

ANDRZEJ HAŁADUS*, RYSZARD KULMA*

Warunki formowania jakości wody w zbiorniku Piaseczno koło Tarnobrzega w czasie likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego siarki

Słowa kluczowe

Hydrogeochemia, likwidacja kopalń, obliczenia prognostyczne

Streszczenie

Jednym z najważniejszych problemów ostatnich lat w rejonie Tarnobrzega jest przeprowadzenie likwidacji odkrywkowych kopalń siarki Machów i Piaseczno w sposób minimalizujący zagrożenie dla środowiska naturalnego. Programy prac likwidacyjnych zakładają, że w miejsce odkrywek powstaną zbiorniki wodne o charakterze rekreacyjnym. W odkrywce Machów wykonywana jest 25-metrowa warstwa z ilów krakowieckich izolująca wody w przyszłym zbiorniku od zanieczyszczonych wód trzeciorzędowych. W wyrobisku Piaseczno od 1981 r., tj. od zakończenia robót górniczych, istnieje zbiornik wodny, którego rzędna utrzymywana jest poprzez odprowadzanie nadmiaru wód do Wisły. Trudności finansowe spowodowały, że w odkrywce Piaseczno odstąpiono od wykonywania warstwy izolacyjnej.

Prognozowanie zmian jakości wody w zbiorniku Piaseczno oparto na wynikach badań symulacyjnych wykonanych na modelu warunków hydrogeologicznych Tarnobrzezkiego Zagłębia Siarkowego. Rozwiązania uwzględniły różne wysokości piętrzenia wody w zbiorniku Piaseczno i spodziewany postęp prac likwidacyjnych w kopalni Machów. Podstawą bilansu hydrogeochemicznego, umożliwiającego ocenę jakości wód zbiornikowych, były wydatki strumieni filtracyjnych oraz koncentracje w nich jonów wskaźnikowych (chlorki i siarczany).

Zarówno obecnie (2000 r.), jak i w prognozach największy ładunek zanieczyszczeń jest wnoszony przez strumień filtracyjny napływający do zbiornika od strony składowisk. Dla stanu wyjściowego stężenie jonu chlorkowego w wodach zbiornika spowodowane przez ten strumień stanowi około 42% całkowitej jego koncentracji, a siarczanów aż około 84%.

Obliczenia prognostyczne wskazują, że na jakość wody w zbiorniku Piaseczno istotny wpływ będzie miał postęp i wzajemna relacja prac likwidacyjnych w obu wyrobiskach poeksploatacyjnych. Okresowo może dochodzić do pogorszenia się jakości wody, jednak w warunkach docelowych ulegnie ona poprawie w stosunku do obserwowanej obecnie.

* Dr inż., Zakład Hydrogeologii i Ochrony Wód AGH, Kraków.

Wprowadzenie

Zakończenie prac likwidacyjnych w nieczynnym od 1981 r. wyrobisku Piaseczno powinno nastąpić do końca 2002 r. Termin ten wynika z uwarunkowań związanych z likwidacją pobliskiej Kopalni Siarki Machów, a konkretnie z wyłączeniem jej systemu odwadniania. Rozpocznie się wówczas proces odbudowy powierzchni piezometrycznego zwierciadła, skutkujący również zmianą dotychczasowych kierunków przepływu strumienia filtracyjnego i jego natężenia. Czynniki te mogłyby w niekorzystny sposób wpływać na przebieg prac likwidacyjnych w wyrobisku Piaseczno, powodując konieczność podjęcia stosownych działań osłonowych.

Brak możliwości zastosowania sposobu likwidacji przyjętego dla pobliskiej Kopalni Siarki Machów (Kopeć, Wojteczko 1993; Kirejczyk, Pantula 1997) skłania do znacznego ograniczenia zakresu prac w przypadku wyrobiska pogórniczego w Piasecznie. Zasadnicza różnica wynika z odstąpienia od wykonania warstwy izolacyjnej na dnie zbiornika. Nie ulegają natomiast zmianie pozostałe założenia, jakie przyjęto przy opracowaniu projektu likwidacji wyrobiska Piaseczno. Przedstawiają się one następująco:

- utworzenie zbiornika wodnego o docelowym przeznaczeniu rekreacyjnym,
- zachowanie obecnego stanu zagospodarowania terenów przyległych,
- minimalizacja kosztów likwidacji.

Podstawę dla przygotowania prognoz hydrogeochemicznych dotyczących jakości wód zbiornikowych stanowiły wyniki rozwiązań modelowych (Kulma i in. 2000) oraz rezultaty badań składu chemicznego wód podziemnych i wód powierzchniowych odprowadzanych ze zbiornika Piaseczno. Na podstawie wyników badań symulacyjnych określono wielkości charakteryzujące strumienie filtracyjne napływające do odkrywki z różnych kierunków. Zmienność składu chemicznego tych wód przyjęto natomiast na podstawie wyników analiz z otworów piezometrycznych i studni tworzących lokalną sieć monitoringową. Reprezentatywność przyjętych stężeń jonów wskaźnikowych w obrębie wydzielonych strumieni filtracyjnych została sprawdzona dla obecnego stanu zwierciadła wody w zbiorniku Piaseczno i jego otoczeniu.

1. Zagospodarowanie zbiornika Piaseczno

Wysokość napełnienia zbiornika wodnego utworzonego w wyrobisku poeksploatacyjnym byłej kopalni siarki Piaseczno utrzymywana jest w sposób sztuczny przez odprowadzanie wód nadmiarowych. Obecnie (2000 r.) zwierciadło wody w zbiorniku Piaseczno utrzymywane jest na rzędnej 121,1—122,2 m n.p.m., tj. ponad 26 m poniżej pierwotnej wysokości terenu w tym rejonie. Zbiornik ma powierzchnię ponad 60 ha, a jego pojemność wynosi około 5,3 mln m³. Docelowo, przy spiętrzeniu wód w zbiorniku do rzędnej 146,0 m n.p.m., jego powierzchnia wzrośnie do około 160 ha, a pojemność do około 31,4 mln m³.

