

MODELOWANIE PRZEMIAN SKŁADU CHEMICZNEGO WÓD PODZIEMNYCH PERMSKIEGO PIĘTRA WODONOŚNEGO W REJONIE LUBIŃSKO-GŁOGOWSKIEGO OBSZARU MIEDZIONOŚNEGO

GEOCHEMICAL MODELLING OF GROUNDWATER IN PERMIAN (ZECHSTEIN) AQUIFER IN THE LUBIN-GŁOGÓW COPPER REGION (LGCR)

MARIUSZ MAĐRALA¹

Abstrakt. Eksploatacja rud miedzi w kopalniach lubińsko-głogowskiego obszaru miedzionośnego (LGOM) spowodowała intensywny i długotrwały drenaż górniczy. Główną rolę w kształtowaniu dopływu wód do wyrobisk kopalni LGOM odgrywa szczelinowo-krasowy poziomy wodonośny wapienia podstawowego W-1 oraz pozostające z nim w łączności hydraulicznej poziomy dolomitu głównego, pstrego piaskowca i oligocenu. Rozwój leja depresji spowodował obniżenie zwierciadła wód podziemnych w utworach cechsztynu, obejmując również poziomy wodonośne miocenu, oligocenu i pstrego piaskowca. Posługując się klasyfikacją Monitona, wydzielono 6 typów hydrochemicznych wód: Cl–Na, Cl–Na–Ca, Cl–SO₄–Ca–Na, SO₄–Cl–Ca–Na, SO₄–Ca–Na i SO₄–HCO₃–Ca–Na. Stworzony model konceptualny zakładał, że głównym procesem kształtującym chemizm wód w poziomie wapienia podstawowego jest rozpuszczanie siarczanów i dedolomityzacja węglanów. Wykonane modelowanie specjacyjne, modelowanie odwrotne i wprost potwierdziły założenia przyjęte w modelu konceptualnym.

Słowa kluczowe: drenaż górniczy, typy hydrochemiczne wód, model konceptualny, modelowanie hydrogeochemiczne.

Abstract. The Lubin–Głogów Copper Region (LGCR) is an area of copper mining, where ore sediment is exploited at depths of 600–1200 m. Mine dewatering has influenced the Triassic, Permian, Paleogene (Oligocene) and Neogene (Early and Middle Miocene) aquifers. In the north of LGCR outcrops of carbonate-rock aquifer underlies the Triassic and Oligocene sediments, whereas in the south it dips beneath Tertiary sediments. Six chemical water types were identified in the carbonate-rock aquifer: Cl–Na, Cl–Na–Ca, Cl–SO₄–Ca–Na, SO₄–Cl–Ca–Na, SO₄–Ca–Na and SO₄–HCO₃–Ca–Na. Generally, the total dissolved-solids concentration of water increases with depth. The predominance of sulphate over calcium and bicarbonate indicates that process controlling the chemistry of this water types is sulphate dissolution which involves dedolomitization of carbonates. Mining drainage forces groundwater moving through the Zechstein sediments initially dissolves anhydrite (or gypsum) and dolomite. The state of geochemical equilibrium, inverse mass balance and reaction path models in the carbonate-rock aquifer were calculated by using the computer model PHREEQC ver. 2.15.

Key words: mining drainage, hydrochemical water types, conceptual model, hydrogeochemical modelling.

WSTĘP

Początek wydobywania rud miedzi na terenie lubińsko-głogowskiego obszaru miedzionośnego sięga 1965 r. Obecnie głębokość eksploatacji osiąga 600–1200 m i jest prowadzona w trzech zakładach górniczych: Lubin, Polkowice-Sieroszowice i Rudna. Długotrwały i intensywny drenaż

górnicy objął utwory wodonośne paleogenu, neogenu, triasu i permu. W wyniku infiltracji wód z oligocenu do wyrobisk górniczych rozpoczął się proces przeobrażeń geochemicznych silnie zmineralizowanych wód wapienia podstawowego W-1. Na podstawie analizy materiałów hydroche-

¹ Uniwersytet Wrocławski, Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska, Instytut Nauk Geologicznych, pl. Maxa Borna 9, 50-204 Wrocław

micznych z lat 1968–2006 oraz modelu hydrodynamicznego krążenia wód w obszarze oddziaływania kopalni LGOM stworzono model konceptualny. Wyniki modelowania hydrogeo-

chemicznego pozwoliły na identyfikację rodzaju oddziaływań woda–skała, kształtujących chemizm wód podziemnych pod wpływem drenażu górniczego.

