

ZAGADNIENIE DRENAŻU KWAŚNYCH WÓD NA TERENACH PO EKSPLOATACJI WĘGLA BRUNATNEGO – ŁUK MUŻAKOWA

ACID MINE DRAINAGE WITHIN THE ABANDONED LIGNITE MINING AREA – MUSKAU ARCH

SYLWIA SKOCZYŃSKA-GAJDA¹, KRZYSZTOF LABUS¹

Abstrakt. W wyniku eksploatacji węgla brunatnego prowadzonej na obszarze Łuku Mużakowa powstała grupa sztucznych zbiorników wodnych, których skład chemiczny jest konsekwencją wietrzenia pirytu (FeS_2), obecnego w węglonośnych utworach mioceńskich. Proces ten prowadzi do formowania zjawiska drenażu kwaśnych wód (AMD – *Acid Mine Drainage*) i w efekcie do zakwaszenia wód zbiorników. W artykule przedstawiono rezultaty interpretacji procesów hydrogeochemicznych, przebiegających w środowisku wybranego zbiornika wodnego zlokalizowanego w rejonie Łęknicy.

Słowa kluczowe: drenaż kwaśnych wód, Łuk Mużakowa.

Abstract. As a result of exploitation of lignite within the territory of Muskau Arch – the group of artificial lakes was formed. The chemistry of their waters is a consequence of Acid Mine Drainage (AMD). AMD starts from the intensive weathering of pyrite (FeS_2), that is present in miocene lignite-bearing rock forming the banks of the lakes. Finally this process leads to heavy acidification of the water. This paper, presents an interpretation of hydrogeochemical processes that have impact on the certain reservoir, situated within the discussed area.

Key words: acid mine drainage, Muskau Arch.

WPROWADZENIE

W wyniku działalności górniczej, prowadzonej w rejonie Łuku Mużakowa od połowy XIX w. do roku 1974, doszło do przeobrażenia środowiska naturalnego tego obszaru. Sposób prowadzenia eksploatacji węgla brunatnego uwarunkowany był w dużej mierze budową geologiczną regionu. Łuk Mużakowski został utworzony przez nasuwający się łob łądłodu południowopolskiego i przemodelowany w wyniku działalności glacialnej łądłodu środkowopolskiego. Na skutek zaburzeń glacitektonicznych węgle brunatne, zalegające w osadach miocenu na znacznych głębokościach (100–200m), zostały wypiętrzone ku powierzchni, tworząc glacitektoniczne struktury fałdowe, fałdowo-łuskowe i porwakowe (fig. 1).

Stworzyło to dogodne warunki do pozyskiwania surowca metodą odkrywkową. W wyniku eksploatacji powstał największy w Polsce zespół sztucznie utworzonych zbiorników wodnych zwany w literaturze „pojezierzem antropogenicznym” (Jędrzak, 1992; Wróbel, 1997; Asani, Kołodziejczyk, 2006; Jachimko, 2007), który ze względu na walory przyrodnicze i krajobrazowe został objęty ochroną. Skład chemiczny wód utworzonych w ten sposób jezior znacznie odbiega od przeciętnego składu naturalnych wód powierzchniowych w naszym kraju. Jest on formowany wskutek przedostawania się do wód produktów wietrzenia pirytu (FeS_2), obecnego w utworach mioceńskiej formacji węglonośnej (Labus, Mro-

¹ Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Instytut Geologii Stosowanej, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 2;
e-mail: sylwia.skoczynska-gajda@polsl.pl; klabus@polsl.pl

