

## Modelowanie hydrogeochemiczne wód termalnych eksploatowanych z trzech ujęć geotermalnych w Bańskiej Niżnej (Podhale)

Klaudia Sekuła<sup>1</sup>, Barbara Tomaszewska<sup>1</sup>, Katarzyna Wątor<sup>1</sup>,  
Ewa Kmiecik<sup>1</sup>, Anna Mika<sup>1</sup>

**Hydrogeochemical modelling of thermal waters exploited from three geothermal wells in Bańska Niżna (Podhale, south Poland).** Prz. Geol., 65: 1014–1018.

*Abstract.* The exploitation of thermal waters from the Triassic, Jurassic and carbonate Eocen is conducted by PEC Geothermia Podhalańska with three wells: Bańska PGP-1, Bańska PGP-3 and Bańska IG-1. The groundwater discharge rates from each well change over time, depending on the energy requirements of the heating installation. As a consequence, the proportions of water exploited by the wells and mixed in the heating system are fluctuating. This paper presents results of physicochemical research of water from geothermal wells, which were carried out under various operating conditions. The data were used to evaluate changes in the hydrogeochemical specificity of water exploited from individual wells and mixed in the installation. Hydrogeochemical modelling was performed with the analysis of changes of ion speciation depending on the exploitation parameters. Consideration is given to the results obtained during the summer, when the water extraction rate is lower (providing energy coverage for hot water) and in the winter, when the extraction rate is considerably higher (for heat and hot water supply). The results of the modelling allow identification of the impact of the performance parameters of the wells on the water characteristics of the system before and after geothermal heat exchangers.

**Keywords:** geothermal waters, geochemical modelling, Bańska Niżna, south Poland

Formy występowania rozpuszczonych składników wód podziemnych zależą od siły jonowej wody, odczynu pH, potencjału redoks Eh oraz obecności innych substancji zawartych w badanych wodach (Witeczak i in., 2013). Wskaźniki chemiczne oznaczane w analizach fizykochemicznych wód zwyczajowo są podawane w formie jonowej (np. potas czy sód jako jony potasu  $K^+$  i sodu  $Na^+$ ) lub związku (np. zawartość krzemionki jako  $SiO_2$  czy  $H_2SiO_3$ ). Wynika to z ograniczonych możliwości metod analitycznych, które pozwalają na oznaczenie ogólnego stężenia danego wskaźnika, a nie jego specjacji (Barałkiewicz, Bulska, 2009).

Uwzględniając zróżnicowanie środowiska geologicznego oraz zmieniające się warunki fizykochemiczne, do opisu procesów hydrogeochemicznych zachodzących w układzie wieloskładnikowym woda – faza stała – faza gazowa powszechnie jest wykorzystywane modelowanie hydrogeochemiczne (Zhu, Anderson, 2002; Macioszczyk, Dobrzyński, 2002; Dobrzyński, 2006; Zhu, 2009). Jednym z najczęściej stosowanych w tym celu programów komputerowych jest PHREEQC, pozwalający m.in. na obliczenie udziału form (specjacji) występowania substancji rozpuszczonych w wodach oraz stanu równowagi roztworu wodnego względem minerałów (Appelo, Postma, 2005).

Celem przeprowadzonego modelowania hydrogeochemicznego rozkładu specjacji wybranych wskaźników w badanych roztworach była ocena różnic w tym zakresie pomiędzy wodami pochodzącymi bezpośrednio z ujęć (charakteryzującymi się wysokimi temperaturami) a ich mieszaniną (przed i za wymiennikiem ciepła). Porównanie to pozwoliło na ocenę wpływu zmian parametrów eksploatacyjnych (wydajności) oraz fizycznych (pH, Eh, temperatury) na właściwości pozyskiwanych i wykorzystywanych wód termalnych. Zdefiniowano zjawiska mogące

zachodzić w wyniku samego procesu mieszania, jak również skutek spadku temperatury w trakcie procesu wymiany ciepła na instalacji.

### CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

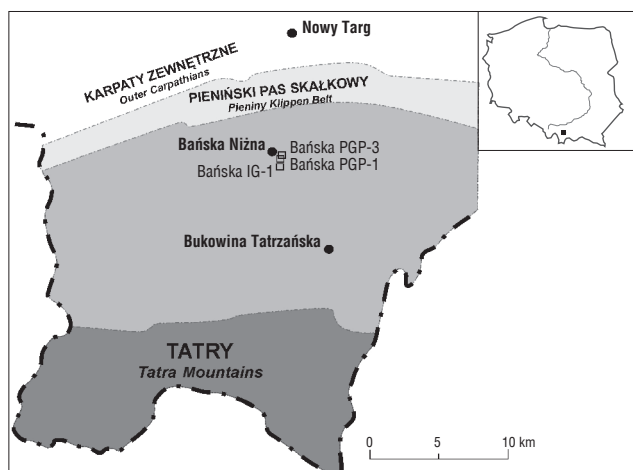
Badania przeprowadzono w miejscowości Bańska Niżna (województwo małopolskie), gdzie firma PEC Geothermia Podhalańska S.A. eksploatuje trzy ujęcia wód termalnych: Bańska PGP-1, Bańska PGP-3 oraz Bańska IG-1 (ryc. 1). Otwory te wchodzi w skład geotermalnego systemu ciepłowniczego firmy (Kleszcz, Tomaszewska, 2013). Poziomy zbiornikowe dla wód termalnych stanowią otwory eocenu węglanowego wraz z niżej leżącymi utworami mezozoicznymi, głównie wapieniami i dolomitami triasu środkowego oraz piaskowcami i skałami węglanowymi jury. Na skład chemiczny wód termalnych niecki podhalańskiej mają wpływ: warunki ich krążenia, litologia skał zbiornikowych, warunki utleniająco-redukcyjne, ciśnienie, temperatura oraz działalność mikroorganizmów (Kępińska, Ciągło, 2008).

Wody termalne ujmowane odwiertami Bańska PGP-1, Bańska PGP-3 oraz Bańska IG-1 to wody siarczanowo-chlorkowo-sodowo-wapniowe o mineralizacji ogólnej ok. 2,5 g/dm<sup>3</sup> (Kmiecik i in., 2016).

### METODYKA BADAŃ

Opróbowanie i pomiary terenowe wykonano zgodnie z metodyką podaną w normach ISO serii 5667 (Jakość wody – Pobieranie próbek) oraz w publikacjach (Kania, 2003; Ármannsson, Ólafsson, 2010; Witeczak i in., 2013). Szczegółowy opis przyjętych rozwiązań technicznych przedstawiono w następujących pracach: Mika, Korzec,

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; kladia.sekula@agh.edu.pl, barbara.tomaszewska@agh.edu.pl, katarzyna.wator@agh.edu.pl, ewa.kmiecik@agh.edu.pl, annamika@agh.edu.pl.



Ryc. 1. Obszar badań  
Fig. 1. The research area

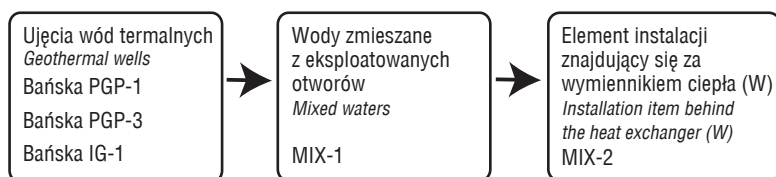
2015; Kmiecik i in., 2016; Korzec i in., 2016a, b. W terenie mierzono parametry nietrwałe, pH, PEW, Eh i temperaturę (T) oraz zapisywano wielkość wydobywania wody z każdego ujęcia. Analizy składu chemicznego próbek wód były wykonywane w akredytowanym Laboratorium Hydrogeochemicznym Katedry Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH w Krakowie (certyfikat akredytacji PCA nr AB 1050).

Badania wód z ujęć eksploatujących wody termalne w Bańskiej Nizynie oraz z instalacji technologicznej wykonywano wg schematu przedstawionego na rycinie 2.

Modelowanie hydrogeochemiczne wód termalnych za pomocą programu PHREEQC Interactive v. 3.3.11 z wykorzystaniem bazy danych termodynamicznych wateq4f. dat przeprowadzono na podstawie pełnych analiz fizykochemicznych. Zakres pełnej analizy obejmował 37 wskaźników: Na, K, Ca, Mg, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, składnik swoisty – krzemionkę przeliczoną na stężenie kwasu metakrzemowego, Li, B, Be, Ba, Sr, Fe, Mn, Ag, Zn, Cu, Ni, Co, Pb, Hg, Cd, Se, Sb, Al, Cr, Mo, V, Zr, Ti, As, Tl, W, Br, I, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>.

Wykonane modelowanie pozwoliło na określenie zmian stężeń wybranych specjacji poszczególnych pierwiastków. Szczegółowej analizie poddano siarkę (VI), chlor, sód oraz wapń, które w formie jonowej decydują o typie hydrochemicznym wód termalnych eksploatowanych z ww. ujęć oraz wody pobranej za wymiennikiem ciepła z istniejącej instalacji geotermalnej (W). Stężenia tych jonów oraz wartości parametrów terenowych zestawiono w tabeli 1.

Wykonano również modelowanie mieszania się wód termalnych w znanych proporcjach, określonych na podstawie wielkości wydobywania, dla dwóch temperatur – charakterystycznej dla wody wypływającej z ujęcia (MIX-1 – przed wymiennikiem ciepła) oraz wody za wymiennikiem ciepła (MIX-2). W wyniku tego modelowania uzyskano



Ryc. 2. Schemat opróbowania i analizy wód termalnych w Bańskiej Nizynie  
Fig. 2. Scheme of sampling and analysis of geothermal waters exploited in Bańska Nizina

informację o przypuszczalnym udziale specjacji w roztworach symulujących efekt procesu mieszania wód. Modelowanie specjacyjne wykonano, wykorzystując wyniki badań własnych, przeprowadzonych w dniach 6 lutego (sezon zimowy) i 3 maja 2015 r., kiedy eksploatowano wszystkie trzy ujęcia (Bańska PGP-1, Bańska PGP-3, Bańska IG-1), oraz 20 sierpnia 2015 r. (sezon letni), kiedy eksploatacja była mniejsza – pobór wody tylko z otworów Bańska PGP-1 i Bańska PGP-3.

Temperatura wody na wypływie z ujęć geotermalnych wahała się podczas badań (79,3–86,3°C) i była o ponad 30°C wyższa niż temperatura wody za wymiennikiem ciepła (W). W schłodzonej wodzie odnotowano nieznaczny spadek wartości pH oraz wzrost wartości Eh.

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Biorąc pod uwagę wyniki uzyskane z modelowania, analizę rozkładu poszczególnych specjacji wybranych pierwiastków, których jony determinują typ hydrochemiczny badanych wód, przeprowadzono dla wód z trzech ujęć geotermalnych oraz dla ich mieszaniny. Modelowanie mieszania wykonano z wykorzystaniem funkcji MIX oraz z uwzględnieniem rzeczywistej wielkości eksploatacji w danym dniu dla dwóch temperatur, tj. charakterystycznej dla wody wypływającej z ujęcia (MIX-1) oraz niższej – dla wody za wymiennikiem ciepła (MIX-2). Otrzymane stężenia poszczególnych specjacji porównano z wynikami rozkładu specjacji w rzeczywistej mieszaninie tych wód, pobranej za wymiennikiem ciepła (W). Stężenia głównych specjacji analizowanych pierwiastków przedstawiono na rycinie 3.

Na podstawie wyników modelowania specjacyjnego (ryc. 3) można stwierdzić, że niezależnie od wielkości eksploatacji wód termalnych dominują w nich te same formy (specjacje) badanych pierwiastków. Obniżenie temperatury wody termalnej w systemie wymienników ciepła przyczynia się jednak do obniżenia udziału molowego podrzędnych specjacji wapnia (CaCO<sub>3</sub>) oraz sodu (NaCO<sub>3</sub>). Spadek ten stanowi odpowiednio 65–76% i 71–82% w przypadku wyników rzeczywistych (W) oraz 59–70% i 59–70% w badaniach modelowych (MIX-2).

Procentowy udział głównych specjacji wybranych jonów przedstawiono w tabeli 2.

W przypadku wapnia dominują w wodzie proste jony (Ca<sup>2+</sup>) – ok. 69% w okresie wzmożonej eksploatacji ujęcia Bańska PGP-1 (powyżej 200 m<sup>3</sup>/h) do ok. 71,5% w okresie letnim. Podobny wzrost procentowego udziału jonowej formy Ca zaobserwowano w okresie letnim w pozostałych ujęciach geotermalnych. Siarczan wapnia (CaSO<sub>4</sub>), jako druga główna forma występowania wapnia w analizowanych wodach, wykazuje odwrotną zależność. Obniżenie wydajności w ujęciach w okresie letnim skutkuje obniżeniem udziału tej specjacji w bilansie. Jak wykazano, anion wodorowęglanu wapnia (CaHCO<sub>3</sub>) oraz węglan wapnia (CaCO<sub>3</sub>) stanowią podrzędne specjacje, a ich udział procentowy zależy od stanu termodynamicznego wody. Udział procentowy tych form nie wykazuje istotnych zależności (rosnących lub malejących) w bilansie dla wód gorących, które mogłyby być związane ze zmianą wydajności ujęcia. Zaobserwowany natomiast spadek udziału węglanu wapnia w wodach schłodzonych

w przedziale 59–76% (po wymienniku ciepła, W, MIX-2) w stosunku do mieszaniny wody gorącej (MIX-1) potencjalnie może mieć związek z wytrącaniem tej formy mineralnej z wody w postaci kalcytu czy aragonitu na skutek zmiany stanu termodynamicznego wody. Ta kwestia wymaga jednak wnikliwszej analizy i bardziej zaawanso-

wanych badań. Intensywność wytrącania węglanowych form mineralnych, takich jak kalcyt czy aragonit, przebiega intensywniej wraz ze wzrostem temperatury (Tomaszewska, 2008). Zatem sam spadek temperatury na wymiennikach ciepła nie powinien być przyczyną obniżenia udziału tej formy mineralnej w wodzie. Odnosząc się do całkowitej

**Tab. 1.** Zestawienie wybranych parametrów analizowanych wód  
**Table 1.** Summary of selected parameters of analyzed waters

Punkt poboru (ryc. 2) Sampling point (Fig. 2)	Data poboru Date of sampling	Parametr Parameter								
		T [°C]	pH [-]	PEW EC [mS/cm]	Eh ORP [mV]	Ca [mg/dm <sup>3</sup> ]	Na [mg/dm <sup>3</sup> ]	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [mg/dm <sup>3</sup> ]	Cl <sup>-</sup> [mg/dm <sup>3</sup> ]	Wydobycie Exploitation rate [m <sup>3</sup> /h]
PGP-1	luty 2015	86,3	6,68	3,36	-84	203,5	499,6	860,7	481,1	452
	maj 2015	86,0	6,90	3,35	-86	204,3	480,7	864,0	471,1	307
	sierpień 2015	84,0	6,82	3,28	-81	179,9	442,5	711,2	492,8	193
PGP-3	luty 2015	84,9	6,67	3,29	-91	204,3	503,6	880,3	473,5	161
	maj 2015	84,4	6,92	3,17	-85	226,8	555,9	979,6	477,3	167
	sierpień 2015	82,9	6,86	3,02	-82	185,3	452,5	744,1	487,7	98
IG-1	luty 2015	80,3	6,68	3,29	-87	207,0	502,6	870,1	495,2	77
	maj 2015	79,3	6,86	3,14	-86	210,6	498,3	884,2	466,4	50
	sierpień 2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W	luty 2015	51,5	6,68	3,40	-80	206,2	507,1	895,2	504,1	690
	maj 2015	51,0	6,73	3,34	-83	192,8	469,3	854,9	469,5	524
	sierpień 2015	55,4	6,64	3,18	-80	185,8	457,6	736,5	487,7	291

**Tab. 2.** Procentowe udziały wybranych specjacji Ca, Cl, Na i S(VI)

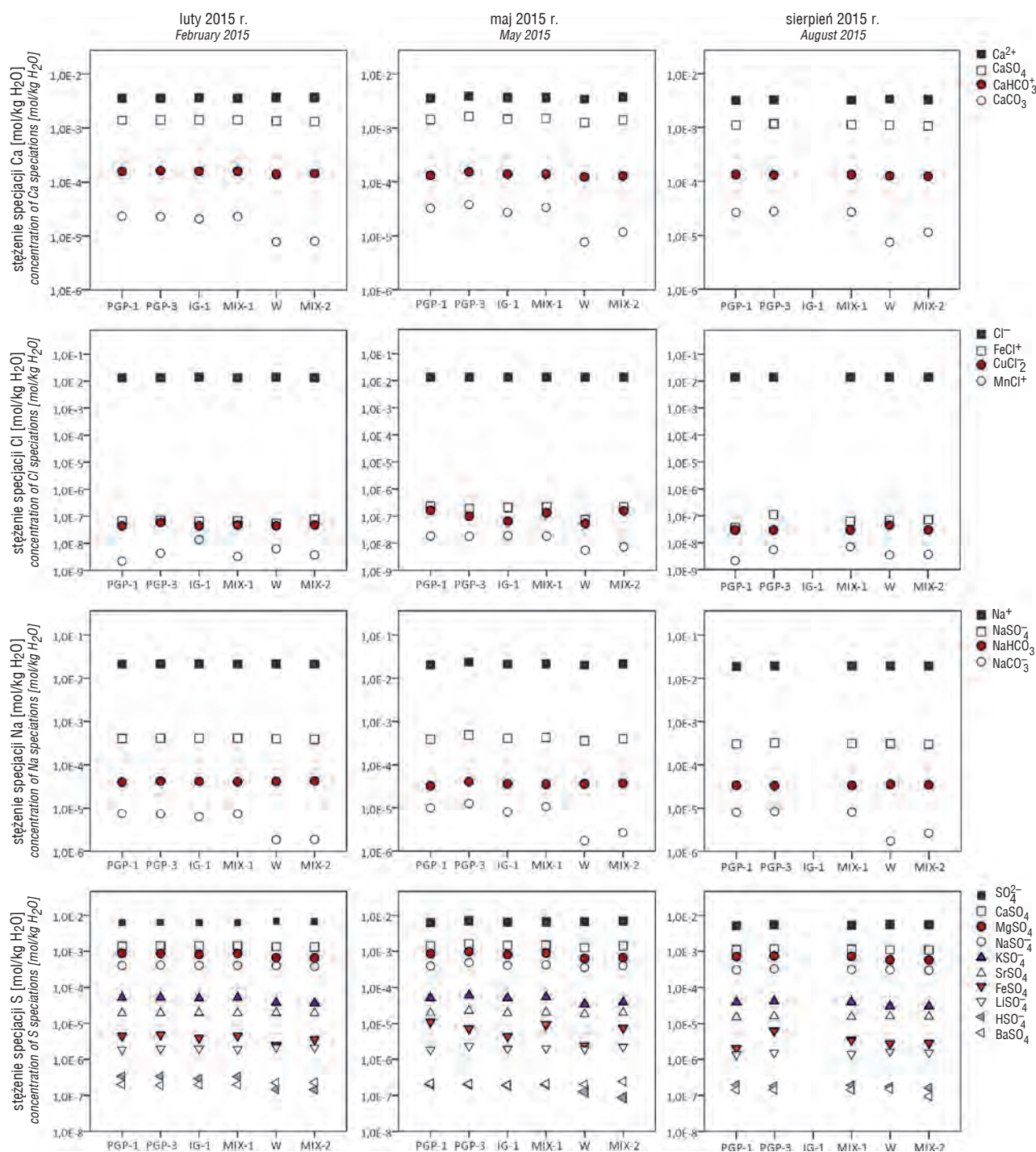
**Table 2.** Percentage ratios of selected speciations for Ca, Cl, Na i S(VI)

Punkt poboru (ryc. 2) Sampling point (Fig. 2)	Data poboru Date of sampling	Specjacje Ca Speciation of Ca			Specjacje Cl Speciation of Cl	Specjacje Na Speciation of Na		Specjacje S(VI) Speciation of S(VI)				
		[% mol/kg H <sub>2</sub> O]										
		Ca <sup>2+</sup>	CaSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	CaHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	NaSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CaSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	MgSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	NaSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	
PGP-1	luty 2015	69,2	27,2	3,1	100,0	97,9	1,8	69,4	15,4	9,8	4,5	
	maj 2015	69,1	27,7	2,6	100,0	97,9	1,9	69,5	15,7	9,5	4,4	
	sierpień 2015	71,5	24,9	3,0	100,0	98,2	1,6	70,3	15,1	9,7	4,1	
PGP-3	luty 2015	68,8	27,6	3,2	100,0	97,9	1,9	69,8	15,4	9,5	4,5	
	maj 2015	68,0	28,6	2,7	100,0	97,7	2,0	68,7	15,9	9,7	4,8	
	sierpień 2015	71,1	25,5	2,9	100,0	98,1	1,6	70,2	15,2	9,6	4,2	
IG-1	luty 2015	69,4	27,2	3,0	100,0	97,9	1,9	70,1	15,5	9,1	4,5	
	maj 2015	69,2	27,6	2,7	100,0	97,9	1,9	70,1	15,8	8,8	4,4	
	sierpień 2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
MIX-1	luty 2015	69,1	27,3	3,1	100,0	97,9	1,9	69,6	15,4	9,7	4,5	
	maj 2015	68,7	28,0	2,6	100,0	97,9	1,9	69,3	15,8	9,5	4,5	
	sierpień 2015	71,4	25,1	3,0	100,0	98,2	1,6	70,3	15,1	9,7	4,2	
W	luty 2015	71,0	26,1	2,7	100,0	98,0	1,8	73,5	14,4	7,2	4,3	
	maj 2015	71,2	26,1	2,6	100,0	98,0	1,8	74,1	14,1	7,1	4,0	
	sierpień 2015	73,1	24,0	2,7	100,0	98,3	1,5	73,3	14,5	7,6	4,0	
MIX-2	luty 2015	71,4	25,7	2,8	100,0	98,1	1,7	73,3	14,5	7,3	4,2	
	maj 2015	71,0	26,3	2,4	100,0	98,0	1,8	73,1	14,8	7,2	4,2	
	sierpień 2015	73,2	23,8	2,7	100,0	98,3	1,5	73,5	14,3	7,6	3,9	

formy wapnia, oznaczonej analitycznie w badanych wodach przed wymiennikami ciepła i modelowanej na podstawie proporcji udziału wody zmieszanej (MIX-1) oraz za wymiennikiem ciepła (W, MIX-2), nie odnotowano spadku jego zawartości w wodzie, a wręcz przeciwnie, wzrost stężenia w lutym (MIX-1: 204,07 mg Ca/dm<sup>3</sup>; W: 206,2 mg Ca/dm<sup>3</sup>) oraz w sierpniu 2015 r. (MIX-1: 181,70 mg Ca/dm<sup>3</sup>; W: 185,80 mg Ca/dm<sup>3</sup>).

Wyniki modelowania hydrogeochemicznego wykazały, że chlor występuje w badanych wodach niemal w całości w postaci jonów Cl<sup>-</sup>, a sód jest obecny głównie (ponad

97% mol/kg H<sub>2</sub>O) jako jon Na<sup>+</sup>. Około 2% wszystkich specjacji sodu stanowi forma NaSO<sub>4</sub><sup>-</sup>. Podrzędny anion węglanu sodu, w przypadku którego zaobserwowano podobną zależność jak dla węglanu wapnia, stanowi tylko 0,03–0,05%. Po schłodzeniu wody odnotowano spadek tej formy w bilansie specjacji Na do wartości 0,001–0,009%. Spośród wielu obliczonych specjacji związków siarki (VI) najwięcej stwierdzono jonów SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> oraz związków: siarczanu wapnia (CaSO<sub>4</sub><sup>0</sup>) i siarczanu magnezu (MgSO<sub>4</sub><sup>0</sup>), a także jonu NaSO<sub>4</sub><sup>-</sup>. Pozostałe formy stanowią już niewielki udział w sumie wszystkich specjacji tego pierwiastka.



Ryc. 3. Wykresy stężeń najważniejszych specjacji pierwiastków decydujących o typie hydrochemicznym wód [Ca, Cl, Na i S(VI)] dla trzech okresów poboru próbek

Fig. 3. Graph of the most important speciations of ions determining the hydrochemical type of water [Ca, Cl, Na, S(VI)] for three periods of sample collection

Rozpatrywane zależności jonowe oraz relacje między specjacjami składników głównych wody i mikroelementami w niej występującymi stanowią podstawę do złożonych rozważań, które mogą się przyczynić do wyjaśnienia specyfiki relacji woda–skała zbiornikowa, a przez to do ustalenia stref dopływu wody do otworu wiertniczego. Należy zwrócić uwagę, że strefa czynna w rozpatrywanych otworach geotermalnych osiąga niemal 700 m. Nie oznacza to, że w całym interwale głębokości następuje dopływ wody ze skał zbiornikowych do ujęcia. W szczelinowych strukturach geologicznych istnieje wiele uprzywilejowanych obszarów, którymi woda geotermalna przemieszcza się od strefy zasilania do miejsca drenażu. Równocześnie same skały zbiornikowe również wykazują zmienną specyfikę mineralogiczno-petrograficzną. Wyniki korelacji tych dwóch informacji geologicznych (właściwości wody/skład mineralny skał) stanowią element dalszych prac badawczych autorek niniejszej pracy i zostaną przedstawione w kolejnych publikacjach.

### WNIOSKI

Wykonane modelowanie rozkładu stężeń specjacji jonów (wapnia, sodu, siarczanowych i chlorkowych) decydujących o typie hydrochemicznym analizowanych wód wykazało, że niezależnie od ilości pobieranej wody we wszystkich badanych roztworach dominują te same formy badanych pierwiastków. W niewielkim stopniu zmieniają się natomiast proporcje między zawartościami wybranych specjacji. Wraz z obniżeniem eksploatacji rośnie udział formy  $\text{Ca}^{2+}$  kosztem  $\text{CaSO}_4^0$ . W sezonie zimowym (przy zwiększonej eksploatacji) wzrasta udział jonów siarczanowych, a obniża się zawartość siarczanu wapnia.

Widoczne są również różnice w zawartościach wybranych specjacji pomiędzy wodami z ujęcia oraz mieszaniną tych wód w temperaturze odpowiadającej warunkom w złożu (przed wymiennikiem ciepła – MIX-1) a wodą pobraną za wymiennikiem ciepła (W) oraz modelowaną mieszaniną MIX-2. W wodzie schłodzonej nieznacznie obniża się stężenie węglanu wapnia ( $\text{CaCO}_3^0$ ) oraz anionu węglanu sodu ( $\text{NaCO}_3^-$ ). Wyniki przeprowadzonych badań stanowią podstawę do dalszych rozważań ukierunkowanych na rozpoznanie dróg przepływu wód w szczelinowych skałach zbiornikowych.

Autorki składają podziękowania Recenzentom i Redaktorowi Naczelnemu Przeglądu Geologicznego za cenne uwagi i korekty, które przyczyniły się do udoskonalenia niniejszej publikacji.

Autorki serdecznie dziękują również firmie PEC Geotermia Podhalańska S.A. za umożliwienie przeprowadzenia badań. Praca częściowo finansowana w ramach umów AGH nr 11.11.140.797 i 11.11.140.321.

### LITERATURA

- APPELO C.A.J., POSTMA D. 2005 – Geochemistry, groundwater and pollution, 2nd edition. A. A. Balkema Publishers, Leiden, The Netherlands a member of Taylor & Francis Group, s. 649.
- ÁRMANNSSON H., ÓLAFSSON M. 2010 – Geothermal sampling and analysis. Short Course V on Exploration for Geothermal Resources. UNU-GTP,GDC and KenGen.
- BARAŁKIEWICZ D., BULSKA E. (red.) 2009 – Specjacja chemiczna. Problemy i możliwości. Wyd. MALAMUT, Warszawa, s. 332.
- DOBRZYŃSKI D. 2006 – Modelowanie geochemiczne wód podziemnych. [W:] A. Macioszczyk (red.), Podstawy hydrogeologii stosowanej. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa: 280–304.
- KANIA J. 2003 – Geochemical interpretation of thermal fluids from low-temperature wells in Stykkishólmur, W-Iceland and Pyrzyce, NW-Poland. Geothermal Training Programme, 13: 305–336.
- KĘPIŃSKA B., CIAĞŁO J. 2008 – Możliwość zagospodarowania wód geotermalnych Podhala do celów balneoterapeutycznych i rekreacyjnych. Geologia, 34 (3): 541–559.
- KLESZCZ A., TOMASZEWSKA B. 2013 – Prognozowanie scalingu na przykładzie wód ujmowanych otworem Bańska PGP-1 – Prediction of scaling phenomenon based on Bańska PGP-1 geothermal well. Tech. Poszuk. Geol., Geotermia, Zrównoważony Rozwój, 52 (1): 115–122.
- KORZEC K., KMIECIK E., MIKA A., TOMASZEWSKA B., BODZEK M. 2016 – Selected problems with the boron determination in water treatment processes. Pt.1, Comparison of the reference methods for ICP-MS and ICP-OES determinations. Environ. Sci. Pollut. Res., 23 (12): 11658–11667.
- KORZEC K., KMIECIK E., MIKA A., TOMASZEWSKA B., WĄTOR K. 2016a – Metodyka opróbowania ujęć wód termalnych – aspekty techniczne. Tech. Poszuk. Geol., Geotermia, Zrównoważony Rozwój, 55 (1): 75–87.
- KORZEC K., SZATKO M., KMIECIK E., MIKA A., TOMASZEWSKA B., WĄTOR K. 2016b – Badania wód termalnych – propozycja technicznych rozwiązań w zakresie poboru próbek. [W:] M.I. Szykowska, S. Garboś (red. nauk.), XXI Konferencja „Nowoczesne metody instrumentalne w analizie śladowej”. 8–9 grudnia 2016 r. Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego – Państwowy Zakład Higieny, Warszawa.
- MACIOSZCZYK A., DOBRZYŃSKI D. 2002 – Hydrogeochemia – strefy aktywnej wymiany wód. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, s. 448.
- MIKA A., KORZEC K. 2015 – Ocena stabilności stężeń kwasu metakrzemowego w wodach termalnych ujmowanych otworem Bańska PGP-1 w Bańskiej Niżnej. Tech. Poszuk. Geol., Geotermia, Zrównoważony Rozwój, 54 (2): 89–96.
- TOMASZEWSKA B. 2008 – Prognozowanie kolmatacji instalacji geotermalnych metodą modelowania geochemicznego. Gosp. Sur. Miner., 24 (2/3): 399–408.
- WITCZAK S., KANIA J., KMIECIK E. 2013 – Katalog wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
- ZHU C., ANDERSON G. 2002 – Environmental Applications of Geochemical Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, UK, s. 298.
- ZHU C., 2009 – Geochemical Modeling of Reaction Paths and Geochemical Reaction Networks. Rev. Mineral. Geochem., 70 (1): 533–569.