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Złoża rud miedzi występują w północno-zachodniej części monokliny przedsudeckiej, oddzielonej strefą uskokuwą środkowej Odry od bloku przedsudeckiego (fig. 1). Na obszarze LGOM można wyróżnić cztery piętra wodonośne: czwartorzędowe, neogeńsko-paleogeńskie (Ng–Pg), permskie i triasowe (Konstantynowicz red., 1971). Piętro czwartorzędowe obejmuje wodonośne piaski i żwiry plejstocenu i holocenu, natomiast w piętrze Ng–Pg występują wodonośne piaski i żwiry oligocenu i miocenu przewarstwiane łałami, mułowcami oraz węglem brunatnym. Permskie piętro wodonośne tworzą: poziom piaskowców czerwonego spagowca oraz dwa poziomy wodonośne związane z wapniem pod-

stawowym (W-1) i dolomitem głównym. W utworach triasowych wyróżnia się poziom wodonośny pstrego piaskowca, wykształcony w piaskowcach o spoiwie ilastym. Poziomy wodonośne w utworach neogenu, paleogenu, triasu i cechsztynu wykazują znaczącą więź hydrauliczną poprzez uskoki i kontakty sedimentacyjne (fig. 2). Główną rolę w kształtowaniu dopływu wód do wyrobisk kopalni LGOM odgrywa szczelinowo-krasowy poziom wodonośny wapienia podstawowego W-1 oraz pozostające z nim w łączności hydraulicznej poziomy dolomitu głównego, pstrego piaskowca i oligocenu (Bocheńska, 1984, 1988; Bocheńska i in., 2000). Ze względu na zróżnicowanie warunków hydrogeologicz-