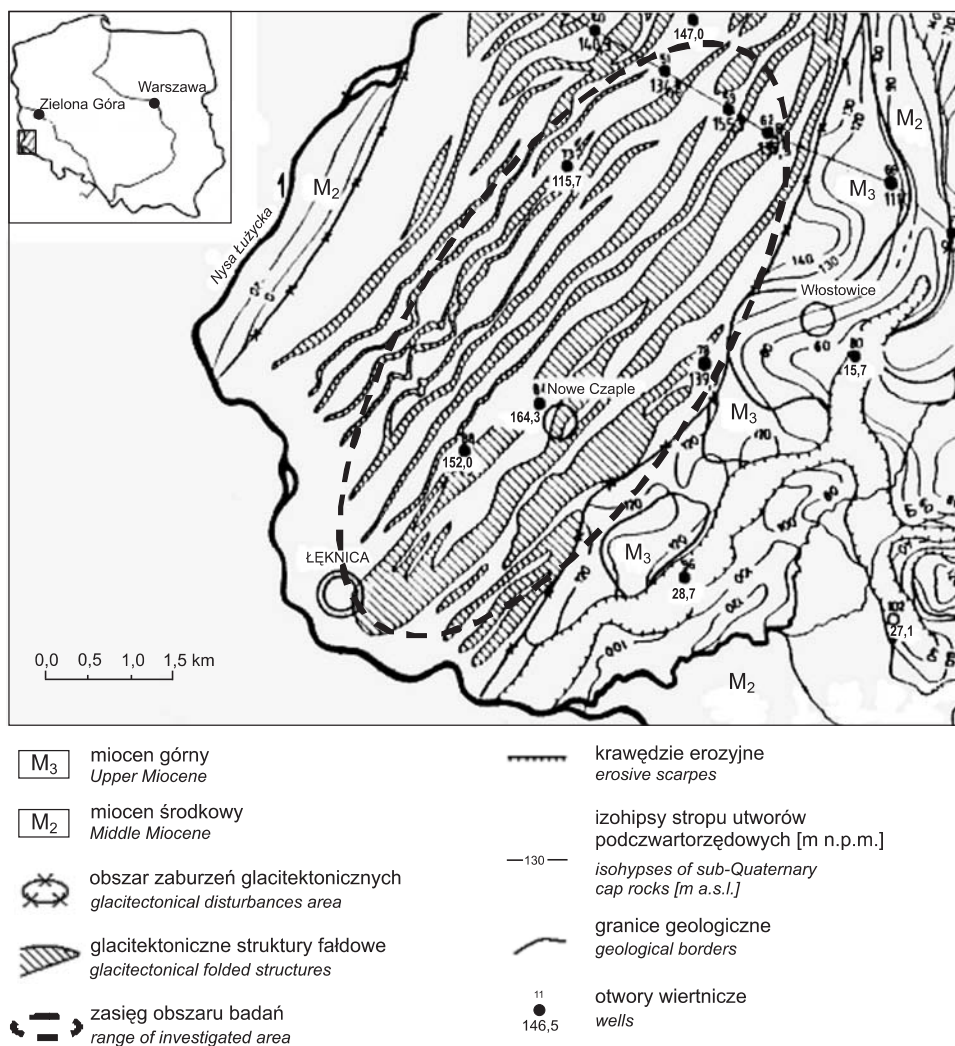


Fig. 1. Szkic geologiczny odkryty analizowanego obszaru (wg Bartczak, Gancarz, 1998)

Uncovered geological sketch of analyzed area (after Bartczak, Gancarz, 1998)

wiec, 2010). Intensywny proces utleniania siarczku doprowadził do powstania zjawiska drenażu kwaśnych wód, zwanego *Acid Mine Drainage* – AMD. W niniejszej pracy zaprezentowano rezultaty interpretacji procesów hydrogeochemicznych przebiegających w środowisku zbiorników wodnych zlokalizowanych w rejonie Łęknicy, charakteryzujących się naj-

większym stopniem zakwaszenia oraz podwyższonymi stężeniami siarczanów i metali względem pozostałych jezior rejonu Łuku Mużakowa. Może ona stanowić punkt wyjścia do oszacowania efektywności procesów samooczyszczania się wód zbiorników oraz doboru metody ich remediacji.

NATURA ZJAWISKA DRENAŻU KWAŚNYCH WÓD

Jednym z głównych problemów środowiskowych związanych z działalnością górnictwem jest zjawisko drenażu kwaśnych wód (AMD). Jego formowanie jest wynikiem złożonych geochemicznych i mikrobiologicznych reakcji zachodzących, gdy materiał skalny zawierający w swym składzie związki

siarki kontaktuje się z tlenem atmosferycznym i wodą. Powstawanie AMD może wystąpić długo po zakończeniu działalności eksploatacyjnej kopalni, gdy zwałowiska skały płonej, zawierające w swym składzie np. piryt, wyeksponowane są na wietrzenie (Skousen i in., 1998; Akcil, Koldas,

2006). Wśród hydrogeochemicznych efektów oddziaływania AMD na środowisko można wymienić:

- wzrost kwasowości łączący się z obniżeniem odczynu,
- wyczerpanie zdolności buforowej roztworu,
- wzrost zawartości rozpuszczonych metali, takich jak: Fe, Zn, Cu, Al, Mn,
- wzrost zawartości SO_4^{2-} ,
- ubytek tlenu,
- wzrost zasolenia,
- zwiększenie twardości wód.

W wyniku AMD może znacznie obniżyć się zawartość rozpuszczonego w wodzie tlenu, zużywanego w reakcjach chemicznych (np. utlenianie Fe^{2+} do Fe^{3+}). Prowadzi to do zaburzenia prawidłowego funkcjonowania ekosystemów wodnych – rozwoju i egzystencji organizmów wodnych. W wyniku reakcji związanych z utlenianiem pirytu zostają uwolnione jony siarczanowe, które przyczyniają się do nadmiernego zasolenia wody. Zjawisko AMD może być ponadto przyczyną wzrostu twardości wody (Banks i in., 1997; Gray, 1997).