Brzegi zbiornika tworzą wapienie osiarkowane, stanowiące stropową część serii złożowej, oraz piaski baranowskie zalegające w jej podłożu. Zachodnią część zbiornika budują twory nadkładu złoża zdeponowane na zwałowisku wewnętrznym. Likwidacja wyrobiska pogórniczego w Piasecznie wymagać będzie wykonania następujących zadań (Kirejczyk i in. 2000):

- izolacji odsłoniętych warstw serii chemicznej z wykorzystaniem materiału ilastego z warstw nadkładowych,
- profilowania skarp wyrobiska,
- uporządkowania terenu wokół zbiornika i demontażu zbędnych instalacji,
- rekultywacji terenów przyległych do zbiornika wodnego oraz utworzenia kompleksu parkowo-leśnego.

W miarę postępu prac likwidacyjnych możliwe będzie okresowe wyłączenie stacji pomp powierzchniowych, co spowoduje piętrzenie wód w zbiorniku Piaseczno. Zmiana wysokości napełnienia zbiornika nie powinna jednak zagrażać podtopieniem terenów rolniczych i zabudowy mieszkalno-gospodarczej. W związku z tym napełnianie zbiornika Piaseczno musi być skoordynowane z wykonaniem systemu melioracyjnego na terenach przyległych.

2. Charakterystyka wyników badań modelowych

Badania symulacyjne wykonane zostały na modelu matematycznym warunków hydrogeologicznych Tarnobrzieskiego Zagłębia Siarkowego (Kulma i in. 2000) z wykorzystaniem programu MODFLOW. Wykonano sześć rozwiązań prognostycznych — wszystkie przy założeniu braku warstwy izolacyjnej na dnie wyrobiska Piaseczno. Poprzedził je etap weryfikacji modelu, który został przeprowadzony przy wymuszeniach zakładających odwadnianie odkrywki Machów studniami barier wewnątrznych i utrzymanie zwierciadła wody w zbiorniku Piaseczno na rzędnej 121,3 m n.p.m. Prognozy dopływów (Kulma, Haładus 2001) wykonane dla ustalonych warunków filtracji uwzględniają różne wysokości piętrzenia wody w zbiorniku Piaseczno (rzędne piętrzenia zawierają się w przedziale od 130,0 do 146,0 m n.p.m.). W odkrywce Machów uwzględniono działanie systemów odwadniających, jako studni barier zewnętrznych lub ich wyłączenie — co oznaczało zakończenie procesu likwidacji kopalni Machów.

Stan wyjściowy odwzorowuje warunki hydrogeologiczne dla ustalonego przepływu wód podziemnych w piętrach czwartorzędowym i trzeciorzędowym, umownie przyjęte na czerwiec 2000 r. W rzeczywistości odzwierciedla on stan średni z ostatnich kilkunastu miesięcy.

3. Możliwości wymiany i mieszania się wody w zbiorniku Piaseczno

Bilans wodny zbiornika wskazuje na intensywną wymianę wody. Czas wymiany wynosi około 355 dni, przy średnim wydatku wód odprowadzanych ze zbiornika w wysokości 14 950 m³/d i jego pojemności równej 5,3 mln m³. Zbiornik można zaliczyć do średnio przepływowych, dla których czas retencji mieści się w granicach 180—365 (Dojlido 1995). W stanie docelowym zbiornik będzie charakteryzował się powolną wymianą wód, ponieważ czas wydłuży się do około 13,5 lat. Głębokość zbiornika Piaseczno dochodzi obecnie (2000 r.) do około 22 m, a docelowo osiągnie około 46 m.

Z badań wód zbiornikowych wynika, że w profilach pionowych obserwuje się zróżnicowanie składu chemicznego. Oznaczenia składu chemicznego wykonane w 1994 r. (Szczepański i in. 1994), kiedy zbiornik był płytszy, a maksymalna głębokość dochodziła do 14 m, wskazują na

występowanie przy dnie nie wymieszanych wód trzeciorzędowych zawierających substancje rozpuszczone w ilości 6,7—9,9 g/dm³. Wody wymieszane, występujące w strefie głębokościowej 0—8 m, zawierały 2,0—2,4 g/dm³ substancji rozpuszczonych. W późniejszym okresie obserwuje się wzrost głębokości strefy wód wymieszanych.

W zbiorniku Piaseczno hipolimnion nie jest wywołany stratyfikacją termiczną, lecz wynika ze zmian gęstości wody spowodowanych dopływem strumieni filtracyjnych o zróżnicowanej ilości substancji rozpuszczonych do poszczególnych stref głębokościowych. Na proces mieszania się wody w zbiorniku Piaseczno największy wpływ mają następujące czynniki: wielkość i przestrzenny rozkład strumieni wód podziemnych dopływających do zbiornika, mineralizacja wód dopływających, wysokość piętrzenia wody w zbiorniku (głębokość zbiornika), powierzchnia zbiornika, temperatura wody, ilość pompowanych i odprowadzanych wód ze zbiornika oraz lokalizacja miejsca odbioru wody.

4. Jakość wody w zbiorniku Piaseczno

Jakość wody w zbiorniku jest kształtowana przez strumienie wód zasilających go z różnych źródeł, charakteryzujących się odmiennymi wydatkami i składem chemicznym. W profilach pionowych zbiornika można wyróżnić trzy strefy wód o zróżnicowanym składzie i mineralizacji, tj. górną, przejściową i denną. Zarówno grubość warstw, jak i skład wody w ich obrębie ulegają ciągłym zmianom w czasie i przestrzeni.

Górna warstwa wody jest najgrubsza, w minionym czasie osiągała nawet 21 m. Mineralizacja na ogół mieści się w przedziale 1,4—2,5 g/dm³, a stężenie chlorków wyjątkowo przekracza 300 mg/dm³. Twardość najczęściej wynosi 1050—1250 mg CaCO₃/dm³. W dolnych partiach tej strefy mogą występować wysokie koncentracje żelaza, nawet do kilkudziesięciu mg/dm³. Według klasyfikacji Altowskiego i Szwieca są to wody typu Ca-Na-HCO₃-SO₄.

