

WPŁYW ZAPRZESTANIA ODWODNIENIA ZG „KONRAD” NA CHEMIZM WÓD PODZIEMNYCH SYNKLINY GRODZIECKIEJ W REJONIE IWIN KOŁO BOLESŁAWCA

IMPACT OF THE ABANDONMENT OF DEWATERING IN THE “KONRAD” MINE ON GROUNDWATER QUALITY OF THE GRODZIEC SYNCLINE IWINY REGION NEAR BOLESŁAWIEC

MARIUSZ MAĐRALA¹

Abstrakt. Synklina grodziecka znajduje się na Pogórz Kaczawskim w pobliżu Bolesławca na Dolnym Śląsku. Początek wydobywania rud miedzi w kopalniach „Konrad” i „Lubichów” sięga początku lat 40. XX wieku. ZG „Konrad” zaprzęstała eksploatacji rud miedzi z końcem 1988 r. Łączna powierzchnia odwodnionych utworów środkowego cechsztynu wyniosła 29 km², a osadów czwartorzędowych około 64 km². Poziom środkowego cechsztynu ze względu na silne zawodnienie, spowodowane dobrymi właściwościami filtracyjnymi skał oraz łącznością hydrauliczną z poziomem czwartorzędowym, decydował o zawodnieniu wyrobisk górniczych i odbudowie zwierciadła wód podziemnych w drenowanych poziomach wodonośnych po zakończeniu eksploatacji. Systematyczny drenaż górotworu prowadzono wyprzedzającymi eksploatację otworami wiertniczymi wykonywanymi bezpośrednio z głównych wyrobisk. Likwidację kopalni „Konrad” rozpoczęto w 2001 roku poprzez zatopienie wyrobisk. W poziomie cechsztyńskim przed zatopieniem wyrobisk dominowały wody typu HCO₃–Ca–Mg i SO₄–Ca–Mg, natomiast po 2001 roku pojawia się trzeci typ SO₄–Cl–Na–K. W otworach ujmujących wody wyrobiska poziomu eksploatacyjnego 830 – AQ-1 i AQ-2 obserwowano znaczące obniżenie odczynu z początkowo alkalicznego (pH = 7,24) do słabo kwaśnego (pH = 5,29) oraz znaczący wzrost stężenia siarczanów oraz żelaza. Dla poziomu wodonośnego środkowego cechsztynu dodatkowym źródłem jonów SO₄²⁻ obok rozpuszczania gipsu i anhydrytu jest najprawdopodobniej proces utleniania siarczków miedzi i żelaza. W piezometrach ujmujących wody cechsztynu, położonych poza obszarem wyrobisk górniczych, zaobserwowano jedynie wyraźny wzrost alkaliczności wód spowodowany rozpuszczaniem węglanów.

Słowa kluczowe: odwodnienie kopalniane, odbudowa leja depresji, chemizm wód drenażowych, wskaźniki hydrochemiczne.

Abstract. The Grodziec Syncline is situated in the Kaczawskie Foothills near Bolesławiec in Lower Silesia. Copper ore mining activity in the “Konrad” and “Lubichów” mines began in the early 1940s. The “Konrad” mine stopped the copper ore exploitation at the end of 1988. The impact of long-term mining inflow resulted in the formation of a cone of depression in the Zechstein water-bearing horizon and indirectly in the Quaternary aquifer due to hydraulic connection. The total surface of the cone of depression in the in the Zechstein aquifer is 29 km², whereas in the Quaternary aquifer it is about 64 km². The most important role in the drainage of the “Konrad” mine was played by the Zechstein aquifer that is composed of porous-fractured-cavernous limestones. The “Konrad” mine closure began in 2001 and included two stages. During the mining activity, HCO₃–Ca–Mg and SO₄–Ca–Mg chemical water types were identified within the Zechstein carbonate-rock aquifer. After 2001, groundwater from old mineworking in the Zechstein aquifer observed at AQ-1 and AQ-2 piezometers and K-I and K-II mine shafts, became more acid and more contaminated by sulphates and iron. Oxidation of sulphides is the initial reaction of groundwater acidification, which is neutralized by limestone dissolution. At the piezometers located out of the mineworking area, groundwater quality changes in the Zechstein aquifer were not observed.

Key words: mining drainage, cone of depression, groundwater chemistry, ion ratios.

¹ Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: mariusz.madrala@ing.uni.wroc.pl

WSTĘP

Synklina grodziecka znajduje się na Pogórzu Kaczawskim w pobliżu Bolesławca na Dolnym Śląsku. Eksploatacji podlegały tutaj rudy miedzi występujące głównie w marglach i wapieniach marglistych cechsztynu. Początek wydobycia rud miedzi na tym obszarze sięga 1940 roku, w momencie uruchomienia szybu K-II kopalni „Konrad” (Awłasiewicz, 1964; Preidl i in., 1989). Z początkiem 1943 r. rozpoczęto głębienie szybu K-I kopalni „Konrad” oraz szybów L-I i L-II kopalni „Lubichów”. Katastrofalne wdarcia wody w roku 1944 spowodowały zatopienie szybów obu kopalni. W latach 50. przeprowadzono rekonstrukcję szybów kopalni „Konrad” i „Lubichów” oraz rozpoczęto eksploatację „Upadowej Grodziec”. W 1960 roku wszystkie kopalnie zostały połączone w Zakłady Górnicze „Konrad”. Kopalnia „Upadowa Grodziec” zakończyła eksploatację w 1973 r. W 1987 r. ZG „Konrad” zostały postawione w stan likwidacji jako kopalnia miedzi i zaprzestano eksploatacji z końcem 1988 r. W kopalni „Lubichów” w dalszym ciągu prowadzona jest eksploatacja gipsów i anhydrytów. W okresie 1956–1988 eksploatacja rud miedzi w kopalni „Konrad” prowadzona była na poziomach: 180, 240, 550, 650, 720 i 830 m, natomiast w kopalni „Lubichów” na poziomach: 115, 134, 213, 240 i 315 m. Po odtopieniu kopalni „Konrad”

w wyniku drenażu wyrobisk górniczych dopływ do kopalni wzrósł od 7 m³/min w 1952 r. do 46 m³/min w roku 1988. Po zaprzestaniu eksploatacji rud miedzi dopływy uległy nieznacznemu obniżeniu, osiągając w okresie 1997–2001 43 m³/min. W kopalni „Lubichów” najwyższe dopływy zanotowano w 1966 r. – 16 m³/min, a do roku 1988 ustabilizowały się na poziomie 5,4 m³/min. W latach 1997–2001 dopływ wynosił 3,4 m³/min. Łączna powierzchnia odwodnionych utworów środkowego cechsztynu wyniosła 29 km². Systematyczny drenaż poziomu wodonośnego środkowego cechsztynu spowodował także odwodnienie poziomu wodonośnego czwartorzędu na obszarze około 64 km².

Złoże miedzi w synklinie grodzieckiej tworzy seria marglisto-wapienna dolnego cechsztynu, o miąższości około 18 m. Głównymi minerałami złożowymi są: chalkozyn, bornit i chalkopiryt. Minerały tlenkowe i węglanowe miedzi występują przy wychodniach złoża w strefie utleniania (Preidl i in., 1989; Witczak, Piestrzyński, 1990). W kierunku upadu złoża obserwuje się wzrost zawartości żelaza w minerałach miedzionośnych. Występuje także strefowość minerałów w profilu pionowym. W spągowych partiach przeważa chalkozyn, wyżej bornit, a w partiach stropowych przeważają chalkopiryt i piryt.

