

# Zmiany składu chemicznego wód podziemnych w węglanowych utworach triasu opolskiego na podstawie badań wybranych źródeł

Stanisław Staško<sup>1</sup>, Marta Trałka<sup>1</sup>, Marek Błachowicz<sup>1</sup>



S. Staško



M. Trałka



M. Błachowicz

**Changes in the chemical composition of groundwater in carbonate formations of the Opole Triassic based on research on selected springs.** *Prz. Geol.*, 70: 868–876; doi: 10.7306/2022.34

*Abstract.* Results of research of six large karstic springs with a discharge rate of 10–100 l/s obtained from a series of 12 measurements in 2021–2022 are the basis for a comparison of the chemical composition in the past and present. The studied springs drain Triassic limestones and dolomites in the southern part of Major Groundwater Basin No. 333 in the Opole region. After 40 years, there is a significant decrease in discharge rates in five out of all selected springs, and frequent dying out of outflows in three cases. A significant increase in the content of nitrogen compounds, especially nitrates, has been measured. Statistical factor analysis allowed distinguishing two groups of factors responsible for changes in the main ions in groundwater. Restoring high groundwater quality is an urgent task for the administration of this region, which requires a comprehensive approach.

Restoring high groundwater quality is an urgent task for the administration of this region, which requires a comprehensive approach.

**Keywords:** groundwater, nitrates, sulphates, springs, Opole region

Źródła jako naturalne wypływy wód podziemnych stanowią cenne obiekty badań hydrogeologicznych, dostarczające informacji o zmianach zachodzących w zasobach wodnych (Kresic, Stevanovic, 2010; Chełmicki i in., 2011; Staško, Buczyński, 2018; Jokić, Michalczyk, 2019). Jedną ze zmian jakościowych, jakie w ostatnich dekadach zauważono w wodach podziemnych węglanowych utworów triasu opolskiego (ryc. 1 i 2), jest wzrost zawartości związków azotu (Horska-Szwarc, Spałek, 2008). Celem pracy jest rozpoznanie zmian składu chemicznego wód Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 333 – Opole–Zawadzkie, szczególnie w jego południowej części. Skład wód podziemnych oceniano na podstawie wyników badań wód wybranych 6 źródeł krasowych o dużej wydajności, wypływających w miejscowościach: Błotnica Strzelecka, Roźniątów, Odrowąż, Sucha, Leśnica i Gąsiorowice (ryc. 2 i 3). Cztery z wymienionych źródeł były szczegółowo badane także w latach 1980–1983 (Staško, 1988, 1992).

## OBSZAR BADAŃ

Obszar badań (ryc. 1 i 2) obejmuje południową część Wyżyny Śląskiej (o rzędnych terenu 270–400 m n.p.m), w której występują dwie triasowe, węglanowe formacje skalne – retu i wapienia muszlowego. Charakterystyczną cechą krajobrazu regionu opolskiego jest niski wskaźnik gęstości sieci rzecznej – 0,23. Liczne są natomiast źródła krasowe.

Skałami zbiornikowymi wód podziemnych wypływających w źródłiskach na obszarze badań są skały węglanowe wapienia muszlowego (ryc. 2), które zalegają na utworach pstrego piaskowca. Należą one do sukcesji o miąższości 70–90 m i porowatości w przedziale 0,9–31,9% (średnio 12%), podścielonej przez zespół dolomitów, mar-



**Ryc. 1.** Lokalizacja obszaru badań  
**Fig. 1.** Location of the research area

gli i ewaporatów retu. Skały formacji wapienia muszlowego są spękane i występują w nich zjawiska krasowe (Staško, 1992; Kryza, Staško, 2000). Wartość współczynnika filtracji tych skał, określona na podstawie próbnych pompowań, jest zmienna i zawiera się w przedziale  $1,7 \times 10^{-7}$ – $4,8 \times 10^{-3}$  m/s (Wcisło i in., 2014), a najczęstsza wartość, tzn. typowa, jest duża i wynosi  $4 \times 10^{-4}$  m/s. Studnie eksploatujące użytkowy poziom wodonośny mają znaczną wydajność, dochodzącą do 100–130 m<sup>3</sup>/h, mimo tego leje depresyjne wytworzone wokół nich przez pobór wód są

<sup>1</sup> Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, ul. Cybulskiego 32, 50–205 Wrocław; stanislaw.stasko@uwr.edu.pl; ORCID ID: S. Staško – 0000-0002-5561-3141, M. Trałka – 0000-0003-4239-9032, M. Błachowicz – 0000-0001-7156-7467

niewielkie. Poziom zwierciadła wód podziemnych podlega dużym zmianom – ich roczna amplituda osiąga 10,8 m. W strefie aktywnej wymiany wód podziemnych czas ich przepływu, oznaczony za pomocą badań izotopowych, wynosi 10–25 lat.

Wydajność źródeł drenujących formacje węglanowe jest duża – dochodzi do 330 l/s (Staško, 1988, 1992). Źródła te przeważnie występują na obszarach rolniczych, którym towarzyszą odkrywkowe kopalnie wapieni (ryc. 3). W gminie Strzelce Opolskie, o powierzchni ok. 202 km<sup>2</sup>, użytki rolne zajmują ok. 58,6% terenu, a kopalnie 2,59% (5,23 km<sup>2</sup>). W rejonie zasilania źródeł obszary leśne stanowią ok. 15%.

## METODYKA

Od końca kwietnia 2021 r. do początku czerwca 2022 r. co miesiąc pobierano do analiz chemicznych próbki wód ze źródeł w miejscowościach Błotnica Strzelecka, Roźniatów, Odrowąż, Sucha, Leśnica i Gąsiorowice (ryc. 2) w regionie opolskim i mierzono ich wydajność. Wody źródła w Gąsiorowicach, ze względu na przyjęty harmonogram badań, poddano analizie chemicznej tylko czterokrotnie (w kwietniu 2021 r. oraz w marcu, czerwcu i październiku 2022 r.). Skład chemiczny wód oznaczano w Pracowni Geologii Środowiskowej Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego. Zawartość jonu HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> oznaczono metodą miareczkową, a aniony (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>) oraz kationy (Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) za pomocą wysokosprawnego chromatografu cieczowego HPLC typu Waters z dokładnością do 0,01 mg/l. Temperaturę wód źródłanych, ich pH oraz EC mierzono *in situ* wykwalibrowanym miernikiem wieloparametrycznym ELMETRON CX-461.

