

SKŁAD CHEMICZNY WÓD PODZIEMNYCH WĘGLANOWEGO KOMPLEKSU WODONOŚNEGO TRIASU W REJONIE UJĘCIA BIBIELA W ŚWIETLE BADAŃ MODELOWYCH

GROUNDWATER CHEMISTRY OF THE TRIASSIC CARBONATE AQUIFER IN THE BIBIELA WELL FIELD AREA IN VIEW OF GEOCHEMICAL MODELLING

SABINA JAKÓBCZYK¹, ANDRZEJ KOWALCZYK¹

Abstrakt. Ujęcie wód podziemnych Bibiela funkcjonuje od ponad 50 lat i jest jednym z największych ujęć w rejonie Górnego Śląska. Intensywna eksploatacja wód spowodowała głębokie obniżenie zwierciadła wody węglanowego kompleksu triasowego na obszarze około 350 km². Skomplikowana budowa geologiczna w rejonie ujęcia oraz zmienne warunki hydrodynamiczne wpływają znacząco na przestrzenne i czasowe zróżnicowanie składu chemicznego wód. Celem pracy była ocena stanu rozpoznania składu chemicznego wód węglanowego kompleksu wodonośnego triasu w związku z długotrwałym obniżeniem zwierciadła wody. W tym celu przeanalizowano wyniki ponad 5000 archiwalnych analiz chemicznych wód z 22 studni ujęcia Bibiela z lat 1956–2009. Przy użyciu programu AquaChem zintegrowanego z programem Phreeqc obliczono wskaźniki nasycenia badanych wód względem kalcytu, dolomitu i gipsu.

Słowa kluczowe: kompleks wodonośny triasu, skład chemiczny wód podziemnych, modelowanie geochemiczne, ujęcie Bibiela.

Abstract. The Bibiela well field is one of the biggest intakes in the Upper Silesian region, extracting groundwater from the Triassic carbonate aquifer. The paper describes groundwater chemistry based on over 5000 chemical analyses of water from 22 wells from the years of 1956–2009. Saturation conditions of water with respect to calcite, dolomite and gypsum were calculated by means of AquaChem software combined with Phreeqc. Chemical composition of considered groundwater shows spatial and temporal variability mostly due to complicated geology. Intensive groundwater exploitation caused water table lowering of about 70 m, what changed hydrogeochemical conditions and caused some processes to happen or intensify. The most probable process is calcite and dolomite dissolution but also dedolomitization due to inflow of water enriched with SO₄ and Ca ions from the dissolution of gypsum.

Key words: Triassic carbonate aquifer, groundwater chemistry, geochemical modelling, the Bibiela well field.

WSTĘP

Bibiela to jedno z największych ujęć wód podziemnych w rejonie Górnego Śląska. Składa się obecnie z 13 studni, eksploatujących wody z węglanowego kompleksu wodonośnego triasu. Aktualny skład chemiczny wód pobieranych studniami jest zróżnicowany w poszczególnych studniach, a ponadto różni się od tego, jaki obserwowano w tych studniach w latach ubiegłych. Główne zmiany w czasie wyrażają

się wzrostem zawartości siarczanów, żelaza oraz twardości i zasadowości.

Celem pracy było rozpoznanie składu chemicznego wód węglanowego kompleksu wodonośnego triasu w związku z długotrwałym obniżeniem zwierciadła wody, następnie częściowym jego podniesieniem, a także identyfikacja czynników odpowiedzialnych za zróżnicowanie składu che-

¹ Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec; e-mail: sabina.jakobczyk@us.edu.pl; andrzej.kowalczyk@us.edu.pl

micznego tych wód. Analiza wieloletnich trendów zmian stężeń składników wody w połączeniu z modelowaniem geochemicznym pomaga ocenić relacje wody ze środowi-

skiem skalnym i dzięki temu zidentyfikować czynniki odpowiedzialne za kształtowanie się składu chemicznego wód w rejonie ujęcia.