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

ZG „Konrad” są położone na obszarze niecki grodzieckiej stanowiącej północno-wschodnie skrzydło synklinorium północnosudeckiego. Krystaliczne podłoże synkliny tworzą utwory starszego paleozoiku, a wypełniają ją osady permu, triasu i górnej kredy (Awłasiewicz, 1971, 1974; Piestrzyński, 1996). Utwory mezozoiczne i permskie przykrywają lodowcowe i fluwioglacjalne osady czwartorzędu (fig. 1, 2).

Pod względem hydrogeologicznym na obszarze synkliny grodzieckiej wyróżnić można trzy piętra wodonośne: czwartorzędowe, permskie i mezozoiczne (Awłasiewicz, 1971, 1974; Wilk i in, 1990; Wilk, Bocheńska, 2003). Piętro czwartorzędowe obejmuje wodonośne piaski i żwiry plejstocenu i holocenu zalegające bezpośrednio na skałach mezozoicznych (fig. 2). Utwory wodonośne czwartorzędu osiągają miąższość 17 m, przy czym żwiry o najwyższej wodoprzewodności zalegają bezpośrednio na skałach mezozoicznego podłoża lub są izolowane 7-metrowej miąższości glinami zwałowymi. Mezozoiczne piętro wodonośne tworzą trzy poziomy wodonośne: górnej kredy, wapienia muszlowego i pstrego piaskowca. Poziom wodonośny górnej kredy budują piaskowce pozostające w łączności hydraulicznej z zalegającymi bezpośrednio poniżej spękany wapieniami wapienia muszlowego. Ze względu na nieciągłe rozprzestrzenienie oraz niewielkie zawadnienie poziomy górnej kredy i wapienia muszlowego nie miały praktycznie wpływu na wielko-

ści dopływu wody do wyrobisk górniczych w okresie eksploatacji rud miedzi. Poziom wodonośny pstrego piaskowca stanowią drobnoziarniste piaskowce, o ciągłym rozprzestrzenieniu i znaczącej miąższości, stanowiące najzasobniejszy zbiornik wodonośny niecki grodzieckiej. Z uwagi na ilaste spoiwo tych utworów charakteryzują się one niskimi wartościami współczynnika filtracji oraz porowatości, co powodowało, że nie stwarzały zagrożenia wodnego dla kopalni miedzi. Większe dopływy z tego poziomu związane były jedynie z uprzywilejowanymi strefami uskokowymi. Permskie piętro wodonośne tworzą poziomy piaskowców czerwonego spągowca oraz poziomy wodonośny górnego i środkowego cechsztynu. Wody w utworach górnego cechsztynu występują w drobnoziarnistych piaskowcach oraz dolomicie kaczawskim. Piaskowce o ilastym spoiwie zalegają w nieciągły sposób bezpośrednio na wapieniach dolnego cechsztynu lub są od nich izolowane łupkami ilastymi. Osady te cechuje nieznaczna porowatość i niska wodoprzewodność. W trakcie prac górniczych i wiertniczych w utworach tych tylko sporadycznie stwierdzono wypływy osiągające maksymalnie kilkanaście dm³/min. Dolomit kaczawski, nazywany także płytowym, tworzą porowate i kawerniste wapienie i dolomity o średniej miąższości 10 m i współczynnika filtracji 2,68 m/d. Dolomit płytowy jest zasilany na wychodniach wodami z poziomu czwartorzędowego, a poprzez strefy tektoniczne również wodami pocho-