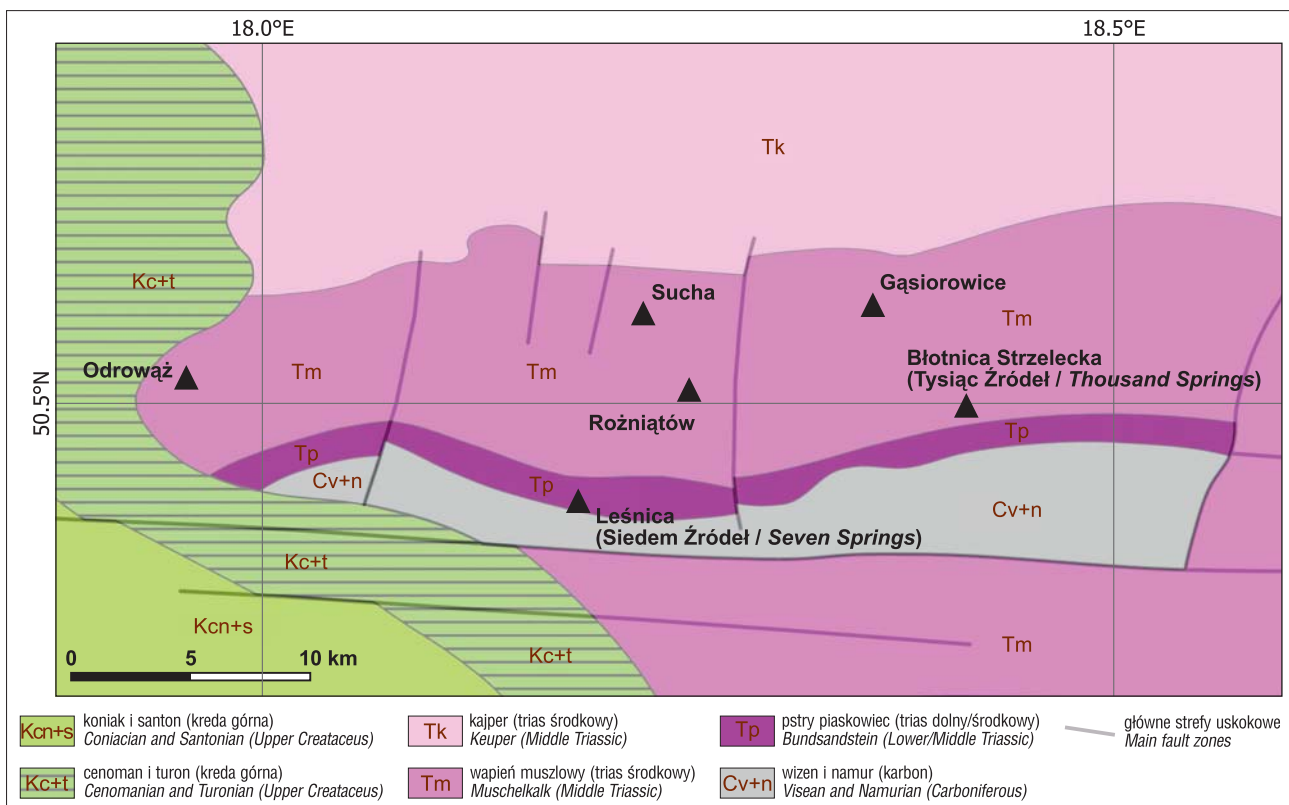
Zmiany wydajności źródeł i składu chemicznego wód podziemnych regionu opolskiego, jakie nastąpiły w tym systemie wodonośnym w efekcie intensywnej działalności człowieka, oceniono na podstawie porównania wyników badań prowadzonych w latach 2021–2022 z rezultatami prac uzyskanymi w latach 1980–1983 (Staško, 1988, 1992). Naturalne tło hydrochemiczne określono, stosując metodę wykresów prawdopodobieństwa (Macioszczyk, 1990).

W celu szczegółowej interpretacji procesów kształtujących chemizm wód podziemnych triasu opolskiego wykonano czynnikiową analizę statystyczną, wykorzystując oprogramowanie *Statistica*. Ze względu na dysproporcje w liczbie analiz chemicznych wód 6 badanych źródeł, wynikające z sezonowego zaniku dwóch z nich i niepełnego opróbowania źródła w Gąsiorowicach, w analizie tej uwzględniono jedynie wyniki 44 analiz wód źródeł w Błotnicy Strzeleckiej, Odrowążu i Leśnicy. Po interpretacji zbioru danych, ich typu i zmienności przyjęto wartość graniczną ładunków > 0,5. Niewielka zmienność stężeń jonów PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> oraz NH<sub>4</sub><sup>+</sup> sprawiła, że nie uwzględniono ich w analizie.

