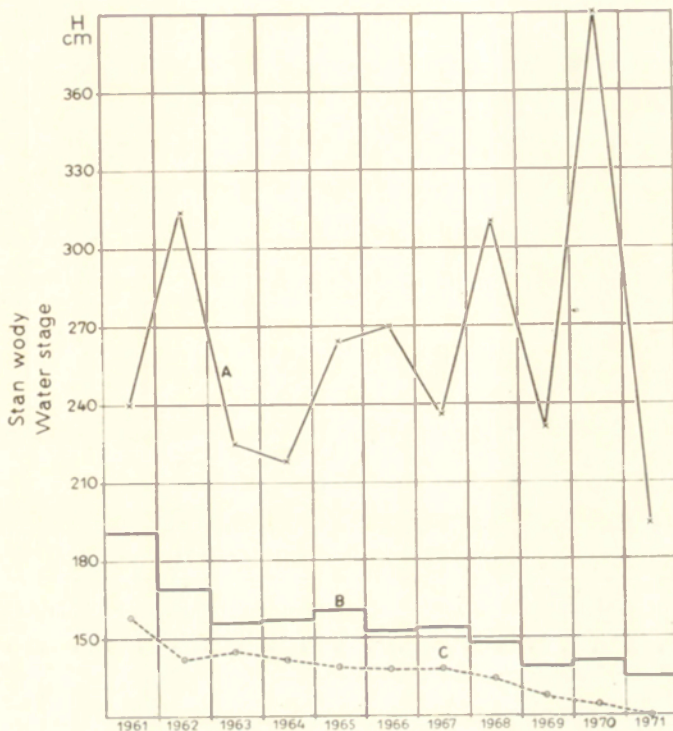
Ryc. 4. Średnie miesięczne temperatury powietrza i sumy opadów dla stacji PIHM Jaworzyna Krynicka (995 m n.p.m.) w 1970 i 1971 r.

Fig. 4. Mean monthly air temperatures and precipitation totals for the PIHM station Jaworzyna Krynicka (995 m a. s. l.) in 1970 and 1971

(koncentracja zawiesiny  $> 25 \text{ g/m}^3$ ). Małe wymiary zlewni, brak lasów w dolnych częściach stoków, gęsta sieć stałych dopływów i okresowo odwadnianych dróg gruntowych i ścieżek przyspiesza obieg wody w zlewni i powoduje gwałtowny wzrost przepływu.

Kilkudniowe ocieplenia zimą (grudzień — luty) wywołują niewielkie wezbrania odwilżowe o wolno wzrastającym przepływie i kulminacjach do  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  (ryc. 9, 14, 15). Wiosenne wezbrania roztopowe (luty — kwiecień) osiągają niekiedy (1966 r.) kulminacje do  $70,2 \text{ m}^3/\text{s}$  (ryc. 9), które przy dobowym cyklu wahań przepływu trwają zazwyczaj kilka dni (ryc. 10, 11, 16). Zaczynają się one na ogół powolnym wzrostem przepływu, który w fazie poprzedzającej kulminację gwałtownie wzrasta. Zróżnicowany sposób zaniku pokrywy śnieżnej daje w efekcie wezbrania radiacyjne, adwekcyjne i adwekcyjno-opadowe (K. Figuła 1960; L. Starkel 1960).



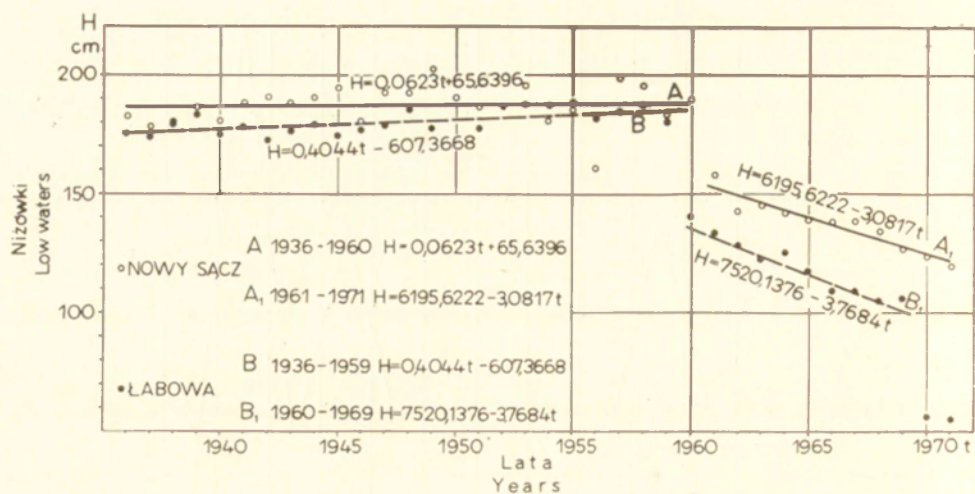


Ryc. 5. Ekstremalne i średnie roczne stany wody Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu (1960–1971): *A* — maksymalne; *B* — średnie; *C* — minimalne

Fig. 5. Extreme and mean annual water-stages in the Kamienica Nawojowska at Nowy Sącz (1960–1971): *A* — maximum; *B* — mean; *C* — minimum

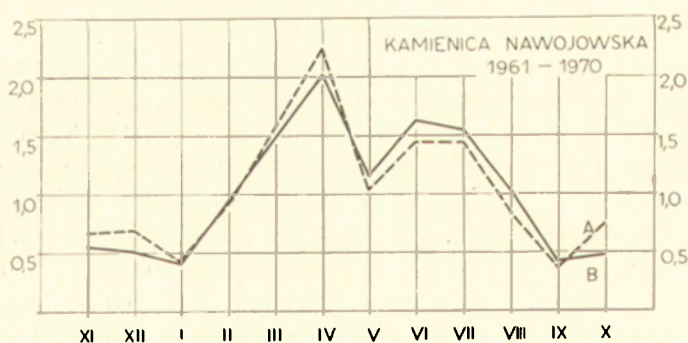
Przeważająca część wezbrań wywołana zostaje przez opady deszczu. Do wystąpienia kulminacji przepływu około  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  potrzebny jest opad około  $20 \text{ mm}/\text{dobę}$  (ryc. 13). Letnie wezbrania deszczowe o kulminacjach do  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  (ryc. 9) pojawiają się średnio co 3–5 lat. Przy przepływach około  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  rozpoczyna się przepływ pełnokorytowy (bankfull stage) na poszczególnych odcinkach, natomiast przy około  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  na całej długości rzeki. Co kilkanaście lat mają miejsce gwałtowne katastrofalne powodzie (ryc. 17, 18; fot. 7) przekraczające  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $1300 \text{ l/s}$  z  $\text{km}^2$ . Wywołują je rozlewne deszcze z opadem przekraczającym  $100 \text{ mm}/\text{dobę}$  (T. Niedźwiedź 1972). Charakteryzują się one szybkim wzrostem przepływu i krótkim czasem trwania, wyrażającym się wartością ułamka lub kilku procent czasu roku. Przepływy powodziowe Kamienicy Nawojowskiej mają duże znaczenie dla kształtowania się fal powodziowych Dunajca (K. Figuła 1962).

Okres badań (1 XI 1969–30 X 1971) charakteryzował się znaczną ilością wezbrań, które wystąpiły we wszystkich porach roku (ryc. 10, 11, 14–17, 19–22;



Ryc. 6. Trendy zmian minimalnych rocznych stanów wody ( $H$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (profil Nowy Sącz i Łabowa, 1936–1971)

Fig. 6. Trends of minimum annual water-stages ( $H$ ) in the Kamienica Nawojowska (cross-section at Nowy Sącz and Łabowa, 1936–1971)



Ryc. 7. Stosunek średnich miesięcznych przepływów do średniego rocznego przepływu w Kamienicy Nawojowskiej:  $A$  — profil Łabowa;  $B$  — profil Nowy Sącz

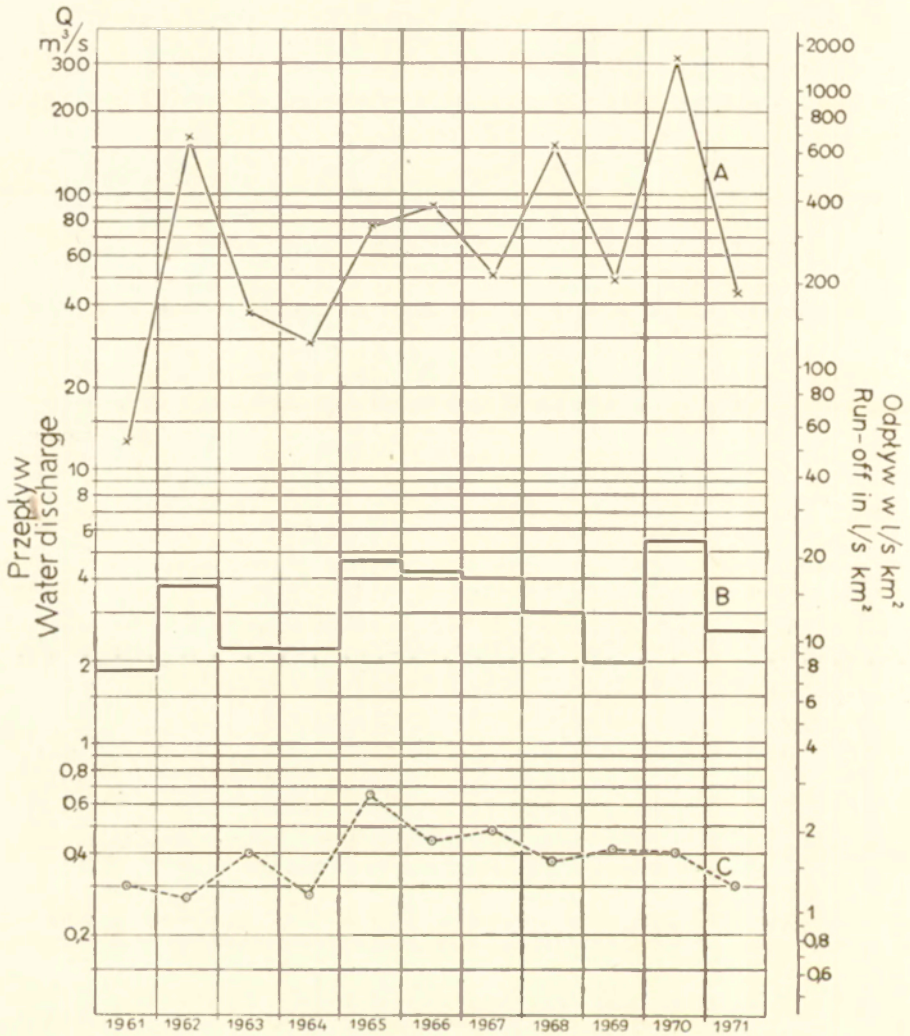
Fig. 7. Ratio of mean monthly discharge to the mean annual discharge in the Kamienica Nawojowska:  $A$  — cross-section Łabowa;  $B$  — cross-section Nowy Sącz

Tabela I. Średnie miesięczne i roczne przepływy (w m<sup>3</sup>/s) Kamienicy Nawojowskiej (przekrój Nowy Sącz) w latach 1970–1971 na tle dziesięciolecia 1961–1970

Lata	Średnie miesięczne przepływy												Średni roczny przepływ	Współczynnik splywu jednostkowego (w l/s z km <sup>2</sup> )
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
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	23,4
1971	3,27	3,07	3,06	2,78	5,65	2,61	2,34	1,92	3,62	1,07	1,26	0,81	2,61	10,9
1961–1970	1,80	1,67	1,32	3,11	4,94	6,72	3,82	5,45	5,19	3,42	1,39	1,59	3,36	14,1

Tabela II. Średnie miesięczne i roczne przepływy (w m<sup>3</sup>/s) Kamienicy Nawojowskiej (przekrój Łabowa) w latach 1970–1971 na tle dziesięciolecia 1961–1970

Lata	Średnie miesięczne przepływy												Średni roczny przepływ	Współczynnik splywu jednostkowego (w l/s z km <sup>2</sup> )
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
1970	0,169	0,198	0,995	0,248	1,240	2,292	1,433	1,887	8,597	1,445	0,395	0,781	1,656	24,6
1971	1,227	0,726	0,846	0,772	1,949	0,861	0,649	0,654	1,162	0,439	0,415	0,299	0,833	12,4
1961–1970	0,797	0,821	0,499	1,082	1,873	2,685	1,216	1,723	1,726	1,013	0,443	0,867	1,198	17,8



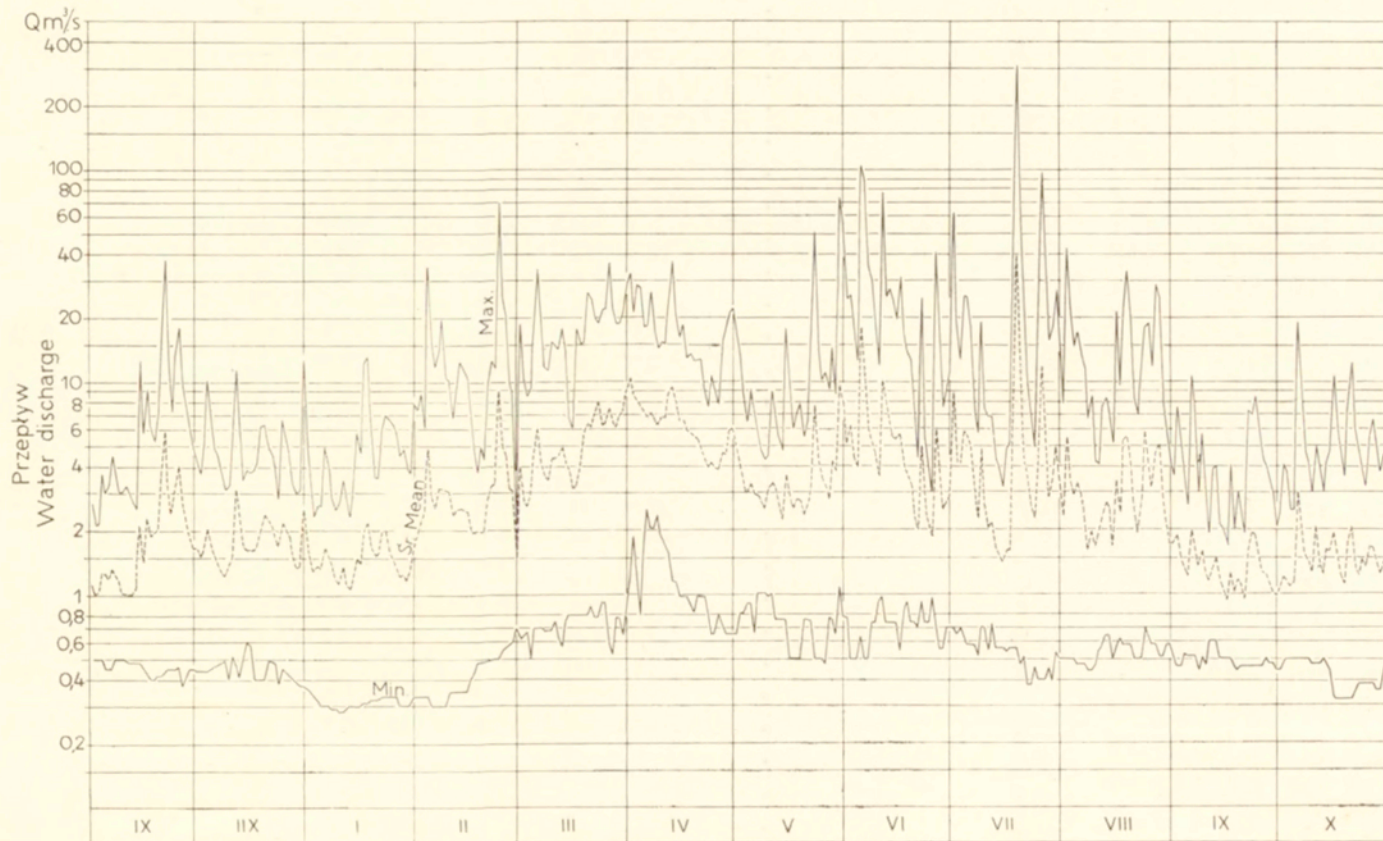
Ryc. 8. Ekstremalne i średnie roczne przepływy Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) w okresie 1961–1971: *A* – maksymalne; *B* – średnie; *C* – minimalne

Fig. 8. Extreme and mean annual discharge in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) over 1961–1971: *A* – maximum; *B* – mean; *C* – minimum

tab. III). Umożliwiły one prześledzenie mechanizmu i rozmiarów transportu materiału w czasie odmiennych sposobów zasilania rzeki, w różnych okresach wegetacji, przy różnym kształcie i wielkości fal wezbraniowych oraz długości okresów międzywezbraniowych. Na szczególną uwagę zasługuje katastrofalna powódź w lipcu 1970 r. oraz gwałtowne wezbranie deszczowe w październiku 1970 r., jako największe tego typu w minionym dziesięcioleciu (ryc. 9, 10, 17, 22).

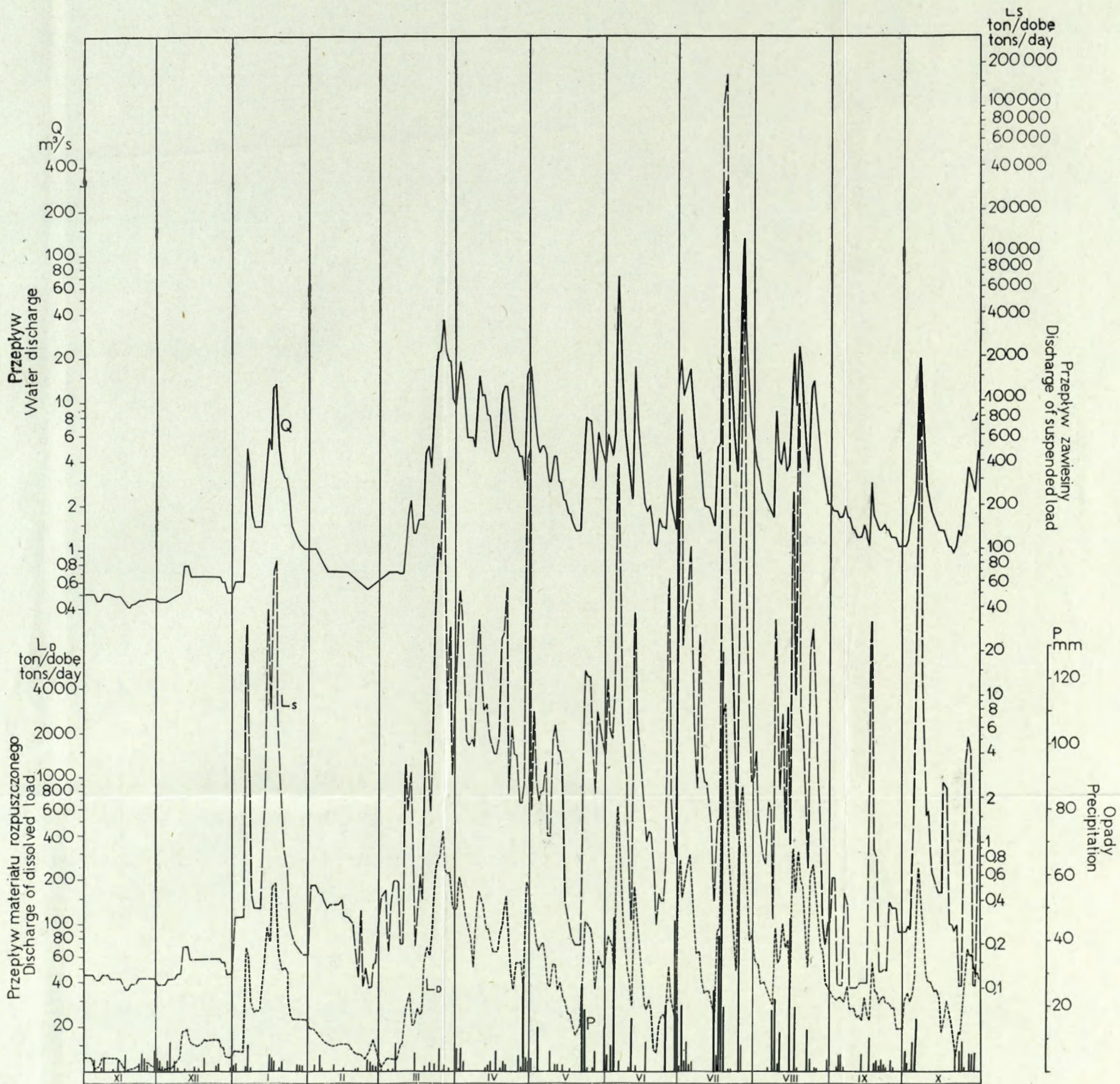
Tabela III. Liczba wezbrań i ekstremalne przepływy miesięczne (w m<sup>3</sup>/s) Kamienicy Nawojowskiej z profilu Nowy Sącz

Lata	Parametry hydrologiczne	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1970	liczba wezbrań o przepływie > 5 m <sup>3</sup> /s	—	—	2	—	1	3	1	3	3	3	—	1
	ekstrema max. min.	0,50 0,40	0,78 0,44	13,40 0,60	1,00 0,53	36,58 0,62	18,80 2,80	11,20 1,30	70,20 1,00	314,0 1,42	23,00 1,60	2,76 1,04	19,00 0,90
1971	liczba wezbrań o przepływie > 5 m <sup>3</sup> /s	1	2	1	1	1	—	2		2	1	1	—
	ekstrema max. min.	9,24 1,78	12,80 1,78	7,00 1,25	8,75 1,60	38,70 1,20	4,56 1,46	8,75 1,04	3,69 1,04	43,10 0,82	8,75 0,50	5,72 0,58	1,32 0,50
1961 – 1970	średnia ilość wezbrań o przepływie > 5 m <sup>3</sup> /s	0,6	0,8	0,3	1	2,1	1,5	1,4	1,4	1,2	1,6	0,4	0,7
	ekstrema max. min.	38,00 0,42	12,80 0,37	13,40 0,28	91,00 0,30	53,00 0,50	37,50 0,65	76,80 0,47	160,0 0,50	314,0 0,38	48,80 0,44	12,80 0,44	19,00 0,32



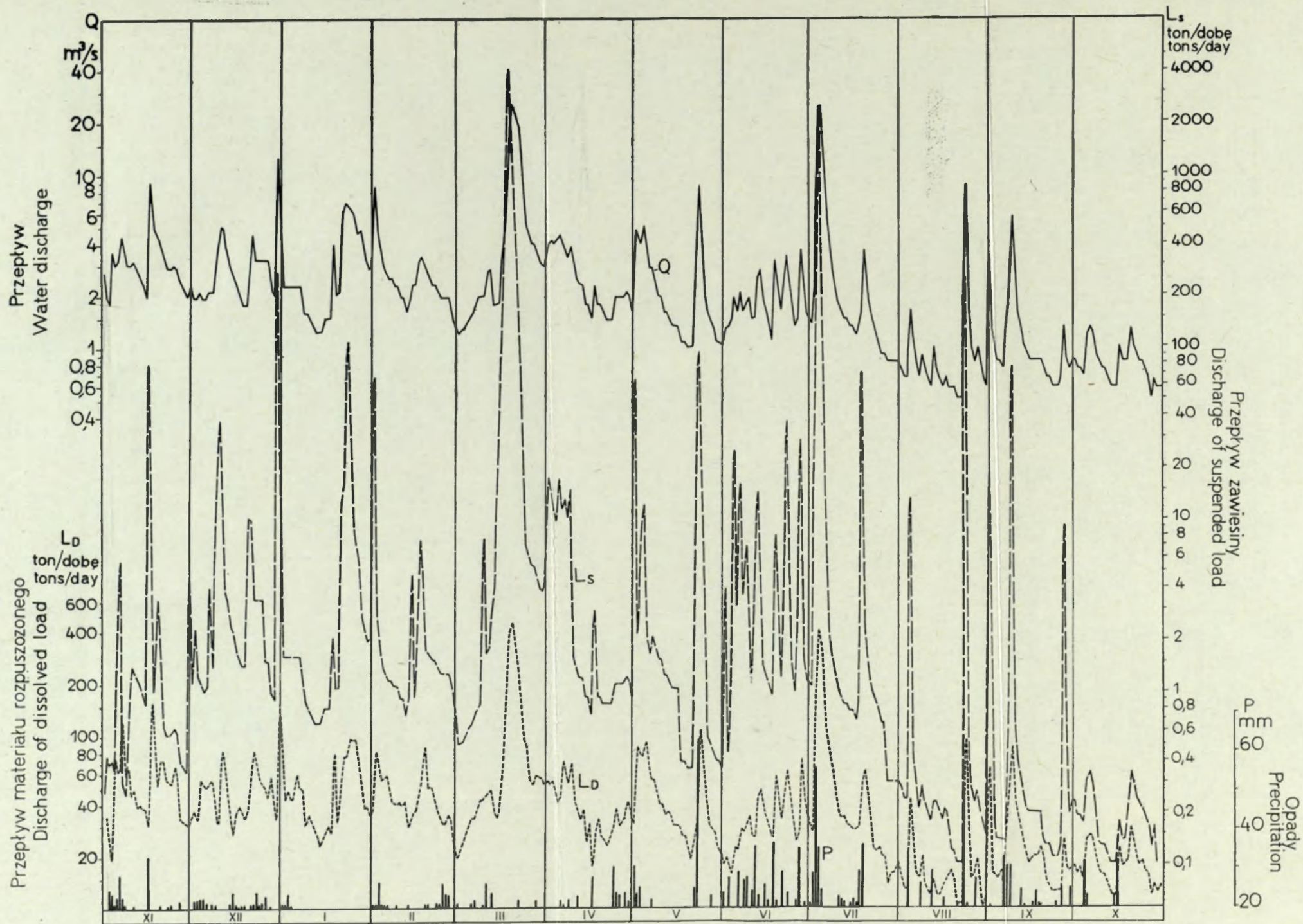
Ryc. 9. Ekstremalne i średnie dobowe przepływy Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) w okresie 1961 – 1971

Fig. 9. Extreme and mean daily discharge in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) over 1961 – 1971



Ryc. 10. Przeptywy ( $Q$ ) i ładunki: materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ) i zawiesiny ( $L_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) na tle opadów ( $P$ ) w 1970 r.

Fig. 10. Discharge ( $Q$ ) and loads: of dissolved material ( $L_D$ ) and of suspended material ( $L_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) against precipitation ( $P$ ) in 1971



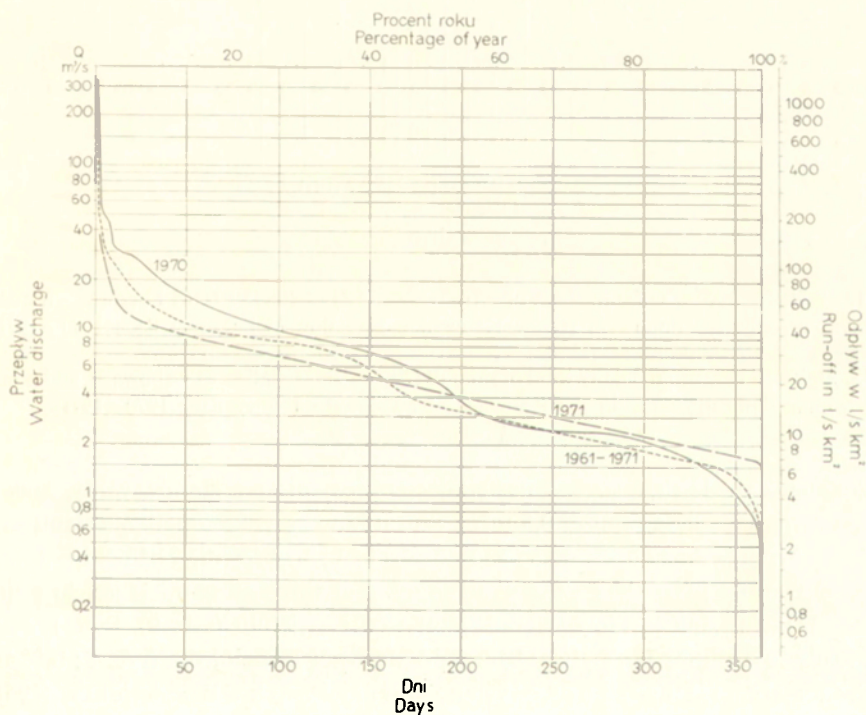
Ryc. 11. Przepływy ( $Q$ ) i ładunki: materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ) i zawiesiny ( $L_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) na tle opadów ( $P$ ) w 1971 r.

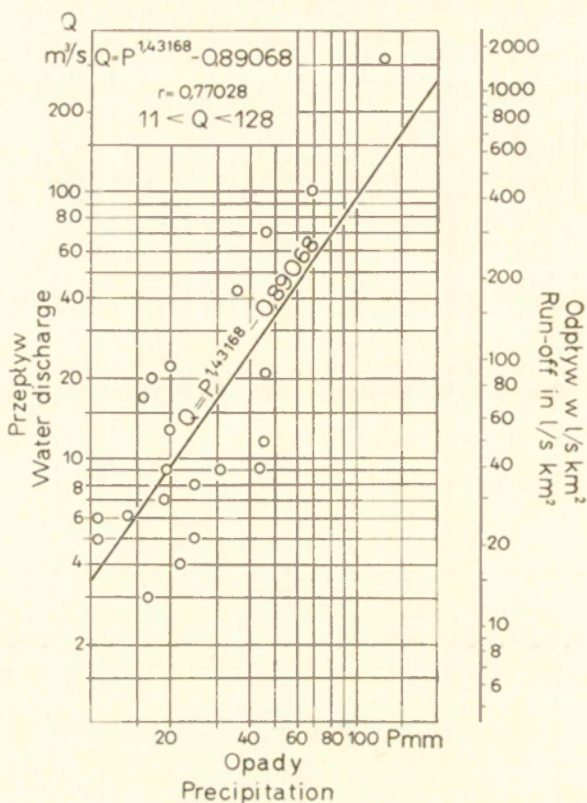
Fig. 11. Discharge ( $Q$ ) and loads: of dissolved material ( $L_D$ ) and of suspended material ( $L_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) against precipitation ( $P$ ) in 1971



Tabela IV. Odplyw miesieczny (w %) Kamienicy Nawojowskiej (przekrój Nowy Sącz)

Lata	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1961	11,77	13,02	5,60	7,01	15,38	7,34	9,59	7,61	5,29	9,93	3,48	3,98
1962	1,75	3,44	3,94	3,45	11,80	25,93	11,60	29,61	4,20	1,51	1,47	1,29
1963	4,05	4,12	6,65	3,58	11,78	33,61	15,92	4,74	3,10	2,77	2,62	7,05
1964	4,89	3,48	1,67	2,16	17,08	4,31	20,51	4,39	3,93	11,36	10,75	15,47
1965	8,24	5,74	2,93	4,01	14,88	10,01	6,19	18,69	10,77	13,11	3,18	2,24
1966	1,79	3,10	1,06	20,08	8,61	11,86	12,19	13,56	13,18	8,72	3,80	2,04
1967	7,20	6,62	2,18	11,01	17,98	15,58	14,47	14,88	2,64	2,52	1,98	2,96
1968	1,44	3,62	3,91	10,43	12,02	8,31	3,61	8,48	20,15	13,03	7,30	7,68
1969	8,04	3,73	3,04	8,71	8,59	18,56	4,33	9,22	11,29	18,30	3,15	2,05
1970	0,69	0,91	4,40	0,98	10,57	13,14	6,34	9,90	36,92	9,69	2,12	4,33
1961—1970	4,38	4,31	3,40	7,28	12,72	14,85	9,84	13,63	13,38	8,65	3,46	4,09
1971	10,23	9,95	9,12	8,14	18,30	8,18	7,58	6,00	11,71	3,46	3,96	2,60

Ryc. 12. Czas trwania poszczególnych wielkości przepływu ( $Q$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) w 1970 i 1971 r. na tle średniej z dziesięciolecia 1961—1970Fig. 12. Duration of particular values of discharge ( $Q$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) in 1970 and 1971 against the mean for the decade 1961—1970



Ryc. 13. Związek między dobową sumą opadów deszczu ( $P$ ) – stacja PIHM Łabowa – a maksymalnym przepływem dobowym ( $Q$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz 1970–1971)

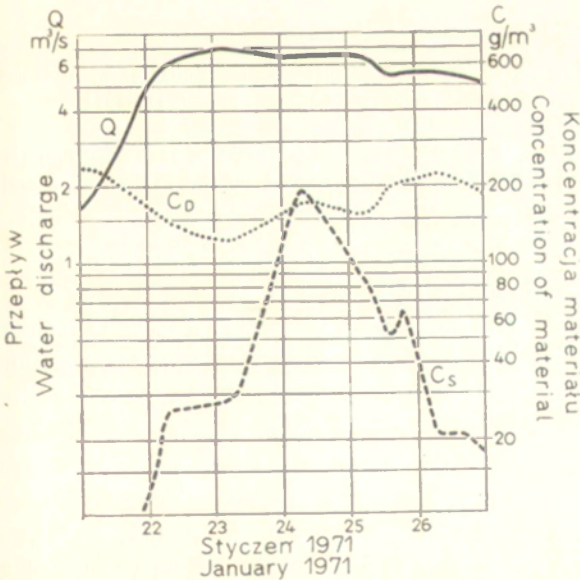
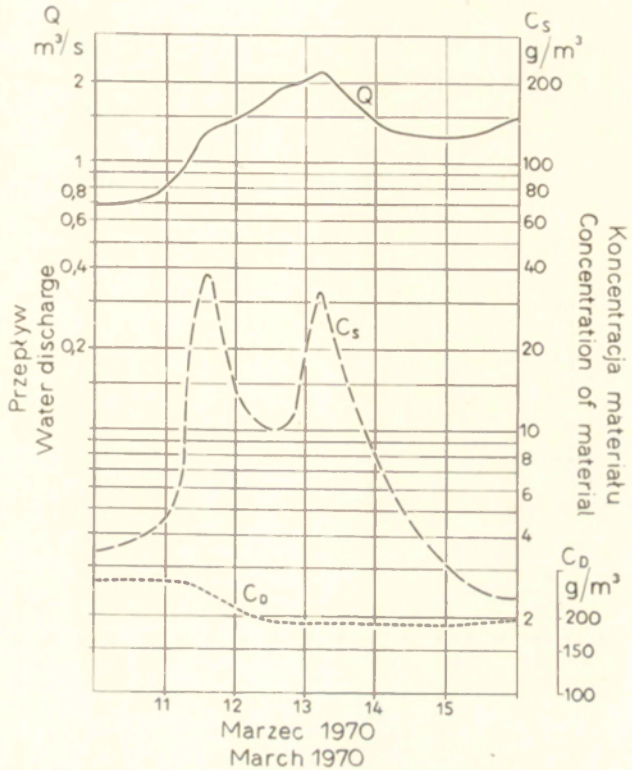
Fig. 13. Relation between the daily total of rainfall ( $P$ ) – PIHM station at Łabowa – and a maximum daily discharge in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz 1970–1971)

Wezbrania rozdzielają szybko następujące okresy niskich stanów wody, podczas których przepływ spada poniżej  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Stosunkowo szybkie opadanie stanu wody po wezbraniach wskazuje na małą zdolność retencyjną zlewni. Niżówki pojawiają się najczęściej u schyłku lata i utrzymują się z małymi przerwami w jesieni i zimie (ryc. 9–11). Zasadniczo nie występują w marcu i kwietniu (ryc. 9). Przepływy niżówkowe w okresie badań były zbliżone do wartości z wielolecia (ryc. 8; tab. III). Odpowiadające im jednak stany wody należą do najniższych w dziesięcioleciu (1961–1970), co wskazuje na silne pogłębianie koryta (ryc. 5, 6).

Wzajemny stosunek krzywych czasów trwania przepływów w okresie badań i dziesięciolecia (1961–1970) wskazuje, że rok 1970 był rokiem „mokrym”, a 1971 „suchym” (ryc. 12). Znajduje to również swoje potwierdzenie w średnich wartościach parametrów hydroklimatycznych w różnych piętrach wysokościowych (ryc. 3, 4).

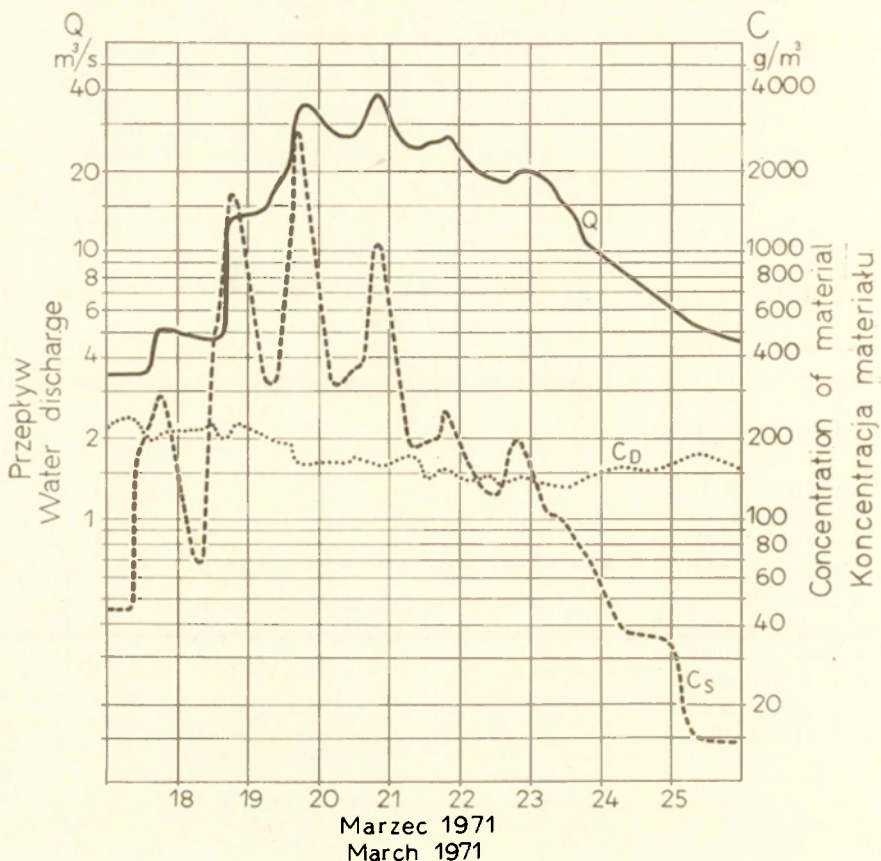
Ryc. 14. Przepływ ( $Q$ ) i koncentracja: materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) i zawiesiny ( $C_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) podczas wezbrania roztopowego 11–15 III 1970

Fig. 14. Discharge ( $Q$ ) and concentrations: of dissolved material ( $C_D$ ) and of suspended material ( $C_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) during raised water-stage due to thawing, March 11–15, 1970



Ryc. 15. Przepływ ( $Q$ ) i koncentracja: materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) i zawiesiny ( $C_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) podczas wezbrania roztopowego 22–26 I 1971

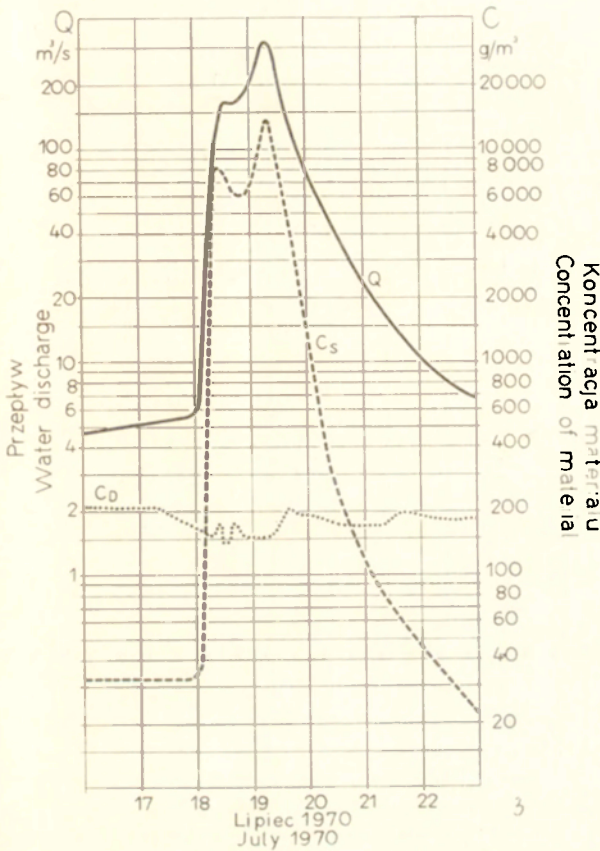
Fig. 15. Discharge ( $Q$ ) and concentrations: of dissolved material ( $C_D$ ) and of suspended material ( $C_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) during raised water-stage due to thawing, January 22–26, 1971



Ryc. 16. Przepływ ( $Q$ ) i koncentracja: materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) i zawiesiny ( $C_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) podczas wezbrania roztopowego 17–26 III 1971

Fig. 16. Discharge ( $Q$ ) and concentrations: of dissolved material ( $C_D$ ) and of suspended material ( $C_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) during raised water-stage due to thawing, March 17–26, 1971

Okres badań reprezentuje dwa podstawowe typy lat hydrologicznych w Kamienicy Nawojowskiej charakteryzujące się odmienną koncentracją odpływu. Maksymalna koncentracja odpływu w 1970 r. przypadła na okres lata, a w 1971 r. na okres wiosennych roztopów (tab. IV). Upoważnia to w pewnych granicach do ekstrapolacji otrzymanych wyników badań transportu materiału na inne lata pomimo krótkiego okresu badań. Długość okresu badań winna zdaniem Z. Paślawskiego (1960) zależeć od średniego kwadratowego odchylenia badanego elementu (np. średniego rocznego przepływu) przy zastosowaniu prawa Gaussa z odpowiadającą mu całką Laplace'a.