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE I CHARAKTERYSTYKA UJĘCIA BIBIELA

Ujęcie wód podziemnych Bibiela zlokalizowane jest ok. 10–12 km na północ od Tarnowskich Gór. W rejonie ujęcia na podłożu utworów paleozoicznych leżą terygeniczne osady triasu dolnego, przykryte węglanowymi skałami górnych ogniw triasu dolnego (retu) i środkowego (wapień muszlowy). Na większości obszaru utwory wapienia muszlowego są przykryte ilami i iłowcami triasu górnego, a w południowej części rejonu węglanowe utwory triasu występują na powierzchni lub pod przykryciem niewielkiej miąższości piaszczystych osadów czwartorzęd.

W profilu hydrogeologicznym wyróżnia się dwa piętra wodonośne: czwartorzęd, związane z osadami piaszczysto-gliniastymi, oraz triasu, związane z utworami węglanowymi wapienia muszlowego i retu. Tworzą one łącznie węglanowy kompleks wodonośny o potrójnej, krasowo-szczelinowo-porowej porowatości, silnie spękany i pocięty licznymi uskokami (Rózkowski i in., red., 1997). Na przeważającej części obszaru jest on izolowany warstwą słabo przepuszczalnych utworów triasu górnego, a zwierciadło wody jest napięte.

W obszarze wychodni kompleksu wodonośnego oraz tam, gdzie zwierciadło zostało obniżone na skutek eksploatacji ujęcia, jest ono swobodne. W wyniku eksploatacji wód podziemnych wokół ujęcia Bibiela wytworzył się głęboki lej depresji, osiagający z końcem lat 90. XX w. 45–50 m, a obszar spływu wody do ujęcia zajmował około 360 km² (Kowalczyk, 2003).

Ujęcie Bibiela składa się z 22 studni (fig. 1), odwierconych w latach 1954–1982 (Kowalczyk i in., 1999). Obecnie czynnych jest 13 z nich. Studnie E-1 – E-11, z wyjątkiem E-9, ujmują tylko utwory wapienia muszlowego, natomiast studnie E-1'' – E-11'' oraz E-9 ujmują łącznie poziomy wapienia muszlowego oraz retu. W okresie największego zapotrzebowania na wodę pitną (połowa lat 80. XX w.) ujęcie pracowało z wydajnością do 100 tys. m³/d, co spowodowało obniżenie zwierciadła w studniach o 40–70 m. Od początku lat 90. zapotrzebowanie systematycznie spadało, aż do wartości obecnej ok. 40 tys. m³/d. Aktualnie depresja zwierciadła wody w rejonie ujęcia wynosi ok. 10–20 m.