## WYNIKI

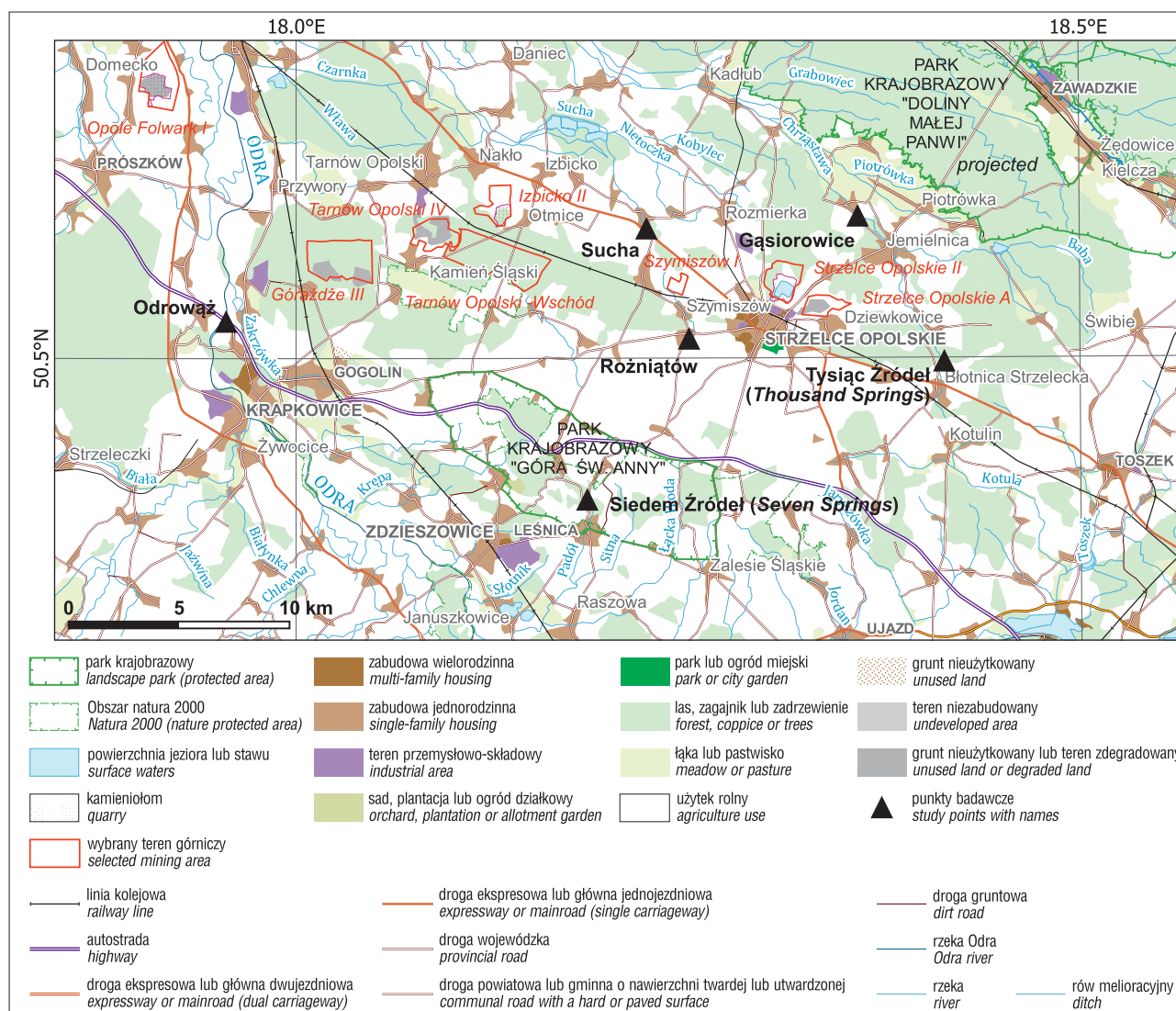
### Wydajność źródeł

Wydajność sześciu badanych źródeł była uzależniona od sezonowych warunków klimatycznych. Trzy z nich charakteryzowały się ciągłością wypływu w okresie pomiarowym 2021/2022 (Tysiąc Źródeł w Błotnicy Strzeleckiej, Siedem Źródeł w Leśnicy oraz źródło w Odrowążu), dwa natomiast (źródło w Suchej oraz źródło Roźniatów) wypływem okresowym od kwietnia do września.



Ryc. 2. Zgeneralizowana mapa geologiczna obszaru badań wg Dadleza i in. (2000)

Fig. 2. Generalized geological map after Dadlez et al. (2000)



Ryc. 3. Lokalizacja badanych źródeł na tle mapy użytkowania terenu pobranej z Bazy Danych Obiektów Ogólnogeograficznych (BDOO, 2022)

Fig. 3. Location of the studied springs on the background of the land use map downloaded from the Database of General Geographical Objects (BDOO, 2022)

Źródło w miejscowości Błotnica Strzelecka wybija za budynkiem szkoły w porośniętej lasem dolinie, którą w starszych mapach geologicznych (Assmann, 1944) oznaczono jako miejsce wypływu Tysiąca Źródeł (ryc. 4). W trakcie badań prowadzonych 40 lat temu (Staško, 1988, 1992) w tutejszej niszy źródłiskowej obserwowano kilkanaście pulsujących wypływów. Był to okres dużej wydajności źródeł. Porównując wyniki pomiarów z lat 1980–1983 i 2021–2022, stwierdzono 3-krotny spadek ich wydajności – średnio do 16,9 l/s. Jednak w latach 2021–2022 przez znaczną część okresu badawczego (od września do marca) wydajność tych źródeł była o wiele mniejsza, rzędu 1–5 l/s.

Źródło Rożniatów (ryc. 5), wybijające we wsi o tej samej nazwie, usytuowanej na zachód od Strzelec Opolskich, drenuje stropowe warstwy retu, składające się z wapieni i dolomitów. Jest ono najdłużej obserwowane, bo od ponad stu lat. Jak pisał Assmann (1929): *źródło to w ubiegłym stuleciu było tak silne, że napędzało młyn wodny, a jedynie w wyjątkowo suchych latach 1914, 1921 i 1928 stwierdzono widoczne osłabienie źródła. [...] Zasoby wód są tak znaczne, że można je określić jako prawie niewyczerpywalne.*

W latach 2021–2022 wypływ wody ze źródła Rożniatów trwał tylko od kwietnia do lipca 2021 r. oraz w październiku 2022 r. Źródłisko to daje początek Potokowi Rożniatowskiemu, którego wody giną w ponorze za wsią Szymiszów.

Źródło w miejscowości Sucha (3 km na północny zachód od Rożniątowa) wypływa na łące w odległości 200 m od drogi Strzelce Opolskie–Opole. Drenuje ono wapień muszlowy – formację skał przykrywającą osady retu. W latach 80. ubiegłego stulecia miało ono dużą wydajność, średnio 102,7 l/s. Jednak już wtedy zaobserwowano trzymiesięczny zanik wypływu – trwający od listopada 1982 r. do lutego 1983 r. (Staško, 1992). W latach 2021–2022 wypływ z tego źródła obserwowano tylko przez trzy miesiące w roku – od kwietnia do czerwca 2021 r. i stwierdzono znaczny spadek jego wydajności w ciągu ostatnich czterech dekad, ponad 10-krotny.

Źródła w Leśnicy i Odrowązu są stałe. Ich wydajność była duża zarówno w latach 80. ubiegłego stulecia, jak i jest współcześnie. Źródło w Odrowązu wypływa z tarasu Odry i jest zagospodarowane jako łowisko pstrąga. W latach 80. XX w. jego wydajność mieściła się w granicach 48–121 l/s, średnio wynosiła 80 l/s (Staško, 1992), a obecnie – 66 l/s.



**Ryc. 4.** Źródliko Siedem Źródeł w październiku 2021 r. Fot. S. Staško  
**Fig. 4.** The Seven Springs area in October 2021. Photo by S. Staško



**Ryc. 5.** Wyschnięte źródło w Roźniątowie w sierpniu 2020 r. Fot. S. Staško  
**Fig. 5.** A dried-up spring in Roźniatów in August 2020. Photo by S. Staško

Źródło w Leśnicy (o nazwie Siedem Źródeł) wypływa w dolinie potoku po południowej stronie drogi na Górę Św. Anny. Przed 40 laty miało wydajność 20–30 l/s, a obecnie – 14,9 l/s. Na tablicy informacyjnej ustawionej przy Siedmiu Źródłach (opracowanej przez Zespół Opolskich Par-

ków Krajobrazowych) widnieje informacja, że w ubiegłym stuleciu w ich okolicy działało siedem młynów wodnych.

Źródło w Gąsiorowicach wypływa ze skarpy przy drodze na północ od Strzelec Opolskich i w latach 2021–2022 miało średnią wydajność 13,8 l/s.

## Skład chemiczny wód podziemnych triasu opolskiego

Wody podziemne węglanowych utworów triasu opolskiego charakteryzują się zmiennym odczynem – od słabo kwaśnego (6,65) do słabo zasadowego (8,54) – oraz sporym zróżnicowaniem składu chemicznego (tab. 1). Większość analizowanych próbek wód źródłanych reprezentowała wody typu  $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ , natomiast próbki wód ze źródeł w Błotnicy Strzeleckiej, Leśnicy i Odrowążu (pobrane we wrześniu 2021 r.) – typ  $\text{SO}_4\text{-Ca-Mg}$  (ryc. 6).

Stężenie EC oraz jonów  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  i  $\text{SO}_4^{2-}$  znacznie przekraczało górne granice naturalnego tła hydrochemicznego (tab. 2).

