

Janusz Siwek

Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii

## HYDROCHEMICZNA INTERPRETACJA WEZBRAŃ Z LIPCA 1997 R. W ZLEWNI DWORSKIEGO POTOKU (POGÓRZE WIŚNICKIE)

*Zarys treści:* Badano zmiany składu chemicznego i koncentracji substancji rozpuszczonych w wodach Dworskiego Potoku w czasie wezbrań w lipcu 1997 r. W wodach potoku następował spadek koncentracji substancji rozpuszczonych związany z rozcieńczaniem wód pochodzących z zasilania gruntowego słabiej zmineralizowanymi wodami dostarczonymi do zlewni w czasie trwania opadu. W potoku obniżyła się koncentracja jonów  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ , których dostawa związana jest głównie z zasilaniem gruntowym. Jednocześnie wzrastały stężenia jonów  $\text{K}^+$  i  $\text{PO}_4^{3-}$ , które do cieku dostarczane były przez spływ powierzchniowy i śródpokrywowy. Zmiany mineralizacji i składu chemicznego zależały od zmian mechanizmu zasilania cieku. Zasilanie gruntowe ma istotny udział w odpływie podczas niewielkich wezbrań występujących przy słabo nawilżonych pokrywach zlewni. Natomiast w warunkach dobrze nawilżonych pokryw zmiany przepływu potoku związane są głównie z natężeniem spływu powierzchniowego, a w początkowych i końcowych fazach wezbrania – również spływu śródpokrywowego.

*Słowa kluczowe:* chemizm wód, spływ powierzchniowy, spływ śródpokrywowy, Pogórze Karpackie.

*Key words:* water chemistry, surface run-off, midsoil-runoff, Carpathian Foothills.

### 1. Wstęp

Zmianom przepływu rzeki w czasie wezbrań towarzyszą zmiany składu chemicznego i mineralizacji jej wód. Spowodowane są one złożonymi procesami zachodzącymi w zlewni w czasie transformacji opadu w odpływ. Najczęściej w czasie wezbrań wraz ze wzrostem przepływu w rzece następuje spadek koncentracji materiału rozpuszczonego. Zjawisko to związane jest z efektem rozcieńczania wód pochodzących z zasilania gruntowego słabiej od nich zmineralizowanymi wodami opadowymi docierającymi do cieku drogą spływu powierzchniowego i śródpokrywowego. Wody gruntowe nie

są jednak jedynym źródłem dostawy substancji rozpuszczonych. W czasie wezbrań ze zlewni odpro-wadzane są również sole wymywane z pokryw w czasie trwania spływu śródpokrywowego i powierzchniowego. Wody spływu powierzchniowego, mające ograniczony kontakt z podłożem, a co za tym idzie – ograniczone możliwości ługowania, odznaczają się naj-mniejszą mineralizacją. Podczas serii występujących po sobie wezbrań proces wymywa-nia coraz słabiej wpływa na mineralizację cieku, w miarę jak w gruncie zmniejszają się zasoby łatwo rozpuszczalnych soli. Wezbrania poprzedzone długotrwałymi okresami bez opadu odznaczają się największymi koncentracjami substancji rozpuszczonych. Każde wezbranie charakteryzuje odrębny mechanizm dostawy wody i substancji rozpuszczonych do koryta w zależności m.in. od warunków meteorologicznych i nawilżenia zlewni (Walling, Foster, 1975; Froehlich, 1982; Kostrzewski i in., 1992).

Zmiany składu chemicznego cieków w czasie wezbrań spowodowane są różnym udziałem poszczególnych związków w procesach biogeochemicznych, ich różną podatnością na rozpuszczanie, a przede wszystkim różnymi drogami ich krążenia i dostawy do koryta. Każde ze źródeł zasilania cieku – spływ powierzchniowy, śródpokrywowy i zasilanie podziemne – wprowadza do cieku wody o odrębnych cechach fizykochemicznych. Badania składu chemicznego wód cieków w czasie wezbrań pozwalają na ocenę roli, jaką odgrywają te źródła w poszczególnych fazach wezbrań (Walling, Foster, 1975; Sklash, Farvolden, 1979; Kostrzewski i in., 1992; Caissie, Pollock, Cunjak, 1996). Uzyskane wyniki nie dają jednak informacji o przestrzennym zróżnicowaniu procesów zachodzących w obrębie zlewni.

W badaniach składu chemicznego rzek pobór prób wody dokonywany jest najczęściej w regularnych odstępach czasu – dobowych, tygodniowych, a nawet miesięcznych. Metoda taka pozwala na uchwycenie sezonowych lub długookresowych zmian składu chemicznego, nie daje jednak dostatecznej informacji o krótkotrwałych zdarzeniach ekstremalnych. W okresach wezbraniowych obieg materii i energii w małych zlewniach charakteryzuje się dużą dynamiką. Główną trudnością w badaniach składu chemicznego wód małych cieków w tym czasie jest więc zapewnienie dostatecznie częstego poboru prób do analiz laboratoryjnych. Badania przeprowadzone w zlewni Dworskiego Potoku umożliwiły poznanie składu chemicznego wód w różnych fazach wezbrań, co z kolei pozwoliło na ocenę mechanizmu zasilania cieku w czasie ich trwania.

Badania prowadzono w czasie wezbrań, które wystąpiły w lipcu 1997 r. Występujące wówczas w Europie Środkowej opady deszczu spowodowały liczne powodzie, które najdotkliwiej zaznaczyły się w dorzeczu Odry, a także w niektórych zlewniach dorzecza górnej Wisły. Wyniki uzyskane w tym stosunkowo krótkim okresie pozwoliły na poznanie zmian składu chemicznego wód Dworskiego Potoku w czasie wezbrań, przy różnym nawilżeniu pokryw zlewni.