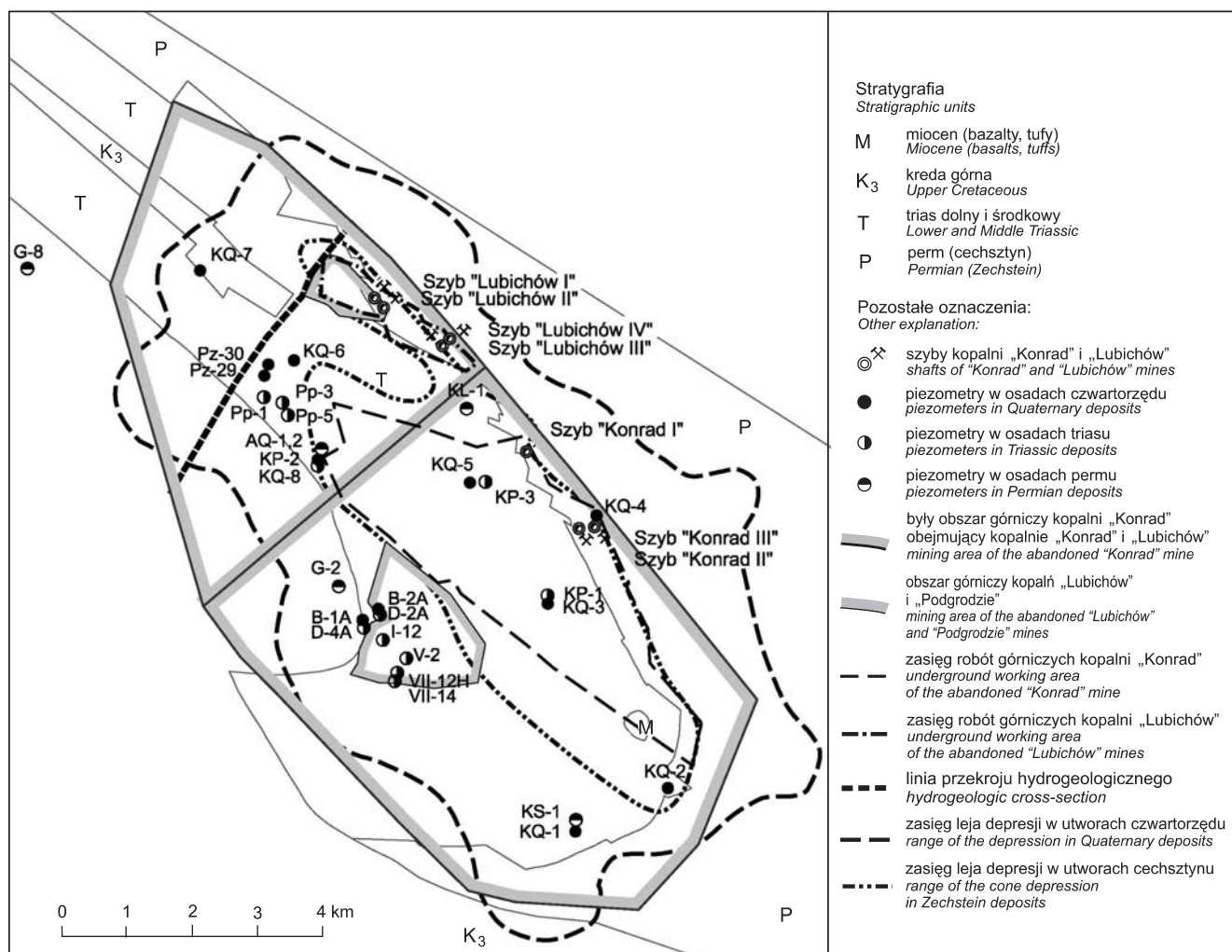


Fig. 1. Mapa geologiczna odkryta synkliny grodzieckiej

Geological map of the Grodziec Syncline without Quaternary deposits

dzącymi z utworów pstrego piaskowca. Poziom wodonośny środkowego cechsztyńskie reprezentują szczelinowate i kawerniste wapienie o średniej miąższości 30 m. Utwory węglanowe wykazują porowatość na poziomie 13,5%, a współczynnik filtracji waha się w przedziale 0,1–31,0 m/d. Poziom środkowego cechsztyńskie ze względu na silne zawodnienie, spowodowane dobrymi właściwościami filtracyjnymi skał oraz łączność hydrauliczną z poziomem czwartorzędowym, decydował o zawodnieniu wyrobisk górniczych i odbudowie zwierciadła wód podziemnych w drenowanych poziomach wodonośnych po zakończeniu eksploatacji. Piaskowce czerwonego spągowca ze względu na słabe właściwości filtracyjne nie miały większego znaczenia dla kształtowania dopływu do kopalni.

Obszar niecki grodzieckiej jest silnie zaangażowany tektonicznie. Uskokki o kierunku NW–SE spowodowały podzielenie osadów cechsztyńskich na szereg bloków wzajemnie po-

przesuwanych w pionie i poziomie. Tektonika dysjunktywna ma silny wpływ na system krążenia wód podziemnych, umożliwiając bezpośredni kontakt różnych poziomów wodonośnych lub warstw złożowych z utworami zawodnionymi.

Roboty górnicze prowadzone po rozciągłości złoża, z uwagi na duże zaangażowanie tektoniczne udostępniały nowe bloki złoża, doprowadzając do odwodnienia utworów środkowego cechsztyńskie i pozostających z nim w łączności hydraulicznej innych poziomów wodonośnych, szczególnie czwartorzędowego. Systematyczny drenaż górotworu prowadzono wyprzedzającymi eksploatacją otworami wiertniczymi, wykonywanymi bezpośrednio z głównych wyrobisk.

Likwidację kopalni „Konrad” rozpoczęto roku 2001 poprzez zatopienie wyrobisk w dwóch etapach. W pierwszym etapie wyłączono pompowanie na poziomie 830 i 650, a następnie w drugim etapie na poziomach 550 i 240. Po rozebraniu budynków nadszybi, szyby K-I i K-II przystosowano do

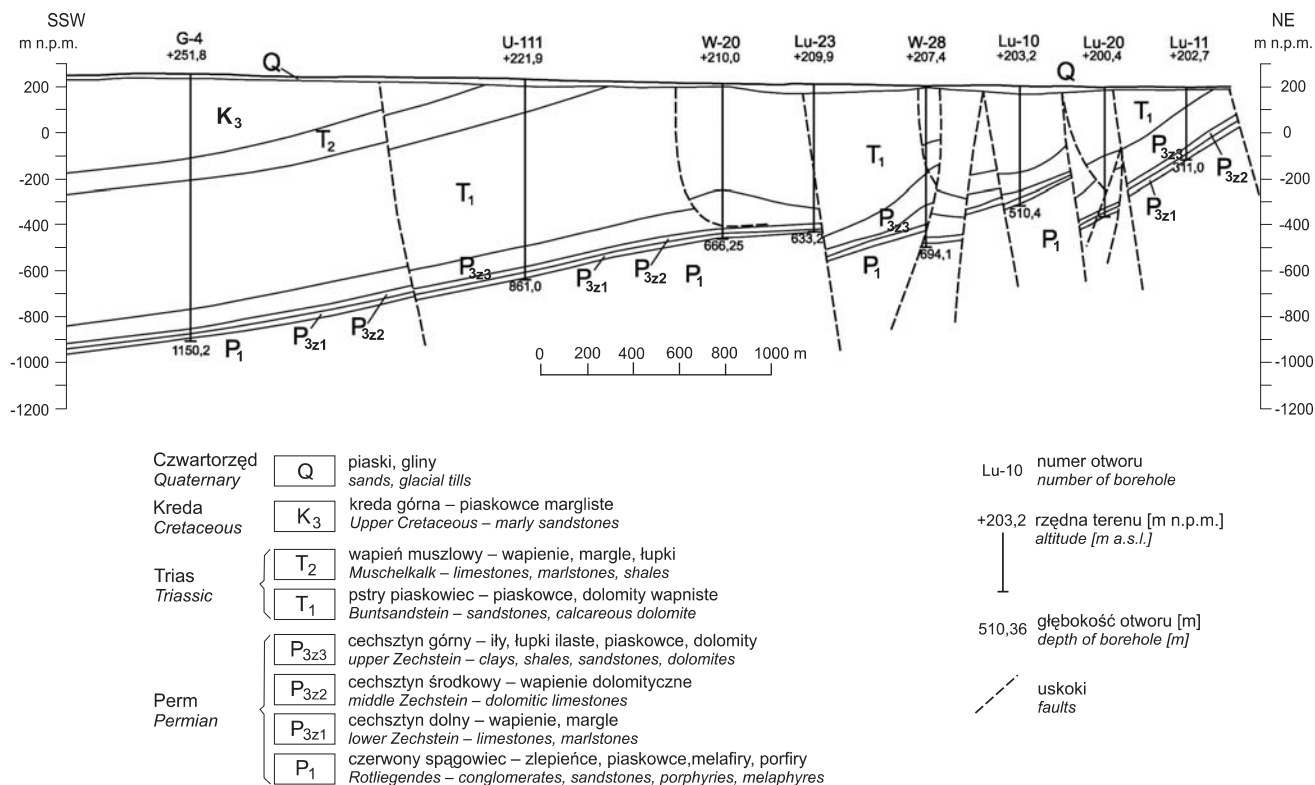


Fig. 2. Przekrój hydrogeologiczny przez synklinę grodziecką

Hydrogeological cross-section across the Grodziec Syncline

obserwacji położenia zwierciadła wód. W roku 2000, przed przystąpieniem do zatapiania wyrobisk cztery otwory drenażowe na poziomie 830 przyłączono do kolektora zbiorczego, który podłączono do dwóch otworów wiertniczych AQ-1

i AQ-2 wykonanych z powierzchni terenu. Otwory te miały stanowić ujęcie wód dla różnych odbiorców. Z uwagi na skokowy wzrost mineralizacji ujęcie wyłączono z eksploatacji w roku 2002.