INTERPRETACJA PROCESÓW HYDROGEOCHEMICZNYCH

W obrębie analizowanych zbiorników zachodzi szereg procesów hydrogeochemicznych wpływających na ostateczny skład ich wód. Dominujące znaczenie mają tutaj przemiany żelaza i siarki. Aby rozpoznać procesy kształtujące chemizm rozpatrywanych wód, przeprowadzono analizę specyficzną tych właśnie składników.

Na potrzeby niniejszej pracy wytypowano jako reprezentatywny, najgłębszy (24 m głębokości) i jeden z najmłodszych zbiorników obszaru, należący do typu jezior meromiktycznych. W przypadku tego rodzaju zbiorników, wody poszczególnych stref głębokościowych nie mieszają się w obrębie całego profilu. W jeziorach meromiktycznych występują trzy strefy: strefa przypowierzchniowa, ulegająca mieszanemu zwaną miksolimnionem, strefa przydenna nie objęta miksą, zwana monimolimnionem, oraz pomiędzy nimi – strefa przejściowa, gdzie gwałtownie zmienia się temperatura oraz skład chemiczny wód. Brak pełnej miksji może być skutkiem niewielkiej siły wiatru, spowodowanej zalesieniem terenu wokół jeziora, niewystarczającej do wymieszania mas wód.

W rozpatrywanym zbiorniku wykonano analizy parametrów fizykochemicznych i chemicznych wód w profilu pionowym.

Próbki wód pobrano z dziesięciu głębokości, z pontonu, za pomocą rurki z tworzywa sztucznego, podłączonej do pompki perystaltycznej. W trakcie badań terenowych w próbkach oznaczone zostały, przy wykorzystaniu przenośnego urządzenia CX-742 firmy ELMETRON: temperatura, odczyn (pH), potencjał redoks (Eh). Oznaczenia podstawowych kationów: (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), anionów: (Cl^- , SO_4^{2-}) oraz żelaza ogólnego przeprowadzone zostały w laboratorium Instytutu Geologii Stosowanej Politechniki Śląskiej, przy użyciu fotometru przenośnego LF 205 Slandi oraz spektrometru emisyjnego ICP-AES Jobin-Yvon 2000. Wyniki analizy zaprezentowano w tabeli 1.

W analizowanym zbiorniku miksolimnion sięga do głębokości ok. 7–8 m, na głębokości od 8 do 14 m, znajduje się strefa przejściowa, gdzie następuje spadek temperatury oraz zmiany w chemizmie wód. Poniżej, na głębokości od 14 do 24 m, występuje monimolimnion.

Dla określenia form (specjacji) żelaza i siarki w poszczególnych strefach głębokościowych zbiornika przeprowadzono modelowanie matematyczne z wykorzystaniem programu PHREEQC II (Parkhurst, Apello, 1999). Wyniki zaprezentowano w tabelach 2 i 3.

Tabela 1

Zmiany parametrów fizykochemicznych i chemicznych wód w profilu pionowym analizowanego zbiornika

Changes of physicochemical and chemical parameters in vertical profile of analyzed reservoir

H [m]	T [°C]	pH	Eh [V]	O ² [mg/dm ³]	Cl ⁻ [mg/dm ³]	SO ₄ ²⁻ [mg/dm ³]	Ca ²⁺ [mg/dm ³]	Mg ²⁺ [mg/dm ³]	Na ⁺ [mg/dm ³]	K ⁺ [mg/dm ³]	Fe _{og} [mg/dm ³]
0,5	25,7	2,2	0,760	7,8	6,1	1934	103,0	24,8	6,4	4,8	144,7
2	24,5	2,3	0,743	8,1	11,0	1976	111,4	31,2	6,8	4,5	143,5
5	18,4	2,3	0,750	8,0	16,2	2013	121,2	38,7	6,7	5,1	150,0
8	12,2	2,5	0,710	8,2	18,0	2218	120,9	40,9	6,9	5,6	147,2
10	10,2	3,2	0,651	0	21,3	2416	127,8	51,0	7,1	6,3	151,0
12	8,1	3,4	0,629	0	20,0	2412	132,3	56,0	7,1	7,8	348,0
15	8,0	3,8	0,504	0	22,0	2854	151,1	79,3	7,9	8,9	458,0
18	8,1	4,0	0,457	0	21,8	3011	153,0	83,0	8,0	9,4	624,0
20	7,9	4,0	0,459	0	22,1	3194	158,0	83,0	7,9	10,2	695,0
22	7,9	4,1	0,432	0	22,0	3356	169,0	99,0	8,1	11,8	712,0