## 2. Obszar badań

Zlewnia Dworskiego Potoku (0,29 km<sup>2</sup>) jest jedną z doświadczalnych zlewni Stacji

Naukowej IGUJ w Łazach. Potok jest lewobrzeżnym dopływem Starej Rzeki mającym swe ujście we wsi Łazy. Według L. Starkla (1988) ta część Pogórza Wielickiego stanowi jednostkę o nazwie Pogórze Wiśnickie, a zlewnia Dworskiego Potoku położona jest w jego północnej części – na Przedgórzu Brzeskim.

Zlewnia położona jest w obrębie płaszczowiny podśląskiej, której niższa dygitacja określana jest w okolicach Bochni jako tzw. jednostka bocheńska dolna. Zbudowana jest ona z utworów fliszowych przełańdowanych z utworami mioceniowymi – piaskowców i ilów marglistych z wkładkami margli, tufitów i gipsów (Olewicz, 1973). Skały podłoża przykryte są pokrywami pyłów lessopodobnych. Rzeźba zlewni należy do typu pogórzy niskich (Starkel, 1988). Przeważają w niej stoki wypukło-wklęsłe odcinające się od płaskiego, akumulacyjnego dna doliny wyraźnym załomem. Koryto potoku wcięte jest w dno doliny na głębokość 0,5-1,5 m. Średni przepływ w Dworskim Potoku, w latach 1987-1995 wynosił 1,2 l/s, co odpowiada wskaźnikowi rocznego odpływu 132 mm i odpływowi jednostkowo-wemu 3,7 l/s km<sup>2</sup>. W odpływie ze zlewni przeważa udział półroczna zimowego, zwłaszcza w tych latach, kiedy w czasie upalnych i suchych miesięcy letnich potok okresowo wysycha. W zlewni największy udział mają gleby płowe opadowo-glejowe (*Stagnic Luvisol*). Obecny w ich profilu, na głębokości 50-120 cm, ilasty poziom (*argillic*) utrudnia infiltrację wód opadowych, powodując jej okresowe stagnowanie, sprzyjając jednocześnie formowaniu się spływu śródpokrywowego. W dnach dolin oraz w nieckowatych zagłębieniach na stokach występują gleby gruntowo-glejowe (*Eutric Gleysol*).

Zlewnia była od wielu lat intensywnie użytkowana rolniczo – głównie jako pastwiska. W 1995 r. znaczna część pastwisk została zaorana. W 1997 r. grunty orne stanowiły 63% powierzchni zlewni, użytki zielone – 23%, a lasy – 2%. Położone w dnie doliny nieużytki stanowiły ok. 12% i zajęte były przez roślinność wodolubną. Na gruntach użytkowanych rolniczo stosowano wapnowanie oraz nawożenie potasowo-fosforowo-azotowe.

Badania dotyczące mineralizacji i składu chemicznego wód powierzchniowych i podziemnych w okolicach Łazów prowadzili W. Chełmicki, L. Kaszowski, J. Święchowicz (1992), M. Żelazny (1995). W latach 1987-1989 koncentracja materiału rozpuszczonego w wodach Dworskiego Potoku wynosiła średnio 393 mg/l, mieszcząc się w zakresie od 126 do 633 mg/l (Chełmicki, Kaszowski, Święchowicz, 1992). W latach 1993-1996 koncentracja substancji rozpuszczonych wynosiła od 51-270 mg/l – w czasie wezbrań do 426-759 mg/l – w okresach międzywezbraniowych (Krzemień, 1995a; Krzemień, Sobiecki, 1998).

Szczegółowe badania składu chemicznego wód powierzchniowych i podziemnych w zlewni Dworskiego Potoku przeprowadził K. Krzemień (1995b). Największy udział w mineralizacji ogólnej wód potoku mają jony HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup>. W obrębie zlewni zaznacza się zróżnicowanie składu chemicznego wód powierzchniowych i podziemnych. W porównaniu z wodami gruntowymi, wody pochodzące z drenażu pokrywy charakteryzują się stosunkowo niską mineralizacją. W wodach z drenów odwadniających grunty orne stwierdzono najwyższe koncentracje jonu K<sup>+</sup>.

### 3. Metody

W czasie wybranych wezbrań, w lipcu 1997 r., mierzono w jednoniutowych odstępach czasu przewodność elektryczną i temperaturę wody Dworskiego Potoku przy użyciu automatycznego rejestratora *RC 4* firmy *Trax Elektronik*. Jednolitrowe próby wody do oznaczeń laboratoryjnych pobierano w odstępach czasu od 10 min. do 3 godz., w zależności od dynamiki zmian stanów wody i przewodności elektrycznej. Próby pobrano również po 3-8 h po opadnięciu fali wezbraniowej. W sumie oznaczenia laboratoryjne wykonano dla 83 prób wody rzecznej oraz w próbach reprezentujących dobowe sumy opadów. Stany wód Dworskiego Potoku rejestrował limnigraf. Dane o natężeniu opadu uzyskano z pluwiografu zainstalowanego w obrębie zlewni.

W laboratorium w pobranych próbach mierzono przewodnictwo elektryczne dla temperatury odniesienia 25°C, przy użyciu konduktometru *Elmetron CX-721*. Wykonano oznaczenia zawartości jonów: Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Zawartość kationów Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> oznaczono metodą fotometrii płomieniowej. Oznaczenia zawartości jonów Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> i PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> wykonano metodą kolorymetryczną przy użyciu spektrofotometru *Merck SQ 118*. Próby do oznaczeń zawartości fosforanów były sączone przez filtry jakościowe 0,45mm firmy *Sartorius* przy pomocy urządzenia do filtrowania *Sartorius SM 16510/11*. Aniony Cl<sup>-</sup> i HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> oznaczono metodą miareczkową. Koncentrację substancji rozpuszczonych – mineralizację całkowitą (Janiec, 1982) – obliczano jako sumę koncentracji wszystkich makrojonów.