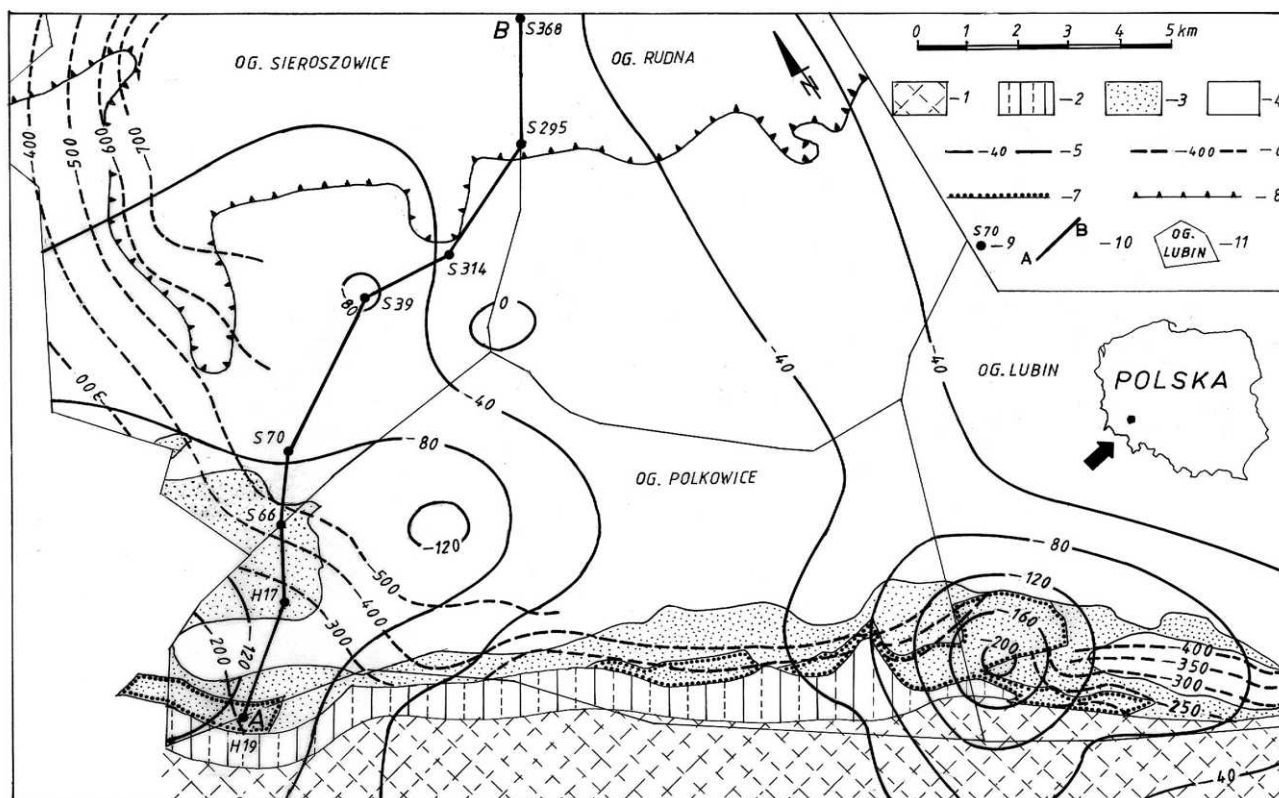


Fig. 1. Schematyczna mapa geologiczna obszaru LGOM

1 – blok przedsudecki, 2 – czerwony spagowiec, 3 – cechsztyńskie wapienie i dolomity W-1, 4 – trias, 5 – hydroizohipsy poziomu wodonośnego cechsztyńskich wapieni i dolomitów W-1, 6 – hydroizohipsy poziomu wodonośnego w utworach paleogenu, 7 – strefa kontaktów hydraulicznych poziomu wodonośnego cechsztyńskich wapieni i dolomitów W-1 i poziomu wodonośnego paleogenu, 8 – granica występowania soli kamiennej, 9 – otwory wiertnicze, 10 – linia przekroju, 11 – obszar górnictwa

Schematic geological map of the LGCR mining area

1 – Fore-Sudetic Block, 2 – Rotliegendes outcrops, 3 – Zechstein outcrops, 4 – Triassic outcrops, 5 – hydroisohyps of W-1 Zechstein carbonate-rock aquifer, 6 – hydroisohyps of Paleogene aquifer, 7 – zones of direct connection between W-1 Zechstein carbonate-rock aquifer and Paleogene aquifer, 8 – range of Zechstein salt cyclothem, 9 – boreholes, 10 – cross-section line, 11 – mining area