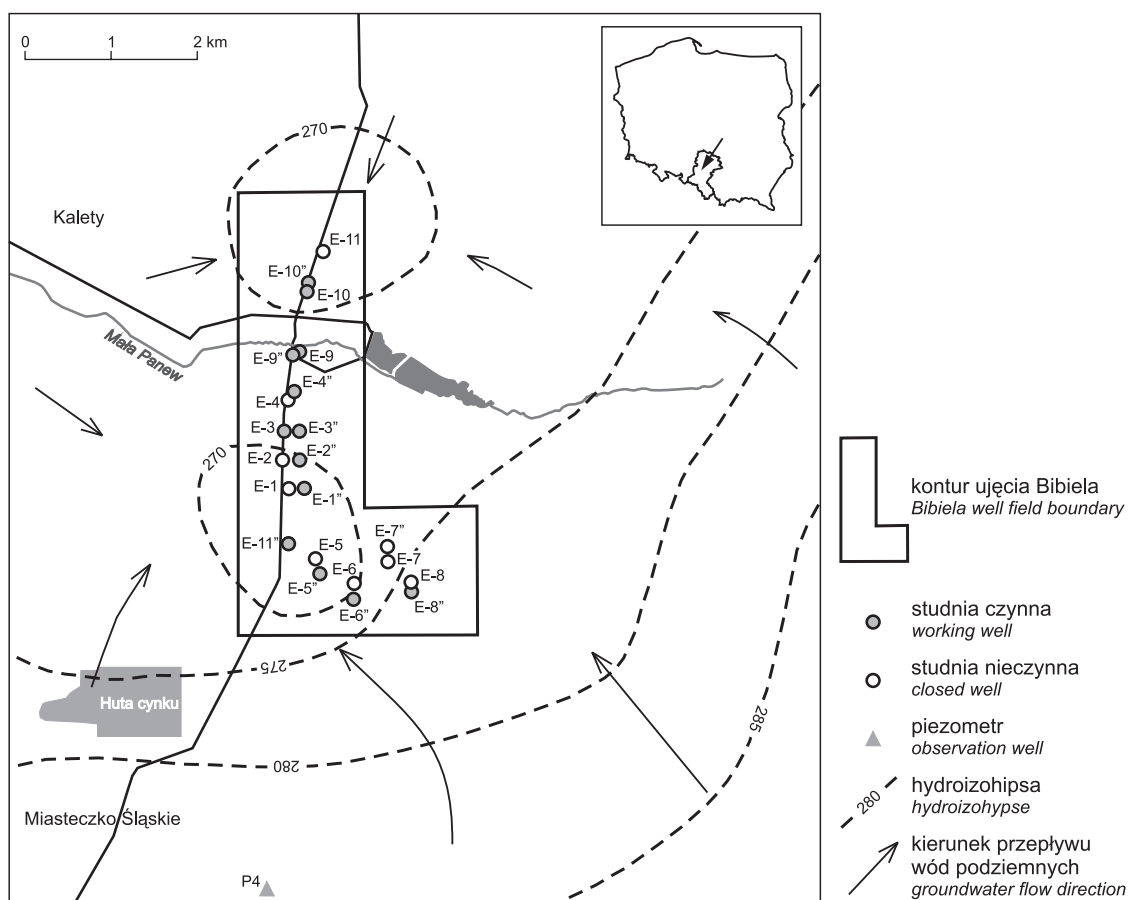


Fig. 1. Mapa hydroizohips obszaru badań

Hydrogeological map of the investigation area

METODYKA BADAŃ

W celu scharakteryzowania składu chemicznego wód podziemnych ujmowanych przez studnie ujęcia Bibiela zebrano dostępne wyniki analiz chemicznych wód wykonywanych przez Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów w Katowicach w dwóch laboratoriach: w Kozłowej Górze oraz w stacji uzdatniania wody Bibiela. Zgromadzono ok. 2450 wyników analiz wody z laboratorium w Bibieli z lat 1984–2009, w których oznaczano: barwę, pH, zasadowość, twardość, utlenialność oraz stężenia Fe og., Mn i Cl. Dodatkowo zebrano ponad 2570 wyników analiz wody z laboratorium w Kozłowej Górze z lat 1956–2008, których zakres był powiększony o oznaczenia mętności, azotu amonowego oraz temperatury wody. Spośród wszystkich tych analiz tylko około 320 obejmowało jony główne, a wśród nich 160 analiz zawierało oznaczenia mikroskładników.

Dla porównania składu chemicznego wód ujęcia Bibiela z wodami spoza obszaru ujęcia zgromadzono wyniki analiz chemicznych wody z piezometru P4, zlokalizowanego na południe od ujęcia (fig. 1). Analizy te były wykonywane w latach 1993–2008 w ramach monitoringu regionalnego i krajowego (Rocznik Hydrogeologiczny, 2009). Wyniki pełnych analiz zostały zweryfikowane na podstawie bilansu jonowego. Obliczono ponadto wskaźniki nasycenia względem kalcytu, dolomitu i gipsu, stworzono macierze korelacji między głównymi jonami w badanych wodach oraz wykonano odpowiednie wykresy. Wszystkie obliczenia wykonano za pomocą programu AquaChem v. 4.0, który jest zintegrowany z programem Phreeqc.