Tabela 2

Formy żelaza [mol/dm³] dominujące w wodach analizowanego zbiornika
Forms of iron [mol/dm³] dominant in water of analyzed reservoir

	Fe(II)og	Fe ²⁺	FeSO ₄	FeHSO ₄ ⁺	FeOH ⁺
Miksolimnion	1,259·10 ⁻⁴	8,159·10 ⁻⁵	4,222·10 ⁻⁵	2,105·10 ⁻⁶	2,688·10 ⁻¹²
W-wa przejściowa	5,052·10 ⁻³	3,318·10 ⁻³	1,728·10 ⁻³	5,495·10 ⁻⁶	4,058·10 ⁻¹⁰
Monimolimnion	1,275·10 ⁻²	8,104·10 ⁻³	4,638·10 ⁻³	3,042·10 ⁻³	4,540·10 ⁻⁹
	Fe(III)og	FeSO ₄ ⁺	Fe(SO ₄) ₂ ⁻	Fe ³⁺	Fe(OH) ²⁺
Miksolimnion	2,465·10 ⁻³	2,005·10 ⁻³	2,428·10 ⁻⁴	9,844·10 ⁻⁵	5,851·10 ⁻⁵
W-wa przejściowa	1,179·10 ⁻³	8,162·10 ⁻⁴	1,419·10 ⁻⁴	4,405·10 ⁻⁵	1,322·10 ⁻⁴
Monimolimnion	1,848·10 ⁻⁶	6,747·10 ⁻⁷	1,437·10 ⁻⁷	8,425·10 ⁻⁸	4,799·10 ⁻⁷

Tabela 3

Formy siarki [mol/dm³] dominujące w wodach analizowanego zbiornika
Forms of sulfur [mol/dm³] dominant in water of analyzed reservoir

	Siarka og.	SO ₄ ²⁻	HSO ₄ ⁻	FeSO ₄ ⁺	CaSO ₄ ⁺
Miksolimnion	2,013·10 ⁻²	1,088·10 ⁻²	4,089·10 ⁻³	2,005·10 ⁻³	9,154·10 ⁻⁴
	Siarka og.	SO ₄ ²⁻	FeSO ₄	CaSO ₄	MgSO ₄
W-wa przejściowa	2,511·10 ⁻²	1,846·10 ⁻²	1,728·10 ⁻³	1,326·10 ⁻³	8,670·10 ⁻⁴
Monimolimnion	3,494·10 ⁻²	2,536·10 ⁻²	4,638·10 ⁻³	1,791·10 ⁻³	1,628·10 ⁻³

W warstwach przypowierzchniowych analizowanego zbiornika żelazo występuje głównie w formie trójwartościowej – Fe(III), z głębokością wzrasta stężenie form żelaza dwuwartościowego – Fe(II) (fig. 2A). We wszystkich strefach zbiornika dominującą formą żelaza dwuwartościowego są jony Fe²⁺ oraz formy FeSO₄ (tab. 2). W przypadku żelaza trójwartościowego, przeważają kompleksy FeSO₄⁺, Fe(SO₄)₂⁻ oraz jony żelazowe Fe³⁺. Wraz z głębokością obserwuje się spadek stężeń jonów Fe³⁺ na korzyść jonów Fe²⁺ (fig. 2B).

W warstwie przypowierzchniowej jony Fe³⁺ stanowią 95,1% żelaza ogólnego, w strefie przydennej ich udział spada poniżej 0,1%. W przypadku jonów Fe²⁺, ich najmniejszy udział równy 4,6% żelaza ogólnego, odnotowano w miksolimnionie, w monimolimnionie zwiększa się on do ponad 99,9%.

Dominującą formą siarki w miksolimnionie są formy jony: SO₄²⁻ (stanowiące 54% siarki ogólnej), HSO₄⁻, FeSO₄⁺ oraz CaSO₄⁺ (tab. 3). W warstwie przejściowej i monimolimnionie obserwuje się wzrost zawartości jonów SO₄²⁻ do ponad 70% siarki ogólnej. W miejscu kompleksów jonowych obecnych w miksolimnionie pojawiają się związki: FeSO₄, CaSO₄, MgSO₄.

W celu graficznego przedstawienia rozkładu równowag form żelaza i siarki w wodach strefy powierzchniowej i przydennej analizowanego zbiornika, wykonano diagramy Eh – pH, przy wykorzystaniu modułu „Act2” (The Geochemist’s Workbench 7.0) (Bethke, 2007) (fig. 3, 4). Warunki

panujące w obrębie analizowanego zbiornika (odczyn, potencjał utleniająco-redukcyjny, aktywności żelaza i siarki) umożliwiają występowanie żelaza i siarki w strefie powierzchniowej głównie w formach Fe³⁺, FeSO₄⁺ i SO₄²⁻, a w strefie przydennej w formach: FeSO₄, SO₄²⁻, co potwierdza wyniki modelowania wykonanego przy wykorzystaniu PHREEQC II. Na podstawie analizy specjacyjnej form żelaza i siarki, popartej interpretacją wykonanych diagramów ich stabilności, zidentyfikowano główne procesy hydrogeochemiczne zachodzące w zbiorniku nr 8 (tab. 4).

