



## WYKORZYSTANIE CHEMIZMU WÓD GŁĘBOKICH POZIOMÓW WODONOŚNYCH W REJONIE BEŁCHATOWA JAKO WSKAŹNIKA ICH PRZYDATNOŚCI DO LOKOWANIA DWUTLENKU WĘGLA

### USAGE OF CHEMISTRY OF DEEP AQUIFERS AS AN INDICATOR FOR THEIR SUITABILITY FOR STORAGE OF CARBON DIOXIDE IN BEŁCHATÓW REGION (CENTRAL POLAND)

LIDIA RAZOWSKA-JAWOREK<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Jedną z podstawowych cech głębokich poziomów wodonośnych decydujących o ich przydatności do lokowania dwutlenku węgla jest ich szczelność, która uniemożliwia migrację wód w kierunku górnych partii zbiornika. Jedną z metod oceny izolacji głębokich poziomów wodonośnych jest analiza stopnia przeobrażenia składu chemicznego wód. Opisana w tym artykule metoda była używana w pierwszym etapie projektu dotyczącego rozpoznania formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania w rejonie Bełchatowa.

Możliwości lokowania CO<sub>2</sub> w głębokich poziomach wodonośnych w rejonie Bełchatowa były badane za pomocą analizy hydrochemicznej dojrzałości wód i stopnia szczelności zbiornika, których miarą są wskaźniki hydrochemiczne: Na/Cl, Cl/Br i mineralizacja wód. Wydzielono sześć typów genetycznych wód w zależności od stopnia przeobrażenia chemizmu, będącego wskaźnikiem szczelności danego zbiornika, od najmłodszych wód w kontakcie z wodami infiltracyjnymi (typ 1 i 2) do najstarszych, stagnujących, wysoko mineralizowanych solanek (typ 5 i 6).

Analizie poddano wodę z poziomów wodonośnych triasu dolnego i górnego, jury dolnej, środkowej i górnej oraz kredy. W przedziale głębokości 518–4530 m mineralizacja wód wynosi od 0,5 do 370 g/l. Jakość tych wód wyklucza ich przydatność do celów pitnych. Stopień przeobrażenia chemizmu wód zależy od głębokości, obecności nieprzepuszczalnego nadkładu, odległości od wychodni oraz obecności drożnych systemów szczelin i uskoków. W poziomach jurajskich występują wody o zróżnicowanych typach, od wykluczających lokowanie dwutlenku węgla typów 1 i 2 do bardziej odpowiednich do lokowania typów 3 i 4. Wody w zbiornikach triasowych są przeważnie typu 5 lub 6, czyli wskazujące na najbardziej odpowiednie warunki do lokowania CO<sub>2</sub>.

Stosowanie opisanej w artykule analizy stopnia przeobrażenia chemizmu wód głębokich poziomów wodonośnych do szacunkowej oceny przydatności zbiorników do lokowania dwutlenku węgla może być szczególnie przydatne we wstępnym etapie poszukiwań potencjalnych kolektorów. Metoda ta jest nie tylko prosta i szybka, ale przede wszystkim pozwala zaoszczędzić czas i ograniczyć nakłady finansowe na szczegółowe analizy zbiorników, które mogą być tą metodą wykluczone z kolejnych etapów badań.

**Słowa kluczowe:** dwutlenek węgla, skład chemiczny, potencjał składowania, głębokie poziomy wodonośne.

**Abstract.** Deep, saline aquifers used for the storage of CO<sub>2</sub> must be covered by impermeable formations in order to prevent the migration of water into shallow zones. One of the methods of the assessment of the isolation degree of deep aquifers is the study of the chemical composition of waters. This method has been used at the first stage of the research program presented in this paper in the Bełchatów region (central Poland).

Within this region several deep saline aquifers have been evaluated with respect to their storage potential represented by the geochemical maturity and isolation of saline waters measured by Na/Cl, Cl/Br ratios and TDS. Six types of groundwaters according to the degree of maturity and isolation have been identified, from the youngest waters with contact to meteoric waters (type 1 and 2) to the oldest, stagnant, highly mineralized brines (type 5 and 6).