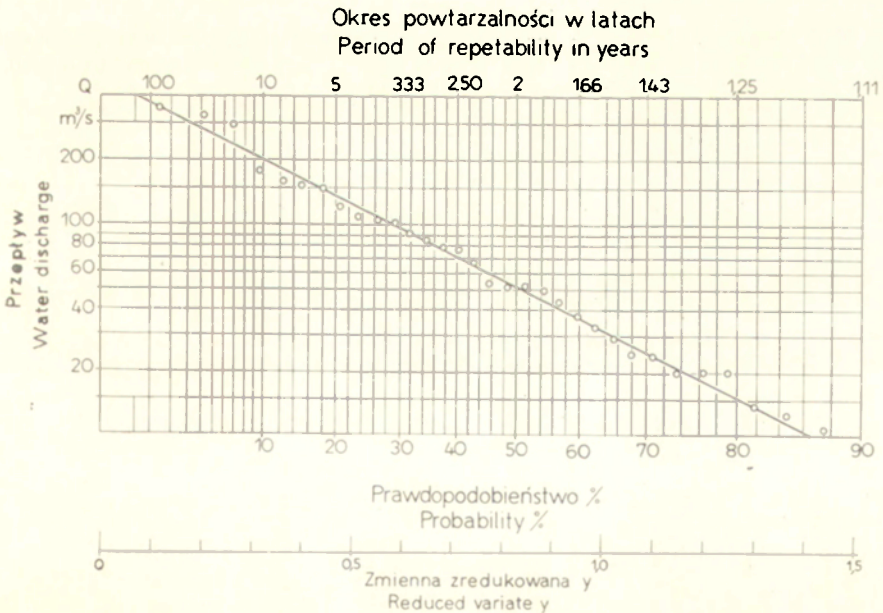


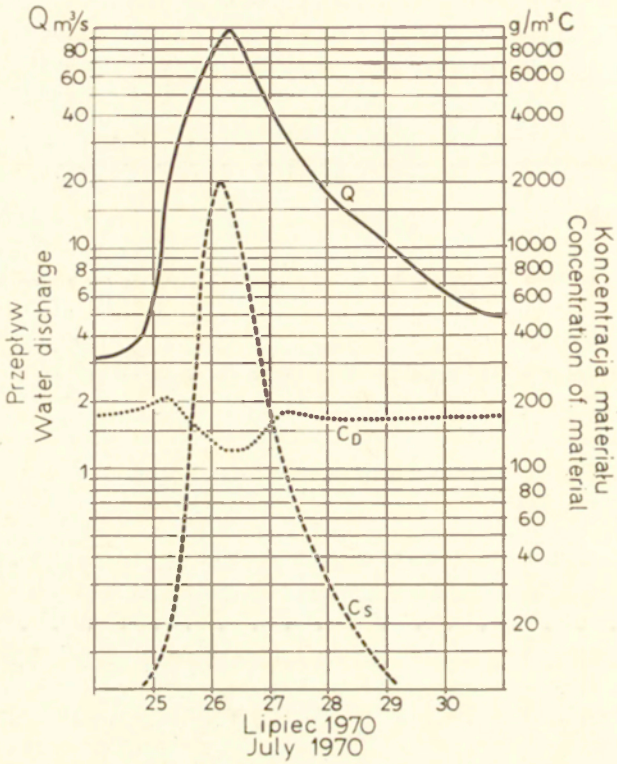
Ryc. 17. Przeptyw ( $Q$ ) i koncentracja: materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) i zawiesiny ( $C_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) podczas katastrofalnej powodzi deszczowej 18–23 VII 1970

Fig. 17. Discharge ( $Q$ ) and concentrations: of dissolved material ( $C_D$ ) and of suspended material ( $C_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) during a catastrophic rainfall flood, July 18–23, 1970

Ryc. 18. Prawdopodobieństwo wystąpienia maksymalnych przepływów rocznych w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

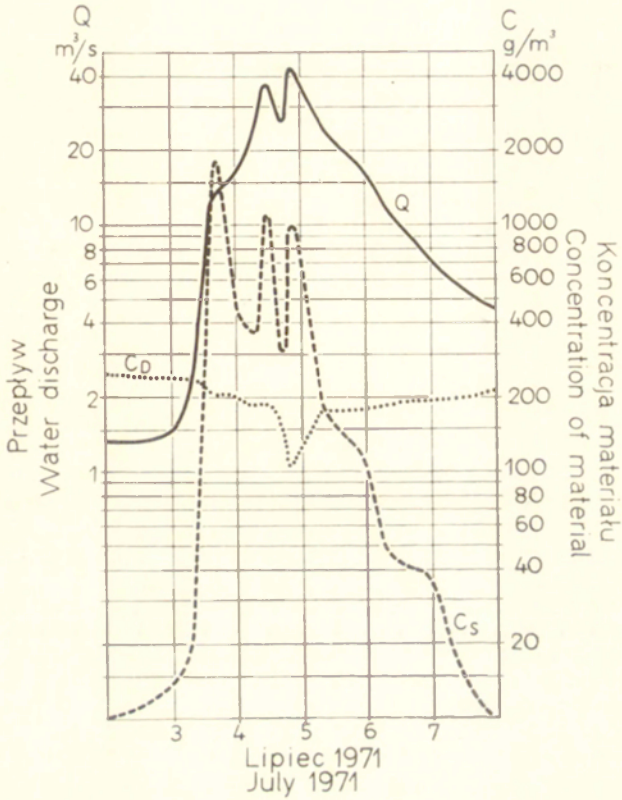
Fig. 18. Probability of the occurrence of maximum yearly discharge in Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)





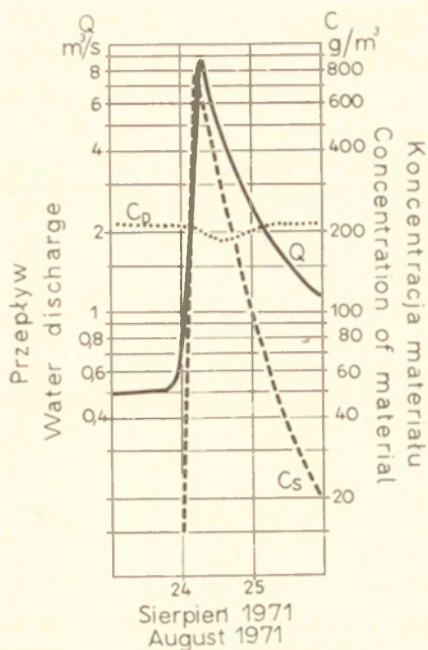
Ryc. 19. Przeptyw ( $Q$ ) i koncentracja: materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) i zawiesiny ( $C_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) podczas wezbrania deszczowego 25–31 VII 1970

Fig. 19. Discharge ( $Q$ ) and concentrations: of dissolved material ( $C_D$ ) and of suspended material ( $C_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) during raised water-stage due to rainfall, July 25–31, 1970



Ryc. 20. Przepływ ( $Q$ ) i koncentracja: materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) i zawiesiny ( $C_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) podczas wezbrania deszczowego 3–8 VII 1971

Fig. 20. Discharge ( $Q$ ) and concentrations: of dissolved material ( $C_D$ ) and of suspended material ( $C_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) during a rainfall raised water-stage, July 3–8, 1971

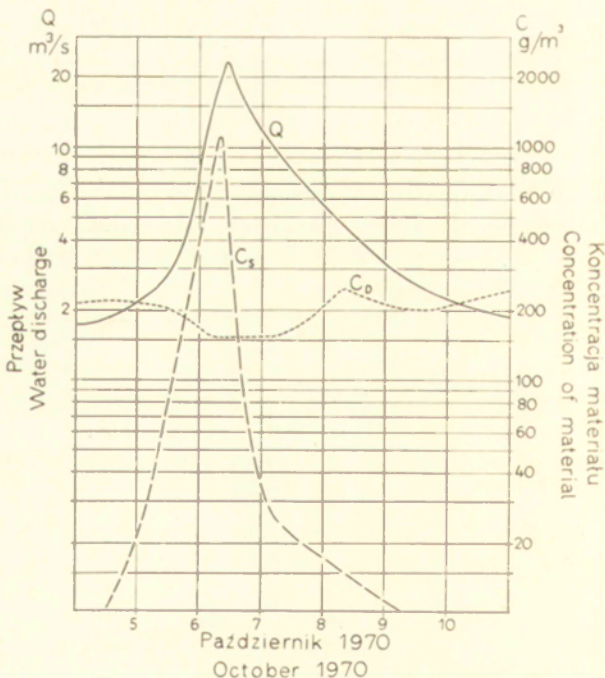


Ryc. 21. Przeptyw ( $Q$ ) i koncentracja: materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) i zawiesiny ( $C_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) podczas wezbrania deszczowego 24–26 VIII 1971

Fig. 21 Discharge ( $Q$ ) and concentrations: of dissolved material ( $C_D$ ) and of suspended material ( $C_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) during a rainfall raised water-stage, August 24–26, 1971

Ryc. 22. Przeptyw ( $Q$ ) i koncentracja: materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) i zawiesiny ( $C_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz) podczas wezbrania deszczowego 5–10 X 1970

Fig. 22. Discharge ( $Q$ ) and concentrations: of dissolved material ( $C_D$ ) and of suspended material ( $C_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz) during a rainfall raised water-stage, October 5–10, 1970





## I. DYNAMIKA TRZECH RODZAJÓW TRANSPORTU RZECZNEGO

Na transport materiału rzeki zużywają znaczną część swojej energii. Złożony mechanizm transportu w ciągu roku wiąże się zasadniczo z okresowymi zmianami warunków dostawy materiału do koryta i możliwościami transportowymi rzeki.

### TRANSPORT W ROZTWORZE

Transportowany przez rzeki materiał rozpuszczony składa się w przewadze ze związków nieorganicznych i częściowo organicznych, których koncentrację z dużą dokładnością określa sucha pozostałość (residue filtered).

Tabela V. Skład chemiczny wody Kamienicy Nawojowskiej (w mg/l) w Nowym Sączu dnia 28 VII 1964 (Pasternak 1968)

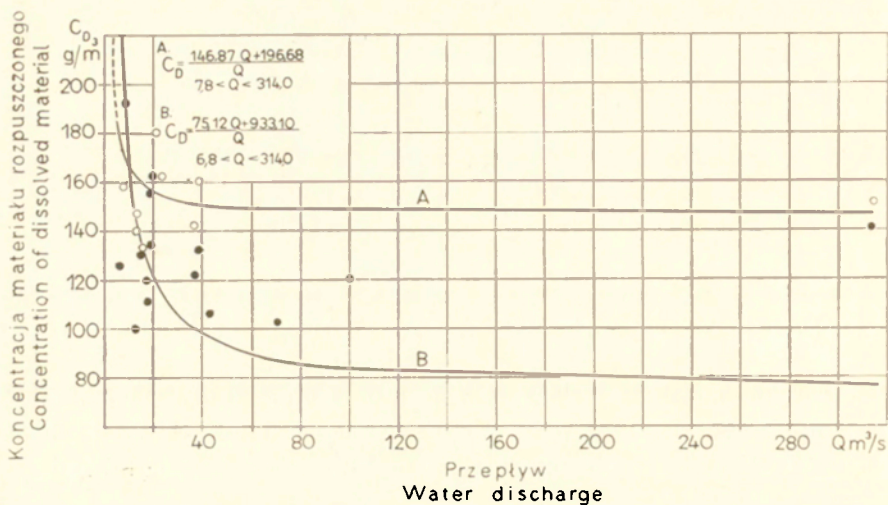
Ca	Mg	K	Na	Fe	Cl	SO <sub>4</sub>
50,0	10,6	2,39	7,84	0,02	5,2	21,6

Skład chemiczny wody Kamienicy Nawojowskiej (tab. V) jest typowy dla zlewni beskidzkich zbudowanych z warstw magurskich i podmagurskich. Charakteryzuje się średnią twardością ogólną (9,4° n) i alkalicznym odczynem (K. Pasternak 1968). Koncentracja jonów wodorowych pH wykazuje małą zmienność sezonową w granicach 7,4–7,8 pH. W odcinku ujściowym rzeka posiada pełną równowagę tlenową i biologiczną (biochemiczne zapotrzebowanie tlenu BZT<sub>5</sub> wynosi 2,4 O<sub>2</sub>/l) (Z. Ka-jetanowicz i B. Osuch 1962).

### ZWIĄZEK TRANSPORTU Z PRZEPŁYWEM WODY

Rozpuszczone w wodzie związki chemiczne, obok temperatury, decydują o jej lepkości (Z. Płochniewski 1971), która ma duży wpływ na transport zawiesiny i materiału wlezonego (A. Born 1958; B. R. Colby 1964; B. R. Colby i C. H. Hembree 1955; D. W. Hubbel i K. S. Al-Shaikh-Ali 1961; C. F. Nordin 1963).

Transportowany w korycie materiał rozpuszczony ulega silnej dyspersji podłuż-



Ryc. 23. Związek między: *A* – kulminacją przepływu wzebrań ( $Q$ ) a koncentracją materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) podczas kulminacji wzebrania; *B* – między kulminacją przepływu wzebrań ( $Q$ ) a najmniejszą koncentracją materiału rozpuszczonego w czasie wzebrania ( $C_D$ )

Fig. 23. Relation between: *A* – the culmination of raised water-stage discharge ( $Q$ ) and the concentration of dissolved material ( $C_D$ ) during the culmination of raised water-stage; *B* – the culmination of raised water-stage discharge ( $Q$ ) and the minimum concentration of dissolved material ( $C_D$ ) during raised water-stage

nej i poprzecznej, wyrównującej stężenie rozpuszczonych związków chemicznych (M. Church 1967; R. E. Glover 1964). Potwierdzają to wyniki pomiarów koncentracji związków chemicznych w nurcie i przy brzegu, wykonane na Wieprzu przez M. Stangenberga (1958) i autora w Kamienicy Nawojowskiej. Przyjmując, że koncentracja w przekroju poprzecznym jest wyrównana, obliczenia ładunku materiału rozpuszczonego oparto na pojedynczej próbie wody z nurtu, którą przyjęto za miarodajną dla całego przekroju.

Koncentracja i ładunek materiału rozpuszczonego wykazują ścisły związek z wahaniami przepływu wody (ryc. 23–26). Zmiany koncentracji materiału rozpuszczonego zachodzą w stosunku odwrotnie proporcjonalnym do zmian przepływu (ryc. 23, 25). Niskim stanom wody odpowiadają wysokie wartości koncentracji, które maleją przy wzroście przepływu. Mechanizm tych wahań przybliży równanie hiperboli o ogólnym wzorze:

$$C_D = Q_a + \frac{b}{Q},$$

gdzie:  $C_D$  – koncentracja materiału rozpuszczonego;  $Q$  – objętość przepływu wody.

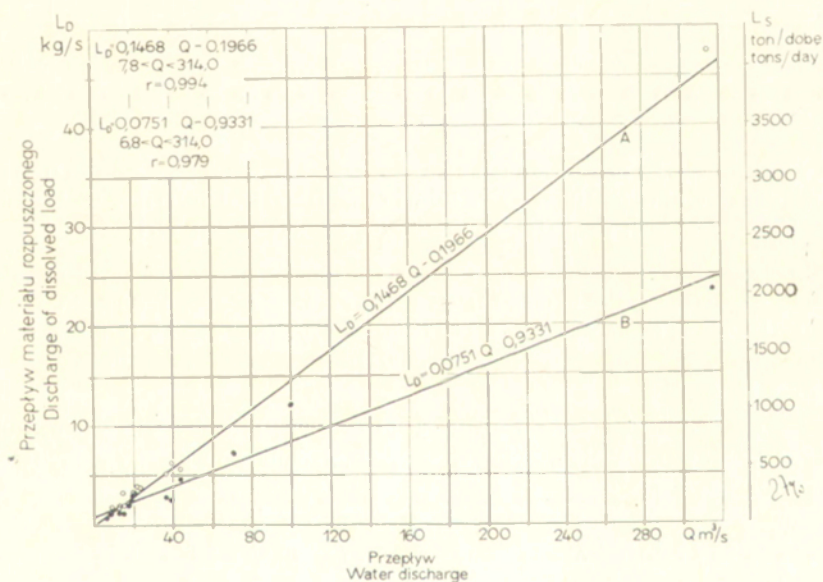
Zwiększanie się przepływu pociąga za sobą wzrost ładunku (ryc. 24, 26). Związek ten o wysokim współczynniku dodatniej korelacji można przedstawić w formie równania liniowego o ogólnej postaci:

$$L_D = Q_a + b,$$

gdzie:  $L_D$  – ładunek materiału rozpuszczonego.

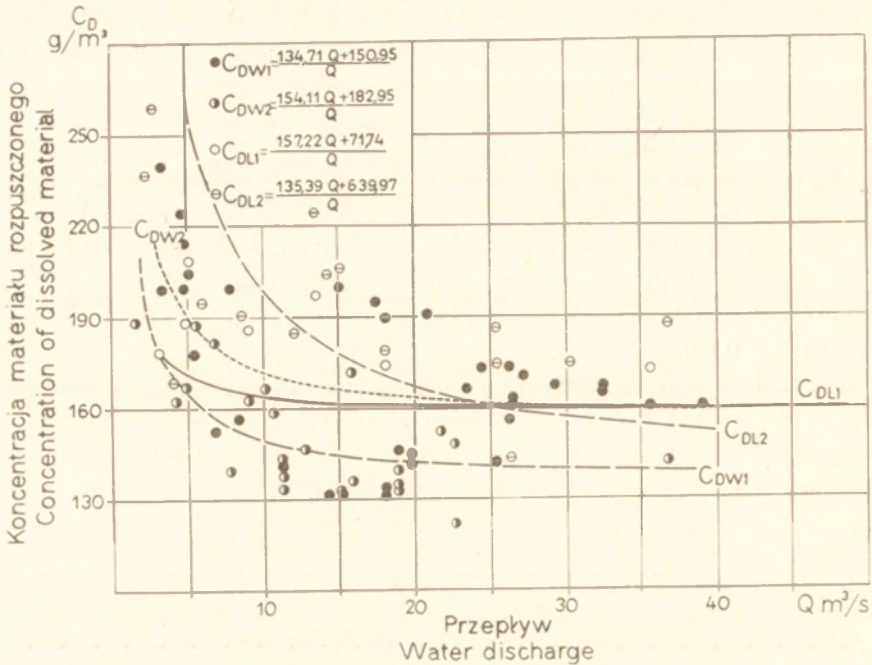
Potwierdza to wyniki badań otrzymane dla większości rzek (O. A. Alekin 1953; M. A. Burkalcewa 1965; J. S. Gatewood et al. 1964; M. Jaworska 1968; A. Neciajiene i I. Nečiajus 1970). Dla małych cieków Tatr Zachodnich (Mała Łąka) A. Kotarba (1972) przyjmuje związek liniowy, który wyraża się wysokim współczynnikiem korelacji ( $r = 0,99$ ).

Ramiona hiperboli o przeciwnych asymptotach odpowiadają odmiennemu reżimowi zasilania rzeki. Przy przepływach niżówkowych duża koncentracja materiału rozpuszczonego wiąże się z przewagą zasilania gruntowego i ługowaniem zlewni podziemnej. W miarę wzrostu przepływu i udziału spływu powierzchniowego zmniejsz-



Ryc. 24. Związek między: *A* – kulminacją przepływu wzebrań ( $Q$ ) a przepływem ładunku materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ) podczas kulminacji przepływu; *B* – między kulminacją przepływu wzebrań ( $Q$ ) a przepływem ładunku materiału rozpuszczonego podczas najmniejszej koncentracji ( $L_D$ )

Fig. 24. Relation between: *A* – the culmination of raised water-stage discharge ( $Q$ ) and the discharge of dissolved load ( $L_D$ ) during the culmination of raised water-stage; *B* – the culmination of raised water-stage discharge ( $Q$ ) and the discharge of dissolved load ( $L_D$ ) during a minimum concentration



Ryc. 25. Związek między przepływem ( $Q$ ) a koncentracją materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) podczas wezbrań roztopowych:  $C_{DW1}$  (19 III–5 IV 1970) i  $C_{DW2}$  (17–31 III 1971) oraz wezbrań deszczowych:  $C_{DL1}$  (18–23 VII 1970) i  $C_{DL2}$  (3–8 VII 1971)

Fig. 25. Relation between the discharge ( $Q$ ) and the concentration of dissolved material ( $C_D$ ) during raised water-stages due to thawing:  $C_{DW1}$  (March 19 – April 5, 1970) and  $C_{DW2}$  (March 17–31, 1971); during raised water-stages due rainfalls:  $C_{DL1}$  (July 18–23, 1970) and  $C_{DL2}$  (July 3–8, 1971)

szanie się koncentracji łączy się z większym rozcieńczeniem roztworu wywołanym przepływem wody przez silnie wylugowane powierzchniowe warstwy gleby (szczególnie gleb bielocowych).

#### MECHANIZM TRANSPORTU W CZASIE WEZBRAŃ

Wahania koncentracji materiału rozpuszczonego podczas wezbrań nie naśladują zmian przepływu wody. Wskazuje to na dużą bezwładność rozpuszczania skał w stosunku do zmian hydrologicznych. Najmniejsza koncentracja występuje bezpośrednio przed lub po kulminacji przepływu (ryc. 14–17, 19–22). Potwierdzają to obliczone równania regresji dla związków między kulminacjami przepływu wezbrań a występującą podczas nich koncentracją i ładunkiem (ryc. 23, 24):

$$C_D = \frac{146,87 Q + 196,68}{Q} \quad L_D = 0,1468 Q - 0,1966$$

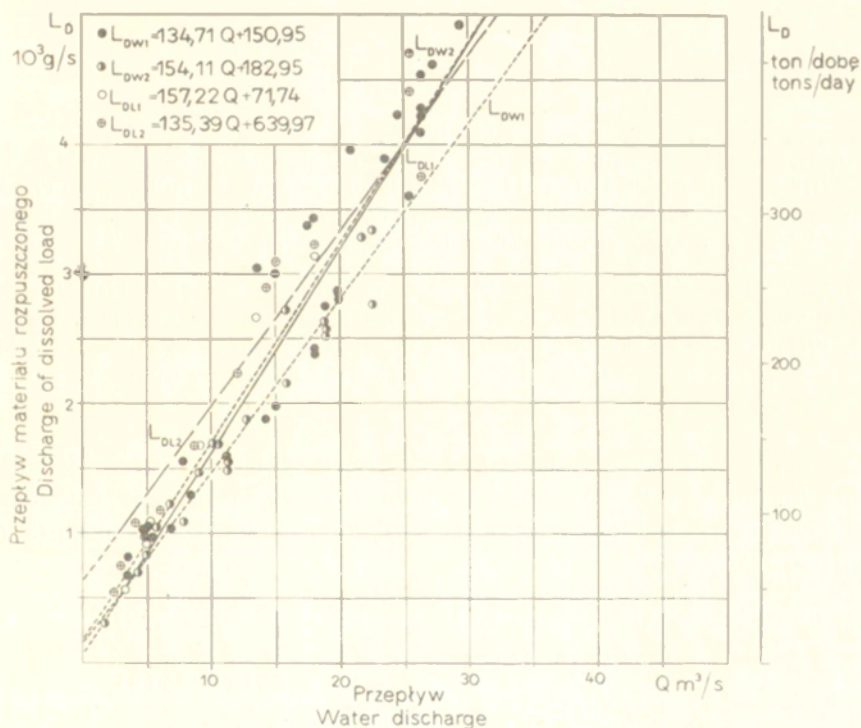
oraz między kulminacjami wezbrań a najmniejszą koncentracją i ładunkiem w czasie wezbrań:

$$C_D = \frac{75,12 Q + 933,10}{Q} \quad L_D = 0,0751 Q + 0,9331$$

( $C_D$  w  $g/m^3$ ;  $L_D$  w  $kg/s$ ;  $Q$  w  $m^3/s$ ).

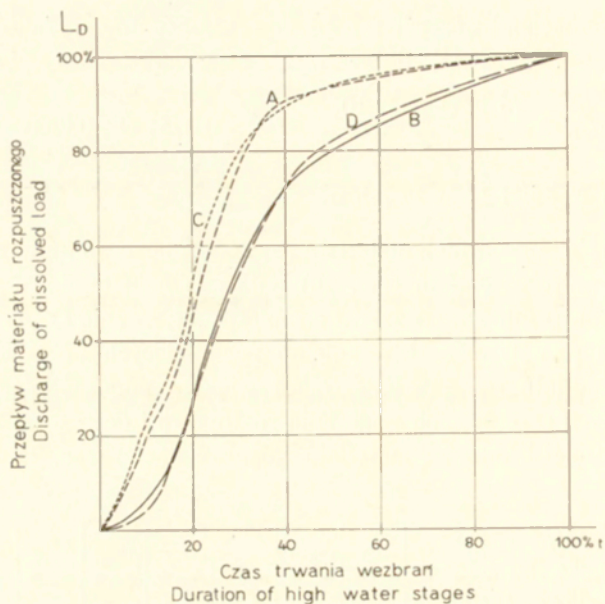
Zmniejszanie się koncentracji materiału rozpuszczonego po kulminacji przepływu podczas długotrwałych wezbrań (ryc. 16) wskazuje na stopniowe wyczerpywanie się „zapasu” rozpuszczalnych związków chemicznych. Według O. A. Alekina (1953) przy podobnych przepływach dwu kolejno następujących po sobie powodziach koncentracja materiału rozpuszczonego jest większa podczas pierwszej.

Przy podobnych przepływach wezbrania roztopowe i deszczowe różnią się wartościami koncentracji i ładunku materiału rozpuszczonego (ryc. 25, 26). Obliczone



Ryc. 26. Związek między przepływem ( $Q$ ) a ładunkiem materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ) podczas wezbrań roztopowych:  $L_{DW1}$  (19 III–5 IV 1970) i  $L_{DW2}$  (17–31 III 1971) oraz wezbrań deszczowych  $L_{DL1}$  (18–23 VII 1970) i  $L_{DL2}$  (3–8 VII 1971)

Fig. 26. Relation between the discharge ( $Q$ ) and the load of dissolved material ( $L_D$ ) during raised water-stages due to thawing:  $L_{DW1}$  (March 19–April 5, 1970) and  $L_{DW2}$  (March 17–31, 1971); during raised water-stages due to rainfalls:  $L_{DL1}$  (July 18–23, 1970),  $L_{DL2}$  (July 3–8, 1971)



Ryc. 27. Wynoszenie ładunku materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ) na tle odpływu wody w czasie wezbrań ( $t$ ): *A* – katastrofalnej powodzi 18–23 VII 1970; *B* – wezbrania roztopowego 17–31 III 1971; *C* – odpływ wody podczas katastrofalnej powodzi; *D* – odpływ wody podczas wezbrania roztopowego (Kamienica Nawojowska – Nowy Sącz)

Fig. 27. Carrying away of dissolved load ( $L_D$ ) against water run-off during raised ( $t$ ): *A* – during the catastrophic flood of July 18–23, 1970; *B* – during raised water-stage due to thawing March 17–31, 1971; *C* – run-off during a catastrophic flood; *D* – run-off during raised water-stage due to thawing (the Kamienica Nawojowska – Nowy Sącz)

równania regresji dla związków między przepływem wody a koncentracją i ładunkiem materiału rozpuszczonego dla czterech wezbrań pozwalają sądzić, że przy podobnych przepływach każde wezbranie różni się wielkością parametrów transportu (ryc. 25, 26):

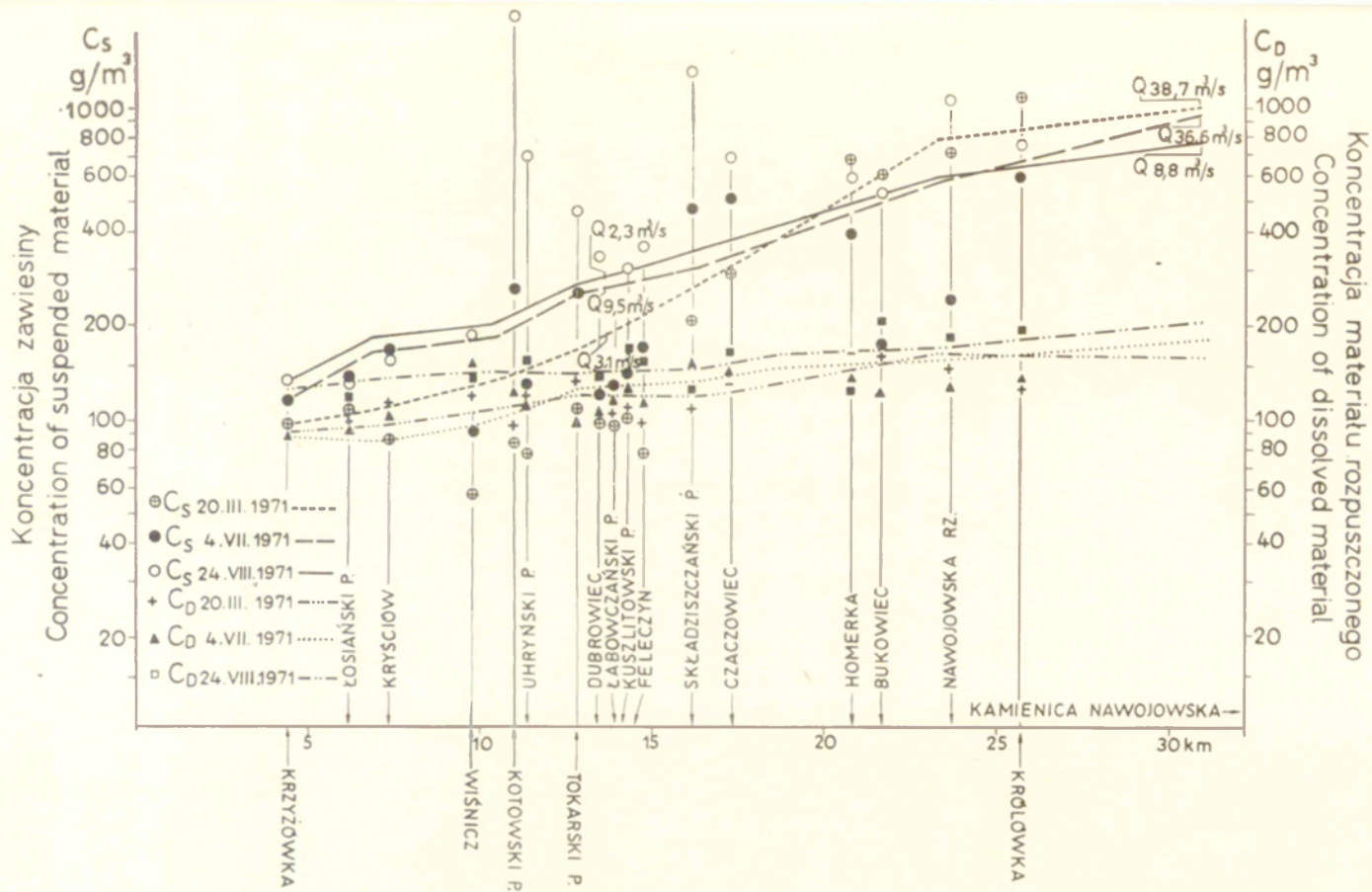
Wezbrania roztopowe (*W1*: 19 III–5 IV 1970; *W2*: 17–26 III 1971):

$$C_{DW1} = \frac{134,71 Q + 150,95}{Q} \quad L_{DW1} = 134,71 Q + 150,95,$$

$$C_{DW2} = \frac{154,11 Q + 182,95}{Q} \quad L_{DW2} = 154,11 Q + 182,95.$$

Wezbrania deszczowe (*L1*: 18–23 VII 1970; *L2*: 3–8 VII 1971):

$$C_{DL1} = \frac{157,22 Q + 71,74}{Q} \quad L_{DL1} = 157,22 Q + 71,74,$$



Ryc. 28. Koncentracja materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) i zawiesiny ( $C_S$ ) wzdłuż Kamienicy Nawojowskiej oraz w ujściach dopływów podczas wezbrania roztopowego 20 III 1971 i wezbrań deszczowych: 4 VII 1971, 24 VIII 1971 (objętości przepływu w przekrojach wodowskazowych Łabowa i Nowy Sącz)

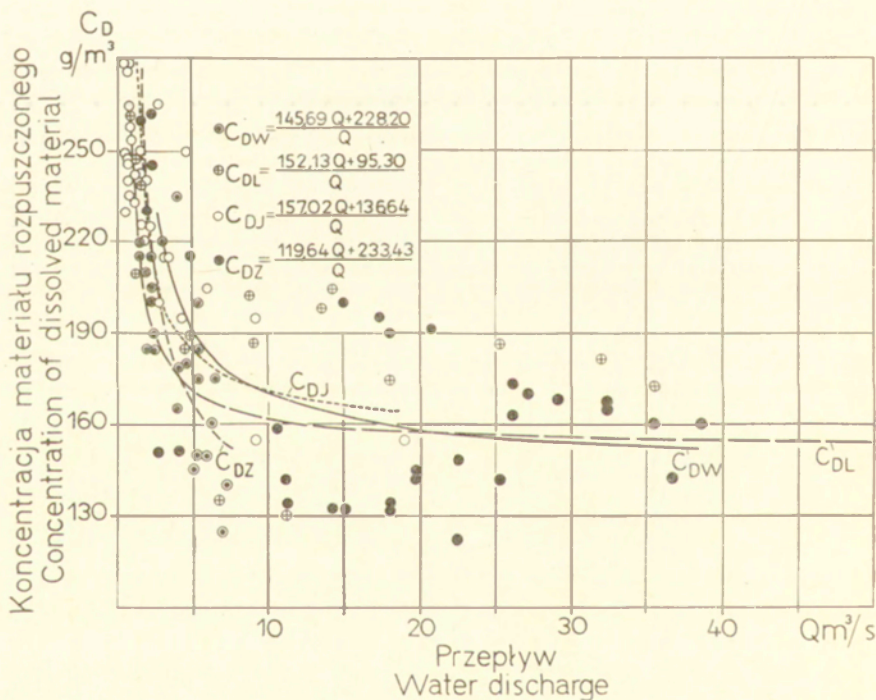
Fig. 28. Concentration of dissolved material ( $C_D$ ) and of suspended material ( $C_S$ ) along the Kamienica Nawojowska, and at the mouths of its tributaries during raised water-stages due to thawing March 20, 1971 and those due to rainfalls: July 4, 1971, August 24, 1971 (volumes of discharge at water-gauges at Łabowa and Nowy Sącz)

$$C_{DL2} = \frac{135,39 Q + 639,97}{Q} \quad L_{DL2} = 135,39 Q + 639,97$$

( $L_D$  w g/s).

Wynoszenie ładunku materiału rozpuszczonego podczas różnych wezbrań wykazuje duże podobieństwo (ryc. 27). Wynika ono ze związku funkcyjnego transportowanego ładunku materiału rozpuszczonego z przepływem wody —  $L_D = f(Q)$ .

Pomiary koncentracji materiału rozpuszczonego podczas trzech wezbrań (roztopowego: 20 III 1971 i deszczowych: 4 VII 1971, 24 VIII 1971), wykonane w różnych punktach zlewni, dają przybliżony rozkład jej wartości w dopływach i różnych punktach koryta (ryc. 28). Mała koncentracja materiału rozpuszczonego ( $95-150 \text{ g/m}^3$ ) występowała w górnej części zlewni zbudowanej w przewodzie z piaskowców magurskich. Wzrastała w dopływach z wysokiego pogórza ( $120-180 \text{ g/m}^3$ ) o dużym udziale serii łupkowych. Zaznaczał się powolny wzrost koncentracji materiału



Ryc. 29. Związek między przepływem ( $Q$ ) a koncentracją materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ): wiosną ( $C_{DW}$ ); latem ( $C_{DL}$ ); jesienią ( $C_{DJ}$ ); zimą ( $C_{DZ}$ ) (Kamienica Nawojowska — Nowy Sącz).

Fig. 29. Relation between the discharge ( $Q$ ) and concentrations of dissolved material ( $C_D$ ): in spring ( $C_{DW}$ ); in summer ( $C_{DL}$ ); in autumn ( $C_{DJ}$ ); in winter ( $C_{DZ}$ ) (the Kamienica Nawojowska — Nowy Sącz)

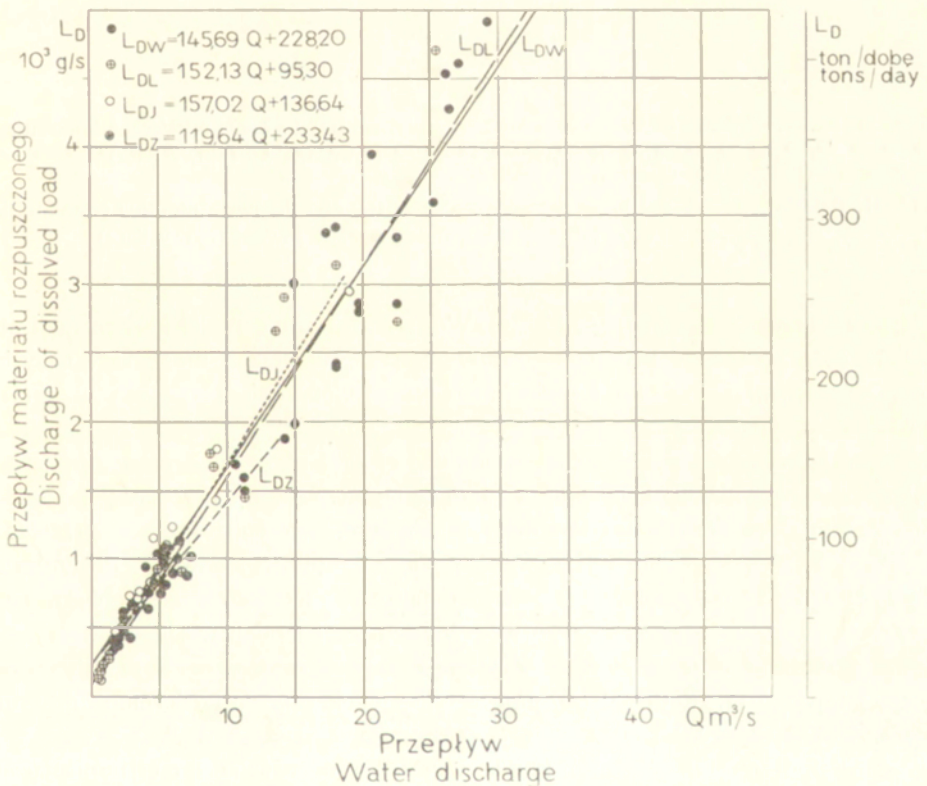


rozpuszczonego z biegiem rzeki, co potwierdza dotychczasowe wyniki badań (O. A. Alekin 1953; M. Stangenberg 1958). Małe zróżnicowanie koncentracji wzdłuż rzeki wskazuje na silną podłużną dyspersję materiału rozpuszczonego, związaną z dużymi prędkościami wody podczas wezbrań (R. V. Thomman 1973).

#### ZMIENNOŚĆ TRANSPORTU W CIĄGU ROKU

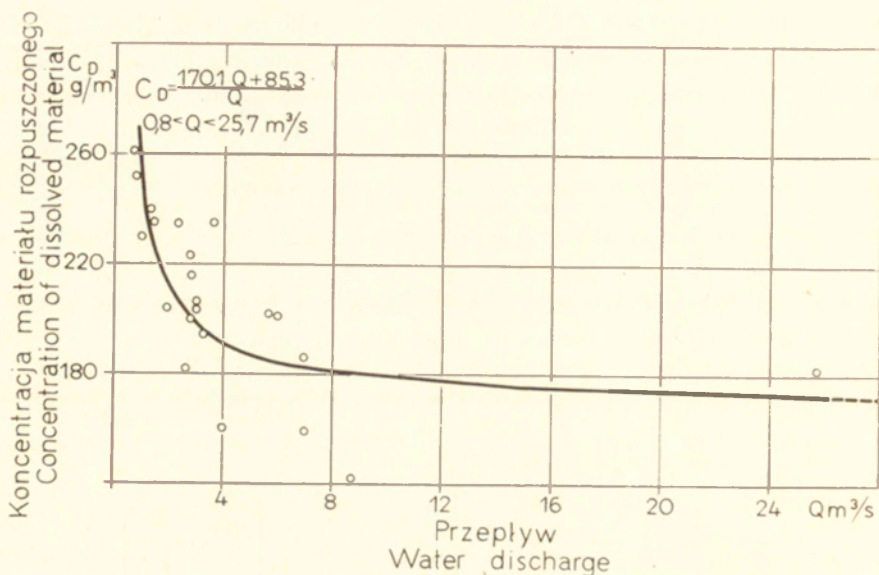
Podczas okresów niżówkowych w różnych porach roku występuje podobna koncentracja i ładunek materiału rozpuszczonego związane z gruntowym zasilaniem rzeki (ryc. 29, 30). Głębokie niżówki dają największą koncentrację materiału rozpuszczonego w jesieni i zimie, a wiosną mniejszą niż latem.

Przekroczenie średniego rocznego przepływu w różnych porach roku daje w efekcie różnice w wielkości koncentracji i ładunku materiału rozpuszczonego (ryc. 29, 30). Mały wzrost przepływu podczas odwilży zimowych wywołuje szybkie zmniejsz-



Ryc. 30. Związek między przepływem ( $Q$ ) a ładunkiem materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ): wiosną ( $L_{DW}$ ); latem ( $L_{DL}$ ); jesienią ( $L_{DJ}$ ); zimą ( $L_{DZ}$ ) (Kamienica Nawojowska – Nowy Sącz)

Fig 30. Relation between the discharge ( $Q$ ) and the load of dissolved material ( $L_D$ ): in spring ( $L_{DW}$ ); in summer ( $L_{DL}$ ); in autumn ( $L_{DJ}$ ); in winter ( $L_{DZ}$ ) (the Kamienica Nawojowska – Nowy Sącz)



Ryc. 31. Związek między średnim miesięcznym przepływem ( $Q$ ) a średnią miesięczną koncentracją materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

Fig. 31. Relation between the mean monthly discharge ( $Q$ ) and the mean monthly concentration of dissolved material ( $C_D$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)

szanie się koncentracji (ryc. 14, 15, 29). Wody roztopowe o małej koncentracji materiału rozpuszczonego płynąc po zamrzniętym gruncie nie mogą się „nasycić” rozpuszczalnymi związkami i wywołują silne rozcieńczenie płynących w korycie wód gruntowych.