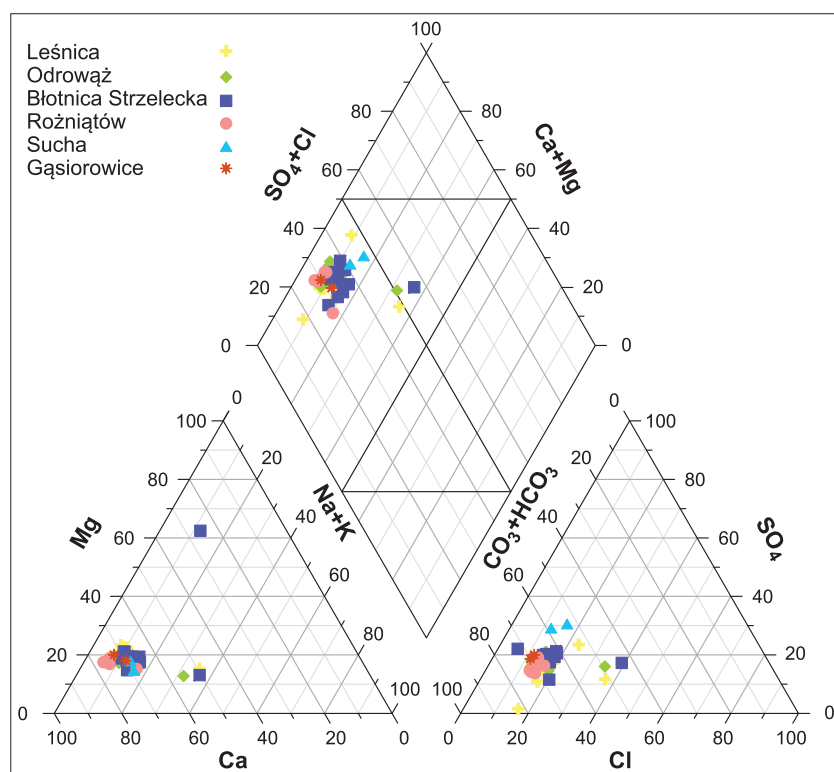
## Zmiany stężenia związków azotu w wodach podziemnych triasu opolskiego

Próbki wód pobrane z 6 źródeł drenujących skały węglanowe triasu opolskiego charakteryzowały się silnym stężeniem związków azotu oraz jego sezonową zmiennością. W składzie chemicznym wód wszystkich badanych źródeł dominował jon azotanowy ( $\text{NO}_3^-$ ), natomiast jon azotynowy ( $\text{NO}_2^-$ ) występował podrzędnie. Stężenie jonu amonowego ( $\text{NH}_4^+$ ) przeważnie utrzymywało się na niskim poziomie (0,00–0,36 mg/l), ale w kilku próbkach przekroczyło 5,7 mg/l. Taki skład związków azotu wska-

Tab. 1. Charakterystyka statystyczna składu chemicznego wód 6 źródeł triasu opolskiego badanych w latach 2021–2022

Tab. 1. Statistical characteristics of the chemical composition of the waters of 6 sources of the Opole Triassic studied in 2021–2022

Parametr Parameter	Liczba próbek Number of samples	Średnia Average value	Minimum Min	Maksimum Max	25 percentyl 25 percentile	75 percentyl 75 percentile	Odchylenie Standardowe St. Deviation
pH [-]	44	7,64	6,65	8,54	6,92	8,42	0,544
EC [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	44	740,55	613,1	945,6	625	820	72,628
$\text{Cl}^-$ [mg/L]	44	42,72	15,48	130,78	29,45	48,48	22,672
$\text{NO}_2^-$ [mg/L]	44	7,62	1,68	24,68	4,59	10,45	3,494
$\text{NO}_3^-$ [mg/L]	44	54,79	0,45	103,76	27,01	94,89	24,742
$\text{PO}_4^{3-}$ [mg/L]	44	0,33	0	4,4	0	1,28	0,837
$\text{SO}_4^{2-}$ [mg/L]	44	62,25	4,68	151,29	43,66	76,04	23,204
$\text{Na}^+$ [mg/L]	44	13,29	6,02	29,56	7,85	21,28	5,588
$\text{K}^+$ [mg/L]	44	9,62	0,23	103,84	1,48	5,71	24,244
$\text{Mg}^{2+}$ [mg/L]	44	14,87	10,8	42,82	12,53	16,34	4,548
$\text{Ca}^{2+}$ [mg/L]	44	87,11	29,03	129,73	71,92	101,21	15,684
$\text{HCO}_3^-$ [mg/L]	44	288,74	140,35	353,92	256,28	329,51	34,134



Ryc. 6. Typy hydrochemiczne wód wybranych źródeł regionu opolskiego  
Fig. 6. Hydrochemical types of waters of selected springs in the Opole region

zuje na to, że ognisko zanieczyszczeń przedostających się do tych wód podziemnych jest odległe w czasie i przestrzeni (Macioszczyk, Dobrzyński, 2002). Świadczy o tym również pewna korelacja zawartości azotanów w wodzie z wydajnością źródeł. Natomiast silny związek stężenia  $\text{NH}_4^+$  z temperaturą wody, a także z zawartością  $\text{PO}_4^{3-}$  oraz  $\text{SO}_4^{2-}$  sugeruje wzrost aktywności bakterii i przemian chemicznych.

Stężenie jonu  $\text{NO}_2^-$  we wszystkich próbkach wód pobranych w okresie

pomiarowym przekraczało normę ustaloną dla wód przeznaczonych do spożycia (Rozporządzenie, 2017). Także zawartość  $\text{NO}_3^-$  w prawie wszystkich próbkach wód z wyjątkiem pochodzących ze źródeł w Gąsiorowicach oraz Leśnicy była ponadnormatywna. Dużą koncentrację jonu amonowego, sprawiającą, że wody stały się niezdadne do picia, stwierdzono w wodzie źródła w Suchej oraz w listopadzie 2021 r. w Błotnicy Strzeleckiej.