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Górnośląski, ul. Królowej Jadwigi 1, 41-200 Sosnowiec;  
e-mail: lidia.razowska-jaworek@pgi.gov.pl

Saline aquifers of the Lower Triassic, Upper Triassic, Lower, Middle and Upper Jurassic, Cretaceous were examined. Between 518 and 4,530 m depth, these aquifers contain waters of 0.5–370 g/l of total dissolved solids (TDS). These waters are not an underground source of drinking water. The geochemical maturity of waters depends on the depth, the presence of the impermeable cover, the distance from the outcrops and also the presence of faults and fractures. Waters in the Jurassic reservoirs are of different types, from 1 and 2 which are not suitable for CO<sub>2</sub> location to 3 and 4 (more suitable for CO<sub>2</sub> location). The Triassic reservoirs are mostly of type 5 and 6 which are very suitable for CO<sub>2</sub> location.

This approach may be applied particularly in the preliminary studies not only due to its simplicity and low time consuming but also due to the savings of cost and time for the further studies of the reservoirs which may be excluded for storage of carbon dioxide using this method.

**Key words:** Carbon dioxide, chemical composition, storage potential, saline aquifer.

## WSTĘP

Głównym celem badań opisanych w artykule była analiza chemizmu wód z głębokich poziomów wodonośnych, wytypowanie obszarów o największym rozprzestrzenieniu kolektora spełniającego kryteria do lokowania dwutlenku węgla. Charakterystykę hydrogeochemiczną kolektorów przeprowadzono dla poziomów zbiornikowych występujących w profilu stratygraficznym regionu Bełchatowa spełniających podstawowe kryteria dla lokowania CO<sub>2</sub>, czyli: głębokość ponad 700 m, miąższość ponad 20 m i obecność izolującego nadkładu (Wójcicki, 2009). Powyższe wa-

runki spełniają utwory jury górnej, środkowej i dolnej oraz triasu górnego i dolnego.

Ocenę wykonano głównie na podstawie wyników uzyskanych z opróbowania poziomów zbiornikowych w głębokich otworach badawczych, poszukiwawczych i hydrogeologicznych Państwowego Instytutu Geologicznego oraz w głębokich otworach wiertniczych Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa, do której wytypowano 79 otworów ujmujących kompleksy skał o najlepszych właściwościach zbiornikowych.

## METODYKA BADAŃ

W celu przeprowadzenia charakterystyki hydrogeochemicznej dokonano analizy składu chemicznego i mineralizacji wód. Analizie poddano przede wszystkim jony Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> i HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (tab. 1). Następnie wykonano uproszczone modelowanie wyników analiz chemicznych wód za pomocą programu Wateval (Hounslow, 1995)

oraz obliczono wybrane wskaźniki hydrochemiczne (Na/Cl, Na+K/Cl, Cl/Br i SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>\*100/Cl). Po zestawieniu tych danych dokonano ich interpretacji, czyli oceny stopnia przeobrażenia wód, będącego wskaźnikiem szczelności kolektora (tab. 2).

**Tabela 1**

### Charakterystyka typów genetycznych wód i warunków do lokowania CO<sub>2</sub>

Description of types of waters and suitability for the location of CO<sub>2</sub>

Typ genetyczny	Stopień przeobrażenia i izolacji wód	Warunki do lokowania CO <sub>2</sub>
1	wskaźnik Na/Cl >1 i/lub niska mineralizacja (M <3 g/l); strefa aktywnej wymiany; dobre zasilanie wodami infiltracyjnymi, wody współczesne	nie można lokować (brak szczelności)
2	wskaźnik Na/Cl >1; strefa aktywnej wymiany; dobre zasilanie wodami infiltracyjnymi, ale wysoka mineralizacja i typ Cl-Na świadczą o ługowaniu pokładów soli	interpretacja niepewna
3	wskaźnik Na/Cl 0,85–0,99, wysoka mineralizacja; kontakt z wodami infiltracyjnymi istnieje, ale jest utrudniony, przepływ powolny, słaba wymiana; kolektor rozszielony	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
4	wskaźnik Na/Cl 0,66–0,84, wysoka mineralizacja; dobra, długo trwająca izolacja, wody reliktowe, przepływ może zachodzić, ale tylko znikomy, dobra szczelność kolektora, ale nie zupełna	korzystne warunki do lokowania
5	wskaźnik Na/Cl <0,65 i Cl/Br 400–1000, bardzo wysoka mineralizacja; wody reliktowe, bardzo dobra szczelność kolektora, ale istnieją przesłanki świadczące o zmieszaniu wód z wodami młodszymi (w czasie geologicznym)	bardzo korzystne warunki do lokowania
6	wskaźnik Na/Cl <0,65 i Cl/Br <400, bardzo wysoka mineralizacja; całkowita izolacja, wody reliktowe, stagnujące, bardzo szczelny kolektor	najlepsze warunki do lokowania