HYDROGEOCHEMIA

CHARAKTERYSTYKA SKŁADU CHEMICZNEGO WÓD SYNKLINY GRODZIECKIEJ

Pierwsze informacje na temat początkowego chemizmu wód podziemnych na omawianym obszarze podaje Awłasiewicz (1964) na podstawie analiz z okresu 1957–1963. Wody z poziomu czwartorzędowego charakteryzowały się niską mineralizacją (278–561 mg/dm³), średnią twardością ogólną (3,1–6,57 meq/dm³) oraz słabo kwaśnym lub słabo zasadowym odczynem (pH = 6,5–7,7). W składzie jonowym dominowały HCO₃⁻, Ca²⁺ i Mg²⁺. Wody poziomu środkowoczechszyńskiego wykazywały niską mineralizację, podwyższoną twardość (2,5–14 meq/dm³) i słabo zasadowy odczyn. W wodach dominowały głównie jony SO₄²⁻, HCO₃⁻, Ca²⁺. Zupełnie odmienny chemizm wykazywały wody górnego

cechsztynu, szczególnie pod względem podwyższonej mineralizacji (2163–3932 mg/dm³) i bardzo wysokiej twardości (27,3–31,5 meq/dm³). Były to wody o dominującym udziale SO₄²⁻, Ca²⁺, Na⁺ lub Mg²⁺. Należy zauważyć, że wody poziomu górnoczechszyńskiego nigdy nie były odwadniane bezpośrednio otworami drenażowymi.

Do charakterystyki składu chemicznego wód drenażowych środkowego czechsztynu, przed likwidacją wyrobisk kopalnianych, wykorzystano wyniki analiz chemicznych z prac Świdorskiej-Bróż (1987, 1989) oraz Kijewskiego i inych (1997). Chemizm wód w okresie 2003–2009 przedstawiono na podstawie wyników analiz chemicznych prób wody, z monitoringu wód podziemnych prowadzonego przez KGHM Cuprum Sp. z o.o. – CBR w związku z zatapianiem kopalni „Konrad”. Wskaźniki nasycenia obliczone zostały przy użyciu programu

PHREEQC (Parkhurst, Appelo, 1999). Do wyznaczenia typów hydrochemicznych wód podziemnych wykorzystano klasyfikację Monitiona.

W wodach poziomu czwartorzędowego dominują wody czterojonowe typu $SO_4-HCO_3-Ca-Mg$, $HCO_3-SO_4-Na-Ca$, lub $HCO_3-SO_4-Ca-Mg$ o podwyższonej mineralizacji i obni-

żonym do kwaśnego lub słabo kwaśnego odczynu. Najszybciej zmiany te zaobserwowano w piezometrach KQ-7, KQ-1, KQ-2 położonych w strefie peryferyjnej leja depresji utworów czwartorzędowych. Chemizm tych wód przedstawiono za pomocą diagramu Pipera i formuły Kurlowa (fig. 3, tab. 1). Natomiast wody poziomu triasowego wykazują typ $HCO_3-Ca-Mg$,

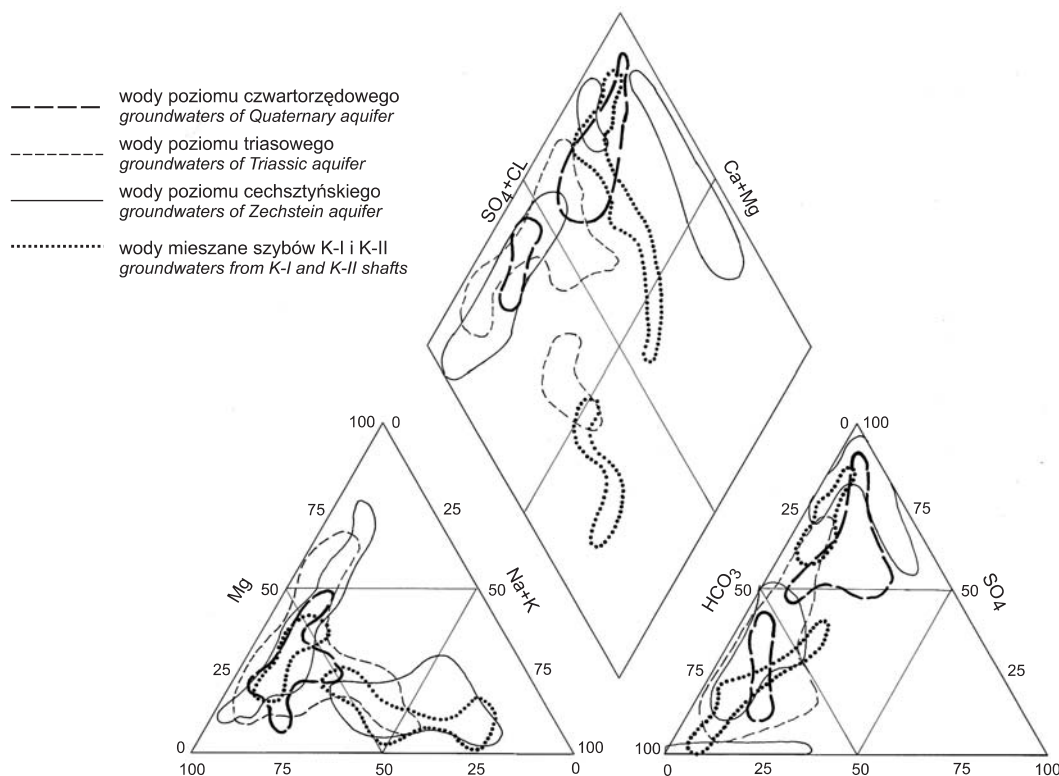


Fig. 3. Diagram Pipera – skład jonowy wybranych poziomów wód podziemnych synkliny grodzieckiej po zatopieniu wyrobisk górniczych

Piper diagram for the Grodziec Syncline groundwaters after mine flooding

Tabela 1

Skład jonowy wybranych poziomów wód podziemnych synkliny grodzieckiej po zatopieniu wyrobisk górniczych

Chemical properties and major constituents of groundwater in the Grodziec Syncline after “Konrad” Mine flooding

Poziomy wodonośne	Formuła Kurlowa
Czwartorzęd	$Fe^{0,05-11,2}M^{0,7-9,5} \frac{HCO_3^{5-71}SO_4^{12-89}Cl^{5-31}}{Ca^{40-71}Mg^{9-46}Na^{5-35}}$
Trias	$Fe^{0,04-80,1}M^{1,1-2,1} \frac{HCO_3^{23-85}SO_4^{8-69}Cl^{2-32}}{Ca^{22-80}Mg^{8-65}K^{0,5-37}Na^{2-33}}$
Cechsztyn środkowy (do 2001 r.)	$Fe^{0,01-0,13}M^{2,6-15,9} \frac{SO_4^{11-83}HCO_3^{15-82}Cl^{2-20}}{Ca^{18-85}Mg^{11-75}}$
Cechsztyn środkowy (po 2001 r.)	$Fe^{0,01-56,8}M^{6,4-27,2} \frac{HCO_3^{2-99}SO_4^{0,3-94}Cl^{0,4-42}}{Na^{3-92}Ca^{2-79}Mg^{1-41}K^{2-40}}$
Poziom wód mieszanych (K-I, K-II)	$Fe^{0,1-51,4}M^{0,88-2,6} \frac{HCO_3^{9-91}SO_4^{3-86}Cl^{3-22}}{Ca^{1-72}K^{1-60}Na^{7-57}Mg^{0,5-39}}$