Wraz z odciekami ze zwałowiska tworzącego obwałowania analizowanego zbiornika, przedostają się do niego jony Fe²⁺, będące produktem wietrzenia pirytu, zgodnie z reakcją AMD [O]. W warstwie powierzchniowej (miksolimnion) może następować utlenianie jonów żelazawych do żelazowych, zgodnie z reakcją [A]; tworzenie się m.in. ich hydrokompleksów [B]. Z uwagi na wysokie stężenie siarczanów w wodach zbiornika, tworzone są ich kompleksy z jonami Fe³⁺ zgodnie z reakcją [C]. Formy trójwartościowe zidentyfikowano jako dominujące w strefie powierzchniowej zbiornika (tab. 4). Pozostałe w wodzie jony Fe²⁺, mogą migrować w formie prostej bądź tworzyć związki, głównie z siarczanami (D), zidentyfikowane w wodach zbiornika na drodze analizy specjacyjnej (tab. 2 i 3). Z kwaśnych wód zawierających jony siarczanowe i żelazowe może wytrącać się jarosyt [E]. Dla określenia możliwości krystalizacji jarosytu i innych wybranych form mineralnych, obliczono indeksy nasycenia

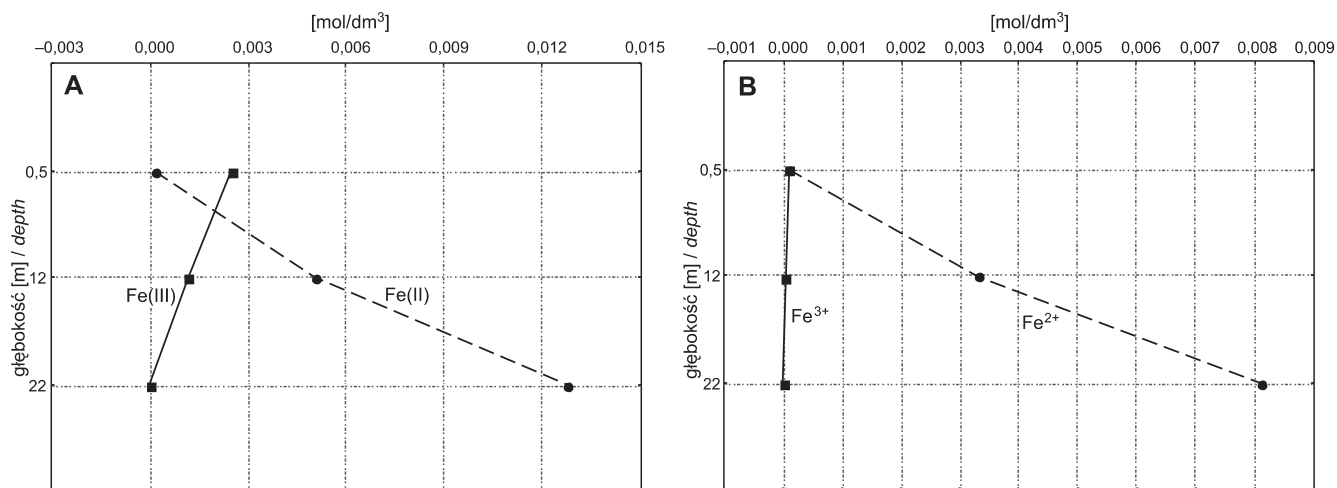


Fig. 2. Zróżnicowanie stężeń: A – dwuwartościowych i trójwartościowych form żelaza; B – jonów Fe²⁺ i Fe³⁺ w profilu głębokościowym analizowanego zbiornika

Variety of concentration: A – divalent and trivalent forms of iron; B – Fe²⁺ i Fe³⁺ ions in vertical profile of analyzed reservoir