W strefie przydennej występują często wody o mineralizacji od około 5—6 do nawet ponad 10,0 g/dm³. Grubość warstwy zależy od warunków lokalnych i zmienia się od 0 do kilku metrów. Przy maksymalnych zawartościach substancji rozpuszczonych na ogół są to wody typu Na-Cl. Ich twardość ogólna zmienia się w szerokim zakresie i wynosi 1300—1850 mg CaCO₃/dm³. Charakterystyczne dla tej strefy są wysokie koncentracje chlorków (od ponad 2000 do 5200 mg/dm³) przy spadku zawartości siarczanów (z 700—1050 do 200—600 mg/dm³) oraz niewielkie ilości lub brak tlenu. Wody te zawierają na ogół wysokie, najczęściej od kilkunastu do kilkudziesięciu mg/dm³, zawartości żelaza.

Nad warstwą przydenną zalegają wody mające charakter przejściowy. Grubość tej warstwy tylko miejscami sięga kilku metrów. Mineralizacja wody najczęściej wynosi od 2,5—3,0 do 5,0—6,0 g/dm³, a twardość około 1100—1300 mg CaCO₃/dm³.

Uogólniając można stwierdzić, że w wodach zbiornika wraz z głębokością rośnie zawartość substancji rozpuszczonych, twardość, koncentracja chlorków i żelaza. Maleje natomiast pH z około 8 — w strefie przypowierzchniowej, do około 7 — w strefie dennej, a więc wody mają na ogół odczyn zasadowy. Cechą charakterystyczną dla wód strefy dennej jest bardzo wyraźny spadek zawartości siarczanów i brak, lub bardzo niewielkie ilości, rozpuszczonego tlenu.

Wody odprowadzane ze zbiornika do Wisły są bardziej zbliżone do składu fizykochemicznego charakteryzującego górną strefę zbiornika. W dużej mierze zależy to od sposobu ich poboru pompami powierzchniowymi. Ilość substancji rozpuszczonych w wodzie zmienia się na ogół od 1400 do 2000 mg/dm³.

5. Bilans hydrogeochemiczny

5.1. Wprowadzenie

Wyniki badań modelowych oraz rozpoznanie stanu jakości wód podziemnych w rejonie Tarnobrzega stały się podstawą dla dokonania oceny hydrochemicznych skutków likwidacji wyrobiska pogórniczego Piaseczno w warunkach braku dennej warstwy izolacyjnej. Zasadniczym elementem takiej oceny jest bilans stężeń substancji (jonów) uznanych jako wskaźnikowe dla rozważanego zbiornika. Uwiarygodnieniem prognozy zmian hydrogeochemicznych jest uzyskanie w obliczeniach bilansowych potwierdzenia rzeczywistych stężeń tych substancji w okresie poprzedzającym (stan wyjściowy przyjęty na koniec 2000 r.). Warunkiem wykonania obliczeń bilansowych jest określenie wydatków strumieni filtracyjnych, bądź innych źródeł zasilających zbiornik wodny, oraz koncentracji jonów wskaźnikowych w tych wodach.

Podobnie jak w prognozach wykonywanych wcześniej (Szczepański i in. 1994; Kania, Haładus 1997) jako główne jony wskaźnikowe przyjęto chlorki i siarczany. Wskaźnik pierwszy traktować należy jako tzw. wskaźnik idealny. Jego obecność w wodach podziemnych i powierzchniowych wynika z przeciętnych stężeń, jakie cechują poszczególne wyróżnione źródła. Nie powstaje on w wyniku procesów zachodzących w zbiorniku. Drugim składnikiem wód, który uwzględniono w rozważaniach bilansowych, był jon siarczanowy. W środowisku hydrogeochemicznym rejonu wyrobiska poeksploatacyjnego Piaseczno i w samym zbiorniku obecność tego jonu może być związana z różnymi procesami. Występuje on w wodach czwartorzędowych i trzeciorzędowych w zawartościach wynikających z „tła”, charakterystycznego dla wód podziemnych całego obszaru tarnobrzeskich złóż siarki. Może być on dodatkowo „produkowany” w procesach utleniania zredukowanych form siarki.

Przyjęcie tych dwóch wskaźników, tj. chlorków i siarczanów, umożliwiło opracowanie bilansu hydrogeochemicznego zbiornika dla warunków obecnych (2000 r.) i prognozowanych, jakie kształtować się będą w trakcie procesu likwidacji wyrobiska w Piasecznie i po jego zakończeniu.

5.2. Podstawowe składniki bilansu

Wody występujące w zbiorniku Piaseczno mają obecnie, lub mogą mieć w przyszłości, różnorakie pochodzenie. Głównymi „źródłami” zasilania (dodatniego lub ujemnego) są:

- Q_P — bezpośrednie opady atmosferyczne na powierzchnię zbiornika,
- ΔQ_N — nadwyżka parowania z powierzchni wodnych nad wysokością opadów atmosferycznych,
- Q_S — spływ powierzchniowy z obszaru zlewni zbiornika wodnego,

Q_1 — dopływ strumienia wód podziemnych poprzez obszar zwałowisk kopalnianych,

Q_2 — dopływ niezanieczyszczonych wód podziemnych z utworów czwartorzędowych leżących poza obszarem oddziaływania zwałowisk oraz infiltracji wód z Wisły,

Q_3 — dopływ wód podziemnych z utworów czwartorzędowych, zanieczyszczonych na skutek infiltracji zasolonych wód z Wisły,

Q_4 — dopływ wód podziemnych z utworów trzeciorzędowych występujących w rejonie okna hydrogeologicznego (na zachód i północny-zachód od wyrobiska poeksploatacyjnego),

Q_5 — odpływ ze zbiornika do utworów trzeciorzędowych wymuszony działaniem systemu odwadniania odkrywki w Machowie,

Q_6 — dopływ wód podziemnych z utworów trzeciorzędowych leżących poza oknem hydrogeologicznym, zajmujących pozostałą część obszaru filtracji (głównie na wschód od wyrobiska poeksploatacyjnego).

