

DOI 10.2478/v10116-011-0009-5

## ZMIANY WIELKOŚCI I SKŁADU TRANSPORTU MATERIAŁU ROZPUSZCZONEGO W DOLNYM ODCINKU RZEKI OBRY

ZYGMUNT MŁYNARCZYK, MARCIN SŁOWIK

Zakład Centrum Turystyki i Rekreacji,  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, ul. Dziegielowa 27, 61-680 Poznań

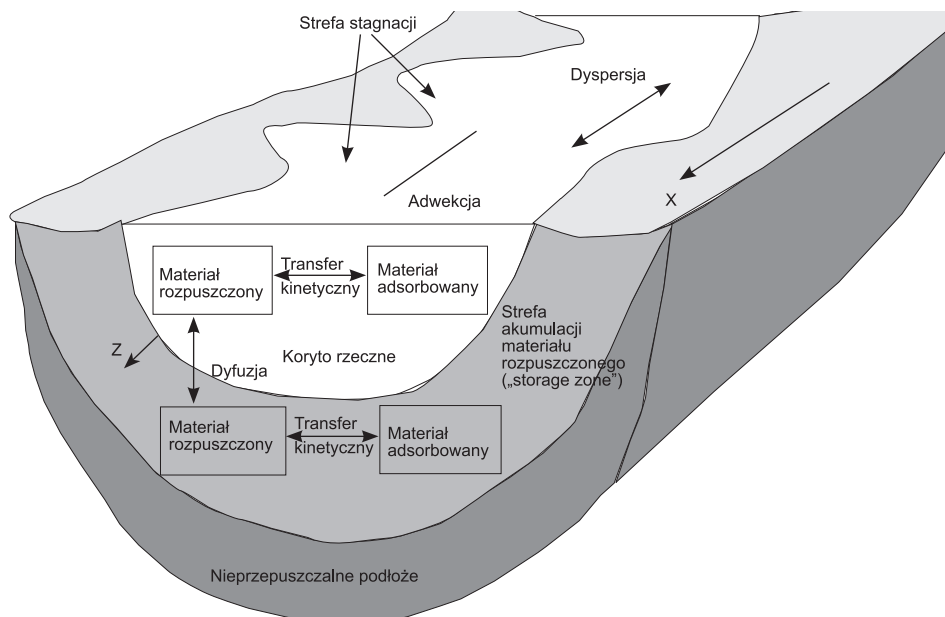
**Abstract:** The studies concerning changes in concentration of the selected elements of dissolved matter have been conducted in the lower section of the Obra River in the vicinity of Międzyrzecz. The main research objective was to determine the changes in transportation volume of dissolved matter as well as the analysis of changes of concentration of the selected chemical elements in diverse hydrological conditions. Twelve measurement series have been completed in order to define bathymetry of the riverbed and changes of flow volume. During field research, a total of 111 samples of water have been collected in order to determine the concentration of calcium, sodium, potassium, chlorides, phosphates and the measurements of electrolytic conductivity proper performed. It has been found that the geological structure of the Obra River catchment influences the concentration of the studied elements as well as the intensity of lixiviation processes, the effect of dilution, intensity of atmospheric precipitation and fertilization in agricultural areas. Also, it has been observed that the winter half-year was characterized by much greater volumes of transported dissolved matter in comparison with the summer half-year. The reason for this could be the denudational processes, the length of the vegetative period as well as the agricultural use of land.

**Key words:** dissolved matter, riverbed, the Obra valley

### WPROWADZENIE

Określenie zmian wielkości transportu substancji rozpuszczonych związane jest bezpośrednio ze wskazaniem metod umożliwiających obliczenie tempa denudacji chemicznej, jaka zachodzi na danym obszarze. Wiąże się ono również z aktywnością takich procesów, jak adwekcja i dyspersja (Habel i in. 2002; Guymer i in. 2005). Materiał rozpuszczony transportowany w korycie rzeczonym jest poddawany dyspersji, co bezpośrednio wpływa na jego koncentrację. Proces ten powoduje również stały kontakt substancji rozpuszczonych ze strefą hyporeiczną, co uruchamia ich dyfuzyjną wymianę wzdłuż obwodu zwilżonego koryta (Habel i in. 2002; Kazezyilmaz-Alhan 2006; De Smedt 2006, 2007). Na zmiany koncentracji elementów materiału rozpuszczonego może wpływać resuspensja osadów dennych koryta rzeczego (Hussein, Schwartz 2003). Jest to bardzo istotny proces w przypadku transportu zanieczyszczeń. Wzrost natężenia transportu materiału rozpuszczonego mogą opóźniać procesy chemiczne

(sorpcja związków chemicznych do materii cząsteczkowej) oraz procesy biologiczne (Jonsson, Wörman 2001). Oddziaływanie tych mechanizmów na zmiany transportu materiału rozpuszczonego ilustruje schemat przedstawiony przez Jonssona i Wormanana (2001) (ryc. 1).



Ryc. 1. Schemat oddziaływania mechanizmów sorpcji, adwekcji i dyfuzji na zmiany transportu materiału rozpuszczonego (Jonsson, Wörman 2001)

Fig. 1. Schematic of influence of sorption, advection and diffusion mechanisms on changes of solute transport in a river bed (Jonsson, Wörman 2001)

Wiele modeli transportu materiału rozpuszczonego opiera się na równaniu adwekcji i dyspersji (Hussein, Schwartz 2003; de Smedt 2007; Kazezyilmaz-Alhan 2006), wykorzystuje metodę znaczników (Jonsson, Wörman 2001; Salehin i in., 2003; Richardson, Carling 2006; de Smedt 2006, 2007) oraz uwzględnia wymianę materiału rozpuszczonego między korytem rzeczny a jego osadami dennymi (Habel i in. 2002) z wykorzystaniem metody momentów koncentracji materiału rozpuszczonego w korycie i w strefie dennej (Aris 1956, 1959 w: Habel i in. 2002). Stosowana jest ponadto metoda hydrometryczna dla obszarów krasowych (Pulina 1974) oraz młodogłacjalnych (Kostrzewski, Zwoliński 1984, 1985).

Podejmowano także próby określenia zależności pomiędzy koncentracją materiału rozpuszczonego a objętością przepływu, stosując równania regresji krzywoliniowej. W przypadku zlewni młodogłacjalnych wskazywały one na odwrotnie proporcjonalną zależność (Kostrzewski, Zwoliński 1992). Badania prowadzone przez Froehlich (1982) wykazały, że w trakcie wezbrań zależność

tę charakteryzuje efekt histerezy, który pojawia się, gdy koncentracja substancji rozpuszczonych podczas fazy podnoszenia jest odmienna niż w trakcie opadania wód. Ponadto, w czasie przepływów wezbraniowych uwidaczniają się różnice w zmianach koncentracji poszczególnych jonów. Jest to uwarunkowane ich właściwościami chemicznymi, udziałem w obiegu biologicznym, procesami glebowymi i geochemicznymi oraz odmiennymi drogami krążenia i dostawy materiału do koryta rzecznego (Walling, Webb 1980, w: Kostrzewski, Zwoliński 1992). Froehlich (1982) oraz Kostrzewski i Zwoliński (1992) poruszyli także problem sezonowej zmienności intensywności oddziaływania procesów denudacyjnych. Zauważyli, że poza czynnikami klimatycznymi duży wpływ na zmiany wielkości denudacji chemicznej ma wartość objętości przepływu w korycie rzecznym.

Istotnym parametrem, który umożliwia obliczenie natężenia transportu materiału rozpuszczonego, jest przewodność elektrolityczna właściwa. Jest ona bezpośrednio związana z zawartością rozpuszczonych w wodzie soli (Dojlido 1980) i wielkością odprowadzanego ładunku materiału rozpuszczonego (Salehin i in. 2003). Koncentracja soli rozpuszczonych w wodzie jest wynikiem procesów biogeochemicznych, którym podlegają te substancje jeszcze przed osiągnięciem koryta rzecznego. Zróżnicowanie składu chemicznego wód następuje podczas ich krążenia w glebie i podłożu mineralnym, a także poprzez kontakt z szatą roślinną. Hussein i Schwartz (2003) zaobserwowali, że strefa przybrzeżna koryta odgrywa ważną rolę w transferze elementów materiału rozpuszczonego. Salehin i in. (2003) stwierdzili, że zwarta pokrywa roślinna na brzegach koryta powoduje opóźnienie wzrostu koncentracji materiału rozpuszczonego w stosunku do wzrostu prędkości przepływu. Duże znaczenie ma również obieg biologiczny i działalność antropogeniczna.