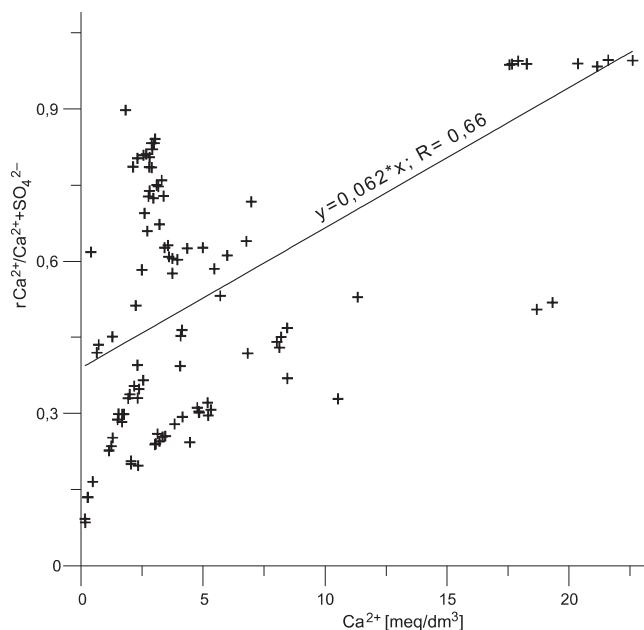


Fig. 4. Zależność wskaźnika $r \frac{Ca^{2+}}{Ca^{2+}+SO_4^{2-}}$ od stężeń Ca^{2+} w wodach poziomu środkowego cechsztyńskiego po zatopieniu wyrobisk górniczych

Relationship between $r \frac{Ca^{2+}}{Ca^{2+}+SO_4^{2-}}$ value and Ca^{2+} in groundwater of the Zechstein aquifer after mine flooding

SO_4 -Cl-Ca-Mg oraz podrzędnie HCO_3 - SO_4 -Na-Ca. Mineralizacja zmienia się w przedziale 114–1208 mg/dm³, natomiast odczyn waha się od słabo kwaśnego do słabo alkalicznego. W wodach poziomu cechsztyńskiego przed zatopieniem wyrobisk dominowały wody typu HCO_3 -Ca-Mg i SO_4 -Ca-Mg, natomiast po 2001 roku pojawia się trzeci typ SO_4 -Cl-Na-K. W otworach ujmujących wody wyrobiska poziomu eksploatacyjnego 830 – AQ-1 i AQ-2 obserwujemy znaczące obniżenie odczynu, z początkowo alkalicznego do kwaśnego, oraz znaczący wzrost stężenia siarczanów oraz żelaza (fig. 4). W prawie wszystkich otworach daje się zauważyć znaczący wzrost mineralizacji wód powyżej dwóch tysięcy mg/dm³.

Osobnego omówienia wymagają wody występujące w szybach K-I i K-II, w których występują wody mieszane wszystkich poziomów wodonośnych. Ma to swoje odzwierciedlenie w dominujących typach wód: SO_4 -Ca-Mg, SO_4 -Na-K oraz HCO_3 -Na-K lub HCO_3 -Na-Ca. Mineralizacja osiąga maksymalnie 2056 mg/dm³, a wody ulegają silnej alkalizacji (pH = 11,72).

PRÓBA INTERPRETACJI ZMIENNOŚCI MINERALIZACJI WÓD POZOSTAJĄCYCH POD WPLYWEM DRENAŻU GÓRNICZEGO

Na podstawie wartości wskaźników $r \frac{Na^+}{Cl^-}$ i $r \frac{Na^+ + K^+}{Cl^-}$ można przyjąć, że chemizm wód z utworów triasu i permu – cechsztynu (do 2001 roku) kształtował się w strefie aktyw-

nej wymiany wód z wodami opadowymi (tab. 2). Po zaprzestaniu odwodnienia, wartości wskaźnika $r \frac{Na^+}{Cl^-}$ wskazywały, że w wodach poziomu cechsztyńskiego mamy do czynienia ze stagnacją dynamiczną i hydrochemiczną, a w przypadku poziomu czwartorzędowego ze strefą mieszania się wód (utrudnionej wymiany). Zwiększenie udziału w składzie jonowym wód stężeń Na^+ jest najprawdopodobniej wynikiem procesu wymiany jonowej Ca^{2+} na Na^+ (Appelo, Postma, 2005). Znaczenie procesu wymiany jonowej dla kształtowania składu chemicznego wód pozostających pod wpływem odwodnienia potwierdzają wartości wskaźnika $r \frac{Na^+}{Na^+ + Cl^-} > 0,5$ (Hounslow, 1995).

Dla wód poziomu cechsztyńskiego obliczone wartości wskaźnika $r \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$ wynoszą powyżej 0,5. W przypadku wód tego poziomu przed rokiem 2001, wartości wskaźników nasycenia dla kalcytu ($-2,8 < SI < 0,16$) i dolomitu ($-6,96 < SI < 0,2$) wskazują na stan nienasycenia. Podobnie obserwuje się w otworach AQ-1, AQ-2 (po roku 2001), gdzie wartości $-2,86 < SI_{kal} < -0,31$ a $-6,23 < SI_{dol} < -0,51$, natomiast w pozostałych piezometrach cechsztyńskich stwierdza się częściowy stan nasycenia w stosunku do wspomnianych faz mineralnych. W wodach poziomu czwartorzędowego i triasowego wartości wskaźnika $r \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} > 0,5$

charakteryzują proces wietrzenia minerałów krzemianowych (Hounslow, 1995). Z kolei wartości wskaźników $r \frac{Ca^{2+}}{SO_4^{2-}}$ oraz $r \frac{Ca^{2+}}{Ca^{2+} + SO_4^{2-}}$ (tab. 2) sugerują potencjalnie inne źródło siarczanów w wodach niż rozpuszczanie gipsów i anhidrytów (Hounslow, 1995). Pomimo wartości wskaźników $r \frac{Ca^{2+}}{Ca^{2+} + SO_4^{2-}}$ i $r \frac{SO_4^{2-} * 100}{Cl^-}$ sugerujących brak rozpuszczania siarczanów (tab. 2) proces taki jest jednak wysoce prawdopodobny. Przemawiają za tym wskaźniki nasycenia SI względem siarczanów wykazujące dla wód wszystkich poziomów stan nienasycenia ($2,86 < SI_{gips} < -0,13$; $6,09 < SI_{anh} < -0,63$), a w przypadku poziomu wód środkowego cechsztynu także wysoki współczynnik korelacji pomiędzy $r \frac{Ca^{2+}}{Ca^{2+} + SO_4^{2-}}$ i Ca^{2+} (fig. 4).