Tabela 2

## Skład fizykochemiczny wód głębokich poziomów wodonośnych w rejonie Bełchatowa

Physico-chemical composition of deep aquifers in Bełchatów region

	Ciężar właściwy [g/cm <sup>3</sup> ]	Mineralizacja [g/l]	Cl [g/l]	Na [g/l]	Ca [g/l]	Br [mg/l]	Wskaźnik Na/Cl	Typ genetyczny
Jura środkowa (n = 20)								
Średnia	1,001	17,2	10,35	7,46	1,55	100,5	0,87–1,27	1–2
Maksimum	1,082	111,4	69,86	33,43	17,42	161,9		
Minimum	1,013	1,2	0,124	0,036	0,027	6,6		
Jura dolna (n = 18)								
Średnia	1,017	23,2	14,071	7,46	1,55	151,8	0,84–1,014	3–4
Maksimum	1,093	127,0	75,58	33,43	17,42	747,6		
Minimum	1,001	0,5	0,07	0,036	0,027	0,06		
Trias górny (n = 24)								
Średnia	1,034	52,9	33,19	16,84	4,35	471,2	0,59–1,006	3–6
Maksimum	1,149	167,2	95,85	54,95	20,2	1280,0		
Minimum	1,003	6,0	3,19	2,07	0,12	22,0		
Trias dolny (n = 11)								
Średnia	1,162	235,5	142,9	55,37	26,08	714,6	0,58–0,90	5–6
Maksimum	1,254	370,7	223,7	82,11	69,7	1963,4		
Minimum	1,073	104,9	60,8	27,49	6,81	156,6		

## OCENA WARUNKÓW HYDROGEOCHEMICZNYCH W CELU ZATŁACZANIA CO<sub>2</sub>

Na podstawie stopnia przeobrażenia składu chemicznego wód, wartości mineralizacji ogólnej i wskaźników hydrochemicznych określono tzw. genetyczne typy wód, reprezentujące różne warunki do lokowania CO<sub>2</sub>. Podstawą klasyfikacji jest uwzględnienie stopnia zaawansowania procesu wymiany jonowej solanek typu chlorkowo-wapniowego wyrażonego stosunkiem molarnym Na/Cl i Na+K/Cl, wagowym Cl/Br i molarnym SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>\*100/Cl (Razowska, 1999). W warunkach odizolowania poziomów zbiornikowych od strefy wymiany wód następuje spadek wartości stosunku Na/Cl <0,75; Cl/Br <300 i SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>\*100/Cl <1 (Paczyński, Pałys, 1970).

Duży wzrost stężenia jonu Ca<sup>2+</sup> przy jednoczesnym spadku zawartości jonu Na<sup>+</sup> świadczy o istnieniu ukierunkowanego procesu przemian chemicznych i odizolowaniu poziomów, co wiąże się z istnieniem korzystnych warunków do składowania CO<sub>2</sub>.