Mineralizację całkowitą cieku, w czasie gdy nie pobierano prób, obliczono na podstawie przewodności elektrycznej zmierzonej przez rejestrator RC4. Związek między przewodnością elektryczną ( $\gamma$  [ $\mu$  S/cm]) a mineralizacją wody (Cd [mg/l]) w pobranych próbach wyraża równanie regresji liniowej:

$$Cd = 0,88877 \gamma - 28,67$$

przy współczynniku korelacji  $r = 0,99$ .

### 4. Wyniki

Ogólną prawidłowością występującą w czasie wezbrań Dworskiego Potoku był spadek mineralizacji całkowitej jego wód, spadek koncentracji jonów Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> oraz wzrost stężeń K<sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (tab. 1). Spadek koncentracji dotyczył przede wszystkim tych jonów, których pochodzenie związane jest głównie z zasilaniem gruntowym. Spośród tych jonów najsłabiej skorelowany z mineralizacją całkowitą był jon siarczanowy, którego istotnym źródłem dostawy mogły być ponadto wody spływu śródpokrywowego. Dodatnio skorelowane z przepływem było stężenie jonu K<sup>+</sup>. Potas jest jonem odgrywającym istotną rolę w procesach biochemicznych zachodzących w glebie. Po wystąpieniu opadu rozpuszczalne sole potasowe mogą być łatwo wymywane z pokryw i dostarczane do cieku wraz z wodami spływu śródpokrywowego i powierzchniowego (Edwards, 1973). Głównym źródłem dostawy anionów PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> były wody spływu powierzchniowego, które dostarczają do cieku fosforany spłukane z po-

Tab. 1. Współczynnik korelacji między przepływem (Q) i mineralizacją całkowitą (Cd) a stężeniem jonów  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  w wodach Dworskiego Potoku w czasie wezbrań w lipcu 1997 r.

Table 1. Correlation coefficient between concentration of dissolved solids (Cd), stream discharge (Q) and concentration of  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  in water of Dworski Potok during the flood events in July 1997

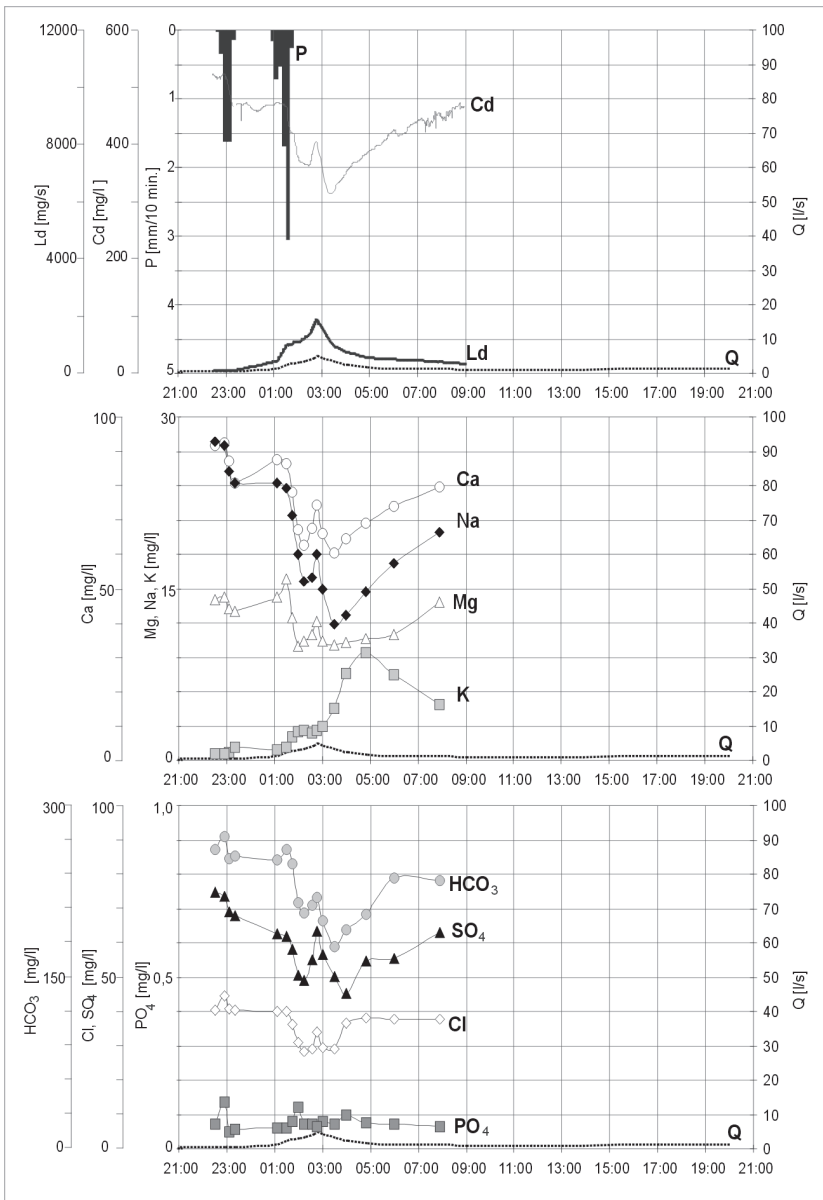
	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$
Q	0,80	-0,69	-0,69	-0,54	0,33	-0,68	-0,70	-0,61
Cd	-0,65	1,00	0,97	0,97	-0,41	1,00	0,91	0,97

wierzchni zlewni. Część fosforanów może ponadto pochodzić z rozpuszczania osadów z dna koryta w czasie ich redepozycji (Siwek, 1998; Gacek, 2000).