Średnie stężenie wybranego jonu wskaźnikowego w wodach zbiornika Piaseczno można przedstawić w postaci:

$$c_{\text{śr}} = \frac{Q_P \cdot c_P + Q_S \cdot c_S + Q_1 \cdot c_1 + Q_2 \cdot c_2 + Q_3 \cdot c_3 + Q_4 \cdot c_4 - Q_5 \cdot c_5 + Q_6 \cdot c_6}{Q_P + Q_S + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_5 + Q_6} \quad (1)$$

gdzie:

Q_i — wydajność i -tego strumienia wód podziemnych dopływającego do zbiornika wodnego [m^3/d],

c_i — stężenie i -tego jonu wskaźnikowego w wodach podziemnych [g/m^3].

Rozwiązanie równania bilansowego (1) wymaga przyjęcia koncentracji jonów wskaźnikowych Cl^- i SO_4^{2-} w poszczególnych strumieniach filtracyjnych (tab. 1). Stężenia te określono na podstawie archiwalnych wyników badań monitoringowych wód podziemnych i zbiornika Piaseczno. Dla określenia wydajności strumieni wód podziemnych (tab. 2) wykorzystano wyniki badań modelowych (Kulma, Haładus 2001).

Ilości wód zasilających zbiornik, a pochodzących z opadów atmosferycznych Q_P i ze spływu powierzchniowego Q_S , obliczono przyjmując wysokość opadów z wielolecia 1954—1980, z posterunku w Baranowie Sandomierskim, wynoszącą 640 mm/rok (Bajkiewicz-Grabowska 1997). Średnia roczna opadów z lat 1997—1999 wynosi 637 mm/rok, a więc jest bardzo zbliżona do wielkości z wielolecia.

Nadwyżkę parowania Q_N z powierzchni zbiornika nad opadami dla tej szerokości geograficznej przyjęto w wysokości 100 mm słupa wody rocznie.

5.3. Bilans dla stanu wyjściowego

Sprawdzeniem wiarygodności prognoz hydrogeochemicznych wykonanych dla zbiornika Piaseczno jest określenie stężeń wybranych jonów wskaźnikowych (chlorków i siarczanów) dla początkowego stanu hydrodynamicznego odtworzonego na modelu (czerwiec 2000 r.) oraz ich porównanie z wartościami uzyskanymi z badań jakości wody w punktach lokalnej sieci monitoringowej.

TABELA 1

Koncentracje jonów wskaźnikowych określone na podstawie badań monitoringowych w rejonie Piaseczna koło Tarnobrzega

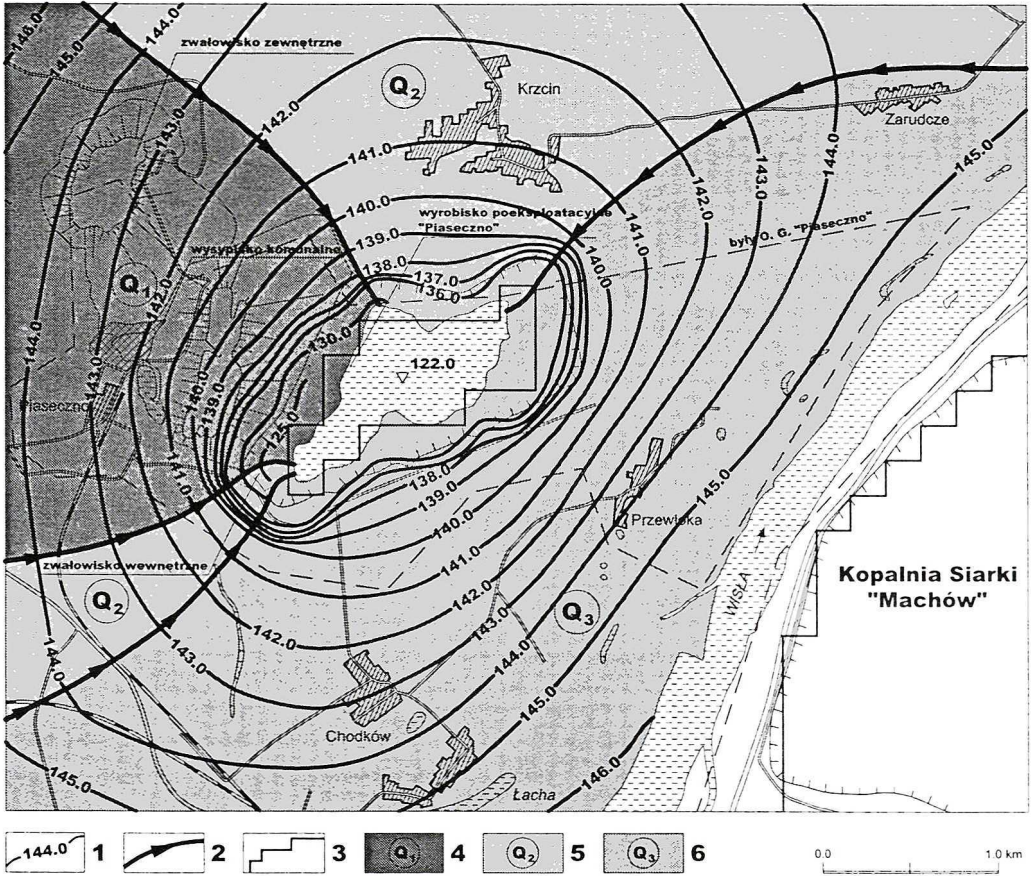
TABLE 1

Concentration of indicator ions described on the basis of monitoring in the region of Piaseczno near Tarnobrzeg