Dla poziomu wodonośnego środkowego cechsztynu dodatkowym źródłem jonów SO_4^{2-} jest najprawdopodobniej proces utleniania siarczków miedzi i żelaza współwystępujących w złożu, co tłumaczyłoby także podwyższenie stężeń żelaza (fig. 5). Utlenianie siarczków prowadzi do powstania silnie zakwaszonych wód na obszarach eksploatacji rud polimetalicznych, określanymi terminem – kwaśny drenaż górniczy (ang. *Acid Mine Drainage* – AMD) (Wolkersdorfer, 2008). Utlenianie pirytu zachodzi w obecności utleniaczy, wśród których najpowszechniejszym w środowisku wód podziemnych jest tlen (fig. 6). Powszechna obecność tlenu w wodach drenażowych związana jest z wymuszoną

Tabela 2

Wartości średnie i odchylenia standardowe głównych jonów i wskaźników hydrochemicznych wód podziemnych synkliny grodzieckiej po zatopieniu wyrobisk górniczych

Mean and standard deviation values of major constituents and ion ratios in groundwater of the Zechstein aquifer after mine flooding

Zmienna	Wody mieszane (po 2001 r.) (n = 42)		Cechsztyń środkowy (do 2001 r.) (n = 43)		Cechsztyń środkowy (po 2001 r.) (n = 63)		Trias (po 2001 r.) (n = 68)		Czwartorzęd (po 2001 r.) (n = 37)	
	średnia	odchylenie standardowe	średnia	odchylenie standardowe	średnia	odchylenie standardowe	średnia	odchylenie standardowe	średnia	odchylenie standardowe
% Ca ²⁺	44,011	22,210	54,196	15,759	43,127	22,193	53,661	13,601	56,922	9,398
% Mg ²⁺	19,600	12,280	34,743	15,634	16,879	8,651	29,048	13,804	28,138	10,080
% Na ⁺	18,776	14,080	9,269	3,132	31,310	25,086	11,935	7,150	11,243	6,336
% K ⁺	17,613	19,535	1,792	0,748	8,684	10,988	5,356	8,276	3,698	3,249
% HCO ₃ ⁻	37,719	22,717	55,760	18,491	35,834	36,959	54,167	14,765	37,061	20,566
% Cl ⁻	8,542	4,393	6,631	4,061	15,073	11,096	12,001	6,789	14,403	8,052
% SO ₄ ²⁻	53,739	24,741	37,609	20,196	49,092	36,897	33,833	16,267	48,536	20,404
r Na ⁺ /Na ⁺ +Cl ⁻	0,653	0,088	0,603	0,642	0,090	0,219	0,491	0,164	0,464	0,068
r Na ⁺ /Cl ⁻	2,092	0,874	1,697	0,868	3,100	2,656	1,290	1,168	0,895	0,240
r Na ⁺ +K ⁺ /Cl ⁻	3,921	2,677	2,047	1,034	4,055	3,498	1,699	1,501	1,183	0,366
r Ca ²⁺ /Ca ²⁺ +SO ₄ ²⁻	0,435	0,190	0,604	0,149	0,503	0,318	0,621	0,135	0,572	0,114
SO ₄ ²⁻ *100/Cl ⁻	837,243	600,629	929,319	973,849	496,174	583,409	443,766	417,750	471,580	342,639
r Ca ²⁺ /SO ₄ ²⁻	1,196	1,910	1,952	1,273	24,301	53,259	2,220	2,093	1,564	0,925
r Ca ²⁺ /Ca ²⁺ +Mg ²⁺	0,682	0,124	0,609	0,700	0,171	0,111	0,655	0,138	0,673	0,106
r Mg ²⁺ +Ca ²⁺ /SO ₄ ²⁻	1,639	2,438	3,197	1,830	31,144	66,679	3,406	2,995	2,431	1,662
r Mg ²⁺ /Mg ²⁺ +Ca ²⁺	6,116	3,662	5,790	3,857	7,117	6,491	5,130	2,835	4,617	2,039

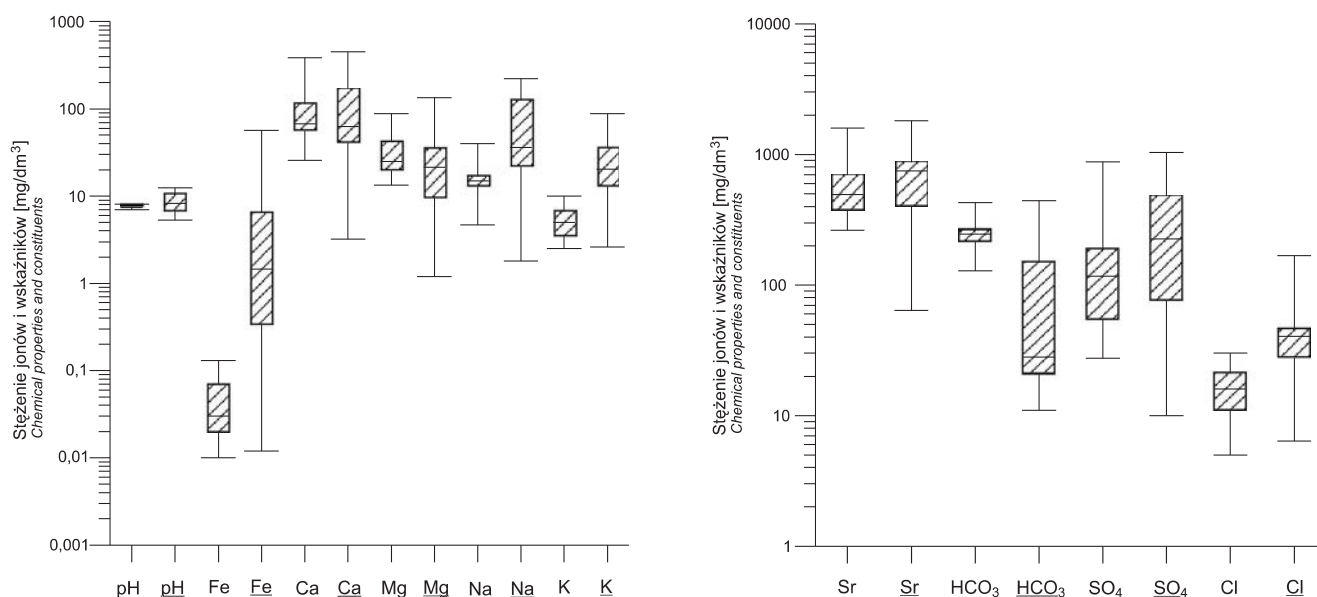


Fig. 5. Wykres zmienności stężeń składników jonowych i właściwości hydrochemicznych wód poziomu środkowego cechsztynu

Na wykresach przedstawiono wartości minimum–maksimum, pierwszego (25%) i trzeciego (75%) kwartyla oraz mediany. Wartości podkreślone odpowiadają okresowi po 2001 roku

Statistical parameters of chemical properties and constituents in groundwaters of the Zechstein aquifer

Diagrams showing minimum–maximum values, 1st and 3rd quartile values and median value. Underlined properties and constituents refer to the period after 2001

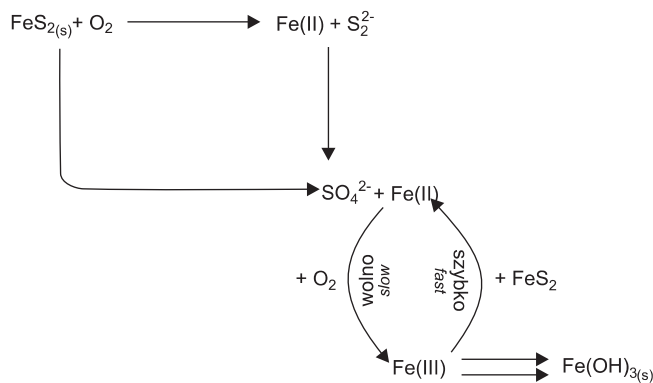
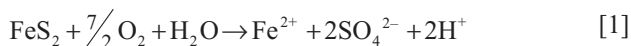