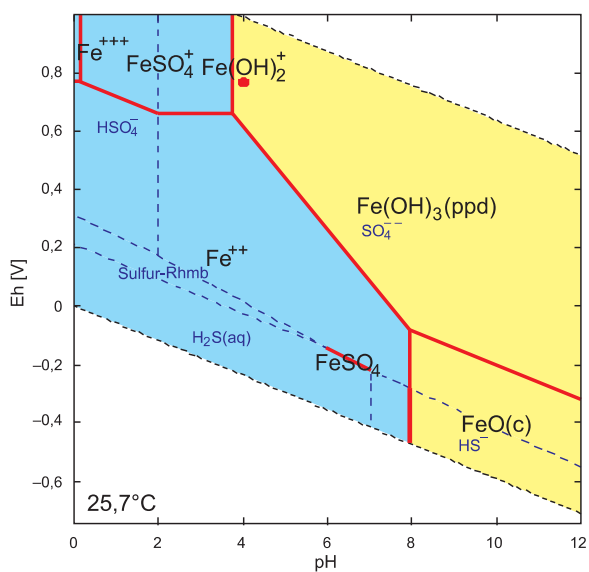


Fig. 3. Diagram stabilności form żelaza i siarki dla warstwy powierzchniowej (T = 25,7°C; aktywności: Fe³⁺ = 2,743·10⁻⁵, SO₄²⁻ = 5,519·10⁻³)

Kropką zaznaczono wody analizowanego zbiornika

Stability diagram of iron and sulfur's forms for surface layer (T = 25.7°C; activities: Fe³⁺ = 2.743·10⁻⁵, SO₄²⁻ = 5.519·10⁻³)

Dot represent water of analyzed reservoir

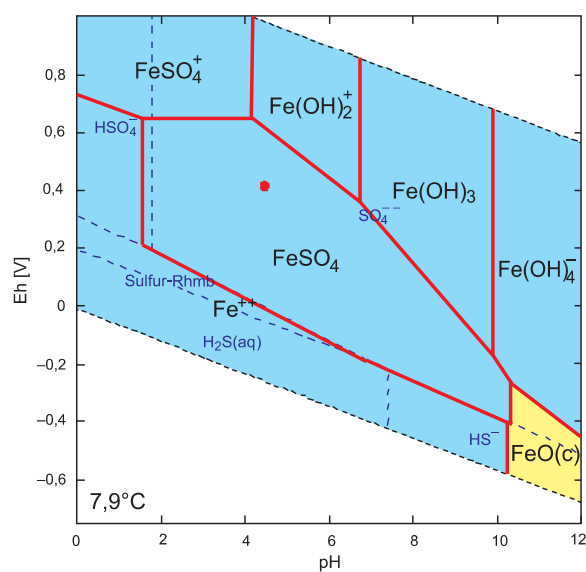


Fig. 4. Diagram stabilności form żelaza i siarki dla warstwy przydennej (T = 7,9°C; aktywności: Fe³⁺ = 7,039·10⁻⁹, SO₄²⁻ = 1,045·10⁻³)

Kropką zaznaczono wody analizowanego zbiornika

Stability diagram of iron and sulfur's forms for bottom layer (T = 7.9°C; activities: Fe³⁺ = 7.039·10⁻⁹, SO₄²⁻ = 1.045·10⁻³)

Dot represent water of analyzed reservoir

Tabela 4

Główne procesy związane z przemianami żelaza i siarki zachodzące w obrębie analizowanego zbiornika

Primary processes connected with transformation of iron and sulfur occur in analyzed reservoir

	Reakcje		Opis
Obwałowania zbiornika	$\text{FeS}_2 + 3,75\text{O}_2 + 3,5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3\downarrow + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$	[O]	wietrzenie pirytu
Miksolimnion	$\text{Fe}^{2+} + 0,25\text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 0,5\text{H}_2\text{O}$	[A]	utlenianie Fe^{2+} do Fe^{3+}
	$\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})^{2+} + \text{H}^+$	[B]	tworzenie hydrokompleksów
	$\text{Fe}^{3+} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{FeSO}_4^+$	[C]	tworzenie kompleksów z siarczanami
	$\text{Fe}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{FeSO}_4$	[D]	tworzenie związków siarczanowych
	$3\text{Fe}^{3+} + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{K}/\text{Na}^+ + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}/\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 6\text{H}^+$	[E]	krystalizacja jarosytu
Strefa przejściowa	$\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3\downarrow + 3\text{H}^+$	[F]	wytrącanie żelaza w formie wodorotlenku
Monimolimnion	$\text{FeS}_2 + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$	[G]	utlenianie pirytu przez jon żelazowy
	$\text{Fe}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{FeSO}_4$	[H]	tworzenie związków siarczanowych

nimi wód rozpatrywanego zbiornika. Posłużono się w tym celu pakietem PHREEQC II; wyniki obliczeń zaprezentowano w tabeli 5 i na figurze 5. Stan nasycenia wód względem danego minerału jest wyrażony poprzez tzw. wskaźnik nasycenia (SI) obliczany wg. wzoru:

$$\text{SI} = \log \frac{\text{IAP}}{\text{K}_{\text{sp}}}$$

gdzie:

IAP – iloczyn jonowy, obliczony na podstawie aktywności jonowej substancji biorących udział w reakcji,

K_{sp} – stała równowagi reakcji dla danych warunków termodynamicznych.