Chlorki (Cl ⁻)						
składniki bilansu*	stan wyjściowy (2000 r.)	stany prognozowane dla wysokości piętrzenia wody w zbiorniku Piaseczno [m n.p.m.]				
	121,3	130,0	138,0	130,0	138,0	146,0
c _P	10	10	10	10	10	10
c _N	0	0	0	0	0	0
c _S	35	35	35	35	35	35
c ₁	100	100	100	100	100	100
c ₂	35	35	35	35	35	35
c ₃	225	225	225	225	225	—
c ₄	600	600	600	600	600	600
c ₅	180	143,5**	123,1**	—	—	—
c ₆	—	—	—	3 500	3 500	3 500
Siarczany (SO ₄ ²⁻)						
składniki bilansu*	stan wyjściowy (2000 r.)	stany prognozowane dla wysokości piętrzenia wody w zbiorniku Piaseczno [m n.p.m.]				
	121,3	130,0	138,0	130,0	138,0	146,0
c _P	30	30	30	30	30	30
c _N	0	0	0	0	0	0
c _S	165	165	165	165	165	165
c ₁	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700
c ₂	250	250	250	250	250	250
c ₃	250	250	250	250	250	—
c ₄	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700
c ₅	800	717,2**	556,5**	—	—	—
c ₆	—	—	—	1 800	1 800	1 800

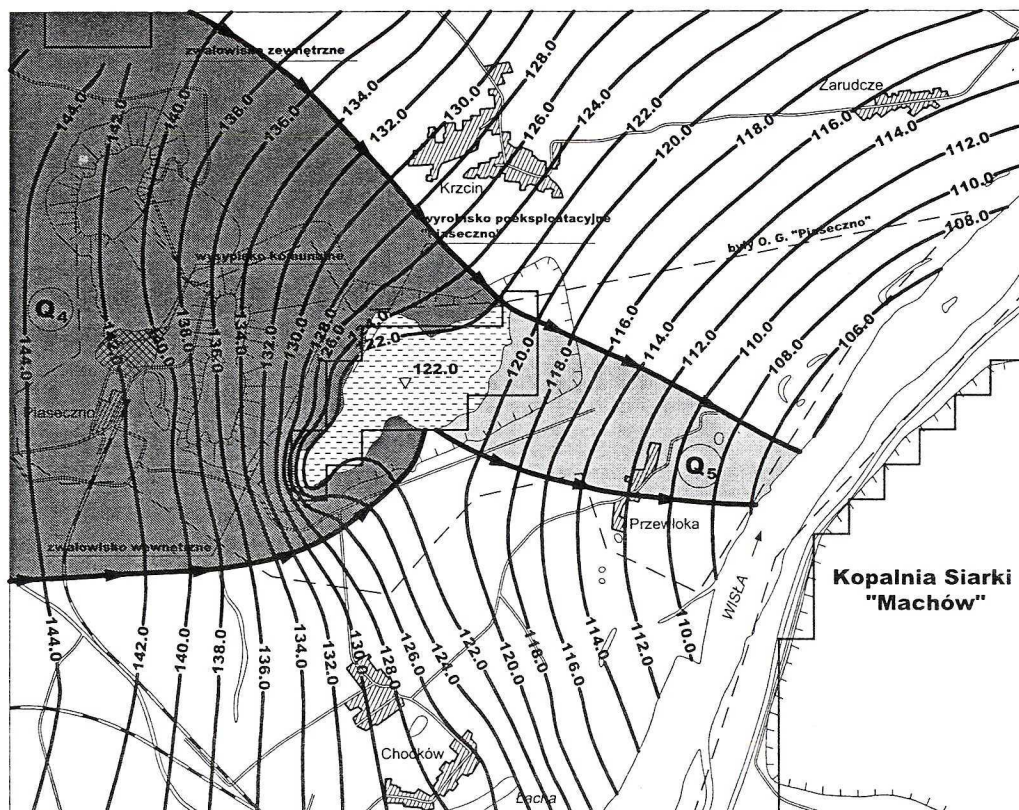
* objaśnienia symboli składników bilansowych podano w tekście.

** Przyjęto wielkości prognozowane (tab. 3).



Rys.1. Strumienie wód podziemnych piętra czwartorzędowego formujące skład chemiczny wody w zbiorniku Piaseczno — stan z czerwca 2000 r. po weryfikacji modelu hydrogeologicznego
 1 — hydroizohipsy, w m n.p.m., 2 — linie prądu strumienia filtracyjnego, 3 — maska obszaru badań modelowych, 4, 5, 6 — strumienie wód podziemnych uwzględnione w bilansie hydrogeochemicznym zbiornika

Fig. 1. Quaternary groundwater flows forming the chemical composition of of waters in the Piaseczno reservoir — state in June 2000 after verification of the hydrogeological model
 1 — hydroisohips in m absl (above sea level), 2 — flow lines of the filtration stream, 3 — extent of the modelled study area, 4, 5, 6 — groundwater flowlines considered in the hydrogeochemical balance of the reservoir



Rys. 2. Strumienie wód podziemnych piętra trzeciorzędowego formujące skład chemiczny wody w zbiorniku Piaseczno — stan z czerwca 2000 r. po weryfikacji modelu hydrogeologicznego
Objaśnienia jak na rys.1

Fig. 2. Tertiary groundwater flows forming the chemical composition of the Piaseczno reservoir waters—state in June 2000 after verification of the hydrogeological model
Explanations identical to Fig.1

TABELA 2

Wydajności źródeł zasilania zbiornika poeksploatacyjnego Piaseczno określone na podstawie badań modelowych

TABLE 2

Output capacity (discharge) of sources recharging the post-exploitation reservoir Piaseczno on the basis of modelling

Składniki bilansu*	Zasilanie zbiornika poeksploatacyjnego, [m ³ /d]					
	stan wyjściowy (2000 r.)	stany prognozowane dla wysokości piętrzenia wody [m n.p.m.]				
		121,3	130,0	138,0	130,0	138,0
Q _P	1 080	1 650	2 280	1 080	1 650	2 810
ΔQ _N	170	260	360	260	360	440
Q _S	220	160	100	160	100	60
Q ₁	4 420	4 760	3 430	5 420	3 860	1 430
Q ₂	3 870	4 570	4 800	6 140	7 900	4 360
Q ₃	5 030	5 370	5 720	5 610	4 400	0
Q ₄	1 970	1 020	300	1 730	1 020	190
Q ₅	340	700	1 700	0	0	0
Q ₆	0	0	0	2 230	1 170	410
F — powierzchnia zbiornika [m ²]	615 000	940 000	1 300 000	940 000	1 300 000	1 600 000
P — wysokość opadów [mm/rok]	640	640	640	640	640	640

* Objaśnienia symboli składników bilansowych podano w tekście.