Podczas wysokich przepływów jesienią występuje wyższa koncentracja materiału rozpuszczonego niż latem i wiosną. Jesienne podwyższone przepływy pochodzą przeważnie z rozlewnych opadów deszczu o małym natężeniu, które w przewodzie wsiąkają w głębsze, mniej wyługowane poziomy profilu glebowego, dostarczając do koryta wody o wysokiej koncentracji materiału rozpuszczonego. Niska koncentracja materiału rozpuszczonego wód wiosennych i letnich wiąże się z przyspieszoną cyrkulacją wody w zlewni, związaną z częstym występowaniem spływu powierzchniowego (J. Słupik 1973), dającego w efekcie silne rozcieńczenie wód gruntowych.

Każdej porze roku odpowiadają inne współczynniki równań regresji opisujących związki między przepływem wody a koncentracją i ładunkiem materiału rozpuszczonego (ryc. 29, 30):

$$\text{Wiosna: } C_{DW} = \frac{145,69 Q + 228,20}{Q} \quad L_{DW} = 145,69 Q + 228,20.$$

$$\text{Lato: } C_{DL} = \frac{152,13 Q + 95,30}{Q} \quad L_{DL} = 152,13 Q + 95,30.$$

$$\text{Jesień: } C_{DJ} = \frac{157,02 Q + 136,64}{Q} \quad L_{DJ} = 157,02 Q + 136,64.$$

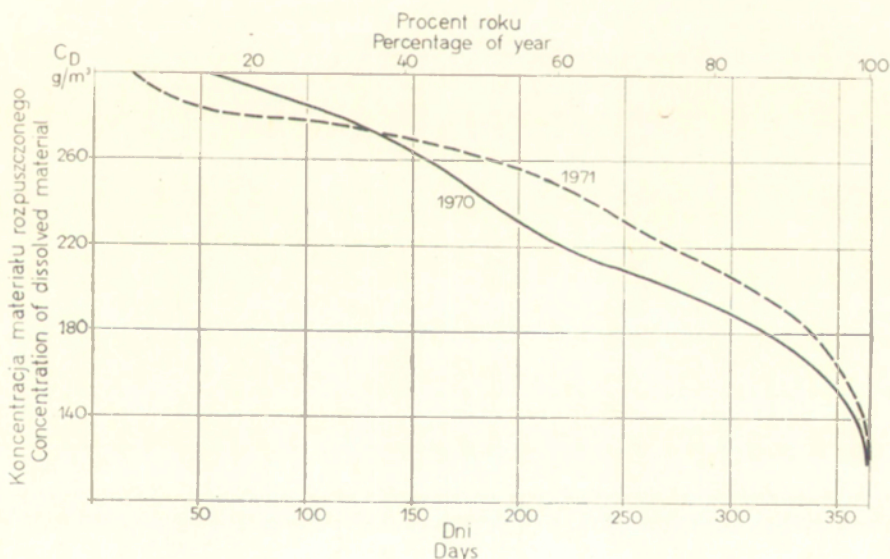
$$\text{Zima: } C_{DZ} = \frac{119,64 Q + 233,43}{Q} \quad L_{DZ} = 119,64 Q + 233,43.$$

Średnie miesięczne wartości koncentracji materiału rozpuszczonego wykazują związek ze średnimi miesięcznymi przepływami, które opisuje równanie regresji (ryc. 31):

$$C_D = \frac{170,1 Q + 85,3}{Q}.$$

Równanie to może służyć do obliczania rozmiarów rocznego transportu materiału rozpuszczonego w Kamienicy Nawojowskiej (przekrój Nowy Sącz) dla lat pozabawionych pomiarów.

Średnia roczna koncentracja materiału rozpuszczonego wahała się w tak kontrastowych hydrologicznie latach w wąskich granicach od 211 (1970 r.) do 215 g/m<sup>3</sup>



Ryc. 32. Czas trwania poszczególnych wielkości koncentracji materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

Fig. 32. Duration of particular values of dissolved material concentration ( $C_D$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)

Tabela VI. Średnie miesięczne i roczne wartości koncentracji (w g/m<sup>3</sup>) materiału rozpuszczonego i zawiesiny w Kamienicy Nawojowskiej (profil Nowy Sącz) w latach 1970–1971

Lata	Średnie miesięczne wartości koncentracji	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Rok
1970	materiału rozpuszczonego	287	280	216	261	186	142	160	159	182	201	236	223	211
	zawiesiny	3	3	14	5	16	34	10	39	691	29	7	43	74
1971	materiału rozpuszczonego	195	204	206	200	202	182	235	204	235	230	240	252	215
	zawiesiny	7	25	19	15	47	17	19	32	27	31	17	3	22



**Fot. 1.** Budowa terasy nadzalewowej w Nowej Wsi. W spągu występuje cokół skalny, na którym spoczywają aluwia rzeczne

**Phot. 1.** Structure of the overflow terrace at Nowa Wieś. At the bottom there is rock pedestal overlain with fluvial alluvia



**Fot. 2.** Zawieszono nad dnem koryta Kamienicy Nawojowskiej fundamenty filaru mostu drogowego  
Zdjęcie wykonane po przejściu fali powodzi 19 - 23 VII 1970

**Phot. 2.** Foundations of a road bridge-pillar at Nowa Wieś suspended above the bottom of the Kamienica Nawojowska bed. The photo was taken after the wave of the flood of July 19 - 23, 1970 had passed



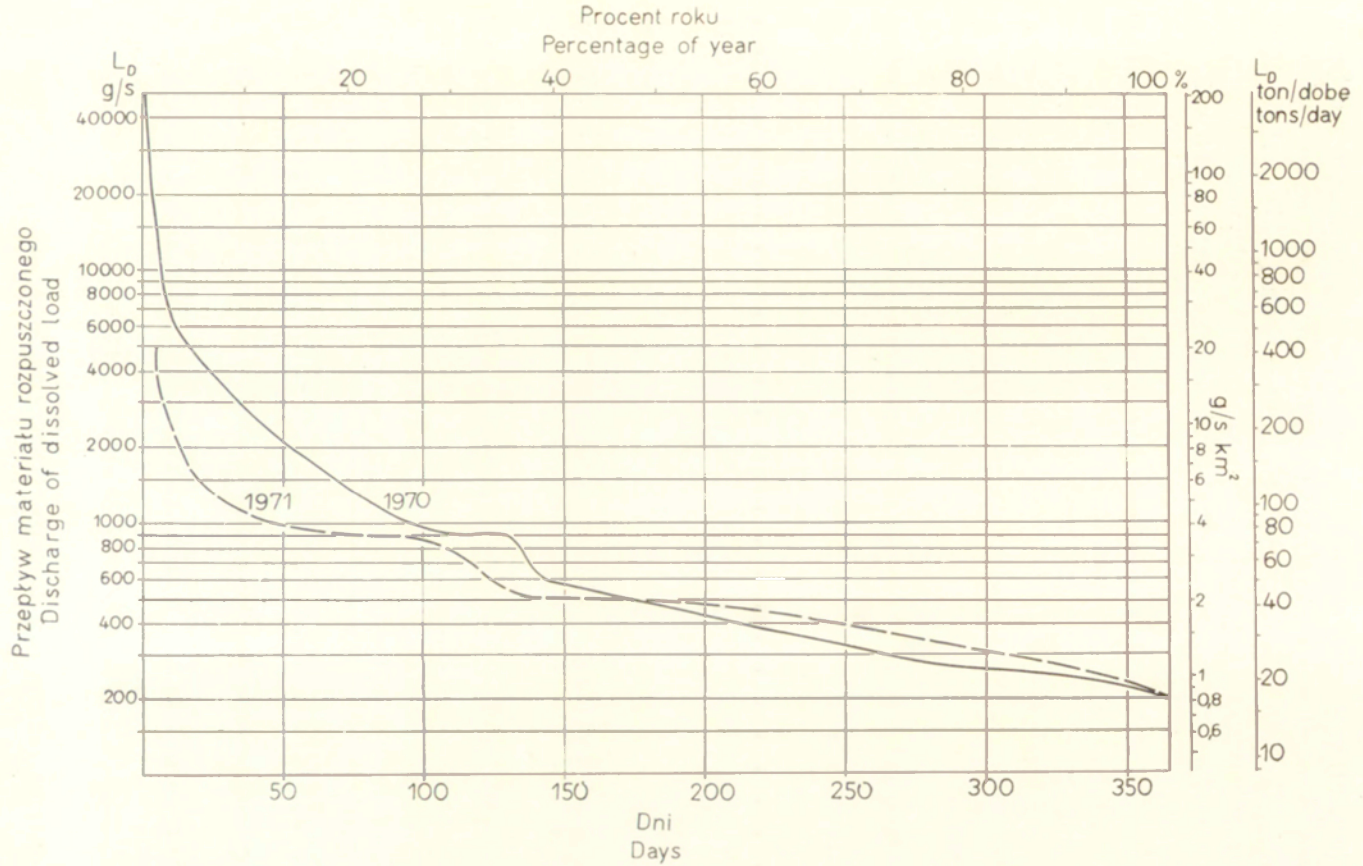
**Fot. 3. Żwirowo-glazowe aluwia w korycie Kamienicy Nawojowskiej k. Łabowej (zdjęcie wykonane po powodzi w lipcu 1970 r.)**

**Phot. 3. Gravelly-boulder alluvia in the bed of the Kamienica Nawojowska near Łabowa (the photo was taken after the flood of July 1970)**



**Fot. 4. Centralne lachy żwirowe w korycie Kamienicy Nawojowskiej k. Łabowe powstałej po powodzi w lipcu 1970 r.**

**Phot. 4. Central gravelly bars in the bed of the Kamienica Nawojowska near Łabowa due to the flood of July 1970**



Ryc. 33. Czas trwania poszczególnych wielkości przepływu ładunku materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

Fig. 33. Duration of particular values of dissolved material discharge ( $L_D$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)

(1971 r.). Największe wartości średniej miesięcznej koncentracji materiału rozpuszczonego (tab. VI) przypadają na miesiące jesienne, kiedy przy niskich przepływach występowała koncentracja do  $287 \text{ g/m}^3$  (XI 1970). Wysokie przepływy wiosenne powodowały jej obniżenie do  $142 \text{ g/m}^3$  (IV 1970), a latem do  $159 \text{ g/m}^3$  (VI 1970).

Czas trwania poszczególnych wartości koncentracji i ładunku materiału rozpuszczonego wykazuje ścisły związek z typem hydrologicznym danego roku (ryc. 32, 33). Suchy rok 1971 charakteryzował się dłuższym czasem trwania wysokich wartości koncentracji materiału rozpuszczonego w porównaniu z mokrym rokiem 1970, który mimo niskiej frekwencji wysokich wartości koncentracji wykazywał przewagę czasu trwania przepływów dużych ładunków materiału rozpuszczonego. Można uogólnić, że czas trwania przepływów wody danego roku jest wprost proporcjonalny do czasów trwania przepływów ładunku materiału rozpuszczonego, a odwrotnie proporcjonalny do czasów trwania poszczególnych wartości koncentracji materiału rozpuszczonego. Prawidłowość ta potwierdza dla każdego roku rolę przepływu wody jako czynnika nadrzędnego, wpływającego bezpośrednio na wielkość koncentracji i ładunku, decydującego o rozmiarach transportu materiału rozpuszczonego.

#### POCHODZENIE MATERIAŁU TRANSPORTOWANEGO W ROZTWORZE

Stosunkowo niska koncentracja materiału rozpuszczonego w wodach rzek beskidzkich (M. Bombówna 1960, 1969; K. Figuła 1966; W. Froehlich 1972, 1973; S. Maultz 1972; K. Pasternak 1968; M. Stangenberg 1958) wskazuje na małą wydajność procesów rozpuszczania skał uwarunkowaną małą agresywnością krążących wód i wcześniejszym wylugowaniem powierzchniowych warstw gruntu z rozpuszczalnych związków chemicznych. Jak wynika z badań B. Adamczyka i J. Tokaja (1957), na terenie zlewni rzeki Raby kalcyt z powierzchniowych warstw piaskowca magurskiego został w większości wymyty do głębokości dwóch metrów.

Na teren Polski południowej spada rocznie z opadem około  $5-10 \text{ t/km}^2$  soli z atmosfery (A. Kotarba 1972). Przyjmując, że spadające na teren zlewni Kamienicy Nawojowskiej sole są w całości odprowadzane, otrzymamy masę  $1195-2390$  ton, która w rocznym ładunku wynoszonego materiału rozpuszczonego stanowiła  $3,6-7,2\%$  w 1970 r. i  $7,2-14,4\%$  w 1971 r.

Sztuczne nawożenie w rolniczych obszarach zlewni (około  $36\%$  powierzchni zlewni =  $86 \text{ km}^2$ ) wynosi średnio  $6 \text{ t/km}^2$  (około 516 ton dla całej zlewni). Przy założeniu, że  $50\%$  masy nawozów zostaje odprowadzone w roztworze, otrzymamy masę 258 ton. Jej udział w rocznym ładunku wynoszonego materiału rozpuszczonego stanowił w 1970 r.  $0,79\%$ , a w 1971 r.  $1,55\%$ .

Transportowany w Kamienicy Nawojowskiej materiał rozpuszczony oznaczany jako sucha pozostałość zawiera maksymalnie do  $12\%$  rozpuszczonych związków organicznych pochodzących z rozkładu biomasy. Przeto zdecydowana większość wynoszonego materiału rozpuszczonego pochodzi z lugowania pokryw zwietrzelinowych i rozpuszczania w głębi litych skał. Sądzę, że powierzchniowa ablacja chemiczna związana ze spływem powierzchniowym odgrywa niewielką rolę. Toteż pojęcia denu-



dacji chemicznej zlewni nie można utożsamiać z denudacją powierzchniową. Wyrażanie wartości wynoszonego przez rzeki materiału rozpuszczonego w jednostkach masy lub objętości odniesionych do powierzchni zlewni (tzw. jednostkowa denudacja w  $t/km^2$ ,  $m^3/km^2$ ) jest mało precyzyjne i może prowadzić do błędnych wniosków przy porównaniach denudacji chemicznej różnych obszarów.

### TRANSPORT ZAWIESINY

Przez transport zawiesiny należy rozumieć przenoszone w zawieszeniu, podlegające dyspersji i nierównomiernie rozmieszczone w masie wody drobne frakcje materiału. W wodzie stojącej ulegają one sedymentacji. Ich obecność znacznie zmniejsza wewnętrzny opór cieczy i powoduje, że obciążona materiałem woda płynie szybciej niż woda czysta (V. A. Vanoni 1946).

#### SKŁAD GRANULOMETRYCZNY ZAWIESINY

Cząsteczki zawiesiny transportowane przez Kamienicę Nawojowską zbudowane są w przewadze z ziarenek kwarcu. Mają postać nieregularną, znacznie odbiegającą od kształtu kuli (fot. 8). Podobny kształt cząsteczek zawiesiny, określony za pomocą mikroskopu elektronowego, przedstawiają zdjęcia zamieszczone w pracy N. G. Maczawariani i E. A. Dżawachiszwili (1972).

Szybkość sedymentacji drobnych frakcji zawiesiny zależy m. in. od oporu wywołanego przez kształt cząsteczek. Dla ziarn o kształtach nieregularnych, kanciasłych, będzie większy niż dla ziarn kulistych. Ponieważ cząsteczki zawiesiny transportowane przez Kamienicę Nawojowską mają kształt nieregularny, przeto zastosowanie wzorów empirycznych Stockes'a, Gonczarowa i Krumbeina na szybkość sedymentacji (hydrauliczna wielkość cząstek) uwzględniających ziarna o kształcie kuli może prowadzić do błędnych wyników.

Podczas wzrostu fali wezbrań typowy jest udział grubszych frakcji, który rośnie proporcjonalnie do wielkości i gwałtowności wzrostu przepływu (tab. VII). Podczas opadania stanu wody materiał zawiesinowy staje się drobniejszy i jednorodny granulometrycznie.

Podczas katastrofalnej powodzi (19 VII 1970) w czasie wzrostu przepływu ( $Q = 280 m^3/s$ ) 82% materiału zawiesinowego przypadało na frakcje 1,0–0,1 mm. Przy opadaniu fali powodzi frakcja ta stanowiła zaledwie 8% (tab. VII). Końcowe etapy opadania fal dużych wezbrań roztopowych i deszczowych charakteryzują się małą mętnością (szare zabarwienie wody), która w niewielkim stopniu ustępuje po przesączeniu nawet przez twarde sączki. Wskazuje to na transport bardzo drobnych frakcji koloidalnych, o obecności których świadczy również obserwowany efekt Tyndalla.

Duża koncentracja drobnej zawiesiny i silna turbulencja w początkowej fazie wielkich wezbrań ułatwiają utrzymywanie się w zawieszeniu frakcji piaszczystej pochodzącej z aluwiiów korytowych i erodowanych brzegów (fot. 9). Utrwalenie bru-

Tabela VII. Skład granulometryczny transportowanej zawiesiny w Kamienicy Nawojowskiej (profil Nowy Sącz)

Daty pobrania próbek	Faza wezbrania	Przepływ podczas pomiaru (w m <sup>3</sup> /s)	Udział procentowy poszczególnych frakcji (w mm)					
			1,0 – 0,1	0,1 – 0,05	0,05 – 0,02	0,02 – 0,006	0,006 – 0,002	> 0,002
19 VII 1970	wzrost fali	280	82	1	3	4	3	7
26 VII 1970	wezbrania	75	74	9	5	4	3	5
4 VII 1971		36	51	22	9	6	3	9
20 VII 1970	opadanie fali	42	8	25	31	14	10	12
27 VII 1970	wezbrania	26	19	32	25	9	5	10

ków erozyjnych w czasie opadania fali, zmniejszenie lepkości wody (mała mętność), szybkości i turbulencji warunkuje transport drobnego materiału w zawiesinie. Zdaniem G. W. Łopatina (1959), rzeki górskie (Sułak, Kara-Daria) podczas wezbrań przenoszą w zawiesinie drobniejszy materiał pochodzący ze splukiwania niż rzeki nizinne (Wołga, Kama, Dniepr), transportujące w zawiesinie grubsze frakcje pochodzące z uruchomienia materiału dennego, często wleczonego przy stanach średnich.

Wielkość wezbrań wpływa na skład granulometryczny zawiesiny. Udział grubej frakcji jest proporcjonalny do wielkości wezbrania (tab. VII). Dunajec przy ujściu do J. Rożnowskiego podczas małych wezbrań transportuje frakcje ilaste, w czasie średnich pylaste, a podczas katastrofalnych powodzi piaszczyste (J. Cyberski 1969). Jak wynika z badań J. Cyberskiego i K. Pasternaka (1973), rzeki karpackie transportują więcej części ilastych w okresie wezbrań letnich niż zimowo-wiosennych.

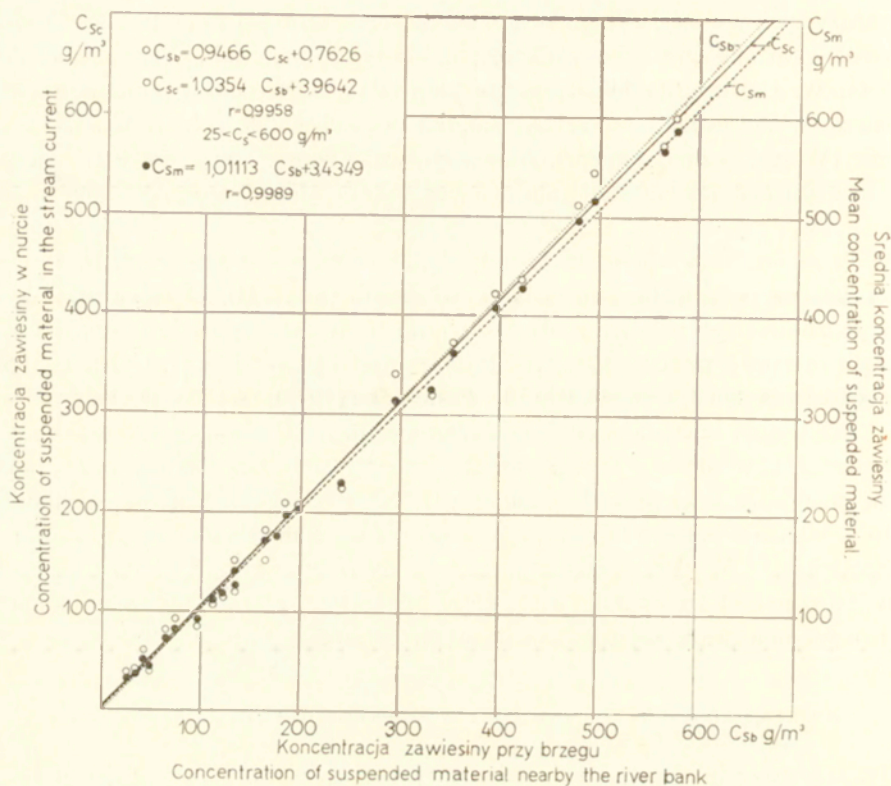
Materiał zawiesinowy transportowany przez Kamienicę Nawojowską składa się w przewadze z cząsteczek mineralnych. Szczątki organiczne mogą stanowić 3–16%. W czasie wzrostu fali wezbrań zawartość ich waha się od 7 do 16‰, a w czasie opadania 3–6%. Przy niskich stanach wody (mętność 2–8 g/m<sup>3</sup>) transportowany jest w przewadze materiał organiczny, pochodzący w dużej mierze z obumierania i odrywania plech glonów zasiedlających koryto.

#### ROZKŁAD KONCENTRACJI ZAWIESINY W PRZEKROJU POPRZECZNYM KORYTA

Transportowany przez rzeki ładunek zawiesiny ulega silnej pulsacji niezależnej od przepływu wody (J. Brański 1966; W. Jarocki 1957). Wynika to między innymi z różnej bezwładności wody i transportowanego materiału (L. Prandtl 1956).

Nierównomierne rozmieszczenie zmacenia w przekroju poprzecznym koryta wiąże się ze słabą dyspersją drobnego materiału (M. Church 1967; W. W. Sayre i F. M. Chang 1968). Rozkład zmacenia w przekroju pomiarowym Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu określono w oparciu o równoczesne pomiary koncentracji zawiesiny w trzech punktach nurtu i przy brzegu w czasie dwóch wezbrań deszczowych (4–9 VI 1970 i 3–8 VII 1971) podczas wzrostu i opadania stanu wody. Są to odmienne pod względem cyrkulacji wody i warunków hydrodynamicznych części wezbrania. Początkowy wzrost przepływu powoduje, że szybkość powierzchniowa jest podobna do panującej przy dnie, a strugi wody dźwigają się ku powierzchni unosząc ze sobą cząsteczki materiału dennego (A. F. Manbycz 1966). Silna turbulencja w tej fazie wezbrania ma duży wpływ na utrzymywanie się drobnych cząsteczek w zawiesinie (M. P. O'Brien 1933; F. Hjulström 1935; C. Nevin 1946). Równocześnie jednak duża koncentracja zawiesiny zwiększa lepkość wody (C. F. Nordin 1963; D. B. Simons i E. V. Richardson 1966) i powoduje wielkie straty energii przez dyssypację (J. B. Leighly 1932). Założono zatem, że obydwie fazy wezbrania różnią się mogą rozkładem zmacenia w przekroju.

Wyprowadzone związki ilościowe między zmaceniem w nurcie i przy brzegu



Ryc. 34. Związek między koncentracją zawiesiny przy brzegu ( $C_{Sb}$ ) a koncentracją zawiesiny w nurcie ( $C_{Sc}$ ) – nożyce korelacyjne – oraz między średnią koncentracją zawiesiny w przekroju ( $C_{Sm}$ ) a koncentracją przy brzegu ( $C_{Sb}$ ) podczas wzrostu przepływu w profilu pomiarowym Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu

Fig. 34. Relation between the concentration of suspended material at the bank ( $C_{Sb}$ ) and the concentration of suspended material in the current ( $C_{Sc}$ ) – correlation scissors – and between the mean concentration of suspended material in a cross-section ( $C_{Sm}$ ) and the concentration at the bank ( $C_{Sb}$ ) during a rise of the discharge at a measurement site at Nowy Sącz on the Kamienica Nawojowska

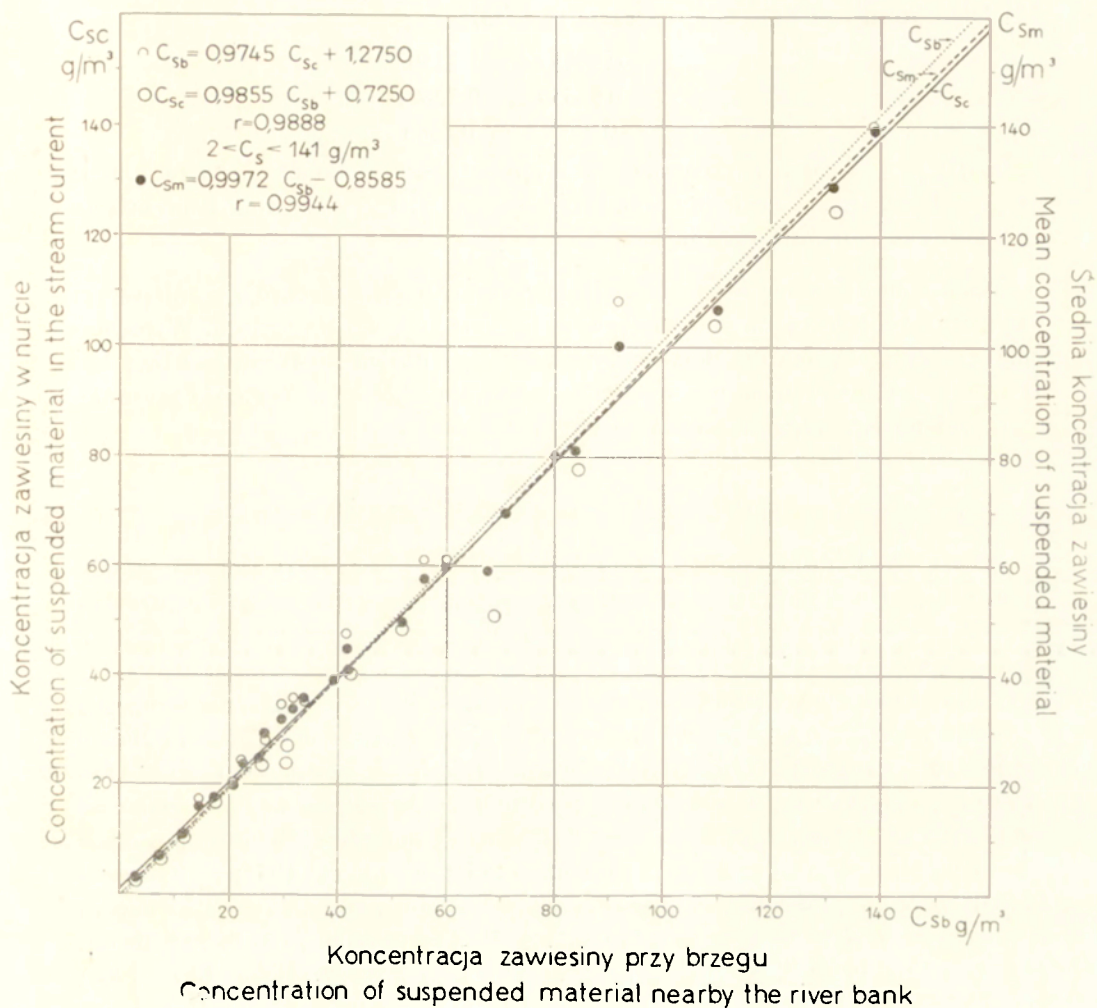
oraz średnim zmaczeniem w przekroju (przekrój pomiarowy Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu) dla okresu wzrostu i opadania fali wezbrania charakteryzują się wysokimi współczynnikami korelacji liniowej (0,988–0,998) i mają następującą postać regresji liniowych:

1) Dla okresu wzrostu fali wezbrania (ryc. 34):

$$C_{Sb} = 0,9466 C_{Sc} + 0,7626,$$

$$C_{Sc} = 1,0354 C_{Sb} + 3,9642,$$

$$C_{Sm} = 1,0111 C_{Sb} + 3,4349.$$



Ryc. 35. Związek między koncentracją zawiesiny przy brzegu ( $C_{Sb}$ ) a koncentracją zawiesiny w nurcie ( $C_{Sc}$ ) – nożyce korelacyjne – oraz między średnią koncentracją zawiesiny w przekroju ( $C_{Sm}$ ) a koncentracją przy brzegu ( $C_{Sb}$ ) podczas opadania fali wezbrania w profilu pomiarowym Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu

Fig. 35. Relation between the concentration of suspended material at the bank ( $C_{Sb}$ ) and the concentration of suspended material in the current ( $C_{Sc}$ ) – correlation scissors – and between the mean concentration of suspended material in a cross-section ( $C_{Sm}$ ) and the concentration at the bank ( $C_{Sb}$ ) during a fall of the wave of raised water-stage. Measurement site at Nowy Sącz on the Kamienica Nawojowska

2) Dla okresu opadania fali wezbrania (ryc. 35):

$$C_{Sb} = 0,9745 C_{Sc} + 1,2750,$$

$$C_{Sc} = 0,9855 C_{Sb} + 0,7250,$$

$$C_{Sm} = 0,9972 C_{Sb} + 0,8585,$$

gdzie:  $C_{Sc}$  — średnia koncentracja zawiesiny w trzech punktach nurtu (w  $g/m^3$ );  
 $C_{Sb}$  — koncentracja zawiesiny przy brzegu (w  $g/m^3$ );  $C_{Sm}$  — średnia koncentracja zawiesiny w przekroju (w  $g/m^3$ ).

Obliczone równania wskazują, że różnice koncentracji w przekroju pomiarowym są nieznaczne; postanowiono więc nie uwzględniać ich w obliczeniach. Wyrównanie zmaczenia w przekroju pomiarowym wiąże się z dużym spadkiem zwartego koryta oraz występowaniem progów skalnych wywołujących silną dyspersję zawiesiny powyżej miejsca poboru prób wody.

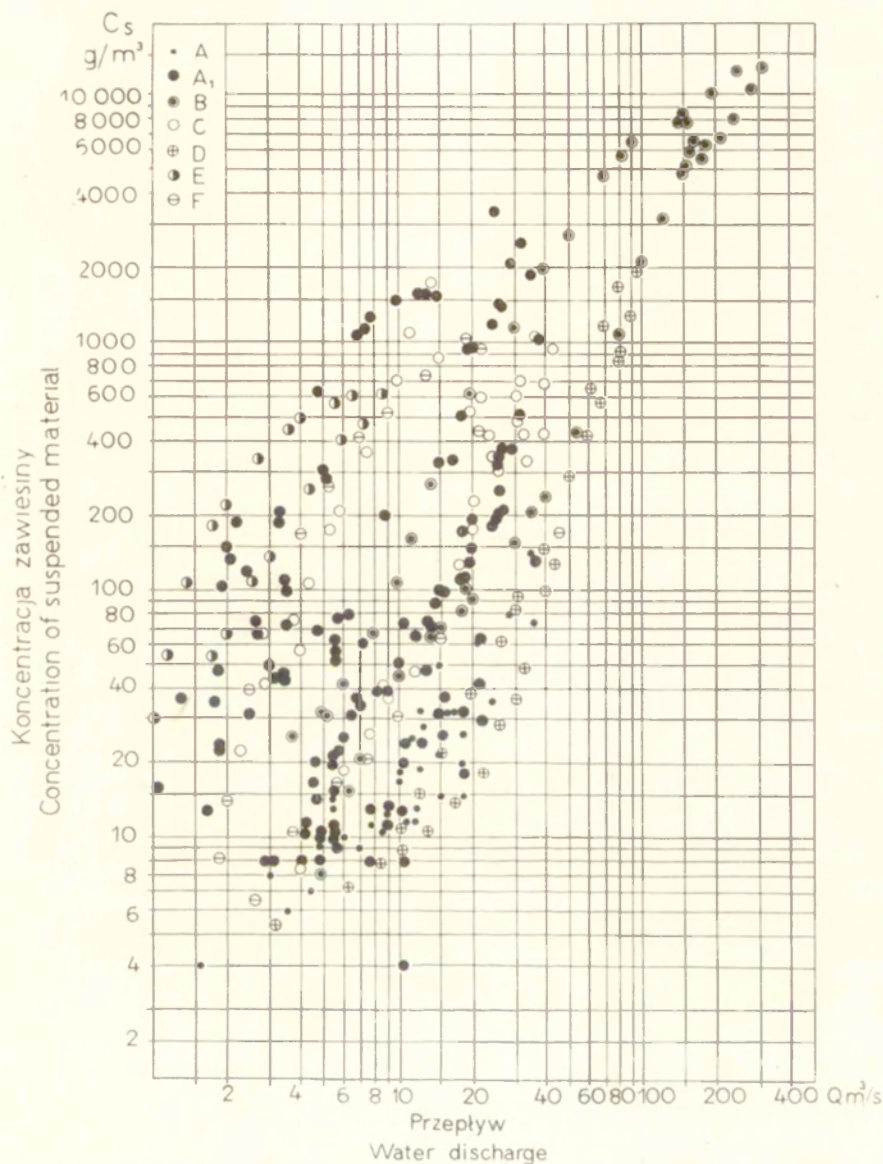
#### ZWIĄZEK TRANSPORTU Z PRZEPLYWEM WODY

Początkowej fazie wezbrań towarzyszy gwałtowny wzrost zmaczenia o amplitudzie często wielokrotnie przekraczającej wahańa przepływu wody. Po przejściu kulminacji w fazie opadania fali zmniejszanie się mętności odbywa się na ogół jednostajnie (ryc. 14–17, 19–22).

Szybko następujące zmiany zmaczenia w początkowej fazie wezbrania wymagają częstego pobierania prób wody. Ma to wpływ na zwiększenie dokładności obliczeń rozmiarów transportu. Między koncentracją zawiesiny a przepływem wody brak prostego związku (W. Jarocki 1957), co utrudnia interpolację wartości zmaczenia dla okresów pozbawionych pomiarów. Zastosowanie interpolacji liniowej powoduje poważne błędy w obliczeniach (G. Braudeau 1951; W. Jarocki 1957; Z. Paślawski 1965). Przy niewystarczającej liczbie pomiarów wyprowadzane są związki między przepływem wody a zmaczeniem w formie zależności krzywoliniowych (W. M. Brown i J. R. Ritter 1971; P. A. Glancy 1971; K. N. Lisicyna i I. W. Bogolubowa 1964; L. K. Lustig i R. D. Busch 1967) lub liniowych (J. Cyberski 1969). Ładunek zawiesiny wykazuje zawsze lepszą korelację z przepływem wody niż koncentracja zawiesiny (H. P. Guy 1964). Do wyrównania ciągu obserwacji zmaczenia stosowano również metodę interpolacji Newtona w oparciu o równanie Lagrange'a (J. Sobczak 1965, 1966; K. Figuła 1966).

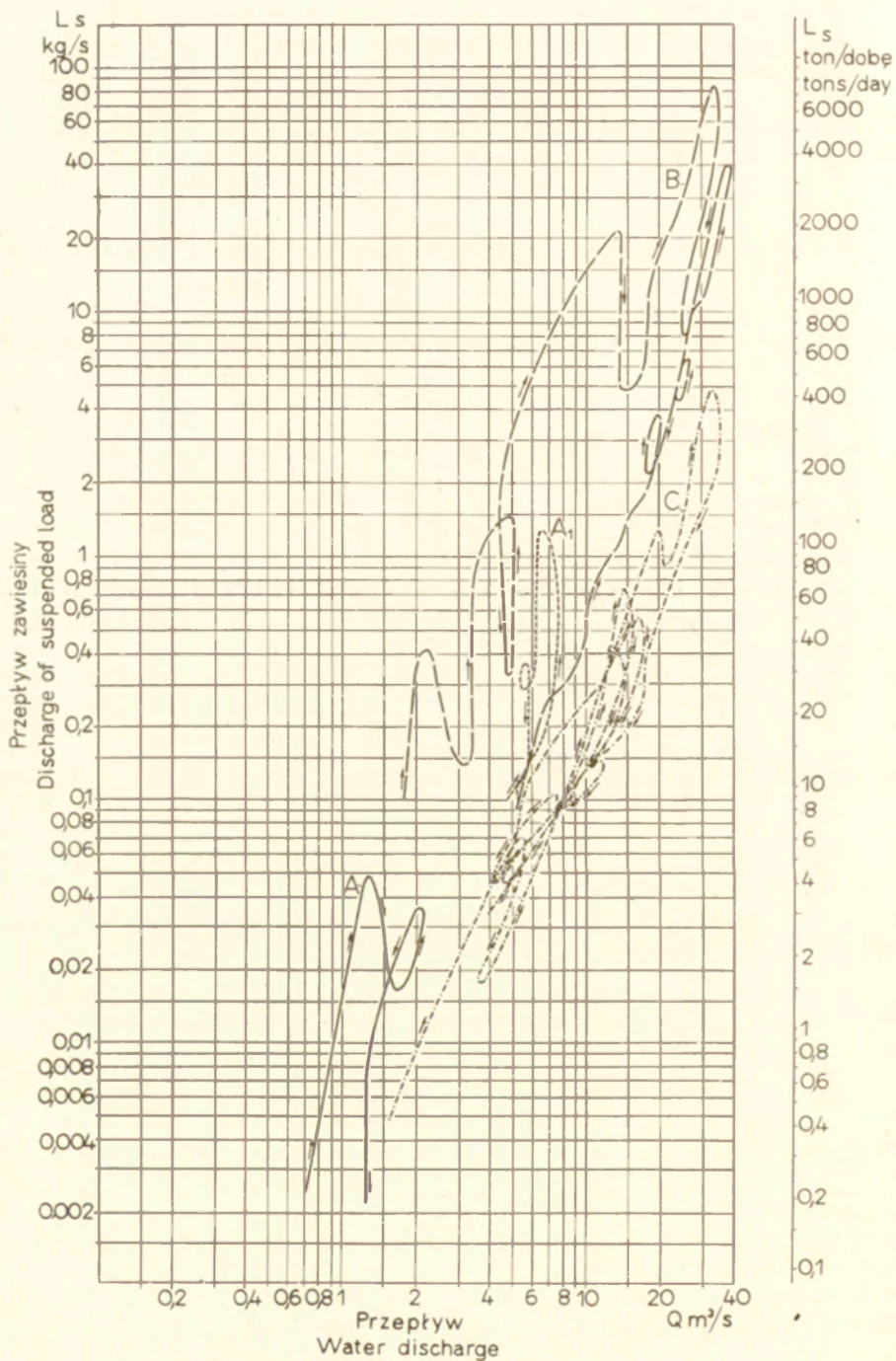
Dla większości rzek graficznym obrazem związku między przepływem wody a zmaczeniem jest pętla (J. Brański 1966; W. Jarocki 1957; Z. Paślawski 1965; E. S. Siemienowa 1964). Pętle mogą ulegać zmianom kształtu z biegiem rzeki.

W Państwowym Instytucie Hydrologicznym (G.G.I.) w ZSRR wyprowadzono cztery typy związków między przepływem wody a koncentracją zawiesiny dla różnych typów rzek w formie trzech pętli i paraboli, które umożliwiają interpolację wartości zmaczenia dla okresów pozbawionych pomiarów (G. W. Żeleznikow 1972). Na podstawie częstych pomiarów zmaczenia w Kamienicy Nawojowskiej stwierdzo-



Ryc. 36. Związek między przepływem ( $Q$ ) a koncentracją zawiesiny ( $C_S$ ) podczas wezbrań roztopowych:  $A$  – 19 III–5 IV 1970;  $A_1$  – 17–31 III 1971 i deszczowych:  $B$  – 18–23 VII 1970;  $C$  – 3–8 VII 1971;  $D$  – 25–31 VII 1970;  $E$  – 24–26 VIII 1971;  $F$  – 6–8 X 1970 w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

Fig. 36. Relation between the discharge ( $Q$ ) and the concentration of suspended load ( $C_S$ ) during raised water-stages due to thawing:  $A$  – March 19 – April 5, 1970;  $A_1$  – March 17–31, 1971 and during those due to rainfalls;  $B$  – July 18–23, 1970;  $C$  – July 3–8, 1971;  $D$  – July 25–31, 1970;  $E$  – August 24–26, 1971;  $F$  – October 6–8, 1970 (the Kamienica Nawojowska – Nowy Sącz)





no jednak, że każdemu niemal wezbraniu odpowiada inny przebieg pętli złączenia (ryc. 36–38). Zatem każde przybliżenie interpolacyjne przy małej ilości pomiarów (dla dłuższego okresu czasu będzie obciążone błędem.

#### TRANSPORT W CZASIE WEZBRAŃ

Podczas wezbrań występuje najczęściej wyprzedzenie kulminacji przepływu przez maksimum złączenia (ryc. 14, 16, 17, 20–22). Przypada ono najczęściej na krótko przed kulminacją, po osiągnięciu 75–90% wysokości fali wezbrania. W nielicznych przypadkach występuje równocześnie z kulminacją przepływu (ryc. 19) lub po jej przejściu (ryc. 15). Wskazuje to na złożony mechanizm dostawy drobnego materiału do transportu.