Dla $\text{SI} < 0$ występuje niedosycenie wody, względem danego minerału, natomiast przy $\text{SI} > 0$ dochodzi do przesylenia wody względem niego $\text{SI} = 0$ oznacza tzw. punkt nasycenia wody, czyli stan równowagi termodynamicznej (Kleczkowski, Rózkowski, 1997).

Tabela 5

Indeksy nasycenia $\text{Fe}(\text{OH})_{3(a)}$ i jarosytu w analizowanym systemieSaturation index of $\text{Fe}(\text{OH})_{3(a)}$ and jarosite in analyzed system

	$\text{Fe}(\text{OH})_{3(a)}$	Jarosyt
Miksolimnion	-2,85	0,26
W-wa przejściowa	-0,34	5,37
Monimolimnion	-0,74	0,35

Na podstawie obliczeń stwierdzono, że wody wszystkich stref głębokościowych są przesycone względem jarosytu, a więc wysokie jest prawdopodobieństwo jego wytrącania się.

W strefie przejściowej jony żelazowe mogą być wiązane w postaci wodorotlenku żelaza(III) [reakcja F], występującego w formie charakterystycznych brunatno-pomarańczowych osadów, których obecność stwierdzono w trakcie badań terenowych, w partiach przybrzeżnych rozpatrywanego zbiornika. Wartość indeksu nasycenia (tab. 5), mimo iż nie przekracza punktu nasycenia wody ($\text{SI} = 0$), wskazuje na

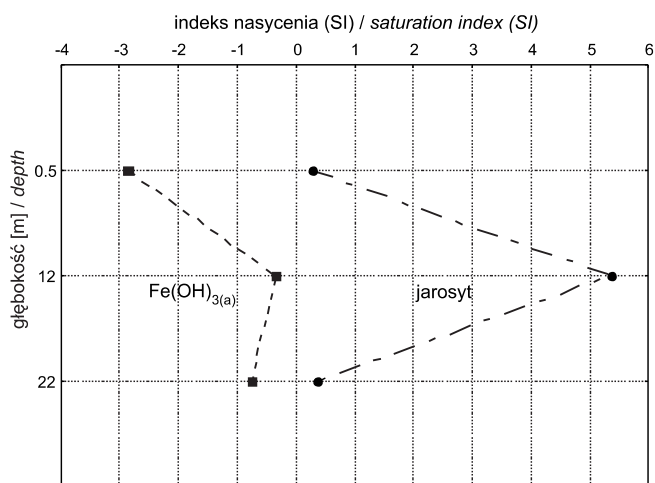


Fig. 5. Indeksy nasycenia niektórych faz mineralnych mogących występować w analizowanym zbiorniku

Saturation index of some mineral phases that could occur in analyzed reservoir

dażność do wystąpienia stanu nasycenia wód względem $\text{Fe}(\text{OH})_3$ w obrębie strefy przejściowej.

W strefie przydennej następuje ograniczenie stężeń jonów Fe^{3+} na korzyść jonów Fe^{2+} (fig. 2). Może być to spowodowane zużyciem jonów żelazowych w procesie utleniania obecnego w osadach dennych pirytu, zgodnie z reakcją [G] (Jędrzak, 1992). Produktem tego procesu, oprócz jonów żelazowych, są również jony siarczanowe, których zawartość w wodach monimolimnionu jest wyższa w stosunku do wód miksolimnionu. Z uwagi na brak procesów desulfatacji w warstwie przydennej, potwierdzony przez interpretację analiz izotopowych, nie dochodzi tam do ograniczenia zawartości siarczanów (Skoczyńska-Gajda, 2011 i niepublikowane). Efektem reakcji [G] jest również uwalnianie jonów H^+ , które powinno prowadzić do dalszego zakwaszenia wód strefy przydennej. W profilu, w trakcie badań terenowych,

odnotowano jednak wzrost odczynu wraz z głębokością (z 2,2 do 4,1 pH) (Skoczyńska-Gajda, 2011; niepublikowane), czego przyczyną mogłaby być np. neutralizacja wód monimolimnionu poprzez dopływ wód podziemnych o charakterze wodorowęglanowym. Nie stwierdzono jednak obecności wodorowęglanów w monimolimnionie, co może być spowodowane wyczerpaniem zdolności buforowej systemu. Wzrost odczynu może być również związany z rozpuszczaniem jarosytu w warstwie przydennej, prowadzącym do konsumpcji protonów. Jony żelazowe pozostają w wodach przydennej strefy zbiornika głównie w formie prostej, jako Fe^{2+} . Mogą one również tworzyć kompleksy z siarczanami, podobnie jak miało to miejsce w warstwie miksolimnionu [reakcja H].

