

Izotopy strontu jako znaczniki środowiskowe do rozpoznania warunków krążenia wód podziemnych w wielopoziomowych systemach wodonośnych

Ewa Krogulec¹, Katarzyna Sawicka¹, Sebastian Zabłocki¹,
Zdzisław Bełka², Mateusz Zieliński²

Strontium isotopes as environmental tracers for identification of groundwater circulation in multi-layered aquifer systems.
Prz. Geol., 63: 873–877.

Abstract. The results of the research concerning measures of strontium isotopes and concentrations, were presented in this article. This environmental tracers occurring in groundwater and surface water allowed for the preliminary identification of groundwater circulation in the multi-layered aquifer system. The study area concerned Żarnowiecka Upland and Valley of the Żarnowieckie Lake with the Piaśnica river, where the occurrence of 3 to 5 aquifers in Quaternary, Miocene and Oligocene was confirmed. The valley area is also the Main Groundwater Reservoir (MGR) No. 109. The results clearly indicated on substantial differences in the values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic signatures and strontium concentrations in each of aquifers. These differences made possible to determine the percentage of the groundwater in the Piaśnica drained from the upland and from the valley. Calculations showed the groundwater component from the upland may constitute up to 80% of river water, and the river is a regional drainage base even for the Oligocene aquifer occurring at a depth of approx. 200 m. The results confirmed no link between the shallowest aquifers occurring in the upland, and the drainage role of the Piaśnica river. The characteristic of shallow groundwater is similar to the rainwater.

Keywords: strontium isotopic ratio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, strontium concentration, multi-layered groundwater system, groundwater circulation, groundwater mixing

W wodach podziemnych najczęściej spotykane są cztery naturalne izotopy strontu: ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr i ^{88}Sr , z których szczególne zastosowanie badawcze zyskał radiogeniczny izotop ^{87}Sr . Jego zawartość w wodach jest najczęściej odnieszona do zawartości ^{86}Sr i wyrażana jako stosunek izotopowy $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Wartości tego stosunku w wodach zależą od stosunków Rb/Sr i $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ w skale oraz od oddziaływania woda–skała. Inne znaczniki środowiskowe, takie jak: izotopy tlenu, wodoru i węgla ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, ^3H , ^{14}C), stosowane do określania genezy wód i mieszania się różnych typów wód, podlegają silnemu zróżnicowaniu na skutek zmian fazowych i transportu wody w atmosferze, a także w reakcji chemicznych i biochemicznych zachodzących na drodze przepływu. Natomiast stosunek izotopów strontu w wodzie nie ulega zmianom wskutek parowania, zmian temperatury, procesów biologicznych i innych procesów w trakcie filtracji wód podziemnych. Oznaczony stosunek izotopowy $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dla wód pochodzących z danego poziomu wodonośnego stanowi ich swoistą sygnaturę izotopową, właściwą tylko dla nich (Faure & Powell, 1972; Faure, 1986; Frost & Toner, 2004; Négrel, 2006). Stosunek izotopów strontu jest bardzo dobrym znacznikiem środowiskowym służącym do ilościowej oceny udziału wód podziemnych w zasilaniu wód powierzchniowych (np. Négrel i in., 2003; Négrel i in., 2007; Brink & Frost, 2007), identyfikacji składowych mieszania się wód o różnym pochodzeniu (np. Frost & Toner, 2004; Brenot i in., 2007; Peterman i in., 2012; Bakari i in., 2013) oraz do rozpoznania pochodzenia zanieczyszczeń w rejonach narażonych na oddziaływanie antropogeniczne (np. Jiang i in., 2009; Hamel i in., 2010; Christian i in., 2011; Chapman i in., 2012).

Celem przeprowadzonych badań było rozpoznanie złożonych warunków krążenia wód podziemnych w wielopo-

ziomowym systemie wodonośnym rejonu Głównego Zbiornika Wód Podziemnych (GZWP) Nr 109 – Rynna Jeziora Żarnowieckiego (Orłowski, 1996; ryc.1). Oznaczenia stosunku izotopowego strontu $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i stężeń strontu w wodzie wykorzystano do ustalenia relacji pomiędzy poszczególnymi poziomami wodonośnymi tego rejonu oraz do oszacowania udziału wód podziemnych z poziomów wysoczyznowych i dolinnych w odpływie podziemnym rzeki Piaśnicy.

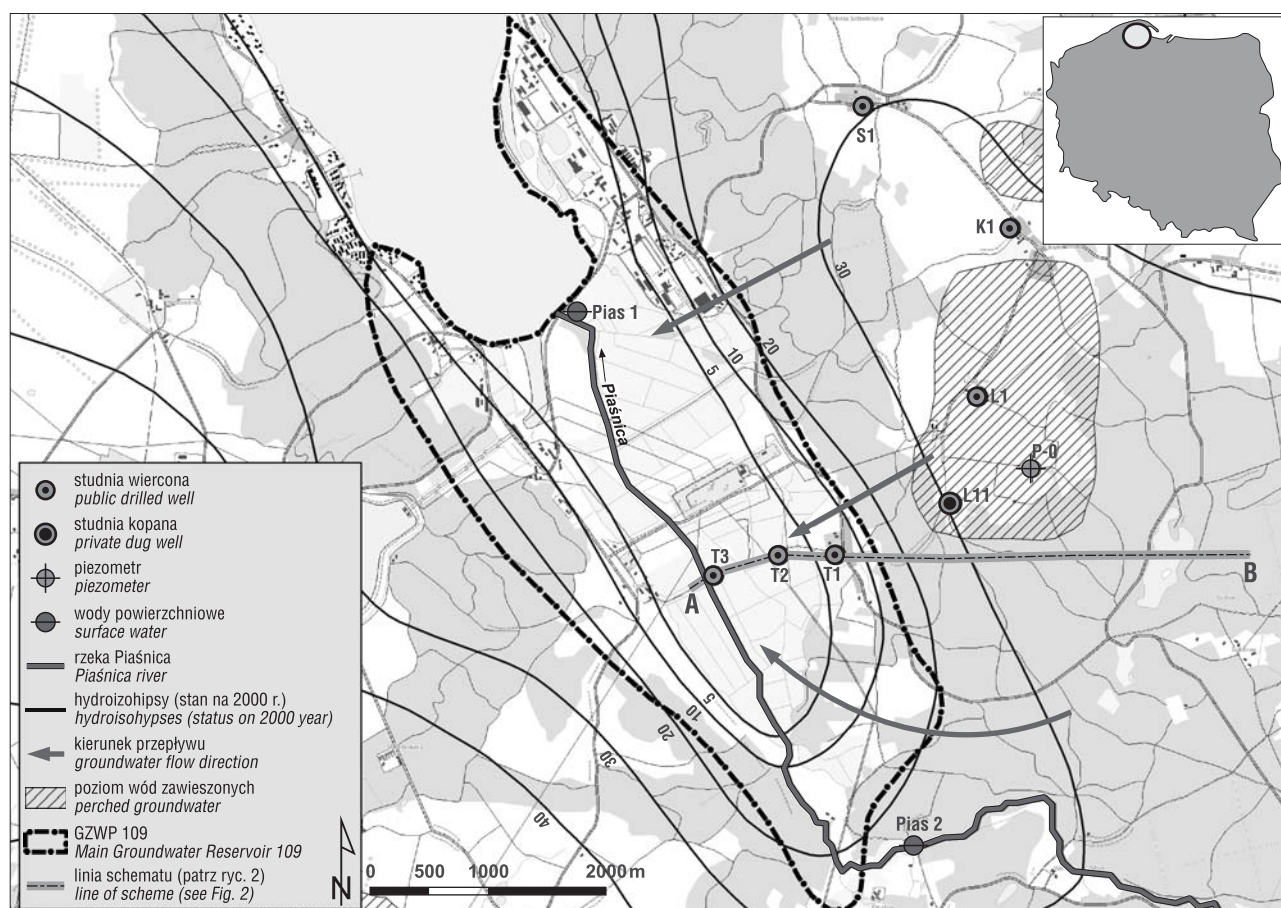
METODYKA BADAŃ

Opróbowanie chemiczne oraz izotopowe wód podziemnych i powierzchniowych przeprowadzono w październiku 2014 r. Pobrano łącznie 10 próbek wód pochodzących z 6 studni wierconych, 1 piezometru i 1 studni kopanej oraz 2 próbki wód powierzchniowych z rzeki Piaśnicy (rys.1).

Stężenie strontu w wodzie oznaczono w akredytowanym laboratorium za pomocą ICP-EOS (Optyczna Spektrometria Emisyjna ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej). Prace analityczne, obejmujące separację strontu oraz pomiary stosunków izotopowych, zostały wykonane w Laboratorium Izotopowym Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Do chromatograficznej separacji strontu użyto zminiaturyzowanych wymienników jonowych, zgodnie z metodą opisaną przez Pin i in. (1994). Wprowadzono zmiany w wielkości wymienników jonowych oraz w koncentracji reagentów wg modyfikacji przedstawionej przez Dopieralską (2003). Stront połączony z aktywatorem (TaCl_5) był umieszczany w pojedynczych filamentach z ultra czystego renu. Pomiary stosunków izotopowych przeprowadzono przy użyciu termojonizującego spektrometru masowego Finnigan MAT 261. W okresie

¹ Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; Ewa.Krogulec@uw.edu.pl, sawicka@uw.edu.pl, s.zablocki@uw.edu.pl.

² Laboratorium Izotopowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, ul. Dziegielowa 27, 61-680 Poznań; zbelka@amu.edu.pl, mateusz.zielinski@amu.edu.pl.



Ryc. 1. Lokalizacja terenu badań wraz z punktami dokumentacyjnymi (hydroizohipsy wg Sierżęgi & Chmielowskiej, 2000; zasięg poziomu wód zawieszonych wg Sierżęgi i in., 2006)

Fig. 1. Location of the study area with documentation points (hydroisohypses according to Sierżęga, Chmielowska, 2000; area of perched groundwater according to Sierżęga et al., 2006)

badan testowe pomiary standardu NBS 987 Sr dały średni stosunek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,710255 \pm 12$ (błąd 2σ z 18 analiz).

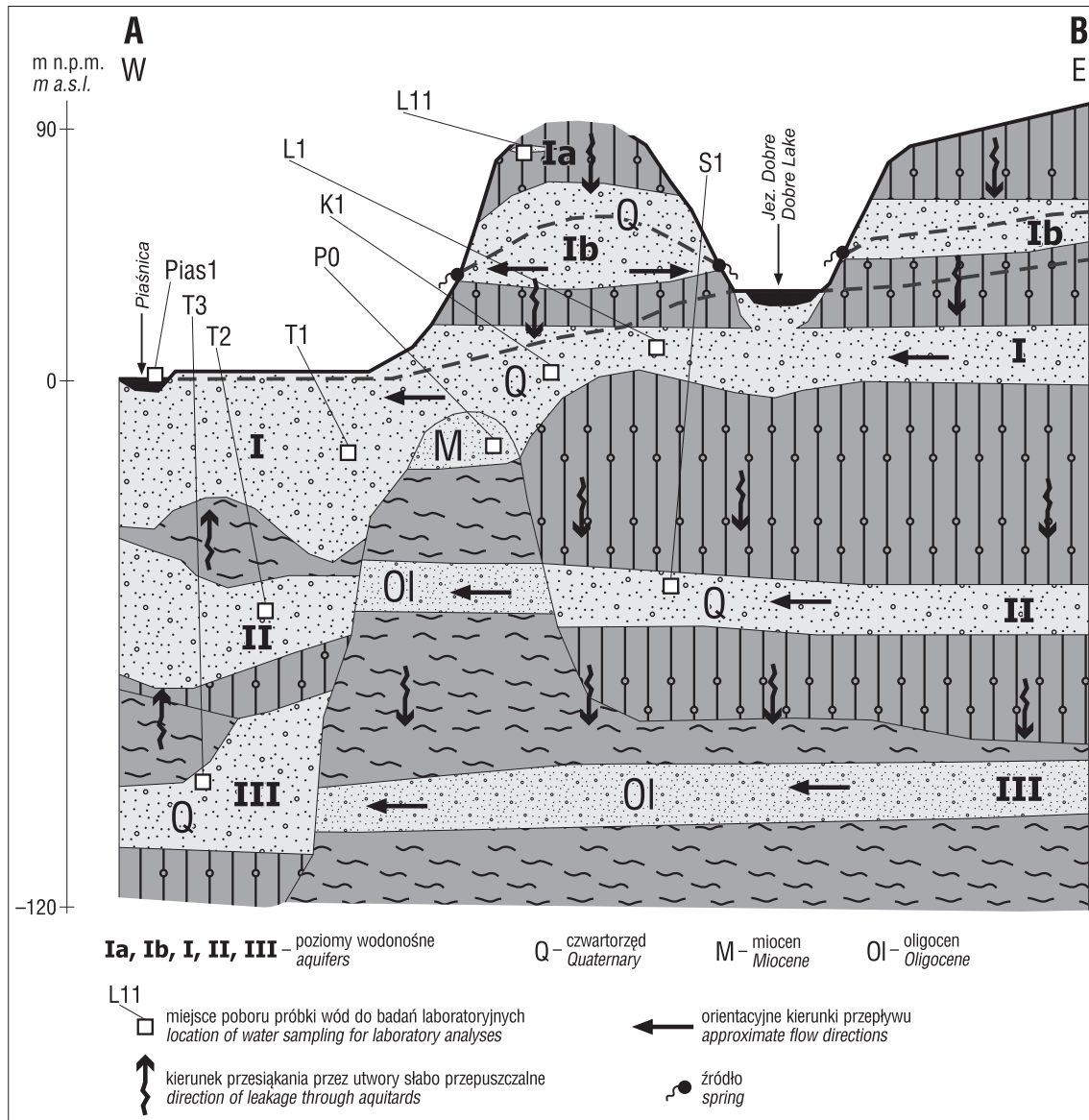
TEREN BADAŃ

Obszar badań jest zlokalizowany w północnej Polsce, na terenie dwóch wyraźnie odmiennych jednostek geomorfologicznych: Rynny Żarnowieckiej wraz z doliną rzeki Piasnicy oraz Wysoczyzny Żarnowieckiej (ryc. 1). Poziomy wodonośne z rejonu wysoczyzny pozostają w kontakcie hydraulicznym z utworami wodonośnymi występującymi w dolinie. Główny kierunek filtracji (układ linii prądu) wskazuje, że przepływ wód podziemnych odbywa się na zachód i południowy zachód – od wysoczyzny ku osi rynny, gdzie przez rzekę Piasnicę są drenowane nawet głębokie poziomy wodonośne.

Na Wysoczyźnie Żarnowieckiej występuje pięć poziomów wodonośnych (Ia, Ib, I, II, III; ryc. 2) w utworach czwartorzędu i oligocenu oraz lokalnie miocenu. Utwory wodonośne to głównie piaski i żwiry – wodnolodowcowe zlodowacenia wisły (poziomy Ia, Ib, I, II), w rejonach wyniesień podłoża przedczwartorzędowego lokalnie występują piaski drobnoziarniste z wkładkami mułków formacji burowęglowej miocenu (poziomy I), natomiast głębiej leżące poziomy wodonośne są zbudowane lokalnie (poziomy II) lub w całości (poziomy III) z drobnoziarnistych piasków morskich oligocenu z mułkami oraz konglomeratami fosforytowymi (Ostaficzuk i in., 1976; Sierżęga & Chmielowska, 2000; Sierżęga i in., 2006).

Poziomy wodonośne są zasilane poprzez infiltrację wód opadowych (poziomy Ia, Ib) lub pionowe przesiąkanie wód przez utwory słabo przepuszczalne z nadległych poziomów. Poziomy Ia i Ib są położone najpłycej i mają ograniczone rozprzestrzenienie, a ich wody nie pozostają w kontakcie hydraulicznym z poziomami zlokalizowanymi na terenie Rynny Żarnowieckiej, ani tym samym nie są drenowane przez Piasnicę. Bazą drenażu dla poziomów wodonośnych I, II, III zlokalizowanych na wysoczyźnie jest dolina rzeki Piasnicy (ryc. 2).

Dolina rzeki Piasnicy jest położona w osi erozyjnej struktury rynnowej o rozciągłości N–S, posiadającej założenia tektoniczne w utworach mezozoicznych. Struktura ta została wypełniona utworami czwartorzędu. W obrębie rynny ustanowiono GZWP Nr 109 – Rynna Jeziora Żarnowieckiego (Orłowski, 1996). Na obszarze doliny stwierdzono występowanie trzech poziomów wodonośnych (I, II, III) występujących w utworach czwartorzędu. Zasilanie I poziomu zachodzi bezpośrednio z infiltrujących opadów, a także w wyniku dopływu lateralnego z wysoczyzny. Poziomy II i III jest zasilany przez dopływ lateralny z obszaru wysoczyzny. Bezpośredni kontakt hydrauliczny zachodzi pomiędzy poziomami wodonośnymi II i III wysoczyzny i odpowiadającymi im poziomami dolinnym (ryc. 2). Układ ciśnień w poszczególnych poziomach wskazuje na drenaż przez Piasnicę wszystkich trzech poziomów. Zwierciadło III poziomu wodonośnego stabilizuje się średnio na poziomie ok. 4,5 m p.p.t., natomiast zwierciadło wyżej leżącego poziomu II znajduje się pod niższymi ciśnieniami piezo-



Ryc. 2. Schemat koncepcyjny krążenia wód podziemnych w rejonie badań
Fig. 2. Conceptual scheme of groundwater circulation in the study area

metrycznymi i ustala się średnio ok. 1,5 m p.p.t. (Orłowski, 1996; Sierzęga & Chmielowska, 2000; Sierzęga i in., 2006).

WYNIKI BADAŃ

Uzyskane sygnatury izotopowe oraz zawartość strontu w badanych wodach podziemnych wykazują wyraźne zróżnicowanie, co umożliwia wydzielenie dwóch grup wód podziemnych: występujących na Wysoczyźnie Żarnowieckiej (próbki ze studni: L1, S1, K1) oraz z obszaru doliny Piaśnicy (próbki ze studni: T1, T2, T3). Wody z terenu wysoczyznowego cechują się sygnaturami izotopowymi $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ w zakresie 0,7113–0,7119 oraz koncentracjami strontu w przedziale 0,107–0,129 mg/dm³. Wody z obszaru doliny posiadają niższe wartości sygnatur izotopowych strontu (0,7093–0,7103) i wyższe stężenia strontu (0,204–0,261 mg/dm³) niż w wodach podziemnych obszaru wysoczyzny, co prawdopodobnie jest spowodowane możliwym dopływem wód z poziomów trzeciorzędowych do czwartorzędowych warstw wodonośnych rejonu dolinnego (ryc. 2).

Spośród badanych próbek wód podziemnych wyraźnie wyróżniają się wody płytkiego poziomu wodonośnego (próbki z piezometru P0 i studni kopanej L11) na wysoczyźnie (poziom Ia i I), cechujące się niską wartością sygnatury izotopowej: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7099$. Ponadto woda z poziomu Ia cechuje się najniższym stężeniem strontu (0,081 mg/dm³) wśród pomierzonych, co potwierdza, że te wody podziemne nie biorą bezpośredniego udziału w rozpatrywanym regionalnym systemie krążenia, stanowiąc lokalny poziom wód zawieszonych. W studni ujmującej ten poziom można się również spodziewać zanieczyszczeń pochodzenia rolniczego, z których nawozy powodują obniżenie sygnatury izotopowej strontu (Böhlke & Horan, 2000; Jiang, 2011).

Wynik stosunku izotopów strontu w wodach z piezometru P0 (poziom I) jest prawdopodobnie spowodowany lokalnie odmienną litologią utworów wodonośnych. Stwierdzone podczas opróbowania obecności materii organicznej oraz domieszki osadów mułkowatych i ilastych w osadach miocenijskich wpływają na niższy stosunek $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ przy wyższych koncentracjach strontu w wodzie, niż te obserwowane w próbkach wód z sąsiednich studni

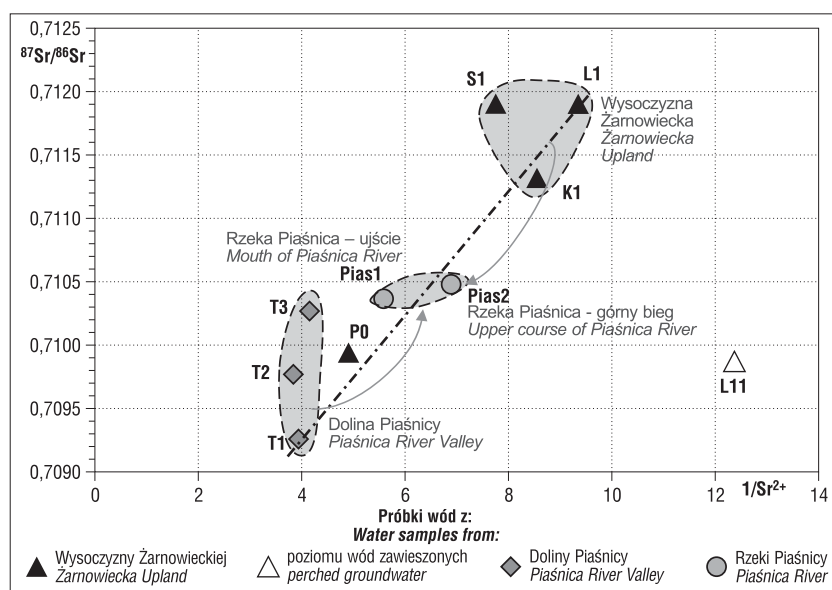
(L1, K1), ujmujących ten sam poziom wodonośny, lecz zbudowany wyłącznie z piasków czwartorzędowych. Wpływ na uzyskane wyniki mogła również odegrać obecność w próbce trudno usuwalnej zawiesiny, nie zdecydowano się zatem na uwzględnienie próbki P0 w dalszych rozważaniach przed ponownym opróbowaniem piezometru i weryfikacją wyników.

Wyniki badań izotopowych $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i stężeń strontu potwierdzają fakt, że rzeka Piaśnica jest na terenie badań regionalną bazą drenażu i drenuje zarówno poziomy wodonośny położony w swoim bezpośrednim otoczeniu (w samej dolinie), jak i te znajdujące się na wysoczyźnie. Stosunek izotopów strontu w próbkach pobranych z wód rzeki Piaśnicy stanowi bowiem wypadkową mieszania się dwóch składowych – wód podziemnych występujących na wysoczyźnie i w dolinie (ryc. 3). Sygnatura izotopowa dla wód powierzchniowych określona dla Piaśnicy przy ujściu do Jeziora Żarnowieckiego wynosi 0,7105 (Pias1) oraz 0,7104 w jej górnym biegu poza granicami rynny (Pias2), natomiast stężenia strontu wynoszą odpowiednio: 0,145 mg/dm³ (Pias1) i 0,179 mg/dm³ (Pias2).

W celu ilościowej oceny udziału wód podziemnych z poziomów wysoczyznowych oraz dolinnych w odplywie podziemnym przyjęto model dwuskładnikowego mieszania. W rozpatrywanym modelu biorą udział dwie skrajne składowe: wody z poziomów wysoczyznowych oraz z poziomów dolinnych. Wynikiem ich mieszania są wody rzeczne Piaśnicy (ryc. 3). Oprócz stosunków izotopowych uwzględniono również stężenia strontu w wodach (model transportu masy), co pozwoliło na ocenę rzeczywistych proporcji mieszania. Zastosowano formułę obliczeniową zaproponowaną przez Faure (1986) i zastosowaną przez m.in. Négrela i in. (2004, 2007), Binka & Frosta (2007), Bakarię i in. (2013):

$$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{Piaśnica}} * [\text{Sr}]_{\text{Piaśnica}} = f * ((^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{dolina}} * [\text{Sr}]_{\text{dolina}}) + (1-f) * ((^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{wysoczyzna}} * [\text{Sr}]_{\text{wysoczyzna}})$$

gdzie: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ odnosi się do wartości sygnatury izotopowej wód Piaśnicy, wód podziemnych z wysoczyzny



Ryc. 3. Sygnatura izotopowa $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}^{2+}$ w próbkach wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie badań

Fig. 3. Isotopic signature $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}^{2+}$ in groundwater and surface water samples in the study area

i doliny, a [Sr] do koncentracji strontu wyrażonej w mg/dm³. Równanie rozwiązuje się dla niewiadomej f , która określa udział składowych w próbce odpowiadającej wynikowi mieszania. W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki obliczeń dla próbek wód podziemnych z tych poziomów, gdzie kontakt hydrauliczny między wysoczyzną a doliną jest bezpośredni (poziomy I, II) oraz dla wartości uśrednionych ze wszystkich poziomów dolinnych i wysoczyznowych (ryc. 4).

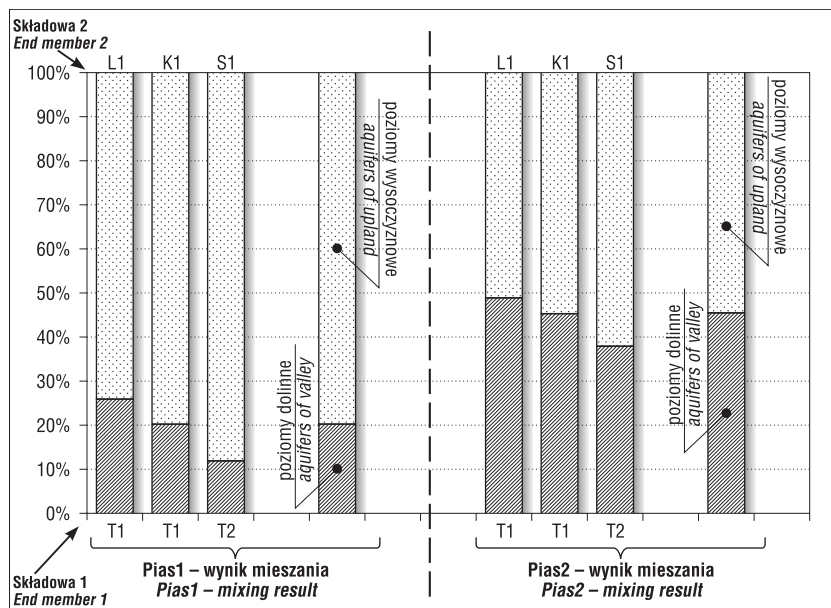
Uzyskane wyniki wskazują jednoznacznie, że zdecydowanie większy udział w wodach rzecznych mają wody podziemne pochodzące z rejonu wysoczyzny – średnio ok. 80% – dla rejonu ujścia Piaśnicy do Jeziora Żarnowieckiego (Pias1) i średnio ok. 54% – dla górnego odcinka rzeki (Pias2; ryc. 4). Wyniki te znajdują potwierdzenie w koncepcyjnym modelu krążenia wód podziemnych (ryc. 1 i 2), opracowanym na podstawie rozpoznania hydrodynamicznego, wskazującym na silny drenaż wód z wysoczyzny (Kępy Żarnowieckiej) ku środkowej i północnej części doliny, którą należy definiować jako regionalną bazę drenażu. W południowej części doliny Piaśnica drenuje głównie płytsze poziomy wodonośny (lokalna baza drenażu), co wpływa na ograniczenie udziału wód z poziomów wysoczyznowych w wodach rzecznych. Wyraźnie jest to widoczne w przypadku wód z I poziomu wodonośnego położonego w dolinie (studnia T1), gdzie udział tych wód w odplywie rzeczonym waha się w granicach 45–49%, a na odcinku ujściowym Piaśnicy spada do 20–26% (ryc. 4).

Zaobserwowano także duży wpływ składowej reprezentującej wody z wysoczyznowego II poziomu wodonośnego (S1) w odplywie Piaśnicy oraz zasilaniu wód II poziomu dolinnego (T2). Składowa wód wysoczyznowych (S1) stanowi od 62% (rejon górnego biegu rzeki) do 88% (rejon ujścia) w odplywie Piaśnicy (ryc. 4).

WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Przedstawione zróżnicowanie składu izotopowego i koncentracji strontu w wodach podziemnych rejonu GZWP 109 potwierdza złożone warunki krążenia w wielopoziomowym systemie wodonośnym. Przeprowadzone badania chemiczne i izotopowe potwierdziły drenujący charakter rzeki Piaśnicy, również w stosunku do głębokich poziomów wodonośnych. Obszar rynny Jeziora Żarnowieckiego stanowi regionalną bazę drenażu wód podziemnych. Analiza stosunku izotopów strontu pozwoliła na ilościową ocenę udziału wód podziemnych z wysoczyzny w odplywie Piaśnicy wynoszącym średnio ok. 80% dla rejonu ujścia Piaśnicy do Jeziora Żarnowieckiego i średnio ok. 54% dla górnego odcinka rzeki.

Wody w utworach czwartorzędowych na obszarze wysoczyzny cechują się odmiennymi sygnaturami izotopów strontu i jego koncentracjami niż wody z poziomów położonych w obrębie doliny Piaśnicy. Badania wykazały, iż na niższe stężenia $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ w wodach poziomów wodonośnych doliny (0,7093–0,7103)



Ryc. 4. Procentowe udziały wód podziemnych z rejonu wysoczyzny (studnie L1, K1, S1) i doliny (studnie T1, T2) w wodach rzeki Piasnicy (Pias1, Pias2)

Fig. 4. Percentage of groundwater from upland (wells L1, K1, S1) and valley area (wells T1, T2) in the water of Piasnica river (Pias1, Pias2)

niż wysoczyzny (0,7113–0,7119) przy znacznie wyższych koncentracjach strontu w wodach z poziomów dolinnych (0,204–0,261 mg/dm³) niż wysoczyznowych (0,107–0,129 mg/dm³), duży wpływ ma prawdopodobnie zasilanie z poziomów wodonośnych zbudowanych z osadów miocen-skich i oligocen-skich znajdujących się w rejonie wysoczyznowym.

LITERATURA

BAKARI S.S., AAGAARD P.P., VOGT R.D., RUDEN F., JOHANSEN I. & VUAI S.A. 2013 – Strontium isotopes as tracers for quantifying mixing of groundwater in the alluvial plain of a coastal watershed, south-eastern Tanzania. *J. Geochem. Explor.*, 130: 1–14.

BÖHLKE J.K. & HORAN M. 2000 – Strontium isotope geochemistry of groundwaters and streams affected by agriculture, Locust Grove, MD. *Appl. Geochem.*, 15: 599–609.

BRENOT A., BARAN N., PETELET-GIRAUD E. & NÉGREL P. 2007 – Interaction between different water bodies in a small catchment in the Paris basin (Bre'villes, France): Tracing of multiple Sr sources through Sr isotopes coupled with Mg/Sr and Ca/Sr ratios. *Appl. Geochem.*, 23: 58–75.

BRINK E.L. & FROST C.D. 2007 – Detecting infiltration and impacts of introduced water using strontium isotopes. *Ground Water*, 45 (5): 554–568.

CHAPMAN E.C., CAPO R.C., STEWART B.W., KIRBY C.S., HAMMACK R.W., SCHROEDER K.T. & EDENBORN H.M. 2012 – Geochemical and strontium isotope characterization of produced waters from Marcellus shale natural gas extraction. *Environ. Sci. & Technol.*, 46: 3545–3553.

CHRISTIAN L.N., BANNER J.L. & MACK L.E. 2011 – Sr isotopes as tracers of anthropogenic influences on stream water in the Austin, Texas, area. *Chem. Geol.*, 282 (3/4): 84–97.

DOPIERALSKA J. 2003 – Neodymium isotopic composition of conodonts as a paleoceanographic proxy in the Variscan oceanic system, Ph.D. thesis, 111 pp., Justus-Liebig-University, Giessen, <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2003/1168/>.

FAURE G. & POWELL J.L. 1972 – Strontium isotope geology. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, s. 188.

FAURE, G. 1986 – Principles of Isotope Geology. Second Edition. John Wiley & Sons Inc., New York, USA, s. 589.

FROST C.D. & TONER R.N. 2004 – Strontium isotopic identification of water-rock interaction and groundwater mixing. *Ground Water*, 42 (3): 418–432.

HAMEL B.L., STEWART B.W. & KIM A.G. 2010 – Tracing the interaction of acid mine drainage with coal utilization byproducts in a grouted mine: Strontium isotope study of the inactive Omega Coal Mine, West Virginia (USA). *Appl. Geochem.*, 25 (2), 212–223.

JIANG Y. 2011 – Strontium isotope geochemistry of groundwater affected by human activities in Nandong underground river system, China. *Appl. Geochem.*, 26: 371–379.

JIANG Y., WU Y. & YUAN D. 2009 – Human impacts on karst groundwater contamination deduced by coupled nitrogen with strontium isotopes in the Nandong Underground River System in Yunan, China. *Environ. Sci. Technol.*, 43 (20): 7676–7683.

NÉGREL P. 2006 – Water-granite interactions: clues from strontium, neodymium and rare earth elements in soil and waters. *Appl. Geochem.*, 21: 1432–1454.

NÉGREL P., PETELET-GIRAUD E. & GAUTIER J.B.E. 2003 – Surface water-groundwater interactions in an alluvial plain: chemical and isotopic systematics. *J. Hydrol.*, 277: 248–267.

NÉGREL P., PETELET-GIRAUD E. & WIDORY D. 2004 – Strontium isotope geochemistry of alluvial groundwater: a tracer for groundwater resources characterisation. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 8 (5): 959–972.

NÉGREL P., LEMIÈRE B., MACHARD DE GRAMMONT H., BILLAUD P. & SENGUPTA B. 2007 – Hydrogeochemical processes, mixing and isotope tracing in hard rock aquifers and surface waters from the Subarnarekha River Basin, (east Singhbhum District, Jharkhand State, India). *Hydrogeol. J.*, 15: 1535–1552.

ORŁOWSKI R. 1996 – Dokumentacja hydrogeologiczna GZWP nr 109. Dolina kopalna Żarnowiec, PH sp. z o.o. Gdańsk, Maszynopis.

OSTAFICZUK S., JAKUBOWICZ B. & SKOMPSKI S. 1976 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Sławoszy-no (0005). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

PETERMAN Z.E., THAMKE J.N., FUTA K. & PRESTON T. 2012 – Strontium isotope systematics of mixing groundwater and oil-field brine at Goose Lake in northeastern Montana, USA. *Appl. Geochem.*, 27: 2403–2408.

PIN CH., BRIOT D., BASSIN CH. & POITRASSON F. 1994 – Concomitant separation of strontium and samarium-neodymium for isotopic analysis in silicate samples, based on specific extraction chromatography. *Analytica Chimica Acta*, 298: 209–222.

SIERŻĘGA P. & CHMIEŁOWSKA U. 2000 – Mapa Hydrogeologiczna Polski (GUPW) w skali 1 : 50 000. Arkusz Sławoszy-no (0005) wraz z objaśnieniami. Państw. Inst. Geol., Warszawa.

SIERŻĘGA P., MAJEWSKA A. & NERKOWSKI P. 2006 – Baza danych GIS MhP 1 : 50 000, „Pierwszy poziom wodonośny - występowanie i hydrodynamika”, arkusz Sławoszy-no (0005). Państw. Inst. Geol., Warszawa.