Jon chlorkowy (Cl⁻)

Korzystając z równania bilansowego (1) można obliczyć średnią koncentrację chlorków w wodach zbiornika Piaseczno. Podstawiając odpowiednie wartości liczbowe (tab. 1 i 2) otrzymujemy: $C_{Cl(\bar{s}r)} = 177,1 \text{ mg/dm}^3$.

Obliczone stężenie chlorków jest wielkością bardzo zbliżoną do oznaczanych w wodach odprowadzanych ze zbiornika. Według badań wykonywanych przez Elektrownię Połaniec, w okresie styczeń 1999—czerwiec 2000, stężenia jonu chlorkowego najczęściej zawierały się w przedziale 177—188 mg/dm³, przy czym wartość średnia wynosiła 180,0 mg/dm³. Różnica między koncentracją chlorków obliczoną analitycznie a oznaczoną laboratoryjnie wynosi około 1,6%.

Udział poszczególnych strumieni formujących stężenie chlorków w wodach zbiornika jest bardzo zróżnicowany. Wody opadowe i pochodzące ze spływu powierzchniowego wnoszą bardzo niewielki ładunek chlorków, stanowiący tylko około 0,6% ładunku sumarycznego

„dostarczonego” do wód zbiornika. Największy wpływ na wzrost stężenia chlorków mają wody podziemne zanieczyszczone na skutek infiltracji zasolonych wód Wisły (39,7%) i wody dopływające z trzeciorzędowego piętra wodonośnego od strony zachodniej (41,7%).

Jon siarczanowy (SO_4^{2-})

Równanie (1), zapisane dla stanu początkowego obliczeń symulacyjnych, po podstawieniu w nim odpowiednich wartości (tab. 1 i 2) umożliwia obliczenie stężenia jonu siarczanowego. Wynosi ono $C_{\text{SO}_4(\text{sr})} = 801,3 \text{ mg/dm}^3$.

Wyniki badań jakości wód zbiornikowych zrealizowane w latach 1999—2000 przez Elektrownię Połaniec wskazują, że stężenia siarczanów w wodach pompowanych ze zbiornika mieściły się w przedziale od 602,7 do 893,9 mg/dm^3 . Wartość średnia wynosiła 799,8 mg/dm^3 , co oznacza, że różni się tylko o około 0,2% od prognozowanej dla stanu wyjściowego.

Ładunek siarczanów doprowadzany do wód zbiornikowych wraz z opadami atmosferycznymi i spływem powierzchniowym jest bardzo mały (w stosunku do całkowitego) i stanowi około 0,5%. Składnik ten jest głównie wnoszony przez strumień wód czwartorzędowych (58,3%) i trzeciorzędowych (26%), dopływający od strony zachodniej przez obszar składowiska wewnętrznego.

5.4. Bilans dla stanów prognozowanych

Równanie bilansowe (1), wykorzystywane do obliczenia stężeń jonu chlorkowego i siarczanowego w rozwiązaniach prognostycznych, ma ogólną postać identyczną jak dla stanu wyjściowego. Różni je natomiast wielkości dopływów pochodzących z poszczególnych „źródeł” zasilania (tab. 2). Obliczenia zostały wykonane przy założeniu, że stężenia jonów Cl^- i SO_4^{2-} w strumieniach filtracyjnych dopływających do zbiornika Piaseczno nie ulegną zmianie (tab. 1). Odstępstwa od tej zasady dotyczą tylko sytuacji, które nie występowały przy początkowym stanie hydrodynamicznym. Nie było wówczas możliwości zweryfikowania przyjętych stężeń jonów wskaźnikowych.

Z obliczeń prognostycznych wynika (tab. 3), że po spiętrzeniu wody w zbiorniku Piaseczno do rzędnych 130,0 i 138,0 m n.p.m., i równoczesnym utrzymaniu systemu odwadniania w Kopalni Siarki Machów, nastąpić powinien wyraźny spadek stężenia chlorków: ze 177,1 mg/dm^3 — w stanie wyjściowym, do odpowiednio 143,5 i 123,1 mg/dm^3 , tj. o około 19,0 i 30,5%. Podobna tendencja powinna być obserwowana w przypadku siarczanów, których koncentracja zmniejszy się z 801,3 mg/dm^3 — w warunkach początkowych, do 717,2 i 556,5 mg/dm^3 . W prognozowanych warunkach nastąpiłoby więc ograniczenie zawartości siarczanów odpowiednio o około 10,5 i 30,5%.

Spadek koncentracji jonów wskaźnikowych w zbiorniku Piaseczno w miarę jego napełniania wodą spowodowany będzie zarówno zmniejszeniem dopływu strumieni silnie zanieczyszczonych (od strony składowiska wewnętrznego), jak i wzrostem ilości wód odpływających do piętra trzeciorzędowego we wschodniej części odkrywki, tj. ku wyrobisku Machów.

Obecnie (2000 r.) ładunek soli, wyrażony jako suma jonów $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$, w wodach odprowadzanych do Wisły wynosi około 14 630 kg w ciągu doby (tab. 3). Z rozwiązań prognostycznych wynika, że ilości te zmniejszą się do około 12 930 kg/d, tj. o około 13,2%, lub nawet do 8 530 kg/d, a więc o około 41,7%.