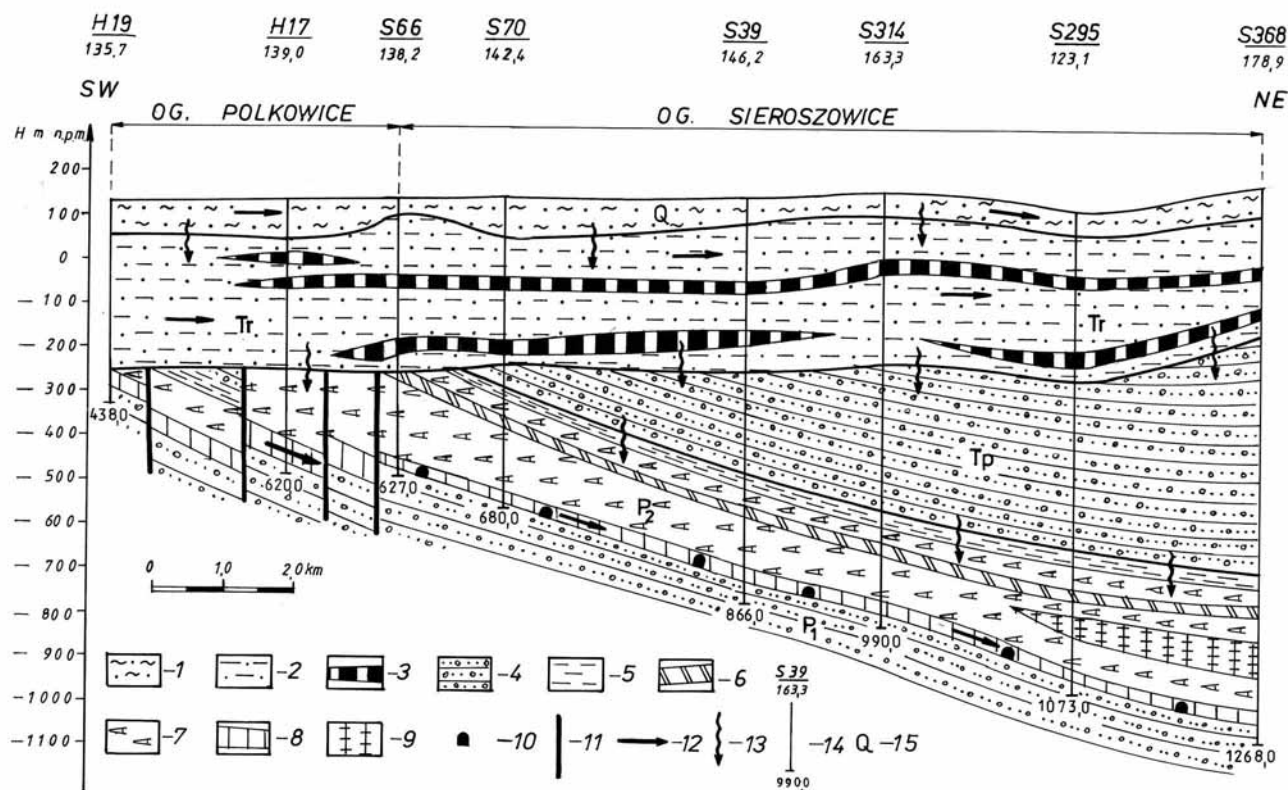


Fig. 2. Schematyczny przekrój geologiczny przez obszar LGOM

1 – piaski i gliny, 2 – piaski i ility, 3 – węgiel brunatny, 4 – piaskowce, 5 – iłolupki, 6 – dolomity, 7 – anhydryty, 8 – wapienie W-1, 9 – sól kamienna, 10 – wyrobiska górnicze, 11 – uskoki, 12 – kierunki przepływu wód podziemnych, 13 – kierunek przesączania wód podziemnych, 14 – otwory wiertnicze, 15 – stratygrafia (Q – czwartorzęd, Tr – trzeciorzęd, Tp – pstry piaskowiec, P₂ – cechsztyń, P₁ – czerwony spągowiec)

Schematic cross-section of groundwater flow in LGCR mines

1 – sands and glacial tills, 2 – sands and calcs, 3 – lignite, 4 – sandstone, 5 – claystone, 6 – dolomites, 7 – anhydrites, 8 – W-1 limestone, 9 – salt cyclothem, 10 – mine excavation, 11 – faults, 12 – groundwater flow direction, 13 – groundwater seepage direction, 14 – boreholes, 15 – stratigraphy (Q – Quaternary, Tr – Tertiary, Tp – Bundsandstein, P₂ – Zechstein, P₁ – Rotliegendes)

nych w wapieniu podstawowym wyróżnia się dwie strefy: północną i południową. W rejonie południowym wyrobiska górnicze prowadzą kopalnie Lubin i Polkowice, a w rejonie północnym także kopalnie Rudna i Sierszowice. W strefie północnej poziom wapienia podstawowego charakteryzuje się mniejszą szczelinowatością i porowatością oraz niewielkimi współczynnikami filtracji. W strefie południowej, obejmującej rejon podpaleogeńskich wschodni skał węglanowych, warstwa wodonośna wapieni W-1 wykazuje intensywne zawadnienie związane ze zwiększoną szczelino-

watością i porowatością oraz znacznym stopniem zaangażowania tektonicznego. Kierunki krążenia wód podziemnych w warunkach drenażu górniczego przedstawiono na figurze 2.

Pod względem petrograficznym poziom wodonośny wapienia podstawowego W-1 budują wapienie dolomityczne, przechodzące ku górze w dolomity wapienne (Lorenc, 1975; Peryt, 1981). W części stropowej utwory węglanowe zawierają znaczące domieszki anhydrytów i gipsów, których udział procentowy maleje w kierunku stropu.

IDENTYFIKACJA GŁÓWNYCH PROCESÓW HYDROGEOCHEMICZNYCH – MODEL KONCEPTUALNY

W kopalniach miedzi LGOM do monitoringu składu chemicznego wód z poziomu wapieni podstawowych W-1 wykorzystuje się otwory drenażowe wykonywane bezpośrednio z wyrobisk górniczych. Analizowane dane pochodzą z lat 1968–2006 i obejmują 2587 wyników analiz chemicznych. Do wydzielenia typów hydrochemicznych w poziomie

wodonośnym wapienia podstawowego W-1 posłużono się klasyfikacją Monitiona. Największy udział w wodach drenażowych mają wody typu Cl-Na i Cl-Na-Ca (tab. 1). Wody tego typu dominują w kopalniach Rudna i Sierszowice (strefa północna) oraz stanowią 1/3 wód w kopalni Polkowice. Wody te mają charakter reliktowy, związany z powsta-

Tabela 1

Główne typy hydrochemiczne wód poziomu wapienia podstawowego W-1 w kopalniach rud miedzi LGOM

Major types, their specific cation, anion composition, and abundance in LGCR mine

Typ hydrochemiczny wody	Liczba analiz wody danego typu z poziomu wapienia podstawowego W-1		
	ZG Lubin	ZG Polkowice	ZG Rudna i Sieroszowice
Cl-Na	–	213 (23,3%)	1201 (89,8%)
Cl-Na-Ca	17 (5,2%)	70 (7,7%)	107 (8,0%)
Cl-SO ₄ -Ca-Na	2 (0,6%)	168 (18,4%)	1 (0,1%)
SO ₄ -Cl-Ca-Na	145 (43,5%)	380 (41,6%)	20 (1,5%)
SO ₄ -Ca-Na	124 (37,2%)	82 (9,0%)	8 (0,6%)
SO ₄ -HCO ₃ -Ca-Na	45 (13,5%)	–	–

waniem wapieni cechsztyńskich i ich dolomityzacją. Wody o dominującym składzie jonowym Cl-SO₄-Ca-Na, SO₄-Cl-Ca-Na oraz SO₄-Ca-Na przeważają w kopalniach Lubin i Polkowice. Natomiast wody typu SO₄-HCO₃-Ca-Na spotykane są tylko w kopalni Lubin w strefie kontaktów hydrolicznych z poziomem oligoceniowym.