Wydzielono sześć typów genetycznych wód ze względu na stopień metamorfizmu wód i izolacji. Typy 1 i 2 to wody strefy aktywnej wymiany o niekorzystnych warunkach do lokowania CO<sub>2</sub>; typy 3 i 4 to wody zmetamorfizowane, które jednak w przeszłości miały kontakt z wodami infiltracyjnymi,

co stwarza średnio lub mało korzystne warunki do lokowania CO<sub>2</sub>; typy 5 i 6 to wody reliktywne, z bardzo szczelnych kolektorów o bardzo korzystnych warunkach do lokowania CO<sub>2</sub>. Dla każdego kolektora, dla którego była dostępna analiza chemiczna wody, przyporządkowano jeden z sześciu typów genetycznych (tab. 2).

Postępujący stopień przemian chemicznych, wyrażony niskim stosunkiem Na/Cl, świadczy o reliktywnym charakterze wód i odizolowaniu ich od strefy wymiany wód. Występowanie solanek silnie stężonych (powyżej 200 g/l), o zawartości NaCl powyżej 90% lub zawartości jonu Mg<sup>2+</sup> powyżej 30% mvali, świadczy natomiast o zachodzących wtórnych procesach ługowania soli kamiennych lub potasowo-magnezowych (Dowgiałło, 1971). Występowanie wód typu HCO<sub>3</sub>-Na świadczy o istnieniu wymiany wód w górnej części basenu i niewystarczającej izolacji kolektora.

Poniżej przedstawiono ogólną charakterystykę poszczególnych poziomów wodonośnych w rejonie Bełchatowa. Szczegółowa tabela z typami genetycznymi wszystkich opróbowanych interwałów z tego rejonu znajduje się na stronie internetowej PIG-PIB.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Adres internetowy: <http://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/bin/view/co2/wynikibelchatow> – tabela 1.1.6.6

W basenie niecki łódzkiej poziom **kredy dolnej** od wielu lat jest bardzo intensywnie eksploatowany, co doprowadziło do znacznego obniżenia zwierciadła wody i zaburzenia reżimu hydrodynamicznego. Wody słodkie, o mineralizacji 0,4 g/l, sięgają tam do głębokości około 1700 m, a najgłębsze studnie ujmują wodę z głębokości około 900 m, co wyklucza ten poziom do lokowania CO<sub>2</sub>.

W utworach **jury górnej**, w rejonie Sarnów–Nadaje, występujących zaledwie 250 m głębiej od poziomu kredy dolnej, mineralizacja wód jest większa o 80–115 g/l, a różnica ciśnień wynosi 45 MPa. W przypadku odnowienia się szczelin na skłonach istniejących tam wgłębnym struktur solnych może nastąpić przepływ pionowy wód z poziomów górnourajskich ku powierzchni (Bojarski, 1993), co wyklucza możliwość składowania CO<sub>2</sub>.

W utworach **jury** występują wszystkie typy genetyczne wód, ale przeważają typy od 1 do 4. Na południowym zachodzie, czyli najbliżej wychodni utworów jury środkowej i dolnej wyznaczono typy 1 i 2, czyli wody infiltracyjne, świadczące o nieszczelnych kolektorach, natomiast ku północnemu zachodowi dominuje typ 4, czyli wody zmetamorfizowane, świadczące o dosyć szczelnych kolektorach. Mapę z zaznaczonymi klasami genetycznymi dla piętra jurajskiego przedstawia figura nr 1.1.6\_5 na stronie internetowej PIG–PIB.<sup>2</sup>

Mineralizacja wód poziomów **jury środkowej** jest bardzo zróżnicowana, solanki poziomów jury środkowej charakteryzują się nieznacznym stopniem przemian chemicznych przy Na/Cl = 0,87–1,27, co świadczy o kontakcie z wodami infiltracyjnymi.

Bardzo dobre właściwości zbiornikowe piaskowców **jury dolnej** powodują na skłonach obszarów alimentacyjnych głęboki zasięg wód infiltracyjnych. W głębszych stre-

fach solanki poziomów jury dolnej charakteryzują się słabym i średnim stopniem przemian chemicznych przy Na/Cl = 0,84–1,01, co oznacza ograniczony kontakt z wodami infiltracyjnymi. W składzie solanek dominują Na i Cl. Utwory jury dolnej charakteryzują się bardzo niskimi wartościami ciśnienia o gradientach  $G = 0,95\text{--}1,06$  MPa/10 m, co nie stwarza zagrożenia dla ascensyjnego przemieszczania się solanek (Bojarski, 1993). Nieznaczny przepływ typu lateralnego może następować w czasie geologicznym od centralnych części niecki ku jej brzegom. Wynika to ze zbyt małych różnic gradientów ciśnień i dość dużej odległości solanek o mineralizacji 100 g/l od granicy wód zwykłych.