TABELA 3

Prognozowane koncentracje jonów wskaźnikowych i wielkość ładunku soli w wodach odprowadzanych do Wisły ze zbiornika Piaseczno

TABLE 3

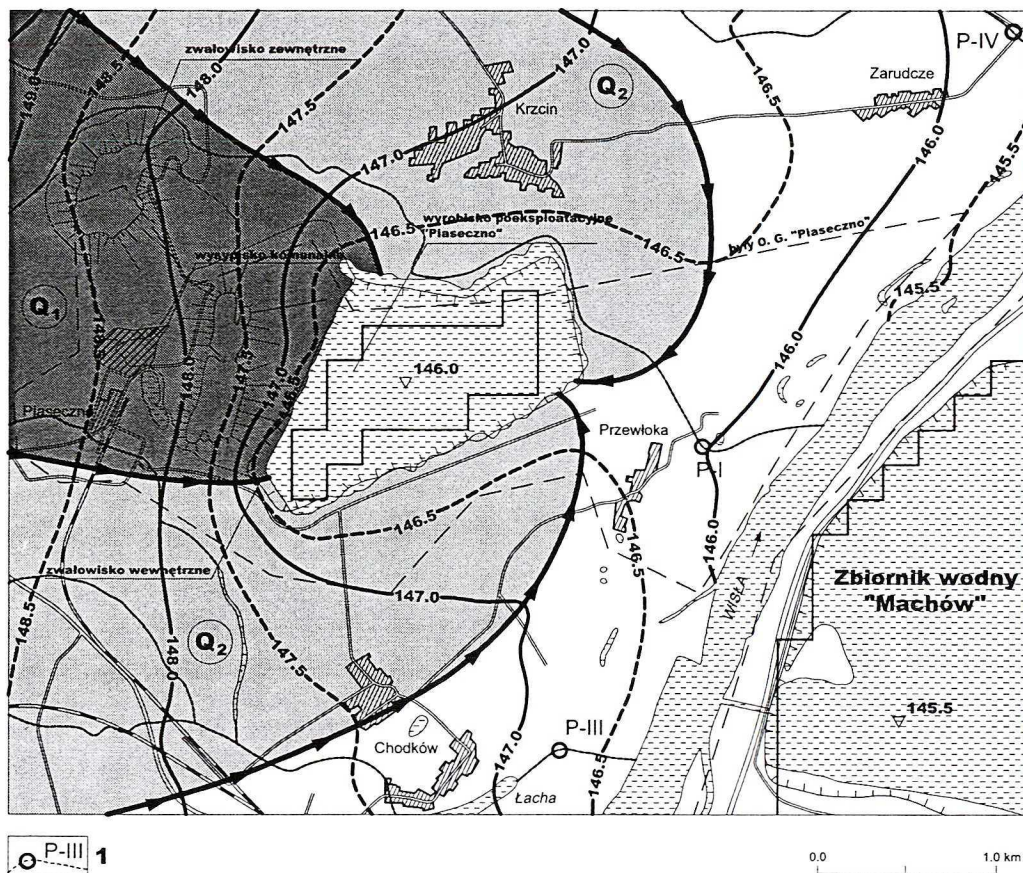
Proposed concentration of indicator ions and the amount of salt load in waters directed into the Vistula from the Piaseczno reservoir

Odwadnianie odkrywek i stan robót likwidacyjnych	Rzędna piętrzenia wody w zbiorniku Piaseczno [m n.p.m.]	Koncentracje jonów wskaźnikowych [mg/dm ³]		Prognozowane dopływy [m ³ /d]	Ładunek soli Cl ⁻ + SO ₄ ²⁻ [kg/d]
		chlorki (Cl ⁻)	siarczany (SO ₄ ²⁻)		
Stan wyjściowy na czerwiec 2000 r.	121,3	177,1	801,3	14 950	14 627
W KS Machów prowadzone jest odwadnianie odkrywki barierami studziennymi	130,0	143,5	717,2	15 020	12 928
	138,0	123,1	556,5	12 550	8 529
Zakończono likwidację KS Machów — w wyrobisku utworzono zbiornik wodny	130,0	492,0	866,7	21 130	28 709
	138,0	323,2	686,1	18 350	18 521
Zakończono likwidację wyrobisk pogórnich, w rejonie Piaseczna działa system melioracyjny	146,0	212,5	530,2	6 390	4 746

Obliczenia wykonane dla scenariusza, według którego wysokość piętrzenia 130,0 i 138,0 m n.p.m. w zbiorniku Piaseczno osiągnęte są po zakończeniu likwidacji wyrobiska w Machowie, wskazują, że należy się spodziewać pogorszenia jakości wody w zbiorniku. Stężenie siarczanów może wzrosnąć do 866,7 mg/dm³, a chlorków aż do 492,0 mg/dm³ (tab. 3). W stosunku do stanu obecnego (2000 r.) spowodowałyby to przyrost tych wskaźników odpowiednio o około 8,2 i aż o 277,8%. Ładunek soli zrzucany do Wisły może natomiast sięgać około 28 710 kg (Cl + SO₄)/d (wzrost o 96,2%).

Spiętrzenie wody w zbiorniku Piaseczno do 138,0 m n.p.m. wpłynie na zmniejszenie zawartości siarczanów i chlorków w stosunku do stanu poprzedniego. Jednak koncentracja chlorków w porównaniu do stanu wyjściowego może być wyższa i wynosić 323,2 mg/dm³, tj. wzrosnąć o około 182,4%. Powinna się natomiast zmniejszyć o około 14,4% ilość siarczanów, osiągając 686,1 mg/dm³. Ładunek soli w stosunku do stanu z roku 2000 wzrośnie zatem do około 18 520 kg (Cl + SO₄)/d, tj. o około 26,6%.

Dalsze piętrzenie zbiornika Piaseczno powinno wpłynąć na poprawę jakości wody zarówno w stosunku do sytuacji jaka powstanie po likwidacji KS Machów, jak i stanu aktualnego (2000 r.). Przy docelowej wysokości napełnienia zbiornika (146,0 m n.p.m.) stężenie chlorków może sięgać 212,5 mg/dm³, będzie więc wyższe o około 20% od obecnego (tab. 3). Jednak wyraźnie, bo o około 33,8%, zmniejszy się ilość siarczanów, które osiągną koncentrację około 530,2 mg/dm³.