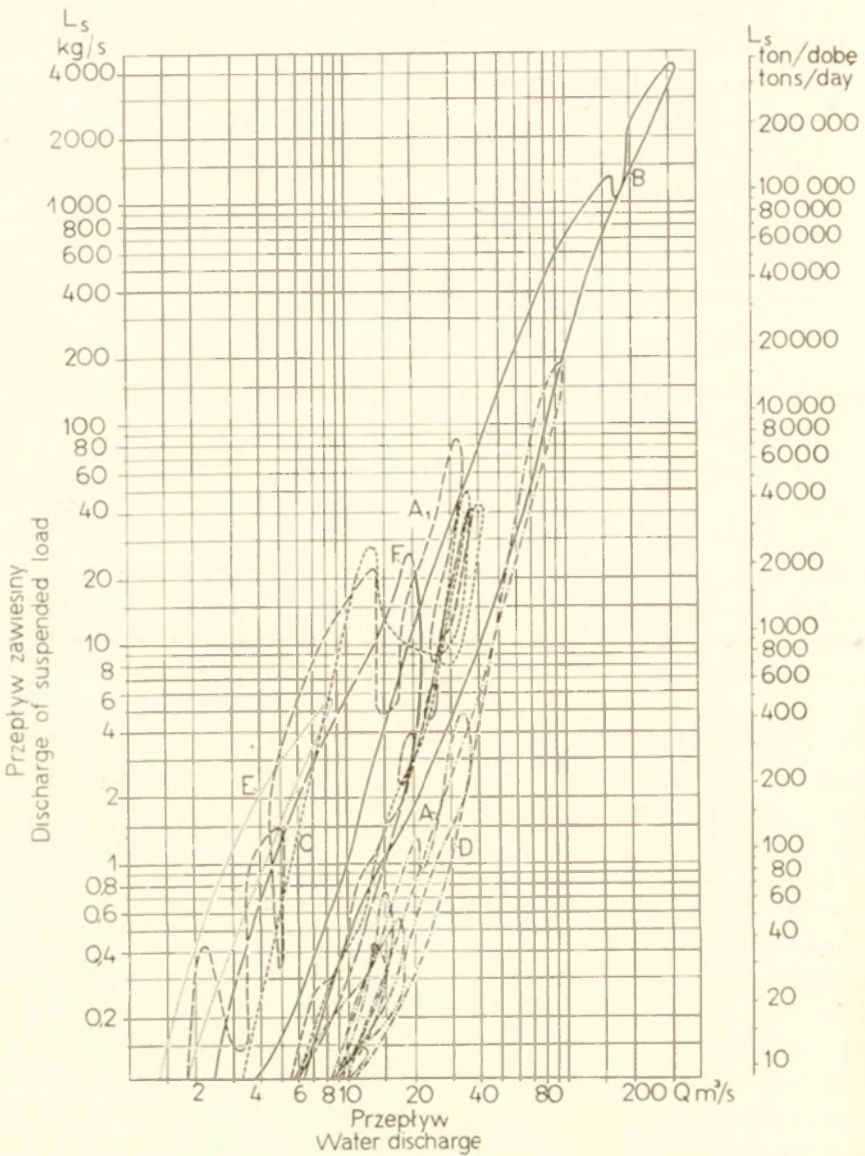
Przy podobnych przepływach wezbrań koncentracja zawiesiny wykazuje duże zróżnicowanie (ryc. 36). Znajduje to swoje odbicie w przebiegu zależności między przepływem a ładunkiem zawiesiny (ryc. 37, 39). Kształt pętli informuje o pojemności transportowej rzeki w różnych fazach wezbrania, dostawie materiału do transportu i warunkach hydrodynamicznych panujących w korycie. Każdemu okresowi wezbrania odpowiada inne natężenie przepływu zawiesiny, odzwierciedlające się w kształcie pętli. Różne kształty pętli i ich wzajemny stosunek świadczą, że w naszym typie klimatu jest duża przejściowość wyrażająca się w zmienności warunków pogody. Znajduje ona odbicie w zróżnicowanych kształtach fal wezbraniowych i warunkach dostawy luźnej zwierzliny do transportu w zawieszynie.

Największe ładunki zawiesiny transportują gwałtowne wezbrania deszczowe występujące po okresie długotrwałej suszy u schyłku lata i w jesieni (ryc. 21, 22, 38). Kulminacje tych wezbrań charakteryzowały się dużą koncentracją zawiesiny, dochodzącą maksymalnie do  $1086 \text{ g/m}^3$  ( $6 \times 1970$ ) przy stosunkowo małym przepływie ( $22,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ). O dużej mętności wody w tym okresie decyduje gwałtowność wzrostu przepływu (opad o dużym natężeniu) i długi okres gromadzenia luźnej zwierzliny tworzącej się w wyniku przesuszenia wierzchniej warstwy gruntu. Silnie wyschnięta nawierzchnia dróg gruntowych, kruszona przez koła wozów i maszyn rolniczych, intensywnie „produkuje” luźną zwierzelinę. Duże złączenie podczas jednego z opisywanych wezbrań G. Porterfield (1972) wiąże z długim okresem suszy i niskich stanów wody przed wezbraniem.

Podobnie duży ładunek zawiesiny transportują niektóre wezbrania roztopowe (ryc. 14, 16, 37). Nagromadzenie w zlewni produktów wietrzenia fizycznego w okresie

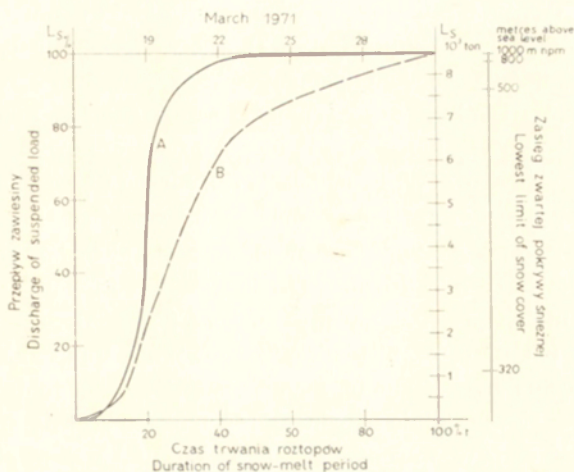
Ryc. 37. Związek między przepływem ( $Q$ ) a ładunkiem zawiesiny ( $L_S$ ) podczas wezbrań roztopowych:  $A$  – 11–15 III 1970;  $A_1$  – 22–29 I 1971;  $B$  – 17–31 III 1971;  $C$  – 19 III–5 IV 1970 w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

Fig. 37. Relation between the discharge ( $Q$ ) and the load of suspended material ( $L_S$ ) during raised water-stages due to thawing:  $A$  – March 11–15, 1970;  $A_1$  – January 22–29, 1971;  $B$  – March 17–31, 1971;  $C$  – March 19–April 5, 1971 in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)



Ryc. 38. Związek między przepływem ( $Q$ ) a ładunkiem zawiesziny ( $L_s$ ) podczas wezbrań roztopowych:  $A$  – 19 III–5 IV 1970;  $A_1$  – 17–31 III 1971 i deszczowych;  $B$  – 18–23 VII 1970;  $C$  – 3–8 VII 1971;  $D$  – 25–31 VII 1970;  $E$  – 24–26 VIII 1971;  $F$  – 6–8 X 1970 w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

Fig. 38. Relation between the discharge ( $Q$ ) and the load of suspended material ( $L_s$ ) during raised water-stages due to thawing:  $A$  – March 19–April 5, 1970;  $A_1$  – March 17–31, 1971 and during those due to rainfalls;  $B$  – July 18–23, 1970;  $C$  – July 3–8, 1971;  $D$  – July 25–31, 1970;  $E$  – August 24–26, 1971;  $F$  – October 6–8, 1970 in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)



Ryc. 39. Wynoszenie ładunku zawiesiny ( $L_S$ ): *A* – na tle odpływu wody; *B* – podczas wezbrania roztopowego 17–31 III 1971 (Kamienica Nawojowska – Nowy Sącz)

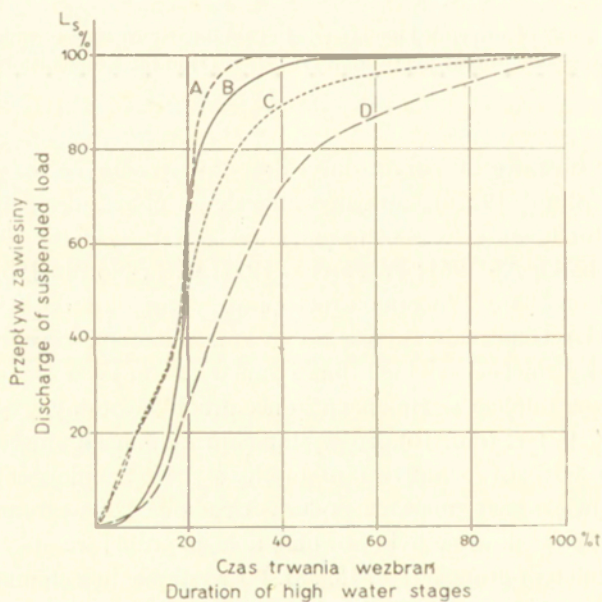
Fig. 39. Carrying away of suspended load ( $L_S$ ): *A* – on the background of water run-off; *B* – during raised water-stage due to thawing (March 17–31, 1971) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)

zimy umożliwia dostawę do koryta dużej ilości zwietrzliny przez wody roztopowe (por. E. Gil i J. Słupik 1972a). Utrzymywanie się dużej mętności jest możliwe dzięki niskiej temperaturze wody zwiększającej jej lepkość (B. R. Colby 1964; D. W. Hubbel i K. S. Al-Shaikh Ali 1961; W. Jarocki 1957; C. F. Nordin 1963; D. B. Simons i E. V. Richardson 1966). Wezbrania roztopowe trwają od kilku (1971 r.) do kilkunastu dni (1970 r.). Charakteryzują się dobowymi wahaniami przepływu związanymi z ablacją pokrywy śnieżnej w ciągu dnia i zamarzaniem jej w ciągu nocy (ryc. 16). Znajduje to swoje odbicie w zmianach koncentracji zawiesiny. Podczas wezbrania roztopowego w 1971 r. (ryc. 16), po wystąpieniu kulminacji zmaczenia ( $2659 \text{ g/m}^3$ ) mimo dalszego wzrostu przepływu nastąpiło szybkie zmniejszenie się mętności. Wystąpienie największego zmaczenia podczas opadania fali wezbrania roztopowego (22–26 I 1971) spowodowane było powolną ablacją grubej warstwy śniegu zalegającej na przemarzniętym gruncie (ryc. 15, 38). Po wystąpieniu kulminacji, wody roztopowe w niższych częściach zlewni płynęły po rozmarzniętym gruncie i mogły dostarczać drobny materiał do koryta. Przy długotrwałym wolno przebiegającym zaniku pokrywy śnieżnej wiosną, poprzedzonym odwilżami (1970 r.), wiosenne wezbranie roztopowe na skutek niedoboru w zlewni luźnego drobnego materiału na powierzchni gruntu charakteryzowało się małą mętnością (ryc. 36, 37). Poprzedzające je małe wezbranie odwilżowe (11–15 III 1970) transportowało duży ładunek zawiesiny przy małym przepływie (ryc. 14, 37).

Największe zmaczenia występują podczas katastrofalnych powodzi. Podczas po-

wodzi w lipcu 1970 r. zmaczenie wody w Kamienicy Nawojowskiej osiągnęło w czasie kulminacji przepływu  $13500 \text{ g/m}^3$  (ryc. 17). Pierwsza kulminacja zmaczenia wyprzedziła odpowiadającą jej kulminację przepływu, a druga wystąpiła równocześnie z maksimum przepływu i związana była z dużą dostawą materiału pochodzącego z poszerzenia koryta nie dostosowanego do warunków hydrodynamicznych katastrofalnych przepływów (W. Froehlich 1972). Liczne wezbrania, które wystąpiły przed powodzią, wyniosły dużą ilość drobnego materiału ze zlewni. Duża wilgotność gruntu utrzymywała w stanie zwięzłości agregaty glebowe. Skutkiem tego początkowa faza powodzi w porównaniu z innymi wezbraniem charakteryzowała się transportem mniejszych ładunków zawiesiny (ryc. 38).

Podczas krótkich okresów międzywezbraniowych poprzedzających gwałtowne wezbrania deszczowe nie następuje regeneracja zasobów luźnego drobnego materiału zwierzelinowego w zlewni. Silnie rozwinięta roślinność oraz wilgotność gleby chroni ją przed splukiwaniem. W warunkach karpaccich niekiedy gwałtowne katastrofalne wezbrania deszczowe mogą osiągnąć cechy zbliżone do potoków błotnych



Ryc. 40. Wynoszenie ładunku zawiesiny ( $L_5$ ) na tle odpływu wody w czasie wezbrań ( $t$ ): *A* – podczas katastrofalnej powodzi deszczowej 18–23 VII 1970; *B* – wezbrania roztopowego 17–31 III 1971; *C* – odpływ wody podczas katastrofalnej powodzi deszczowej; *D* – odpływ wody podczas wezbrania roztopowego (Kamienica Nawojowska – Nowy Sącz)

Fig. 40. Carrying away of suspended load ( $L_5$ ) against water run-off: *A* – during a catastrophic rainfall flood, July 18–23, 1970; *B* – raised water-stage due to thawing, March 17–23, 1971; *C* – run-off during a catastrophic rainfall flood; *D* – run-off during raised water-stage due to thawing (the Kamienica Nawojowska – Nowy Sącz)

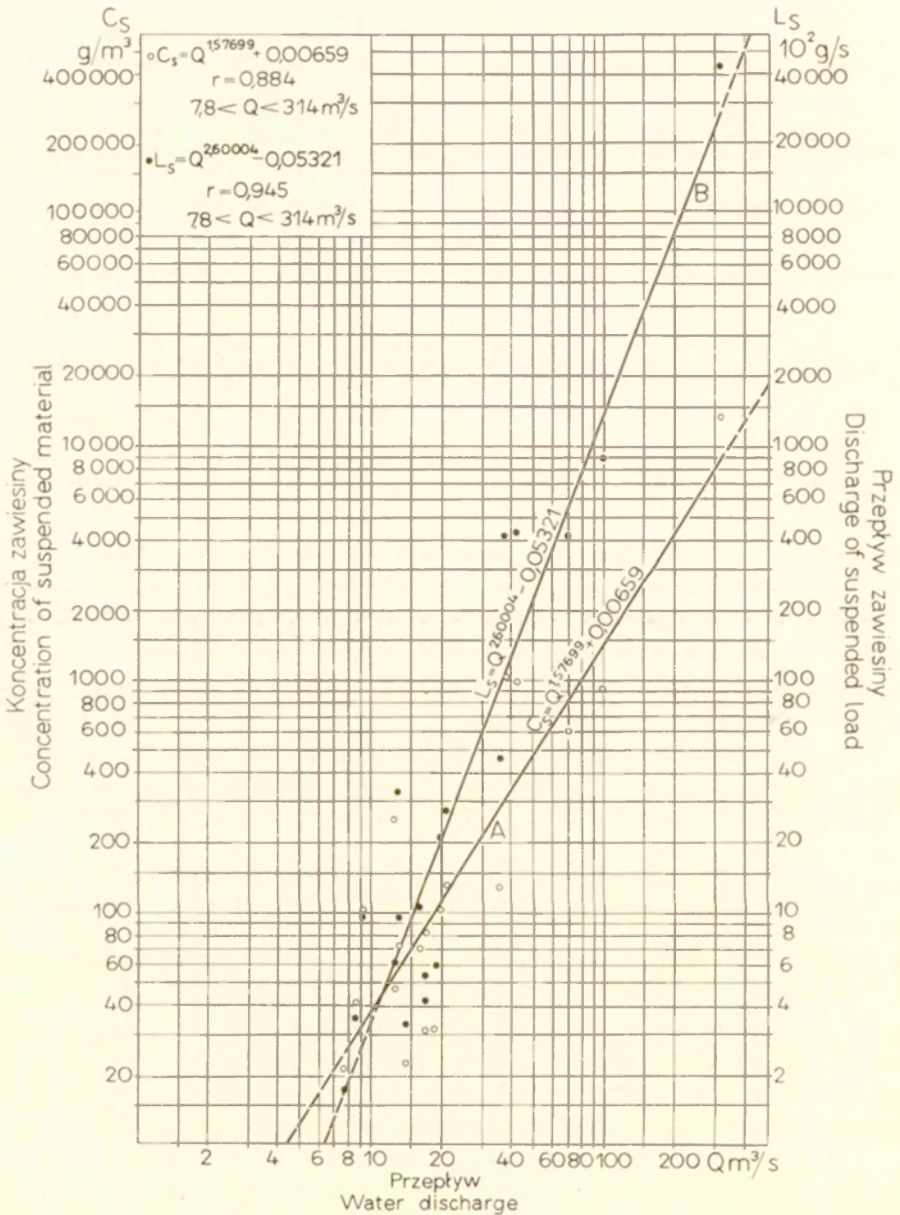
(mud flow). Na przykład potok Świdnik (zlewnia o powierzchni 11, 18 km<sup>2</sup>), uchodzący do J. Rożnowskiego, w czasie kulminacji wezbrania 23–24 V 1963 osiągnął mętność 35300 g/m<sup>3</sup> przy przepływie 29 m<sup>3</sup>/s (K. Cyberska i J. Cyberski 1964). Zjawiska te mogą być związane z procesami upłynnienia gleby na stokach w czasie gwałtownych ulew (por. E. Gil i J. Słupik 1972b).

Najmniejsze ładunki (przy podobnych przepływach) transportują wezbrania występujące bezpośrednio po innych wezbraniach (ryc. 19, 37, 38). Zaczynają się one często od dużego przepływu odziedziczonego po poprzednim wezbraniu, któremu towarzyszy niska koncentracja zawiesiny. Wyniesiony przez poprzedzające je wezbranie drobny luźny materiał oraz najczęściej znaczna wilgotność gleby i krótki okres międzywezbraniowy powodują trudności w uruchomieniu zwietrzeliny. Zmniejszanie się zmacenia w kolejno następujących po sobie wezbraniach podkreślają K. N. Lisicyna i I. W. Bogolubowa (1964).

Przedstawiona charakterystyka wezbrań oparta na różnicach w natężeniu transportu zawiesiny obejmuje wezbrania, które wystąpiły w ciągu okresu badań. Należy jednak mieć na uwadze wielką różnorodność wezbrań w wieloleciu, mogącą mieć podobny lub odmienny mechanizm transportu zawiesiny. Wstępnie można jednak sądzić, że zróżnicowanie natężenia transportu zawiesiny uzależnione jest od: 1) gwałtowności wzrostu przepływu uwarunkowanego natężeniem deszczu lub szybkością ablacji pokrywy śnieżnej; 2) długości okresu międzywezbraniowego i „zapasu” drobnej luźnej zwietrzeliny na powierzchni gruntu; 3) różnej roli ochronnej szaty roślinnej w okresie wegetacji; 4) temperatury wody.

Podczas wezbrań zaznacza się duże zróżnicowanie koncentracji zawiesiny w dopływach oraz wzdłuż biegu Kamienicy Nawojowskiej (ryc. 28). Największa mętność występowała w dopływach środkowego biegu, których zlewnie zbudowane są miejscami z mało odpornych łupków. Zmacenie wody w dużym stopniu zależy od odporności budujących zlewnię skał. Zależność między tymi parametrami jest prostoliniowa (N. G. Maczawariani 1972). Nieco mniejszą mętnością charakteryzowały się dopływy dolnego biegu, odwadniające zlewnie położone częściowo w obrębie pogórzy. Z biegiem rzeki wzrastała koncentracja zawiesiny, szczególnie silnie po przyjęciu dopływów z rolniczych pogórzy i przepływie rzeki przez odcinki akumulacji aluwów. Zaznaczała się wyraźna różnica wzrostu zmacenia z biegiem rzeki podczas wezbrania roztopowego (20 III 1971) i wezbrań deszczowych (4 VII 1971 i 24 VIII 1971). Mała koncentracja zawiesiny w dopływach górnej części zlewni podczas wezbrania roztopowego wynikała z powolnego i opóźnionego w czasie zanikania pokrywy śnieżnej w wyższych piętrach gór. Największa ilość materiału pochodziła z wysokości do 500 m n.p.m. (ryc. 39).

Szybkość wynoszenia ładunku zawiesiny podczas wezbrań uzależniona jest od ich gwałtowności i wielkości zmian zmacenia (ryc. 40). Mniej gwałtowne wezbrania roztopowe odprowadzają transportowany ładunek zawiesiny bardziej równomiernie niż gwałtowne katastrofalne powodzie (W. Froehlich 1973). Różnice te wynikają zasadniczo z braku bezpośredniego związku funkcyjnego między przepływem wody



Ryc. 41. Związek między szczytowym przepływem wzebrań ( $Q$ ) a występującą podczas nich koncentracją zawiesiny ( $C_S$ ) i ładunkiem zawiesiny ( $L_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

Fig. 41. Relation among the peak discharge of raised water-stages ( $Q$ ) and the then occurring concentration of suspended load ( $C_S$ ) and the load of suspended material ( $L_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)



Fot. 5. Akumulacyjny odcinek koryta Kamienicy Nawojowskiej o cechach roztok k. Frycowej  
Phot. 5. An accumulation reach of the Kamienica Nawojowska bed revealing the character of a braided river near Frycowa

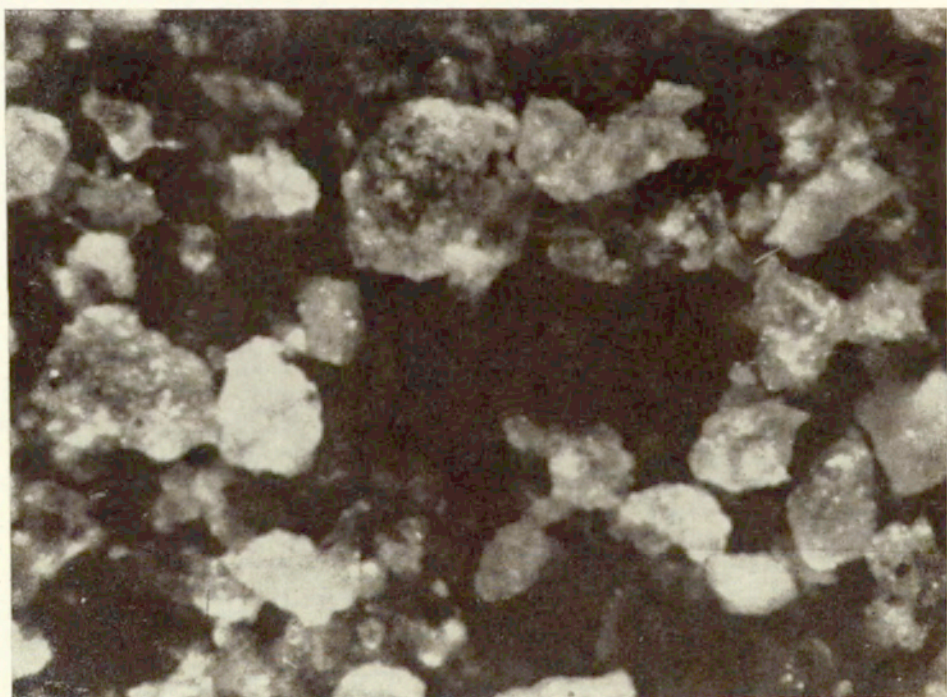


Fot. 6. Utrwalone przez roślinność „cienie” piaszczysto-mulkowe na terasie zalewowej Kamienicy Nawojowskiej k. Nawojowej  
Phot. 6. Sandy-silty “shadows” fixed by plants on the inundation terrace of the Kamienica Nawojowska near Łabowa



Fot. 7. Fala powodziowa Kamienicy Nawojowskiej przy ujściu do Dunajca. W głębi widoczne podparcie wód Kamienicy przez Dunajec

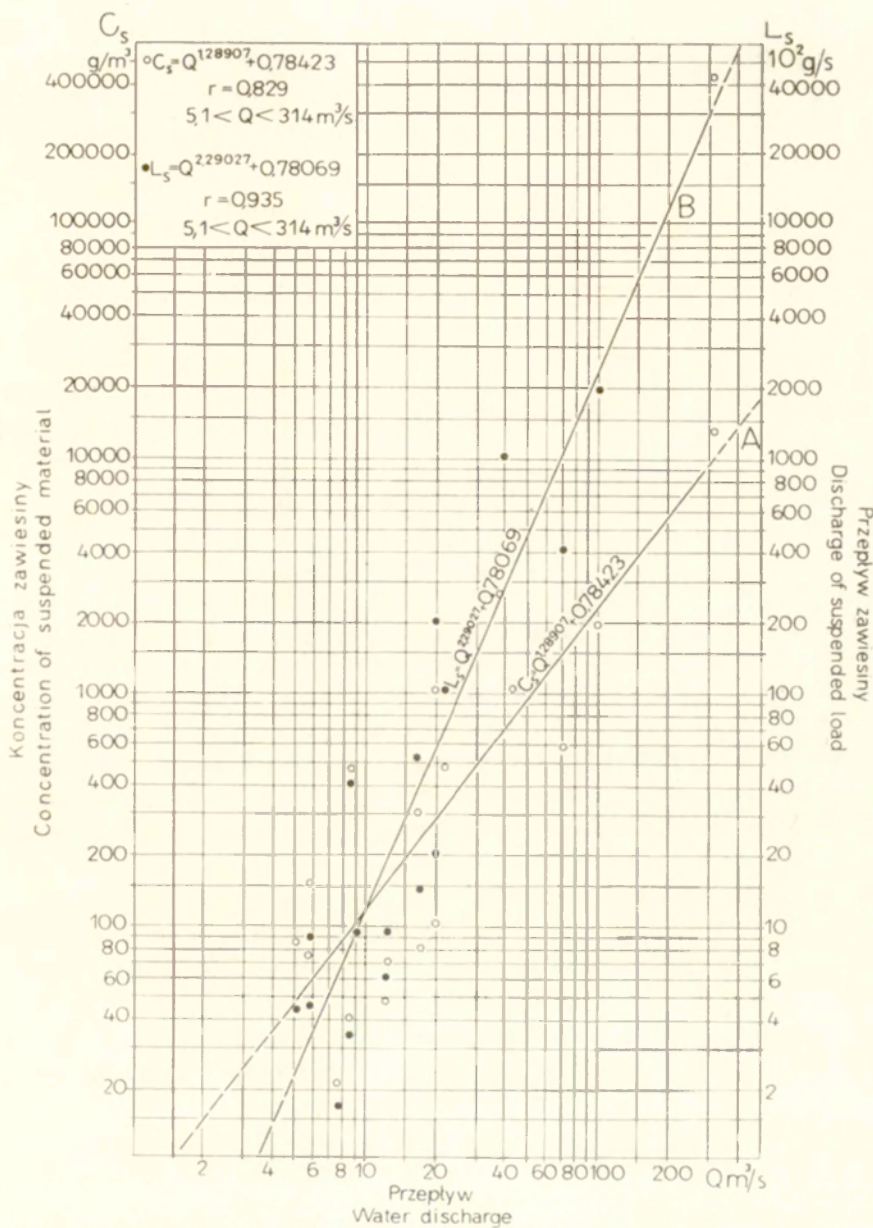
Phot. 7. Flood-wave of the Kamienica Nawojowska at its mouth into the Dunajec. In the background visible a rise of the Kamienica waters by the Dunajec



Fot. 8. Zdjęcie mikroskopowe materiału zawiesinowego

Phot. 8. A microscopic picture of suspended material





Ryc. 42. Związek między szczytowym przepływem wzebrania ( $Q$ ) a maksymalną koncentracją zawiesiny podczas wzebrania ( $C_S$ ) i przepływającym równocześnie ładunkiem zawiesiny ( $L_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

Fig. 42. Relation among the peak discharge of raised water-stages ( $Q$ ) and the max. concentration of suspended load during raised water-stage ( $C_S$ ) and the passing load of suspended material ( $L_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)

a transportem ładunku zawiesiny. Znajduje tu swoje odbicie zmienne natężenie transportu podczas każdego wezbrania.

Szczytowe przypiływy wezbrań wykazują silny związek z występującą podczas nich koncentracją i ładunkiem zawiesiny (ryc. 41), przybliżają go następujące równania regresji:

$$C_S = Q^{1,57699} \cdot 0,00659 \quad r = 0,884,$$

$$L_S = Q^{2,60004} \cdot 0,05321 \quad r = 0,945,$$

gdzie:  $C_S$  — koncentracja zawiesiny podczas kulminacji przepływu (w  $g/m^3$ );  
 $L_S$  — ładunek zawiesiny transportowany podczas kulminacji przepływu (w  $g/s$ ).

Podobnie silny związek wykazują szczytowe przepływy wezbrań z maksymalną koncentracją i ładunkiem zawiesiny w czasie wezbrania (ryc. 42). Opisują go następujące równania regresji:

$$C_S = Q^{1,28907} \cdot 0,78423 \quad r = 0,829,$$

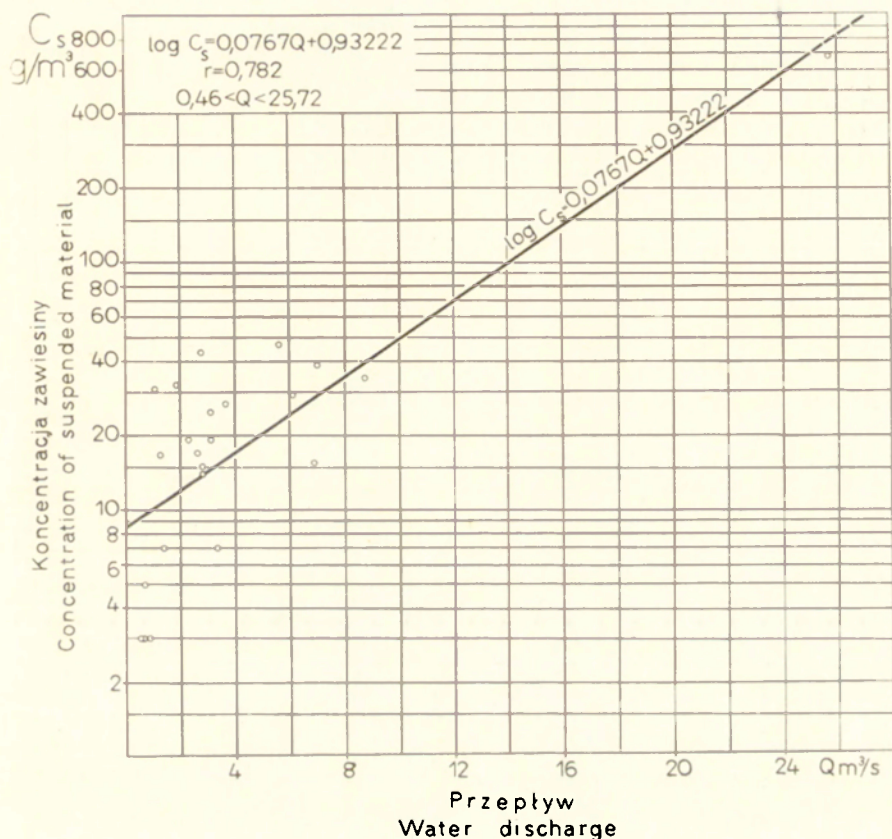
$$L_S = Q^{2,29027} \cdot 0,78069 \quad r = 0,935.$$

Z analizy przedstawionych równań regresji wynika, że podczas każdego wezbrania rzeka dąży do możliwie największego w danych warunkach hydrodynamicznych obciążenia w zawiesinę. Zmniejszanie się rozrzutu punktów wartości zmaczenia po przekroczeniu granicy przepływu około  $40 m^3/s$  (ryc. 37) podczas różnych wezbrań wiąże się z uruchomieniem w niektórych odcinkach koryta materiału dennego. Rzeka zostaje „dociążona” proporcjonalnie do chwilowych możliwości transportowych drobnym materiałem z aluwiów korytowych. O dużej dostawie drobnego materiału z aluwiów korytowych do transportu w zawiesinie świadczyć może między innymi zmaczenie wody wywołane przez przejazd w bród pojazdów oraz podczas eksploatacji aluwiów z koryta.

Wyprowadzone równania wskazują, że obciążenie rzeki w zawiesinę podczas wezbrań rośnie potęgowo w stosunku do wzrostu przepływu. Koncentracja zawiesiny wzrasta jak 1,3–1,6 potęgi przepływu, a transportowany ładunek jak 2,3–2,6 potęgi przepływu. Według P. A. Szatbieraszwili (1958) średnie zmaczenie kaukaskiej rzeki Rioni jest w przybliżeniu proporcjonalne do szóstej potęgi średniej szybkości wody.

#### ZMIENNOŚĆ TRANSPORTU W CIĄGU ROKU

Średnia roczna koncentracja zawiesiny w Kamienicy Nawojowskiej wynosiła w 1971 r.  $22 g/m^3$ , a w 1970 r.  $74 g/m^3$  (tab. VI). Przy niskich przepływach jesiennych i zimowych średnie miesięczne zmaczenie spadało do  $3 g/m^3$  (XI, XII 1970 i X 1971). Wiosenne wezbrania o dużej koncentracji zawiesiny dawały w marcu i kwietniu wzrost średniego zmaczenia od 16 (III 1970) do  $47 g/m^3$  (III 1971). Podczas miesięcy letnich wartość średniej miesięcznej była bardzo wysoka i np. w lipcu 1970 r. wynosiła  $691 g/m^3$ .



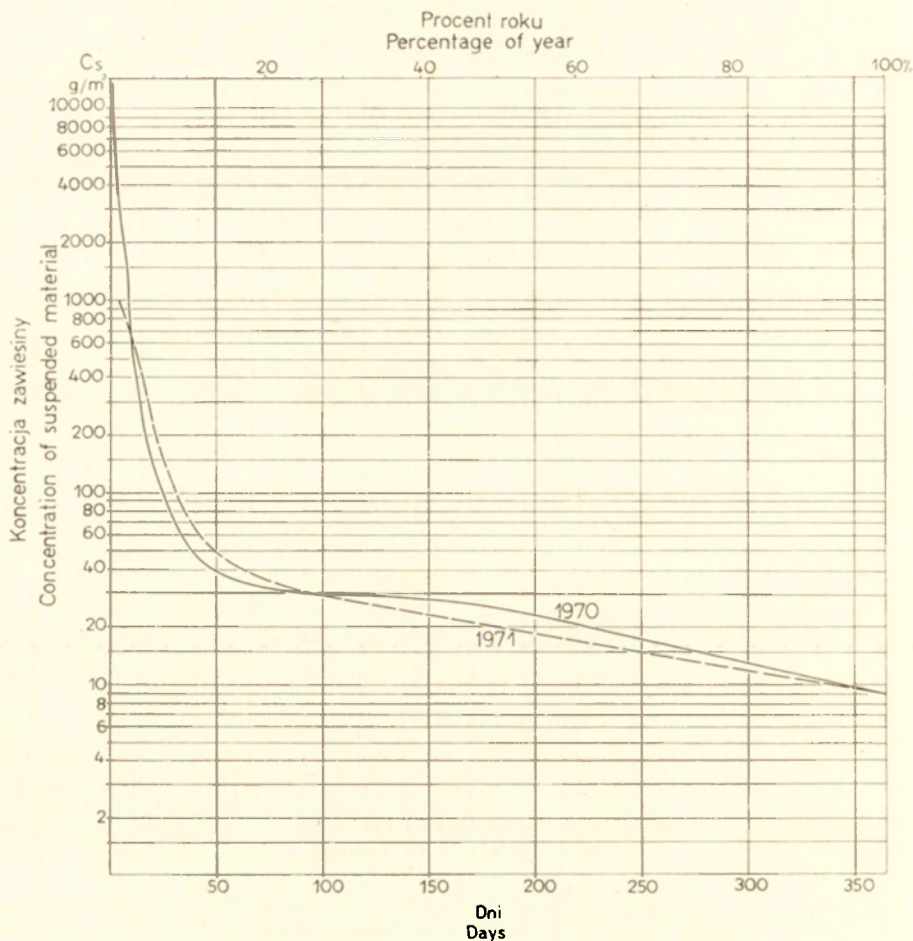
Ryc. 43. Związek między średnim miesięcznym przepływem wody ( $Q$ ) a średnią miesięczną koncentracją zawiesiny ( $C_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

Fig. 43. Relation between the mean monthly discharge of water ( $Q$ ) and the mean monthly concentration of suspended material ( $C_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)

Średnie miesięczne wartości zmaczenia wykazują dość silny związek ( $r = 0,782$ ) ze średnimi miesięcznymi wartościami przepływu. Związek przybliża równanie regresji logarytmicznej o postaci (ryc. 43):

$$\log C_S = 0,0767 Q + 0,93222.$$

Równanie to przedstawia z wielkim uproszczeniem złożony mechanizm wahań koncentracji zawiesiny w ciągu roku. Zatem zastosowanie go do obliczeń rocznego bilansu wynoszenia zawiesiny ze zlewni Kamienicy Nawojowskiej (dla lat pozbawionych pomiarów zmaczenia) może prowadzić do wyników obarczonych wielkimi błędami (szczególnie dla lat z dużą ilością wezbrań).



Ryc. 44. Czas trwania poszczególnych wielkości koncentracji zawiesiny ( $C_s$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

Fig. 44. Duration of particular values of concentration of suspended material ( $C_s$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)

W ciągu ponad 250 dni w roku występują zmagnięcia mniejsze od  $30 g/m^3$  (ryc. 44). przy przepływie ładunku zawiesiny poniżej  $100 g/m^3$  (ryc. 45). Tylko niewielki procent czasu roku (poniżej 10%) przypada na wysokie wartości koncentracji i ładunku zawiesiny przenoszone podczas wielkich wezbrań. Mokry rok 1970 wykazywał przewagę czasu trwania wysokich wartości koncentracji i ładunku zawiesiny w porównaniu z suchym rokiem 1971. Wskazuje to na prawidłowość, że w latach mokrych częstotliwość dużych wartości zmagnięcia i ładunku zawiesiny jest większa niż w latach suchych.

ŹRÓDŁA DOSTAWY DROBNEJ ZWIETRZELINY

Przemieszczanie znacznych mas materiału na stokach Karpat fliszowych pod wpływem splukiwania (T. Gerlach 1965) nie znajduje w pełni swojego odbicia w transporcie zawiesiny przez rzeki. Przeważająca część materiału splukiwanego ze stoków zostaje zdeponowana u ich podnóża oraz w dnach dolin i nie dociera do koryt (L. Starkel 1972a).

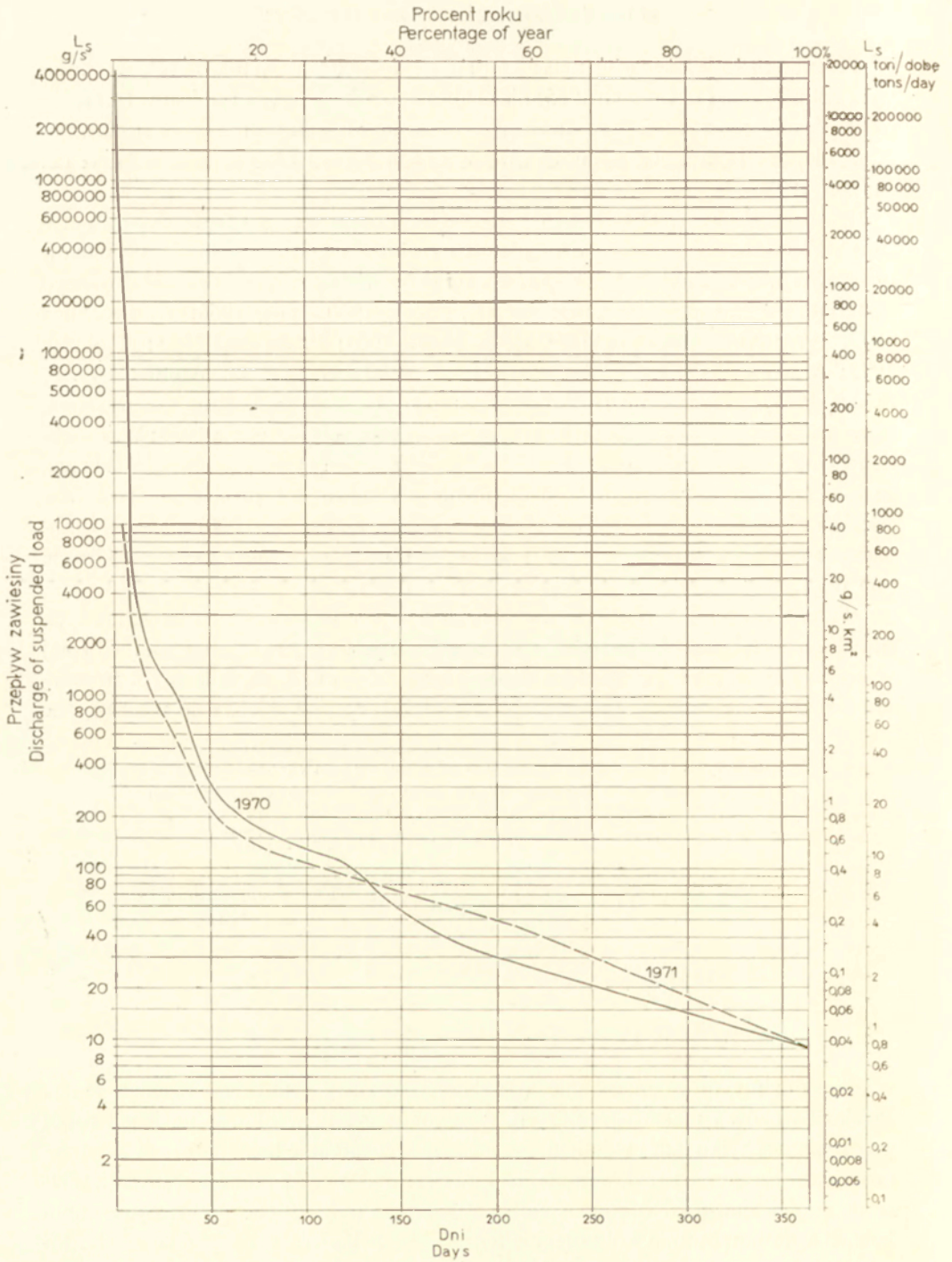
Transportowany w korycie drobny materiał dostarczany jest zasadniczo z bocznych dopływów, koryta oraz z dróg i ścieżek gruntowych, które spełniają rolę cieków okresowych. Wielu autorów przypisuje sieć dróg wielką rolę w dostawie drobnego materiału do transportu w zawieszynie (K. Figuła 1960, 1964, 1966; W. Froehlich 1972, 1973; M. Klimaszewski 1935a; S. Polak 1965; P. Prochal 1968; J. Słupik 1973; A. Welc 1972; K. F. Williams i L. A. Reed 1972; M. G. Wolman i A. P. Schick 1967). Potwierdzają to nieliczne pomiary zmaczenia wykonane podczas wezbrań równocześnie w korycie cieku i na drodze gruntowej (K. Figuła 1960; W. Froehlich 1973). Obserwacje przeprowadzane w zlewni Kamienicy Nawojowskiej wskazują, że koncentracja zawiesiny w wodach płynących drogą jest przeciętnie 2–4 razy większa niż w korycie (tab. VIII). Według pomiaru K. Figuły (1960) w zlewni Grajczarka zmaczenie na drodze (9 V 1957) wynosiło 10054 mg/l, a równocześnie w korycie 300 mg/l.