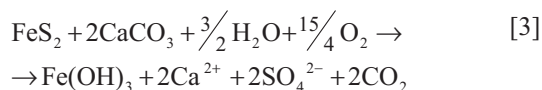
Fig. 6. Schemat przebiegu abiotycznego utleniania siarczków (wg Wolkersdorfera, 2008)

Schematic representation of the pathways during abiotic disulphide oxidation (after Wolkersdorfer, 2008)

cyrkulacją powietrza w wyrobiskach kopalnianych oraz wzruszeniem górotworu na skutek prac górniczych. Utlenianie siarczków żelaza powoduje wzrost stężeń żelaza i siarczanów w wodzie – utlenianie niecałkowite [1] lub jedynie siarczanów, gdy żelazo wytrąca się w formie tlenowodorotlenku – utlenianie całkowite [2] (Appelo, Postma, 2005):



Powyższe reakcje prowadzą do znacznego obniżenia odczynu wód, co wykazały analizy wód w piezometrach AQ-1 i AQ-2. Jeśli w środowisku geologicznym znajdują się minerały węglanowe, procesy utleniania pirytu powodują ich rozpuszczanie według reakcji [3]:



W środowisku buforowanym przez rozpuszczanie węglanów odczyn pH roztworu obniża się maksymalnie do wartości 5 (fig. 7). Wolkersdorfer (2008) podaje, że w przypadku mieszaniny węglanów możliwe jest buforowanie pH wód w granicach 4,8–6,5, natomiast dla dolomitu lub kalcytu pH roztworu waha się 6,5–7,5. Należy jednak podkreślić, że obniżonego odczynu nie obserwuje się w szybach K-I i K-II oraz piezometrach poziomu cechsztyńskiego KL-1, KS-1, G-2 i G-5 (fig. 1). Wręcz przeciwnie, wody w tych otworach stają się alkaliczne, maksymalnie pH osiąga wartości 9–12. Przyczyną tego procesu jest prawdopodobnie wysycenie wód względem węglanów ($\text{SI}_{\text{kal,max}} = 3,94$, $\text{SI}_{\text{dol,max}} = 1,39$) co

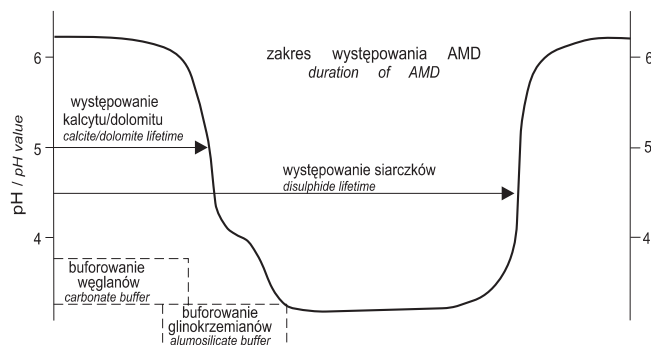


Fig. 7. Schemat procesu obniżania odczynu wód kopalnianych na skutek utleniania siarczków w obecności węglanów i glinokrzemianów (wg Wolkersdorfera, 2008)

Potential development of pH of a mine water in a mine with more disulphides than carbonates (after Wolkersdorfer, 2008)

spowodowało pojawienie się zasadowości F i jednocześnie brak występowania AMD. Fakt ten spowodowany jest położeniem piezometrów poza obszarem prac górniczych kopalni „Konrad” i jednocześnie blokadą budową geologiczną złoża, co znacznie ograniczyło oddziaływanie AMD. W przypadku szybów K-I i K-II, gdzie mieszają się wody wszystkich poziomów i ulegają stagnacji hydrodynamicznej, chemizm kształtowany jest jedynie pod wpływem dyfuzji składników. Dlatego istotne znaczenie ma głębokość poboru wód, bo wpływa na uzyskane w analizie chemicznej wartości.

Jak wskazują pomiary położenia zwierciadła wód prowadzone w piezometrach czwartorzędowych KQ1-KQ-8, Pz-29, Pz-30 oraz triasowych Pp-1-Pp-3, Pp-5, KP-1-KP-3 (fig. 1), po zaprzestaniu odwodnienia kopalni „Konrad” nie zaobserwowano dotychczas odbudowy zwierciadła wody związanej z zatapianiem wyrobisk górniczych (Kisielewicz i in., 2007). Prawdopodobnie odbudowa wytworzonego leja depresji będzie wydłużona w czasie ze względu na skomplikowaną budowę geologiczną o dużym zaangażowaniu tektonicznym. Zatem obserwowane w niektórych piezometrach zmiany w chemizmie wód poziomu czwartorzędowego, takie jak obniżenie odczynu do $\text{pH} = 5,29\text{--}6,47$ oraz wzrost stężeń siarczanów, maksymalnie do 360 mg/dm^3 , prawdopodobnie nie są spowodowane oddziaływaniem zatapianych wyrobisk górniczych. Wspomniane zmiany chemizmu należy łączyć z procesami utleniania substancji organicznej, wskutek długotrwałego odwodnienia utworów czwartorzędowych. Utlenianie substancji organicznej pociąga za sobą również utlenianie siarczków, a w konsekwencji obniżenie odczynu i wzrost stężeń siarczanów (Górski, 1981).

PODSUMOWANIE

1. Początek wydobycia rud miedzi na tym obszarze sięga początku lat 40. XX wieku. ZG „Konrad” zaprzestały eksploatacji rud miedzi z końcem 1988 r. po 36 latach działalności. W tym okresie dopływ do wyrobisk górniczych wahał się od 7 m³/min w 1952 r. do 43 m³/min w roku 2001. Łączna powierzchnia odwodnionych utworów środkowego cechsztynu wyniosła 29 km², a osadów czwartorzędowych około 64 km².

2. Pod względem hydrogeologicznym na obszarze synkliny grodzieckiej wyróżnić można trzy piętra wodonośne: czwartorzędowe, mezozoiczne i permskie. Piętro czwartorzędowe z luką sedimentacyjną zalega bezpośrednio na skałach mezozoiku i permu. Poziomy wodonośny piętra mezozoicznego oraz czerwonego spągowca ze względu na niską wodoprzewodność i porowatość, słabe rozprzestrzenienie lub izolację utworami słabo przepuszczalnymi nie odgrywały istotnej roli w kształtowaniu wielkości dopływu wody do wyrobisk górniczych. Decydujące znaczenie dla wielkości zawodnienia wyrobisk i stopnia zagrożenia prowadzonych robót górniczych stanowi poziom wodonośny środkowego cechsztynu zbudowany ze spękanych i kawernistych wapieni.

3. Złoże miedzi w synklinie grodzieckiej tworzy seria marglisto-wapienna dolnego cechsztynu o miąższości około 18 m. Głównymi minerałami złożowymi są: chalkozyn, bornit i chalkopiryt. W kierunku upadu złoża obserwuje się wzrost zawartości żelaza w minerałach miedzionośnych.