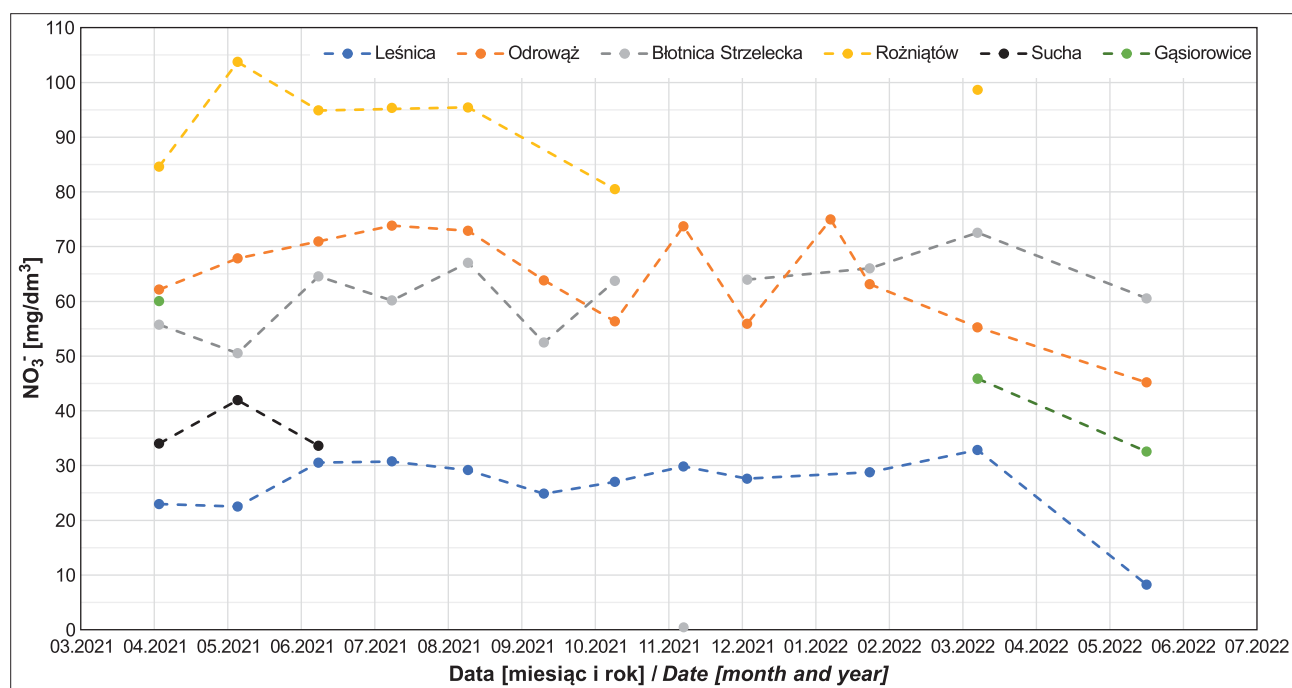
Zawartość azotanów w wodach badanych źródeł była zróżnicowana w czasie. W ciągu całego okresu pomiarowego najmniejszym stężeniem azotanów charakteryzowała się woda Siedmiu Źródeł w Leśnicy, natomiast największym – źródła Roźniatów. Największa koncentracja jonu azotanowego utrzymywała się w wodach wszystkich badanych źródeł od kwietnia do października 2021 r., natomiast w listopadzie nagle zmniejszyła się (ryc. 7),

**Tab. 2.** Tło hydrochemiczne 6 badanych źródeł w zestawieniu z naturalnym tłem wybranych składników wód podziemnych Polski (wg Witczaka i in., 2013)

**Tab. 2.** Hydrochemical background of the 6 studied springs compared to the natural background of selected components of groundwater in Poland (based on Witczak et al., 2013)

Parametr Parameter	Tło hydrochemiczne 6 badanych źródeł Hydrochemical background of the 6 studied springs		Naturalne tło hydrochemiczne wybranych składników wód podziemnych Polski (wg Witczaka i in., 2013) Hydrogeochemical background of typical natural groundwater in Poland (based on Witczak et al., 2013)	
	Dolna granica (10百分yl) Lower range (10 percentile)	Górna granica (90百分yl) Upper range (90 percentile)	Dolna granica Lower range	Górna granica Upper range
pH [-]	6,92	8,42	6,5	9,5
EC [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	625	<b>820</b>	200	700
$\text{Cl}^-$ [mg/l]	29,45	48,48	2	60
$\text{NO}_2^-$ [mg/l]	4,59	<b>10,45</b>	0	0,01
$\text{NO}_3^-$ [mg/l]	27,01	<b>94,89</b>	0	5
$\text{PO}_4^{3-}$ [mg/l]	0	<b>1,28</b>	0,01	1
$\text{SO}_4^{2-}$ [mg/l]	43,66	<b>76,04</b>	5	60
$\text{Na}^+$ [mg/l]	7,85	21,28	1	60
$\text{K}^+$ [mg/l]	1,48	5,71	0,5	10
$\text{Mg}^{2+}$ [mg/l]	12,53	16,34	0,5	30
$\text{Ca}^{2+}$ [mg/l]	71,92	101,21	2	200
$\text{HCO}_3^-$ [mg/l]	256,28	329,51	60	360

**Objaśnienia:** Grubszą czcionką wyróżniono wartości przekraczające granice naturalnego tła hydrochemicznego Polski  
**Explanations:** Values exceeding the limits of Poland's natural hydrochemical background are highlighted in thicker font



**Ryc. 7.** Stężenie azotanów w wodach źródeł drenujących skały węglanowe triasu opolskiego (od kwietnia 2021 r. do czerwca 2022 r.)  
**Fig. 7.** Nitrate concentration in the waters of springs draining carbonate rocks of the Opole Triassic (April 2021 to June 2022)

mimo jednoczesnego spadku wydajności źródeł. Od grudnia 2021 r. do marca 2022 r. zawartość azotanów w wodach źródła w Błotnicy Strzeleckiej oraz w Odrowążu ulegała bardzo dużym zmianom. W czerwcu 2022 r. w wodach wszystkich badanych źródeł (z wyjątkiem Tysiąca Źródeł w Błotnicy Strzeleckiej) nastąpił spadek zawartości  $\text{NO}_3^-$  do minimum w całym okresie pomiarowym, bez istotnej korelacji z wydajnością źródeł.

### Analiza czynnikowa

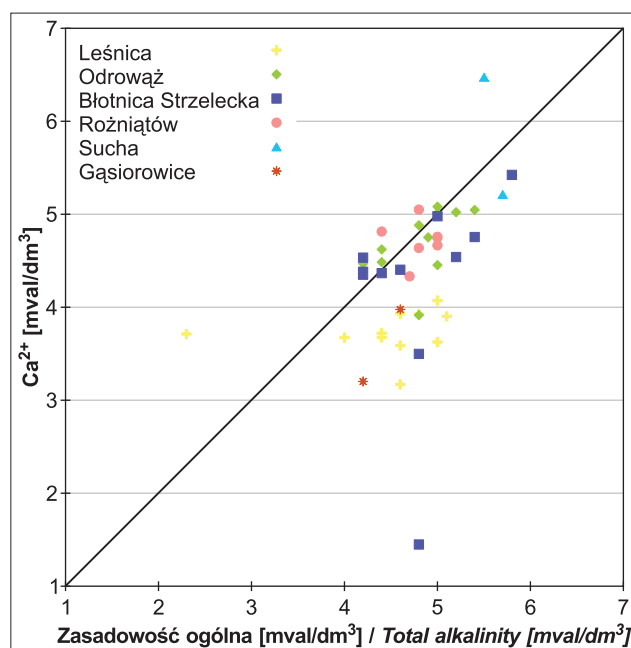
W analizie czynnikowej wyróżniono dwie grupy zmiennych, które odpowiadają za kształtowanie się chemizmu wód podziemnych w obszarze badań. Uzyskano dwa czynniki łącznie wyjaśniające 57,5% wariancji (tab. 3).