SKŁAD CHEMICZNY WÓD PODZIEMNYCH I JEGO ZMIANY W CZASIE

Skład chemiczny wód podziemnych serii węglanowej triasu w rejonie ujęcia Bibiela wykazuje zróżnicowanie w obszarze ujęcia, a także pewne zmiany w czasie. Wody charakteryzują się neutralnym lub słabo zasadowym odczynem (pH od 6,9 do 8,0) oraz zawartością substancji rozpuszczonych w zakresie od 90,5 (E-3) do 858 mg/l (E-10''), przy średniej wartości 292 mg/l. Stężenia jonów HCO_3^- mieszczą się w granicach od 134 (E-1'', fig. 2) do 292 mg/l (E-10''). Zawartość jonów Ca zmienia się od 29 (E-2) do 166 mg/l (E-10''), natomiast jonów Mg – od 10 (E-5'') do 53 mg/l

(E-10''). Najwyższe stężenia siarczanów występują w wodzie ze studni E-10'' (392 mg/l), a najniższe w wodzie ze studni sąsiedniej E-10 (14 mg/l). Stężenia jonów chlorkowych są bardzo zróżnicowane, od 3 (E-2'') do 44 mg/l (E-11''), natomiast stężenia jonów Na i K, oznaczane tylko w niektórych analizach, są niewielkie i wynoszą odpowiednio około 5 oraz 2,3 mg/l. Według klasyfikacji Szczukariewa-Prikłóńskiego wśród badanych wód dominuje typ hydrochemiczny

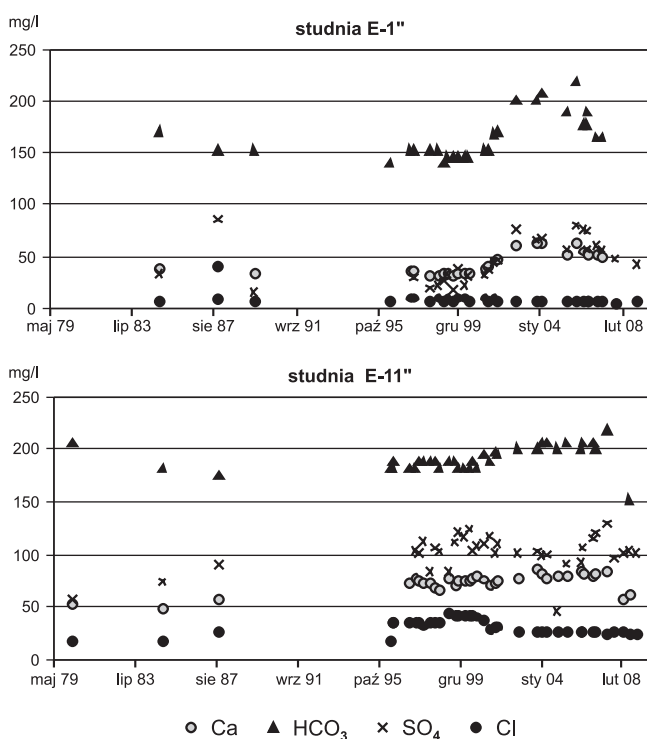


Fig. 2. Skład chemiczny wód ze studni E-1'' oraz E-11''

Chemical composition of water from the wells E-1'' and E-11''