Głównym celem przeprowadzonych badań było określenie zmian wielkości transportu materiału rozpuszczonego oraz analiza zmian koncentracji jego wybranych elementów przy różnych warunkach hydrologicznych w dolnym odcinku Obry. Należy zaznaczyć, że zarówno koryto, jak i zlewnia Obry są silnie przekształcone antropogenicznie, co w znaczący sposób wpływa na transport materiału rozpuszczonego. Do realizacji celu głównego posłużyły następujące cele cząstkowe:

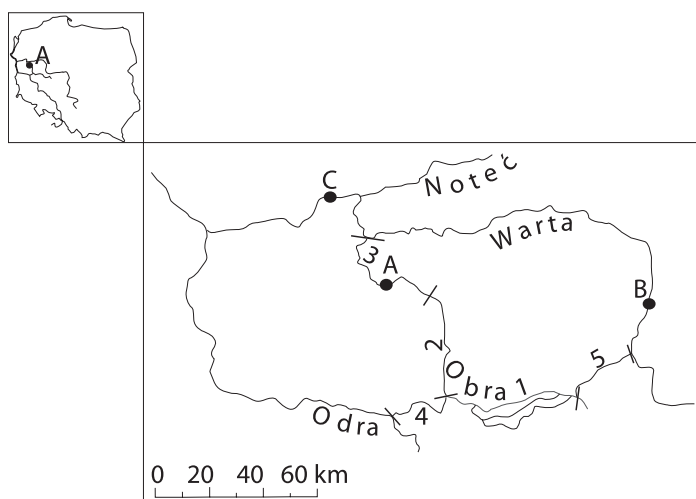
1. Analiza zmian koncentracji: wapnia, sodu, potasu, fosforanów i chlorków w badanych przekrojach poprzecznych koryta Obry w różnych warunkach hydrologicznych. Pozwoliła ona na przybliżenie wpływu objętości przepływu i procesów zachodzących na obszarze zlewni na transport materiału rozpuszczonego. Wśród wybranych jonów wapń, sód i potas są komponentami denudacyjnymi, natomiast chlorki i fosforany – pozadenudacyjnymi. Należy jednak zwrócić uwagę, że na wartości stężeń pierwszych trzech wymienionych pierwiastków w korycie rzecznym również mają wpływ zanieczyszczenia, a nie jedynie naturalne ich zawartości w podłożu zlewni i roślinności. Charakterystyka zmian koncentracji poszczególnych jonów została przedsta-

wiona w odniesieniu do zmian objętości przepływu. Analiza tej zależności umożliwiła wstępne określenie przyczyn zmian ich koncentracji w różnych warunkach hydrologicznych. Powyższe analizy przeprowadzono dla pięciu przekrojów poprzecznych koryta Obry, na których pobrano próby do analiz chemicznych w 12 seriach pomiarowych.

2. Obliczenie wielkości transportowanego ładunku materiału rozpuszczonego dla lat hydrologicznych 1971–1991. Dane te pozwoliły na porównanie wielkości transportu w latach hydrologicznych suchych i wilgotnych oraz w miesiącach półrocza letniego i zimowego.

## OBSZAR BADAŃ

Badania dotyczące uwarunkowań wpływających na zmiany koncentracji wybranych pierwiastków chemicznych oraz wielkości materiału rozpuszczonego przeprowadzono w dolnym odcinku rzeki Obry znajdującym się na obszarze Obniżenia Obry (odcinek 3; ryc. 2). Koryto tej rzeki podlegało intensywnym

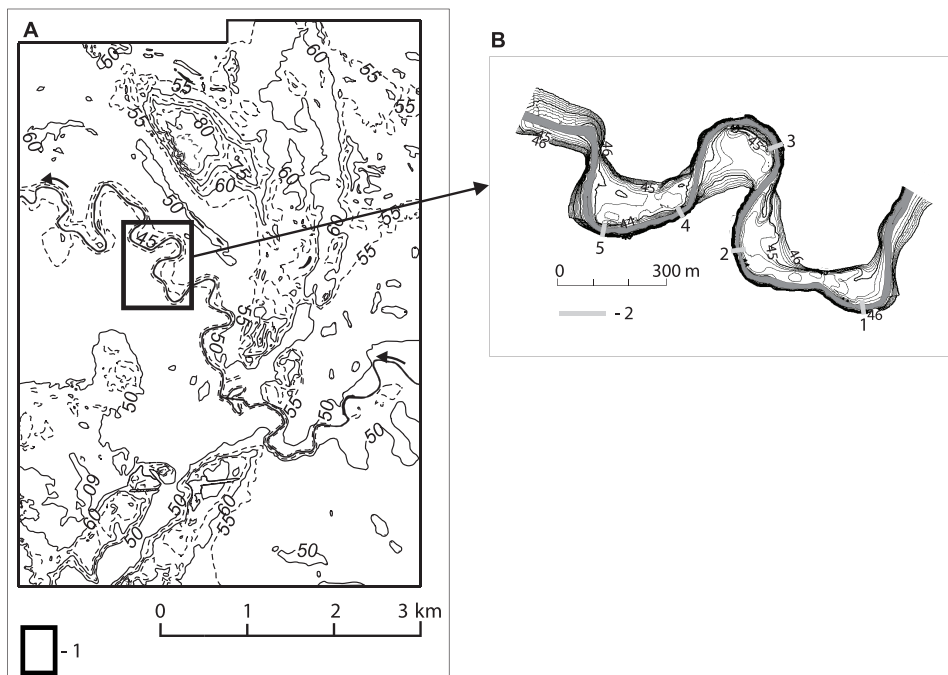


Ryc. 2. Przebieg Obry w jej środkowym i dolnym odcinku (Kościan–Skwierzyna)  
 Poszczególne odcinki wydzielono wg Tomaszewskiego (1967): 1 – odcinek Kościan–Kargowa (Pradolina Warszawsko-Berlińska), 2 – odcinek Kargowa–Policko, 3 – odcinek Policko–Skwierzyna, 4 – bifurkacja Obry (ujście do Odry koło Cigacic), 5 – ujście do Warty (Kanał Mosiński); A – Międzyrzecz, B – Poznań, C – Gorzów

Fig. 2. The Obra River in its middle and lower course (Kościan–Skwierzyna)  
 Particular sections were distinguished according to Tomaszewski (1967):  
 1 – section Kościan–Kargowa (Warsaw–Berlin Pradolina), 2 – section Kargowa–Policko,  
 3 – section Policko–Skwierzyna, 4 – bifurcation of the Obra River (outlet to the Oder near Cigacice), 5 – outlet to the Warta (Mosina Channel); A – Międzyrzecz, B – Poznań, C – Gorzów

przekształceniom od końca XVIII w. (budowa kanałów, sztuczne prostowanie koryta, budowa zastawek i zapór wodnych) (Słowik 2009). Obszerna charakterystyka dotycząca budowy geologicznej, geomorfologii i stosunków wodnych tego obszaru przedstawiona jest w opracowaniu pod redakcją M. Żurawskiego (Choiński i in. 1979) oraz w pracy Bartkowskiego (1956). Specyficzną cechą doliny Obry jest występowanie jezior przepływowych, które wpływają na złagodzenie amplitudy stanów wody, przepływów oraz przebiegu wezbrań (Paślawski 1973, w: Choiński 1988; Byczkowski 1999; Bajkiewicz-Grabowska 2002).