Pierwszy czynnik, wyjaśniający 32,5% zmienności danych, wskazuje, że zawartość jonów  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  i  $\text{NO}_3^-$  w wodach podziemnych triasu opolskiego, od których zależy również EC, jest bezpośrednio związana z wydajnością badanych źródeł, a co za tym idzie, że składniki te są dostarczane do wód podziemnych w miejscach odległych od ich wypływów i sugeruje, że są to wody długo krążące w systemie wodonośnym (Żelazny i in., 2013). Jon  $\text{NO}_3^-$  może jednak w głównej mierze pochodzić z substancji stosowanych w rolnictwie, które przedostają się do wód podziemnych z pól uprawnych i przyczyniają do podwyższenia w nich również zawartości wapnia i sodu. Jony siarczanowe mogą natomiast pochodzić z zanieczyszczeń bytowych, przemysłowych, a także z nawozów naturalnych bądź z dopływu wód z formacji retu. Duży wpływ na chemizm badanych wód mają procesy wymiany jonowej zachodzące na powierzchni utworów węglanowych, w których wykształcił się system wodonośny, oraz procesy rozpuszczania lub wytrącania minerałów. Na podstawie relacji zawartości jonów  $\text{Ca}^{2+}$  do  $\text{HCO}_3^-$  można stwierdzić, że zmiany stężenia tych jonów w badanych

**Tab. 3.** Ładunki czynnikowe po rotacji *biquartimax*  
**Table 3.** Factorial charges after *biquartimax* rotation

Zmienna Variable	Czynnik 1 Factor 1	Czynnik 2 Factor 2
Wydajność / Discharge [l/s]	<b>0,52</b>	-0,02
Temperatura / Temperature [°C]	0,33	0,13
pH [-]	-0,12	<b>0,54</b>
EC [μS/cm]	<b>0,75</b>	-0,28
$\text{Cl}^-$ [mg/l]	0,06	<b>0,82</b>
$\text{NO}_2^-$ [mg/l]	-0,22	<b>-0,60</b>
$\text{NO}_3^-$ [mg/l]	<b>0,83</b>	-0,02
$\text{SO}_4^{2-}$ [mg/l]	<b>0,73</b>	0,13
$\text{Na}^+$ [mg/l]	<b>0,52</b>	-0,33
$\text{K}^+$ [mg/l]	0,04	<b>0,86</b>
$\text{Mg}^{2+}$ [mg/l]	0,04	-0,28
$\text{Ca}^{2+}$ [mg/l]	<b>0,71</b>	0,26
$\text{HCO}_3^-$ [mg/l]	0,43	-0,06
Wyjaśniona wariancja [%] Expl. Var. [%]	32,50	25,00

**Objaśnienia:** Wyróżniono ładunki przekraczające wartość graniczną  $> 0,5$   
**Explanations:** Charges exceeding the limit of  $> 0.5$  were distinguished



**Ryc. 8.** Zależność zawartości wapnia od zasadowości  
**Fig. 8.** Correlation of alkalinity and calcium contents

wodach źródłanych w większości nie są wynikiem antropopresji (ryc. 8).

Drugi czynnik wyjaśnia 25% wariancji i jest związany z jonami  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  oraz pH, a także z ujemnie skorelowanym do nich jonem  $\text{NO}_2^-$ . Czynnik ten reprezentuje procesy antropogeniczne, od których zależy jakość wód podziemnych, a zawartość jonów potasu oraz chloru wskazuje na przenikanie do nich substancji pochodzących z nawozów rolniczych, które podwyższają pH tych wód. Ujemna korelacja azotanów do pozostałych składników sugeruje natomiast inny proces odpowiedzialny za dostawanie się tych jonów do wód. Choć one mogą pochodzić ze związków azotu zawartych w nawozach rolniczych, które po przeniknięciu do gleby podlegają migracji do warstwy wodonośnej, a następnie przemianom w procesach redoks.

## DYSKUSJA

Wody podziemne wypływające z utworów węglanowych triasu opolskiego na ogół charakteryzują się dobrą jakością, jednak ze względu na sposób użytkowania terenu w okolicy źródeł oraz szczelinowo-krasowy system przepływu są one narażone na zanieczyszczenia. W latach 80. ub. wieku Nowacki (1989) zaobserwował zmniejszenie wydajności źródeł w regionie opolskim i okresowe zaniki wypływów wód ze źródeł w Suchej oraz Rożniątowie, spowodowane intensyfikacją odwadniania kopalń.

Na terenach działalności rolniczej oraz przemysłowej związki chemiczne zawierające azot, jakie przedostają się do wód podziemnych, pochodzą głównie z nawozów rolniczych, ścieków gospodarczych oraz zakładów przemysłowych. Wysokie stężenie azotanów (powyżej 50 mg/l) odnotowano w wodach wszystkich 6 źródeł w całym okresie pomiarowym – zazwyczaj przewyższało ono górną granicę naturalnego tła hydrochemicznego Polski określoną przez Witczaka i in. (2013). Wody źródeł w Suchej i Rożniątowie już od końca lat 90. ubiegłego wieku charaktery-

**Tab. 4.** Stężenie azotanów w źródłach opolskich wg Kryzy i in. (1999), Horskij-Szwarc i Spałka (2008)\* oraz Spałka i in. (2011)\*\*

**Tab. 4.** Nitrate concentrations in Opole springs according to Kryza et al. (1999), Horska-Szwarc and Spałek (2008)\* and Spałek et al. (2011)\*\*

Lokalizacja <i>Location</i>	Rok pomiaru <i>Sampling year</i>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]
Sucha	1988	10,4
	1990	1,5
	1999	65,93
Odrawąż	1988	11,88
	1990	10,74
	1999	62,69
	2004**	70,83
	2008*	30–34
Roźniatów	1986	4,96
	1987	16,2
	1988	14
	1989	17,2
	1990	8
	2008*	47–100

zują się dużą zawartością azotanów (tab. 4), a w Odrawążu od początku XXI w. (Kryza i in., 1999; Spałek i in., 2011). W 1999 r. w wodach źródeł w Suchej i Odrawążu stężenie azotanów wynosiło ponad 65 mg/l, natomiast w wodach Siedmiu Źródeł k. Leśnicy wzrosło ono w 2008 r. (ryc. 9).

Według danych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, pochodzących z monitoringu jakości wód podziemnych w latach 2000–2021 (Monitoring..., 2000–2021), wody podziemne przepływające przez porowo-szczelinowo-krasowe ośrodki wodonośne na obszarze województwa opolskiego (m.in. w miejscowościach Jemielnica, Strzelce Opolskie i Tarnów Opolski) charakteryzują się wysokim stężeniem jonu NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (czasami przekraczającym 100 mg/l). Tak duże zanieczyszczenie wód związkami azotu najczęściej zaznacza się na obszarach zagospodarowanych rolniczo.