4. Roboty górnicze udostępniały poszczególne bloki złoża, prowadząc do odwodnienia utworów środkowego

cechsztynu i pozostających z nim w łączności hydraulicznej innych poziomów wodonośnych. Systematyczny drenaż górotworu prowadzono wyprzedzającymi eksploatację otworami wiertniczymi, wykonywanymi bezpośrednio z głównych wyrobisk. Likwidację kopalni „Konrad” rozpoczęto w 2001 roku poprzez zatopienie wyrobisk w dwóch etapach. W pierwszym etapie wyłączono pompowanie na poziomach 830 i 650, a następnie w drugim etapie na poziomach 550 i 240.

5. Zmiany w chemizmie wód pod wpływem zatapiania kopalni „Konrad”, polegające na obniżeniu odczynu i wzroście stężenia siarczanów, zaobserwowano jedynie w piezometrach AQ-1 i AQ-2 ujmujących wody cechsztynu ze starych wyrobisk. W piezometrach ujmujących wody cechsztynu położonych poza obszarem wyrobisk górniczych, zaobserwowano wyraźny wzrost alkaliczności wód spowodowany rozpuszczaniem węglanów.

6. Zmiany w chemizmie wód w utworach czwartorzędowych należy łączyć z procesami utleniania substancji organicznej wskutek długotrwałego odwodnienia utworów czwartorzędowych. Utlenianie substancji organicznej pociąga za sobą również utlenianie siarczków, a w konsekwencji obniżenie odczynu do pH = 5,29–6,47 i wzrost stężeń siarczanów do 360 mg/dm³.

Podziękowania. Autor wyraża serdeczne podziękowanie panom mgr inż. Zbigniewowi Kisielewiczowi i mgr inż. Sławomirowi Cyganowi za udzieloną pomoc w trakcie przygotowania tego artykułu.

LITERATURA

- APPELO C.A.J., POSTMA D., 2005 — Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- AWŁASIEWICZ R., 1964 — Dokumentacja hydrogeologiczna złoża rud miedzi niecki grodzieckiej. Arch. PG Kraków.
- AWŁASIEWICZ R., 1971 — Charakterystyka hydrogeologiczna i geologiczno inżynierska niecki grodzieckiej. W: Monografia przemysłu miedziowego w Polsce, t. 1. Wyd. Geol., Warszawa.
- AWŁASIEWICZ R., 1974 — Krążenie i zasoby wód podziemnych obszaru synkliny grodzieckiej na Dolnym Śląsku [praca doktorska]. Arch. AGH, Kraków.
- HOUNSLOW W., 1995 — Water quality data. Lewis Publ., New York.
- GÓRSKI J., 1981 — Kształtowanie jakości wód podziemnych utworów czwartorzędowych w warunkach naturalnych oraz wymuszonych eksploatacją. Inst. Kształtowania Środowiska, Warszawa.
- KIJEWSKI P. i inni, 1999 — Badania geochemiczne i izotopowe wody oraz mineralogiczna charakterystyka procesów utleniania skał w wyrobiskach byłej kopalni Konrad. Arch. CBPM „Cuprum” Sp. z o.o., Wrocław.
- KISELEWICZ i inni, 2007 — Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z zakończeniem odwadniania likwidowanych zakładów górniczych miedzi „Konrad” w Iwinach k/ Bolesławca. Arch. KGHM Cuprum Sp. z o.o., Centrum Badawczo-Rozwojowe.
- 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: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259.
- PIESTRZYŃSKI A. (red.), 1996 — Monografia KGHM Polska Miedź S.A. Wyd. CPBM Cuprum Sp. z o.o., Wrocław.
- PREIDL M. i inni, 1989 — Dodatek nr 3 do dokumentacji geologicznej złoża rud miedzi niecki grodzieckiej. Materiały niepublikowane. Arch. PG, Kraków.
- ŚWIDERSKA-BRÓŹ, M., 1987 — Badania zmian składu-chemicznego i bakteriologicznego wód kopalnianych ZG. „Konrad”. Arch. Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr., raport seria SPR.
- ŚWIDERSKA-BRÓŹ, M., 1989 — Badania nad zawartością chromu w próbkach wód dostarczonych przez KGH Z.G. Konrad. Arch. Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr., raport seria SPR.
- WILK Z., ADAMCZYK A.F., NAŁĘCKI T., 1990 — Wpływ działalności górnictwa na środowisko wodne w Polsce. Wyd. SGGW-AR, Warszawa.

WILK Z., BOCHENSKA T. (red), 2003 — Hydrogeologia polskich złóż kopalin i problemy wodne górnictwa. Tom 2. Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.

WITCZAK S., PIESTRZYŃSKI A., 1990 — Możliwość uzdatniania wody kopalnianej do celów pitnych ze szczególnym uwzględnie-

niem zawartości chromu. Arch. Katedry Hydr. i Geol. Inż. AGH, Kraków.

WOLKERSDORFER CH., 2008 — Water management at abandoned flooded underground mines. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

SUMMARY

The Grodziec Syncline is situated in the Kaczawskie Foothills near Bolesławiec in Lower Silesia. Copper ore mining activity in the “Konrad” and “Lubichów” mines began in the early 1940s. After catastrophic mine floods in 1944, copper exploitation restarted in 1953. The „Konrad” mine stopped the copper ore exploitation at the end of 1988 after 36 years of activity. In that period, the drainage rate from excavation fluctuated from 7 m³/min in 1952 to 43 m³/min in 2001. The impact of long-term mining inflow resulted in the formation of a cone of depression in the Zechstein water-bearing horizon and indirectly in the Quaternary aquifer due to hydraulic connection. The total surface of the cone of depression in the Zechstein aquifer is 29 km², whereas in the Quaternary aquifer it is about 64 km². There are Quaternary, Permian and Mesozoic multiaquifer formations in the hydrogeological profile of the Grodziec Syncline. The Quaternary aquifer is located directly in the area of Permian and Mesozoic outcrops. Because of low permeability and porosity, as well as small extents, the Cretaceous, Triassic and Rotliegend aquifers did not significantly influence the mine inflow. The most important role in the drainage of the “Konrad” mine was played by the Zechstein aquifer that is composed of 18-m thick porous-fractured-cavernous lime-

stones. The average porosity value of the Zechstein water-bearing horizon is 13.5% whereas hydraulic conductivity varies from 0.1 to 31 m/d. Copper ore deposits contain abundant chalcocite, bornite and chalcopyrite. Drainage boreholes at the excavation levels were located directly on the contour of the deposit opening. Their main minerals are chalcocite, bornite and chalcopyrite. Generally, the content of iron in cupriferous minerals of the ore deposit increases with depth. The “Konrad” mine closure began in 2001 and included two stages. During the first stage the dewatering pumps were switched off on 830 and 650 excavations levels and during the second stage on 550 and 240 excavations levels. During the mining activity, HCO₃-Ca-Mg and SO₄-Ca-Mg chemical water types were identified within the Zechstein carbonate-rock aquifer. After 2001, mine water from old mineworkings observed at AQ-1 and AQ-2 piezometers and K-I and K-II mine shafts, became more acid and more contaminated by sulphates and iron. Weathering of sulphide and especially oxidation of pyrite are the initial reactions in the formation of acid mine drainage, which is neutralized by limestone dissolution. At the piezometers located out of the mineworking area, groundwater quality changes in the Zechstein aquifer were not observed.