Długotrwały drenaż górniczy związany z eksploatacją rud miedzi na terenie LGOM spowodował przekształcenia chemizmu wód w wapieniach W-1. W strefie południowej zwiększenie dopływów do kopalń Lubin i Polkowice w latach 1973–2006 spowodowało spadek mineralizacji wód do 20 g/l, przy jednoczesnym wypływie strefy występowania tych wód do głębokości około 350 m. Natomiast w rejonie północnym rozwój drenażu w okresie 1974–2006 spowodował pojawienie się wód o mineralizacji 100–200 g/l już na głębokości 550 m.

Zmiany mineralizacji wód drenażowych odzwierciedlały przemiany składu jonowego wód spowodowane interakcją pomiędzy wodami podziemnymi a minerałami budującymi skały wodonośne w warunkach drenażu górniczego. W wyniku dopływu do wyrobisk górniczych niskozmineralizowanych wód z oligocenu została zaburzona naturalna równowaga hydrogeochemiczna w poziomie wodonośnym wapienia podstawowego. Pierwotne wody typu Cl-Na i Cl-Na-Ca, związane z wodami reliktowymi, uległy przeobrażeniu spowodowanemu wzrostem stężeń jonów siarczanowych, wapniowych i magnezowych. Przewaga w składzie jonowym wód siarczanów nad wapniem i wodorowęglanami oraz brak zgodności z modelem prostego rozpuszczania dolomitu i kalcytu wskazują na inny mechanizm kształtujący che-

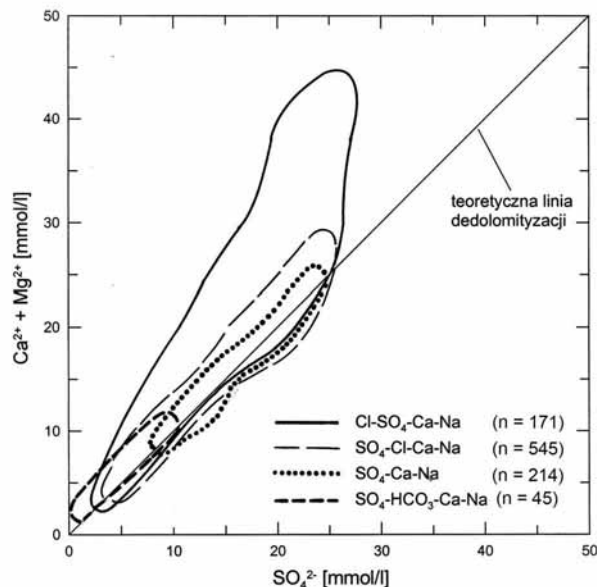


Fig. 3. Zmiany stężenia jonów wapnia i magnezu w zależności od stężenia jonów siarczanowych w wodach w poziomie wapienia podstawowego W-1 (n – liczba analiz)

Concentration of calcium and magnesium as a function of sulphate concentration in groundwater from the Zechstein carbonate-rock W-1 aquifers, categorized by water type (n – number of analyses)

mizm wód. Wskaźniki nasycenia wód w stosunku do anhydrytów i gipsów wykazują korelację z suchą pozostałością, czego nie obserwujemy w stosunku kalcytu i dolomitu. Przepływające przez wapienie podstawowe W-1 wody podziemne powodują rozpuszczanie siarczanów (anhydrytu lub gipsu) oraz kalcytyzację węglanów. Proces dedolomityzacji zachodzi w wyniku zastępowania atomów magnezu przez atomy wapnia. W sytuacji kiedy minerały węglanowe osiągną stan nasycenia, anhydryty w dalszym ciągu ulegają rozpuszczaniu, dostarczając do wody jony siarczanowe i wapniowe. W konsekwencji roztwór może osiągnąć stan przesylenia w stosunku do kalcytu i spowodować jego wytrącanie. Sumaryczna reakcja dedolomityzacji może przebiegać następująco:



Wykres przedstawiający zależność stężeń Ca+Mg w funkcji SO₄ dla wszystkich typów wód z wyjątkiem Cl-Na wykazuje dużą zgodność z modelem teoretycznym procesu dedolomityzacji (fig. 3). W przypadku wód typu Cl-Na-Ca część wód na wykresie reprezentuje nieprzeobrażone wody reliktowe. Występujące w strefie podpaleogeńskich wychodni utworów cechsztynu wody typu SO₄-HCO₃-Ca-Na związane są wyłącznie z dopływem wód z oligocenu. Ze względu na to, że zbiornik permski stanowi układ zamknięty, formy węglanowe w pozostałych typach wód zależą wyłącznie od pH.

