

*Tomasz Gacek*

Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii  
(obecnie: Tukaj Mapping Central Europe, Kraków)

## **CZYNNIKI DOSTAWY FOSFORU DO WÓD POWIERZCHNIOWYCH NA POGÓRZU KARPACKIM**

*Zarys treści:* W pracy przedstawiono wyniki badań nad czynnikami i procesami, warunkującymi przemiany fosforu w małej pogórskiej zlewni rolniczej na przykładzie Dworskiego Potoku na Pogórzu Wiśnickim. Stężenie fosforanów w wodach powierzchniowych w okresach pozawezbraniowych jest wyrównane i pozostaje w równowadze kształtowanej przez charakter wód podziemnych, wód śródpokrywowych oraz cechy osadów dennych. Stwierdzono silną zależność pomiędzy stężeniem fosforanów a wielkością przepływu. Spływ powierzchniowy jest głównym źródłem fosforu w wodach powierzchniowych w czasie wezbrania. Przestrzenne zróżnicowanie zawartości fosforu w glebach i osadach zależy od natężenia procesów erozyjnych. Obszary najsilniej erodowane są najuboższe w fosfor.

*Słowa kluczowe:* chemizm wód, fosfor w wodzie rzecznej, Pogórze Karpackie.

*Key words:* water chemistry, phosphorus in stream water, Carpathian Foothills.

### **1. Wstęp**

Fosfor, jest biogenem warunkującym przebieg procesu eutrofizacji w wodach słodkich (Klapper, 1991). Procesy rządzące dostawą fosforu do wód nie są w pełni poznane. Znaczna liczba, zmiennych w czasie i przestrzeni, czynników fizycznych i chemicznych, decyduje o przemianach tego biogenu

**Celem** badań, przeprowadzonych w małej, rolniczej zlewni Dworskiego Potoku (Pogórze Wiśnickie), było poznanie czynników i procesów kształtujących zawartość fosforu w wodach powierzchniowych poprzez zbadanie przemian, jakim podlega fosfor, ze szczególnym uwzględnieniem roli wezbrań w transporcie tego biogenu.

## 2. Występowanie i przemiany fosforu w przyrodzie

Fosfor w glebie pochodzi z wietrzenia minerałów skałotwórczych zawierających ten pierwiastek, z mineralizacji substancji organicznej oraz z nawozów mineralnych i organicznych. Najwięcej fosforu występuje w warstwie ornej (próchnicznej) oraz w najdrobniejszej frakcji glebowej (części spławialne) (Chodań, Grzesiuk, Mirowski, 1984). Wyróżnia się dwie grupy związków fosforu w glebach: mineralne i organiczne.

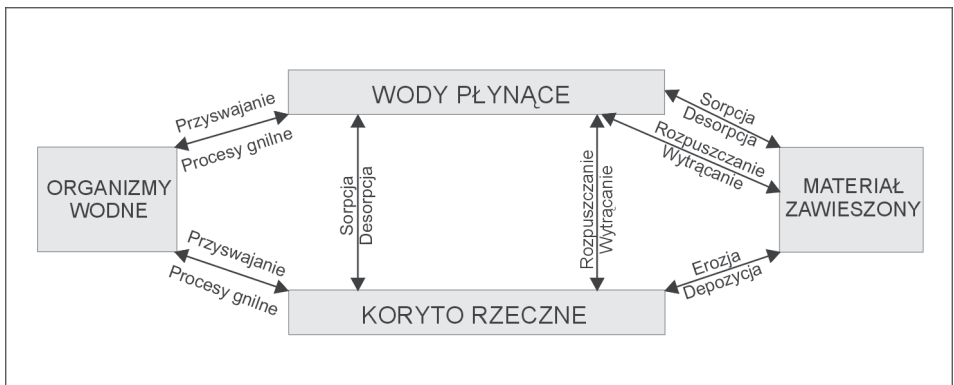
Mineralne związki fosforu to głównie połączenia z wapniem, których rozpuszczalność maleje ze wzrostem zasadowości (Koter, 1987) oraz fosforany glinu i żelaza, występujące przede wszystkim w glebach kwaśnych nieprzepuszczalnych, mineralnych i torfowych.

Organiczne związki fosforu występują w żywych organizmach, szczątkach i połączeniach próchnicznych. Fosfor związków organicznych, w odróżnieniu od fosforu związków mineralnych, jest stale uwalniany do gleby w wyniku rozkładu substancji organicznej (Dobrzański, 1981). Jony fosforanowe uwalniane podczas procesów wietrzenia minerałów, mineralizacji substancji organicznej oraz dostarczane z nawozami, są w glebie bardzo szybko wiązane lub wytrącane. Zjawisko to nosi nazwę retrogradacji lub uwstecznienia.

Istotnym źródłem fosforu obecnego w wodach jest fosfor uwalniany z gleb w procesie wymywania. Pochodzi on z procesów wietrzenia cząstek mineralnych oraz dekompozycji materii organicznej. Stąd formy fosforu zawartego w wodzie są genetycznie związane lub wręcz identyczne z opisanymi w środowisku glebowym. Duże znaczenie w zasilaniu wód powierzchniowych w fosfor mogą mieć ścieki bytowe lub przemysłowe. Nie są one jednak przedmiotem rozważań w pracy.

Fosfor może być klasyfikowany na podstawie stanu fizycznego i typu chemicznego (Logan, 1982). Na całkowitą pulę fosforu w środowisku wodnym składa się fosfor rozpuszczony oraz fosfor w fazie stałej, związany w osadach rzecznych lub materiale zawieszonym. Wszystkie formy fosforu w wodzie pozostają w równowadze dynamicznej, jednak ich wzajemne proporcje zmieniają się w zależności od warunków fizykochemicznych. Za przemiany fosforu odpowiedzialne są następujące procesy: sorpcja i desorpcja, rozpuszczanie i wytrącanie, pobór biogenu przez żywe organizmy i mineralizacja substancji organicznej oraz erozja i depozycja (ryc. 1).

**Sorpcja – desorpcja.** Proces sorpcji fosforu obecnego w roztworze wodnym zachodzi przy udziale minerałów ilastych (frakcja ok. 2  $\mu\text{m}$ ), a także cząstek organicznych, pochodzących z erodowanej gleby. Przemianie ulega frakcja nieorganicznego fosforu rozpuszczonego. Fosfor organiczny nie bierze udziału w procesie (Johnson, Bouldin, Goyette, Hedges, 1976). Kierunek przeobrażeń (sorpcja – desorpcja) zmienia się w zależności od cech osadów czy zawiesiny (skład mechaniczny, mineralny, zawartość materii organicznej, jej fizyczne i chemiczne cechy), a także roztworu wodnego – głównie pH oraz Eh (Wróbel, 1976). Tempo procesu określa jego rangę w przeobrażeniach frakcji fosforu. Czas przeobrażeń fosforu mierzony jest w minutach (Kunishi i in., 1972). Niektórzy badacze wprost twierdzą, że dystrybucja fosforu w wodzie determinowana jest przez przemiany sorpcyjne (Barlow, Glase, 1982), tak więc zawartość rozpuszczonego



Ryc. 1. Obieg fosforu w środowisku

Fig. 1. Circulation of phosphorus in environment

fosforu zależy od cech osadów (Klotz, 1988; Meyer, 1979; Taylor, Kunishi, 1971; vide Sharpley, Halvorson, 1994).