Poszczególne wezbrania w lipcu 1997 r. charakteryzowały się odrębnym przebiegiem zmian składu chemicznego wód Dworskiego Potoku w zależności od warunków hydrometeorologicznych, stanu nawilżenia i stopnia przemycia pokryw zlewni.

**Wezbranie w dniu 5 lipca 1997 r.** wystąpiło w warunkach słabo nawilżonych pokryw zlewni. Spowodowane było opadem w wysokości 10,2 mm, trwającym w sumie ok. 2h. Natężenie opadu było niewielkie i wynosiło od 0,1 do 1,6 mm/10 min i jedynie pod koniec trwania opadu na krótko wzrosło do 3,1 mm/10 min (ryc. 1). Przepływ Dworskiego Potoku przed wezbraniem wynosił 0,3 l/s, a w czasie kulminacji 4,7 l/s. W tygodniu poprzedzającym analizowane wezbranie w potoku na kilka dni zupełnie zanikł przepływ i pojawił się dopiero po opadzie, który wystąpił w nocy z 30 czerwca na 1 lipca 1997 r.

Mineralizacja całkowita wód potoku w czasie wezbrania zmieniała się w zakresie od 318 do 526 mg/l. Wezbranie charakteryzowało się niewielką dynamiką zmian przepływu. W początkowych fazach wezbrania wzrost przepływu potoku odbywał się przy niewielkich zmianach parametrów fizykochemicznych jego wód. Oznacza to, że w zasilaniu ciek dominowało jedno źródło dostawy – zasilanie gruntowe. Po krótkotrwałym wzroście natężenia opadu w potoku nastąpił spadek koncentracji jonów  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ . Podobny przebieg zmian koncentracji tych jonów jest świadectwem ich wspólnego pochodzenia – z wód gruntowych. Wyrażna zmiana parametrów fizykochemicznych wód potoku związana była z rozcieńczaniem wód pochodzących z zasilania gruntowego wodami opadu bezpośredniego – a więc przez opad dostarczony bezpośrednio do koryta i jego najbliższego otoczenia. Od początku wezbrania w zasilaniu Dworskiego Potoku stopniowo wzrastał udział spływu śródpokrywowego. Świadczy o tym wzrastająca od początku wezbrania koncentracja kationu  $\text{K}^+$ . Maksymalne stężenie  $\text{K}^+$  (9,4 mg/l) wystąpiło ok. 2h po kulminacji wezbrania – czyli 3h po ustaniu opadu. Opóźnienie to związane było z wydłużonym czasem docierania wód opadowych do ciek drogą spływu śródpokrywowego w warunkach słabego nawilże-



Ryc. 1. Opad (P) i skład chemiczny wody w Dworskim Potoku w czasie wezbrania 5 lipca 1997 r.  
 Q – przepływ, Cd – koncentracja substancji rozpuszczonych, Ld – ładunek substancji rozpuszczonych

Fig. 1. Precipitation (P) and chemical composition of water in Dworski Potok during the 5 July 1997 flood event

Q – discharge, Cd – concentration of dissolved solids, Ld – load of dissolved solids

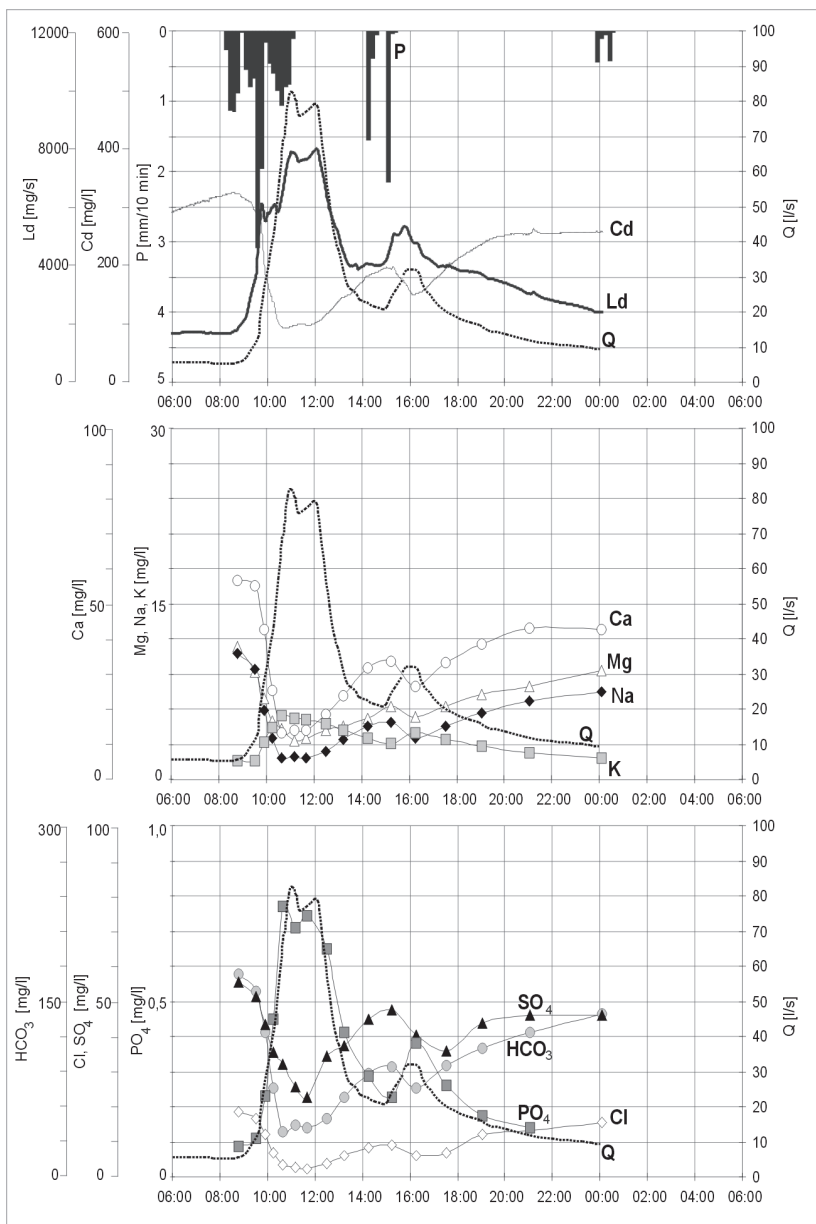
nia pokryw zlewni. W czasie wezbrania nie stwierdzono istotnych zmian koncentracji anionu  $\text{PO}_4^{3-}$ , co świadczy o tym, że spływ powierzchniowy w czasie tego wezbrania nie odgrywał znaczącej roli w zasilaniu.

W okresie trwania wezbrania ze zlewni odprowadzone zostało ok. 23 kg substancji rozpuszczonych. Dostawa soli wraz z opadem wyniosła 17,4 kg (w tym 14,2 kg ładunku  $\text{SO}_4^{2-}$ ). Największe ładunki odprowadzane były przez Dworski Potok w czasie kulminacji wezbrania. Odprowadzane sole pochodziły więc głównie z pokryw intensywnie przemianych przez spływ śródpokrywowy oraz z głębszego krążenia – z wód gruntowych.

**Wezbranie z dnia 8 lipca 1997 r.** reprezentuje wezbrania z deszczy nawalnych, które wystąpiły w warunkach dobrze nawilżonych pokryw zlewni. Spowodowane było opadem, którego suma wyniosła 19,5 mm. Maksymalne natężenie opadu wynosiło 3,1 mm/10 min (ryc. 2). Opad trwał około 4h. Opady występujące w okresie poprzedzającym wezbranie, o łącznej sumie 63,2 mm w ciągu 4 dni, spowodowały nasycenie gruntu wodą oraz przemycie pokryw. Przepływ Dworskiego Potoku przed wezbraniem wynosił 5,2 l/s, a w czasie kulminacji 82,6 l/s. Mineralizacja całkowita ciekłu wynosiła od 324 mg/l przed wezbraniem do 75 mg/l w czasie jego kulminacji. Mineralizacja ciekłu przed wystąpieniem wezbrania była niższa niż przed wezbraniem z dn. 5 lipca (526 mg/l). Ta obniżona mineralizacja wód Dworskiego Potoku w dniu 8 lipca była efektem dostawy do koryta wód ze spływu śródpokrywowego prowadzącego wody z wcześniejszych opadów oraz przemycia pokryw w czasie wcześniejszych wezbrań. Mineralizacja wód gruntowych zasilających ciek mógł być ponadto obniżona wskutek ich rozcieńczania wodami infiltracyjnymi z poprzednich opadów.

Dobrze nawilżone pokrywy sprzyjały szybkiemu krążeniu wody w zlewni. Już po kilkudziesięciu minutach od wystąpienia opadu zaznaczył się wzrost przepływu ciekłu oraz słaby spadek mineralizacji całkowitej. Wzrost natężenia opadu spowodował gwałtowne obniżenie mineralizacji wód potoku – spadek koncentracji jonów  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  oraz wzrost koncentracji jonów  $\text{K}^+$  i  $\text{PO}_4^{3-}$ . Świadczy to o tym, że dalszy wzrost przepływu spowodowany był przede wszystkim dostawą do ciekłu wód pochodzących ze spływu powierzchniowego oraz śródpokrywowego. Na uwagę zasługuje zwłaszcza anion fosforanowy, którego zawartość w wodach Dworskiego Potoku była silnie skorelowana z przepływem. W trakcie opadania fali mineralizacja ciekłu stopniowo wzrastała, w miarę jak w zasilaniu zmniejszał się udział spływu powierzchniowego i śród-pokrywowego. Wzrost mineralizacji spowodowany był ponadto coraz dłuższym czasem krążenia wód w obrębie pokryw, a więc coraz dłużej trwającym procesem rozpuszczania zawartych w gruncie soli. Minimum koncentracji jonów:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  wystąpiło w czasie kulminacji wezbrania. Jony  $\text{SO}_4^{2-}$  oraz  $\text{Cl}^-$  osiągnęły swoje minima nieco później, tj. około 40 min. po kulminacji przepływu. Opóźnienie wystąpienia minimum koncentracji jonu  $\text{SO}_4^{2-}$  wynika z tego, że jego dostawa do ciekłu następuje zarówno z wodami gruntowymi, jak i z wodami krążącymi w pokrywie glebowej. Do czasu przemycia pokryw, efekt rozcieńczania siarczanów z wód gruntowych był więc „łagodzony” przez ich dodatkową dostawę wraz ze spływem śródpokrywowym.

W czasie wezbrania ze zlewni odprowadzone zostało ok. 237 kg substancji rozpuszczonych w formie jonowej. Dostawa soli wraz z opadem była niewielka i wyniosła



Ryc. 2. Opad (P) i skład chemiczny wody w Dworskim Potoku w czasie wezbrania 8 lipca 1997 r.  
 Q – przepływ, Cd – koncentracja substancji rozpuszczonych, Ld – ładunek substancji rozpuszczonych

Fig. 2. Precipitation (P) and chemical composition of water in Dworski Potok during the 8 July 1997 flood event

Q – discharge, Cd – concentration of dissolved solids, Ld – load of dissolved solids

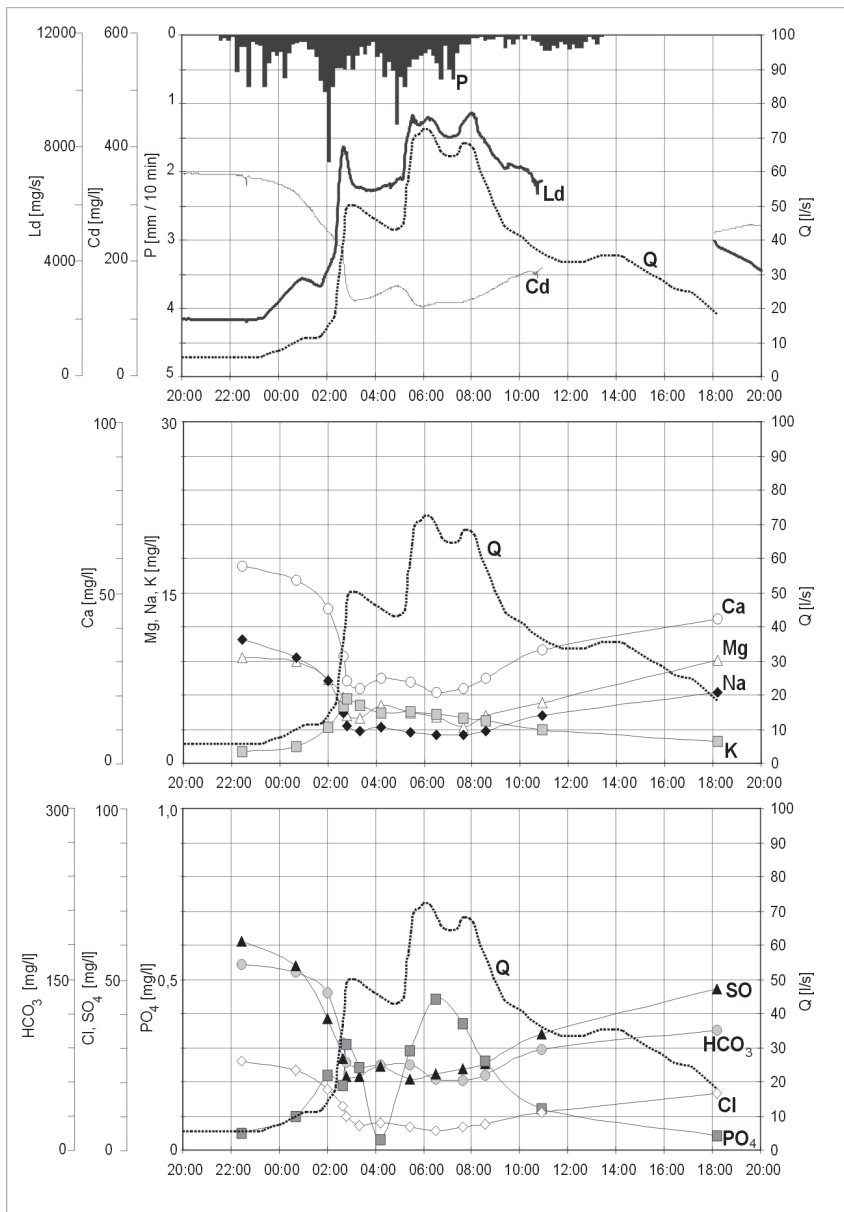


8,6 kg (3,6% materiału odprowadzonego). Największe ładunki (8 g/s) odprowadzane były przez Dworski Potok w czasie kulminacji wezbrania – a więc w okresie gdy ciek zasilany był głównie przez spływ powierzchniowy.

**Wezbranie w dniu 21 lipca 1997 r.** wystąpiło w warunkach dobrze nawilżonych pokryw zlewni. Wywołane było opadem o wysokości 26,4 mm. Opad trwał bez przerwy 16 h, a jego natężenie wynosiło od 0,02 do 1,9 mm/10 min (ryc. 3). W okresie poprzedzającym to wezbranie w zlewni występowały opady (31,8 mm w ciągu 3 dni), które spowodowały nawilżenie i przemycie pokryw zlewni. Przepływ Dworskiego Potoku wynosił od 5,6 l/s przed wezbraniem do 72,3 l/s w czasie kulminacji przepływu. Koncentracja substancji rozpuszczonych zmieniała się w przedziale od 360 do 123 mg/l.

Niewielkiemu natężeniu opadu (do 0,8 mm/10min) w pierwszych godzinach wezbrania towarzyszył łagodny spadek mineralizacji wód potoku. Następował wówczas spadek koncentracji jonów:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  oraz wzrost stężeń jonów  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{K}^+$ . Należy przypuszczać, że ciek zasilany był w tym okresie głównie wodami obecnymi w zlewni przed wystąpieniem opadu – a więc wodami dostarczonymi ze spływem śródpokrywowym oraz wodami gruntowymi. Stopniowo jednak w zasilaniu cieku coraz większą rolę odgrywały wody „nowe”, docierające drogą spływu powierzchniowego oraz śródpokrywowego. Wzrost natężenia opadu spowodował wyraźny wzrost przepływu oraz dalszy spadek mineralizacji wód potoku. Zmiany mineralizacji cieku, które wystąpiły później, w godzinach 3:00-8:00, były stosunkowo niewielkie (123-160 mg/l). W tym samym czasie przepływ zmieniał się w zakresie od 43 do 72 l/s. Duża zmienność przepływu przy niewielkich zmianach mineralizacji była wynikiem ustabilizowania się mechanizmu zasilania potoku. Wzrost przepływu cieku uwarunkowany był przede wszystkim wzrostem natężenia spływu powierzchniowego. Świadectwem tego są aniony fosforanowe, których wzrost stężenia następował tylko w czasie wzrastania przepływu, po chwilowym wzroście natężenia opadu. Wzrost mineralizacji cieku nastąpił w trakcie opadania fali wezbraniowej, po godz. 8:00, kiedy natężenie opadu zmalało do wartości 0,1-0,2 mm/10 min. Następował wówczas łagodny wzrost stężeń jonów:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  oraz spadek stężeń jonów:  $\text{K}^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ . Jony  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  wykazywały większe tempo wzrostu stężenia po wezbraniu niż jon  $\text{Na}^+$ . Było to wynikiem szybszego nasycania się wód infiltracyjnych tymi jonami. Szybszy wzrost stężeń jonów  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  w stosunku do jonu  $\text{Na}^+$  mógł jednak być również spowodowany większą ich zawartością w wodach spływu śródpokrywowego, mającego duży udział w zasilaniu cieku w czasie opadania fali wezbraniowej.

W czasie wezbrania ze zlewni odprowadzone zostało ok. 273 kg substancji rozpuszczonych w formie jonowej. Dostawa soli wraz z opadem wyniosła 22,1 kg (8,1% materiału odprowadzonego). Największe ładunki (9,2 g/s) odprowadzane były przez Dworski Potok w okresie, gdy ciek zasilany był głównie przez spływ powierzchniowy. Wysokie ładunki odprowadzane były również w początkowych i końcowych fazach wezbrania, gdy ciek zasilany był wodami spływu śródpokrywowego, mimo przemycia pokryw przez wcześniej występujące opady.



Ryc. 3. Opad (P) i skład chemiczny wody w Dworskim Potoku w czasie wezbrania 21 lipca 1997 r. Q – przepływ, Cd – koncentracja substancji rozpuszczonych, Ld – ładunek substancji rozpuszczonych.

Fig. 3. Precipitation (P) and chemical composition of water in Dworski Potok during the 21 July 1997 flood event

Q – discharge, Cd – concentration of dissolved solids, Ld – load of dissolved solids

## 5. Wnioski

Wezbrania Dworskiego Potoku charakteryzują się dużą dynamiką zmian przepływu oraz transportu substancji rozpuszczonych. Szybkiemu obiegowi wody w zlewni sprzyja rzeźba terenu, użytkowanie zlewni oraz występująca w niej pokrywa glebowa. Formowanie się krótkotrwałych i gwałtownych wezbrań sprzyja ponadto zwarty kształt tej małej zlewni.

W czasie wezbrań w lipcu 1997 r. w potoku następował spadek mineralizacji całkowitej, spowodowany rozcieńczeniem wód z zasilania gruntowego słabiej od nich zmineralizowanymi wodami spływu śródpokrywowego i powierzchniowego. Zmiany mineralizacji wód potoku zależały więc od mechanizmu jego zasilania. Dynamika tych zmian zależała od przebiegu samego wezbrania. W czasie niewielkich wezbrań, w zlewni słabo nawilżonej, mineralizacja cieku zmniejszała się stopniowo, w miarę wzrostu zasilania cieku spływem śródpokrywowym. W czasie wezbrań w zlewni dobrze nawilżonej dostawa wód spływu powierzchniowego powodowała szybki spadek koncentracji substancji rozpuszczonych. W czasie trwania wysokich przepływów koncentracja ta nie ulegała dużym zmianom, ponieważ dominujący udział w zasilaniu miało tylko jedno źródło dostawy wody – spływ powierzchniowy.

Zmianom przepływu Dworskiego Potoku towarzyszyły zmiany składu chemicznego jego wód. W trakcie wezbrań następował spadek koncentracji jonów:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ . Głównym źródłem dostawy tych jonów są wody gruntowe. Ponadto istotny udział w dostawie jonów  $\text{SO}_4^{2-}$  mogą mieć wody spływu śródpokrywowego. Jony  $\text{K}^+$  wykazują wzrost stężeń w czasie wezbrań. Ich dostawa do cieku następuje wraz z wodami spływu powierzchniowego i śródpokrywowego. W czasie dużych wezbrań, występujących w warunkach dobrze nawilżonych pokryw zlewni, wzrostowi przepływu towarzyszył wzrost stężeń anionu fosforanowego. Jest on dostarczany do cieku wraz z wodami spływu powierzchniowego.

W czasie niewielkich wezbrań, występujących w zlewni słabo nawilżonej, głównym źródłem zasilania cieku mogą być wody gruntowe wraz ze spływem śródpokrywowym. W trakcie wzrastania przepływu w czasie takich wezbrań wody gruntowe są głównym źródłem zasilania cieku. Dostawa wód spływu śródpokrywowego może nastąpić po upływie kilku godzin od wystąpienia opadu, co jest wynikiem utrudnionej migracji wód w przesuszonych pokrywach. Minimum koncentracji substancji rozpuszczonych występuje po kulminacji wezbrania, gdy nastąpi przemycie pokryw oraz zwiększy się udział wód „nowych” w zasilaniu.

W czasie wezbrań występujących w zlewni dobrze nawilżonej, niezależnie od powodującego je typu opadu, wzrost przepływu spowodowany jest przede wszystkim dostawą do potoku wód spływu powierzchniowego. Utrudniona infiltracja wód opadowych w nasycony grunt powoduje, że po każdym wzroście natężenia opadu następuje wzrost przepływu. Spływ śródpokrywowy odgrywa istotną rolę głównie w początkowych fazach wezbrania (zwłaszcza przy deszczach rozlewnych) oraz w czasie opadania fali. Reakcja wód spływu śródpokrywowego po wystąpieniu opadu następuje stosunkowo szybko, co jest wynikiem „wtłaczania” do cieku wód znajdujących się w pokrywach

przez infiltrujący opad. Minimum koncentracji substancji rozpuszczonych występuje zwykle w czasie kulminacji przepływu.