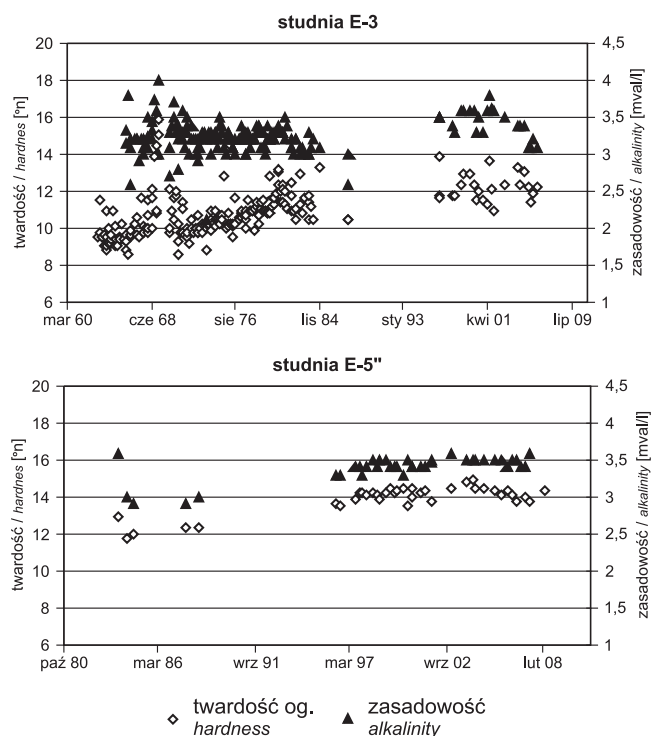


Fig. 3. Zmiany twardości i zasadowości w wodach ze studni E-3 i E-5''

Temporal trends of hardness and alkalinity for groundwater of E-3 and E-5'' wells

$\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$, a w dalszej kolejności $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ i $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$.

Zawartość Fe i Mn w wodach większości studzien jest niewielka, często poniżej progu oznaczalności, jednak w niektórych studniach stężenie Fe dochodzi do 4,4 mg/l (E-7), a Mn do 0,533 mg/l (E-7"). Zawartości innych metali w badanych wodach są generalnie bardzo niskie, a podwyższone stężenia ołowiu i kadmu pojawiają się tylko w analizach z czerwca

2001 oraz października 2000 r. Zaobserwowano podwyższone stężenia strontu, nawet do 1,5 mg/l w studni E-10".

W wodach różnych studni zauważono wzrost stężeń niektórych składników w czasie. Jest to najczęściej wzrost zasadowości i twardości (E-1", E-3, E-5", E-6", E-11"; fig. 3), żelaza (E-3", E-4", E-9) oraz siarczanów (E-1", E-2", E-3", E-4", E-10"). W studni E-7" zaobserwowano spadki stężeń żelaza i siarczanów.

WYNIKI OBLICZEŃ MODELOWYCH

W wyniku obliczeń przy użyciu programu Phreeqc uzyskano różne wartości indeksów nasycenia (SI) dla wód z poszczególnych studni (fig. 4).

Niemal we wszystkich studniach woda charakteryzuje się stanem nasycenia względem kalcytu, przy czym wskaźniki SI są najwyższe w przypadku wody ze studni E-10, E-10" oraz E-11", natomiast najniższe w wodach ze studni E-9, E-9" i E-4". Tylko wody studni E-7" są niedosycone względem kalcytu.

Wskaźniki nasycenia względem dolomitu są bardziej zróżnicowane i zmienne w czasie. Najczęściej wahają się od -1 do 0 i tylko wody ze studni E-10 oraz E-10" nie wykazują niedosycenia względem dolomitu.

We wszystkich studniach ujęcia Bibiela woda jest w wysokim stopniu niedosycona względem gipsu (E-10, E-9, E-3, E-2", E-1"). W wodzie ze studni E-1" z biegiem czasu stopień nasycenia gipsem wyraźnie rośnie. Najwyższe wskaźniki SI dla gipsu obserwuje się w przypadku studni E-10" ($\text{SI} > -1,5$).