Do badań wybrano odcinek doliny Obry o długości 1000 m i szerokości od 70 m do 150 m, położony około 3 km na północny zachód od Międzyrzecza, w pobliżu miejscowości Św. Wojciech. W tym miejscu koryto Obry charakteryzuje się dobrze wykształconymi zakolami meandrowymi (ryc. 3). Dolina jest tu wąska i głęboka – brzegi erozyjne zakoli meandrowych cechuje znaczne nachylenie stoków i duża wysokość (od 7 m do 10 m nad poziomem dna doliny). Obra wykształciła swoją dolinę w osadach polodowcowych reprezentowanych przez



Ryc. 3. Mapa hipsometryczna obszaru badań i jego otoczenia (A) oraz położenie przekrojów pomiarowych (B)

1 – obszar badań, 2 – przekroje pomiarów

Fig. 3. Hypsometric map of research area and its surroundings (A) and the situation of river bed cross-sections (B)

1 – study area, 2 – river bed cross-sections

glinę morenową i fluwioglacjalne piaski drobnoziarniste, widoczne w kilku odsłonięciach w brzegach wklęsłych zakoli meandrowych. Gлина morenowa stanowi również podłoże osadów aluwialnych występujących w dnie doliny Obry. W obrębie badanego odcinka doliny szerokość koryta Obry wynosi od 15 m do 25 m. Jego głębokość przy wysokich stanach wody dochodzi do maksymalnie 3,25 m. Średni przepływ wynosi około  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a podczas wezbrań wzrasta maksymalnie do ponad  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Prędkość przepływu w strefie nurtu osiąga maksymalnie  $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , a w strefie brzegowej koryta nie przekacza  $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Słowik 2007; Młynarczyk, Słowik 2008).

## METODY BADAŃ

Pomiary hydrologiczne w korycie Obry przeprowadzono od 2 lutego 2002 do 4 kwietnia 2003 r. Wyznaczono pięć przekrojów poprzecznych (ryc. 3B), na których wykonano pomiary prędkości przepływu w pionach hydrometrycznych, zachowując między nimi odległość 1 m. Prędkości przepływu mierzono młynkiem hydrometrycznym. Przeprowadzono 12 serii pomiarowych. Ponadto, w celu przedstawienia geometrii koryta wykonano zdjęcie tachymetryczne badanego fragmentu doliny Obry w skali 1 : 3000 (ryc. 3A).

Według wytycznych PIHM (1970) pomiary prędkości przepływu przy głębokości rzeki przekraczającej 0,6 m przeprowadza się przy dnie, na głębokościach 0,2 *h*, 0,4 *h* i 0,8 *h* (*h* – głębokość koryta) oraz przy powierzchni. Liczba punktów, w których wykonano pomiary, jest większa. Wynika to z przeznaczenia danych pomiarowych do określenia zależności pomiędzy zmiennymi charakteryzującymi przepływ a natężeniem transportu rumowiska w przekroju koryta rzecznoego (Młynarczyk, Słowik 2005, 2008). Prędkość przepływu mierzono punktowo w każdym pionie – w odległości od dna: 0,1, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 m, jak również pod powierzchnią zwierciadła wody. W każdej z serii pomiarowych odczytywano wysokość stanu wody z łaty wodowskazowej umieszczonej na wodowskazie IMGW w Międzyrzeczu. Jest on ulokowany w odległości 42,8 km od ujścia Obry w Skwierzynie i zamyka obszar dorzecza Obry o powierzchni 2,116 tys. km<sup>2</sup>.

Pobrano 111 próbek wody do określenia zawartości jonów: wapnia, sodu, potasu, chlorków oraz fosforanów. Wymienione pierwiastki mogą pochodzić z rozpuszczania podłoża zlewni przez wody opadowe lub gruntowe (komponenty denudacyjne) lub z opadów atmosferycznych i działalności człowieka (komponenty pozadenudacyjne) (Kostrzewski i in. 1994). W poszczególnych seriach pomiarowych pobierano od 8 do 10 próbek. Najwięcej próbek (5 w czasie każdej z serii) pobrano z przekroju nr 4 (ryc. 3), który położony był na początku prostego odcinka koryta i cechował się kształtem zbliżonym do symetrycznego (Młynarczyk, Słowik 2008). Próbki pobierano co 2 m szerokości przekroju

koryta. Wyniki analiz zawartości poszczególnych pierwiastków uśredniano dla każdej serii pomiarowej.

Ponadto, w celu określenia zawartości wapnia pobrano pięć próbek osadu z odsłonięcia w wysokim brzegu koryta Obry. W pobranych próbkach wody wykonano pomiary przewodności elektrolitycznej właściwej za pomocą konduktometru oraz określono zawartości następujących pierwiastków i związków chemicznych:

- chlorki: metodą miareczkowania za pomocą roztworu azotanu srebra wobec chromianu potasu,
- wapń: metodą wersenianową (miareczkowanie za pomocą wersenianu dwusodu wobec kalcesu),
- sód i potas: metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej na spektrometrze Analyst 300 firmy Perkin Elmer z atomizacją w płomieniu acetylen–powietrze, po wcześniejszej mineralizacji/roztworzeniu próbki na mokro za pomocą stężonego kwasu azotowego i nadtlenu wodoru,
- fosforany: kolorymetryczną metodą molibdenianową przy użyciu kwasu askorbinowego jako reduktora (Elbanowska, Zerba, Siepak 1999).

W próbkach osadu określono zawartość wapnia metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej. Analizy te zostały wykonane w Zakładzie Analiz Wody i Gruntu Wydziału Chemii UAM.

Wielkości transportu materiału rozpuszczonego obliczono dla lat 1971–1991, opierając się na otrzymanej zależności między natężeniem transportu a stanem wody. Zależności te wyznaczono na podstawie wyników pomiarów terenowych wykonanych od 2 lutego 2002 do 4 kwietnia 2003 r. Hussein i Schwart (2003) stwierdzili, że koncentracje wybranych elementów materiału rozpuszczonego charakteryzuje duża czułość na zmiany objętości przepływu. Odniesienie natężenia transportu do objętości przepływu było jednak niemożliwe ze względu na brak krzywej konsumpcyjnej przepływów dla wodowskazu Międzyrzecz.

Dla każdej z próbek wody poddanych analizom chemicznym obliczono wartość mineralizacji ogólnej, stosując wzór Dorochońskiego (Paluch 1973) dla temperatury 20°C, gdzie:

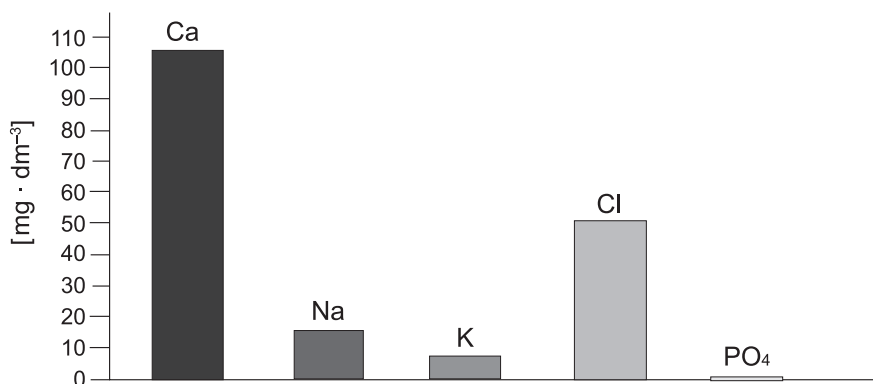
$P_T$  – przewodność próby w temperaturze  $T$  [ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ].

$T$  – temperatura próbki wody w czasie pomiaru przewodności [ $^{\circ}\text{C}$ ].



## ZMIANY KONCENTRACJI WYBRANYCH ELEMENTÓW MATERIAŁU ROZPUSZCZONEGO ORAZ PRZEWODNOŚCI ELEKTROLITYCZNEJ W RÓŻNYCH WARUNKACH HYDROLOGICZNYCH

Najwyższe zanotowane przepływy wystąpiły w marcu i kwietniu 2002 r. Koncentracje poszczególnych jonów w tym czasie przedstawiono na przykładzie przekroju pomiarowego nr 4 (ryc. 4). Przy objętości przepływu sięgającej niemal  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , wapń charakteryzował się największą koncentracją (ryc. 4). Były to najwyższe stężenia tego komponentu zanotowane w okresie objętym pomiarami. Wapń występuje w dużych ilościach w osadach glacialnych stanowiących podłoże aluwialnego wypełnienia dna doliny. Analiza koncentracji tego pierwiastka w próbkach osadów pobranych z odsłonięcia osadów glacialnych (głina zwałowa) w wysokim brzegu koryta Obry wykazała, że osad ten zawiera w sobie od  $20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  do  $25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  wapnia. Wapń występuje ponadto w osadach aluwialnych. W torfach i piaskach drobnoziarnistych jego koncentracje maksymalnie sięgają  $22,4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  (Słowik 2007).



Ryc. 4. Koncentracje analizowanych pierwiastków w czasie wezbrania  
14 III 2002 – przekrój nr 4, objętość przepływu  $9,71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

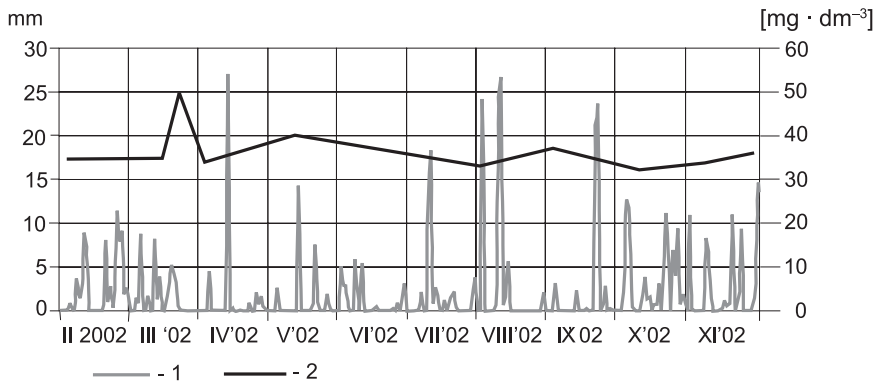
Fig. 4. Concentrations of studied elements in the period of high water stages  
14 March 2002 – cross-section 4, discharge:  $9.71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Pierwiastek ten może być również dostarczany przez wody gruntowe o długim czasie krążenia i poprzez oddziaływanie procesów ługowania, związane ze spływami powierzchniowymi (Kostrzewski i in. 1999). W czasie kulminacji wezbrania koncentracje wapnia na każdym z przekrojów pomiarowych przekraczały  $100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Sytuacja taka może być efektem intensywnego ługowania



gleb w tym okresie, do czego mogły przyczynić się stosunkowo duże i rozłożone w czasie opady atmosferyczne w lutym i marcu 2002 r. (ryc. 5). W miesiącach letnich (lipiec i sierpień 2002) zaznaczył się wyraźny spadek objętości przepływu (poniżej  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Znalazło to odbicie w zmianach koncentracji wapnia, które w przekrojach nr 3, 4 i 5 wyniosły  $65 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (ryc. 6 – przekrój nr 4) (Słowik 2007). Jest to prawdopodobnie rezultat mniejszej intensywności procesów ługowania na obszarze zlewni w okresie charakteryzującym się niskimi wartościami opadów atmosferycznych (ryc. 4).

Jony chlorkowe są dostarczane do koryta rzecznego głównie przez opady atmosferyczne i związane z nimi dodatkowe uruchomienie związków wytrąconych wskutek ewapotranspiracji lub zatrzymanych z suchego opadu na powierzchni szaty roślinnej, przede wszystkim liści i igieł (Kostrzewski i in. 1994). Chlorki stanowią także składnik nawozów organicznych i sztucznych, co w przypadku zlewni o charakterze rolniczym i zurbanizowanym może w istotny sposób wpłynąć na wielkość ich koncentracji w wodach rzecznych (Kostrzewski, Zwoliński 1992). Znaczne ilości opadów atmosferycznych w lutym i marcu 2002 r. (ryc. 5) przyczyniły się do wzrostu zawartości chlorków, która w trakcie trzeciej serii pomiarowej na wszystkich badanych przekrojach wyniosła ponad  $50 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (ryc. 5). W okresie występowania wartości przepływu w przedziale  $4\text{--}6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  dwukrotnie zaobserwowano wzrost stężenia jonów chlorkowych (maj i wrzesień 2002). Obydwa te pomiary poprzedzał okres, w którym wystąpiły zwiększone, lecz krótkotrwałe opady atmosferyczne (ryc. 5). W okresie letnim charakteryzującym się niskimi przepływami (ryc. 6) nastąpił spadek stężenia chlorków. Ich



Ryc. 5. Zmiany koncentracji chlorków na tle dobowych sum opadów atmosferycznych w okresie luty–listopad 2002 r. na przykładzie przekroju nr 4  
1 – opady atmosferyczne, 2 – koncentracja jonów chlorkowych (Słowik 2007)

Fig. 5. Changes of chlorides concentration and daily precipitation in the period between February and November 2002 – the example of cross-section 4  
1 – precipitation, 2 – chloride contents (Słowik 2007)

koncentracje wahały się od  $24 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  do  $33 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (Słowik 2007). Był to przypuszczalnie efekt niskich sum opadów w tym czasie (lipiec–sierpień 2002).

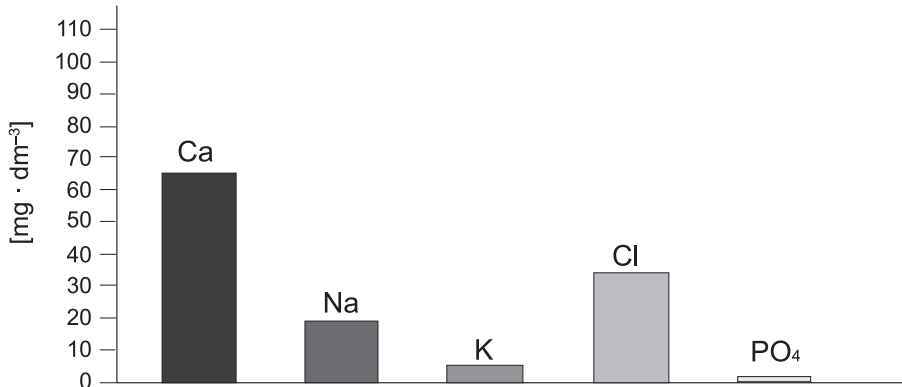
Można przypuszczać, że komponent ten pochodził także z nawozów stosowanych na obszarach rolniczych. W czasie pomiaru na początku kwietnia 2002 r. koncentracja jonów chlorkowych była już znacznie niższa ( $34 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ; ryc. 5), na co przypuszczalnie miał wpływ efekt rozcieńczenia (Słowik 2007).

Analizując jony sodu, w trakcie wezbrania zanotowano jedne z najniższych koncentracji tego pierwiastka w okresie pomiarowym. Wyniosły one około  $16 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  na wszystkich badanych przekrojach. Wyższe stężenie tego komponentu stwierdzono natomiast w okresie poprzedzającym stany wezbraniowe (luty 2002, powyżej  $17 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) (Słowik 2007). Spadek stężenia sodu można tłumaczyć występowaniem efektu rozcieńczenia przy wzroście objętości przepływu, a także wyczerpywaniem się sodu w warstwach powierzchniowych zlewni. Odwrotnie proporcjonalną zależność między stężeniami elementów materiału rozpuszczonego a objętością przepływu zaobserwowali również Hussein i Schwartz (2003). Sód to pierwiastek pochodzący głównie z erozji powierzchni glebowych na obszarze zlewni (jego obecność związana jest z procesami ługowania). Źródłami tego pierwiastka mogą być także zanieczyszczenia antropogeniczne oraz stosowanie nawozów na terenach rolniczych (Kostrzewski, Zwoliński 1985), a także procesy wietrzenia krzemianów (Gaillardet i in. 1997). Można przypuszczać, że sód w profilach glebowych na obszarze badanego fragmentu zlewni występuje w mniejszych ilościach niż wapń (wskazują na to kilkakrotnie mniejsze koncentracje jonów sodu). Z tego powodu przy intensywnych procesach ługowania stosunkowo szybko może dochodzić do wyczerpywania się źródeł dostawy tego pierwiastka. Przy niskich stanach wody (lipiec i sierpień 2002) zaobserwowano wzrost koncentracji sodu, która osiągnęła  $20 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w przekroju nr 4 (ryc. 6) i  $22 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  w przekrojach 2 i 3 (Słowik 2007).

Niskie koncentracje w okresie wysokich stanów wody dotyczyły fosforanów ( $0,1 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  lub poniżej granicy oznaczalności) (ryc. 4). Na pozostałych przekrojach pojawiają się istotne różnice. Fosforany są silnie związane z oddziaływaniem antropogenicznym na obszar zlewni. Występują one głównie w nawozach i środkach ochrony roślin, a także w zanieczyszczeniach miejskich i przemysłowych (Elbanowska, Zerbe, Siepak 1999). Podczas fali wzrastającej wezbrania zaobserwowano tu wzrost koncentracji fosforanów do  $0,45\text{--}0,6 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (Słowik 2007). Mogło to mieć związek z dostarczeniem opisywanego komponentu z obszarów rolniczych (na lewym brzegu Obry, w pobliżu pierwszych trzech przekrojów, znajduje się pole wykorzystywane pod uprawę żyta). Podczas niskich stanów wody stężenie fosforanów wynosiło do  $1,1 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

Stężenia jonów potasu w okresie wezbrania wykazywały niewielkie zróżnicowanie w stosunku do przepływu. Koncentracja tego komponentu wyniosła  $6 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (14 lutego 2002; ryc. 4) (Słowik 2007). W innych seriach pomiarowych

opisujących stany wezbraniowe wartość ta nie zmieniła się w istotny sposób. Łatwem zaobserwowano spadek koncentracji potasu do  $4,8 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  (ryc. 6). Mógł być to wynik sezonowego włączania tego komponentu do obiegu biologicznego. Włączenie potasu do obiegu biologicznego ogranicza jego obecność w wodzie (Kostrzewski, Mazurek, Zwoliński 1994).



Ryc. 6. Koncentracje analizowanych pierwiastków w okresie występowania niskich wartości przepływu

1 VIII 2002 – przekrój nr 4, objętość przepływu  $1,71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

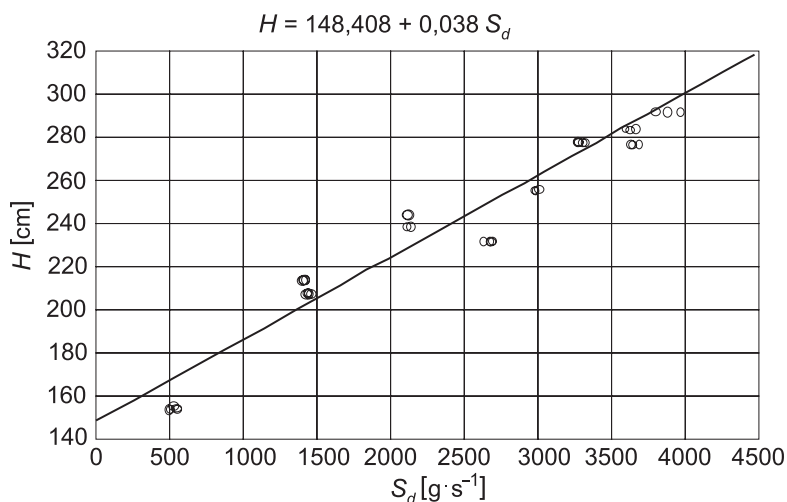
Fig. 6. Concentrations of studied elements in the period of low water stages

1 August 2002 – cross-section 4, discharge  $1.71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Najwyższe przewodności elektrolityczne (powyżej  $600 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) zanotowano podczas wezbrania powodziowego w marcu 2002 r. W miarę przebiegu wezbrania obserwowane wartości przewodności uległy niewielkiemu obniżeniu (do  $580 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ). Natomiast najniższe wartości przewodności elektrolitycznej ( $460\text{--}510 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) związane były z niskimi przepływami w lipcu i sierpniu 2002 r. (Słowik 2007). W połączeniu z niskimi wartościami przepływu wskazuje to, że okres ten był mniej produktywny pod względem wielkości odprowadzanego ładunku materiału rozpuszczonego.

## WIELKOŚĆ TRANSPORTU MATERIAŁU ROZPUSZCZONEGO W LATACH 1971–1991

Obliczenie wielkości mineralizacji ogólnej z zastosowaniem wzoru Dorochowskiego (Paluch 1973) pozwoliło na wyznaczenie zależności pomiędzy ładunkiem materiału rozpuszczonego a stanem wody (ryc. 7). Na podstawie tego



Ryc. 7. Zależność pomiędzy natężeniem transportu materiału rozpuszczonego ( $S_d$ ) a stanem wody ( $H$ ) (Słowik 2007)

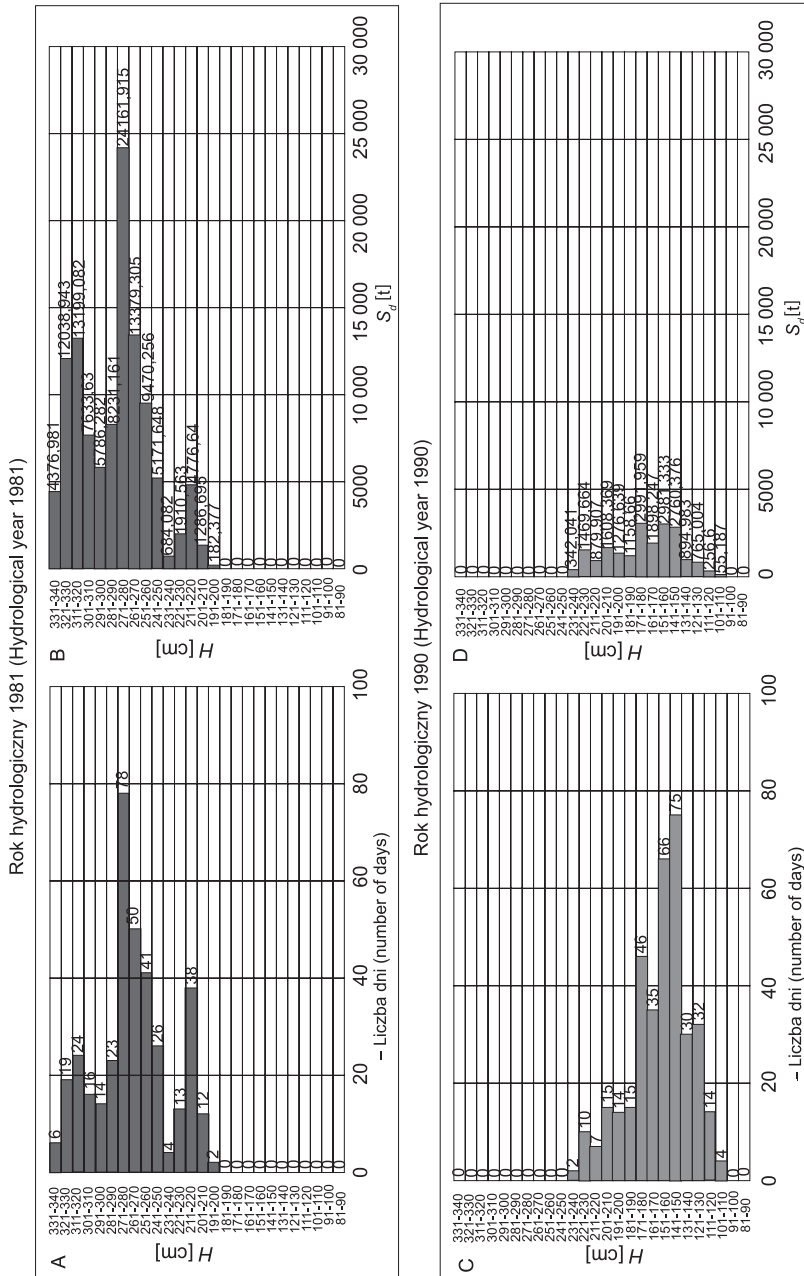
Fig. 7. Relation between the amount of solute transport load ( $S_d$ ) and water stage ( $H$ ) (Słowik 2007)

związku dokonano obliczenia wielkości transportu materiału rozpuszczonego w latach 1971–1991.

Szczególną uwagę zwrócono na wybrany rok wilgotny (1981) i suchy (1990) (ryc. 8). W roku hydrologicznym 1981 roczna wielkość transportu materiału rozpuszczonego wyniosła 112 289 t. Podobnie jak w przypadku rumowiska wlezonego (Młynarczyk, Słowik 2005), największy ładunek materiału podlegał transportowi przy utrzymujących się przez długi czas (78 dni; ryc. 8A) wysokich stanach wody (od 271 cm do 280 cm). W czasie ich występowania odprowadzonych zostało ponad 20 tys. ton ładunku substancji rozpuszczonych (ryc. 8B) (Słowik 2007).

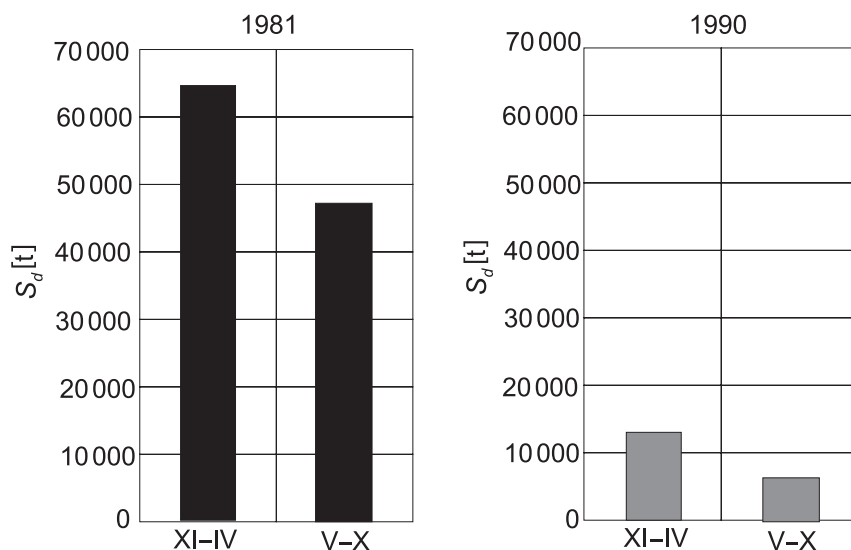
W roku suchym (1990) wielkość transportu substancji rozpuszczonych wyniosła 19 338 t. Wpłynęła na to przypuszczalnie niska aktywność procesów morfogenetycznych oraz czynników klimatycznych oddziałujących na obszar zlewni. Najbardziej „produktywny” okazał się okres występowania stanów wody w zakresie 171–180 cm (2991 t materiału rozpuszczonego (ryc. 8C i D)). Dopiero w drugiej kolejności pod tym względem zaznaczyły się stany wody w zakresie 141–150 cm, charakteryzujące się największą częstością występowania (75 dni; ryc. 8C i D). Można przypuszczać, że w tym przypadku większe znaczenie w kształtowaniu wielkości transportu miały warunki przepływu wody w korycie niż częstość występowania określonych stanów wody (Słowik 2007).

Dokonano porównania wielkości transportu materiału rozpuszczonego dla



Ryc. 8. Częstość występowania stanów wody ( $H$ ) oraz wielkość transportu materiału rozpuszczonego ( $S_d$ ) w roku wilgotnym (1981; A, B) i suchym (1990; C, D) (Słowik 2007)

Fig. 8. Frequency of water stages ( $H$ ) and the amount of solute transport ( $S_d$ ) in the chosen wet (A, B) and dry (C, D) hydrologic year (Słowik 2007)



Ryc. 9. Wielkość transportu materiału rozpuszczonego w miesiącach półrocza zimowego (XI–IV) i letniego (V–X) w roku suchym i wilgotnym (Słowik 2007)

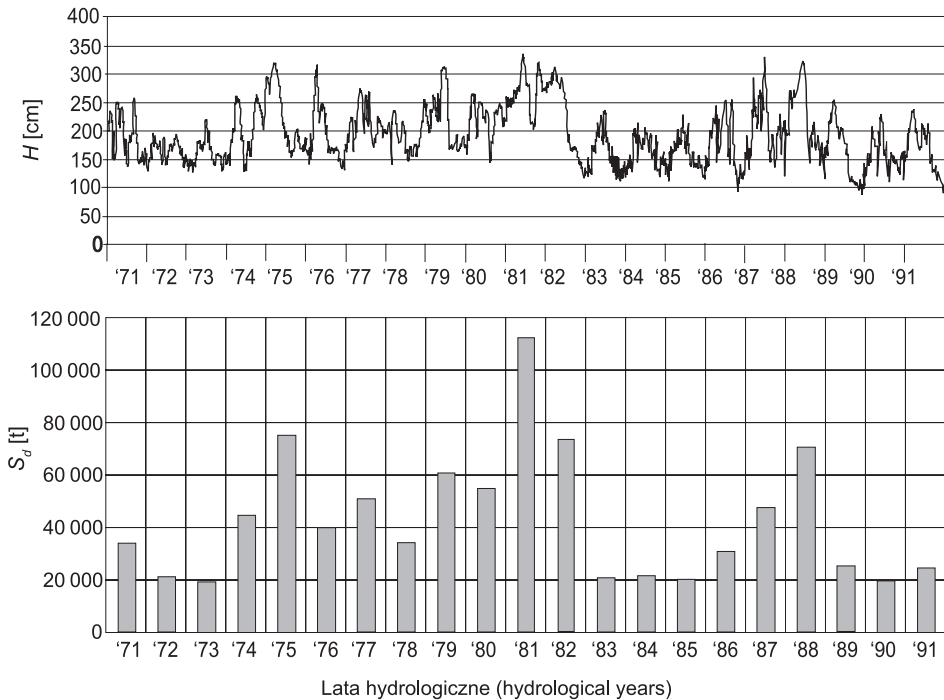
Fig. 9. Amount of solute transport during winter (November–April) and summer (May–October) months in a wet (1981) and dry (1990) hydrological year (Słowik, 2007)

miesiący zimowych i letnich w obydwu analizowanych latach hydrologicznych (ryc. 9). Podobnie jak w przypadku transportu materiału zawieszono (Młynarczyk, Słowik 2007), większa ilość substancji rozpuszczonych odprowadzana była w okresie zimowym.

Fakt ten wynika z intensywnego wymywania substancji rozpuszczonych z podłoża zlewni zimą, na co wpływają warunki hydrometeorologiczne i niski stopień rozwoju szaty roślinnej. Podwyższone wartości transportu w okresie zimowym stwierdzano także w przypadku zlewni rzecznych obszaru młodogłajnego (Kostrzewski, Mazurek, Zwoliński 1994). Elementem najlepiej ilustrującym ten proces jest, w przypadku badanego fragmentu doliny Obry, wapń, którego największe koncentracje zanotowano w miesiącach półrocza zimowego (marzec 2002), podczas znacznych opadów atmosferycznych i wysokich stanów wody (Słowik 2007).

Roczne wielkości transportu materiału rozpuszczonego obliczono dla okresu objętego systematycznymi obserwacjami hydrologicznymi (1971–1991) (ryc. 10).

Największe obliczone wartości transportu przypadają na lata charakteryzujące się intensywnymi wezbrzeniami oraz długimi okresami utrzymywania się wysokich stanów wody (1975, 1981–1982, 1988; ryc. 10) (Słowik 2007). Latem hydrologicznym, w których miały miejsce długotrwałe niżówki, a mak-

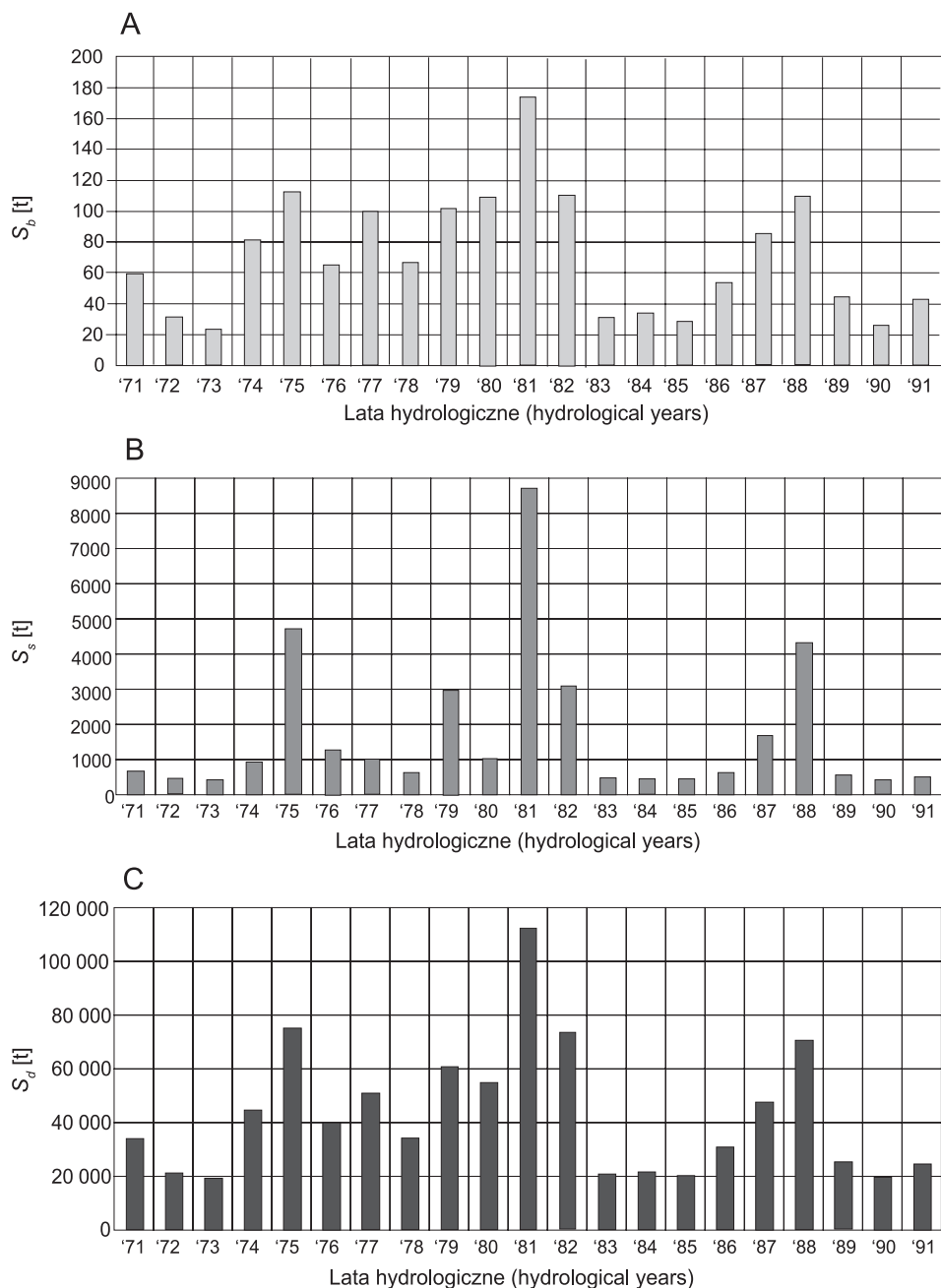


Ryc. 10. Roczne wielkości transportu materiału rozpuszczonego ( $S_d$ ) w latach 1971–1991 na tle wahań stanów wody (Słowik 2007)

Fig. 10. Annual amount of solute transport ( $S_d$ ) and changes of water stages in hydrological years 1971–1991 (Słowik, 2007)

symalne stany wody nie przekroczyły 250 cm, odpowiadały niskie wartości transportu. Obliczone wartości transportu materiału rozpuszczonego w latach suchych i wilgotnych znacznie przewyższają wielkość ładunku zawiesiny (Młynarczyk, Słowik 2005) oraz materiału wlezonego (Młynarczyk, Słowik 2007) (ryc. 11). Z porównania wartości transportu dla roku hydrologicznego 1981 wynika, że wielkość ładunku materiału rozpuszczonego 13-krotnie przewyższa transport zawiesiny i aż 640-krotnie transport materiału wlezonego. Na tak znaczną różnicę w drugim z wymienionych przypadków wpłynęła obecność osadów glacialnych w podłożu doliny Obry oraz występowanie bruku erozyjnego, który nie podlega transportowi w warunkach hydrologicznych koryta Obry (Młynarczyk, Słowik 2008). Wskazuje to na przewagę procesów denudacji chemicznej w dolnym odcinku Obry, co jest potwierdzeniem badań prowadzonych w zlewniach młodoglacialnych (Kostrzewski, Mazurek, Zwoliński 1994). Podobne wyniki uzyskano również na środkowym odcinku Wisły, gdzie stosunek transportowanej zawiesiny i substancji rozpuszczonych wynosił 1 : 5 (Fal 1965).





Ryc. 11. Zestawienie wielkości ładunku materiału wlezonego ( $S_b$ ) (A), zawieszonoego ( $S_s$ ) (B) i rozpuszczonego ( $S_d$ ) (C) w dolnym odcinku rzeki Obry w latach 1971–1991

Fig. 11. Comparison of amounts of bed-load ( $S_b$ ) (A), suspended load ( $S_s$ ) (B) and solute material transport ( $S_d$ ) (C) in the lower course of the Obra River in the years 1971–1991

## WNIOSKI

Występowanie najwyższych w okresie pomiarowym koncentracji wapnia przy wysokich wartościach przepływu jest rezultatem intensywnych procesów ługowania na obszarze badanego fragmentu zlewni, budowy litologicznej podłoża zlewni bogatej w związki wapnia. Koncentracje pozostałych badanych pierwiastków były uwarunkowane takimi czynnikami, jak: efekt rozcieńczenia (sód, fosforany), wielkość opadów atmosferycznych (chlorki), włączanie pierwiastka do obiegu biologicznego w okresie letnim (potas) oraz stosowanie nawozów na obszarach rolniczych (sód, potas i fosforany).

Natężenie transportu materiału rozpuszczonego w dolnym odcinku Obry jest co najmniej 13-krotnie większe od transportu zawiesiny i 640-krotnie większe od transportu materiału wlezonego, co potwierdza przewagę procesów denudacji chemicznej nad denudacją mechaniczną. Wielkość ładunku materiału rozpuszczonego w roku wilgotnym była niemal sześciokrotnie większa niż w roku suchym. Wynika to z warunków przepływu wody w korycie oraz długości okresu, w jakim się utrzymywały.

W miesiącach półroczna zimowego stwierdzono większe natężenie transportu substancji rozpuszczonych, co uwarunkowane jest: wielkością opadów atmosferycznych, długością okresu wegetacyjnego, stopniem pokrycia szatą roślinną oraz rolniczym użytkowaniem gruntów na obszarze zlewni.

## LITERATURA

- Bajkiewicz-Grabowska E., 2002: *Obieg materii w systemach rzeczno-jeziornych*. Uniw. Warszawski, Warszawa, 1–274.
- Bartkowski T., 1956: *Z zagadnień geomorfologicznych okolicy Międzyrzecza*. Bad. Fizjogr. nad Pol. Zach., t. III, PTPN, Poznań, 1–61.
- Byczkowski A., 1999: *Hydrologia*. t. II. Wyd. SGGW, Warszawa, 1–416.
- Choiński A., 1988: *Zróżnicowanie i uwarunkowania zmienności przepływów rzek polskich*. Wyd. Nauk. UAM, Poznań, 1–99.
- Choiński A., Kaniecki A., Krajniak J., Żurawski M., 1979: *Wody gminy Międzyrzec*. Międzyrzeckie Tow. Kultury, Poznań–Międzyrzec, 1–111.
- De Smedt F., 2006: *Analytical solution for transport of decaying solutes in rivers with transient storage*. Journ. of Hydrol., 330, 672–680.
- De Smedt F., 2007: *Analytical solution and analysis of solute transport in rivers affected by diffusive transfer in the hyporheic zone*. Journ. of Hydrol., 339, 29–38.
- Dojlido J.R., 1980: *Instrumentalne badania wody i ścieków*. Warszawa.
- Elbanowska H., Zerbe J., Siepak J., 1999: *Fizyczno-chemiczne badania wód*. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.
- Fal B., 1965: *Transport rumowiska unoszonego i rozpuszczonego na środkowej Wiśle oraz próba ustalenia ogólnej masy transportu w rejonie Warszawy*. Pr. PIHM, z. 88, Warszawa.
- Froehlich W., 1982: *Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin w górskiej zlewni fliszowej*. Pr. Geogr. IGiPZ PAN, 143.

- Gaillardet J., Dupre B., Allegre C.J., Negrel P., 1997: *Chemical and physical denudation in the Amazon river basin*. Chem. Geol., 142, 141–173.
- Guymer I., Wilson C.A.M.E., Boxall J.B., 2005: *Modelling solute transport processes in free surface flow CFD schemes*. [W:] D. Bates, S.N. Lane, R.I. Ferguson (red.), *Computational Fluid Dynamics. Applications in Environmental Hydraulics*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Habel F., Mendoza C., Bagtzoglou A.C., 2002: *Solute transport in open channel flows and porous streambeds*. Advances in Water Res., 25, 455–469.
- Hussein M., Schwartz F.W., 2003: *Modeling of flow and contaminant transport in coupled stream-aquifer systems*. Journ. of Contaminant Hydrol., 65, 41–64.
- Jonsson K., Wörman A., 2001: *Effect of sorption kinetics on the transport of solutes in streams*. Journ. of the Total Environment, 266, 239–247.
- Kazeyilmaz-Alhan C.M., Medina Jr. M.A., 2006: *Stream solute transport incorporating hyporheic zone processes*. Journ. of Hydrol., 329, 26–38.
- Kostrzewski A., Mazurek M., Stach A., Zwoliński Z., 1999: *Funkcjonowanie geosystemu dorzecza Parsęty w warunkach wezbraniowych*. [W:] A. Kostrzewski (red.), *Funkcjonowanie geosystemów zlewni rzecznych*. Wyd. Nauk. Bogucki, Poznań.
- Kostrzewski A., Mazurek M., Zwoliński Z., 1994: *Dynamika transportu fluwialnego górnej Parsęty jako odbicie funkcjonowania systemu zlewni*. Stow. Geomorf. Pol., Poznań.
- Kostrzewski A., Zwoliński Z., 1984: *Zastosowanie metody hydrometrycznej do analizy tempa denudacji chemicznej na obszarze nizin Pomorza Zachodniego: wstępne opracowanie metodyczne*. Spraw. PTPN, 100, Poznań 150–158.
- Kostrzewski A., Zwoliński Z., 1985: *Chemical denudation rate in the upper Parsęta catchment, Western Pomerania: research methods and preliminary results*. Quaes. Geograph., Spec. Iss., 1, 121–138.
- Kostrzewski A., Zwoliński Z., 1992: *Denudacja chemiczna w zlewniach młodoglacjalnych: zlewnia górnej Parsęty, rok hydrologiczny 1987*. [W:] A. Kostrzewski, M. Pulina (red.), *Metody hydrochemiczne w geomorfologii dynamicznej, wybrane problemy*. Uniw. Śląski, Katowice.
- Młynarczyk Z., Słowik M., 2005: *Zmiany natężenia transportu materiału wleczonego w dolnym odcinku rzeki Obry w okolicach Międzyrzecza*. Bad. Fizjogr. nad Pol. Zach., Ser. A – Geogr. Fiz., t. 56, 107–135.
- Młynarczyk Z., Słowik M., 2007: *Zmiany natężenia transportu materiału zawieszonyego w dolnym odcinku Obry*. Bad. Fizjogr. nad Pol. Zach., Ser. A – Geogr. Fiz., t. 58, 109–134.
- Młynarczyk Z., Słowik M., 2008: *Temporal variation of intensity of bed-load transport rate in the lower course of the obra river near Międzyrzecz (western Poland)*. Quaest. Geograph., 27A/1, 69–86.
- Paluch M., 1973: *Mikrobiologia wód*. PWN, Warszawa.
- Pihm, 1970: *Wytyczne do wykonywania i opracowania pomiarów przepływu metodą rachunkową*. Oprac. J. Gołek. Instr. i podręczniki, nr 88.
- Pulina M., 1974: *Denudacja chemiczna na obszarach krasu węglanowego*. Pr. Geogr. IG PAN, 105, Wrocław.
- Richardson K., Carling P.A., 2006: *The hydraulics of a straight bedrock channel: insights from solute dispersion studies*. Geomorph., 82, 98–125.
- Salehin M., Packman A., Wörman A., 2003: *Comparison of transient storage in vegetated and unvegetated reaches of a small agricultural stream in Sweden: seasonal variation and anthropogenic manipulation*. Advances in Water Res., 26, 951–964.
- Słowik M., 2007: *Procesy kształtujące koryto rzeczne na przykładzie dolnego odcinka Obry*. Wyd. Nauk. UAM, Poznań, 1–169.
- Słowik M., 2009: *Wpływ działalności człowieka na zmiany układu koryta rzecznoego w środkowym i dolnym odcinku Obry*. [W:] I. Hildebrandt-Radke, J. Jasiewicz, M. Lutyńska (red.), *Zapis działalności człowieka w środowisku przyrodniczym*. VII Warsztaty Terenowe, 20–22 maja 2009, Kórnik, 133.

Tomaszewski E., 1967: *Geomorfologia i geneza doliny Obry*. Pr. Wydz. Biol. i Nauk o Ziemi, Ser. Geogr. nr 3, UAM, Poznań, 1–61.

## CHANGES OF DISSOLVED MATTER TRANSPORT QUANTITY AND COMPOSITION IN THE LOWER COURSE OF THE OBRA RIVER

### Summary

The study was done in the lower course of the Obra River near Międzyrzecz (western Poland). Main research problem was to determine changes of intensity of solute material transport and to analyze the concentration changes of chosen chemical elements in various hydrologic conditions. Twelve (12) hydrological surveys were done to determine bathymetry of the river bed and the changes of discharge values. During field work, 111 water samples were collected to analyze the contents of Ca, Na, Cl, K, PO<sub>4</sub> and conductivity. Maximum Ca concentrations were observed in the period of high water stages and reached 106 mg dm<sup>-3</sup>, which could be the result of surface erosion processes. The increment of Cl content was influenced by precipitation, which was especially intensive in March and April 2002. At that time, Cl concentrations reached more than 50 mg dm<sup>-3</sup>. Relatively small contents of Na (16 mg dm<sup>-3</sup>) in the period of high water stages can be explained by dilution effect. The concentrations of phosphates ranged from 0.1 mg dm<sup>-3</sup> to 1.1 mg dm<sup>-3</sup> in the period of low water stages and could be the effect of fertilization in agricultural areas within the Obra River basin. At that time, the decrease of K content was noted. The reason for this was seasonal entraining of this component to a biological cycle.

The study has shown that winter months were characterized by greater amounts of solute transport in comparison with a summer half-year. It was also evidenced by low conductivity values in summer months during low water stages. This period was much less effective when taking into account dissolved matter load. The reason could be the denudation processes, length of the vegetation period and agricultural activity. Comparison of amount of solute material, suspended and bed-load transport in the years 1971–1991 has shown that solute transport was at least 13 times and 640 times greater than suspended and bed-load transport, respectively. In the case of amount of bed-load, the reason could be the presence of glacial deposits beneath alluvial sediments of the Obra River valley and bed-armoring effect (Młynarczyk, Słowik, 2008). Taking into account hydrological years 1981 and 1990, it was observed that the intensity of solute transport was greater in a wet year (1981) than in a “dry” year (1990), which is the result of flow conditions in the river bed and its duration in particular hydrological years