MODELOWANIE HYDROGEOCHEMICZNE

Do modelowania hydrogeochemicznego wykorzystano program PHREEQC w wersji 2.15.0 (Parkhurst, Appelo, 1999). Ze względu na wysoką siłę jonową bardzo zmineralizowanych solanek do obliczeń zastosowano bazę danych termodynamicznych *pitzer.dat*. Wstępem do modelowania hydrogeochemicznego było przyjęcie warunków początkowych w formie modelu konceptualnego, nawiązującego do warunków hydrogeologicznych w rozpatrywanych zbiornikach wodonośnych, zweryfikowanych przez modele hydrodynamiczne (Bocheńska, Fiszer, 1988; Fiszer, Derkowska-Sitarz, 2005). Obliczenia modelowe przeprowadzono opierając się na analizach archiwalnych wzdłuż wytypowanej linii prądu pomiędzy otworami: H19–H17–S39–S314–S368 (fig. 1, 2). Otwór H19 reprezentuje strefę zasilania, a więc do głębokości około 350–400 m, natomiast pomiędzy otworami H19 i H17 występuje strefa przepływu sięgająca do głębokości około 600 m. Od otworu H17 aż do S368 została wydzielona strefa drenażu. Ze względu na brak stosownych analiz chemicznych wód oligoceńskich spowodowany szybkim i głębokim ich zdrenowaniem, nie modelowano strefy zasilania, przyjmując jako wyjściowy roztwór w otworze H19.

MODELOWANIE SPECJACYJNE

Pierwszym etapem modelowania była analiza specjacyjna, która posłużyła do weryfikacji warunków początkowych modelu konceptualnego. Analiza specjacji poszczególnych pierwiastków w strefie południowej ujawniła zdecydowaną przewagę prostych form jonowych głównych składników (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) zarówno w obszarze zasilania, jak też przepływu. Jako specjacja drugorzędna w strefie zasilania pojawia się CaSO_4^0 , a w strefie przepływu CaSO_4^0 oraz MgSO_4^0 . W strefie drenażu zaobserwowano wyraźny spadek stężenia jonu HCO_3^- do wartości śladowych. Natomiast wśród pozostałych składników rozpuszczonych w wodach obok prostych form jonowych znaczny udział mają CaSO_4^0 i MgSO_4^0 , a poniżej głębokości 900 m także NaSO_4^- . Skład specjacji substancji rozpuszczonych w wodach wapienia podstawowego został zdeterminowany dużą siłą jonową roztworów.

MODELOWANIE ODWROTNE

Modelowanie odwrotne miało celu obliczenie ilości moli substancji przepływających pomiędzy poszczególnymi punktami wzdłuż linii prądu oraz weryfikację założeń modelu konceptualnego. Do obliczeń przyjęto skład mineralny wapieni podstawowych, rozpoznany we wcześniejszych pracach mineralogicznych i petrograficznych (Lorenc, 1975; Peryt, 1981). Do składu mineralnego dodano halit, polihalit i sylwin w celu zbilansowania masy w zakresie chlorków, sodu i potasu. Pierwszy model stworzono dla par punktów H19–H17, drugi H17–S39, trzeci S39–S314 i czwarty

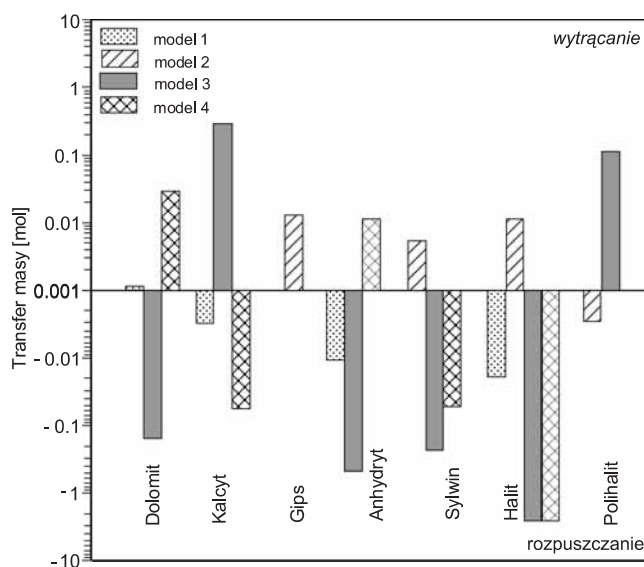


Fig. 4. Wyniki obliczeń modeli odwrotnych

Results of inverse geochemical models

S314–S368. W skonstruowanych modelach nie przyjęto specjalnych wymuszeń co do rozpuszczania bądź wytrącania minerałów, uznając, że przebieg reakcji będzie zależał od wartości SI. Poziom niepewności w modelach odwrotnych przyjęto na poziomie maksymalnego błęd analitycznego.