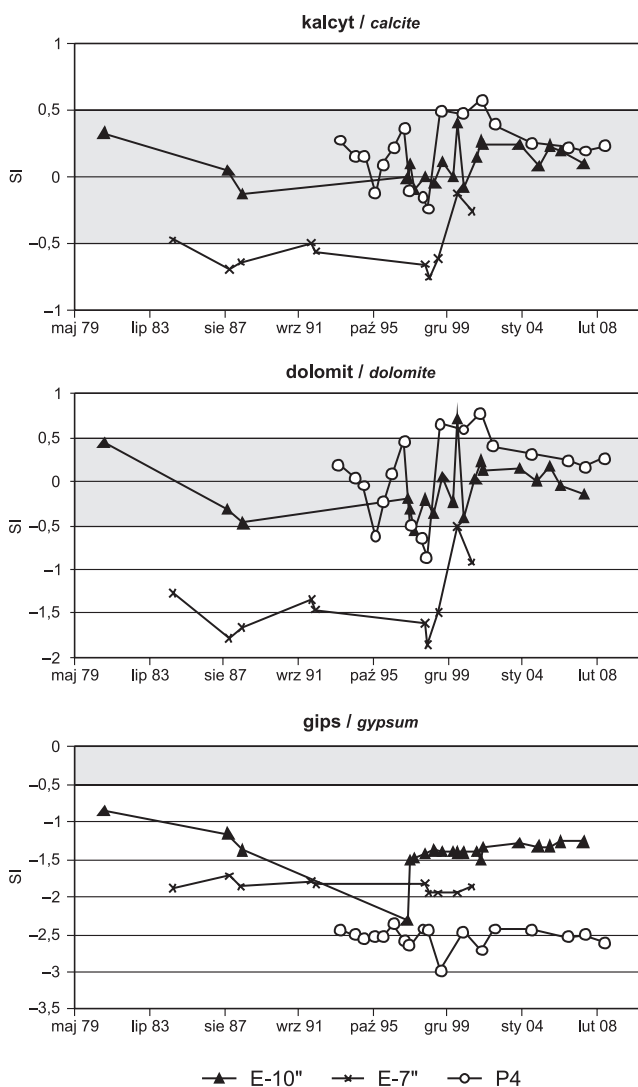


Fig. 4. Wskaźniki nasycenia wód wybranych studni względem kalcytu, dolomitu i gipsu

Saturation index (SI) with respect to calcite, dolomite and gypsum for selected wells

DYSKUSJA WYNIKÓW

W przestrzennym rozkładzie stężeń jonów głównych w wodach ze studni ujęcia Bibiela można wyodrębnić kilka stref o podobnym składzie chemicznym wód. Wody ze studni zlokalizowanych w skrajnie północnej części ujęcia (E-3, E-3", E-4, E-4", E-9, E-9", E-10 i E-10") odznaczają się największą zasadowością i twardością, a także najwyższymi stężeniami żelaza (0,8–2,8 mg/l) i jonu amonowego (do 0,86 mg/l). Wysokie zawartości siarczanów, przewyższające

stężenia charakterystyczne dla większości pozostałych wód, występują w dwóch oddalonych od siebie studniach: E-10" i E-11". Dodatkowo wody studni E-11" wyróżniają się relatywnie wysoką zawartością chlorków (ok. 20–40 mg/l).

Skład chemiczny wód podziemnych ujmowanych przez studnie ujęcia Bibiela formowany jest przez różne czynniki, zarówno naturalne, jak i antropogeniczne. Najważniejszym wydaje się być czynnik geogeniczny, na który składają się

przede wszystkim skomplikowana i zróżnicowana budowa geologiczna obszaru badań oraz węglanowy charakter środowiska wód podziemnych kompleksu wodonośnego triasu. W rejonie ujęcia kompleks wodonośny w części północnej zakryty jest warstwą słabo przepuszczalnych utworów ilastych kajpru i pozbawiony wpływów z powierzchni, a w części południowej jest tej izolacji pozbawiony. Skutkiem tego w niektórych studniach (głównie północnych) zwierciadło wody nie zostało obniżone poniżej spągu utworów izolujących, dzięki czemu nie wytworzyła się wtórna strefa aeracji. Znajduje to wyraz w odmiennym składzie chemicznym wód ze studni położonych najbardziej na północ od tych, które są położone w południowej części obszaru. W wodach tych studni odnotowuje się podwyższone w stosunku do pozostałych studni stężenia żelaza oraz jonu amonowego, wskazujące na warunki redukcyjne środowiska wód podziemnych w tym rejonie. W studniach w części południowej dominują wody typu $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$, a w części północnej wody typu $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$. Zapewne znaczący wpływ na zróżnicowanie składu chemicznego ma także skomplikowany charakter dróg krążenia wód w środowisku skał o porowatości krasowo-szczelinowo-porowej. Przykładem są wody o odmiennym składzie chemicznym ze studni E-1" i E-11", zlokalizowanych w niedalekiej odległości od siebie (fig. 2).

Oprócz czynników geogenicznych duży wpływ na kształtowanie składu chemicznego badanych wód mają czynniki antropogeniczne. Obniżenie zwierciadła wody o kilkadziesiąt metrów wskutek intensywnej eksploatacji wód podziemnych spowodowało wytworzenie wtórnej strefy aeracji, głównie w rejonie studni zlokalizowanych w południowej części obszaru. Fakt ten sprzyjał uruchomieniu lub zintensyfikowaniu procesów utleniania siarczków obecnych w utworach węglanowych triasu, co mogło się objawiać wzrostem stężenia siarczanów oraz żelaza, a także wzrostem wskaź-

ników nasycenia wody, np. dla kalcytu, dolomitu i gipsu. Ponadto część studni ujmuje łącznie utwory wapienia muszlowego i retu, w którym znajdują się wkładki gipsów (Rózkowski i in., red., 1997). Rozpuszczanie gipsów w kontakcie z dolomitami inicjuje proces dedolomityzacji (Plummer i in., 1990), a jego skutkiem jest m.in. zwiększenie stężenia wapnia i siarczanów oraz wzrost twardości wody. Do czynników antropogenicznych należy także zaliczyć wpływ zanieczyszczeń antropogenicznych z powierzchni. Nie można wykluczyć, że wzrost zawartości siarczanów oraz podwyższone stężenia chlorków w wodzie ze studni E-11" mogą być spowodowane dopływem zanieczyszczonych wód do ujęcia od strony południowo-zachodniej, z terenów przemysłowych huty cynku w Miasteczku Śląskim.

Do procesów, które prawdopodobnie mają wpływ na kształtowanie się składu chemicznego wód podziemnych ujmowanych przez studnie ujęcia Bibiela, można zaliczyć: rozpuszczanie węglanów – kalcytu i dolomitu, rozpuszczanie gipsu i dedolomityzację oraz utlenianie siarczków zawartych w skałach węglanowych. O rozpuszczaniu kalcytu i dolomitu mogą świadczyć wysokie wskaźniki nasycenia wód względem tych minerałów, jak również stosunek sumy stężeń wapnia i magnezu do wodorowęglanów ($\text{Ca+Mg}/\text{HCO}_3$). W wodach większości studni stosunek ten wynosi ok. 1:1,7 i jest zbliżony do stosunku typowego dla środowiska rozpuszczania kalcytu i dolomitu, który wynosi 1:2 (Samborska, 2009). Z kolei proces dedolomityzacji, objawiający się przede wszystkim wzrostem zawartości wapnia, magnezu i siarczanów, jest najbardziej widoczny w wodzie ze studni E-10". Potwierdzeniem tego może być wysoki współczynnik korelacji między wapniem i siarczanami ($R = 0,927$) oraz stosunkowo wysokie wskaźniki nasycenia wody względem gipsu, a także podwyższone stężenia strontu (do 1,5 mg/l w studni E-10") (Jacobson, Wasserburg, 2005).

PODSUMOWANIE

Skład chemiczny wód podziemnych w rejonie ujęcia Bibiela wykazuje istotne zróżnicowanie przestrzenne oraz zmienność czasową. Wyraźnie zaznacza się rejonizacja składu chemicznego wód. W części północnej okolic ujęcia występują wody o podwyższonym stężeniu żelaza i jonu amonowego, a charakterystyczne typy chemiczne to $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$ oraz $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$. Skład chemiczny tych wód kształtuje się w warunkach redukcyjnych, pod wpływem wyłącznie czynników geogenicznych. W południowej części obszaru zaznacza się wpływ czynników antropogenicznych na skład chemiczny wód – obniżenie zwierciadła wody oraz dopływ wód zanieczyszczonych. W studniach ujmujących łącznie poziomy wodonośny wapienia muszlowego i retu procesem odpowiedzialnym za kształtowanie składu chemicznego wód jest dedolomityzacja z udziałem gipsu.

W południowej części obszaru, gdzie zwierciadło wody jest swobodne, zaznacza się wpływ procesu utleniania siarczków na skład chemiczny wód, szczególnie w okresie głębokiego obniżenia zwierciadła wody. W tej części ujęcia dominują wody typu $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$.