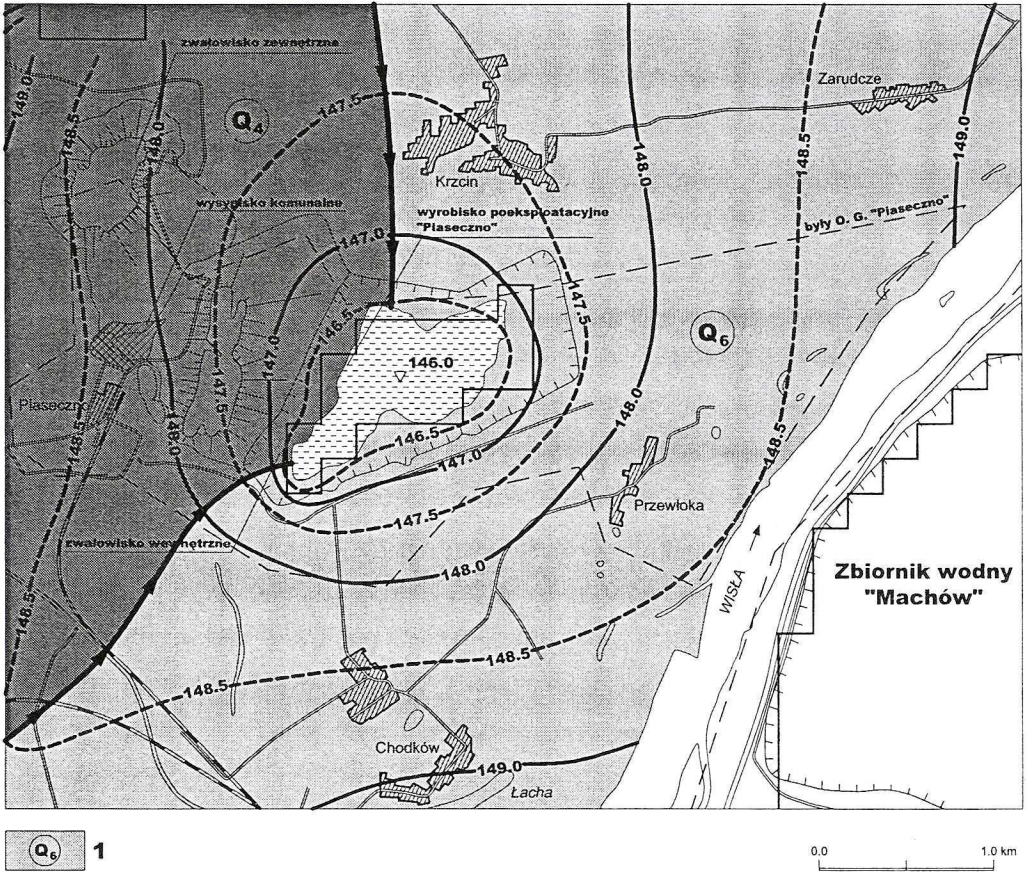


Rys. 3. Strumienie wód podziemnych piętra czwartorzędowego formujące skład chemiczny wody w zbiorniku Piaseczno — stan prognozowany po likwidacji wyrobisk pocksploatacyjnych w Piasecznie i Machowie, w warunkach działania systemu melioracyjnego

1 — rów melioracyjny sieci podstawowej wraz z przepompownią. Pozostałe objaśnienia jak na rys. 1

Fig. 3. Quaternary groundwater flows forming the chemical composition of waters in the Piaseczno reservoir — prognosed state after liquidation of the post-exploitation excavations in Piaseczno and Machow under the conditions of a working melioration system

1 — Melioration drainage trenches of the primary drainage network along with intermediate pumping stations. Remaining explanations as in fig. 1



Rys. 4. Strumienie wód podziemnych pięt trzeciorzędowego formujące skład chemiczny wody w zbiorniku Piaseczno — stan prognozowany po likwidacji wyrobisk poeksploatacyjnych w Piasecznie i Machowie, w warunkach działania systemu melioracyjnego
Objaśnienia jak na rys.1

Fig. 4. Tertiary groundwater flows forming the chemical composition of waters in the Piaseczno reservoir — prognosed state after liquidation of the post-exploitation excavations in Piaseczno and Machow under the conditions of a working melioration system
Explanations identical to Fig.1.

W warunkach jakie powstaną po zakończeniu likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego w Piasecznie znacznie powinna zostać ograniczona wielkość ładunku soli „zrzuca” wraz z wodami nadmiarowymi do Wisły. Zmniejszenie tego ładunku, z około 14 630 (stan początkowy) do około 4750 kg ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$)/d (stan końcowy), wynika jednak głównie z ponad dwukrotnego zmniejszenia ilości wody, którą trzeba będzie odprowadzić ze zbiornika. Wpływ zmiany stężenia jonów wskaźnikowych na wielkość ładunku soli będzie relatywnie mniejszy.

Z prognostycznych obliczeń bilansu hydrochemicznego wynika, że jakość wody w zbiorniku Piaseczno będzie uzależniona od osiągniętej wysokości piętrzenia i postępu prac likwidacyjnych w wyrobisku Machów. Im szybciej zostanie osiągnięty stan docelowy w odkrywce Machów (zbiornik wodny o rzędnej napełnienia 145,5 m n.p.m.) i większe będą różnice pomiędzy położeniem wody w obu likwidowanych wyrobiskach, tym gorszej jakości wody należy oczekiwać w zbiorniku Piaseczno. Jednak po osiągnięciu stanu docelowego w odkrywce Piaseczno, pomimo braku dennej warstwy izolacyjnej, powinna nastąpić poprawa jakości wody w stosunku do obserwowanej obecnie.

Podsumowanie i wnioski

Obecnie (2000 r.) w realnej koncepcji likwidacji wyrobiska Piaseczno wyklucza się możliwość wykonania dennej warstwy izolacyjnej. