

ROZDZIAŁ HYDROGRAMU ODPIYWU W MAŁEJ ZLEWNI RZECZNEJ NA PODSTAWIE BADAŃ ZNACZNIKOWYCH

HYDROGRAPH SEPARATION OF RUNOFF COMPONENTS BASED ON RESEARCH OF ENVIRONMENTAL TRACERS IN A SMALL RIVER CATCHMENT

ANNA FURMANKOWSKA¹

Abstrakt. W artykule przedstawiono wyniki badań znacznikowych, przeprowadzonych w typowej zlewni wschodniego Mazowsza. Badania wykonano w celu wydzielenia z całkowitego odpływu rzecznej składowej pochodzenia podziemnego oraz identyfikacji odpowiednich parametrów fizycznych wody, substancji chemicznych oraz izotopów, które w warunkach wybranej zlewni być mogą uznane za znaczniki środowiskowe.

Słowa kluczowe: znaczniki środowiskowe, izotopy stabilne wody, hydrogram odpływu, odpływ podziemny, wezbranie.

Abstract. The paper presents research results of a tracer experiment led in a typical catchment of eastern Mazovia. The experiment was conducted to separate a groundwater component from total river runoff, and to identify the proper physical parameters of water, chemical ions and stable isotopes, which can be used as tracers in the Trytwa River catchment.

Key words: environmental tracers, stable isotopes of water, runoff hydrograph, groundwater runoff, raised water stage.

WSTĘP

Badania przeprowadzono w celu oceny możliwości wykorzystania znaczników środowiskowych do określenia odpływu podziemnego w zlewni, charakteryzującej się zróżnicowaną rzeźbą terenu i heterogenicznością zagospodarowania przestrzennego oraz do wskazania odpowiednich substancji, które w danych warunkach być mogą uznane za znaczniki środowiskowe. Zgodnie z definicją podaną przez Cooka i Herczego (2000), znaczniki środowiskowe są to naturalne lub wytworzone przez człowieka substancje chemiczne i izotopy, które można zmierzyć w wodach podziemnych i użyć do opisu oraz zrozumienia właściwości hydrogeologicznych warstw wodonośnych. Znaczniki środowiskowe dają możliwość wydzielenia z całkowitego odpływu

rzecznego ilości wody, która dopłynęła do systemu wodonośnego na skutek zjawiska opadowego tzw. nowej wody (*event water*) i tzw. starej wody (*pre-event water*) zgromadzonej w systemie przed zjawiskiem opadowym. Analiza zmian znaczników w wodzie rzecznej, w szczególności izotopów, jest najbardziej wiarygodną metodą identyfikacji składowych odpływu rzecznej (Macioszczyk, 2006). W odróżnieniu od innych metod daje możliwość określenia odpływu podziemnego w każdym momencie opróbowania.

Podstawą rozdziału hydrogramu odpływu jest dwuskładnikowe równanie bilansu masy znacznika w funkcji czasu (Zuber, 2007). Punktem wyjścia równania jest założenie, że całkowity wydatek strumienia rzecznej w danym momen-

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; e-mail: anna.furmankowska@student.uw.edu.pl

cie czasowym $Q_t(t)$ jest sumą wydatku strumienia wód podziemnych $Q_g(t)$ oraz wydatku pochodzącego ze spływu powierzchniowego $Q_s(t)$ w tym momencie. Stąd równanie bilansu przepływu wody jest następujące:

$$Q_t(t) = Q_g(t) + Q_s(t) \quad [1]$$

Przyjęcie w strumieniu odpowiednich koncentracji substancji, równanie [1] przybiera postać równania bilansu masy znacznika:

$$C_t Q_t(t) = C_g Q_g(t) + C_s Q_s(t) \quad [2]$$

gdzie:

C_t – całkowite stężenie substancji w zmieszanej wodzie rzecznej,

C_g – stężenie substancji w strumieniu wód podziemnych,

C_s – stężenie substancji w wodzie opadowej.

Po odpowiednim przekształceniu otrzymujemy równanie na natężenie odpływu podziemnego:

$$Q_g(t) = Q_t(t) \cdot \frac{C_t - C_s}{C_g - C_s} \quad [3]$$

LOKALIZACJA I CHARAKTERYSTYKA POLIGONU BADAWCZEGO

Badania znacznikowe przeprowadzono w sierpniu 2011 roku, w ujściowym profilu rzeki Trytwy. Zlewnia Trytwy o powierzchni $25,9 \text{ km}^2$, położona w dorzeczu Liwca, jest typową zlewnią wschodniego Mazowsza, którą charakteryzuje zarówno urozmaicona rzeźba terenu z wyraźnym podziałem

na część wysoczyznową (Wysoczyzna Kałuszyńska) i rozległą część dolinną (Obniżenie Węgrowskie) (fig. 1), jak i różnorodne zagospodarowanie przestrzenne. Powierzchnia obszaru, morfologia i użytkowanie terenu stanowiły główne kryteria wyboru zlewni.

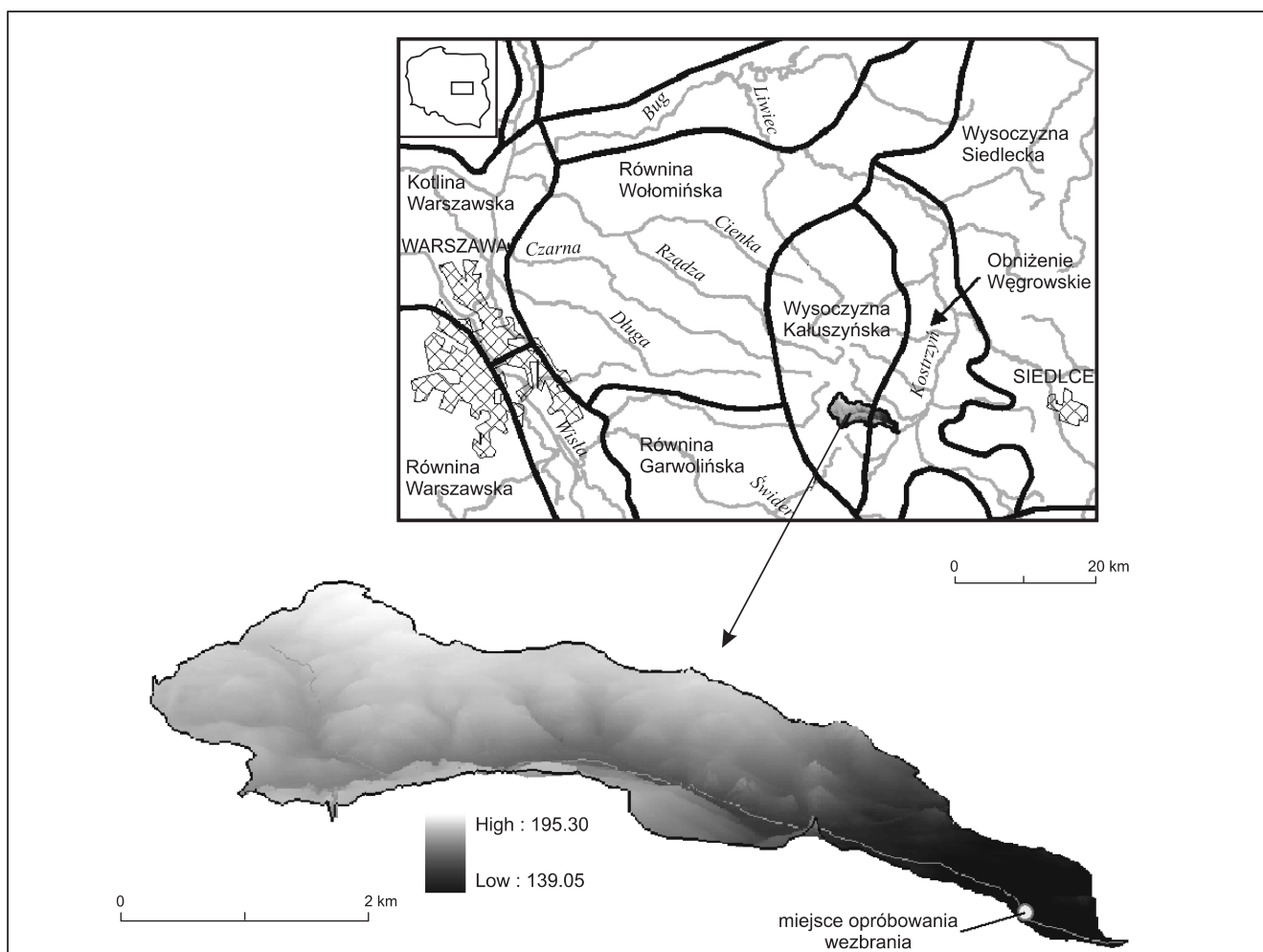


Fig. 1. Położenie i morfologia zlewni Trytwy na tle regionów fizyczno-geograficznych wg Kondrackiego (2002)

Location and morphology of the Trytwa catchment on a background of physiogeographic regions of Kondracki (2002)

METODY BADAŃ

Przybór wody w rzece był spowodowany pojedynczym, krótkotrwałym i intensywnym zdarzeniem opadowym. Opad deszczu trwał jedną godzinę, a jego intensywność wynosiła 23 mm/godz., co w skali Chomicza klasyfikuje opad jako deszcz ulewny III stopnia (Byczkowski, 1996).

Opróbowanie izotopowe i hydrochemiczne wykonywano przez pięć dni, do momentu pojawienia się kolejnego przyboru wody, wywołanego następnym impulsem opadowym. Próbkę wody z koryta rzecznej pobierano z różną częstotliwością, dostosowaną do prędkości wzrostu stanów wody w rzece. Równoległe z poborem próbek wykonywano pomiar prędkości przepływu za pomocą młynka hydrometrycznego. Łącznie analizie chemicznej poddano 31 próbek opadu atmosferycznego i wody rzecznej. Szeroki zakres oznaczeń hydrochemicznych był spowodowany założeniem, że każda substancja lub cecha, którą można oznaczyć i zmierzyć jest potencjalnym znacznikiem i może służyć, zgodnie z definicją, do opisu i zrozumienia właściwości hydrogeologicznych systemu wodonośnego. Przydatność poszczególnych oznaczeń zweryfikowano, wykonując wykresy zmian cech i składników w czasie. Oznaczono stosunki izotopów stabilnych wody – $\delta^{18}\text{O}$ i δD , stężenia składników głównych oraz wybranych składników podrzędnych i mikroskładników. Dokonano pomiaru przewodności i pH wody. Pomiar stosunków izotopów stabilnych wody $\delta^{18}\text{O}$ i δD wykonano za pomocą chromatografu gazowego sprzężonego z izotopowym spektrometrem mas GC-IRMS w Institute of Groundwater Ecology Helmholtz Zentrum Muenchen German Research Center for Environmental Health². W Laboratorium Wody Zakładu Hydrogeochemii i Dynamiki Wód Podziemnych WG UW oznaczono przez miareczkowanie jony HCO_3 , Ca, Cl oraz spektrofotometrycznie – SO_4 i NO_3 (spektrofotometr HACH DR/2000). Pomiar następujących jonów: Na, K, Mn, Si, Al, Fe, Mn, Sr, Ba, Cr, Cu i Zn wykonano w Laboratorium Chemii Wód, Gleb i Skał WG metodą emisyjnej spektrometrii atomowej (spektrometr ICP-OES, model Optima 5300 DV firmy Perkin-Elmer). Przewodność elektrolityczną właściwą (PEW) i pH wody zmierzono bezpośrednio w terenie za pomocą wodoszczelnego miernika wielofunkcyjnego CX-401 firmy Elmerton.

Specyfika przeprowadzonych badań wymagała dużej dokładności oznaczeń, dlatego uzyskane wyniki analiz chemicznych poddano weryfikacji opartej na obliczonych względnych błędach i porównanie ich z maksymalnymi do-

Tabela 1

Wartości stężeń składowej opadowej (C_s) i podziemnej (C_g) dla wyróżnionych znaczników środowiskowych wraz z obliczonym maksymalnym odpływem podziemnym ($Q_{g,max}$)

Concentrations of surface water (C_s) and groundwater (C_g) components for the environmental tracers with the calculated maximum groundwater runoff ($Q_{g,max}$)

Rodzaj znacznika środowiskowego	Wartość składowej opadowej C_s	Wartość składowej podziemnej C_g	Wielkość maksymalna odpływu podziemnego $Q_{g,max}$
δD	-52,53 [%]	-69,14 [%]	0,29 [m^3/s]
$\delta^{18}\text{O}$	-7,86 [%]	-9,62 [%]	0,32 [m^3/s]
PEW	0,009 [mS/cm]	0,434 [mS/cm]	0,29 [m^3/s]
Ca	1,20 [mg/dm^3]	73,58 [mg/dm^3]	0,32 [m^3/s]
Mg	0,10 [mg/dm^3]	6,88 [mg/dm^3]	0,31 [m^3/s]
Sr	0,006 [mg/dm^3]	0,093 [mg/dm^3]	0,30 [m^3/s]
HCO_3	8,67 [mg/dm^3]	209,66 [mg/dm^3]	0,32 [m^3/s]

puszczalnymi wartościami tych błędów podanymi w PN-89/C-04638-02. Weryfikację poprawności wykonano również w stosunku do zmierzonych wartości PEW zgodnie z zaleceniami podanymi przez Szczepańską i Kmiecik (2005). Dla wszystkich analizowanych próbek warunków poprawności pomiaru przewodności został spełniony.

Charakter dwuskładnikowego równania bilansu masy, a także względne udziały koncentracji substancji chemicznych w wodach podziemnych oraz opadowych sprawiają, że kluczowym elementem w przeprowadzonych badaniach jest dokładne ustalenie stężenia składowej podziemnej C_g . Stężenie to określono na podstawie cyklicznych, prowadzonych co dwa tygodnie od lipca 2010 do listopada 2012 r., pomiarów wydatków przepływu i analizy pobranych próbek wody. Na podstawie metody Killiego (Macioszczyk, 2006) wyznaczono z tego okresu średni odpływ podziemny, zaś stężenia poszczególnych jonów i wielkości stosunków izotopów policzono jako średnie ze stężeń współwystępujących z wartościami przepływów niższymi niż wyznaczony odpływ podziemny. Wartości stężeń składowej podziemnej C_g oraz składowej opadowej C_s zestawiono w tabeli 1.

² Analiza izotopowa została przeprowadzona przez dr Christine Stumpp dzięki uprzejmości prof. dra hab. Piotra Małoszewskiego

WYNIKI BADAŃ

W wyniku pomiarów wydatków przepływu uzyskano charakterystyczny hydrogram odpływu z dobrze zaznaczoną krzywą wznoszenia, kulminacją oraz krzywą opadania i wysychania (fig. 2).

Początkowy wydatek przepływu, przed zjawiskiem opadowym, wynosił $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$ i wzrósł w momencie kulminacji do $0,40 \text{ m}^3/\text{s}$, przy średnim wydatku przepływu dla tego profilu z lat 2010–2012 równym $0,27 \text{ m}^3/\text{s}$. Analogicznie, dla każdej oznaczonej substancji i parametru wykreślono chemiczne hydrogramy odpływu. Widoczną reakcją na przyrost objętości wody zaobserwowano dla PEW, Mg^{2+} , Sr^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- , $\delta^{18}\text{O}$ i δD . Wartości PEW oraz stężenia jonów układały się w przybliżeniu w krzywe odwrotne do hydrogramu odpływu, a stosunki izotopów stabilnych w krzywe powtarzające kształt hydrogramu. Pozostałe oznaczone jony nie wykazały zauważalnej zmiany stężenia w czasie przechodzenia fali wezbrania. Uznano, że substancje dla których zaobserwowano reakcję na przyrost objętości wody uznać można, w warunkach zlewni Trytwy, za znaczniki środowiskowe.

Najbardziej wyraźną krzywą otrzymano dla δD , zaś krzywe dla PEW, Mg^{2+} , Sr^{2+} , HCO_3^- (fig. 3) i Ca^{2+} są rozmyte. Spowodowane jest to prawdopodobnie (pomimo niewielkich błędów analiz) niedostateczną dokładnością metody pomiarowej. Wyrażna niezgodność występuje również w przypadku oznaczeń $\delta^{18}\text{O}$, która zaznacza się przez występowanie wartości wyższych niż spodziewane oraz niską korelacją z δD w próbkach pobranych w momencie przechodzenia i po zakończeniu kulminacji (fig. 4). Zawyżone wartości stosunku izotopów tlenu mogą być wynikiem większej wrażliwości $\delta^{18}\text{O}$ w stosunku do δD na kontakt z powietrzem atmosferycznym, możliwym wskutek ewentualnego rozszczelnienia próbek z próbkami wody podczas transportu. Przykładowo

we krzywe, obrazujące zmiany izotopów, przewodności oraz wybranych jonów przedstawiono na figurze 3. Krzywe, obrazujące zmiany stosunków izotopowych, wartości przewodności i stężenia HCO_3^- (fig. 3) oraz Ca charakteryzują się zauważalnym zaburzeniem w początkowej fazie wezbrania. Zaburzenie to, wyraźniej widoczne dla $\delta^{18}\text{O}$ i δD , wyraża się przez spadek stosunków izotopów oraz wzrost stężenia jonów HCO_3^- i Ca, ale przede wszystkim przez brak korelacji z rosnącym wydatkiem przepływu wody w rzece. Jednocześnie, analizując wielkość wydatku przepływu (fig. 2) i wartości stosunków izotopów lub stężeń substancji (fig. 3), w początkowej fazie wezbrania można wyróżnić etapy formowania się odpływu, a także zmiany pochodzenia wody, zasilającej rzekę w tych etapach. Etapy przeanalizowano na podstawie wartości stosunków izotopów stabilnych (krzywa najbardziej wyraźna) i wyróżniono:

Etap 1 – przed zjawiskiem opadowym, reprezentowany przez próbkę 1. Rzeka jest zasilana wyłącznie wodą z warstwy wodonośnej. Woda w korycie rzeczonym stanowi wodę podziemną odparowaną – stosunki izotopów wody rzecznej są wyższe niż stosunki izotopów w wodzie podziemnej.

Etap 2 – po zjawisku opadowym. Wydatek przepływu w korycie rzeczonym wzrasta przy jednoczesnym wzroście $\delta^{18}\text{O}$ i δD . Woda rzeczna ulega bezpośredniemu mieszanii w korycie z wodą opadową o zdecydowanie wyższych wartościach $\delta^{18}\text{O}$ i δD .

Etap 3. Wydatek przepływu w korycie rzeczonym nadal wzrasta, ale następuje odwrócenie wzrostowej tendencji w stosunkach izotopowych – $\delta^{18}\text{O}$ i δD maleją. W dolnej części zlewni, ze względu na płaskie ukształtowanie powierzchni terenu oraz pokrycie doliny, głównie przez nieskoszone łąki, spływ powierzchniowy jest ograniczony lub

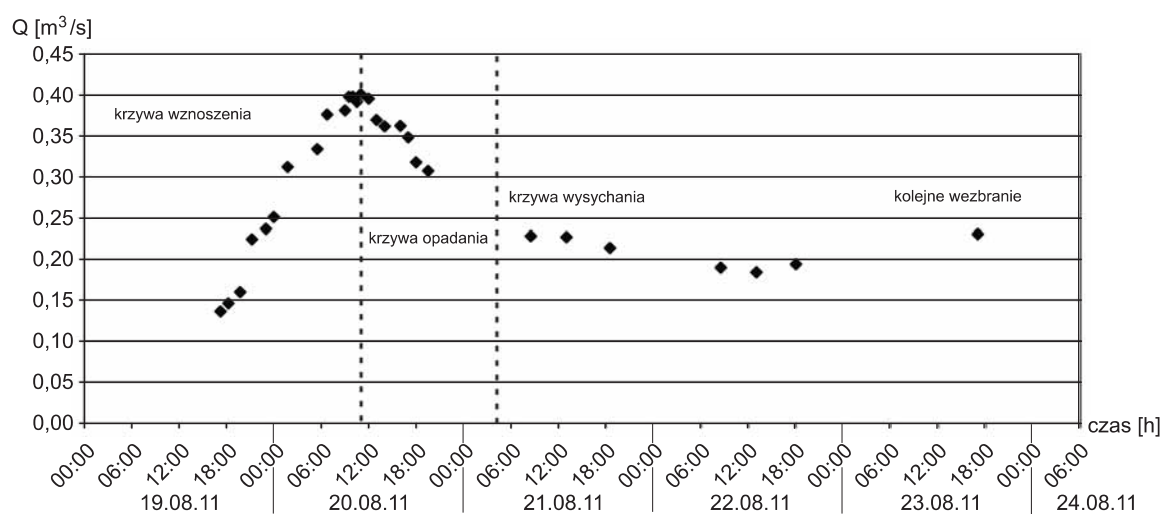


Fig. 2. Hydrogram odpływu z podziałem na etapy wezbrania

Runoff hydrograph divided into the stages of raised water level

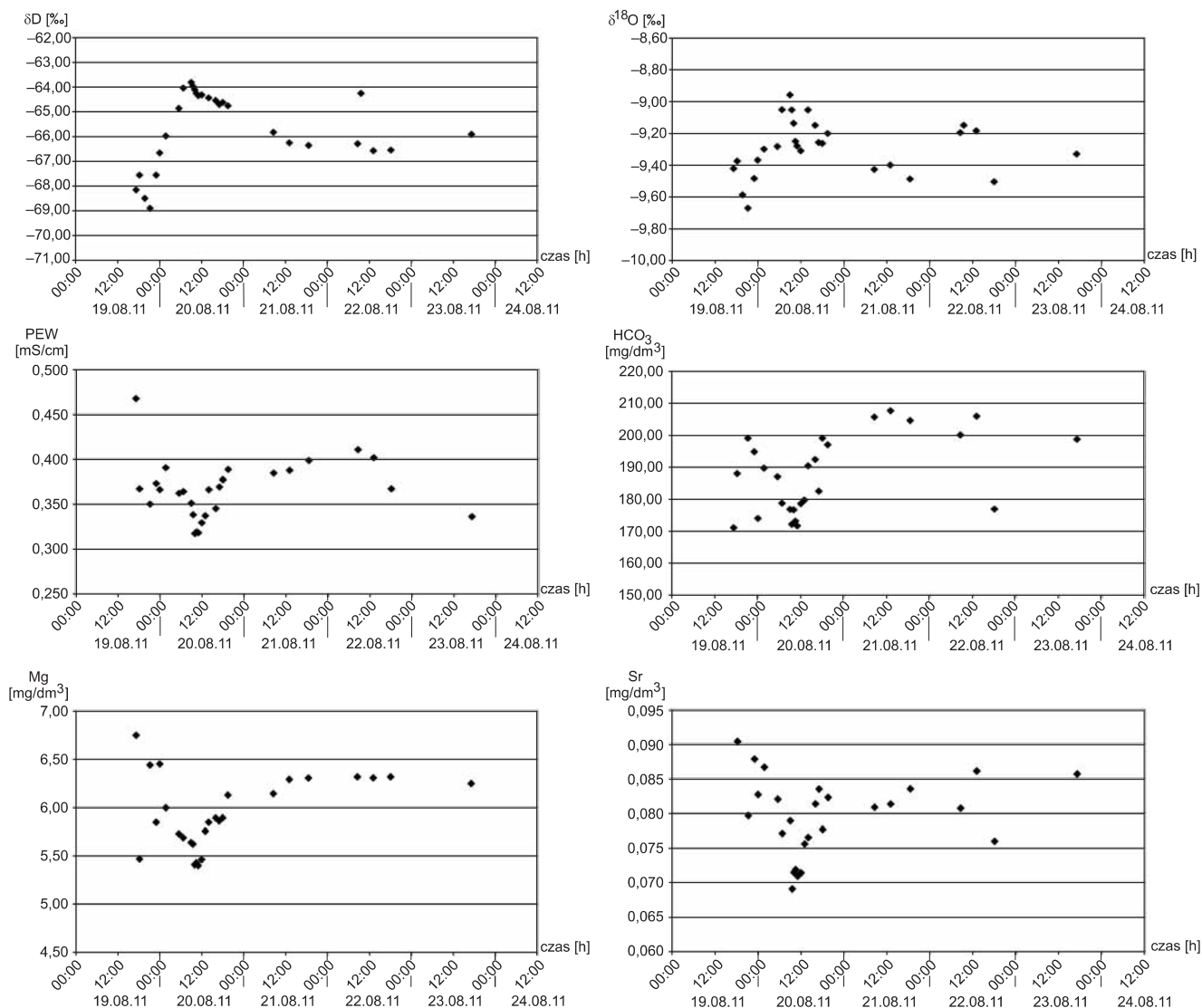


Fig. 3. Zmiany stosunków izotopów, wartości przewodności oraz stężeń wybranych jonów podczas przejścia wezbrania

Changes in isotope ratios, conductivity and concentration of some ions during the raised water stage

zakończony, zachodzi infiltracja wód opadowych do płytko położonego zwierciadła wód podziemnych. Zwiększone ciśnienie w strefie aeracji powoduje wypychanie wody zgromadzonej w warstwie wodonośnej. W rzece zaznacza się zwiększony udział „starej” wody podziemnej przy jednoczesnym udziale wody ze spływu powierzchniowego, pochodzącego z górnej, wysoczyznowej części zlewni.

Etap 4. Następuje wzrost wydatku przepływu wody w korycie, stosunki izotopowe osiągają wartości minimalne, brak spływu powierzchniowego, dopływ wypychanej „starej” wody podziemnej nadal zachodzi.

Etap 5 – zakończenie wstępnej fazy wezbrania. Występuje ciągły wzrost wydatku przepływu wody w korycie, stosunki izotopów stabilnych wody zaczynają rosnąć. Rzeka zaczyna drenować wodę podziemną zmieszaną z wodą pochodzenia opadowego.

Kulminacja wezbrania (maksymalny przepływ) pojawiła się po 17 godzinach od zakończenia opadu atmosferycznego. Na podstawie równania bilansu masy, wykorzystując wyróżnione znaczniki środowiskowe, obliczono maksymalny odpływ podziemny Q_g max. Wielkość ta różni się nieznacznie w zależności od zastosowanego do obliczeń znacznika i wynosi $0,29 \text{ m}^3/\text{s}$ dla δD i PEW, $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$ dla Sr, $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$ dla Mg oraz $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$ dla $\delta^{18}\text{O}$, Ca i HCO_3^- (tab. 1). Niewielkie rozbieżności w wynikach są skutkiem braku proporcjonalności pomiędzy stężeniami tych samych składników dla różnych znaczników.

Średnia arytmetyczna wyróżnionych znaczników z maksymalnych wartości odpływu podziemnego Q_g max wynosi $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$, co stanowi 77% całkowitego maksymalnego odpływu rzeczno- C_l max podczas tego wezbrania. Chemiczne hydrogramy przepływu przedstawiono na figurach 4 i 5.

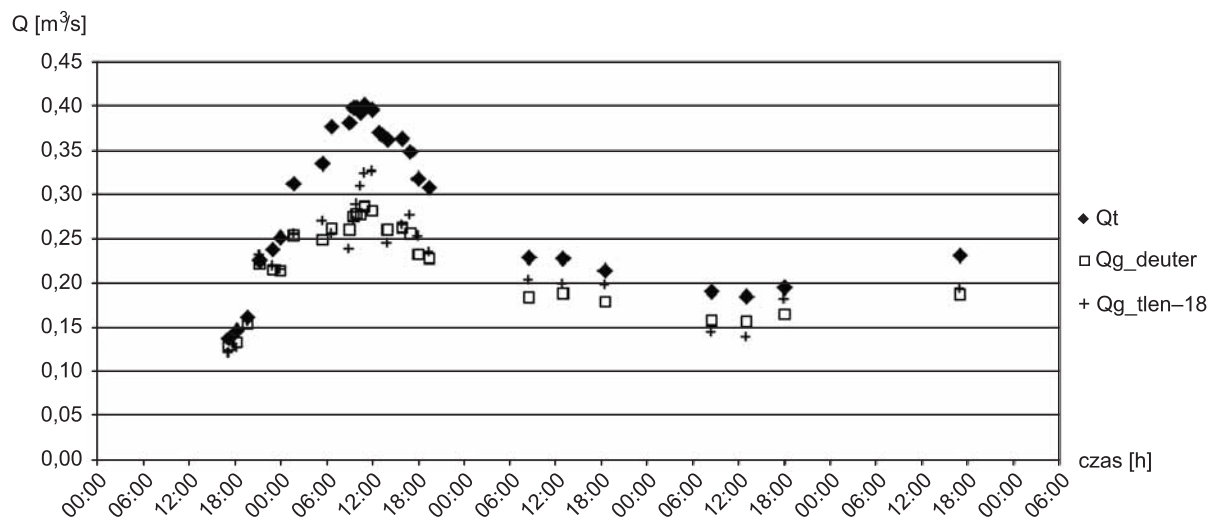


Fig. 4. Zmierzone całkowite wydatki przepływu strumienia Q_t oraz policzone przy pomocy izotopów stabilnych wydatki strumienia Q_g w kolejnych momentach czasowych po intensywnym opadzie

Measured total stream flow Q_t and calculated groundwater flow Q_g by using stable isotopes in subsequent time points after heavy rain

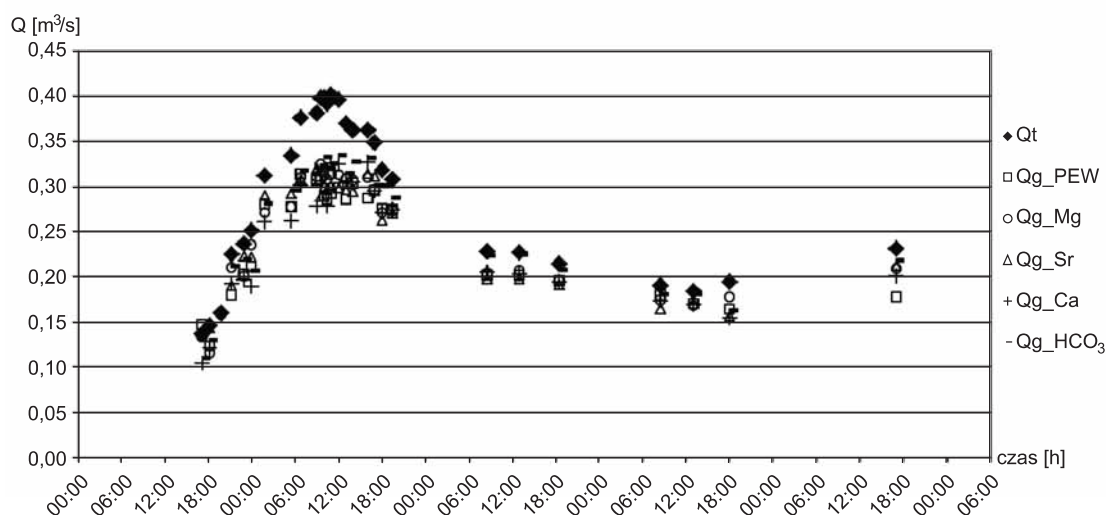


Fig. 5. Zmierzone całkowite wydatki przepływu strumienia Q_t oraz policzone przy pomocy PEW, Mg, Sr, Ca, HCO_3 wydatki strumienia Q_g w kolejnych momentach czasowych po intensywnym opadzie

Measured total stream flow Q_t and calculated groundwater flow Q_g by using PEW, Mg, Sr, Ca, HCO_3 in subsequent time points after heavy rain

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania znacznikowe pozwoliły na ilościowe wydzielenie z całkowitego odpływu rzecznej składowej pochodzenia podziemnego. Wykreślone krzywe zmian stosunków izotopów stabilnych, przewodności i pH wody oraz stężeń jonów w czasie przechodzenia fali wezbrania opadowego, umożliwiły identyfikację substancji/parametru, która w warunkach zlewni Trytwy może być definiowana jako znacznik środowiskowy. Zaburzenie w początko-

wej fazie wezbrania pozwoliło na wydzielenie etapów formowania się odpływu, a także na określenie zmian pochodzenia wody, zasilającej rzekę w tych etapach. Obliczona wartość maksymalnego odpływu podziemnego Q_{gmax} różni się nieznacznie w zależności od stosowanego znacznika, co jest wynikiem braku proporcjonalności pomiędzy stężeniami składowych w równaniu bilansu masy.

LITERATURA

- BYCZKOWSKI A., 1996 — Hydrologia. T. I. Wyd. SGGW, Warszawa.
- COOK P. G., HERCZEG A. L., 2000 — Environmental tracers in subsurface hydrology. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- KONDRACKI J., 2002 — Geografia regionalna Polski. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- PN-89/C-04638-02, 1989 — Bilans jonowy wody. Sposób obliczania bilansu jonowego wody.
- MACIOSZCZYK A. (red.), 2006 — Podstawy hydrogeologii stosowanej. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- SZCZEPAŃSKA J., KMIĘCIK E., 2005 — Ocena stanu chemicznego wód podziemnych w oparciu o wyniki badań monitoringu. Wyd. AGH, Kraków.
- ZUBER A. (red.), 2007 — Metody znacznikowe w badaniach hydrogeologicznych. Poradnik metodyczny. Oficyna Wydawnicza PWroc., Wrocław.

SUMMARY

The study was carried out in the mouth of the Trytwa River. The Trytwa catchment with an area of 25.9 km², located in the Liwiec basin, is a typical basin of eastern Mazovia. The rise of water in the river was caused by a single, transient and intense storm precipitation event. Isotopic and hydrochemical sampling was conducted for 5 days until the next rise of river water occurred. Water samples were collected from the river bed at different intervals, adjusted to the speed of water level increase. In parallel with the collection of samples, the flow rate of river water was measured. A characteristic runoff hydrograph was obtained. Similarly,

for each measured parameters, ions and isotopes, chemical hydrographs were plotted. The apparent reaction in response to the increase of water volume was observed to PEW, Mg²⁺, Sr²⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻, δ¹⁸O and δD. It was considered that the appropriate ions, stable isotopes of water and PEW can be used as environmental tracers in these conditions. Based on the chemical hydrograph curves, the steps of runoff forming and changes in water origin in these stages were determined. The amount of the groundwater runoff was calculated on the basis of mass balance equation.