**Rozpuszczanie i wytrącanie.** Rozpuszczanie zależy od chemicznych uwarunkowań środowiska wodnego. Jest to proces drugorzędny w wodach w porównaniu z przemianami sorpcyjnymi. Zaznaczyć należy, że procesy sorpcji i desorpcji oraz rozpuszczania i wytrącania zachodzą jednocześnie, a ich rezultaty są trudne do rozdzielania w kolejnych fazach obiegu fosforu.

**Mineralizacja substancji organicznej i przyswajanie fosforu przez organizmy żywe.** Znaczenie procesu rozkładu materii organicznej jako źródła biogenu zależy od ilości resztek roślinnych obecnych w glebie oraz osadach dennych rzeki. Na tempo mineralizacji mają wpływ warunki klimatyczne: temperatura i wilgotność powietrza, a także dostępność tlenu.

**Erozja i depozycja.** Większość przemian fosforu zapoczątkowują procesy erozji bocznej i dennej koryta oraz powierzchniowej warstwy gleby. Prowadzą one (przez rozpad struktur glebowych) do zmniejszenia fizycznej ochrony fosforu, umożliwiając desorpcję lub rozpuszczanie. Istotną cechą erozji pokrywy glebowej jest jej selektywność, czego efektem jest wzbogacenie środowiska wodnego we frakcję najbardziej zasobną w fosfor (ił koloidalny). Proces depozycji sprzyja natomiast stabilizacji biogenu zawartego w zawieszynie.

Wielkość odpływu fosforu zależy od sposobu, w jaki jest on transportowany w obrębie zlewni. Pełna charakterystyka eksportu fosforu ze zlewni wymaga osobnego omówienia tego procesu w odniesieniu do okresów niskich przepływów i okresów wezbrań.

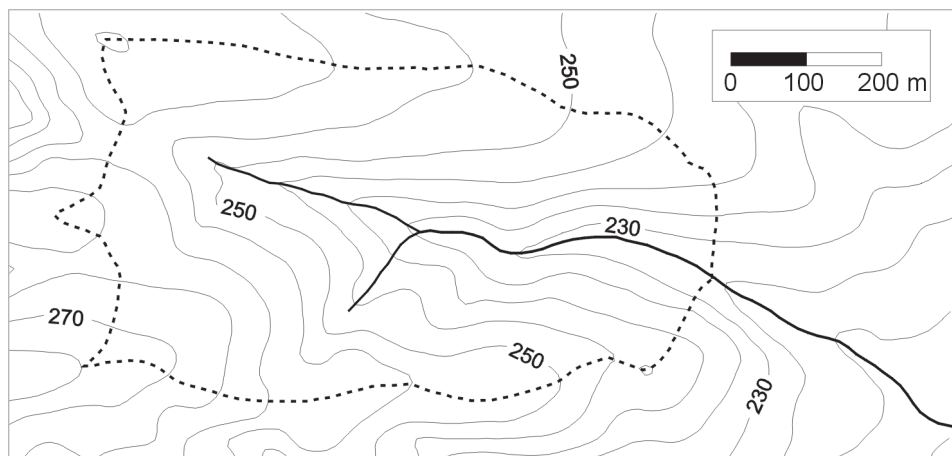
**Odpływ fosforu w czasie niżówek.** Obecność fosforu w wodach w czasie niskich stanów zależy od składu chemicznego wód podziemnych, regulowanego przez procesy geochemiczne. Fosfor może także pochodzić z powolnej desorpcji biogenu z puli zawartej w osadach dennych oraz mineralizacji substancji organicznej w środowisku

wodnym. Uwalniany jest wówczas fosfor rozpuszczony (organiczny i nieorganiczny). Ilość fosforu odprowadzana z wodą jest praktycznie stała, a stężenia nie podlegają istotnym zmianom.

**Odływ fosforu w czasie wezbrań.** Obecność spływu powierzchniowego w czasie wezbrań sprzyja eksportowi fosforu ze zlewni. Studia, prowadzone przez Johnsona i in. (1976), wykazały, że 75% odpływu biogenu nastąpiło w czasie wysokich stanów wody, których sumaryczny czas trwania objął 10% okresu badawczego. Wielkość strat fosforu powinna więc być szacowana na podstawie analizy wezbrań (Kunishi i in., 1972). Są one zjawiskiem, w którym skala oraz zróżnicowanie przemian fosforu są naj-większe. Za wzrost zawartości fosforu w wodach powierzchniowych podczas wezbrań odpowiedzialne są spływ powierzchniowy i resuspensja osadów dennych.

### 3. Obszar badań

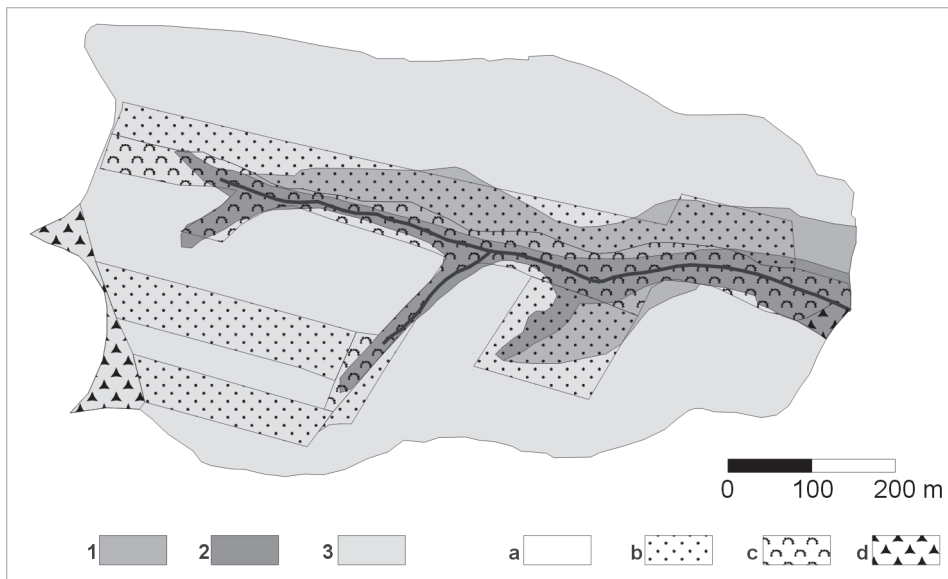
Studia nad zawartością fosforu w wodach powierzchniowych prowadzone były w doświadczalnej zlewni Dworskiego Potoku na Pogórzu Wiśnickim. Zajmuje ona nieckowatą dolinę o przebiegu W-E, położoną na wysokości 225-273 m n.p.m. (ryc. 2). Podłoże stanowi flisz jednostki podśląskiej, przykryty osadami miocenu. Całość przykryta jest grubą warstwą utworów lessopodobnych. Występują tu płaskie wierzchowiny, oddzielone krawędziami od wypukło-wklęsłych stoków, nachylonych pod kątem 0-5° w górnej części, 5-15° – w środkowej i 20-30° – w dolnej. Dynamika procesów morfogenetycznych w znacznej mierze zależy od typu użytkowania.