Uzyskane w modelowaniu odwrotnym możliwe rozwiązania poddano następnie weryfikacji. Wyniki obliczeń analizowano pod kątem składu i liczby faz mineralnych biorących udział w reakcjach, zgodności przebiegu reakcji rozpuszczania/wytrącania z obliczonymi składnikami nasycenia SI oraz wielkości transferowanej masy. Odrzucano również te modele, w których występowały znaczne ilości transferowanego wapnia i magnezu w wyniku procesów wymiany jonowej. Ważnym parametrem przy ocenie wiarygodności modeli jest również wartość *residuals*, rozumiana jako różnica między wartościami analitycznymi a obliczeniami (Appelo, Postma, 2002). W prezentowanych poniżej rozwiązaniach zestawiono wyniki modeli o najniższych wartościach tego parametru.

Wyniki przepływu masy pomiędzy poszczególnymi punktami wzdłuż linii prądu uzyskane w modelach odwrotnych przedstawiono na figurze 4.

Z powyższego zestawienia wynika znaczna zgodność pomiędzy przyjętymi założeniami w modelu konceptualnym a uzyskanymi obliczeniami. Głównym procesem kształtującym przeobrażenia geochemiczne jest rozpuszczanie siarczanów, któremu towarzyszy proces dedolomityzacji lub rozpuszczanie kalcytu. Wymienione procesy we wszystkich modelach przebiegają praktycznie bez udziału CO_2 . W wyniku tych procesów zanotowano przyrost lub spadek zawartości specjacji chemicznych, zgodny z wartościami analitycznymi w danym otworze.

MODELOWANIE WPROST

Sprawdzenie poprawnego zidentyfikowania procesów geochemicznych zachodzących w środowisku wodonośnym wapieni cechsztyńskich wymagało modelowania wprost. Zakładając quasi-ustalone warunki pola hydrogeochemicznego, stan równowagi roztworu początkowego został okre-

ślony przez zadanie wskaźników nasycenia względem tych samych specjacji co w modelowaniu odwrotnym. Otrzymane wyniki obliczeń stężeń specjacji chemicznych porównywano ze składem chemicznym wód w kolejnym punkcie kroku obliczeniowego (tab. 2). Stworzone modele potwierdziły dominujące znaczenie procesu rozpuszczania siarczanów przy współdziałaniu dedolomityzacji.

Tabela 2

Porównanie wartości stężeń głównych jonów uzyskanych z modelowania i badań analitycznych w wodach poziomu wapienia podstawowego W-1

Concentrations of major ions in groundwater from the Zechstein carbonate-rock W-1, based on analytical and model research

	Nr otworu	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
		[-]	[mol/l]						
linia prądu 19-17									
dane analit.	H17	8,30	1,75E-02	1,07E-03	2,56E-02	6,93E-04	4,59E-03	1,65E-02	2,46E-02
dane model.		8,30	1,73E-02	1,04E-03	2,50E-02	6,86E-04	4,64E-03	1,65E-02	2,50E-02
linia prądu 17-39									
dane analit.	S39	6,50	8,76E-03	3,01E-03	1,44E-02	1,08E-03	2,22E-03	1,54E-02	6,76E-03
dane model.		6,48	9,38E-03	3,22E-03	1,23E-02	9,25E-04	2,15E-03	1,43E-02	7,86E-03
linia prądu 39-314									
dane analit.	S314	6,40	1,10E-01	4,37E-02	2,46E+00	1,71E-02	2,07E-03	4,74E-02	2,64E+00
dane model.		6,26	1,97E-01	7,47E-02	2,28E+00	2,43E-02	1,89E-03	2,88E-02	2,79E+00
linia prądu 314-368									
dane analit.	S368	8,60	1,15E-01	1,31E-02	4,93E+00	6,72E-02	3,59E-04	3,90E-02	4,99E+00
dane model.		8,61	1,07E-01	1,25E-02	4,87E+00	6,63E-02	3,64E-04	4,14E-02	5,06E+00

WNIOSKI

1. Uruchomienie w połowie lat 60. wydobywania rud miedzi spowodowało intensywny drenaż poziomu wodonośnego wapieni W-1. Rozwój lejki depresji spowodował obniżenie zwierciadła wód podziemnych w utworach cechsztynu, obejmując również poziomy wodonośny oligocenu i pstręgo piaskowca.