W okresie eksploatacji ujęcia Bibiela nastąpiły zmiany składu chemicznego wód. Najczęściej jest to wzrost twardości i zasadowości oraz siarczanów i żelaza, a także wzrost indeksów nasycenia dla kalcytu, dolomitu i gipsu. Potwierdzenie oraz pełne wyjaśnienie sugerowanych procesów odpowiedzialnych za kształtowanie składu chemicznego wód węglanowego kompleksu wodonośnego triasu w warunkach intensywnej ich eksploatacji wymaga bardziej szczegółowych badań, w tym przede wszystkim badań izotopowych wód i modelowania geochemicznego w szerszym zakresie.

LITERATURA

- JACOBSON A.D., WASSERBURG G.J., 2005 – Anhydrite and the Sr isotope evolution of groundwater in a carbonate aquifer. *Chemical Geology*, **214**: 331–350.
- KOWALCZYK A., 2003 – Formowanie się zasobów wód podziemnych w utworach węglanowych triasu śląsko-krakowskiego w warunkach antropopresji. *Pr. Nauk. UŚl.*, **2152**.
- KOWALCZYK A., KORONA W., RESPEKTA D., RUBIN K., 1999 – Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów eksploatacyjnych ujęcia wód podziemnych Bibiela.
- PLUMMER L.N., BUSBY J.F., LEE R.W., HANSHAW B.B., 1990 – Geochemical modeling of the Madison aquifer in parts of Montana, Wyoming and South Dakota. *Water Resour. Res.*, **26**, 9: 1981–2014.
- ROCZNIK Hydrogeologiczny Państwowej Służby Hydrogeologicznej, 2009. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- RÓŻKOWSKI A., CHMURA A., SIEMIŃSKI A. (red.), 1997 – Użytkowe wody podziemne Górnośląskiego Zagłębia Węglowego i jego obrzeżenia. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **159**.
- SAMBORSKA K., 2009 – Formowanie się składu chemicznego wód podziemnych w utworach węglanowych triasu w północnej części zbiornika Olkusz-Zawiercie w warunkach antropopresji. Praca doktorska. Arch. WNoZ UŚl., Sosnowiec.

SUMMARY

One of the biggest well fields in the Upper Silesian region – Bibiela has been extracting groundwater from the Triassic carbonate aquifer since 1956. It consists of 22 wells drilled in the years of 1954–1982. Currently only 13 of them are active. Very high water extraction in the middle of 80's resulted in groundwater level lowering of about 70 m. Since the beginning of the 90's gradual rise of groundwater table up to 60 meters has been observed. The paper describes Triassic groundwater chemistry based on over 5000 archive chemical analyses. Saturation conditions of water with respect to minerals like calcite, dolomite and gypsum were calculated by means of AquaChem software combined with Phreeqc. Chemical composition of groundwater of the Triassic aquifer in the Bibiela well field region shows both spatial and temporal variability. Considered water represents $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Mg}$ hydrochemical type, neutral or slightly alkaline pH and is characterized by the total dissolved solids mean value of about 300 mg/l. Groundwater from the northern wells

shows higher concentration of Fe, NH_4 and alkalinity, but lower concentration of Mn. For water of some wells an increase in concentration of Fe, SO_4 or alkalinity and hardness has been observed. Geochemical modelling results show that groundwater of the consideration is saturated with respect to calcite but saturation indices for dolomite are a bit lower and more diverse. Saturation indices with respect to gypsum shows undersaturated conditions for this mineral. Different factors affect evolution of groundwater chemistry in the Bibiela well field. One may distinguish geogenic factors (e.g. variable depth of overlaying aquitard due to tectonic features like faults, presence of gypsum layers) and anthropogenic factors (e.g. groundwater level fluctuations on a large scale, artificial connection of two Triassic water bearing layers – Roethian and Muschelkalk, influence of contamination from the earth surface). A few processes take place in the considered carbonate aquifer, like carbonates and gypsum dissolution, dedolomitization or sulfides oxidation.