Największa część ładunku substancji rozpuszczonych odprowadzana jest ze zlewni w okresach, gdy dominującym źródłem zasilania cieką jest spływ powierzchniowy. Nie oznacza to jednak, że wszystkie transportowane wówczas przez potok sole pochodzą ze spłukiwania na stokach. Intensywne zasilanie spływem śródpokrywowym w czasie wezbrań z deszczy rozlewnych zwiększa ilość odprowadzanych substancji rozpuszczonych.

## Literatura

- Caissie D., Pollock T.M., Cunjak R.A., 1996, *Variation in stream water chemistry and hydrograph separation in a small drainage basin*, Journ. of Hydrol., 178.
- Chełmicki W., Kaszowski L., Świąchowicz J., 1992, *Zróżnicowanie i zmienność materiału rozpuszczonego w zlewni Starej Rzeki*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., 88.
- Edwards A. M. C., 1973, *The variation of dissolved constituents with discharge in some Norfolk rivers*, Journ. of Hydrol., 18.
- Froehlich W., 1982, *Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryta w górskiej zlewni fliszowej*, Prace Geogr. IGiPZ PAN, 143.
- Gacek T., 2000, *Czynniki dostawy fosforu do wód powierzchniowych na Pogórzu Karpackim* [w:] W. Chełmicki (red.), *Przemiany środowiska na Pogórzu Karpackim*, t. 1, Inst. Geografii UJ, Kraków.
- Janiec B., 1982, *Badanie denudacji chemicznej metodą konduktometryczną*, Annales UMCS, 37, sec. B.
- Kostrzewski A., Mazurek M., Stach A., Zwoliński Z., 1992, *Hydrochemiczna interpretacja przepływów wezbraniowych w zlewniach młodoglacjalnych* [w:] A. Kostrzewski, M. Pulina (red.), *Metody hydrochemiczne w geomorfologii dynamicznej*, Prace Nauk. UŚ, 1254.
- Krzemień K., 1995a, *Odprowadzanie materiału rozpuszczonego i zawieszony z pogórskich zlewni Starej Rzeki i Dworskiego Potoku* [w:] L. Kaszowski (red.), *Dynamika i antropogeniczne przeobrażenia środowiska przyrodniczego progu Karpat między Rabą a Uszwicą*, Inst. Geogr. UJ, Kraków.
- Krzemień K., 1995b, *Zróżnicowanie i zmienność chemizmu wód w zlewni Dworskiego Potoku (próg Pogorza Wielickiego) w roku hydrologicznym 1995* [w:] L. Kaszowski (red.), *Dynamika i antropogeniczne przeobrażenia środowiska przyrodniczego progu Karpat między Rabą a Uszwicą*, Inst. Geogr. UJ, Kraków.
- Krzemień K., Sobiecki K., 1998, *Transport of dissolved and suspended matter in small catchments of the Wieliczka Foothills near Łazy* [w:] W. Chełmicki (red.), *The Carpathian Foothills Marginal Zone. Man and Environment*, Prace Geogr., 103, Inst. Geogr. UJ.
- Olewicz Z., 1973, *Tektonika jednostki bocheńskiej i brzegu jednostki śląskiej między Rabą a Uszwicą*, Acta Geol. Pol., 23 (4).
- Siwec J., 1998, *Zmienność koncentracji materiału rozpuszczonego i zawieszony w czasie wezbrań w zlewni Dworskiego Potoku, maszynopis w Zakładzie Hydrografii IGUJ, Kraków.*
- Sklash M. G., Farvolden R. N., 1979, *The role of groundwater in storm runoff*, Journ. of Hydrol., 43.
- Starkel L., 1988, *Rzeźba* [w:] J. Warszyńska (red.), *Województwo tarnowskie. Monografia*, Ossolineum, Wrocław.

Walling D. E., Foster I. D. L., 1975, *Variations in the natural chemical concentration of river water during flood flows, and the lag effect: some further comments*, Journ. of Hydrol., 26.

Żelazny M., 1995, *Chemizm wód powierzchniowych i podziemnych w zlewni Starej Rzeki (Pogórze Wielickie)*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr, 100.

## HYDROCHEMICAL INTERPRETATION OF FLOOD EVENTS IN THE CATCHMENT OF DWORSKI POTOK (WIŚNICZ FOOTHILLS) IN JULY 1997

### Summary

Variations in the chemical composition of water of Dworski Potok during flood flows in July 1997 were analysed. The concentration of total dissolved solids in stream water decreased due to dilution of groundwater by rainfall. The concentration of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  ions, supplied by groundwater, decreased due to the dilution. The ions  $\text{K}^+$  and  $\text{PO}_4^{3-}$ , which are supplied with surface run-off and mid-soil flow, increased in concentration at the same time. It was a general regularity found during the flood events. Changes of solute concentration and chemical composition were the result of changes in the stream supply mechanism.

Individual flood events in July 1997 showed an independent course of change in chemical composition of the Dworski Potok water depending on the hydro-meteorological conditions and following soil moisture status. Groundwater plays an important role in runoff during small events, under conditions of low soil-moisture. During flood events, with the high soil moisture status, waters supplied to the stream by surface runoff caused a quick decrease in the dissolved matter concentration. During high flows concentration of total dissolved solids did not change much because there was only one dominant source of water supply – surface runoff. Rainwater infiltration in the water-saturated soils was hindered and, thus, was the reason that the stream flow always rose upon the increase in the rainfall intensity. The mid-soil played an important role in stream supply at the beginning of the storm event (especially during continuous rain) and during the subsequent fall in stream water-stage. The mid-soil waters reacted relatively quickly to the rainfall because they were „forced” into the stream by infiltrating rainfall waters penetrating the soil covers. The maximum  $\text{PO}_4^{3-}$  concentration up to 0.77 mg/l was found during the flow peak, as well as in the periods following the increase in the rainfall intensity.