Ryc. 2. Zlewnia Dworskiego Potoku

Fig.2. Dworski Potok catchment

Charakterystyczną cechą badanego terenu jest mała zmienność typologiczna występujących tu gleb (Klimek, 1995). Wiąże się to z powszechnym występowaniem jednorodnych utworów lessopodobnych na terenie całej zlewni (ryc. 3). Spotykamy tu gleby: płowe opadowo-glejowe (*Stagnic Luvisol*) – na wierzchołkach i słabo nachy-



Ryc. 3. Gleby i użytkowanie ziemi w zlewni Dworskiego Potoku (gleby wg Klimka, 1995)

Gleby: 1 – płowe opadowo-glejowe (*Stagnic Luvisol*), 2 – gruntowo-glejowe (*Eutric Gleysol*), 3 – wtórnie brunatne (*Cambic Luvisol*); Użytkowanie: a – grunty orne, b – pastwiska, c – nieużytki, d – lasy

Fig. 3. Soils and land-use in the Dworski Potok catchment (soils after Klimek, 1995)

Soils: 1 – *Stagnic Luvisols*, 2 – *Eutric Gleysols*, 3 – *Cambic Luvisols*; Land-use: a – arable land, b – pastureland, c – derelict land, d – forests

lonych stokach, wtórnie brunatne (*Cambic Luvisol*) – na objętych intensywną uprawą stokach oraz gruntowo-glejowe (*Eutric Gleysol*) – w dnach dolin.

W glebach zlewni Dworskiego Potoku stwierdzono 0,5-1,8% próchnicy. Wyjątek stanowią gleby gruntowo-glejowe rozmieszczone w dnach doliny głównego cieku, gdzie notowany jest podwyższony udział materii organicznej (7,2%) (Klimek, 1995). Przyczyna tkwi w obecności bujnej roślinności, której rozkład jest źródłem próchnicy zarówno dla gleb, jak i osadów dennych. Nieco niższą zawartość węgla organicznego stwierdzono w niektórych jednostkach gleb wtórnie brunatnych, co jest dowodem nasilenia procesów erozji (Klimek, 1995).

Dominującym typem użytkowania są grunty orne. Obejmują one swym zasięgiem wierzchołki i słabo nachylone stoki. Areal upraw zwiększył się w 1995 roku, po zaoraniu terenów wykorzystywanych wcześniej jako pastwisko. Użytki zielone zajmują obszar w osiowej części zlewni, a przedzielone są pasmem nieużytków. W dolnej jego części, tuż powyżej wodowskazu

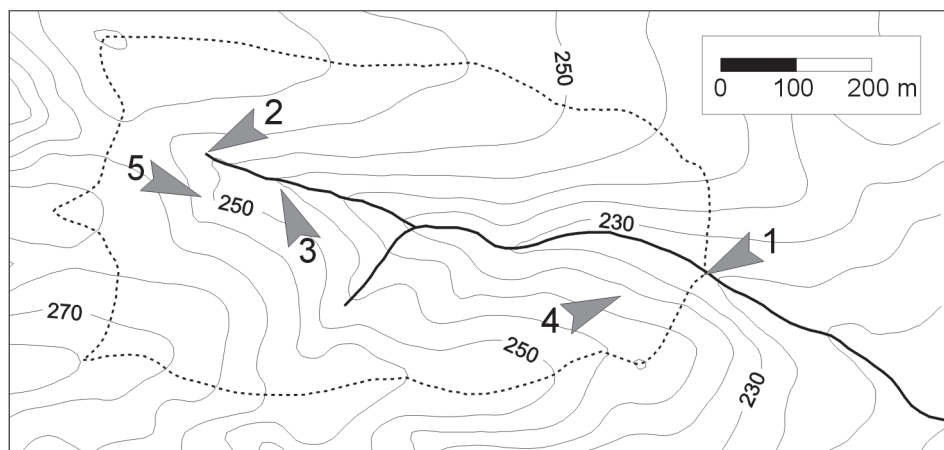
występuje rozległe trzcinowisko. Na zachodnim i wschodnim krańcu zlewni znajdują się niewielkie obszary leśne.

## 4. Metody badań

W wodach Dworskiego Potoku badano zmienność stężenia fosforanów w okresach niskich przepływów oraz fosforanów i substancji zawieszonych w czasie wezbrań. Zbadano także cechy wód śródpokrywowych i podziemnych, wypływających w postaci źródeł. Podczas okresów wzmożonego zasilania pobrano próby osadów z dna głównego cieku, a także jego dopływu oraz materiału namytego u podnóża erodowanego stoku. Zbadano też zawartość fosforanów w wodach spływu powierzchniowego na intensywnie użytkowanym stoku oraz zawartość fosforu całkowitego w glebach zlewni, a także stężenie fosforanów w wodach opadowych, które uformowały dwa wezbrania.

W czasie niżówek i okresów wezbraniowych zastosowano odmienne metody poboru wód. W czasie niżówek dokonano:

- trzech poborów wód powierzchniowych w profilu zamykającym doświadczalną zlewnię Dworskiego Potoku,
- trzech poborów wód podziemnych, ze źródła Dworskiego Potoku,
- dwóch poborów wód śródpokrywowych, w miejscu wypływu do cieku (ryc. 4).



Ryc. 4. Miejsca poboru prób wody w zlewni Dworskiego Potoku.

1 – wody powierzchniowe oraz zawiesina, 2 – wody podziemne (źródło), 3 – wody śródpokrywowe, 4, 5 – wody spływu powierzchniowego

Fig. 4. Water sampling sites in the Dworski Potok catchment

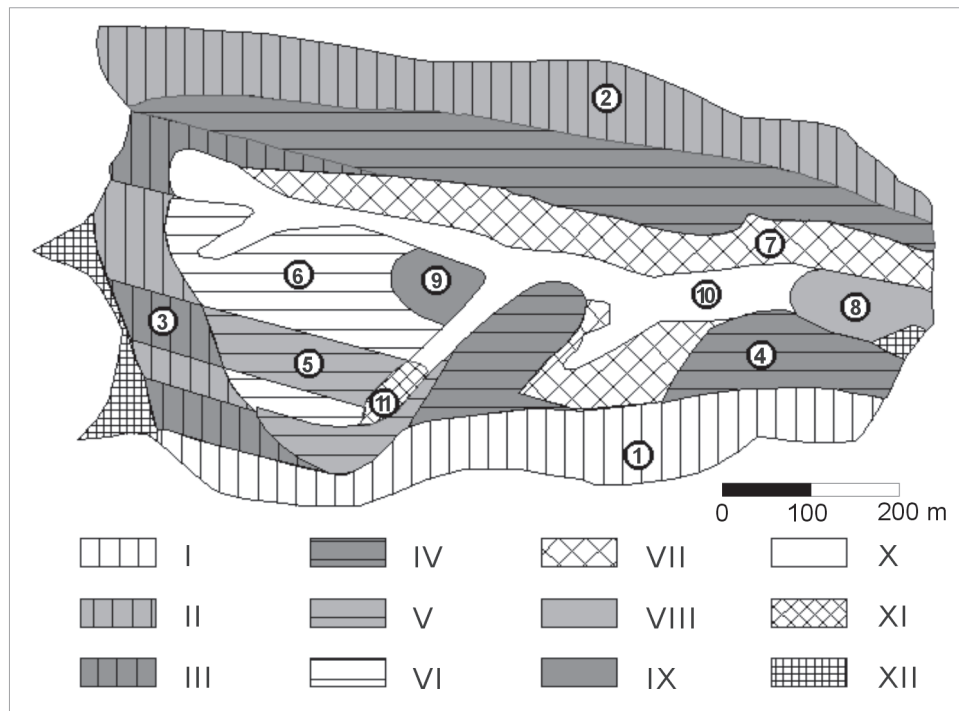
1 – surface waters and suspended matter, 2 – ground-water (spring), 3 – through-flow waters, 4,5 – surface run-off waters

W terenie zmierzono temperaturę, pH oraz przewodnictwo elektryczne wody.