Wciosy drogowe wycięte w gliniasto-gruzowych pokrywach zwietrzelinowych posiadają dużą zdolność produkcji drobnej zwietrzliny, która gromadzi się tutaj w większych ilościach w okresach międzywezbraniowych. Dużą rolę w rozdrobnieniu i rozluźnieniu częściowo spoistego materiału odgrywa wietrzenie mechaniczne

Tabela VIII. Porównanie koncentracji zawiesiny (w g/m<sup>3</sup>) podczas wezbrań w korycie Kamienicy Nawojowskiej i na drodze gruntowej k. Łabowej

Daty pomiarów	Koncentracja zawiesiny	
	w korycie Kamienicy Nawojowskiej k. Łabowej	na drodze gruntowej k. Łabowej
20 III 1971	210	723
4 VII 1971	265	570
24 VIII 1971	310	1236

w okresie zimy oraz wysychanie wierzchniej warstwy gruntu w okresach suszy. Przejazd wozów i maszyn rolniczych, szczególnie częsty w okresie nasilenia robót polowych u schyłku lata i w jesieni, przyspiesza wytwarzanie luźnej drobnej zwietrzliny na drogach przez rozkruszanie ich nawierzchni. Wywóz płodów rolnych z wyższych części zlewni, o dużych spadkach, konnym zaprzęgiem przy zastosowaniu łańcucha do hamowania kół potęguje ten proces, zwłaszcza w okresie suszy (K. Figuła 1964). W okresie zimowych odwilży i wiosennych roztopów odsłonięte strome



ściany wcięć drogowych osypują się pod wpływem wysychania i dobowych wahań temperatury. U podnóża ich gromadzi się często hałda luźnego drobnego materiału, który zostaje wprawiony w ruch przez wody roztopowe. Wiosenne i letnie nawałne opady powodują na powierzchni dróg gruntowych silną erozję wywołaną bombardowaniem kroplami deszczu (splash) oraz spływy miniaturowych potoków błotnych na stromych ścianach wcięć. Uruchamia to nieraz duże ilości materiału.

Aluwia korytowe i terasowe zbudowane są w około 10% z drobnej frakcji poniżej 1 mm, która zalega w korycie pod warstwą bruku. Zostaje ona wprawiona w zawieszenie z chwilą uruchomienia materiału dennego. W odcinkach koryta o małej szybkości wody i w miejscach zaprądowych przy niskich stanach wody akumulowane są nieraz duże ilości drobnego materiału. Podczas wzrostu przepływu zostaje on szybko wprawiony w ruch i obok materiału pochodzącego z powierzchni dróg przyczynia się do wyprzedzenia kulminacji przepływu przez maksimum zmacenia.

Źródłem dostawy drobnej zwierzeliny są również osiadające wskutek erozji bocznej i nadmiernego uwilgocenia skiby materiału budującego ściany koryta. Z gromadzącego się u ich podnóża usypiska przy wyższych stanach wody wymywane są drobne frakcje, które budują stropowe części niskich teras oraz pokrywy stokowe. Z czasem pozostaje silnie przemyty bruk z grubych otoczków, które przemieszczane są dopiero podczas wielkich wezbrań (fot. 10).

Stosowane porównania rozmiarów erozji mechanicznej, wyliczonej z bezpośrednich pomiarów spłukiwania na stokach z wynoszonym przez rzeki ładunkiem zawiesiny, mogą prowadzić do poważnych błędów. Wynikają one z różnic w pochodzeniu przemieszczanego na stokach i transportowanego w korycie materiału oraz z różnej dokładności stosowanych metod. Pomiary spłukiwania informują o rozmiarach przemieszczeń materiału na stokach, który transportowany jest na krótką odległość. Wynoszony przez rzeki ładunek zawiesiny jest masą materiału odprowadzaną poza badany przekrój koryta. Przy zróżnicowanej rzeźbie i użytkowaniu ziemi w Karpatach są to pomiary dwu różnych procesów. Toteż obliczenia denudacji mechanicznej oparte o wynoszony przez rzeki ładunek zawiesiny, przy zastosowaniu tzw. jednostkowej denudacji, wyrażanej w jednostkach masy lub objętości materiału odprowadzanego z 1 km<sup>2</sup> powierzchni, są mało precyzyjne i mogą prowadzić do błędnych wniosków. Transportowany w zawieszynie materiał nie jest bowiem równomiernie wynoszony z całej powierzchni zlewni.

Ryc. 45. Czas trwania poszczególnych wielkości przepływu ładunku zawiesiny ( $L_S$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (Nowy Sącz)

Fig. 45. Duration of particular values of the discharge of suspended load ( $L_S$ ) in the Kamienica Nawojowska (Nowy Sącz)

## TRANSPORT POPRZEZ WLECZENIE PO DNIE

Mechanizm transportu rumowiska dennego, zbudowanego w rzekach górskich z frakcji piaszczysto-żwirowo-głazowych, jest słabo poznany (K. Klimek 1972). Transport otoczków odbywa się wyłącznie podczas wielkich wezbrań (R. K. Fahnestock 1963; R. Frecaut 1968; M. G. Wolman i J. P. Miller 1960) z chwilą przekroczenia granicznej szybkości wprawiającej w ruch frakcje żwirowo-głazowe budujące bruki erozyjne w korycie.

W rzekach karpackich podczas mniejszych wezbrań transportowany jest częściowo w fazie wleczenia materiał piaszczysto-pylasty, który w przewodzie wypełnia zbiorniki przeciwrumowiskowe (W. Froehlich i K. Klimek 1974; A. Golczewski 1970).

## SKŁAD GRANULOMETRYCZNY ALUWIÓW

Aluwia Kamienicy Nawojowskiej zbudowane są z frakcji piaszczysto-żwirowo-głazowych (ryc. 46). Brak selekcji materiału wskazuje, że jego sedimentacja odbywała się gwałtownie w warunkach dużej gęstości ośrodka, przy ruchliwości całego dna. Ruch taki zachodzi wyłącznie podczas wielkich wezbrań i jest formą przejściową między toczeniem, ślizganiem i saltacją (K. M. Scott i G. C. Gravelle 1968).

Skład granulometryczny aluwiów Kamienicy Nawojowskiej i jej dopływów charakteryzuje się przewagą materiału żwirowego o średniej frakcji 55 mm (fot. 10, 11). Maksymalna frakcja głazowego materiału dennego przekracza miejscami 600 mm. Są to przeważnie nieobtoczone odłamki ławic piaskowcowych obalonych w skalnych odcinkach koryta. Pojedyncze otoczki o frakcji powyżej 400 mm występują na początku odcinków akumulacyjnych. Ich udział w aluwiach z biegiem rzeki szybko ulega zmniejszeniu. Znaczną ilość grubego materiału w środkowym biegu (szczególnie u ujścia potoku Kotowskiego) należy wiązać z dużym spadkiem dopływów i ich wielką mętnością podczas wezbrań, zwiększającą kompetencję rzeki (ryc. 46; fot. 12). W dolnym biegu następuje powolne zmniejszanie się maksymalnej frakcji, które następnie gwałtownie wzrasta na kilka kilometrów przed ujściem w odcinku uregulowanego koryta.

W poszczególnych częściach koryta i w ujściowych odcinkach dopływów wartość mediany składu granulometrycznego przypada na frakcje od 18 do 120 mm. Różnice te wynikają ze zmian odporności skał budujących koryto, jak również z długości przebytej drogi przez rumowisko.

Frakcje piaszczyste stanowią maksymalnie do 20% masy aluwiów korytowych i występują zasadniczo pod warstwą bruku. Udział ich wzrasta do 35% w aluwiach budujących równinę zalewową, a w stropowych częściach niskich teras nadbudowanych facją powodziową dochodzi do 90%.

Otoczki piaskowcowe osiągają w Kamienicy Nawojowskiej dojrzałe kształty na 9–12 kilometrze biegu rzeki. Mediany współczynników zaokrąglenia (obtoczenie określone metodą A. Cailleux) oscylują około wartości 300–350. Proces





Fot. 9. Koryto Kamienicy Nawojowskiej k. Nowej Wsi wycięte w gliniasto gruzowych pokrywach stokowych. U podnóża ściany koryta widoczne residuum gruzowe z wypłukaną drobną frakcją

Phot. 9. Bed of the Kamienica Nawojowska near Nowa Wieś cut across clayay-debris slope-covers. At the foot of the bed's side visible a debris residue with a fine fraction washed out



Fot. 10. Skład granulometryczny aluwiów budujących terasę zalewową Kamienicy Nawojowskiej k. Frycowej

Phot. 10. Grain-size composition of alluvia building the inundation terrace of the Kamienica Nawojowska near Frycowa



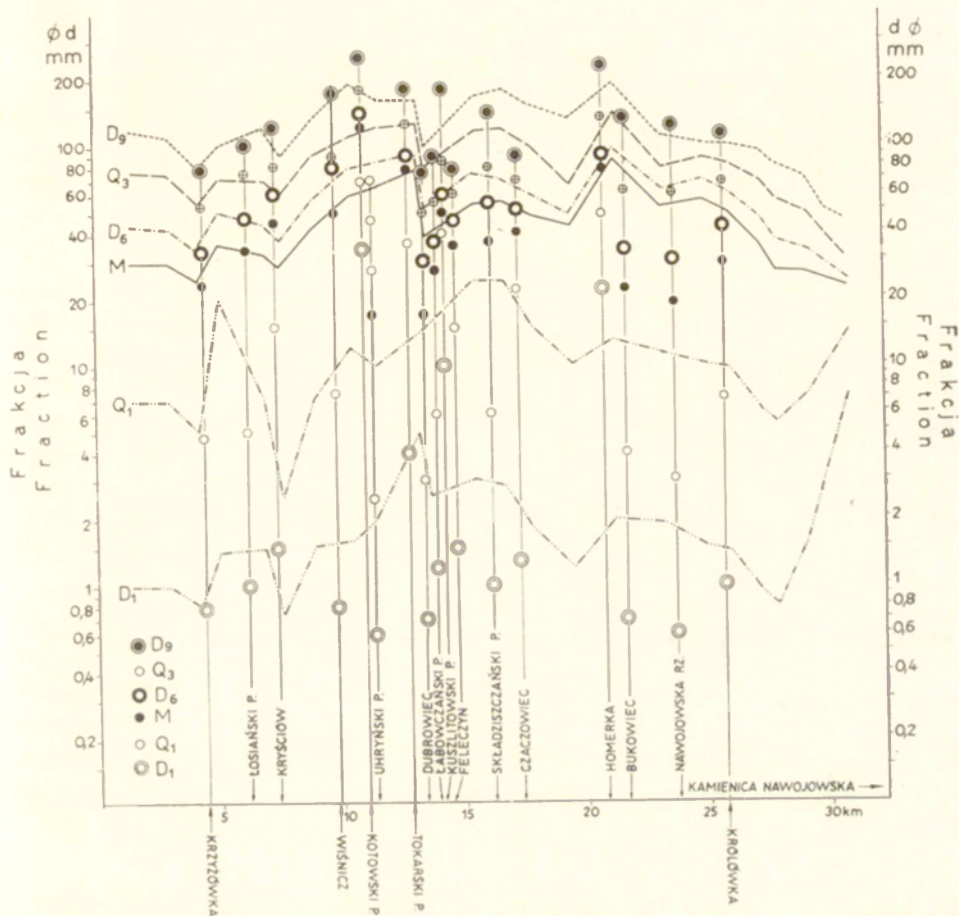
Fot. 11. Żwirowo-głazowe aluvia osadzone podczas powodzi w lipcu 1970 r. w odcinku akumulacyjnym k. Maciejowej

Fig. 11. Gravelly-boulder alluvia deposited during the flood of July 1970 in an accumulation reach near Maciejowa



Fot. 12. Żwirowo-głazowe aluvia u ujścia potoku Kotowskiego do Kamienicy Nawojowskiej

Fig. 12. Gravelly-boulder alluvia at the mouth of the Kotowski stream into the Kamienica Nawojowska

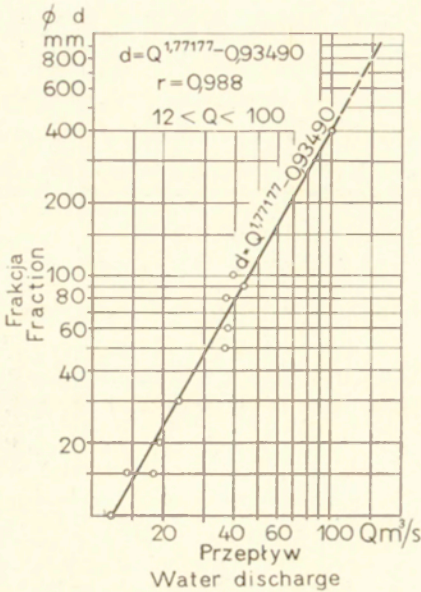


Ryc. 46. Skład granulometryczny aluwów korytowych Kamiénicy Nawojowskiej i aluwów ujściowych odcinków dopływów:  $D_1$  – decyl pierwszy;  $Q_1$  – kwartyl pierwszy;  $M$  – mediana;  $D_6$  – decyl szósty;  $Q_3$  – kwartyl trzeci;  $D_9$  – decyl dziewiąty

Fig. 46. Grain-size composition of bed alluvia in the Kamiénica Nawojowska and of alluvia at mouth reaches of its tributaries:  $D_1$  – first decile;  $Q_1$  – first quartile;  $M$  – median;  $D_6$  – sixth decile;  $Q_3$  – third quartile;  $D_9$  – ninth decile

szybkiego dojrzewania otoczków fliszowych, tak charakterystyczny dla rzek karpackich (por. W. Bobrowski 1962; J. Kossakowska-Such 1961; R. Unrug 1957), jest w Kamiénicy Nawojowskiej pozornie zakłócony ciągłą dostawą świeżego rumowiska z gęstej sieci dopływów oraz z niszczenia skalnego koryta. Potwierdza to również stosunkowo mało zróżnicowany skład granulometryczny w poszczególnych odcinkach.

Współcześnie dostawa materiału do transportu dennego ogranicza się wyłącznie do stref dna doliny i jej dopływów. W odcinkach skalnego koryta materiał pochodzi



Ryc. 47. Związek między szczytowym przepływem wzebrań ( $Q$ ) a transportem maksymalnej frakcji znaczonych otoczków ( $d$ ) w Kamienicy Nawojowskiej (profil pomiarów akumulacji aluwów k. Nowego Sącza)

Fig. 47. Relation between the peak discharge of raised water-stage ( $Q$ ) and the transport of maximum fraction of painted pebbles ( $d$ ) in the Kamienica Nawojowska. Measurement site of alluvial accumulation near Nowy Sącz

zasadniczo z erozji wgłębnej, a w akumulacjach z rozmywania aluwów terasowych. Bezpośrednia dostawa ze stoków ogranicza się do nielicznych i małych osuwisk wkraczających do koryta. Uważam zatem, że przeliczanie rozmiarów transportu dennego w stosunku do powierzchni zlewni (denudacja jednostkowa w  $t/km^2$ ,  $m^3/km^2$ ) jest mało precyzyjne i nie powinno być uwzględniane przy porównaniach denudacji w różnych dorzeczach.

#### ZWIĄZEK TRANSPORTU Z PRZEPLYWEM WZEBRAŃ

Średnica transportowanego materiału wzrasta co najmniej jak 2,6 potęgi prędkości wody (F. Hjulström 1935; C. Nevin 1946). W wodach bardzo mętnych nawet przy małych szybkościach mogą być transportowane wielkie głązy (J. Tricart i H. Vogt 1967). Potoki błotne (mud flows) osiągają lepkość do  $2 \cdot 10^3$  poises (R. P. Sharp i L. H. Noble 1953) i wówczas nawet wielkie głązy mogą być transportowane częściowo w zawieszeniu (K. M. Scott i G. C. Gravlee 1968). Również wzrost lepkości wody związany z obniżeniem jej temperatury powoduje znaczne zwiększenie transportowanego ładunku dennego. W Zakładzie Badawczym Budownictwa Wodnego i Budowy Statków w Berlinie stwierdzono, że przy zmianach temperatury od 2 do  $25^\circ C$  różnice w wielkości transportowanego ładunku wlezonego mogą dochodzić do 100% (A. Born 1958).

Transportowany ładunek materiału wlezonego podlega pulsacji niezależnej od przepływu (A. Born 1958; D. W. Hubbell 1964) i przenoszony jest na krótką odległość (L. Kaszowski 1973; L. Kaszowski i M. Niemirowski 1972; K. Klimek

1972; B. E. Mapes 1969; K. M. Scott i G. C. Gravlee 1968; J. H. Stewart i V. C. La-Marche 1967).

Ruch materiału dennego zależy od szybkości panującej przy dnie. Brak możliwości wykonania jej pomiarów spowodował konieczność rozpatrywania transportu poszczególnych frakcji znaczonego rumowiska w odniesieniu do kulminacji przepływu wezbrań. Pozwala to na porównanie otrzymanych wyników transportu materiału wlezonego z obliczonymi dla Kamienicy Nawojowskiej związkami między przepływem wody a transportem materiału rozpuszczonego i zawiesiny.

Wrzucane do koryta znaczone otoczaki nie zajmują stabilnego położenia (imbrykacji). Są przemieszczane przy mniejszych prędkościach niż ta sama frakcja naturalnie zaklinowana w korycie (uwaga ta nie dotyczy rumowiska malowanego bezpośrednio na powierzchni łach). Wyniki tej metody mają duże znaczenie dla poznania warunków transportu materiału wlezonego w odcinkach, gdzie naturalne opancerzenie dna zostało zniszczone przez eksploatację aluwiów. Stosowanie tej metody było ograniczone do okresów średnich i wielkich wezbrań. Podczas powodzi w lipcu 1970 r. wielkie przekształcenia koryta i związane z tym przemieszczenia dużych ilości aluwiów uniemożliwiły odnalezienie znaczonych otoczków. Stosunkowo mała ilość pomiarów wynikała również ze zniszczenia części stanowisk pomiarowych przez miejscową ludność. Kompletne wyniki uzyskano w odcinku pomiarów objętości składanego materiału wlezonego koło Nowego Sącza.

Związek między transportem maksymalnych frakcji a kulminacjami przepływu wezbrań charakteryzuje się wysokim współczynnikiem korelacji ( $r = 0,988$ ). Przybliża go regresja krzywoliniowa (ryc. 47) o postaci:

$$d = Q^{1,771} - 0,93490,$$

gdzie:  $d$  — maksymalna frakcja transportowanego materiału wlezonego (w mm).

Selektywny transport pojedynczych żwirów o średnicy 15–20 mm miał miejsce przy przepływach około 15 m<sup>3</sup>/s. Frakcja ta występuje w korycie zasadniczo pod warstwą bruku z otoczków i jest transportowana po jego uruchomieniu. Podczas wezbrań o kulminacjach przepływu około 40 m<sup>3</sup>/s, w niektórych krótkich odcinkach koryta następował przepływ pełnokorytowy i miał miejsce transport pojedynczych żwirów o średnicy do 80 mm (ryc. 47). Generalny transport materiału dennego zachodził przy przepływach ponad 70 m<sup>3</sup>/s (uruchamiana była frakcja do 200 mm). Przepływy tej wielkości w dziesięcioleciu 1961–1970 stanowiły 1% czasu roku (ryc. 12); pojawiają się one średnio co 2,5 roku (40% prawdopodobieństwa). Podczas powodzi w lipcu 1970 r. transportowana była w odcinkach skalnego koryta frakcja głazowa o średnicy powyżej 600 mm. Maksymalna obserwowana odległość transportu znaczonych otoczków, najczęściej spotykanej w korycie frakcji 40–60 mm, wynosiła 75 m (podczas kulminacji przepływu 99,6 m<sup>3</sup>/s). Zaobserwowałem, że gwałtowny skokowy wzrost przepływu wezbrania powoduje znacznie większy transport materiału wlezonego niż wolno wzrastający większy przepływ.

Z pomiarów wynika, że transport materiału wleczonego odbywa się na niewielką odległość. Na całej długości rzeki uruchomiony ładunek materiału dennego jest często bardzo duży. Jednak ilość wyniesionego materiału wleczonego poza określony przekrój jest niewielka.

Zastosowane do pomiarów transportu dennego skrzynie-łapacze zakopane w korycie i na powierzchni łach były wypełniane w całości nawet podczas małych wezbrań. Wynika to ze stałej tendencji wyrównywania dna koryta przez rzekę. Otrzymane wyniki obarczone są jednak poważnymi błędami i postanowiono je odrzucić. Składany w łapaczach przeważnie drobny materiał przypomina warunki akumulacji za zaporami przeciwrumowiskowymi, gdzie ulegają sedymentacji frakcje piaszczysto-pylaste (W. Froehlich i K. Klimek 1974; A. Golczewski 1970).

W poszczególnych odcinkach koryta transport materiału wleczonego wykazuje różnice jakościowe i ilościowe. Największe przemieszczenia zachodzą w strefach objętych intensywną eksploatacją aluwii. Podobnie w odcinkach akumulacyjnych o cechach roztoek podczas wezbrań zmiany w kierunku osi nurtu powodują rozmywanie utrwalonych bruków i boczną migrację koryta.

Na podstawie małych i nielicznych form akumulacyjnych w odcinkach skalnego koryta można przypuszczać, że transport denny jest tam nieznaczny z uwagi na brak materiału.

#### TENDENCJE ZMIAN KORYTA I RÓWNINY ZALEWOWEJ JAKO REZULTAT WSPÓŁCZESNEJ DYNAMIKI TRANSPORTU FLUWIALNEGO

Transport materiału dennego jest główną przyczyną zmian geometrii koryta. Typowym procesem kształtującym współcześnie koryta rzek beskidzkich jest erozja wgłębna, szczególnie intensywna i widoczna w odcinkach skalnych (W. Froehlich, K. Klimek i L. Starkel 1972; M. Niemirowski 1970; L. Starkel 1960).

O tempie pogłębienia odcinków skalnego koryta świadczy obniżanie się minimalnych rocznych stanów wody w profilach wodowskazowych Kamienicy Nawojowskiej (ryc. 6). W ostatnim dziesięcioleciu (1961–1970) średnie tempo erozji wgłębnej dla obydwu przekrojów można wyliczyć z następujących równań regresji:

$$\text{profil Łabowa} \quad H = 7520,1376 - 3,7684 t,$$

$$\text{profil Nowy Sącz} \quad H = 6195,6222 - 3,0817 t,$$

gdzie:  $H$  — roczne minimum stanu wody (w cm);  $t$  — rok obliczeń.

Pogłębienie odcinków skalnego koryta w ciągu dziesięciolecia 1961–1970 wynosiło 10–30 cm, a w okresie badań 5–10 cm (przeciętnie 10 m<sup>3</sup> materiału z 15–20 m koryta). Proces pogłębienia koryta Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu (zawieszona budowle regulacyjne nad dnem koryta) ma związek z ogólnym obniżaniem dna koryta Dunajca w Kotlinie Sądeckiej, które spowodowane jest eksploatacją aluwii korytowych u jego ujścia do J. Rożnowskiego (Marcinkowice). Również regulacja ujściowego odcinka Kamienicy Nawojowskiej w Nowym Sączu (wy-

prostowanie koryta), zakończona w ubiegłym dziesięcioleciu, przyczyniła się do przyspieszenia tempa pogłębiania.

Poniżej profilu wodowskazowego w Łabowej występują odcinki akumulacji, w których od 1960 r. prowadzona jest intensywna eksploatacja aluwiów dla potrzeb budowy nowych dróg. Jest ona przyczyną „niedoboru” materiału dennego w korycie, na którego transport rzeka zużywa normalnie znaczną część energii podczas wezbrań. Brak materiału do transportu powoduje nadwyżki energii, które zostają zużyte na erozję wgłębną. Pogłębianie koryta przesuwa się w górę rzeki, o czym świadczą zawieszony nad dnem koryta filary mostu drogowego w Nowej Wsi (fot. 2).

Współczesna ograniczona dostawa materiału dennego i powolny jego transport w dół rzeki nie są w stanie uzupełnić ubytków spowodowanych przez eksploatację. Podczas powodzi w latach 1970, 1972 i 1973 wydatnie wzrosło tempo erozji. Świadczy to o niewielkich rozmiarach transportu dennego w dół rzeki i wzrastającym niedoborze grubego materiału. Oszacowanie rozmiarów eksploatacji jest niezwykle trudne z uwagi na liczne miejsca jego pozyskiwania przez przedsiębiorstwa państwowe i osoby prywatne.

Odcinki eksploatacji aluwiów tworzą nowe antropologiczne lokalne bazy erozyjne, położone niezgodnie w stosunku do naturalnych podstaw, którymi są ujścia rzeczne, dna kotlin oraz miejsca uwarunkowane strukturą. Współczesne pogłębianie przesuwa się w górę rzeki i nakłada na holoceniową tendencję do pogłębiania, powodując jej przyspieszenie.

W odcinkach akumulacyjnych przeważają szerokie, płytkie i rozgałęzione koryta, mające miejscami charakter roztok. Transport denny w tych odcinkach polega na „przerabianiu” aluwiów pochodzących z bocznej migracji koryta oraz ze wstecznego rozcinania wolno wędrujących w dół łach centralnych. Brak w tych odcinkach śladów erozji wgłębnej i nadbudowy teras świadczy, że ilość dostarczanego z góry rumowiska odpowiada ilości odprowadzanego w dół. Można sądzić, że są one obecnie w stanie dynamicznej równowagi. Charakterystyczną ich cechą jest zmiana zarysu koryta w planie (błądzące podczas małych i średnich wezbrań, proste podczas katastrofalnych powodzi) przy równowadze profilu podłużnego. Prawdopodobnie są to formy przetrwałe z okresów o większej dostawie materiału (por. K. Klimek i K. Trafas 1972). Rzeka o współczesnym reżimie hydrologicznym z małą częstotliwością katastrofalnych wezbrań nie jest w stanie uprzętnąć występujących tu nadwyżek materiału.

Formowanie równiny zalewowej w akumulacyjnych rozszerzeniach doliny zachodzi przede wszystkim w czasie powodzi. Polega ono na osadzaniu zwirowo-głazowych łach w osi lub przy brzegach koryta. Po opanowaniu przez roślinność są one nadbudowywane piaskami i mułkami. Wzrost wysokości niskich teras w odcinkach eksploatacji i bezpośrednio powyżej nich zachodzi wyłącznie pod wpływem pogłębiania koryta. Procesy naturalne zachodzą już w nielicznych miejscach i polegają na powolnym pogłębianiu i nadbudowie teras facją powodziową, która stanowi 1/3 wysokości niskich teras w tych odcinkach.

Transport denny zachodzi ze zmiennym natężeniem wzdłuż całego biegu rzeki. Większe rozmiary osiąga jedynie podczas katastrofalnych wzebrań powtarzających się co kilka lat. Obciążenie rzeki jest małe w stosunku do jej pojemności i świadczy o ujemnym bilansie w dostawie grubego materiału. Toteż pomimo występowania odcinków akumulacji panuje generalna tendencja do pogłębiania dna. Zatem współczesny układ kierunku zmian koryta wiąże się zasadniczo z okresem intensywnej gospodarki człowieka w zlewni (wylesienie, eksploatacja aluwii) i w małym stopniu nawiązuje do naturalnego układu klimatycznego.



## II. ROCZNY CYKL WYNOSENIA MATERIAŁU ZE ZLEWNI

W rocznym cyklu wynoszenia materiału ze zlewni wyróżnić można krótkie epizody wezbrań i rozdzielające je długie okresy międzywezbraniowe. Rzeki o nierównomiernie rozłożonym w ciągu roku odpływie wynoszą w czasie wezbrań przeważającą część rocznego ładunku materiału. Według M. G. Wolmana i J. P. Millera (1960), większość pracy w procesach geomorfologicznych wykonywana jest przez siły średniej wielkości, występujące częściej niż katastrofalne o nadzwyczajnej wielkości.

### UDZIAŁ WEZBRAŃ W WYNOSENIU MATERIAŁU

Koncentracja odpływu w czasie wiosennych wezbrań roztopowych i letnich wezbrań deszczowych ma duże znaczenie dla natężenia i ilości wynoszonego ze zlewni materiału. W strefie klimatu umiarkowanego, w czasie krótkich wezbrań powodziowych, występujących co kilka lub kilkanaście lat, rzeki wykonują znacznie większą pracę niż w ciągu kilku lat przy niskich stanach wody (L. Kaszowski i A. Kotarba 1970; M. Klimaszewski 1935b; T. Ziętara 1968). Wyniesiony podczas katastrofalnych powodzi ładunek zawiesiny przekracza wielokrotnie transport w ciągu kilku lub kilkunastu „normalnych” lat (J. Cyberski 1969; W. Froehlich 1972; Z. Kajetanowicz 1938; H. Ziemska 1928). Podczas letnich wezbrań deszczowych rzeki karpackie transportują przeważającą część rocznego ładunku zawiesiny (J. Brański 1968a; J. Cyberski 1969; W. Jarocki 1957). W niektórych latach wielkie wezbrania roztopowe wynoszą ponad 50% rocznego ładunku zawiesiny.

W okresie badań w mokrym 1970 r. wezbrania stanowiły 29, 30% czasu roku, a w suchym 1971 r. 14,78%. Wyniosły one ze zlewni w 1970 r. 96,50%, a w 1971 r. 63,54% całkowitego ładunku rocznego ( $L_D + L_S + L_B$ ). Ich udział w odprowadzaniu rocznego ładunku materiału rozpuszczonego wynosił od 67,01 (1970) do 36,20% (1971), od 99,72 (1970) do 94,36% (1971) rocznego ładunku zawiesiny i około 100% rocznego ładunku materiału wlezonego. Największą część całkowitego rocznego ładunku materiału wyniosła w 1970 r. katastrofalna powódź deszczowa (84,82%), a w 1971 r. gwałtowne wezbranie roztopowe (35,48%).

### TYPOLOGIA WEZBRAŃ W ŚWIETLE TRANSPORTU

Dotychczasowa typologia wezbrań oparta na parametrach hydroklimatycznych (Z. Mikulski 1965) jest często niewystarczająca dla wyjaśnienia mechanizmu i na-

Tabela IX. Udział różnej wielkości wezbrań w wynoszeniu materiału ze zlewni Kamienicy Nawojowskiej

Wezbrania	Rok hydrologiczny	Ilość wezbrań	% czasu roku	Ładunek (w tonach)			% rocznego ładunku			$L_S:L_D:L_B$
				materiału rozpuszczonego ( $L_D$ )	zawiesiny ( $L_S$ )	materiału wleczonego ( $L_B$ )	materiału rozpuszczonego ( $L_D$ )	zawiesiny ( $L_S$ )	materiału wleczonego ( $L_B$ )	
małe $Q < 25 \text{ m}^3/\text{s}$	1970	13	19,17	8730	4643	—	26,75	1,63	—	0,53:1:0
	1971	10	8,03	2435	1260	—	14,64	8,89	—	0,52:1:0
średnie $25 < Q < 70 \text{ m}^3/\text{s}$	1970	1	4,93	3290	905	124	10,08	0,32	1,00	0,27:1:0,04
	1971	2	5,75	3583	12109	496	21,55	85,47	100,00	3,38:1:0,14
wielkie $70 < Q < 200 \text{ m}^3/\text{s}$	1970	2	3,56	3348	16519	1090	10,26	5,78	8,80	4,93:1:0,32
	1971	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ekstremalne $Q > 200 \text{ m}^3/\text{s}$	1970	1	1,64	6501	262093	11176	19,92	91,99	90,20	40,44:1:1,72
	1971	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ogółem	1970	17	29,30	21869	284960	12390	67,01	99,72	100,00	13,03:1:0,57
	1971	12	14,78	6018	13369	496	36,19	94,36	100,00	2,22:1:0,08

tężenia współczesnych procesów fluwialnych. Nie znajduje również w pełni odbicia w morfogenetycznych porach roku.

Opierając się na stanie napełnienia koryta, rozmiarach transportu materiału wlezonego oraz natężeniu i kierunku przekształceń koryta wyróżniłem cztery podstawowe typy wezbrań w zależności od ich wielkości (tab. IX).

1. Wezbrania małe, o kulminacjach przepływu do  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $104,6 \text{ l/s z km}^2$ ), podczas których rzeka na całej długości mieściła się w korycie i nie zachodził transport materiału wlezonego. Każdego roku występuje kilka lub kilkanaście wezbrań tego typu. W okresie badań stanowiły one odpowiednio: w 1970 r. 19,17% (13 wezbrań), w 1971 r. 9,03% (10 wezbrań); i wyniosły od 14,64 (1971) do 26,75% (1970) rocznego ładunku materiału rozpuszczonego oraz od 1,63 (1970) do 8,89% (1971) rocznego ładunku zawiesiny. Stosunek wyniesionego ładunku materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego ( $L_S:L_D:L_B$ ) był w obydwu latach podobny i wynosił 0,53:1:0 w 1970 r. i 0,52:1:0 w 1971 r. W poszczególnych wezbraniach wynoszony ładunek materiału rozpuszczonego był prawie dwukrotnie większy od ładunku zawiesiny, z wyjątkiem wezbrania roztopowego (31 XII 1970 — 2 I 1971) i dwóch wezbrań (ryc. 21, 22; tab. X) po okresie suszy 5—10 X 1970 i 24—26 VIII 1971).

2. Wezbrania średnie, o kulminacjach przepływu  $25 < Q \leq 70 \text{ m}^3/\text{s}$  (do  $292,9 \text{ l/s z km}^2$ ), podczas których zostały zalane niższe części łąch centralnych i przybrzeżnych. Wleczony materiał żwirowy o średnicy do 60 mm, pochodzący z aktywnych podcięć brzegowych, przemieszczany był na odległość do 35 m, a przesunięcia czoła łąch centralnych dochodziły do 6 m. Cofnięcia podcięć niskich teras dochodziły do 1,6 m (Łabowa), a erozja wgłębna w odcinkach skalnego koryta wystąpiła wyłącznie na łupkach, osiągając maksymalnie 4 cm (Nowa Wieś). Wezbrania tej wielkości występują średnio co 1—2 lat (ryc. 18). W okresie badań stanowiły one odpowiednio: w 1970 r. 4,93% (1 wezbranie) i w 1971 r. 5,75% (2 wezbrania) czasu roku i wyniosły od 10,08 (1970) do 21,55% (1971) rocznego ładunku materiału rozpuszczonego, od 0,32 (1970) do 85,47% (1971) rocznego ładunku zawiesiny i od 1,00 (1970) do 100% (1971) rocznego ładunku materiału wlezonego. Stosunek wyniesionych ładunków materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego wynosił w 1970 r. 0,27: 1:0,14. Gwałtowne wezbranie roztopowe (17—26 III 1971; ryc. 16) i deszczowe (3—8 VII 1971; ryc. 20) wyniosły ładunek zawiesiny ponad 3-krotnie większy od ładunku materiału rozpuszczonego, w przeciwieństwie do wolno wzrastającego długotrwałego wezbrania roztopowego (19 III—5 IV 1970) o podobnym przepływie, które wyniosło ładunek materiału rozpuszczonego ponad 3-krotnie większy od ładunku zawiesiny (tab. X).

3. Wezbrania wielkie, o kulminacjach przepływu  $70 < Q \leq 200 \text{ m}^3/\text{s}$  (do  $836,8 \text{ l/s z km}^2$ ). Przy przepływach około  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  rozpoczyna się przepływ pełnokorytowy na poszczególnych odcinkach, natomiast przy około  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  na całej długości rzeki. Przy gwałtownym wzroście przepływu, wezbranie 4—9 VI 1970 przemieściło znaczne ilości materiału wlezonego i wyniosło poza przekrój pomiaro-

Tabela X. Typologia wezbrań w świetle transportu

Typy wezbrań	Data wystąpienia wezbrania	% czasu roku	Kulminacja przepływu (w m <sup>3</sup> /s)	Ładunek (w tonach)			% rocznego ładunku			L <sub>S</sub> :L <sub>D</sub> :L <sub>B</sub>		
				materiału rozpuszczonego (L <sub>D</sub> )	zawiesiny (L <sub>S</sub> )	materiału wleczonego (L <sub>B</sub> )	materiału rozpuszczonego (L <sub>D</sub> )	zawiesiny (L <sub>S</sub> )	materiału wleczonego (L <sub>B</sub> )			
Roztopowe adwekcyjne i adwekcyjno-opadowe	6-8 I 1970	11,23	0,82	5,0	161	38	—	0,49	0,01	—	0,24:1:0	
	14-20 I 1970		1,92	13,4	742	211	—	2,27	0,07	—	0,28:1:0	
	19 I-5 IV 1970		4,93	36,6	3290	905	124	10,08	0,32	1,00	0,27:1:0,04	
	9-15 IV 1970		1,92	15,0	817	80	—	2,50	0,03	—	0,10:1:0	
	18-23 IV 1970		1,64	12,7	556	116	—	1,70	0,04	—	0,21:1:0	
	31 XII 1970- -2 I 1971	3,83	0,82	12,8	260	297	—	1,56	2,09	—	1,15:1:0	
	22-29 I 1971		2,19	7,0	611	198	—	3,67	1,40	—	0,32:1:0	
	2-4 II 1971		0,82	8,7	210	72	—	1,26	0,51	—	0,34:1:0	
	insolacyjno-adwekcyjne	17-31 III 1971	4,11	4,11	38,7	2393	8511	198	14,39	60,07	40,00	3,56:1:0,08
	Wiosenne i letnie wezbrania deszczowe	29 IV-4 V 1970	12,60	1,64	17,2	724	458	—	2,22	0,16	—	0,63:1:0
23-30 V 1970		2,19		7,8	592	65	—	1,75	0,03	—	0,11:1:0	
1-2 VI 1970		0,55		6,1	162	19	—	0,50	0,01	—	0,12:1:0	
4-9 VI 1970		1,64		70,2	1160	3714	310	3,55	1,30	2,50	3,20:1:0,27	
12-14 VI 1970		0,82		17,3	352	48	—	1,08	0,02	—	0,14:1:0	
30 VI- 8 VII 1970		2,47		19,7	1700	468	—	5,20	0,16	—	0,27:1:0	
25-31 VII 1970		1,92		99,6	2188	12805	780	6,70	4,48	6,30	5,85:1:0,36	
9-13 VIII 1970		1,37		8,6	378	49	—	1,16	0,01	—	0,13:1:0	

Typy wezbrań	Data wystąpienia wezbrania	% czasu roku		Kulminacja przepływu (w m <sup>3</sup> /s)	Ładunek (w tonach)			% rocznego ładunku			$L_S:L_D:L_B$
					materiału rozpuszczonego ( $L_D$ )	zawiesiny ( $L_S$ )	materiału wleczonego ( $L_B$ )	materiału rozpuszczonego ( $L_D$ )	zawiesiny ( $L_S$ )	materiału wleczonego ( $L_B$ )	
Wiosenne i letnie wezbrania deszczowe	5–7 V 1971	3,36	0,82	5,1	219	16	–	1,32	0,11	–	0,07:1:0
	24–25 V 1971		0,55	8,7	186	108	–	1,12	0,76	–	0,58:1:0
	3–8 VII 1971		1,64	43,1	1190	3598	298	7,16	25,39	60,00	3,02:1:0,25
	19–20 VII 1971		0,55	6,8	119	74	–	0,72	0,52	–	0,62:1:0
Katastrofalne powodzie deszczowe	18–23 VII 1970	1,64	1,64	314,0	6501	262893	11176	19,92	91,99	90,20	40,44:1:1,72
Wezbrania u schyłku lata i w jesieni z deszczy rozlewnych	16–21 VIII 1970	3,01	1,64	23,0	1282	1222	–	3,93	0,43	–	0,95:1:0
	23–27 VIII 1970		1,37	14,4	806	62	–	2,47	0,02	–	0,08:1:0
	17–19 IX 1970	2,46	0,82	9,2	315	87	–	1,89	0,61	–	0,28:1:0
	11–13 XII 1970		0,82	5,1	209	63	–	1,26	0,44	–	0,30:1:0
8–10 IX 1971		0,82	5,7	178	94	–	1,07	0,66	–	0,53:1:0	
Wezbrania u schyłku lata i jesieni z gwałtownych opadów po okresie suszy	6–8 X 1970	0,82	0,82	22,0	478	1807	–	1,46	0,63	–	2,78:1:0
	24–26 VIII 1971	0,82	0,82	8,7	128	251	–	0,77	1,77	–	1,96:1:0
Okresy międzywezbraniowe	1970	70,70	70,70	0,5	10768	809	–	32,99	0,28	–	0,075:1:0
	1971	85,22	85,22	0,5	10611	799	–	63,81	5,64	–	0,075:1:0

wy około 310 t rumowiska dennego. Uruchomiona została frakcja do 200 mm, a maksymalna obserwowana odległość jej przemieszczania wynosiła 12 m. Cofnięcia aktywnych podcięć niskich teras dochodziły do 2,3 m (Łabowa), a erozja wgłębna wystąpiła zarówno na łupkach (maksymalne pogłębienie 8 cm), jak i na progach piaskowcowych (maksymalne pogłębienie 2 cm). Wezbranie to doprowadziło do trwałych zmian układu koryta, polegających na zmniejszeniu krzywizn koryta, powstaniu nowych i nadbudowie starych łach korytowych. Powstałe zmiany w układzie koryta i wzajemnym stosunku ilościowym form akumulacyjnych i erozyjnych pozostały do czasu wystąpienia katastrofalnej powodzi w lipcu 1970 r. Wielkie i gwałtowne wezbranie 25–31 VII 1970 (ryc. 19), które wystąpiło po powodzi, wyniosło 780 t materiału wlezonego. Maksymalna obserwowana odległość transportu znaczonych otoczków frakcji 40–60 mm wynosiła 75 m. Deformacje koryta były jednak niewielkie z uwagi na jego wcześniejsze przystosowanie do warunków hydrodynamicznych ekstremalnych przepływów powodziowych. Wezbrania tej wielkości występują średnio co 2–4 lata (ryc. 18). W okresie badań dwa tej wielkości wezbrania wystąpiły w 1970 r. (3,56% czasu roku); wyniosły one 10,26% rocznego ładunku materiału rozpuszczonego, 5,78% rocznego ładunku zawiesiny i 8,80% rocznego ładunku materiału wlezonego. Stosunek wyniesionego ładunku materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego wynosił 4,93:1:0,32, a w czasie poszczególnych wezbrań 3,20:1:0,27 (4–9 VI 1970) i 5,85:1:0,36 (25–31 VII 1970).