2. Największy udział w wodach drenażowych mają wody typu Cl-Na i Cl-Na-Ca, dominujące w kopalniach Rudna i Sieroszowice. Są to wody relikto- we, związane z powstawaniem wapieni cechsztyńskich i ich dolomityzacją.

3. W wyniku dopływu do wyrobisk górniczych wód z oligocenu wody typu Cl-Na i Cl-Na-Ca uległy przeobrażeniu spowodowanemu wzrostem stężeń jonów siarczanowych,

wapniowych i magnezowych. Wody o dominującym składzie jonowym: Cl-SO₄-Ca-Na, SO₄-Cl-Ca-Na oraz SO₄-Ca-Na przeważają w kopalniach Lubin i Polkowice. Natomiast wody typu SO₄-HCO₃-Ca-Na spotykane są tylko w kopalni Lubin, w strefie kontaktów hydraulicznych z poziomem oligoceniowym.

4. Wyniki modelowania hydrogeochemicznego potwierdzają zgodność pomiędzy przyjętymi założeniami w modelu konceptualnym a uzyskanymi obliczeniami. Głównym procesem kształtującym przeobrażenia geochemiczne jest rozpuszczanie siarczanów, któremu towarzyszy proces dedolomityzacji. Wymienione procesy we wszystkich modelach przebiegają praktycznie bez udziału CO₂.

LITERATURA

- APPELO C.A.J., POSTMA D., 2002 – Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- BOCHEŃSKA T., 1984 – Zmiany warunków hydrodynamicznych w kompleksie utworów podzwartorzędowych lubińsko-głogowskiego obszaru miedzionośnego. *Prz. Geol.*, **32**, 1: 26–30.
- BOCHEŃSKA T., 1988 – Kształtowanie się warunków hydrodynamicznych w lubińsko-głogowskim obszarze miedzionośnym pod wpływem odwadniania kopalń. *Acta Univ. Wratisl.*, 1044, *Pr. Geol. Miner.* **14**.
- BOCHEŃSKA T., FISZER J., 1988 – Computer simulation of drainage process of deep underground mines. Geomathematics and geostatistics applied to space and time dependent data. *Sc. Terre Ser. Inf.*, **27**: 133–143.
- BOCHEŃSKA T., FISZER J., KALISZ M., 2000 – Prediction of groundwater inflow into copper mines of the Lubin–Głogów Copper Region. *Environ. Geol.*, **39**, 6: 587–594.
- FISZER J., DERKOWSKA-SITARZ M., 2005 – Badania modelowe regionalnego krążenia wód w obszarze oddziaływania kopalń LGOM. *Pr. Nauk. Inst. Gór. PWroc.*, **42**, *Konf.*, 110: 111–121.
- KONSTANTYNOWICZ E. (red.), 1971 – Monografia przemysłu miedziowego w Polsce. Wyd. Geol., Warszawa.
- LORENC S., 1975 – Petrografia i zróżnicowanie facjalne wapieni i anhydrytów Werra monokliny przedsudeckiej. *Geol. Sudet.*, **10**, 1: 59–104.
- PARKHURST D.L., APPELO C.A.J., 1999 – User's guide to phreeqc (version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259. USGS Denver, Colorado.
- PERYT T.M., 1981 – Geneza dolomitów cechsztyńskich. *Prz. Geol.*, **29**, 10: 497–501.

SUMMARY

The Lubin–Głogów Copper Region (LGCR) encompasses southwestern Poland with the area of about 500 km². At present, copper ore is mined at depths from 600 to 1200 m in four mines: Lubin, Polkowice, Sierszowice and Rudna. The hydrogeological profile of LGCR includes Pleistocene, Miocene, Oligocene, Triassic and Permian aquifers. The most important one is water-bearing Zechstein carbonate rocks: dolomite W-2 and limestone and dolomites W-1. Intense mining drainage caused that groundwater from the W-1 Zechstein carbonate-rock has been recharged from aquifers occurring in Tertiary sediments. The Oligocene water-bearing horizon in the southern part of LGCR is directly hydraulically connected to the Zechstein W-1 aquifer. Six chemical water

types were identified in the carbonate-rock aquifer: Cl–Na, Cl–Na–Ca, Cl–SO₄–Ca–Na, SO₄–Cl–Ca–Na, SO₄–Ca–Na and SO₄–HCO₃–Ca–Na. The predominance of sulphate over calcium and bicarbonate indicates that the process controlling the chemistry of the water types is sulphate dissolution which involves dedolomitization of carbonates. Mining drainage forces groundwater moving through the Zechstein sediments initially dissolves anhydrite (or gypsum) and dolomite. The state of geochemical equilibrium, inverse mass balance and reaction path models in the carbonate-rock aquifer were calculated by using the computer model PHREEQC ver. 2.15.