Analizę fal wezbraniowych prowadzono w punkcie zamykającym zlewnię. W okresach wezbrań, w fazie wznoszącej, pobierano próby w interwałach kilkuminutowych.

Wraz z postępowaniem wezbrania próby pobierano rzadziej, zachowując w fazie regresji wezbrania, godzinne odstępy między poborami.

Próby wód dwóch spływów powierzchniowych pochodzą z dwóch zbiorników spływu powierzchniowego zlokalizowanych na stokach. Pobrano je w dwóch etapach.



Ryc. 5. Stanowiska poboru prób gleb (liczby arabskie) i zasięgi poszczególnych kategorii obszarów zlewni, wydzielonych ze względu na typ i podtyp gleby, typ użytkowania oraz rzeźbę (liczby rzymskie) zlewni Dworskiego Potoku

Na wierzchołkach z glebami płowymi opadowo-glejowymi (*Stagnic Luvisols*): I – grunt orny od 1995 r., wcześniej użytkowany jako pastwisko, II – grunt orny, III – pastwisko. Na słabo nachylonych stokach z glebami płowymi opadowo-glejowymi (*Stagnic Luvisols*): IV – grunt orny od 1995 r., V – pastwisko, VI – grunt orny. Na silnie nachylonych stokach z glebami wtórnie brunatnymi (*Cambic Luvisols*): VII – pastwisko. W dolinach z glebami płowymi, gruntowo-glejowymi (*Eutric Cambisols*): VIII – nieużytek, obszar podmokły, IX – nieużytek, obszar podmokły, porośnięty wysokimi trzcinami, X – nieużytek. Ponadto: XI – obszar u podnóża erodowanego stoku, ze śladami ciągłej akumulacji, XII – tereny leśne

Fig. 5. Soil sampling sites (Arabic numbers) and spatial extent of areas representing different soil types and sub-types, land-use and relief of the Dworski Potok catchment (Roman numbers)

On elevated areas with *Stagnic Luvisols*: I – arable land since 1995, earlier used as pastureland, II – arable land, III – pastureland. On gentle slopes with *Stagnic Luvisols*: IV – arable land since 1995, V – pastureland, VI – arable land. On steep slopes with *Cambic Luvisols*: VII – pastureland. In valleys with *Eutric Cambisols*: VIII – derelict land, water-saturated, IX – derelict land, water-saturated with reeds, X – derelict land. Other: XI – foot-slope below eroded slope with traces of continuous accumulation, XII – forests

Gleby pobrano z poziomu ornego z warstwy o głębokości 0-5 cm w obrębie 12 kategorii, wyróżnionych ze względu na typ rzeźby, gleby i użytkowanie (ryc. 5). Aby uzyskać wynik w pełni reprezentatywny, w każdym miejscu pobrano 10 prób z powierzchni ok. 200 m<sup>2</sup>. Próby, odpowiadające poszczególnym kategoriom, zmieszano, wysuszone i zmielono, a następnie pomniejszono metodą kwartowania.

Pobrano także trzy próby osadów. Dwie z nich pochodzą z dna koryt Dworskiego Potoku (przy wodowskazie) i jego okresowego dopływu (w miejscu ujścia). Trzecia próba pochodzi z podnóża erodowanego stoku, gdzie miała miejsce akumulacja wyniesionego materiału (stanowisko 9 na ryc. 5). Podczas wezbrań pobrano próbę zawiesiny w punkcie zamykającym zlewnię.

Fosforany oznaczono w laboratorium Instytutu Geografii UJ metodą fotometryczną przy pomocy gotowego testu (PMB) firmy Merck. Fosfor całkowity w glebach, osadach i zawieszynie oznaczono w laboratorium Zakładu Mineralogii, Petrografii i Geochemii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie metodą strąceniowo-fotometryczną przy użyciu fotometru Specol Zeiss. Zawartość węgla organicznego zbadano zmodyfikowaną metodą Tiurina.

## 5. Okres badań

Badania prowadzono w okresie od 22 lutego 1997 do 11 stycznia 1998 r. W dniach 22 lutego i 3 sierpnia 1997 r. pobrano próby wód Dworskiego Potoku, jego źródeł i wód śródpokrywowych zasilających ciek. Ponadto 12 grudnia 1997 r. i 11 stycznia 1998 r. pobrano też próby wód spływu powierzchniowego. Zestawienie temperatur powietrza i opadów w tych dniach zamieszczono w tabeli 1.

W lipcu 1997 r. prowadzono badania fali wezbraniowej. Suma opadu w tym miesiącu wyniosła 224,3 mm, co stanowi powyżej 1/3 średniego opadu rocznego.

Tab.1. Warunki pogodowe w dniach poboru wód

Table 1. Weather conditions on water sampling days

| Data       | Opad dobowy [mm] | Temperatura powietrza [°C] |
|------------|------------------|----------------------------|
| 17.02.1997 | 0,1              | 6,0                        |
| 03.08.1997 | 0,0              | 17,9                       |
| 12.12.1997 | 13,9             | 6,1                        |
| 11.01.1998 | 0,0              | 5,2                        |

Tab. 2. Warunki pogodowe w czasie fal wezbraniowych

Table 2. Weather conditions during flood events

| Wezbranie | Data       | Opad dobowy [mm] | Temperatura powietrza [°C] |
|-----------|------------|------------------|----------------------------|
| 1         | 4.07.1997  | 10,2             | 20,3                       |
|           | 5.07.1997  | 15,4             | 16,9                       |
| 2         | 8.07.1997  | 21,0             | 17,4                       |
| 3         | 17.07.1997 | 3,4              | 17,3                       |
|           | 18.07.1997 | 24,7             | 15,5                       |
| 4         | 20.07.1997 | 23,2             | 15,0                       |
|           | 21.07.1997 | 3,3              | 14,5                       |



Przeanalizowano cztery fale wezbraniowe. Daty poborów oraz zestawienie warunków meteorologicznych zamieszczono w tabeli 2.

## 6. Wyniki

### 6.1. Zawartość fosforanów w wodach Dworskiego Potoku w okresach niżówek

Wyniki trzech poborów, dokonanych w różnych okresach, przy zróżnicowanej sytuacji synoptycznej, wskazują na stałość koncentracji fosforanów w wodach powierzchniowych w okresach niżówek.

Stołość koncentracji fosforanów w okresach pozawebraniowych uzasadniona jest stałym zasilaniem potoku przez wody podziemne i śródpokrywowe o stałych cechach chemizmu (tab. 3, 4 i 5).