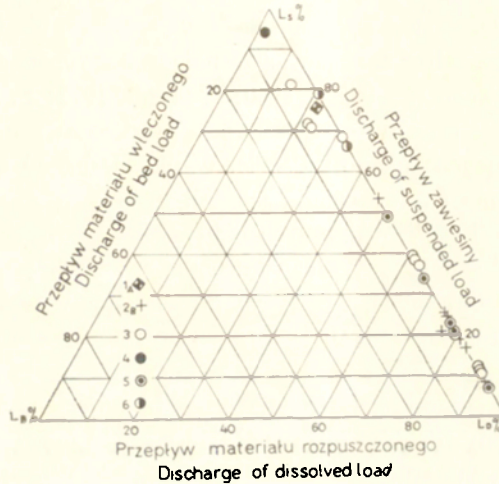
4. Katastrofalne powodzie. Występują one w Beskidach co kilka lub kilkanaście lat i wywołane są przez ulewne opady poprzedzone rozlewnymi deszczami. Maksymalny odpływ jednostkowy waha się od 1000 do 6000 l/s z km<sup>2</sup> (K. Figuła 1960; W. Froehlich 1972; M. Niemirowski 1972; R. Soja 1972; L. Starkel 1972a; A. Welc 1972).

Do tego typu zaliczam wezbrania, które w Kamienicy Nawojowskiej przekraczają przepływ 200 m<sup>3</sup>/s. Następuje wówczas napełnienie łożyska powodziowego i sedymentacja części transportowej zawiesiny na równinie zalewowej.

Katastrofalna powódź w 1970 r. objęła zasadniczo Beskidy Zachodnie. W Kamienicy Nawojowskiej 19 VII 1970 r. (ryc. 18) osiągnęła kulminacyjny przepływ 314 m<sup>3</sup>/s (1313 l/s z km<sup>2</sup>). W odcinkach skalnego koryta wielkie kotły eworsyjne zostały maksymalnie pogłębione o 1,4 m, a znaczna część żeber skalnych obalona. Częściowo rozcięte progi piaskowcowe zostały obniżone miejscami o 15 cm. Nastąpiło generalne wyprzątnięcie materiału. Akumulacyjne odcinki roztokowego koryta zostały wyprostowane i poszerzone miejscami o 30 m. Sedymentacja na równinie zalewowej objęła zasadniczo tereny porośnięte zaroślami łągowymi, gdzie osadzone zostały liczne „cienie” piaszczysto-mułkowe o przeciętnej objętości 0,1–0,9 m<sup>3</sup>. W nielicznych miejscach na zadarnionych powierzchniach równiny zalewowej zdeponowana warstwa piaszczystych mad osiągnęła miąższość do 15 cm. Powódź ta, trwająca około 1,6% czasu roku, wyniosła ze zlewni 19,92% (6501 t) rocznego ładunku materiału rozpuszczonego, 91,92% (262 893 t) rocznego ładunku za-

wiesiny i 90,20% (11176 t) rocznego ładunku materiału wlezonego. Stosunek wyniesionego ładunku materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego wynosił 40,44:1:1,79.

Masa wyniesionej zawiesiny i materiału wlezonego odpowiada ładunkowi transportowanemu podczas dziesięciu „normalnych” lat. Biorąc pod uwagę pracę



Ryc. 48. Udział procentowy wynoszonych ładunków materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ), zawiesiny ( $L_S$ ) i materiału wlezonego ( $L_B$ ) ze zlewni Kamienicy Nawojowskiej podczas wezbrań:  $1_A$  – insolacyjno-adwekcyjnych;  $2_B$  – adwekcyjno-opadowych; 3 – wiosenne i letnie wezbrania deszczowe; 4 – katastrofalne powodzie deszczowe; 5 – wezbrania u schyłku lata i w jesieni z deszczy rozlewnych; 6 – wezbrania u schyłku lata i w jesieni z gwałtownych opadów po okresie suszy.

Fig. 48. Percentage of dissolved material carried away ( $L_D$ ), of suspended material ( $L_S$ ) and of dragged material ( $L_B$ ) in the Kamienica catchment basin during raised water-stages:  $1_A$  – insolation-advective;  $2_B$  – advection-precipitation; 3 – spring and summer raised water-stages; 4 – catastrophic rainfall floods; 5 – raised water-stages at the decline of summer and in autumn, due to long-lasting rains; 6 – raised water-stages at the decline of summer and in autumn, due to rapid rainfalls after a period of draught

rzeki nad ewolucją układu koryta można sądzić, że jedynie katastrofalne powodzie ukierunkowują rozwój kształtu i profilu podłużnego koryta. W czasie takiej powodzi rzeka zmienia swój reżim hydrodynamiczny, a nowo ustalone parametry „wielkiej równowagi” całego układu rzeki będą ulegały ponownej adaptacji do wezbrań mniejszych i częstszych od powodzi.

Biorąc pod uwagę parametry jakościowe: sposób zasilania rzeki, różną rolę ochronną roślinności w ciągu roku, warunki dostawy materiału do koryta i ilościowe cechy transportu, jak: stosunek wyniesionych ładunków materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego ( $L_S:L_D:L_B$ ) oraz udział

w wnoszeniu rocznego ładunku materiału wyróżniono w okresie badań pięć typów wezbrań, a jako szósty typ — okresy niskich stanów wody, czyli okresy międzywezbraniowe (tab. X; ryc. 48).

1. Wezbrania roztopowe. Są one związane z ablacją pokrywy śnieżnej podczas odwilży śródzimowych i wiosennych roztopów. Mała gwałtowność tych wezbrań wynika z powolnego tajania pokrywy śnieżnej w wyższych piętrach gór. Ablacja może przebiegać pod wpływem insolacji, napływu ciepłych mas powietrza (adwekcja), napływu ciepłych mas powietrza połączonego z opadami deszczu, a niekiedy wiatru foehnowego (K. Figuła 1960; J. Słupik 1973; L. Starkel 1960). Najczęściej występuje mieszany typ roztopów przy udziale dwóch czynników równocześnie lub następujących kolejno po sobie. W okresie badań wystąpiły wezbrania insolacyjno-adwekcyjne i adwekcyjno-opadowe.

Procesy mrozowe i częściowo wysychanie (w okresach bezśnieżnych) przygotowują na powierzchni gruntu zapas luźnej drobnej zwierzeliiny, pochodzącej z niszczenia agregatów glebowych w warstwach powierzchniowych. Podczas roztopów przy braku szaty roślinnej materiał ten jest zabierany przez wody roztopowe w dużych ilościach.

Podczas wezbrań roztopowych następuje szybki spadek koncentracji materiału rozpuszczonego. Wody roztopowe o małej koncentracji materiału rozpuszczonego płynąc po zamrożonym gruncie nie mogą się „nasyć” rozpuszczalnymi związkami występującymi głębiej pod powierzchnią. Powoduje to silne rozcieńczenie płynących w korycie wód gruntowych.

A. Wezbrania insolacyjno-adwekcyjne. Do tego typu należy wezbranie roztopowe 17—26 III 1971 (tab. X), które we wstępnej fazie związane było z ablacją pokrywy śnieżnej pod wpływem insolacji, a następnie z napływem ciepłych mas powietrza. Początkowa faza wezbrania charakteryzowała się szybkim wzrostem przepływu (ryc. 16). W całym wezbraniu zaznaczyły się kulminacje popołudniowe, spowodowane nasileniem ablacji śniegu, poprzedzone nocnymi niższymi przepływami, wywołanymi zahamowaniem ablacji. Rytm zmian koncentracji zawiesiny naśladował dobry rytm wahań przepływu wody. Największe zmaczenie wody ( $2659 \text{ g/m}^3$ ) wyprzedziło o 28 godzin kulminację przepływu ( $38,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Kolejne kulminacje koncentracji zawiesiny wyprzedzały odpowiadające im kulminacje przepływu. Duże zmaczenie wody utrzymywało się przez długi okres i wiązało się między innymi z niską temperaturą wody. Następował znaczny wzrost zmacnienia wody od źródeł do ujścia (ryc. 28). Materiał pochodził zasadniczo z niższych części zlewni (do 500 m n.p.m.) i dostarczany był głównie z sieci dróg gruntowych i ścieżek (ryc. 40). Stosunek wyniesionego ładunku materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego wynosił  $3,56:1:0,08$ . Wezbranie to wyniosło  $14,39\%$  rocznego ładunku materiału rozpuszczonego,  $60,07\%$  rocznego ładunku zawiesiny i  $40,00\%$  rocznego ładunku materiału wlezonego. Na podstawie analizy materiałów hydrologicznych PIHM przypuszcza się, że tego typu wezbrania pojawiają się w Kamienicy Nawojowskiej średnio co 3—5 lat.



B. Wezbrania adwekcyjne i adwekcyjno-opadowe. Występują one niemal każdego roku i mają miejsce zarówno podczas odwilży śródzimowych, jak i wiosennych roztopów. Napływ ciepłych mas powietrza (często z udziałem opadów deszczu) powoduje tajanie śniegu równocześnie na wszystkich zboczach, niezależnie od ekspozycji. Daje to przeważnie jedną kulminację wezbrania (ryc. 15). W wyższych częściach zlewni ablacja może zachodzić wolniej w związku z adiabatycznym oziębianiem (K. Figuła 1960). W okresie badań wezbrania tego typu wystąpiły 8 razy i stanowiły w 1970 r. 11,23% (5 wezbrań), a w 1971 r. 3,83% (3 wezbrania) czasu roku. Były to zarówno krótkie wezbrania śródzimowe (0,82% czasu roku), jak również długie wiosenne (4,93% czasu roku). Przebiegające etapami długotrwałe wiosenne wezbranie roztopowe w 1970 r. (adwekcyjno-opadowe) poprzedzone było silnymi wezbraniem odwilżowymi, które wyniosły znaczną część nagromadzonego w ziemie drobnego luźnego materiału zwietrzelinowego. Dlatego maksymalne zmęczenie wody ( $32 \text{ g/m}^3$ ) podczas tego wezbrania było niewielkie w stosunku do jego rozmiarów. Mała mętność wody była cechą charakterystyczną dla większości tego typu wezbrań. Udział poszczególnych wezbrań typu B w wynoszeniu rocznego ładunku był bardzo zróżnicowany. Przykładowo: największe z nich wyniosły od 10,8 (1970) do 3,67% (1971) rocznego ładunku materiału rozpuszczonego, od 0,32 (1970) do 3,67% (1971) rocznego ładunku zawiesiny i około 1% (1970) rocznego ładunku materiału wlezonego. Przenoszony podczas tych wezbrań ładunek materiału rozpuszczonego był przeważnie większy od ładunku zawiesiny.

2. Wiosenne i letnie wezbrania deszczowe. Wywołane są one przez rozlewne opady lub gwałtowne ulewy, charakteryzują się często więcej niż jedną kulminacją przepływu (ryc. 20).

Okres wczesnej wiosny (po roztopach) charakteryzuje się brakiem luźnej drobnej zwietrzliny, której znaczna ilość została usunięta w czasie wezbrań roztopowych, bądź związana jest z powierzchnią gruntu wskutek jego znacznej wilgotności. Nowy „zapas” luźnej zwietrzliny powstaje przez przesuszenie wierzchniej warstwy gruntu, często świeżo zaoranego na wiosnę. Ochronną rolę spełnia rozwijająca się roślinność, która utrudnia splukiwanie. Ogranicza się ono do okresów gwałtownych ulew, podczas których proces splukiwania potęgowany jest przez bombardowanie powierzchni gruntu dużymi kroplami deszczu (splash). W obszarach upraw ziemniaków przy dużym natężeniu opadów następuje niekiedy upłynnienie wierzchniej warstwy gleby (E. Gil i J. Słupik 1972b).

Podczas małych wezbrań maksymalne zmęczenie wahało się od 22 do  $481 \text{ g/m}^3$ ; podczas średnich dochodziło do  $1743 \text{ g/m}^3$ , a podczas wielkich do  $1990 \text{ g/m}^3$ . Niewątpliwie w mniejszych zlewniach dopływów Kamienicy Nawojowskiej osiągało ono wartości znacznie wyższe. Koncentracja materiału rozpuszczonego przy dużym udziale spływu powierzchniowego spadała maksymalnie do  $110 \text{ g/m}^3$ .

Wezbrania tego typu stanowiły w 1970 r. 12,60% (8 wezbrań) czasu roku, a w 1971 r. 3,56% (4 wezbrania). Ich udział w wynoszeniu rocznego ładunku materiału był bardzo zróżnicowany i zależał zarówno od wielkości, jak i gwałtowności

wezbrania. Przykładowo: największe z nich wyniosły od 6,70 (1970) do 7,16% (1971) rocznego ładunku materiału rozpuszczonego, od 4,48 (1970) do 25,39% (1971) rocznego ładunku zawiesiny i od 6,30 (1970) do 60,00% (1971) rocznego ładunku materiału wlezonego. Stosunek wyniesionego ładunku materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego podczas małych wezbrań wynosił 0,07:1:0; w czasie średnich 3,02:1:0,25, a w czasie wielkich 5,85:1:0,36 (tab. X).

3. Katastrofalne powodzie deszczowe. Wyróżnienie katastrofalnej powodzi jako osobnego typu wśród wiosennych i letnich wezbrań deszczowych poddyktowane jest jej wielkim udziałem w wynoszeniu materiału ze zlewni oraz funkcją rzeźbotwórczą.

Katastrofalna powódź deszczowa w lipcu 1970 roku wyniosła ze zlewni 19,92% (6501 t) rocznego ładunku materiału rozpuszczonego; 91,92% (262 893 t) rocznego ładunku zawiesiny i 90,20% (11176 t) rocznego ładunku materiału wlezonego. W zestawieniu wyniesionych mas materiału zwraca uwagę prawie dwukrotnie większy ładunek materiału wlezonego od ładunku materiału rozpuszczonego oraz ponad 40-krotnie większy ładunek zawiesiny od ładunku materiału rozpuszczonego. Są to, obok wielkiego udziału w wynoszeniu rocznego ładunku materiału, indywidualne cechy katastrofalnej powodzi, na podstawie których można sądzić, że jest to okres wzmózonej erozji mechanicznej, której rozmiary wielokrotnie przekraczają erozję chemiczną.

4. Wezbrania u schyłku lata i w jesieni z deszczy rozlewnych. Za schyłek lata uważam okres po żniwach, którego początek w Beskidach przesuwają się często na drugą połowę sierpnia (np. mokry rok 1970). Sprzęt zbóż i innych płodów rolnych oraz kończący się okres wegetacji zmniejsza ochronną rolę roślinności i stwarza korzystne warunki dla spłukiwania. Również wzmózony ruch pojazdów po drogach gruntowych, związany z wywozem płodów rolnych i pracami polowymi, powoduje rozkruszanie wierzchniej warstwy nawierzchni dróg i gromadzenie drobnej luźnej zwierzchniny. Przeważnie jednak małe natężenie deszczu nie jest w stanie wywołać spływu powierzchniowego i spłukiwania.

W okresie badań wezbrania tego typu charakteryzowały się powolnym wzrostem przepływu i kulminacjami od 5,1 do 23 m<sup>3</sup>/s oraz stosunkowo małym zmęceniem, które wahało się od 23 do 481 g/m<sup>3</sup>. Przewaga wsiąkania nad spływem powierzchniowym dawała wysokie wartości koncentracji materiału rozpuszczonego, które podczas kulminacji przepływu wahały się od 162 do 190 g/m<sup>3</sup>. Poszczególne wezbrania wyniosły od 3,93 (1970) do 1,07% (1971) rocznego ładunku materiału rozpuszczonego oraz od 0,02 (1970) do 0,66% (1971) rocznego ładunku zawiesiny. Stosunek wyniesionego ładunku materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego wahał się od 0,08:1:0 do 0,95:1:0. Wyniesiony ładunek materiału rozpuszczonego był większy od ładunku zawiesiny.

5. Wezbrania u schyłku lata i w jesieni z gwałtownych opadów po okresie długotrwałej suszy. W tej porze roku gwałtowne opady występują rzadko. Wezbranie 6—10 X 1970 należy do największych jesiennych wezbrań w dzie-

sięcioleciu 1961—1970. Kulminacje dwóch obserwowanych wezbrań wynosiły 8,7 i 22 m<sup>3</sup>/s. Wezbrania poprzedziła długotrwała susza. Spowodowała ona silne przesuszenie powierzchni gruntu, który tracąc zwiąłość stał się podatny na splukiwanie. Do zwiększenia produkcji luźnej zwierzliny na drogach przyczynił się opisany powyżej intensywny ruch pojazdów. Duży zapas luźnej zwierzliny w zlewni dał bardzo duże zmaczenie wody przy małym przepływie — maksymalnie 788 (24 VIII 1971) i 1086 g/m<sup>3</sup> (6 X 1970). Znaczny udział spływu powierzchniowego doprowadził do obniżenia koncentracji materiału rozpuszczonego podczas kulminacji wezbrania maksymalnie do 155 g/m<sup>3</sup>. Dało to w efekcie przewagę wyniesionego ładunku zawiesiny nad ładunkiem materiału rozpuszczonego. Wezbranie 6—8 X 1970 wyniosło 1,46% rocznego ładunku zawiesiny. Natomiast wezbranie 24—26 VIII 1971 wyniosło 0,77% rocznego ładunku materiału rozpuszczonego i 1,77% rocznego ładunku zawiesiny. Stosunek wyniesionych ładunków materiału rozpuszczonego do zawiesiny i materiału wlezonego wynosił dla wezbrania w 1970 r. 3,78:1:0, a dla wezbrania w 1971 r. 1,96:1:0.

6. Okresy międzywezbraniowe. Krótkie epizody wezbrań rozdzielone są długimi okresami średnich i niskich stanów wody (> 5 m<sup>3</sup>/s). W tym czasie przygotowywana jest luźna zwierzlina. Intensywność jej produkcji zależy od pogody. W zimie rozluźnienie wierzchniej warstwy gruntu wiąże się z procesami mrozowymi, a w pozostałych porach roku z jej przesuszeniem. Również w korycie w miejscach zaprawowych zachodzi w tych okresach sedymentacja drobnego materiału. Wody rzeczne charakteryzują się dużą koncentracją materiału rozpuszczonego (maksymalnie do 290 g/m<sup>3</sup>) oraz niską mętnością (2—8 g/m<sup>3</sup>). W mokrym 1970 r. okresy międzywezbraniowe stanowiły 70,70% czasu roku, a w suchym 1971 r. 85,22%. Podczas nich wyniesione zostało: w 1970 r. 32,99%, a w 1971 r. 63,81% rocznego ładunku materiału rozpuszczonego oraz 0,28% w 1970 r. i 5,64% w 1971 r. rocznego ładunku zawiesiny. Stosunek wyniesionych ładunków materiału rozpuszczonego do zawiesiny i materiału wlezonego w tych okresach był podobny w obydwu latach i wynosił 0,075:1:0. Wskazuje to na wielką przewagę wynieszonego ładunku materiału rozpuszczonego nad ładunkiem zawiesiny.

Należy podkreślić, że przedstawiona typologia wezbrań i wyróżnienie jednego okresu międzywezbraniowego oparto na badaniach, które trwały krótki czas. W porze międzywezbrań duża zmienność pogody stwarza różnorodne warunki dostawy materiału i potencjalne możliwości występowania przejściowych typów wezbrań, których pozycja systematyczna w zaproponowanej typologii może być dyskusyjna.

#### MORFOGENETYCZNE PORY ROKU W ŚWIETLE TRANSPORTU

Na podstawie współcześnie zachodzących procesów oraz przebiegu termiki i opadów wyróżnia się w Karpatach fliszowych cztery morfogenetyczne pory roku, które szczególnie wyraźnie zaznaczają się w piętrach leśnych, gdzie wylesienie doprowadziło do wzrostu natężenia procesów. Wydaje się interesującym określenie

Tabela XI. Udział wezbrań w wnoszeniu materiału ze zlewni Kamienicy Nawojowskiej na tle morfogenetycznych pór roku

Nazwa okresu morfogenetycznego i rodzaj wezbrań	Rok hydrologiczny	Ilość wezbrań	% czasu roku	Ładunek (w tonach)			% rocznego ładunku			$L_S:L_D:L_B$
				materiału rozpuszczonego ( $L_D$ )	zawiesiny ( $L_S$ )	materiału wleczonego ( $L_B$ )	materiału rozpuszczonego ( $L_D$ )	zawiesiny ( $L_S$ )	materiału wleczonego ( $L_B$ )	
Okres zimy: wezbrania roztopowe śródzimowe	1970	2	2,74	903	249	—	2,77	0,09	—	0,27:1:0
	1971	3	3,83	1081	567	—	6,50	4,00	—	0,52:1:0
Okres przedwiośnia: wezbrania roztopowe wiosenne	1970	3	8,49	4663	1101	124	14,29	0,39	1,0	0,24:1:0,03
	1971	1	4,11	2393	8511	198	14,39	60,07	40,00	3,56:1:0,08
Okres późnej wiosny i lata: wezbrania deszczowe	1970	11	17,25	15825	281803	12266	48,49	98,61	99,00	17,81:1:0,77
	1971	6	5,20	2020	4141	298	12,15	29,23	60,00	2,05:1:0,15
Okres jesieni: wezbrania deszczowe	1970	1	0,82	478	1807	—	1,46	0,63	—	13,03:1:0,57
	1971	2	1,64	524	150	—	3,15	1,06	—	2,22:1:0,08

ilościowego udziału występujących w tych okresach wezbrań w wynoszeniu materiału z częściowo wylesionej zlewni Kamienicy Nawojowskiej na przykładzie ekstremalnych lat okresu badań (tab. XI). Przedstawiona charakterystyka okresów morfogenetycznych pochodzi z pracy L. Starkla (1972a, s. 129).

1. Okres zimy na wysokości 600 m n.p.m. to faza intensywnego wietrzenia mrozowego odsłoniętych powierzchni skalnych (głównie nasłonecznionych), zastoju innych procesów przy pokryciu powierzchni grubą warstwą śniegu i częstym przemarznięciu gruntu. Na Pogórze, w zależności od typu zimy, okres częstych odwilży, przewiewania pokrywy śnieżnej, występowania procesów mrozowych, spłukiwania, deflacji, procesów grawitacyjnych na małą skalę (L. Starkel 1972a).

Długie okresy niżówek zimowych przegradzane bywają krótkotrwałymi epizodami odwilży, które wywołują małe wezbrania. Wody roztopowe płyną przeważnie po zamrożonym gruncie, toteż następuje niewielki wzrost zmacenia wody i duży spadek koncentracji materiału rozpuszczonego. Śródzimowe wezbrania odwilżowe stanowiły w roku 1970 2,74% (2 wezbrania) jego czasu, a w roku 1971 3,83% (3 wezbrania) i wyniosły 2,77 (1970) i 6,50% (1971) rocznego ładunku materiału rozpuszczonego oraz 0,09 (1970) i 4,00% (1971) rocznego ładunku zawiesiny. Stosunek wyniesionych podczas wezbrań ładunków materiału rozpuszczonego do zawiesiny i materiału wlezonego był podobny w obu latach i wynosił 0,27:1:0 w 1970 r. i 0,52:1:0 w 1971 r. Przypuszczam, że wynoszony w ziemie podczas wezbrań odwilżowych ładunek materiału rozpuszczonego jest znacznie większy od ładunku zawiesiny. Toteż pod względem wynoszenia materiału ze zlewni beskidzkich okres zimy jest podobny do okresu jesieni.

2. Okres przedwiośnia — tajania pokrywy śnieżnej, intensywnego spłukiwania (przy zamrożonym gruncie) lub procesów sufozyjnych, różnorodnych ruchów masowych, słabej erozji liniowej podczas przymrozków, procesów kriogenicznych i deflacji, a w wysokich górach intensywnych procesów niwalnych (L. Starkel 1972a).

Ulegająca stopniowej ablacji w poszczególnych piętrach wysokościowych pokrywa śnieżna powoduje długotrwałe wezbrania roztopowe (w 1970 r. 8,49% czasu roku, a w 1971 r. 4,11%) o małej gwałtowności i stosunkowo wysokim przepływie. Powodują one w latach suchych (bez powodzi i wielkich wezbrań letnich) koncentrację odpływu wiosną, której kulminacja znacznie przewyższa szczytowy odpływ w lecie (por. ryc. 52). Gwałtowne insolacyjno-adwekcyjne wezbranie roztopowe 17—31 III 1970 wyniosło 14,39% rocznego ładunku materiału rozpuszczonego, 60,07% ładunku materiału zawiesinowego i 40,00% rocznego ładunku materiału wlezonego. Natomiast w 1970 r. przebiegające etapami roztopy adwekcyjno-opadowe dały trzy wezbrania, które wyniosły 14,29% rocznego ładunku materiału rozpuszczonego, 0,39% rocznego ładunku zawiesiny i 1% rocznego ładunku materiału wlezonego. Stosunek wyniesionego podczas wezbrań ładunku materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego wynosił 0,24:1:0,03 w 1970 r. i 3,56:1:0,08 w 1971 r.

Udział wezbrań w bilansie odprowadzania materiału ze zlewni uzależniony jest od rodzaju roku (mokry, suchy), a ilość wyniesionego materiału w formie zawiesiny wiąże się z grubością pokrywy śnieżnej, gwałtownością roztopów i z charakterem poprzedzającej go zimy (kontynentalna, oceaniczna). W czasie zim mroźnych i śnieżnych (zimy kontynentalne) w całych Karpatach następuje zamarcie procesów i narasta gruba pokrywa śnieżna. Jeżeli po takiej zimie nastąpi szybko ocieplenie, wówczas rozmiary denudacji są olbrzymie, gdyż spływ w początkowej fazie następuje po przemarzniętym podłożu. Zimy mroźne i bezśnieżne cechuje słabe splukiwanie i silne wietrzenie mechaniczne (zima 1970/1971). Akumulacje śniegu pod koniec takiej zimy i gwałtowne jego topnienie dają duże odprowadzenia zawiesiny (przedwiośnie 1971). Łagodne zimy odwilżowe cechuje niewielkie natężenie procesów. Wynoszony w okresie przedwiośnia podczas wezbrań ładunek zawiesiny i materiału wlezonego (po zimach o charakterze kontynentalnym) może stanowić ponad 60% rocznego ładunku zawiesiny i materiału wlezonego (np. rok 1971). Przedwiośnie jest wówczas głównym okresem wyprzątania materiału ze zlewni beskidzkiej.

3. Okres późnej wiosny i lata — występowanie deszczów ulewnych i rozlewnych przegradzanych fazami suszy. Jest to okres występowania intensywnego splukiwania, w latach wilgotnych osuwisk na dużą skalę, gwałtownej erozji i akumulacji rzecznej (powodzie czerwcowe i lipcowe) wynoszenia mas materiału poza obręb zlewni szczególnie z Beskidów (L. Starkel 1972a).

Okresowi temu odpowiadają krótkotrwałe, liczne i najczęściej gwałtowne wezbrania deszczowe, które w 1970 r. stanowiły 17,25% czasu roku, a w 1971 r. 5,20%. Duża gwałtowność i wielkość wezbrań przyczyniła się do znacznej przewagi transportu mechanicznego nad chemicznym. Szczególną rolę morfogenetyczną odgrywają występujące co kilka lub kilkanaście lat katastrofalne powodzie, wynoszące ładunek materiału równoważący wynoszenie w ciągu dziesięciu „normalnych” lat. Wezbrania tego okresu wyniosły 48,49 (1970) — 12,15% (1971) rocznego oładunku materiału rozpuszczonego, 98,61 (1970) — 29,13% (1971) rocznego ładunku zawiesiny i 99,00 (1970) — 60,00% (1971) rocznego ładunku materiału wlezonego. Stosunek wyniesionych podczas tych wezbrań ładunków materiału rozpuszczonego do zawiesiny i materiału wlezonego wynosił w roku z powodzią (1970) 17,81:1:0,77, a w roku bez powodzi (1971) 2,05:1:0,15. Wynoszony w tym okresie podczas wezbrań ładunek zawiesiny i materiału wlezonego w wieloletniu znacznie przekraczał rozmiary ładunku zawiesiny i materiału wlezonego w pozostałych porach roku. Jednak w latach o gwałtownych wezbraniach roztopowych i średniej wielkości wezbraniach deszczowych ładunek wyniesionego materiału może być mniejszy niż podczas przedwiośnia, co jest raczej typowe dla obszarów wyżyn Polski południowej, a w Beskidach ma miejsce stosunkowo rzadko. Okresy letnie są jedynymi, w których odbywa się przekształcanie form korytowych i równin zalewowych. Okres największej aktywności morfologicznej wiąże się z występowaniem katastrofalnych powodzi deszczowych.

4. Okres jesieni — o małym natężeniu opadów, wahań temperatury około 0°, okres splukiwania, spalania przy nasiąknięciu wodą (często pozostałość po długotrwałych ulewach w lecie), procesów mrozowych, w przypadku suchej jesieni słabej deflacji, głównie na drogach i polach ornych (L. Starkel 1972a).

Okresowi temu odpowiadają wolno wzrastające wezbrania z deszczy rozlewnych i rzadkie wezbrania z gwałtownych opadów (niekiedy po długich suszach), które w skali roku należą do małych wezbrań. W 1970 r. wystąpiło tylko jedno wezbranie (po okresie suszy), które stanowiło 0,82% czasu roku. Wyniosło ono 1,46% rocznego ładunku materiału rozpuszczonego i 0,63% rocznego ładunku zawiesiny. Dwa wezbrania w 1971 r., pochodzące z rozlewnych opadów i stanowiące 1,64% czasu roku, wyniosły 3,15% rocznego ładunku materiału rozpuszczonego i 1,06% rocznego ładunku zawiesiny. Stosunek wyniesionego podczas wezbrań ładunku materiału rozpuszczonego do zawiesiny i materiału wlezonego wynosił 3,78:1:0 w 1970 r. i 0,29:1:0 w 1971 r. Zatem wynoszony w tym okresie podczas wezbrań ładunek materiału rozpuszczonego jest znacznie większy od ładunku zawiesiny, za wyjątkiem gwałtownych wezbrań po okresie suszy.

#### BILANS TRANSPORTU

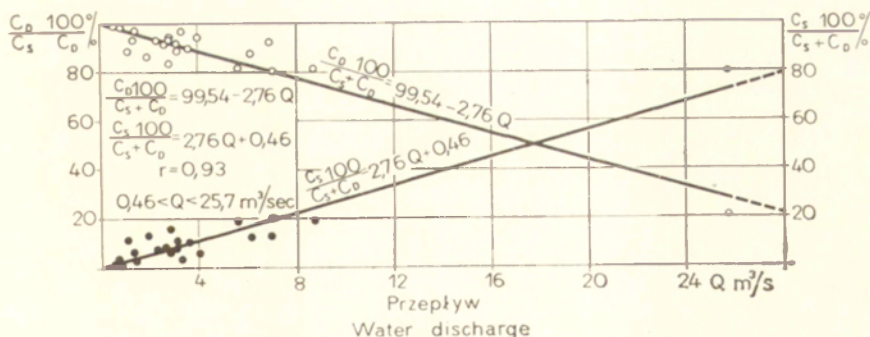
Ładunek wyniesionego w ciągu roku materiału rozpuszczonego, zawiesiny i materiału wlezonego uwarunkowany jest ilością i wielkością wezbrań. W okresie badań w mokrym 1970 r., z katastrofalną powodzią ze zlewni Kamienicy Nawojowskiej, wyniesione zostało 32637 t materiału rozpuszczonego, 285 769 t. zawiesiny i 12390 t materiału wlezonego. Natomiast w suchym 1971 r., bez powodzi, odprowadzone zostało odpowiednio 16629 t materiału rozpuszczonego, 14168 t zawiesiny i 496 t materiału wlezonego. Całkowity ładunek wyniesionego materiału w 1970 r. wynosił 330796 t, a w 1971 r. 31293 t. Przeważająca część rocznego ładunku w 1970 r. była odprowadzona w półroczu letnim, natomiast w 1971 r. w półroczu zimowym (tab. XII). Stosunek wyniesionego ładunku materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego wynosił w 1970 r. 8,75:1:0,38, a w 1971 r. 0,85:1:0,03. Ekstremalne lata okresu badań różnią się między sobą wielkością wyniesionego ładunku materiału oraz wzajemnym stosunkiem odprowadzanego ładunku materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego.

Przyjmuje się jako prawidłowość, że w rzekach górskich wynoszony ładunek zawiesiny jest większy od ładunku materiału rozpuszczonego (O. A. Alekin i L. W. Brażnikowa 1962). Według K. Figuły (1966) w rzekach Karpat fliszowych odpływ zawiesiny jest równy lub przekracza rozmiary ładunku materiału rozpuszczonego. Tymczasem na przykładzie wielkości wynoszonego ładunku materiału rozpuszczonego i zawiesiny ze zlewni Kamienicy Nawojowskiej w 1971 r. można przypuszczać, że w latach bez większych wezbrań wynoszony ze zlewni beskidzkich ładunek materiału rozpuszczonego może być większy od ładunku zawiesiny. Wyniesiony przez Kamienicę Nawojowską roczny ładunek materiału rozpuszczonego stanowił w 1970 r.

Tabela XII. Bilans wyniesionego materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ), zawiesiny ( $L_S$ ) i materiału wlezonego ( $L_B$ ) w okresie badań

Rok hydrologiczny	Rodzaj wynoszonego materiału	Ładunek roczny (w tonach)	Udział ładunku półrocznego letniego (w %)	% całkowitego ładunku rocznego ( $L_T$ )	Okres wezbrań w % czasu roku	Udział (w %)		$L_S:L_D:L_B$
						w wezbrań w wynoszeniu ładunku rocznego	powodzi 1970 r. w wynoszeniu ładunku rocznego	
1970	Materiał rozpuszczony	32637	73,63	9,87	29,30	67,01	19,92	8,75:1:0,38
	Zawiesina	285769	99,19	86,39		99,72	91,99	
	Materiał wleczony	12390	99,00	3,74		100,00	90,20	
Całkowity ładunek roczny		330796	99,66	100,00	29,30	96,50	84,82	
1971	Materiał rozpuszczony	16629	38,10	53,14	14,78	36,19	—	0,85:1:0,03
	Zawiesina	14168	32,06	45,28		94,36	—	
	Materiał wleczony	496	60,00	1,58		100,00	—	
Całkowity ładunek roczny		31293	35,71	100,00	14,78	63,54	—	





Ryc. 49. Związek między średnim miesięcznym przepływem ( $Q$ ) a udziałem procentowym średniej miesięcznej koncentracji materiału rozpuszczonego ( $C_D$ ) i zawiesiny ( $C_S$ );  $C_S + C_D = 100\%$ , koncentracji transportowanego materiału (Kamienica Nawojowska – Nowy Sącz)

Fig. 49. Relation between the mean monthly discharge ( $Q$ ) and the percentage of mean monthly concentration of dissolved material ( $C_D$ ) and suspended material ( $C_S$ );  $C_S + C_D = 100\%$  of concentration of transported material (the Kamienica Nawojowska – Nowy Sącz)

9,87%, a w 1971 r. 53,14% całkowitego rocznego ładunku materiału. W przeważającej części czasu roku koncentracja materiału rozpuszczonego jest większa od koncentracji zawiesiny. Jedynie w ciągu krótkich epizodów, przeważnie średnich i wielkich wezbrań, koncentracja zawiesiny przewyższa koncentrację materiału rozpuszczonego. Przy średnim miesięcznym przepływie  $17 \text{ m}^3/\text{s}$  średnia miesięczna koncentracja zawiesiny jest równa średniej miesięcznej koncentracji materiału rozpuszczonego (ryc. 48). Należy dodać, że średni miesięczny przepływ powyżej  $17 \text{ m}^3/\text{s}$  wystąpił w okresie badań tylko w lipcu 1970 r. (tab. I). Przyjmując za  $100\%$  sumę średniej miesięcznej koncentracji zawiesiny i średniej miesięcznej koncentracji materiału rozpuszczonego ( $C_S + C_D$ ) udział procentowy koncentracji przy określonym przepływie (śr. miesięcznym) można wyliczyć z następujących równań regresji (ryc. 49):

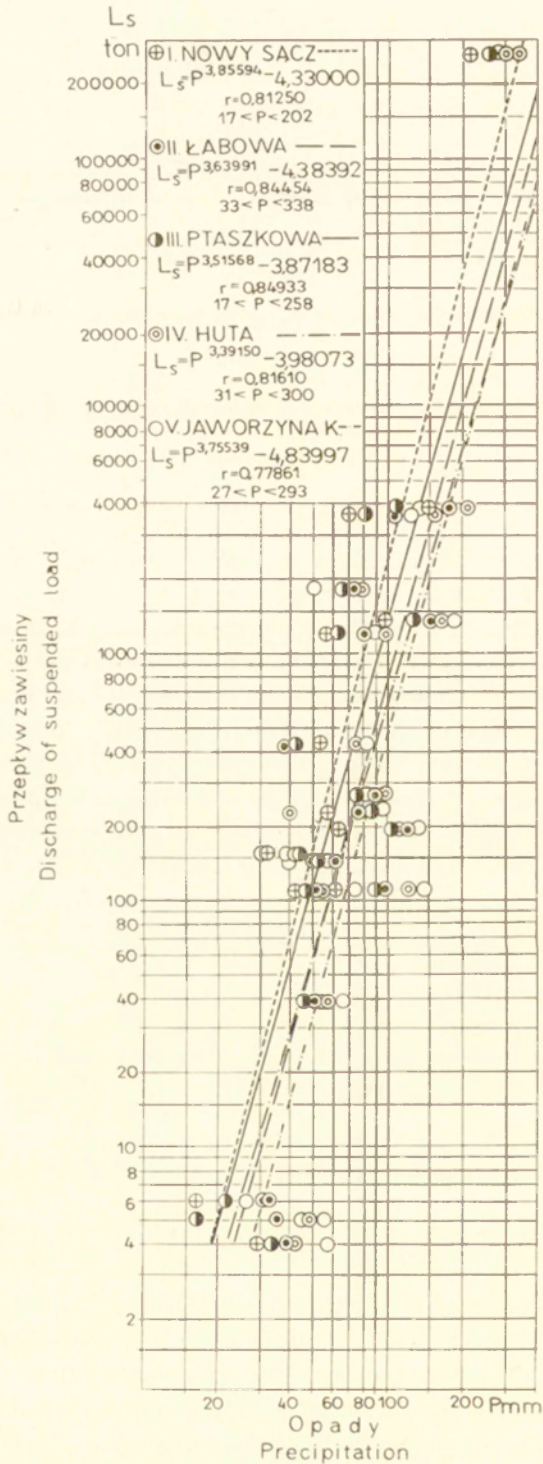
1) procentowy udział koncentracji materiału rozpuszczonego:

$$\frac{C_D}{C_S + C_D} \cdot 100 \% = 99,54 - 2,76 Q,$$

2) procentowy udział koncentracji zawiesiny:

$$\frac{C_S}{C_S + C_D} \cdot 100 \% = 2,76 Q + 0,46.$$

Ładunek wyniesionego ze zlewni materiału wlezonego był niewielki w porównaniu z ładunkiem zawiesiny i materiału rozpuszczonego. Stanowił on w 1970 r. 3,74%, a w 1971 r. 1,58% całkowitego rocznego ładunku materiału (tab. XII). Na małe rozmiary transportu materiału wlezonego wskazują również wyniki pomiarów przyrostu objętości stożków napływowych krótkich bocznych dopływów Kamienicy



Nawojowskiej, uchodzących bezpośrednio na równinę zalewową. Ze zlewni o powierzchni 1–2 km<sup>2</sup> w okresie badań wyniesione zostało 3–11 m<sup>3</sup> grubego materiału. Potwierdza to wyniki badań B. Wiśniewskiego (1972), który dla rzek Karpat fliszowych przyjmuje udział materiału wlezonego na 8–12% w stosunku do transportu zawiesiny (na podstawie kubatury aluwii w zbiornikach zaporowych), w przeciwieństwie do J. Brańskiego (1971), który stosując podobną metodę opierając się na najnowszych wynikach badań metodami izotopowymi (T. Florkowski 1968) szacuje jego udział na 75%. Wyniki badań metodami izotopowymi potwierdzają niewielki udział transportu materiału wlezonego w stosunku do transportu zawiesiny, która stanowi przeciętnie więcej niż 75% przeniesionego ładunku zawiesiny i materiału wlezonego (T. Florkowski 1968). Na mały udział wleżenia w wynoszeniu materiału zwraca uwagę znaczna ilość badaczy, m. in. H. P. Guy (1964), L. K. Lustig i R. D. Busch (1967), B. E. Mapes (1969). Udział zawiesiny w rocznym ładunku wyniesionego materiału ( $L_D + L_S + L_B$ ) ze zlewni Kamienicy Nawojowskiej wynosił w 1970 r. 86,39%, a w 1971 r. 45, 28% (tab. XII).

Porównanie rozmiarów odprowadzania materiału ze zlewni Kamienicy Nawojowskiej z wynoszeniem z innych zlewni górskich jest przedwczesne z uwagi na bardzo krótki okres obserwacji. Liczne wyniki cytowane w literaturze pochodzą zasadniczo z okresów wielolecia i otrzymane są przeważnie przy zastosowaniu innych metod pomiarowych i obliczeniowych.

Sądzę, że porównania rozmiarów transportu materiału w rzekach na podstawie wzajemnego stosunku wynoszonej masy poszczególnych rodzajów materiału (np. stosunek ładunku materiału rozpuszczonego do ładunku zawiesiny i ładunku materiału wlezonego) są bardziej obiektywne niż stosowane dotychczas porównania opierające się na tzw. jednostkowej denudacji dorzecza. Polega ona na przeliczaniu ilości odprowadzanego materiału w stosunku do powierzchni dorzecza i wyrażana jest w t/km<sup>2</sup> lub m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Zamiana jednostek masy transportowanego materiału na jednostki objętości przy zastosowaniu „uniwersalnego” współczynnika 2,5 (J. Corbel 1964) wprowadza daleko idące uproszczenia prowadzące do poważnych błędów. Są one wywołane znacznymi różnicami ciężarów objętościowych, jak również ciężarów właściwych poszczególnych rodzajów skał, zwietrzelin i materiału transportowanego w rzekach. Obliczane rozmiary transportu materiału w rzekach powinny być wyrażone w jednostkach odpowiadających metodzie pomiaru.

Miesięczne ładunki wynoszonego materiału rozpuszczonego ze zlewni Kamienicy Nawojowskiej można z dużym przybliżeniem określić w oparciu o wyprowa-

Ryc. 50. Związek między miesięczną sumą opadów ( $P$ ) a wynoszonym przez Kamienicę Nawojowską miesięcznym ładunkiem zawiesiny ( $L_S$ )

Fig. 50. Relation between the mean monthly precipitation totals ( $P$ ) and the monthly of suspended load carried away ( $L_S$ ) by the Kamienica Nawojowska

dzone równanie regresji, opisujące zależność między średnim miesięcznym przepływem wody (przekrój Nowy Sącz) a średnią miesięczną koncentracją materiału rozpuszczonego (ryc. 31):

$$C_n = \frac{170,1 Q + 85,3}{Q}$$

Ładunki zawiesiny wynoszone ze zlewni Kamienicy Nawojowskiej z pewnym przybliżeniem można obliczyć w oparciu o wyprowadzone równanie regresji, opisujące zależność między średnim miesięcznym przepływem wody (przekrój Nowy Sącz) a średnią miesięczną koncentracją zawiesiny (ryc. 43):

$$\log C_s = 0,0767 Q + 0,93222.$$

Dla wielu obszarów kuli ziemskiej ustalono związki między opadami a ładunkiem wynoszonej zawiesiny (F. Fournier 1960); w takim przypadku znajomość opadu wystarcza do dość dokładnego określenia rozmiarów transportu zawiesiny.

Podobne związki między miesięcznymi sumami opadów a miesięcznymi ładunkami zawiesiny wyprowadzono dla zlewni Kamienicy Nawojowskiej. Równania regresji obliczono dla pięciu stacji PIHM rejestrujących opady na terenie zlewni (ryc. 50):

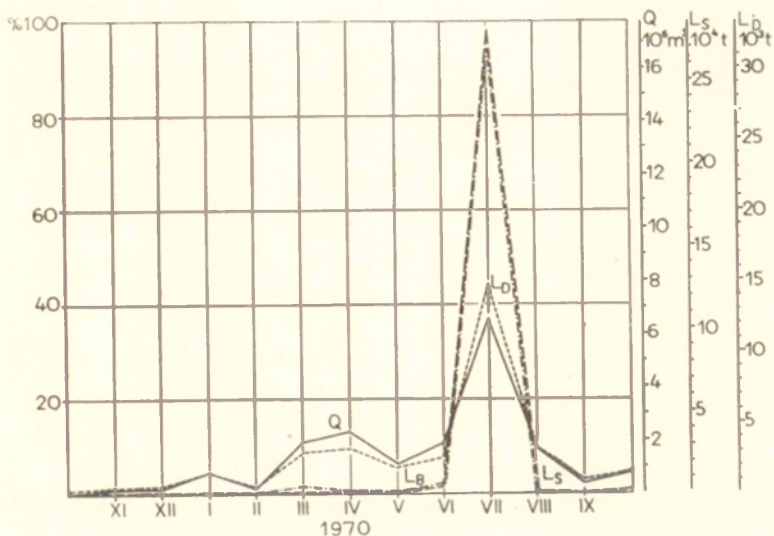
Nowy Sącz	$L_S = P^{3,85594} - 4,33000$	$r = 0,812,$
Łabowa	$L_S = P^{3,63991} - 4,38392$	$r = 0,844,$
Ptaszkowa	$L_S = P^{3,51568} - 3,87183$	$r = 0,849,$
Huta	$L_S = P^{3,39150} - 3,98073$	$r = 0,816,$
Jaworzyna		
Krynicka	$L_S = P^{3,75539} - 4,83997$	$r = 0,779,$

gdzie:  $L_S$  — miesięczny ładunek zawiesiny (w tonach);  $P$  — miesięczna suma opadów (w mm).

Wyznaczenie regionalnych współczynników równań dla poszczególnych obszarów Karpat może mieć duże znaczenie dla poznania rozmiarów transportu zawiesiny w poszczególnych dorzeczach, potrzebnego przy projektowaniu budowli hydrotechnicznych. Obecnie stosuje się najczęściej wzory empiryczne, które dają wyniki znacznie odbiegające od rzeczywistych.

#### STOSUNEK REŻIMU ODPLYWU DO REŻIMU WYNOSENIA MATERIAŁU

Reżim odpływu Kamienicy Nawojowskiej wykazuje w poszczególnych latach różny stosunek do reżimu wynoszenia zawiesiny i materiału wlezonego (ryc. 51–54). W skrajnie hydrologicznych latach nawiązuje do mechanizmu typowego dla prostych reżimów hydrologicznych, w których koncentracja odpływu pokrywa się z maksimum wynoszenia materiału. W latach o zimie kontynentalnej (mroźnej i śnieżnej) oraz lecie suchym (kontynentalnym) kulminacja odpływu wiosną jest większa niż



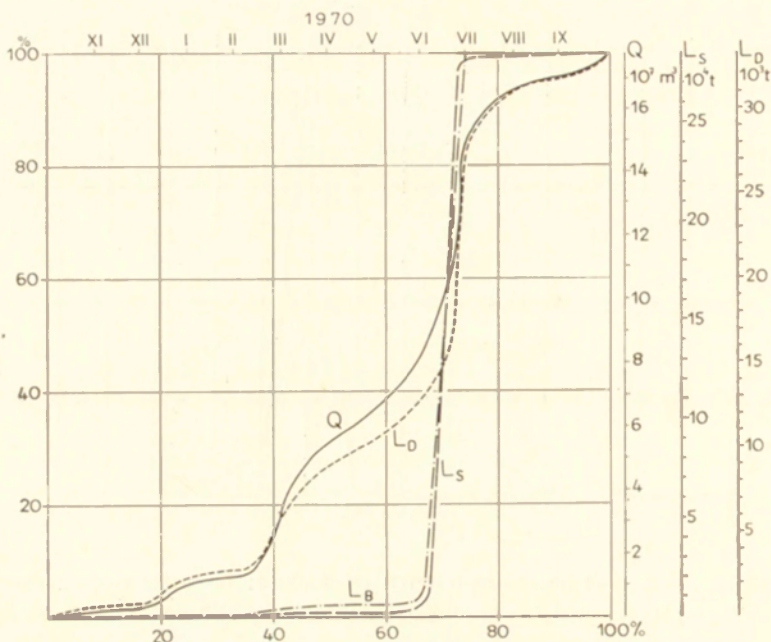
Ryc. 51. Miesięczne wartości odpływu wody ( $Q$ ) i ładunków: materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ); zawiesiny ( $L_S$ ); materiału wlezonego ( $L_B$ ) (Kamienica Nawojowska — Nowy Sącz 1970)

Fig. 51. Monthly values of water run-off ( $Q$ ) and of loads: of dissolved load ( $L_D$ ); of suspended load ( $L_S$ ); of dragged load ( $L_B$ ) (the Kamienica Nawojowska — Nowy Sącz)

latem (por. tab. IV). Gwałtowne roztopy wiosną wywołują w tych latach z reguły duże wezbrania, które wynoszą przeważającą część rocznego ładunku materiału (tab. XII; ryc. 53, 54). Reżim wyprzątania materiału nawiązuje wówczas do prostego reżimu wynoszenia, charakterystycznego dla rzek proglacialnych (por. K. Klimek 1972). Natomiast w latach o zimie typu oceanicznego lub przejściowego i wzmoczonej cyrkulacji cyklonalnej latem (lata oceaniczne), gwałtowne i częste wielkie wezbrania deszczowe, a niekiedy katastrofalne powodzie dają większą kulminację odpływu latem niż wiosną. Przeważająca część ładunku materiału wynoszona jest wówczas latem (tab. XII; ryc. 51, 52). Reżim wynoszenia materiału ze zlewni beskidzkich nawiązuje w takich latach do reżimu wyprzątania, charakterystycznego dla górskich obszarów strefy monsunowej (por. L. Starkel 1972b).

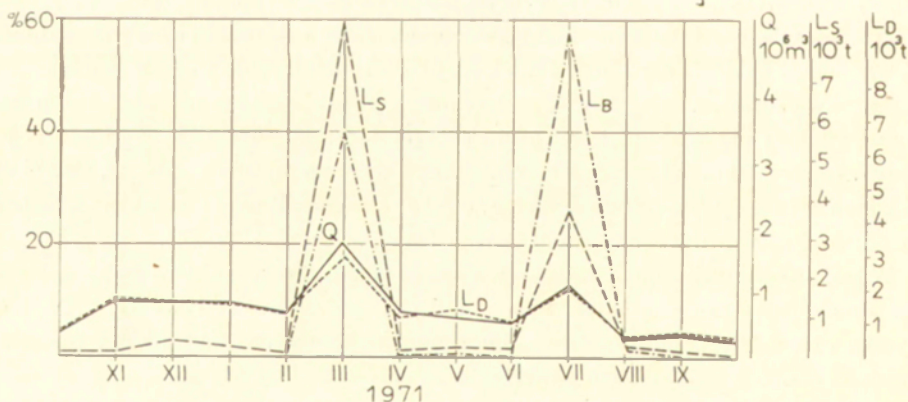
W poszczególnych latach reżim wynoszenia materiału rozpuszczonego ze zlewni Kamienicy Nawojowskiej wykazuje zgodność z reżimem odpływu (ryc. 51–54). Wynika ona z bezpośredniego związku funkcyjnego między ładunkiem materiału rozpuszczonego a przepływem wody —  $L_D = f(Q)$ .

Brak bezpośredniego prostego związku między przepływem wody a ładunkiem zawiesiny powoduje, że w poszczególnych latach reżim wynoszenia ładunku zawiesiny odbiega od reżimu odpływu (por. ryc. 51–54). W wieloletnim letnia kulminacja odprowadzania ładunku zawiesiny jest większa od wiosennej w przeciwieństwie do reżimu odpływu (ryc. 7). Potwierdzają to wyniki dotychczasowych badań wy-



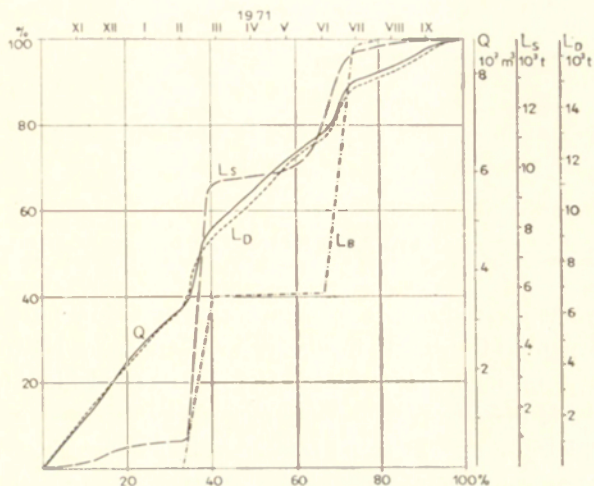
Ryc. 52. Krzywe kulminacyjne odpływu wody ( $Q$ ) i ładunków: materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ); zawiesiny ( $L_S$ ); materiału wleczonego ( $L_B$ ) (Kamienica Nawojowska — Nowy Sącz 1970)

Fig. 52. Cumulative curve of water run-off ( $Q$ ) and of loads: of dissolved load ( $L_D$ ); of suspended load ( $L_S$ ); of dragged load ( $L_B$ ) (the Kamienica Nawojowska — Nowy Sącz)



Ryc. 53. Miesięczne wartości odpływu wody ( $Q$ ) i ładunków: materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ); zawiesiny ( $L_S$ ); materiału wleczonego ( $L_B$ ) (Kamienica Nawojowska — Nowy Sącz 1971)

Fig. 53. Monthly values of the run-off of water ( $Q$ ) and of loads: of dissolved material ( $L_D$ ); of suspended material ( $L_S$ ); of dragged material ( $L_B$ ) (the Kamienica Nawojowska — Nowy Sącz)



Ryc. 54. Krzywe kumulacyjne odpływu wody ( $Q$ ) i ładunków: materiału rozpuszczonego ( $L_D$ ); zawiesiny ( $L_S$ ); materiału wlezonego ( $L_B$ ) (Kamienica Nawojowska — Nowy Sącz 1971)

Fig. 54. Cumulative curves of the run-off of water ( $Q$ ) and of loads of dissolved material ( $L_D$ ); of suspended material ( $L_S$ ); of dragged material ( $L_B$ ) (the Kamienica Nawojowska — Nowy Sącz 1971)

noszenia zawiesiny ze zlewni Karpat fliszowych (J. Brański 1968a; J. Cyberski 1969; W. Jarocki 1957).

Transport materiału dennego zależy zasadniczo od szybkości wody. Jego związek z przepływem zaczyna się dopiero z chwilą przekroczenia granicznej szybkości wprowadzającej w ruch materiał denny. Powoduje to brak zgodności odprowadzania ładunku materiału wlezonego z reżimem odpływu. W wieloletniu kulminacja wynoszenia ładunku materiału wlezonego przypada na okres letni i wiąże się z wielkimi wezbrzeniami deszczowymi.

Przejściowość naszego klimatu daje w efekcie interesującą i indywidualną niemal dla każdego roku zmienność reżimu wyprzątania mechanicznego w zlewniach bezkiddkich, związaną z wielkością poszczególnych typów wezbrań roztopowych i deszczowych.

## UWAGI KOŃCOWE

Podobne parametry środowiska geograficznego Beskidów pozwalają otrzymane wyniki badań dynamiki transportu fluwialnego w Kamienicy Nawojowskiej ekstrapolować częściowo na inne, średniej wielkości rzeki beskidzkie, których wylesione zlewnie budują serie fliszowe płaszczowiny magurskiej.

Deszczowo-śnieżno-gruntowy reżim rzek beskidzkich charakteryzuje się koncentracją rocznego odpływu w stosunkowo krótkim czasie. Ma to wielkie znaczenie dla tempa i ilości wynoszonego materiału. W rocznym cyklu wynoszenia materiału najmniejsze wahania wykazuje transport materiału rozpuszczonego. Podczas głębokich niżówek duża koncentracja materiału rozpuszczonego wiąże się z gruntowym zasilaniem rzeki i ługowaniem zlewni podziemnej. Największa występuje w jesieni i zimie; wiosną jest mniejsza niż latem. Po przekroczeniu średniego rocznego przepływu wykazuje nieznaczne różnice w czasie każdego wezbrania. Amplituda zmian koncentracji materiału rozpuszczonego podczas wezbrań nie naśladuje wahań przepływu wody. Wskazuje to na dużą bezwładność rozpuszczania skał w stosunku do zmian hydrologicznych. Najmniejsza koncentracja występuje w czasie kulminacji przepływu i wywołana jest większym rozcieńczeniem roztworu związanym z przepływem wody przez silnie wylugowane powierzchniowe warstwy gleby. Z biegiem rzeki zaznacza się powolny wzrost koncentracji materiału rozpuszczonego.

Zmiany koncentracji zachodzą w stosunku odwrotnie proporcjonalnym do przepływu. Związek ten przybliża równanie hiperboli  $y = ax + \frac{b}{x}$ . Transportowany ładunek materiału rozpuszczonego zmienia się wprost proporcjonalnie do przepływu. Zależność tą można wyrazić przy pomocy równania liniowego  $y = ax + b$ . Związek ten świadczy o zgodności reżimu wynoszenia materiału rozpuszczonego z reżimem odpływu.

Czas trwania określonych przepływów wody w ciągu roku jest wprost proporcjonalny do czasów trwania przepływów ładunku materiału rozpuszczonego, a odwrotnie proporcjonalny do czasów trwania poszczególnych wartości koncentracji. Materiał rozpuszczony może stanowić od 10 do ponad 50% całkowitego ładunku rocznego, a w latach suchych może być większy od wynoszonego ładunku zawiesiny. Wezbrania wynoszą od 1/3 do 2/3 rocznego ładunku materiału rozpuszczonego.

Maksimum zmacenia wyprzedza najczęściej kulminację przepływu. Przy podobnych przepływach każde wezbranie charakteryzuje się odmiennym natężeniem tran-



sportu zawiesiny, które wyraża się w indywidualnym dla każdego wezbrania kształcie pętli, wyrażającym związek między przepływem wody a ładunkiem zawiesiny. Dlatego każde przybliżenie interpolacyjne zmęczenia wody dla dłuższego okresu pozbawionego pomiarów będzie obciążone błędem. Zróżnicowany przebieg pętli nawiązuje do dużej zmienności pogody w ciągu roku, wpływającej na charakter wezbrań i warunki dostawy drobnej luźnej zwietrzliny. Jest to odbiciem przejściowości naszego klimatu. Natężenie transportu zawiesiny w ciągu roku zależy głównie od: 1) gwałtowności wzrostu przepływu; 2) długości okresu międzywezbraniowego i „zapasu” drobnej luźnej zwietrzliny na powierzchni gruntu — możliwej do uruchomienia; 3) różnej roli ochronnej szaty roślinnej w ciągu okresu wegetacji; 4) temperatury wody.

Obciążenie rzeki w zawiesinę podczas wezbrań rośnie potęgowo w stosunku do przepływu wody. Koncentracja zawiesiny wzrasta w Kamienicy Nawojowskiej jak 1,3—1,6 potęgi przepływu, a ładunek jak 2,3—2,6. Rzeka dąży do możliwie największego w danych warunkach hydrodynamicznych obciążenia w zawiesinę. Z chwilą uruchomienia materiału dennego rzeka zostaje „dociążona” drobnym materiałem pochodzącym z koryta. Podczas wzrostu fali wezbrań typowy jest udział grubszych frakcji zawiesiny, który rośnie proporcjonalnie do wielkości i gwałtowności przepływu. Podczas opadania stanu wody materiał zawiesinowy staje się bardziej drobny i jednorodny granulometrycznie z dużym udziałem frakcji koloidalnej.

Brak prostego związku między przepływem wody a transportowanym ładunkiem zawiesiny powoduje niezgodność reżimu wynoszenia ładunku zawiesiny z reżimem odpływu. Podczas wezbrań wynoszone jest poza obręb zlewni ponad 90% rocznego ładunku zawiesiny. W poszczególnych latach z pięciu wyróżnionych typów wezbrań największy udział w odprowadzaniu rocznego ładunku miały katastrofalne powodzie deszczowe (J. Cyberski 1969; W. Froehlich 1972; W. Froehlich, K. Klimek, L. Starkeł 1972; Z. Kajetanowicz 1938; A. Welc 1972; H. Ziemska 1928), a w 1971 r. gwałtowne wezbrania roztopowe (W. Froehlich 1973; A. Welc 1973). Udział zawiesiny w całkowitym ładunku wynoszonego materiału może przekraczać 85%.

Określanie rozmiarów współczesnej denudacji mechanicznej zlewni w jednostkach masy lub objętości materiału odprowadzanego z 1 km<sup>2</sup> powierzchni (tzw. wskaźnik denudacji) na podstawie wynoszonego przez rzeki ładunku zawiesiny i materiału wlezonego jest daleko idącym uproszczeniem. Transportowany materiał nie jest wynoszony równomiernie z całego obszaru zlewni. Pochodzi zasadniczo z sieci dróg i ścieżek gruntowych oraz z koryta. Dlatego może być tylko podstawą porównań wyprzątania materiału z różnych dorzeczy, a nie rozmiarów denudacji, tym bardziej że wskaźniki denudacji opierają się często tylko na wynoszeniu zawiesiny. Stosowana zamiana jednostek masy transportowanego materiału na jednostki objętości przy zastosowaniu „uniwersalnego współczynnika 2,5 (J. Corbel 1964) może prowadzić do znacznych błędów wynikających z różnic ciężarów objętościowych i właściwych poszczególnych rodzajów skał, zwietrzelin i materiału transportowanego w rzekach.

Transport materiału wlezonego odbywa się na niewielką odległość i zachodzi wyłącznie podczas wielkich wezbrań. Gwałtowny skokowy wzrost przepływu powoduje znacznie większy transport materiału wlezonego niż wolno wzrastający większy przepływ. Na całej długości rzeki uruchomiony ładunek materiału dennego jest często bardzo duży i odświeżane kamieńce sugerują wielki transport. Jednak ilość materiału wlezonego wyniesionego poza określony przekrój jest niewielka. W ciągu roku udział materiału wlezonego w całkowitym ładunku wynoszonego materiału nie przekracza 5%.

Współcześnie dostawa materiału do transportu dennego ogranicza się do stref aktywnych podcięć i dna koryta. Pomiar świeżych powierzchni kamieńców po wezbraniach nie mogą służyć do obliczania transportu materiału wlezonego i współczesnej denudacji.

Poszczególne wezbrania różnią się wzajemnym stosunkiem wynoszonych ładunków materiału rozpuszczonego, zawiesiny i materiału wlezonego oraz udziałem w wynoszeniu rocznego ładunku. Udział wezbrań w odprowadzaniu całkowitego rocznego ładunku może wynosić 60–95%. Wynoszony w czasie katastrofalnych powodzi deszczowych ładunek zawiesiny i materiału wlezonego odpowiada ładunkowi odprowadzanemu w ciągu 10 „normalnych” lat. W porównaniu z innymi wezbraniem katastrofalne powodzie wykonują największą pracę związaną z transportem materiału, modelowaniem koryta i równiny zalewowej.

Według M. G. Wolmana i J. P. Millera (1960), największą część pracy w procesach geomorfologicznych wykazują siły średniej wielkości, występujące częściej niż katastrofalne o nadzwyczajnych rozmiarach. Na przykładzie katastrofalnych powodzi występujących w Beskidach co kilka lat można sądzić, że w warunkach średnich gór klimatu umiarkowanego przejściowego teza M. G. Wolmana i J. P. Millera (1960) nie znajduje potwierdzenia w stosunku do procesów fluwialnych.

Współczesna eksploatacja aluwii z koryta i ograniczona dostawa grubego materiału ze stoków prowadzi do ogólnego niedoboru materiału dennego. Podczas wezbrań zdolność transportowa rzeki jest większa od możliwości dostawy grubego materiału. Jest to przyczyną nadwyżek energii, które zostają wykorzystane na pogłębianie koryta. Proces ten nakłada się na holocenicką tendencję do erozji wgłębnej i powoduje jej przyspieszenie. Ma też zapewne swą przyczynę w trwających nadal tendencjach podnoszących wały Beskidu Sądeckiego. Poszerzanie koryta w odcinkach akumulacyjnych i tendencja do tworzenia roztok oraz gwałtowność wezbrań i duży udział zawiesiny w wynoszonym ładunku materiału mają swoją przyczynę w wylesieniu i dużej gęstości dróg. Toteż współczesny kierunek i natężenie procesów fluwialnych w małym stopniu nawiązuje do naturalnego układu klimatycznego. Pozostaje zasadniczo pod wpływem niektórych elementów środowiska geograficznego przekształconych przez gospodarczą działalność człowieka.

## LITERATURA

- Adamczyk B., Tokaj J. (1957), *Studia nad glebami górskimi na terenie gromady Sieniawa*, Roczn. Glebozn., 6, s. 163–192.
- Alekin O. A. (1953), *Osnovy gidrochimii*, Leningrad, ss. 296 (tłum. polskie: *Podstawy hydrochemii*, Warszawa 1956, ss. 311).
- Alekin O. A., Braźnikowa L. W. (1962), *O sootnoszenii mieźdu jonnym stokom i stokom wzwiessennyh wieszczestw*, Dokł. Akad. Nauk SSSR (Geochimija), 146, s. 203–206.
- Allen J. R. L. (1968), *Current ripples. Their relation to patterns of water and sediment motion*, Amsterdam, ss. 433.
- Bartnik W., Gładki H. (1972), *Próba określenia intensywności odkładania się rumowiska powyżej zapór przeciwrumowiskowych w zlewni Dunajca*, Gosp. Wodna, 7, s. 253–254.
- Bobrowski W. (1962), *Budanie żwirów Dunajca od Tatr do ujścia*, Przegl. Geol., 12, s. 641–645.
- Bobrowski W., Kociszewska-Musiał G. (1959), *Analizy żwirów Dunajca między Tatrami a Pieninami na tle morfologii i geologii obszaru zlewni*, Kwart. Geol., 3, s. 391–414.
- Bombówna M. (1960), *Hydrochemiczna charakterystyka rzeki Soły i jej dopływów*, Acta Hydrob., 3–4, s. 175–200.
- (1968), *Hydrochemiczna charakterystyka potoku Białka Tatrzańska*, Acta Hydrob., 1–2, s. 27–37.
- (1969), *Hydrochemiczna charakterystyka rzeki Raby i jej dopływów*, Acta Hydrob., 4, s. 479–504.
- Born A. (1958), *Włeczenie materiału dennego w korytach rzek i potoków*, Wiad. Służby Hydrol. Meteor., 2, s. 25–51.
- Brański J. (1966), *Pomiar transportu rumowiska unoszonego jako ważnego elementu przy projektowaniu budowli wodnych*, Gosp. Wodna, 10, s. 375–377.
- (1968a), *Zmęcenie wody i transport rumowiska unoszonego w rzekach polskich*, Prace PIHM, 95, s. 49–67.
- (1968b), *Oznaczanie ilości unosin metodą wagową bezpośrednią przy użyciu sączków*, Prace PIHM, 94, s. 13–21.
- (1971), *Kilka uwag o wielkości transportu rumowiska wleczonego w rzekach górskich*, Gosp. Wodna, 6, s. 204–206.
- Braudeau G. (1951), *Quelques techniques pour l'etude et la mesure du debit solide (A few techniques used for the study and measurement of the discharge of solids)*, La Houille Blanche, spec. nr A. s. 243–252.
- Brown W. M., Ritter J. R. (1971), *Sediment transport and turbidity in the Eel River basin, California*, U. S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 1986, ss. 69.
- Burkalcewa M. A. (1965), *K mietodikie postrojenija zawisimostej  $\Sigma u = f(Q)$  dla podszczeta chemiczkiego stoka gornych riek*, Woprosy Gidr., 2, s. 119–125.
- Chmielewski H. (1969), *Międzynarodowy Układ Jednostek Miar*, Warszawa, ss. 148.
- Chomiak T. (1960), *Badania PIHM nad załadowaniem zbiornika Czchowskiego*, Gosp. Wodna, 12, Biul. PIHM, 12, s. 533.

- Chomiak T., Cyberski J., Mikulski Z. (1969), *Akumulacja rumowiska w zbiornikach retencyjnych*, Prace PIHM, 96, s. 3–20.
- Church M. (1967), *Observations of turbulent diffusion in a natural channel*, Canadian Journ. of Earth Sci., 4, s. 855–872.
- Colby B. R. (1964), *Discharge of sands and mean velocity relationships in sand-bed streams*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 462–A, ss. 64.
- Colby B. R., Hembree C. H. (1955), *Computations of total sediment discharge Niobrara River near Cody Nebraska*, U. S. Geol. Surv. Water-Supply Paper, 1357, ss. 187.
- Corbel J. (1964), *L'erosion terrestre, étude quantitative (Méthodes- Techniques — Resultats)*, Ann. de Géogr., 398 (73), s. 386–413 (tłum. polskie: *Erozja na powierzchni Ziemi — studium ilościowe (Metody — Technika — Wyniki)*, Przegl. Zagr. Liter. Geogr., 2–3, s. 147–180).
- Cyberska K., Cyberski J. (1964), *Wezbranie potoku Świdnik po ulewnych deszczach w maju 1963 r.*, Gazeta Obserwatora PIHM, 2, s. 3–6.
- Cyberski J. (1969), *Sedymentacja rumowiska w zbiorniku rożnowskim*, Prace PIHM, 96, s. 21–42.
- (1970), *Badania akumulacji rumowiska w zbiornikach retencyjnych w Polsce*, Gosp. Wodna, 2, s. 43–46.
- Cyberski J., Pasternak K. (1973), *Skład granulometryczny unosin wód rzek karpackich na tle jakości podłoża ich zlewni*, Probl. Zagosp. Ziem Górskich, 12, s. 131–152.
- Dauksza L., Gil E., Kotarba A., Słupik J., Starkel L. (1970), *Investigations of the research station of the Institute of Geography of the Polish Academy of Sciences at Szymbark near Gorlice*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 4, s. 121–141.
- Dębski K. (1959), *Próba oszacowania denudacji na obszarze Polski*, Prace Kom. Gosp. Wodnej, 2, s. 477–481.
- Dobja A., Partyka J., Kramarz K., Miśków J., Ludian Z. (1970), *Zastosowanie metody malowanych otoczków do badań transportu rumowiska w potoku Rzepedka*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 4, s. 261–268.
- Dobrzański B., Malicki A. (1949), *Gleby województwa krakowskiego i rzeszowskiego*, Ann. UMCS B, 6, s. 117–132.
- Dole R. B., Stabler H. (1905), *Denudation*, U. S. Geol. Surv. Water-Supply Paper, 294, s. 78–93.
- Douglas I. (1964), *Intensity and periodicity in denudation processes with special reference to the removal of material in solution by rivers*, Zeitschr. f. Geomorph., 4, s. 453–473.
- Dudziak J. (1971), *Obserwacje nad współczesnym transportem żwirów w Białce i Czarnym Dunajcu*, Czas. Geogr., 57, s. 147–156.
- Dynowska I. (1971), *Typy reżimów rzecznych w Polsce*, Zesz. Nauk. U. J. (Prace Inst. Geogr.), 50, ss. 155.
- Evans R. (1967), *On the use of welding rod for erosion and deposition pins, (Field methods for the study of slope and fluvial processes)*, Revue de Geomorph. Dynam., 4, s. 165–165 (tłum. polskie: *Współczesne procesy geomorfologiczne. Metody badań*, Przegl. Zagr. Liter. Geogr., 4, s. 102–103).
- Fahnestock R. K. (1963), *Morphology and hydrology of a glacial stream White River, Mount Rainier, Washington*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 422–A, ss. 70.
- Fal B. (1965), *Transport rumowiska unoszonego i rozpuszczonego na środkowej Wiśle oraz próba ustalenia ogólnej masy transportu w rejonie Warszawy*, Prace PIHM, 88, s. 83–92.
- Fal B., Stachy J. (1967), *Przepływy charakterystyczne rzek polskich w latach 1951–1960*, Materiały PIHM, ss. 495.
- Figuła K. (1960), *Erozja w terenach górskich*, Wiad. IMUZ, 4, s. 109–147.
- (1962), *Powódź letnia roku 1960 na karpackich dopływach Wisły w województwie krakowskim*, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 37, s. 45–66.

- (1964), *Podstawy projektowania melioracji przeciwerozwojnych w górach i na pogórzach*, Wiad. IMUZ, 5, s. 17–39.
- (1966), *Badania transportu rumowiska w ciekach górskich i podgórskich o różnej budowie geologicznej i użytkowaniu*, Wiad. IMUZ, 6, s. 131–145.
- Flis J. (1949), *Jak powstała rzeźba Sądeckizny*, Roczn. Sądecki, 2, s. 3–53.
- Florkowski T. (1968), *Suspended load*, Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. International Atomic Energy Agency, Vienna. Tech. Reports, 91, s. 51–55.
- Fournier F. (1960), *Climat et érosion*, Université de Paris. Paris, ss. 201.
- Frécaut R. (1968), *Contribution à l'étude des transports solides de fond des cours d'eau en moyenne montagne océanique*, Mel. of M. Pardé, s. 209–218.
- Froehlich W. (1972), *The carrying out of suspended and dissolved load in the Kamienica Nawojowska and Łubinka catchment basins during the flood in 1970*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 105–119.
- (1973), *Transport of materials by the River Kamienica Nawojowska during meltwater – and rain-fall floods in the Beskid Sądecki Mts (the western Carpathians)*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 7, s. 111–129.
- Froehlich W., Klimek K. (1974), *Struktura osadów małych sztucznych zbiorników w Beskidzie Sądeckim*, Spraw. z Posiedz. Komisji Nauk Geogr. PAN w Krakowie (w druku).
- Froehlich 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*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 63–83.
- 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. Paper, 372–B, ss. 53.
- Gerlach T. (1966), *Współczesny rozwój stoków w dorzeczu górnym Grajcarka (Beskid Wysoki – Karpaty Zachodnie)*, Prace Geogr. Inst. Geogr. PAN, 52, ss. 111.
- *Etat actuel et méthodes de recherches sur les processus morphogénétiques actuels sur le fond des éthages climatiques et végétaux dans les Carpates Polonaises*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 4, s. 47–63.
- Gieysztorowa I. (1971), *Obserwacje nad unosinami w dwóch potokach tatrzańskich*, Przegl. Geogr., 43, s. 391–401.
- Gil E., Słupik J. (1972a), *Hydroclimatic conditions of slope wash during snow melt in the Flysch Carpathians*, Symp. Inter. de Geomorph. Univ. de Liège, 67, s. 75–90.
- (1972b), *The influence of the plant cover and land use on the surface run-off and wash down during heavy rain*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 181–190.
- Glancy P. A. (1971), *Sediment transport by streams in the Chehalis River basin, Washington, October 1961 to September 1965*, U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper, 1798–H, ss. 53.
- Glover R. E. (1964), *Dispersion of dissolved or suspended materials in flowing streams*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper 433–B, ss. 32.
- Gładki H., Myczka J. (1968), *Nowoczesne formuły na ruch rumowiska rzecznoego oraz kierunki ich rozwoju w świetle niektórych publikowanych prac*, Czas. Tech., 7B (119), s. 26–30.
- Golczewski A. (1970), *O trudnościach metodycznych przy projektowaniu zabudowy potoków górskich*, Gosp. Wodna, 4 (278), s. 130–133.
- Gołek J., Kostrzewa H. (1960), *Tymczasowa instrukcja dla obserwatorów punktów obserwacji batometrycznych PIHM (maszynopis)*.
- Guy H. P. (1964), *An analysis of some storm-period variables affecting stream sediment transport*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 462–E, ss. 46.
- Hess M. (1965), *Piętra klimatyczne w polskich Karpatach Zachodnich*, Zesz. Nauk UJ. Prace Geogr., 33, ss. 258.
- 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 Resour. Research, 4, s. 737–747.
- Hubbell D. W. (1964), *Apparatus and techniques for measuring bedload*, U. S. Geol. Surv. Water-Supply Paper, 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. Paper, 424–D, ss. 21.
- Jarocki W. (1957), *Ruch rumowiska w ciekach. Badanie oraz obliczanie ilości materiału wlezonego i unoszonego*, Gdynia, ss. 356.
- Jaworska M. (1968), *Erozja chemiczna i denudacja zlewni rzek Wieprza i Pilicy*, Prace PIHM, 95, s. 29–47.
- Judson S., Ritter D. F. (1964), *Rates of regional denudation in the United States*, Jour. of Geoph. Res. 69, s. 3395–3401.
- Just J., Hermanowicz W. (1955), *Fizyczne i chemiczne badanie wody do picia i potrzeb gospodarczych*, Warszawa, ss. 368.
- Kajetanowicz Z. (1938), *Untersuchungsmethoden der Sinkstoffbewegung in den Flüssen Südpolens*, [w:] *VI Baltische Hydrologische Konferenz Deutschland, August 1938*, Berlin 19D, ss. 19.
- (1954), *Krzywa różnicowa spadku i jej zastosowanie*, Wiad. Służby Hydrol. i Meteor., 4, s. 191–208.
- Kajetanowicz Z., Osuch B. (1962), *Wody powierzchniowe powiatu nowosądeckiego*, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 37, s. 67–88.
- Kaszowski L. (1965), *Współczesne procesy erozji, transportu i sedymentacji w zlewni potoku Tenczyńskiego*, Zesz. Nauk. UJ. Prace Geogr., 12, s. 43–71.
- (1970), *Methods of investigation of contemporary fluvial processes applied in the Kraków centre*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 4, s. 65–79.
- (1973), *Morphological activity of the mountain streams (with Biały Potok in the Tatra Mts. as example)*, Zesz. Nauk. UJ. Prace Geogr., 31, ss. 107.
- Kaszowski L., Kotarba A. (1970), *Wpływ katastrofalnych wezbrań na przebieg procesów fluwialnych (na przykładzie potoku Kobylanka na Wyżynie Krakowskiej)*, Prace Geogr. Instytut. Geogr. PAN, 80, s. 1–87.
- Kaszowski L., Niemirowski M. (1972), *Trends of action and intensity of fluvial processes forming the bottoms of Carpathian valleys in the holocene*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 93–103.
- Kędziora M. (1954), *Stosunki wodne w dorzeczu Kamienicy Nawojowskiej*, Inst. Geogr. Fiz. UJ, ss. 146 (maszynopis).
- Klimaszewski M. (1935a), *Przyczynki 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 Skeidararsandur (Islandia)*, Prace Geogr. Inst. Geogr. PAN, 94, ss. 139.
- Klimek K., Trafas K. (1972), *Young — holocene changes in the course of the Dunajec River in the Beskid Sądecki Mts (Western Carpathians)*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 85–92.
- Kociszewska-Musiał G. (1961), *Analizy żwirów Dunajca od Rożnowa do ujścia*, Biul. Geol. 1, poświęcony VI Kongresowi INQUA, Uniw. Warszawski, s. 126–137.
- Kossakowska-Such J. (1961), *Analiza żwirów Dunajca między Pieninami a Jeziorem Rożnowskim*, Biul. Geol. 1, poświęcony VI Kongresowi INQUA, Uniw. Warszawski, s. 104–125.
- Kotarba A. (1972), *Powierzchniowa denudacja chemiczna w wapienno-dolomitowych Tatrach Zachodnich*, Prace Geogr. Inst. Geogr. PAN, 96, ss. 116.
- Krygowski B. (1964), *Abrasion of sands in the streams of Kwisa (Sudety Mts) and Bialka — Dunajec (Tatra — Carpathians)*, Geogr. Pol., 2, s. 31–38.

- Kucharska-Słupikowa M. (1964), *Analizy żwirów z pokryw czwartorzędowych w dolinie Dunajca*, Zesz. Nauk. UJ. Prace Geogr., 10, s. 13–44.
- Langer M. (1950), *Próby badania ruchu rumowiska na Sole i Dunajcu w roku 1929*, Wiad. Służ. Hydrol. i Meteor., 2, s. 89–93.
- Leighly J. B. (1932), *Toward a theory of the morphologic significance of turbulence in the flow of water in streams*, Univ. of Calif. Publ. in Geogr., 6, ss. 22.
- Leopold L. B., Emmet W. W., Myrick R. M. (1966), *Channel and hillslope processes in a Semiarid area New Mexico*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 352–G, s. 193–253.
- (1967) *On some variations in painting rocks (Field methods for the study of slope and fluvial processes)*, Rev. de Geomorph. Dynam., 4, s. 160–161 (tłum. polskie: *Współczesne procesy geomorfologiczne*, Przegl. Zagr. Liter. Geogr., 4, s. 93–94).
- Lisicyna K. N., Bogolubowa I. W. (1964), *Izuczenije stoka nanosow ruczjew*, Trudy Gosud. Gidrol. Inst., 111, s. 5–33.
- Lustig L. K., Busch R. D. (1967), *Sediment transport in Cache Creek drainage basin in the Coast Ranges West of Sacramento, California*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper 562–A, ss. 36.
- Łopatin G. W. (1959), *Nanosy riek SSSR*, Trudy III Wsiesojuznogo Gidr. Sjezda, 7, s. 207–213.
- Maczawariani N. G. (1972), *Wlijanije razmywajemosti i niekatorych fiziko-miechaniczeskich swojstw gornych porod na formirowanije stoka wzwieszennych nanosow*, Gruz. Polit. Inst. W. I. Lenina Nil. Gidr. i Inż. Gieol., 4, s. 217–224.
- Maczawariani N. G., Dżawachiszwili E. A. (1972), *Opyt primienienija pietrograficzeskich metodow issledowanija pri izuczenii stoka wzwieszennych nanosow*, Gruz. Polit. Inst. W. I. Lenina Nil. Gidr. i Inż. Gieol., 4, s. 235–245.
- Manbycz A. F. (1966), *Wlijanije woln pawodkow gornych riek na raschod nanosow*, Miet. i Gidr., 2, s. 41–43.
- Mapes B. E. (1969), *Sediment transport by streams in the Walla Walla River basin, Washington and Oregon July 1962 – June 1965*, U. S. Geol. Surv. Water-Supply Paper, 1868, ss. 32.
- Maultz S. (1972), *Chemizm wód dopływów górnej Wisły*, Folia Geogr. ser. Geogr. Phys., 6, s. 5–101.
- Menard H. W. (1961), *Some rates of regional erosion*, Jour. of Geol., 69, s. 154–161.
- Mikucki Z., Wiśniewski B. (1960), *Badania nad zamulaniem zbiornika w Porąbce*, Gosp. Wodna, 12, s. 557–559.
- Mikulski Z. (1961), *Transport zawiesiny mineralnej w rzekach polskich*, Gosp. Wodna, 10, s. 461–462.
- (1965), *Zarys hydrografii Polski*, Warszawa, ss. 288.
- Milata W. (1937), *Pokrywa śnieżna w Karpatach*, Prace Studium Turyzmu UJ, 3, s. 3–52.
- Nawara K. (1960), *Skład litologiczny żwirów Białki i Czarnego Dunajca w zależności od frakcji*, Acta Geol. Pol., 10, s. 455–474.
- (1964), *Transport i sedymentacja współczesnych żwirów Dunajca i jego niektórych dopływów*, Prace Muzeum Ziemi, 6, s. 3–111.
- Nečiajienė A., Nečiajus I. (1970), *Lietuvos TSR upėse (Šventoji istirpusių medžiagų nuotakio hidrologinės sąlygos) Zsf. Hydrologische bedingungen des Abflusses der gelösten stoffe einiger flüsse der Litauischen SSR (Schwentojistrom)*, Hydrometeorologiniai Straipsniai, 3, s. 69–72.
- Nevin C. (1946), *Competency of moving water to transport debris*, Bull. Geol. Soc. Amer., 57, s. 651–674.
- Niedźwiedz T. (1972), *Heavy rainfall in the Polish Carpathians during the flood in July 1970*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 194–198.
- Niemirowski M. (1970), *Erozja rzeczna w potokach Jaszce i Jamne*, Folia Geogr. ser. Geogr. Phys., 4, s. 63–82.
- (1972), *Comparison of the effects of flood in two catchment basins of the Gorce Mts. (Beskid Sądecki)*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 201–203.

- Nordin C. F. (1963), *A preliminary study of sediment transport parameters Rio Puerco near Bernardo New Mexico*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 462—C, ss. 21.
- O'Brien M. P. (1933), *Review of theory of turbulent flow and its relation to sediment transportation*, Am. Geophys. Union Trans., 14, s. 487—491.
- Pasławski Z. (1960), *Dokładność rocznego modułu przepływu*, Gosp. Wodna, 2, s. 99.
- (1965), *Rozważania nad metodą badań ilościowych unoszonego rumowiska rzecznego*, Wiad. Służ. Hydrol. i Meteor., 1, s. 77—89.
- Pasternak K. (1968), *Skład chemiczny wody rzek i potoków o zlewniach zbudowanych z różnych skal i gleb*, Acta Hydrob., 10, s. 1—25.
- Pettijohn F. J., Potter P. E., Siever R. (1972), *Sand and sandstone*, Berlin—Heidelberg—New York, ss. 618.
- Pietruszewski W. (1949), *Zabudowa potoków czy zbiorniki retencyjne?* Gosp. Wodna, 6, s. 17—22.
- (1955), *Określenie zasobów szutrów w cofkach zbiorników wodnych*, Gosp. Wodna, 1, s. 31—33.
- Płochniewski Z. (1971), *Własności fizyczne, skład chemiczny i bakteriologiczny wód podziemnych — Lepkość. Poradnik hydrogeologa*, Warszawa, ss. 444.
- Polak S. (1965), *Erozja gleb w obrębie zlewni potoku Brzeźnianka w powiecie Nowy Sącz*, Roczn. Gleb., 15, s. 205—230.
- Porterfield G. (1972), *Computation of fluvial-sediment discharge*, Techniques of Water-Resources Investigations of the U. S. Geol. Surv. (Applications of hydraulics), 3, C3, ss. 66.
- Prandtl L. (1956), *Dynamika przepływów*, Warszawa, ss. 554.
- Prochal P. (1958), *Badanie sieci hydrograficznej oraz stanu zlewni potoku Biała Woda w Jaworkach*, Roczn. Nauk Roln., 72—F—3, s. 1273—1279.
- (1960), *Przyrodnicze i techniczne podstawy walki z erozją gleb w górnym dorzeczu Soły*, Roczn. Nauk Roln., 74—F—2, s. 287—329.
- (1973), *Czynniki wpływające na natężenie zmywów i ruchu rumowiska w zlewni potoku Wierchomla Wielka*, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 151, cz. III, s. 31—48.
- Reniger A. (1955), *Erozja gleb na terenie podgórskim w obrębie zlewni potoku Łukowica*, Roczn. Nauk Roln., 71—F—1, s. 149—210.
- (1958), *Denudacja*, [w:] *Stosunki hydrograficzne poszczególnych regionów Polski*, cz. II, Prace i Studia Kom. Gosp. Wodnej, Warszawa ss. 507.
- Sayre W. W., Chang F. M. (1968), *A laboratory investigation of openchannel dispersion processes for dissolved, suspended and floating dispersants*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 433—E, ss. 71.
- Schick A. P. (1967), *On the painting of all rocks on a small area of surface (Field methods for the study of slope and fluvial processes)*, Revue de Geomorph. Dynam., 4, s. 160 (tłum. polskie: *Współczesne procesy geomorfologiczne. Metody badań*, Przegl. Zagr. Liter. Geogr., 4, s. 92—93).
- Schumm S. A. (1963), *The disparity between present rates of denudation and orogeny*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 454—H, ss. 13.
- Scott K. M., Gravlee G. C. (1968), *Flood surge on the Rubicon River, California hydrology, hydraulics and boulder transport*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 422—M, ss. 40.
- Sharp R. P., Noble L. H. (1953), *Mudflow of 1941 at Wright — wood southern California*, Bull. Geol. Soc. Amer., 64, s. 547—560.
- Sikora W. (1970), *Budowa geologiczna płaszczowiny magurskiej między Szymbarkiem ruskim a Nawojową*, Biul. Inst. Geol. Z badań geol. w Karpatach, 235, s. 5—122.
- Simons D. B., Richardson E. V. (1966), *Resistance to flow in alluvial channels*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 422—J, ss. 61.
- Siemienowa E. S. (1964), *Suteczny chod mutności riek i woprosy stoka nanosow*, Trudy Gos. Gidr. Inst., 111, s. 34—60.
- Słupik J. (1973), *Zróżnicowanie splywu powierzchniowego na fliszowych stokach górskich*, Dokum. Geogr. Inst. Geogr. PAN, 2, ss. 118.



- Sobczak J. (1965), *Krzywe związków między wodostanem a masą transportowaną*, Zesz. Nauk. Polit. Krak. 10, Budow. Wodne, 9, ss. 44.
- (1966), *Przyczynek do obliczania masy transportu rumowiska rzecznego przy zastosowaniu metod statystycznych*, Przegl. Geofiz., 1, s. 37–43.
- Soja R. (1972), *Precipitation and discharge during the flood in July 1970 in the catchment basin of Bystrzanka*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 6, s. 203–206.
- Sowiński A. (1961), *Obliczenia kubatury i analiza krzywych namuleni w zbiorniku w Porąbce*, Gosp. Wodna, 8, s. 358.
- Stangenberg M. (1958), *Ogólny pogląd na skład chemiczny wód rzecznych Polski*, Polskie Arch. Hydrob., 4, s. 289–359.
- Starkel L. (1960), *Rozwój rzeźby Karpat fliszowych w holocenie*, Prace Geogr. Inst. Geogr. PAN, 22, ss. 239.
- (1972a), *Charakterystyka rzeźby Polskich Karpat (i jej znaczenie dla gospodarki ludzkiej)*, Prob. Zagosp. Ziem Górskich, 10, s. 75–150.
- (1972b), *The modelling of monsoon areas of India as related to catastrophic rainfall*, Geogr. Polon., 23, s. 151–173
- Stewart J. H., La-Marche V. C. (1967), *Erosion and deposition produced by the flood of December 1964 on Coffe Creek Trinity Country California*, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 422–K, ss. 22.
- Sundborg A., (1956), *The River Klaralven. A study of fluvial processes*, Geogr. Ann., 38, s. 127–316.
- (1967), *Some aspects on fluvial sediments and fluvial morphology. I. General views and graphic methods*, Geogr. Ann., 49A, 2–4, s. 333–343.
- Szatbieraszwili P. A., (1958), *Wlijanije skorosti na mutnost wody w riekach*, Miet. i Gidr., 9, s. 32–32.
- Thomann R. V., (1973), *Effect of longitudinal dispersion on dynamic water quality response of streams and rivers*, Water Resour. Resea., 9, s. 355–366.
- Tricart J., Vogt H., (1967), *Quelques aspects du transport des alluvions grossieres et du façonnement des lits fluviaux*, Geogr. Ann., 49A, s. 351–366.
- Unrug R., (1957), *Współczesny transport i sedymentacja żwirów w dolinie Dunajca*, Acta Geol. Pol., 7, s. 217–257.
- Welc A., (1972), *Transport zawiesiny w rzece Ropie i Bystrzance oraz rozmiary splukiwania podczas powodzi w lipcu 1970 roku*, Spraw. z Posiedz. Kom. Nauk Geogr. PAN, 15, s. 203–205.
- (1973), *Transport of material carried out from the Bystrzanka catchment area during spring snow melting in 1971*, Studia Geomorph. Carpatho-Balcanica, 7, s. 131–141.
- Węćławik S., (1969), *Łabowa — dolina potoku Łabowiec — potok Uhryń — Kotów — Łabowa (Wycieczka nr 24)*, [w:] *Przewodnik geologiczny po zachodnich Karpatach fliszowych*, red. R. Unrug, Warszawa, s. 223–234.
- Williams K. F., Reed L. A. (1972), *Appraisal of stream sedimentation in the Susquehanna River basin*, U. S. Geol. Surv. Water-Supply Paper, 1532–F, ss. 24.
- Wiśniewski B. (1967), *Zamulenie zbiornika wodnego w Myczkowcach po 5 latach eksploatacji*, Gosp. Wodna, 7, s. 246–247.
- (1969), *Zamulanie zbiorników wodnych w Polsce oraz próba jego prognozy na podstawie intensywności denudacji*, Arch. Hydrot., 16, s. 481–504.
- (1972), *Ilość rumowiska unoszonego i wlezioneo w rzekach polskich*, Gosp. Wodna, 10, s. 381–386.
- Wolman M. G., Miller J. P. (1960), *Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes*, Journ. of Geol., 68, s. 54–74.
- Wolman M. G., Schick A. P. (1967), *Effects of construction on fluvial sediment, urban and suburban areas*, Water Resou. Resea., 3, s. 451–464.

- Vanoni V. A. (1946), *Transportation of suspended sediment by water*, Am. Soc. Civ. Eng. Trans., 3, 67–133.
- Ziemońska Z. (1973), *Stosunki wodne w Polskich Karpatach Zachodnich*, Prace Geogr. Inst. Geogr. 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*, Prace Geogr. Inst. Geogr. PAN 60, ss. 116.
- Żeleznikow G. W. (1972), *Gidrometria*, Moskwa, ss. 255.

## ДИНАМИКА ФЛЮВИАЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В РЕКЕ КАМЕНИЦА НАВОЙОВСКА

### Резюме

#### ОЧЕРК ПРОБЛЕМАТИКИ

Проводившиеся до сих пор работы по изучению механизма и сезонной изменчивости транспорта в преобладающей мере посвящались какой-либо одной из форм речного перемещения (растворенного материала, взвешенных наносов, влекомых наносов). Данные о размерах транспорта, полученные на основании различных, нередко не очень точных методов и немногочисленных замеров, представляли собой некоторые средние либо экстремальные значения, не лишенные крупных сшибок. В результате этого сглаживалась сложная динамика годового цикла перемещения материала; невозможно было сравнить отношение между перемещаемым в разные периоды растворенным материалом и взвешенными и влекомыми наносами, а также сравнить гидрологический режим реки с режимом переноса материала.

Большинство результатов количественного исследования современных флювиальных процессов касается крупных карпатских рек. Как правило, нет соответствующих сведений о их ходе в средней величины бескидских реках. Образовавшиеся вследствие наводнений широкие русла этих рек, устланные валунно-гравийными аллювиальными отложениями, и интенсивная эрозия на участках скального русла позволяют судить о том, что здесь происходят особо интенсивные флювиальные процессы.

Цель настоящей работы — изучить, в годовом цикле, динамику перемещения растворенного материала, взвешенных и влекомых наносов в реке Каменица Навойовска.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стационарные исследования начались осенью 1969 года. Работа основана на результатах замеров за 1970 и 1971 годы. Замеры продолжаются.

Основные гидрологические исследования и замеры транспорта материала велись на водомерном посту Государственного Гидрологическо-Метеорологического Института на реке Каменица Навойовска в гор. Новый Сонч. Было принято предположение, что существующие там условия являются отражением гидрологическо-морфологического режима всего бассейна.

Ежедневно проводившиеся измерения заключались в определении уровня воды, во время поднятий — через каждые 1—3 часов, в зависимости от скорости подъема воды и размеров поднятия. Скорость течения измерялась при различных уровнях воды. Результаты этих измерений, а также результаты измерений, проводившихся Государственным Гидро-Метеорологическим Институтом, использовались для подсчета кривых расхода воды. Одновременно с замерами уровня воды брались её образцы объемом в 1 л с помощью бутылочного бато-

метра. Концентрация взвешенных наносов определялась методом фильтрации, растворенного материала — путем выпаривания 200 мл профильтрованной воды. Содержание органических субстанций определялось путем обжига образцов в температуре 550° С. Механический состав взвешенного материала определялся ареометрическим и микроскопическим методом.

Количество перемещенных влекомых наносов подсчитывалось после каждого поднятия на основании измерения объема аллювиев, отложенных в начале урегулированного бетонными ступенями участка русла около г. Новый Сонч. Прирост аккумуляционных форм и изменения в геометрии русла отмечались на ситуационно-высотном плане масштаба 1:1000. Скорость боковой и глубинной эрозии измерялась в разных разрезах с помощью стальных прутьев. Механический состав аллювиев, в русле и на террасах, определялся с помощью сит. Перемещение отдельных фракций влекомых наносов изучалось с помощью выкрашенной эмалью гальки.

Продолжавшаяся два года серия измерений (около 3200 анализов концентрации растворенного материала и взвешенных наносов, около 2800 штук выкрашенной эмалью гальки) была разработана с применением методов математической статистики.

#### МЕСТО ИССЛЕДОВАНИЙ

Каменица Навойовска — это правобережный приток реки Дунаец. Длина её 32,2 км, средний уклон — 18%. Бассейн реки, поверхностью 239 км<sup>2</sup>, расположен на высоте 1084—280 м н.у.м. и построен из флишевых магурских серий. Здесь преобладают средне- и малоустойчивые породы, типичные для территорий, расположенных к востоку от долины р. Дунаец. Общее направление геологических структур NW—SE совпадает с направлением оси главной долины. Притоки, перпендикулярные к ходу геологических структур, облегчают доставку и перемещение материала.

Более низко расположенные территории бассейна (до 550 м н.у.м.) главным образом занимают пашни (35% бассейна). Выше преобладают леса (42% бассейна).

Бассейн Каменицы Навойовской представляет собой средней величины бескидский бассейн среднегорного рельефа со значительной долей высоких и средних возвышенностей. Уменьшение пределов молодых террас вверх по реке, а также глубина расщепления скального основания свидетельствуют о поступающем снизу расщеплении зрелого профиля гляциального периода. По-видимому, одной из причин является также все еще выступающая тенденция к поднятиям в цепи Сондецкого Бескида. Интенсивное углубление русла за последнее десятилетие вызвано его регуляцией и эксплуатацией аллювиев р. Дунаец для промышленных целей.

Сходные условия географической среды Бескидов позволяют отнести полученные результаты изучения годового цикла перемещения материала в Каменице Навойовской к другим средней величины бескидским рекам.

#### ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Каменица Навойовска это типичная бескидская река дождево-снего-грунтового режима питания с концентрацией стока во время весенних поднятий вследствие таяния снега и летних дождевых паводков (рис. 7). Среднее годовое течение (1961—1970 гг.) достигало в Новом Сонче 3,36 м<sup>3</sup>/с — 14,1 л/с с 1 км<sup>2</sup> (табл. 1). За большую часть года (около 200 дней) замечается течение, близкое средней годовой (рис. 13). Летние дождевые поднятия с кульминацией до 100 м<sup>3</sup>/с выступают в среднем через 3—5 лет (рис. 18). Течение по всему руслу начинается на отдельных участках при расходе около 40 м<sup>3</sup>/с; а при около 200 м<sup>3</sup>/с — на всем протяжении реки. Через каждые десять с лишним лет имеют место экстремальные наводнения, превышающие 300 м<sup>3</sup>/с и 1300 л/с с км<sup>2</sup> (рис. 5, 8—10, 17; табл. III). Весенние паводки

(февраль — апрель) достигают кульминации только до  $70 \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 9—11). Межени появляются чаще всего на исходе лета и часто, с небольшими перерывами, продолжают осенью и зимой (рис. 6, 9—11).

Период исследований (1970—1971 гг.) представляют два основных типа гидрологических лет в Каменице Навойовской, характеризующиеся различной концентрацией стока. Максимальная концентрация стока в 1970 году выступила в летний период, а в 1971 — во время весеннего таяния снегов (рис. 51, 53). Сопоставление кривых продолжительности течения за период исследований и за десятилетие (1961—1970) показывает, что 1970 год был „мокрым“, 1971 — „сухим“ (рис. 12).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На транспорт материала уходит значительная часть энергии рек. Сложный механизм транспорта в течение года связан в основном с периодическими изменениями в условиях поставки материала в русло и способностями реки к его перемещению.

В годовом цикле выноса материала самые незначительные колебания замечаются в транспорте растворенного материала (рис. 10, 11; табл. VI). Во время глубоких межени большая концентрация растворенного материала связана с грунтовым питанием реки и выщелачиванием подземного бассейна. Самое крупное выступает осенью и зимой, весной оно меньше, чем летом (рис. 29). После превышения среднего годового течения выступают незначительные различия во время каждого поднятия (рис. 25). Амплитуда изменений концентрации растворенного материала во время поднятий не совпадает с колебаниями течения (рис. 14—17, 19—22), что указывает на значительную инертность растворимости пород по отношению к гидрологическим изменениям. Самая малая концентрация выступает во время кульминации течения и вызывается большим разжижением раствора, связанным с протоком воды через сильно выщелоченные поверхностные слои почвы. С течением реки замечается постепенный рост материала, растворенного во время поднятий (рис. 28). Это указывает на сильную продольную дисперсию растворенного материала, связанную со значительными скоростями течения воды во время поднятий.

Изменения в концентрации растворенного материала обратно пропорциональны течению. Эту связь приближает уравнение гиперболы  $y = ax + b/x$  (рис. 23, 25, 29). Перемещаемое количество материала изменяется прямо пропорционально течению. Эту зависимость можно представить с помощью линейного уравнения  $y = ax + b$  (рис. 24, 26, 30). Эта связь свидетельствует о совпадении режима перемещения растворенного материала с режимом оттока.

Продолжительность определенных течений за год прямо пропорциональна продолжительности течения заряда растворенного материала и обратно пропорциональна продолжительности отдельных значений концентрации (рис. 32, 33). Растворенный материал может составлять от 10 до свыше 50% полного годового заряда, в сухие же годы может быть больше заряда взвешенных наносов (табл. XII). Поднятия перемещают от  $1/3$  до  $2/3$  годового заряда растворенных наносов (табл. IX).

Максимум мутности, как правило, опережает кульминацию течения (рис. 14, 16, 20—22). При такого рода течениях каждое поднятие характеризуется иной интенсивностью перемещения взвешенных наносов, отражающейся в характерной для каждого поднятия форме петли, которая показывает на связь между течением воды и зарядом взвешенных наносов (рис. 36—38). Поэтому каждое интерполяционное приближение мутности воды для более продолжительного периода времени без замеров будет ошибочно. Дифференцированный ход петли связан со значительной изменчивостью погоды в течение года, влияющей на характер поднятий и условия поставки мелкой рыхлой дровсы. В этом отражается переходность нашего климата. Интенсивность перемещения взвешенных наносов в течение года зависит главным образом от: 1) бурности роста течения воды; 2) продолжительности вре-

мени между поднятиями, в течение которого накопился запас мелкой рыхлой дресвы на поверхности почвы, пригодной для перемещения; 3) различной защитной роли растительного покрова в вегетационный период; 4) температуры воды.

Расход взвешенных наносов во время поднятий усиливается степенно по отношению к течению воды. Концентрация взвешенных наносов возрастает как 1,3—1,6 степени течения, а заряд — как 2,3—2,6 (рис. 41, 42). Река стремится к возможно наибольшему в данных гидродинамических условиях расходу взвешенных наносов. С моментом приведения в движение донных наносов река „догружается” мелкими наносами из русла. Во время усиления волны поднятий типичным является участие более крупных фракций взвешенных наносов, возрастающих пропорционально величине и бурности течения. Во время снижения уровня воды взвешенные наносы становятся все мельче и однороднее в гранулометрическом отношении, большой становится доля коллоидальной фракции (табл. VII).

Отсутствие прямой связи между течением воды и перемещаемым зарядом взвешенных наносов приводит к несовпадению режима перемещения заряда взвеси с режимом оттока (рис. 51, 53). Во время поднятий за пределы бассейна выносятся свыше 90% годового заряда взвеси (табл. XII). Доля взвеси в полном заряде выносимых наносов может в экстремальном году превышать 85%.

Перемещение влекомых наносов происходит на небольших расстояниях исключительно во время крупных поднятий. Резкий скачкообразный рост течения вызывает значительно большее перемещение влекомых наносов, чем постепенно нарастающее крупное течение. На всей протяженности реки приведенный в движение заряд донного материала часто бывает очень большим, а осеженная галька могла бы указывать на крупное перемещение. Однако количество влекомых наносов, вынесенных за определенные пределы, невелико. В течение года доля влекомых наносов в полном заряде перемещенного материала не превышает 5% (табл. XII). В настоящее время поставка наносов для донного перемещения ограничивается зонами активных обрывов и дна русла.

Определение размеров современной механической денудации бассейна в единицах массы или объема выносимого с 1 км<sup>2</sup> поверхности (так называемый показатель денудации) материала на основании перемещаемого рекой заряда взвешенных и влекомых наносов представляет собой далеко идущее упрощение. Перемещаемый материал не выносятся равномерно со всей территории бассейна, а, в основном, с сети дорог и грунтовых тропинок, а также с русла. И поэтому может служить только как основание для сопоставления вымывания наносных материалов из разных бассейнов, а не размеров денудации, тем более, что показатели денудации зачастую основаны только лишь на количестве выносимой взвеси. Замена единиц массы перемещаемого материала единицами объема с применением „универсального коэффициента 2,5 (Дж. Корбель 1964) может привести к значительным погрешностям, вытекающим из различий между объемным и собственным весом отдельных видов пород, дресвы и перемещаемого рекой материала.

Учитывая уровень наполнения русла, размеры перемещения влекомых наносов, а также интенсивность и направление преобразований русла, я различаю четыре категории поднятий разной величины: 1) небольшие поднятия; 2) средние; 3) крупные; 4) экстремальные.

Принимая во внимание качественные параметры: способ питания реки, изменяющуюся в разное время года защитную роль растительности, условия поставки материала в русло и количественные черты перемещения, как: отношение вынесенных зарядов растворенного материала к заряду взвешенных наносов и заряду влекомых наносов, а также долю в перемещении годового заряда материала, было в ходе исследований выделено пять морфогенетических типов поднятий: 1) поднятия, вызванные таянием снегов; 1А) инсоляционно-адвекционные поднятия; 1Б) адвекционные и адвекционно-осадковые поднятия; 2) весенние и летние дождевые поднятия; 3) катастрофические дождевые наводнения; 4) поднятия на исходе лета и осенью, вызванные проливными дождями; 5) поднятия на исходе лета и осенью,

вызванные резкими осадками после засушливого периода. В качестве шестого типа перемещения были приняты периоды между поднятиями.

Концентрация оттока во время поднятий имеет большое значение для интенсификации и количества материала, выносимого из бассейна Каменицы Навоювской. В период исследований в мокром 1970 году с катастрофическим наводнением было вынесено 32637 т растворенного материала, 285769 т взвеси и 12390 т влекомых наносов; в сухом же 1971 г., без наводнения, было вынесено 16629 т растворенного материала, 14168 т взвеси и 496 т влекомых наносов (табл. XII). В годы без более крупных поднятий заряд растворенного материала может оказаться больше заряда взвешенных наносов.

Доля поднятий в перемещении всего годового заряда может составлять от 60—95%. Перемещенный во время катастрофических дождевых наводнений заряд взвешенных и влекомых наносов соответствует заряду, перемещаемому в течение десяти „нормальных” лет.

По сравнению с прочими поднятиями катастрофические наводнения выполняют самую крупную работу в области перемещения материала, моделирования русла и поймы.

По М. Г. Вольману и Й. П. Миллеру (1960) самая большая доля работы в геоморфологических процессах приходится на средней величины силы, выступающие чаще катастрофических, необычных размеров. На примере катастрофических наводнений, выступающих в Бескидах через каждые несколько лет, можно судить, что в условиях средних гор умеренного переходного климата тезис М. Г. Вольмана и Й. П. Миллера (1960) не находит подтверждения по отношению к флювиальным процессам.

Современная эксплуатация аллювиев из русла и ограниченная поставка крупного материала со склонов ведут к общему „дефициту” донного материала. Во время поднятий способность реки перемещать наносы превышает возможности поставки крупного материала. Это и является причиной избытка энергии, используемого на углубление русла. Этот процесс совпадает с голоценовой тенденцией к глубине эрозии и ускоряет её. Причиной расширения русла на аккумуляционных участках и тенденции к образованию разветвлений, а также бурности поднятий и большой доли взвеси в перемещаемом заряде материала являются отсутствие лесов и большая густота дорог. Поэтому современное направление и интенсивность флювиальных процессов лишь в незначительной степени зависят от естественных климатических условий, находясь, в основном, под влиянием превращенных человеком элементов географической среды.

Институт географии Польской Академии Наук  
Отделение физической географии в Кракове

*Перевел Даниель Норович*

## THE DYNAMICS OF FLUVIAL TRANSPORT IN THE KAMIENICA NAWOJOWSKA

### Summary

#### OUTLINE OF THE PROBLEM

The works published by now on the mechanism and seasonal changeability of fluvial transport are in most cases devoted to learn only one of the forms of this transport (dissolved material, suspended material, dragged material). The size of transport obtained owing to various, often little accurate methods and scarce measurements provides in effect some mean, or extreme values burdened with considerable faults. They obliterate the complex dynamics of the yearly cycle of removing material. They make it impossible neither to compare the ratio of removed, suspended and dragged material carried away in various time-periods, not to compare the hydrological regime of the river with the regime of the removal of material.

Most results of quantitative studies in the present-day fluvial processes relate to great rivers of the Carpathians. Essentially, there is lack of informations on the course of these processes in the middle-size rivers of the Beskidy Mts. Broad channels of flood-time of these rivers strewn with bouldergravelly alluvia, as well as intensive erosion in reaches of rocky bed suggest there take place fluvial processes of especial intensity.

The aim of the paper is to learn -in the annual cycle-the dynamics of transport of the dissolved, suspended and dragged material in the Kamienica Nawojowska.

#### METHODS OF RESEARCH

The stationary investigations were started in autumn 1969. The paper is based on the results of measurements carried out in 1970 and 1971, which are still continued.

Basic hydrologic investigations and the measurements of transport were done basing on a water-gauge of the PIHM, on the Kamienica Nawojowska at Nowy Sącz. It was assumed that the conditions there reflect the hydrologic-morphological regime of the whole catchment basin.

Each-day measurements consisted in reading the water-stages which, during raised water-stages were carried out more often, at intervals of 1-3 hours, in dependence on the velocity of water rise and the size of high water. The measurements of water velocity were performed at various stages, which apart from the results of measurements by the PIHM were used to calculate the curves of discharge. Together with the measurements of waterstages were taken samples of the water (1 litre in volume) by means of a bottle bathymeter. The concentration of suspended material was determined by a filter method. Concentration of the dissolved load has been fixed due to evaporation of 200 millilitres of filtrated water. Grain size composition has been measured using areometric and microscopic methods.

The load of dragged material removed was calculated after each raised water-stage, basing on measurements of volume of deposited alluvia at the inlet of a -strengthened by concrete steps -bed's reach near Nowy Sącz. The accretion of accumulation forms, as well as changes in the geometry



of the bed were plotted on a situation-hypsometrical plan on scale 1:1000. The rate of lateral and deep erosion was measured at various cross-sections by means of steel rods. The grain-size of bed and terrace alluvia was determined using the sieves. The transport of particular fractions of dragged material was determined by means of enamel-painted pebbles and gravel-catchers.

The two-year's series of measurements (some 3200 analyses of the concentration of dissolved and suspended material, about 2800 enamel-painted pebbles) was worked out making use of the methods of mathematical statistics.

#### AREA OF RESEARCH

The Kamienica Nawojowska is a right-bank tributary of the Dunajec. Its length is 32.3 km and the mean gradient 18‰. Its catchment basin, 239 sq. km, lies at 1084–280 m a. s. l. It is built of the Magura flysch unit. As far as rock-resistance is concerned there prevail medium and little resistant rocks typical of the areas east of the Dunajec valley. The general direction of geological structures NW–SE is accordant to the axis of the master valley. The tributaries perpendicular to the course of geological structures favour the supply and removal of material.

The lower-lying portions of the catchment basin (up to 550 m a. s. l.) are covered mainly by farmland (35% of the catchment basin). Higher up there dominate forests (42% of the catchment basin).

The catchment basin of the Kamienica Nawojowska represents a Beskid catchment basin of medium size with middle-mountain relief characterized by a considerable share of high and middle foothills. The decreasing range of young terraces up the river, as well as the depth of incision of the rock pedestal point to the incision of the already mature profile of the glacial period, proceeding upstream. This is probably also caused by continued upward tendencies in the range of the Silesian Beskid. The intensive deepening of the bed in the last decade has been brought about by its regulation and the exploitation of the Dunajec alluvia on industrial scale.

Similar conditions of the geographical environment of the Beskidy Mts justify to extrapolate in part the results of investigations on the annual cycle of the transport of material to other medium-size rivers of the Beskidy Mts.

#### HYDROLOGIC CHARACTERISTIC

The Kamienica Nawojowska is a typical Beskid river with rain-snow-ground regime of alimentation, and the concentration of run-off during spring raised water-stages and those due to summer rainfalls (Fig. 7). The mean annual discharge (1961–1970) at Nowy Sącz was 3.36 cu. m per sec – 14.1 l per sec per one sq. km (Table I). Throughout the overwhelming part of the year (some 200 days) there occurs discharge similar to the mean annual one (Fig. 13). Raised water-stages due to summer rainfalls with culminations up to 100 cu. m per sec appear, on the average, every 3–5 years (Fig. 18). The bankful discharge starts in particular reaches at a discharge of about 40 cu. m per sec. while at one of about 200 cu. m per sec it effects the whole length of the river. Every more than ten years there appear rapid extreme floods exceeding 300 cu. m per sec and 1300 l per sec per one sq. km (Fig. 5, 8–10, 17; Table III). Spring raised water-stages due to thaw (February–April) reach culminations not exceeding 70 cu. m per sec. (Fig. 9–11). Low water-stages appear most often at the decline of summer and often last with short intervals in autumn and winter (Fig. 6, 9–11).

The period in question (1970–1971) represents two basic types of hydrologic years in the Kamienica Nawojowska, characterized by a different concentration of run-off. The maximum concentration of run-off in 1970 coincided with the summer, while that in 1971 with the period of spring thaw (Fig. 51, 53). The mutual relation of the curves of discharge duration in the period in question and in the decade (1961–1970) points out that the year 1970 was a „wet” year, while 1971 a „dry” one (Fig. 12).

## RESULTS OF INVESTIGATIONS

The transport of material by rivers requires a considerable portion of their energy. The complex mechanism of transport throughout the year is connected essentially with periodical changes in the conditions of the supply to the bed, as well as with transportation abilities of a river.

In the annual cycle of removing material the least oscillations are shown by transport of dissolved material (Fig. 10, 11; Table III). During very low water-stages the great concentration of dissolved material is connected with ground alimentation of the river, and with leaching of the underground catchment basin. The greatest concentration is found in autumn and winter, while in spring it is smaller than in summer (Fig. 29). After crossing the meanyearly discharge it shows slight differences during each raised water-stage (Fig. 25). The range of changes in the concentration of dissolved material during raised water-stages does not follow the oscillations of water discharge (Fig. 14–17, 19–22). This points to a great inertia of the dissolution of rocks in relation to hydrological changes. The least concentration occurs during the culmination of discharge, and is brought about by the major dilution of the solution, due to the flow of water through heavily leached superficial layers of soil. Downstream, there is marked a slow increase in the concentration of dissolved material during raised water-stages (Fig. 28). This points to a strong oblong dispersion of the dissolved material.

Changes in the concentration of dissolved material are inversely proportional to the discharge. This relation is approximated by a hyperbola equation  $y = ax + b/x$  (Fig. 23, 25, 29). The load transported changes directly proportionally to discharge. The dependence may be expressed by means of a linear equation  $y = ax + b$  (Fig. 24, 26, 30). This relation testifies to the accordance of the regime of removing dissolved material with that of run-off.

The duration of particular discharge of water throughout the year is directly proportional to the duration of flow of dissolved material, and inversely proportional to the duration of particular values of concentration (Fig. 32, 33). Material in solution may constitute from 10% to more than 50% of the whole annual load, and in dry years it can be greater than the load of suspended material carried away (Table XII). Raised waterstages carry away from one third to two third of the annual load of dissolved material (Table IX).

The maximum turbidity usually precedes the culmination of the discharge (Fig. 14, 16, 20–22). With similar discharge each raised water-stage is characterized by a different intensity of transport of suspended material, this being revealed by an individual shape of a loop for each raised water-stage, expressing the relation between water discharge and the load of suspended material (Fig. 36–38). Therefore, each interpolation approximation of water turbidity for a longer span of time, devoid of measurements, will be encumbered with faults. The differentiated course of the loop reflects the great variability of the weather throughout the year, which effects the character of raised water-stages and the conditions of supply of fine loose debris. This reflects the transition character of our climate. The intensity of transport of suspended material throughout the year depends mainly on: 1) the rapidity of discharge increase; 2) the duration of the period preceding raised water-stage in which were stored „reserves” of fine loose debris on the surface of the ground-capable of being put in motion; 3) various role of protecting plant-cover during the growing season; 4) the temperature of the water.

The load of suspended material in a river increases exponentially during raised water-stages in relation to the discharge of water. The concentration of suspended material grows like 1.3–1.6 power of the discharge, and that of the load as 2.3–2.6 power (Fig. 41, 42). The river tends to achieve the possible greatest load of suspension in the given hydrodynamic conditions. With putting in motion the bed load the river becomes loaded “to the full” with fine material derived from the bed. During the increase of a flood-wave typical is the share of coarse fractions of suspended material rising proportionally to the size and rapidity of the discharge. During the fall of a water-stage the material in suspension becomes finer and granulometrically similar, with a large share of colloidal fraction (Table VII).

There lacks simple relation between the discharge of water and the load of transported material in suspension, which causes discordance between the regime of the removal of material in suspension and the regime of discharge (Fig. 51, 53). During the floods more than 90% of the yearly load of material in suspension is carried away beyond the catchment basin (Table XII). The share of suspended material may exceed as much as 85% in an extreme year.

Transport of dragged material takes place over short distances, and only during high raised water-stages. The sudden step rise of discharge brings about much more greater transport of dragged material than the slowly raising discharge. Along the whole length of a river the load of bed material in motion is often very serious, and the renewed gravel banks suggest heavy transport. However, the amount of dragged material removed beyond a given cross-section is small. During the year the share of dragged material in the overall load of removed material does not exceed 5% (Table XII). Nowadays, the supply of material to the bottom transport is confined to the zones of active undercuttings and to the bed's floor.

The determination of the size of present-day mechanical denudation in the units of mass, or the volume of material removed from 1 sq. km (the so-called denudation index) is basing on the load of suspended and dragged material carried away by rivers — a far-reaching simplification. Material transported is not removed steadily from the whole area of a catchment basin. It comes mainly from the network of roads and field paths, as well as from the bed. Therefore, it may only be a base for comparisons on the clearing of material from various basins but not on the size of denudation, the more that denudation indices base very often on the material removed in suspension. The applied conversion of mass units of transported material into the units of volume by means of the "universal" coefficient 2.5 (J. Corbel 1964) may lead to considerable faults resulting from differences in the volumetric and specific gravity of particular kinds of rocks, debris and material transported, in the rivers.

Basing on the amount of water in the bed, the size of dragged material transported, and the intensity and trend of bed's transformation the author distinguishes four categories of raised water-stages varying in size: 1) low raised water-stage; 2) medium raised water-stage; 3) high raised water-stage; 4) extreme raised water-stage.

Taking into consideration the qualitative parameters such as the mode of alimentation, varying protective role of vegetation during the year, conditions of the supply of material to the bed, as well as the quantitative features of transportation such as: the ratio of removed loads of dissolved material to those of suspended and dragged material, and the share in removing the yearly load of material, the author distinguished during his research five morphogenetic types of raised water-stages: 1) raised water-stages due to thaw; 1A) insolation-advective raised water-stages; 1B) advection and advection-rainfall raised water-stages; 2) spring and summer rainfall raised water-stages; 3) catastrophic rainfall floods; 4) raised water-stages at the decline of summer and in autumn, due to rains lasting a few days; 5) raised water-stages at the decline of summer and in autumn, due to rapid downpours after a period of draught. The sixth type are the periods between the successive raised water-stages.

The concentration of run-off during raised water-stages is of great importance for the intensity and amount of material removed from the catchment basin of the Kamienica Nawojowska. In the research period, in a wet 1970 there were carried away as many as 32637 tons of dissolved material, 285 769 tons of suspended material, and 12390 tons of dragged material. On the other hand, in a dry 1971 devoid of floods, there were removed 16629 tons of dissolved material, 14168 tons of suspended material, and 496 tons of dragged material (Table XII). In the years without major raised water-stages the load of dissolved material can be greater than that in suspension.

The share of raised water-stages in carrying away the entire annual load may amount to 60–95%. The material removed during catastrophic rainfall floods, both in suspension and along the bed, is equivalent to the load carried away during ten "normal" years. In comparison with other

raised waterstages the catastrophic floods do harder work in transporting the material, and modeling the bed and the flood-plain.

According to M. G. Wolman and J. P. Miller (1960) the heaviest part of work in geomorphological processes is done by medium-size forces occurring more often than the catastrophic ones of extraordinary sizes. On an example of catastrophic floods occurring in the Beskidy Mts every few years, one may judge that in conditions of middle-mountains of the transition temperate climate, the thesis by M. G. Wolman and J. P. Miller (1960) does not find confirmation with respect to fluvial processes

The present-day exploitation of alluvia from the bed, and the limited supply of coarse material from the slopes lead to a general "lack" of bed load. During raised water-stages the transportation ability of the river exceeds the possibility of the supply of coarse material. This is the reason of excess energy which is directed towards deepening the bed. This process overlaps the Holocene tendency towards deep erosion, and causes it to act quicker. The broadening of the bed in accumulation reaches and the tendency towards forming braiding channels, as well as the rapidity of floods and the great share of suspended material in the load of material removed — all these have their reason in the deforestation and great density of roads. Therefore, the present-day trend and the intensity of fluvial processes reflect, to a low degree, the natural set of climatic conditions. They remain essentially under the influence of elements of the geographical environment transformed by man.

Geographical Institute, PAN  
Department of Physical Geography  
Cracow

*Translated by Krzysztof Czekierda*

92. Czyż T., *Zastosowanie metody analizy czynnikowej do badania ekonomicznej struktury regionalnej Polski*. 1971, s. 114 + 13 ilustr. + 11 map pod opaską, zł 38,—
93. Kostrubiec B., *Analiza zjawisk koncentracji w sieci osadniczej. Problemy metodyczne*. 1972, s. 117 + 43 ilustr., zł 24,—
94. Klimek K., *Współczesne procesy fluwialne i rzeźba równiny Skeidararsandur (Islandia)*. 1972, s. 139 + 31 ilustr. + 48 fot., zł 32,—
95. Kraujalis M. W., *Udział ciepła ze sztucznych źródeł w bilansie cieplnym na obszarze Polski*. 1972, s. 74 + 10 ilustr., zł 12,—
96. Kotarba A., *Powierzchniowa denudacja chemiczna w wapienno-dolomitowych Tatrach Zachodnich*. 1972, s. 116 + 24 ilustr. + 15 fot., zł 24,—
97. Jerczyński M., Chaves L. F., Siemek Z., *Studia nad strukturą funkcjonalną miast*. 1973, s. 385 + 96 ilustr., zł 80,—
98. Praca zbiorowa. *Zmiany w rolnictwie tradycyjnym i migracje ludności wiejskiej w krajach rozwijających się (Irak, Maroko, kraje Afryki Zachodniej, kraje andyjskie)*. 1973, s. 179 + 6 ilustr., zł 34,—
99. Kozłowska-Szczęśna T., *Promieniowanie pochłonięte na obszarze Polski*. 1973, s. 119 + 34 ilustr., zł 22,—
100. Biegajło W., *Typologia rolnictwa na przykładzie województwa białostockiego*. 1973, s. 164 + 30 ilustr., zł 35,—
101. Werwieki A., *Struktura przestrzenna średnich miast ośrodków wojewódzkich w Polsce*. 1973, s. 168 + 49 ilustr., zł 30,—
102. Matusik M., *Próba typologii i regionalizacji rolnictwa na obszarze Dolnego Powiśla*. 1973, s. 152 + 30 ilustr. + 6 fot., zł 32,—
103. Ziemońska Z., *Stosunki wodne w polskich Karpatach Zachodnich*. 1973, s. 124 + 23 ilustr., zł 25,—
104. Drozdowski E., *Geneza Basenu Grudziądzkiego w świetle osadów i form glacialnych*. 1974, s. 139 + 41 ilustr. + 17 fot., zł 32,—
105. Pulina M., *Denudacja chemiczna na obszarach krasu węglanowego*. 1974, s. 159 + 52 ilustr. + 10 fot., zł 36,—
106. Baumgart-Kotarba M., *Rozwój grzbietów górskich w Karpatach fliszowych*. 1974, s. 136 + 39 ilustr. + 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 ilustr., zł 30,—
108. Leszczycki S., *Problemy ochrony środowiska człowieka*. 1974, s. 88 + 7 ilustr. + 4 wkl., zł 22,—
109. Gawryszewski A., *Związki przestrzenne między migracjami stałymi i dojazdami do pracy oraz czynniki przemieszczeń ludności*. 1974, s. 155 + 18 ilustr., zł 35,—
110. Żurek S., *Geneza zabagnienia Pradoliny Biebrzy* (w druku)
111. Jankowski W., *Land use Mapping, Development and Methods* (w druku)
112. Dramowicz K. K., *Symulacja cyfrowa i analiza systemowa w badaniach nad procesami urbanizacji wsi (model gromady Biała Stara, powiat plocki)* (w druku)
113. Żurek A., *Struktura przestrzenna przepływów ludności miast woj. kieleckiego* (w druku)

#### Varia

*Centralny katalog zbiorów kartograficznych w Polsce*

Zeszyt 1. *Katalog atlasów i dzieł geograficznych 1482—1800*. 1961, s. 248, zł 72,—

Zeszyt 2 (uzupełniający). *Katalog atlasów i dzieł geograficznych 1482—1800*. 1963, s. 124, zł 28.—

Zeszyt 3. *Katalog atlasów 1801—1919*. 1965, s. 343, zł 76,—

Zeszyt 4. *Katalog atlasów 1920—1945*. 1968, s. 160, zł 48,—



# W. FROELICH, DYNAMIKA TRANSPORTU FLUWIALNEGO