PODSUMOWANIE

Eksploatacja węgla brunatnego prowadzona w rejonie Łuku Mużakowa od połowy XIX w. przyczyniła się do powstania zbiorników wodnych, charakteryzujących się nietypowym składem chemicznym. Mimo, iż działalność wydobywcza została zakończona w 1974 r jej skutki są widoczne do dzisiaj. Charakterystyczną cechą rozpatrywanych zbiorników jest niski odczyn, któremu towarzyszą wysokie stężenia siarczanów i metali, głównie żelaza. Taki skład chemiczny jest konsekwencją procesu wietrzenia pirytu (FeS_2), prowadzącego do powstania zjawiska drenażu kwaśnych wód (AMD – *Acid Mine Drainage*). W obrębie zbiorników za-

chodzi szereg procesów hydrogeochemicznych, związanych głównie z przemianami żelaza i siarki, mających wpływ na ostateczny chemizm ich wód. W poszczególnych strefach głębokościowych jest on kontrolowany przez odmienne reakcje: w strefie przypowierzchniowej (miksolimnionu) zachodzi m.in. utlenianie Fe^{2+} do Fe^{3+} , tworzenie hydrokompleksów, czy wytrącanie jarosytu. W strefie przejściowej może dojść do krystalizacji $\text{Fe}(\text{OH})_3$, a w strefie przydennej (monimolimnionu) utlenianie pirytu przez jon żelazowy.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2011, jako część projektu badawczego N N524 370937.

LITERATURA

- AKCIL A., KOLDAS S., 2006 — Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *J. Cleaner Prod.*, **14**, 12/13: 1139–1145.
- ASANI A., KOŁODZIEJCZYK U., 2006 — Hydrografia obszaru pojezierza antropogenicznego w rejonie Łęknicy w województwie lubuskim. Zielona Góra, Uniwersytet Zielonogórski. CD-ROM: 1–10.
- BANKS D., YOUNGER P.L., ARNESEN R.T., IVERSEN E.R., BANKS S.B., 1997 — Mine water chemistry: the good, the bad and the ugly. *Env. Geol.*, **32**: 157–174.
- BARTCZAK E., GANCARZ A., 1988 — Mapa Geologicznej Polski 1:50000 (Arkusz Łęknica, Trzebiel). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- BETHKE C., 2007 — The Geochemists Workbench Version 7.0: A User's Guide. University of Illinois.
- GRAY N.F., 1997 — Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Env. Geol.*, **30**: 62–71.
- JACHIMKO B., 2007 — Ocena zakwaszenia wód zbiorników „Pojezierza Antropogenicznego”. *Zesz. Nauk. UZiel.-Górs. Inż. Środ.*, **135**, 15:122–132.
- JĘDRZAK A., 1992 — Skład chemiczny wód pojezierza antropogenicznego w Łuku Mużakowskim. Wyd. WS Inż. w Zielonej Górze. Zielona Góra.
- KLECZKOWSKI A.S., RÓŻKOWSKI A. (red), 1997 — Słownik hydrogeologiczny. MOŚNiL. Warszawa.
- LABUS M., MROWIEC A., 2010 — Osady denne rzeki Skródy i ich rola w obiegu metali w środowisku. *Zesz. Nauk. UZiel.-Górs. Inż. Środ.*, **139**, 19: 678–0.
- PARKHURST D., 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. Geol. Survey, U.S. Department of the Interior.

SKOCZYŃSKA-GAJDA S., 2011 — Samooczyszczanie i remediacja zakwaszonych zbiorników wodnych na obszarach dawnej eksploatacji węgla brunatnego w rejonie Łęknicy (Łuk Mużakowa). Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii.

SKOUSEN J., ROSE A., GEIDEL G., FOREMAN J., EVANS R., HELLIER W., 1998 — Handbook of West Virginia University.

WRÓBEL I., 1997 — Zmieniające się krajobrazy. Pojezierze Antropogeniczne w dorzeczu Nysy Łużyckiej. *Zesz. Nauk. PZiel.-Górs.*, **114**, 6: 17–28.

SUMMARY

Exploitation of lignite coal in the area of Muskau Arch caused the formation of artificial lakes, which are characterized by very low reaction and elevated concentration of sulfates and metals. Their chemical constitution is formed as a result of intensive weathering of pyrite (FeS_2), which leading to form Acid Mine Drainage. In acidify lakes occur hydrogeochemical processes, connected mainly

with transformation of iron and sulfur. In particular depth zones of lakes, water chemism is controlled by different reactions: in subsurface zone (mixolimnion) occur e.g. oxidation of Fe^{2+} to Fe^{3+} , formation of hydro-complexes, jarosite precipitation. In transition zone $\text{Fe}(\text{OH})_3$ can crystallize and in bottom zone (monimolimnion) pyrite can be oxidized by ferric ion.