W utworach **triasowych** dominują typy genetyczne 5 i 6, czyli wody reliktove, świadczące o kolektorach o bardzo dobrej szczelności. Jedynie w rejonie samego Bełchatowa i Gornic są to typy 3 i 2, czyli wody, które miały kontakt z wodami infiltracyjnymi, bądź będące pod wpływem wysadów solnych. Mapę z zaznaczonymi klasami genetycznymi dla piętra triasowego przedstawia figura nr 1.1.6\_4 na stronie internetowej PIG–PIB.<sup>2</sup>

Wody **triasu górnego** to głównie solanki reliktove o wysokim stopniu przeobrażeń chemicznych, przy Na/Cl = 0,59–1,00 oraz lokalnie solanki genetycznie związane z wtórnym ługowaniem soli kamiennych.

W utworach **triasu dolnego** solanki nasycone o bardzo wysokiej mineralizacji od 300 do 370 g/l, otoczone aureolą solanek o mineralizacji 200–300 g/l, występują na prawie całym badanym obszarze. Znajdują się tam również solanki reliktove o wysokim stopniu przeobrażeń chemicznych, przy Na/Cl = 0,59–0,90, oraz lokalnie solanki genetycznie związane z wtórnym ługowaniem soli kamiennych. Bardzo wysoką mineralizację solanek (350–370 g/l), stwierdzono w zachodniej części niecki łódzkiej (Bojarski, 1996).

## WNIOSKI

Stosowanie opisanej w tym artykule analizy stopnia przeobrażenia chemizmu wód głębokich poziomów wodonośnych do szacunkowej oceny przydatności zbiorników do lokowania dwutlenku węgla może być szczególnie przydatne we wstępnym etapie poszukiwań kolektorów do lokowania CO<sub>2</sub>. Przemawia za tym nie tylko prostota i szybkość tej metody. Przede wszystkim pozwala ona na oszczędność czasu i nakładów finansowych, które należałoby przeznaczyć na

dalsze szczegółowe analizy zbiorników, które mogą być tą metodą wykluczone z kolejnych etapów badań.

*Opisane w artykule prace wykonano w ramach tematu „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania wraz z ich programem monitorowania”, zamówionego przez Ministerstwo Środowiska i finansowanego ze środków NFOŚiGW.*

## LITERATURA

- BOJARSKI L., 1993 — Ascenzyjne zagrożenie poziomów wód zwykłych solankami paleozoiku i mezozoiku. *Prz. Geol.*, **3**: 171–173.
- BOJARSKI L., 1996 — Atlas hydrochemiczny i hydrodynamiki paleozoiku i mezozoiku oraz ascenzyjnego zasolenia wód podziemnych na Niżu Polskim. Wyd. Geol., Warszawa.
- DOWGIAŁŁO J., 1971 — Studium genezy wód zmineralizowanych w utworach mezozoicznych Polski północnej. *Biul. Geol. Wydz. Geol. UW*, **13**.
- HOUNSLOW A.W., 1995 — Water quality data – analysis and interpretation. Lewis Publishers.
- PACZYŃSKI B., PAŁYS J., 1970 — Geneza i paleohydrogeologiczne warunki występowania wód zmineralizowanych na Niżu Polskim. *Kwart. Geol.*, **14**, 1: 131–147.
- RAZOWSKA L., 1999 — Wskaźniki hydrochemiczne – mało przydatne czy niedoceniane? Współczesne problemy hydrogeologii, **9**: 307–313. Kielce, Warszawa.
- WÓJCICKI A. (red.), 2009 — „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania” sprawozdanie z segmentu 1. Raport merytoryczny nr 1. Segment I. Rejon Bełchatów. <http://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/bin/view/CO2/WynikiPrac>.