Tab. 3. Koncentracja fosforanów oraz przewodnictwo elektryczne, temperatura i pH wód powierzchniowych

Table 3. Phosphate concentration, electrical conductivity, temperature and pH of surface waters

| Data       | $\text{PO}_4^{3-}$<br>[mg/l] | Przewodnictwo<br>[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] ( $t_{25}^\circ\text{C}$ ) | Temperatura powietrza<br>[ $^\circ\text{C}$ ] | pH   |
|------------|------------------------------|---|---|------|
| 22.02.1997 | 0,02                         | —   | 0,9   | 7,42 |
| 3.08. 1997 | 0,04                         | 416   | 18,8  | 7,64 |
| 11.01.1998 | 0,08                         | 406   | 4,8   | 7,43 |

Tab. 4. Koncentracja fosforanów, przewodnictwo elektryczne, temperatura i pH wód źródła Dworskiego Potoku

Table 4. Phosphate concentration, electrical conductivity, temperature and pH of the Dworski Potok spring water

| Data       | $\text{PO}_4^{3-}$<br>[mg/l] | Przewodnictwo<br>[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] ( $t_{25}^\circ\text{C}$ ) | Temperatura powietrza<br>[ $^\circ\text{C}$ ] | pH   |
|------------|------------------------------|---|---|------|
| 22.02.1997 | 0,02                         | —   | 2,3   | 6,81 |
| 3.08. 1997 | 0,02                         | 214   | 14,8  | 6,93 |
| 11.01.1998 | 0,02                         | 192   | 4,8   | 6,79 |

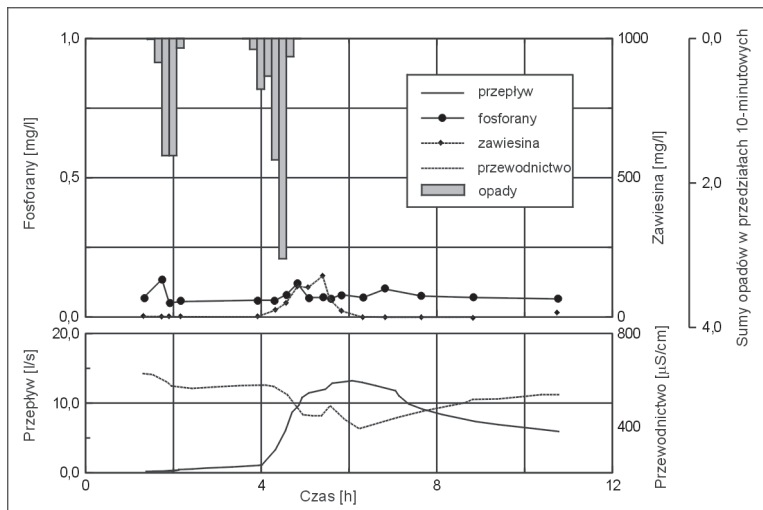
Tab. 5. Koncentracja fosforanów oraz przewodnictwo elektryczne i pH wód śródpokrywowych.

Table 5. Phosphate concentration, electrical conductivity and pH of mid-soil water

| Data       | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> [mg/l] | Przewodnictwo [μS/cm] (t <sub>25</sub> °C) | pH   |
|------------|--------------------------------------|--|------|
| 3.08.1997  | 0,02                                 | —  | 6,81 |
| 11.01.1997 | 0,06                                 | 480  | 6,56 |

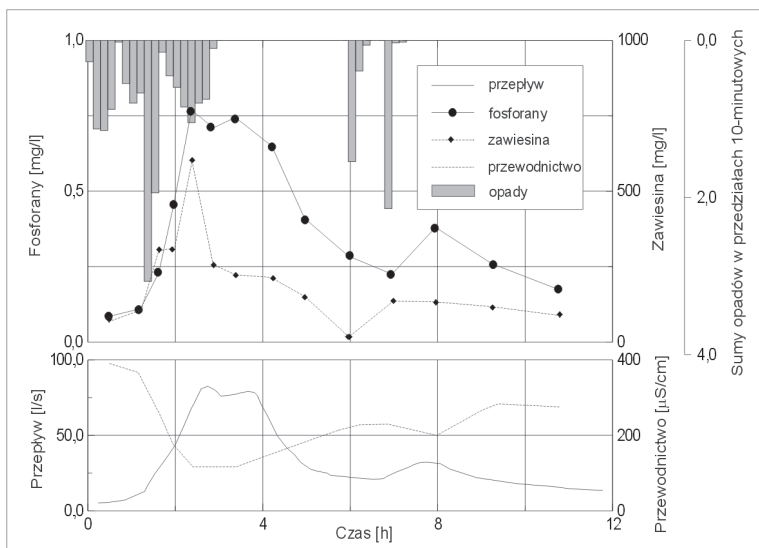
## 6.2. Zawartość fosforanów w wodach Dworskiego Potoku w okresach wezbrań

Wszystkie cechy wód Dworskiego Potoku, w tym także zawartość fosforanów, ulegały istotnym zmianom podczas wezbrań (ryc. 6-9). Początkowo, wraz ze zwiększającym się przepływem obserwowano, znaczący wzrost zawartości fosforanów. Potem, w zależności od nasilenia opadu oraz stanu wody, następował spadek lub wzrost stężenia jonów fosforanowych. Zmienność ich zawartości dodatnio korelowała z wahaniami koncentracji zawiesiny.



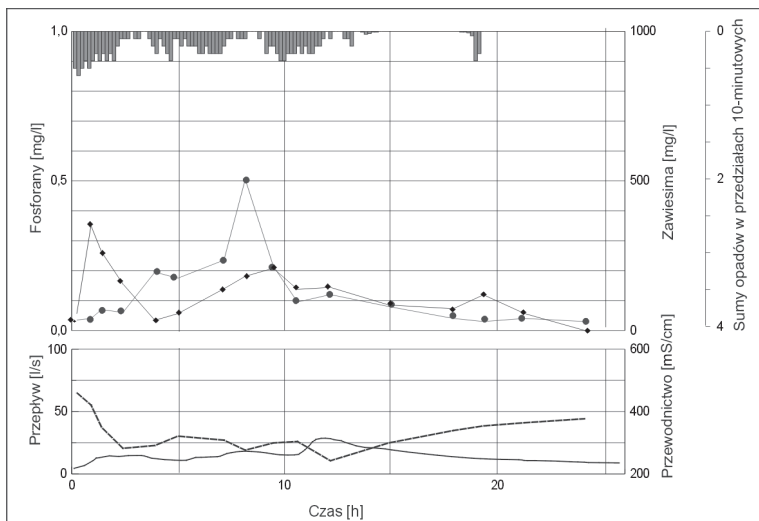
Ryc. 6. Zmiany koncentracji fosforanów i zawiesiny oraz przewodnictwa wody w czasie wezbrania w dniu 5 lipca 1997 r.

Fig. 6. Changes in phosphate and suspended matter concentration and electrical conductivity of water during the flood of 5 July 1997



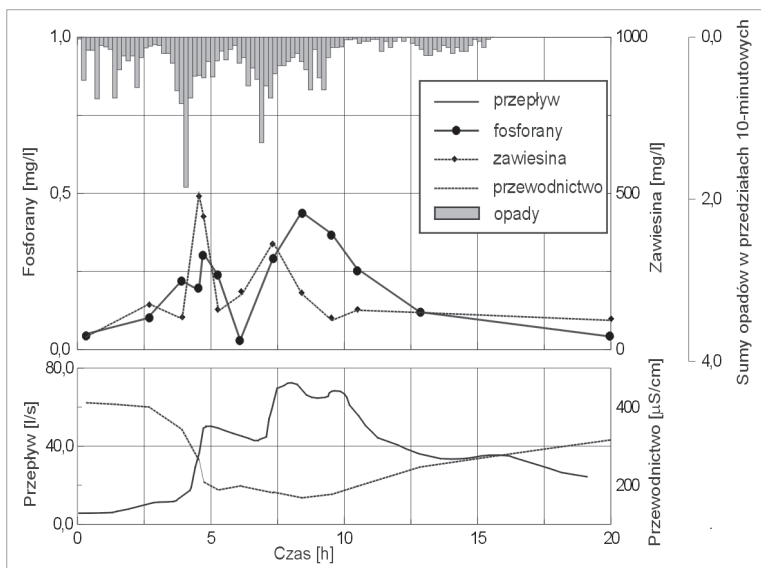
Ryc. 7. Zmiany koncentracji fosforanów i zawiesiny oraz zmiany przewodnictwa w czasie wezbrania w dniu 8 lipca 1997 r.

Fig. 7. Changes in phosphate and suspended matter concentration and electrical conductivity of water during the flood of 8 July 1997



Ryc. 8. Zmiany koncentracji fosforanów i zawiesiny oraz zmiany przewodnictwa w czasie wezbrania w dniu 18 lipca 1997 r.

Fig. 8. Changes in phosphate and suspended matter concentration and electrical conductivity of water during the flood of 18 July 1997



Ryc. 9. Zmiany koncentracji fosforanów i zawiesiny oraz zmiany przewodnictwa w czasie wezbrania w dniu 21 lipca 1997 r.

Fig. 9. Changes in phosphate and suspended matter concentration and electrical conductivity of water during the flood of 21 July 1997

### 6.3. Zawartość fosforanów w wodach opadowych i wodach spływu powierzchniowego

Badania stężenia fosforanów w opadach, przeprowadzone w okresach wezbrań, wykazały nieznaczną zawartość genu biogenu (tab. 6).

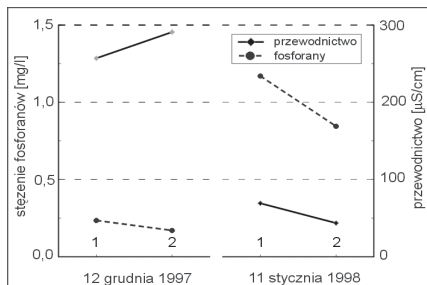
Tab. 6. Koncentracja fosforanów oraz wartości przewodnictwo i pH w wód opadowych.

Table 6. Phosphate concentration, electrical conductivity and pH of precipitation water

| Data       | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup><br>[mg/l] | Przewodnictwo<br>[μS/cm] (t <sub>25</sub> °C) | pH   |
|------------|---|---|------|
| 17.07.1997 | 0,05                                    | 24,1  | 4,35 |
| 11.01.1997 | 0,06                                    | 42,6  | 4,75 |

Znacznie większą ilość fosforanów stwierdzono w wodach spływu powierzchniowego. Podczas każdego z epizodów spływu pobrano dwie próby w dwugodzinnych odstępach. Uzyskane wyniki przedstawia ryc. 10.

Na podstawie zapisu limnigraficznego przy przelewie na zbiorniku spływu powierzchniowego stwierdzono, iż próby pobrane 12 grudnia 1997 r. stanowią końcowe fazy spływu. Wysokie przewodnictwo analizowanej wody świadczy o długim kontakcie wody z podłożem. Natomiast próby pochodzące z dnia 11 stycznia 1998 r. należą do początkowych etapów spływu. Występowało wtedy niskie przewodnictwo analizowanych wód, porównywalne z obserwowanym w wodach opadowych.

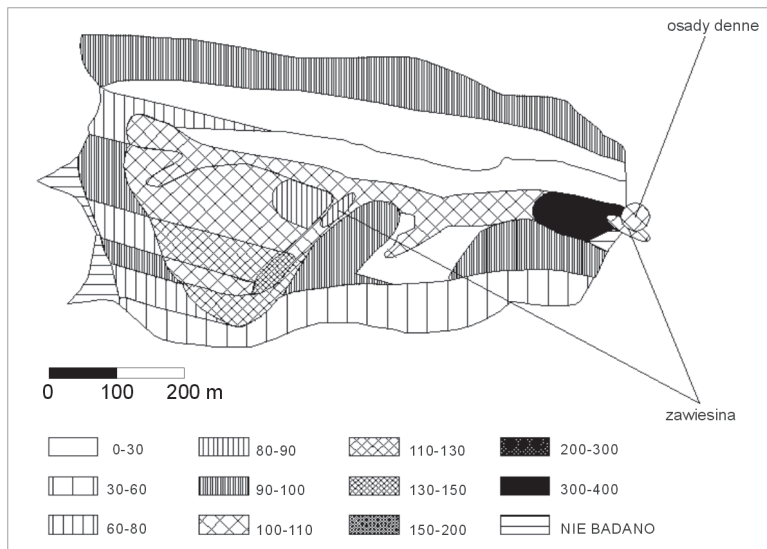


Ryc. 10. Stężenie fosforanów oraz przewodnictwo wód spływu powierzchniowego

Fig. 10. Phosphate concentration and electrical conductivity of the surface run-off water

### 6.4. Zawartość fosforu całkowitego w glebach, osadach i zawieszinie zlewni Dworskiego Potoku

Koncentracja fosforu całkowitego w glebach zlewni Dworskiego Potoku mieści się w granicach od 40 do 140 mg/kg. Wyjątek stanowią gleby wtórnie brunatne, uboższe w fosfor oraz gleby dna doliny porośniętego trzcinami, o wysokiej zawartości tego



Ryc. 11. Zawartość fosforu całkowitego w glebach, osadach i zawieszinie w zlewni Dworskiego Potoku [mg/kg]

Fig. 11. Total phosphorus content in soil, sediments and suspended matter in the Dworski Potok catchment [mg/kg]

Tab. 7. Koncentracja fosforu całkowitego oraz zawartość próchnicy w glebach (por. ryc. 5)

Table 7. Total phosphorus concentration and humus content in soil (see Fig. 5)

| Numer próby | Fosfor całkowity [mg/kg] | Próchnica [%] |
|-------------|--------------------------|---------------|
| 1           | 40                       | 0,4           |
| 2           | 100                      | 0,7           |
| 3           | 105                      | 1,2           |
| 4           | 355                      | 4,7           |
| 5           | 15                       | 0,5           |
| 6           | 95                       | 0,9           |
| 7           | 140                      | 1,1           |
| 8           | 130                      | 1,0           |
| 9           | 65                       | 0,8           |
| 10          | 110                      | 0,8           |
| 11          | 90                       | 0,6           |

Tab. 8. Koncentracja fosforu całkowitego oraz zawartość próchnicy w osadach i zawieszinie (por. ryc. 11)

Table 8. Total phosphorus and humus content in sediments and suspended matter (see Fig. 11)

| próby | całkowity [mg/kg] | [%] |
|-------|-------------------|-----|
| O1    | 110               | 1,6 |
| O2    | 85                | 0,7 |
| Z     | 110               | 1,9 |

O1 – osady dennie Dworskiego Potoku, O2 – osady dennie dopływu Dworskiego Potoku, Z – zawiesina

O1 – bottom sediments of Dworski Potok, O2 – bottom sediments of the Dworski Potok tributary, Z – suspended matter

biogenu (ryc. 11). Wyniki analiz fosforu i węgla organicznego (próchnicy) zestawiono w tabelach 7 i 8.

## 7. Dyskusja i wnioski

### 7.1. Zawartość fosforu w wodach Dworskiego Potoku w okresach nízówek

Stężenia fosforanów w wodach powierzchniowych, w okresach pozawezbraniowych są wyrównane i wynoszą od 0,02 do 0,08 mg/l. Tak małe wahania świadczą o ustalonej zawartości tego biogenu w czasie nízówek. Jest ona kształtowana przez skład chemiczny wód podziemnych i śródpokrywowych oraz takie cechy osadów, jak: pojemność sorpcyjna, pH, zawartość minerałów i związków wiążących fosfor. Potwierdzenie tej tezy znajdujemy w przebiegu koncentracji fosforanów w czasie przejścia fali martwej. Początkowe wartości reprezentują okresy międzywezbraniowe, a stężenia fosforanów mieszczą się w granicach właściwych dla nízówek.

### 7.2. Zawartość fosforu w wodach powierzchniowych Dworskiego Potoku w okresach wezbrań

W Dworskim Potoku stwierdzono dość wyraźną zależność pomiędzy stężeniem fosforanów a wielkością przepływu. Podobną korelację, w odniesieniu do badań ame-

ry-kańskich, opisywał Johnson (1976), a fakt, że badacze amerykańscy uzyskali analogiczne wyniki w zlewni o powierzchni 330 km<sup>2</sup> świadczy o tym, iż przebieg procesów kształtujących stężenie fosforu w wodach powierzchniowych jest podobny, niezależny od charakterystyk zlewni.

Zależność stężenia fosforanów od wielkości przepływu, stwierdzona w Dworskim Potoku, nie stanowi prostego związku korelacyjnego. Powodem tego jest obecność innych czynników, wpływających na przemiany fosforu w zlewni. Są to:

- różne źródła dostawy fosforu do wód Dworskiego Potoku (spływ powierzchniowy, resuspensja osadów dennych),
- właściwości osadów dennych i zawiesiny, które mogą być źródłem fosforu rozpuszczonego oraz buforem wychwytyjącym nadmiar biogenu z wody,
- czynniki klimatyczne (stopień nawilżenia zlewni przed opadem, intensywność opadu).

Stężenie fosforanów wzrasta bardzo gwałtownie w początkowej fazie wezbrania, szybko jednak maleje, pomimo utrzymującego się wysokiego stanu wody. Kolejne kulminacje zawartości tego biogenu następują w przypadku zaistnienia następnej wzrostowej tendencji przepływu. Taką sytuację zaobserwowano w przypadku fal wezbraniowych w dniach 8, 17 i 20 lipca. Taki przebieg stężenia sugeruje, iż to właśnie spływ powierzchniowy jest głównym źródłem fosforu w czasie wezbrania, pozwalając interpretować poszczególne kulminacje jako kolejne epizody spływu powierzchniowego. Potwierdzeniem tego jest przebieg przewodnictwa elektrycznego wody. Znaczny spadek wartości przewodnictwa przy jednoczesnym wzroście przepływu świadczy o zmianie charakteru chemicznego wód, czego przyczyną może być spływ powierzchniowy. Pojawia się jednak pytanie: dlaczego stężenie fosforanów maleje pomimo utrzymującego się, wysokiego stanu wód? Znalezienie odpowiedzi może przybliżyć analiza wyników pomiarów stężenia fosforu w dwóch fazach spływu powierzchniowego. Analogiczne rezultaty uzyskali Barisas i in. (1978) podczas sztucznego deszczowania stoku.

Uzyskane wyniki obrazują przebieg procesów zachodzących na stoku podczas formowania się spływu powierzchniowego. W pierwszej kolejności zachodzą: desorpcja i rozpuszczanie, wyprzedzając moment uruchomienia materiału. Powody tego tkwią w naturze procesów stokowych. Krople deszczu, uderzając o grunt, dezintegrują cząstki gleby, jednak początkowe epizody spływu nie mają wystarczającej energii do transportu tych cząstek. Ułatwia to desorpcję i rozpuszczanie, opóźniając jednocześnie buforujące działanie zawiesiny, mającej bardzo dużą powierzchnię sorpcyjną (Logan, 1982). Wynikiem tego jest wysokie stężenie biogenu w początkowym etapie spływu. Dalsze jego fazy są uboższe w fosforany ze względu na obecność sorbującej zawiesiny oraz wyczerpywanie się chwilowej puli fosforu labilnego. Straty fosforu w kolejnych, następujących po sobie epizodach spływu, nie zmniejszają się w sposób istotny, co sugeruje, iż źródło biogenu nie jest opróżniane przez pojedyncze zdarzenie (Barisas i in., 1978). Relacja pomiędzy fosforem rozpuszczonym i koloidalnym decyduje o przewadze procesów desorpcji podczas transportu (Logan, 1982). Konsekwencją takiej sytuacji są wysokie stężenia biogenu w wodach powierzchniowych, w pierwszych fazach spływu. Dalsze kulminacje zawartości jonów fosforanowych oraz przepływu są prawdopodobnie

efektem zaistnienia zjawiska spływu na nowym obszarze.

Resuspensja osadów w czasie wezbrania jest wynikiem przepływu zwiększonej masy wody w korycie oraz, w przypadku bardzo płytkich cieków, działalności kropel deszczu, powodujących zaburzenia ruchu wody, sięgające dna koryta. Stężenie wodnego fosforu w czasie wezbrania jest więc efektem współistnienia procesów ponownego uruchomienia biogenu z osadów dennych oraz jego transportu wraz ze spływem powierzchniowym. Udział powyższych źródeł w dostawie fosforu nie jest możliwy do oszacowania (Johnson i in., 1976) ze względu na ogromną jego zmienność w kolejnych fazach.

Odmienny przebieg stężenia fosforanów w kolejnych fazach wezbrania zaobserwowano w dniu 5 lipca (por. ryc. 6). Dwa epizody intensywnego opadu spowodowały nieznaczny wzrost stężenia biogenu. Przyczyną tak słabej reakcji zlewni były warunki meteorologiczne panujące w okresie poprzedzającym opad. Wysokie temperatury powietrza oraz niewielka ilość opadów zdecydowały o znacznym przesuszeniu powierzchni zlewni. Stąd, pomimo intensywnego opadu, spływ powierzchniowy nie został uruchomiony. Za wzrost przepływu odpowiedzialne jest wzmożone zasilanie podziemne. Potwierdzeniem tego są wyniki pomiarów przewodnictwa właściwego wody w kolejnych etapach wezbrania. Przez cały okres trwania fali wezbraniowej utrzymywało się ono powyżej wartości 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Odwrotna sytuacja miała miejsce podczas wezbrania w dniu 17 lipca, kiedy mało intensywny opad o niewielkiej sumie spowodował znaczne uruchomienie fosforu, zawiesiny oraz istotną zmianę charakteru wód. Na dystrybucję fosforu wpływa więc nie tylko czynnik opadu, ale także temperatura i wilgotność powietrza oraz stopień przesuszenia zlewni. W przypadku bardzo intensywnych opadów, gdy czynnik ten nabiera dominującego znaczenia, korelacja pomiędzy przepływem i stężeniem fosforanów jest bardzo silna.

Przeprowadzone badania potwierdzają, iż w okresach wezbrań eksport fosforu ze zlewni staje się znacznie bardziej efektywny niż w okresach niżówek. Dzienna strata biogenu jest wtedy 1000-10 000 razy większa niż w czasie niżówek, a stężenie wzrasta o 1-2 rzędy wielkości (Johnson i in., 1976). Na uwagę zasługuje także fakt, iż wagowy procent biogenu w materiale zawieszonym pozostaje w kolejnych fazach wezbrania relatywnie stały, nieco tylko wzrastając podczas okresów niskich przepływów (Johnson i in., 1976).

### 7.3. Dystrybucja fosforu w obrębie zlewni

Analiza zawartości fosforu całkowitego w glebach, osadach i zawieszynie pozwoliła ocenić przestrzenne zróżnicowanie przemian tego biogenu w zlewni Dworskiego Potoku. Najuboższe pod względem zawartości fosforu, są obszary położone na glebach wtórnie brunatnych. Są to jednocześnie obszary najbardziej nachylone, a typ gleby wskazuje na ich erozyjne pochodzenie (Klimek, 1995). Niska zawartość biogenu jest więc skutkiem erozji pokryw glebowych. Mało zasobne w fosfor są także gleby płowe opadowo-glejowe obszarów przekształconych w grunty orne w 1995 r. Zmiana użytko-



wania spowodowała całkowitą zmianę struktury gleby, czego efektem było zmniejszenie fizycznej ochrony fosforu przed wymywaniem. Poziom fosforu całkowitego w glebach zlewni Dworskiego Potoku pozostaje więc w odwrotnej proporcji do podatności gleb na erozję.

Pozostałe fragmenty zlewni charakteryzują się wyrównanymi poziomami fosforu całkowitego. Wyjątek stanowią obszary podmokłe w dnie doliny Dworskiego Potoku oraz jego dopływu, gdzie zawartość fosforu całkowitego jest bardzo wysoka. Powodem tego jest znaczna ilość materiału organicznego pochodzącego z rozkładu bujnej roślinności. Obszary te, poprzez charakter gleb i typ roślinności, mogą spełniać rolę filtra dla wód spływających powierzchniowo, wychwytyjąc fosfor związany z cząstkami spławialnymi. Poparcie tej tezy wymaga jednak dalszych badań. Na uwagę zasługuje także niższy poziom fosforu w osadach naniesionych u podnóża erodowanego stoku. Koreluje z nim niska zawartość węgla organicznego. Jest to skutkiem wysokiej selektywności transportu po stoku, kiedy w wyniku zmiany nachylenia mineralne cząstki spławialne są osadzane, natomiast lżejsze cząstki organiczne (najbardziej zasobne w fosfor) przenoszone są dalej.

Poziom fosforu całkowitego w osadach dennych i zawiesinie Dworskiego Potoku jest wyrównany. Świadczy to o wspólnym pochodzeniu zawiesiny i osadów; jest także dowodem na czasową stabilność zawartości fosforu całkowitego w osadach korytowych Dworskiego Potoku. Dwukrotnie niższą zawartość fosforu w osadach dennych Raby zmierzyl L. Pasternak (1976). Opisuje on jednak wyłącznie łatwo rozpuszczalne formy fosforu.

## Literatura

- Barisas S.G., Baker J. L., Johnson H. D., Laflen J. M., 1978, *Effects of tillage system on runoff losses of nutrients, a simulation rainfall studies*, Trans ASAE, 21.
- Barlow J.P., Glase M.S., 1982, *Partitioning of phosphorus between particles and water in a river outflow*, Hydrobiologia, 91.
- Chodań J., Grzesiuk W., Mirowski Z., 1984, *Zarys gleboznawstwa i chemii rolnej*, PWN, Warszawa.
- Dobrzański B., 1981, *Gleboznawstwo*, PWN, Warszawa.
- Johnson A. H., Bouldin D. R., Goyette E. A., Hedges A. M., 1976, *Phosphorus loss by stream transport from a rural watershed: quantities, processes, and sources*, J. Environ. Quality, 5.
- Klapper H., 1991, *Control of eutrophication in inland waters*, Ellis Horwood Ltd., Chichester.
- Klimek M., 1995, *Charakterystyka pokrywy glebowej eksperymentalnej zlewni Dworskiego Potoku (Pogórze Wielickie)*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., 100.
- Kondracki J., 1994, *Geografia Polski. Mezoregiony fizyczno-geograficzne*, PWN, Warszawa.
- Koter M., 1987, *Chemia rolna*, PWN, Warszawa.
- Kunishi H. M., Taylor A. W., Heald W. R., Gburek W. J., Weaver R. N., 1972, *Phosphatmovement from an agricultural watershed during two rainfall periods*, J. Agr. Food Chem., 20.
- Logan T.J., 1982, *Mechanisms for release of sediment-bound phosphate to water and the effects of agricultural land management on fluvial transport of particulate and dissolved phosphates*, Hydrobiologia, 92.

- Pasternak L., 1976, *Osady denne* [w:] S. Starmach, S. Wróbel, L. Pasternak, red., 1976, *Hydrobiologia*, PWN, Warszawa.
- Sharpley A. N., Halvorson A. D., 1994, *The management of soil phosphorus availability and its impact on surface water quality* [w:] R. Lal, B.A. Stewart (red.), *Soil processes and water quality*, Lewis.
- Wróbel S., 1976, *Eutrofizacja wód* [w:] S. Starmach, S. Wróbel, L. Pasternak (red.), *Hydrobiologia*, PWN, Warszawa.

## FACTORS FOR PHOSPHORUS SUPPLY TO SURFACE WATERSIN THE CARPATHIAN FOOTHILLS

### Summary

This work presents the findings of a study on factors and processes responsible for changes in phosphorus content in the small agricultural, foothill catchment of Dworski Potok. In periods of low flows, concentration of phosphorus was measured in the main creek, through-flow water and ground water represented by springs. In periods of high recharge, changes in phosphorus concentrations in the Dworski Potok were measured during a series of four high-flow periods. Monitoring was also conducted during two episodes of surface run-off from an intensively cultivated slope and of precipitation that had formed the peak flow. Also studied were the values of total phosphorus in suspension, in the creek-bed sediments, and in the soils of a research basin.

Phosphorus concentrations in surface water during periods of medium and low flows are constant and are held in an equilibrium formed by the character of the water in the saturated zone, the vadose zone, and the creek-bed sediments. While analysing the peak flows, a strong dependence between phosphorus concentrations and amount of flow is seen. The study concludes that surface run-off is the main source of phosphorus in the stream during peak flow periods. Spatial variations in the phosphorus content in soil and sediments of the catchment correlate with the intensity of erosion. The most eroded areas are also the most depleted of phosphorus.