W 1988 r. średnia mineralizacja wód podziemnych na obszarze wychodni formacji triasowych w regionie opol-

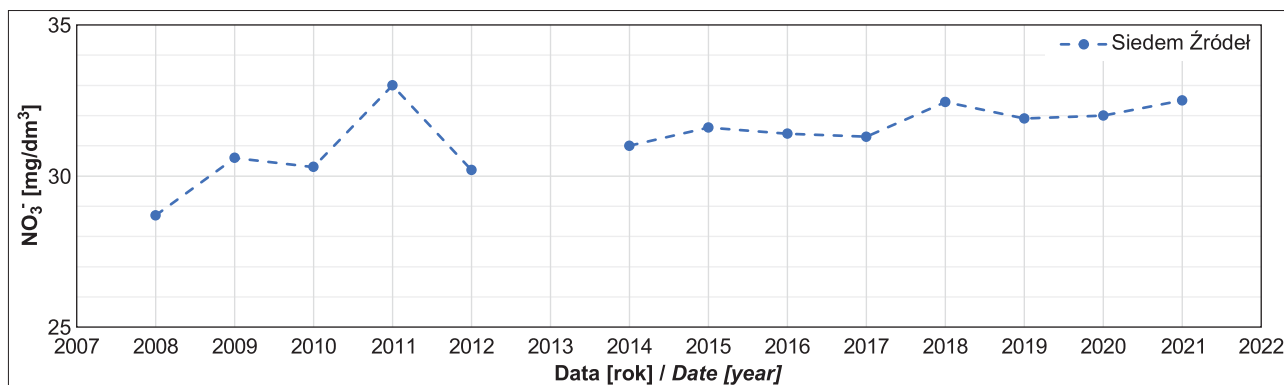
skim wynosiła 493 mg/l, a zawartość azotanów 12,62 mg/l (Kryza i in. 1988). Obecnie mineralizacja wód osiągnęła 740 mg/l, a zawartość azotanów 54,8 mg/l. Wysokie stężenie azotanów w wodach podziemnych wychodni wodonośnych wapieni triasu (przekraczające 50 mg/l) opisywali między innymi Żurek (1991), Duda i Żurek (1993), Kryza i in. (1999), Kryza i Staško (2000) oraz Kryza i Kryza (2002), wskazując jednak na lokalne zasięgi zanieczyszczeń, obejmujące głównie wody płytkiego krążenia. Notowano je w rejonie Strzelce Opolskich, Szymiszowa i Warmątowic. Poza rolniczym źródłem dostaw związków azotu do wód podziemnych wymieniano także inne lokalne ogniska zanieczyszczeń, np. składowiska odpadów i sieci kanalizacyjne. Wyniki badań prowadzonych w latach 1982–1986 nie wskazywały na podwyższenie zawartości tych związków w wodach podziemnych (Staško, 1992).

W 2008 r. stężenie azotanów w wodach źródeł w Błotnicy Strzeleckiej, Odrawążu i Gąsiorowicach zawierało się w przedziale 30–47 mg/l. Jedynie w wodach źródła Roźniatów zawartość azotanów dochodziła do 100 mg/l (Horska-Szwarc, Spałek, 2008).

Silne stężenie azotanów notowane obecnie w wodach podziemnych na Opolszczyźnie dokumentuje dalszy etap negatywnego oddziaływania człowieka na jakość wód GZWP nr 333. Dla naprawy tej sytuacji należy szybko podjąć kompleksowe działania zarówno w dziedzinie dobrych praktyk rolniczych i gospodarki wodno-ściekowej, jak też w obszarze oddziaływania na środowisko górnictwa odkrywkowego.

W latach 90. ubiegłego stulecia również w innych obszarach występowania w Polsce formacji węglanowych, np. na Wyżynie Krakowsko-Wieluńskiej, stwierdzono znaczący wzrost zawartości azotanów w wodach podziemnych formacji krasowo-szczelinowych – nawet do 90 mg/l (Rózkowski i in., 1996). Według Mizery i Maliny (2007) w latach 1983–2002 zawartość azotanów w wodach ze studni i ujęć wód dla Częstochowy zwiększyła się z 10–20 do 40–50 mg NO<sub>3</sub>/l. Natomiast w wodach podziemnych na obszarach o znikomej antropopresji, np. w wywierzysskach tatrzańskich (Chochołowskim, Lodowym i Olczyskim) w 2009 r. stwierdzono małe stężenie azotanów – w przedziale 1,98–2,86 mg/l (Żelazny i in., 2013).

Ciekawe wyniki badań wód podziemnych w jurajskim piętrze wodonośnym w rejonie Olkusza i GZWP nr 326 opublikowali Żurek i in. (2010). Autorzy owi stwierdzili, że jakość tych wód uległa degradacji w latach 2001–2008 na skutek wzrostu zawartości w nich azotanów. Wykazali



**Ryc. 9.** Zmiany stężenia jonu azotanowego w wodach źródła Siedem Źródeł w latach 2008–2021 (Monitoring..., 2000–2021)  
**Fig. 9.** Changes in nitrate ion concentrations at the Seven Springs in the years 2008–2021 (Monitoring..., 2000–2021)



także, że najmniejsze stężenie azotanów występuje w wodach podziemnych na obszarach ugorów, większe na terenach upraw rolnych, a największe na obszarach zabudowanych. Natomiast w latach 1995–2008 w wybranych ujęciach wód podziemnych zaobserwowali tendencję do spadku zawartości azotanów z 50 do 20–30 mg/l. Średnie stężenie azotanów w wodach źródeł zawierało się wówczas w przedziale 5–28 mg/l.

## WNIOSKI

Wzrost aktywności gospodarczej, w tym intensyfikacja rolnictwa oraz wydobywania surowców mineralnych, prowadzą do nasilenia presji na środowisko wodne, polegającej na zwiększeniu zużycia wód podziemnych do celów zaopatrzenia komunalnego, rolniczego i przemysłowego, a także nasileniu odwadniania kopalń, co prowadzi do spadku wydajności lub zaniku źródeł. W ostatnim 40-leciu nastąpił znaczny spadek wydajności źródeł drenujących węglanowe utwory triasu opolskiego (np. Błotnica Strzelecka) lub też pojawiły się długotrwałe okresy zaniku ich wypływów (np. źródeł Roźniatów i Sucha). Procesom tym towarzyszą niepokojące zmiany składu chemicznego wód Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 333 – Opole–Zawadzkie, zwłaszcza zwiększenie mineralizacji ogólnej i zawartości związków azotu. Analiza dostępnych danych archiwalnych wskazuje, że w latach 90. XX w. stężenie azotanów w wodach tego zbiornika przekroczyło 50 mg/l, czyli normę dopuszczalną dla wód pitnych. W okresie badawczym w latach 2021–2022 zawartość azotanów w badanych 6 źródłach mieściła się w zakresie 27,01–94,89 mg/l, a średnia wynosiła 54,79 mg/l. W wodach tych źródeł stwierdzono także wysokie średnie stężenie azotanów – 7,62 mg/l. Zadaniem gospodarzy regionu opolskiego, wymagającym kompleksowego podejścia, jest szybkie przywrócenie wysokiej jakości wodom podziemnym.

Dziękujemy recenzentom – prof. J. Przybyłkowi i prof. M. Szostakiewicz-Hołowni – za cenne uwagi, które przyczyniły się do znacznej poprawy ostatecznej formy artykułu. Pracę wykonano w ramach badań statutowych Instytutu Nauk Geologicznych i dzięki wsparciu jego dyrekcji.

## LITERATURA

- ASSMANN P. 1929 – Über die Entstehung der Quelle des Rosniontauer Wassers und der sogenannten Quelle von Suchau. Naturkundl. Basteine aus Oberschlesien.
- ASSMANN P. 1944 – Die Stratigraphie der Oberchlesischer Trias. Teil II. Der Muschelkalk. Abh. des Reichsamte für Bodenforschung, Berlin, 208.
- BDOO 2022 – Baza Danych Obiektów Ogólnogeograficznych WMTS (Web Map Tile Service) 1: 10 000; <https://mapy.geoportal.gov.pl/wss/service/PZGIG/BDOO/WMTS/aktualne>
- CHELMICKI W., JOKIEL P., MICHALCZYK Z., MONIEWSKI P. 2011 – Distribution, discharge and regional characteristics of springs in Poland. Episodes, 34 (4): 244–256.
- DADLEZ R., MAREK S., POKORSKI J., BUŁA Z. (red.) 2000 – Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku 1: 1 000 000. Wyd. Kartograficzne Polskiej Agencji Ekologicznej, Warszawa.
- DUDA R., ŻUREK A. 1993 – Możliwości oceny zmian jakości wody pod wpływem antropopresji metodą bilansową (GZWP 333 Opole–Zawadzkie). Metodyczne podstawy ochrony wód podziemnych. Wyd. AGH: 217–245.
- JOKIEL P., MICHALCZYK Z. 2019 – Źródła polski – zachować dla przyszłości. Pr. Geogr., 157: 7–31.
- HORSKA-SZWARC S., SPAŁEK K. 2008 – Charakterystyka źródeł Śląska Opolskiego. [W:] Problemy Ekologii Krajobrazu, 2: 211–218.
- KRESIC N., STEVANOVIC Z. (red.) 2010 – Groundwater hydrology of springs. Engineering, theory, management and sustainability. Elsevier, Boston.
- KRYZA H., KRYZA J. 2002 – Zanieczyszczenie wód podziemnych triasu opolskiego. [W:] Współczesne Problemy Hydrogeologii, 10: 33–44.
- KRYZA J., STAŚKO S. 2000 – Groundwater Flow Rate and Contaminant Migration in Fissure – Karstic Aquifer of Opole Triassic System Due to Man Activity. Environ. Geol. 39 (3/4): 384–389.
- KRYZA J., STAŚKO S., LIMISIEWICZ P., MAŁACHOWICZ M. 1988 – Prognoza weryfikacyjna konsekwencji środowiskowych przyjętych zasad ochrony głównych zbiorników wód podziemnych na wybranych obszarach pilotowych: obszar zlewni Jemielnicy. Arch. UW, nr ING/24/88.
- KRYZA H., KRYZA J., KOŚCIAŃSKI R.K. 1999 – Monitoring regionalny wód podziemnych zbiornika GZWP-333 Opole–Zawadzkie. Mater. Konferencji Trias Opolski, Opole–Turawa. Wyd. NOT, Opole.
- MACIOSZCZYK A. 1990 – Tło i anomalie hydrogeochemiczne: metody badania, oceny i interpretacji. Wyd. SGGW-AR.
- MACIOSZCZYK A., DOBRZYŃSKI D. 2002 – Hydrogeochemia strefy aktywnej wymiany wód podziemnych. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- MIZERA J., MALINA G. 2010 – Groundwater extraction control for protecting the water works in Łobodno (SW Poland) against contamination with nitrates. Biul. Państw. Inst. Geol., 441: 101–106.
- MONITORING Jakości Wód Podziemnych w latach 2000–2021. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska: <https://mjwp.gios.gov.pl/>
- NOWACKI F. 1989 – Zmiany wydajności źródeł triasu opolskiego. Pr. Nauk. Inst. Geotech. Polit. Wroc., 58 – Konferencje, 29: 117–121.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz.U. z 2017 r. poz. 2294.
- RÓŻKOWSKI A., RÓŻKOWSKI J., PACHOLEWSKI A. 1996 – Upper Jurassic fissured-karst-porous aquifer of Cracow–Wieluń Upland, Poland. [W:] Int. Conference on Karst – Fractured Aquifers – Vulnerability and Sustainability. Uniw. Śląski, Katowice: 194–204.
- STAŚKO S. 1988 – Odpływ podziemny ze zlewni Jemielnicy w obrębie triasowych utworów szczelinowo-krasowych. Acta Univ. Wratisl., 964, Pr. Geol.-Miner., 11 (2): 163–179.
- STAŚKO S. 1992 – Wody podziemne w węglanowych utworach triasu opolskiego. Pr. Geol.-Miner., 32.
- STAŚKO S., BUCZYŃSKI S. 2018 – Drought and its effects on spring discharge regimes in Poland and Germany during the 2015. Hydrological Sci. J., 63 (5): 741–751.
- SPAŁEK K., PROČKÓW J., STAŚKO S., HORSKA-SZWARC S. 2011 – Preliminary study on the unusual properties in the habitat of Ranuncullentum baudoitii in Central Europe. Centr. Europ. J. Biol. 6 (4): 632–638.
- WCISŁO M., OLICHWER T., STAŚKO S. 2014 – Anisotropy modeling of the fissure-karstic aquifer of the Opole–Zawadzkie Major Groundwater Basin (south-west Poland). Acta Geol. Pol., 64 (3): 353–360.
- WITCZAK S., KANIA J., KMIECIK E. 2013 – Katalog wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania. Gł. Insp. Ochr. Środ.
- ŻELAZNY M., BARCZYK G., WOLANIN A., WÓJCIK S. 2013 – Zmiany cech fizyczno-chemicznych wód wywierzynek: Chochołowskiego, Lodowego i Olczego w 2009 r. Biul. Państw. Inst. Geol., 456: 685–692.
- ŻUREK A. 1991 – Przestrzenne rozmieszczenie związków azotowych w wodach podziemnych zbiornika szczelinowo-krasowego w rejonie Opola. Mater. Krajowej Konferencji Geologiczne Aspekty Ochrony Środowiska, Kraków, 21–23 października 1991 r. Wyd. AGH, Kraków.
- ŻUREK A., CZOP M., MOTYKA J. 2010 – Azotany w wodach jurajskiego piętra wodonośnego w rejonie Olkusza. Wyd. AGH, Kraków, Geologia, 16 (1): 109–134.

Praca wpłynęła do redakcji 14.11.2022 r.  
Akceptowano do druku 21.12.2022 r.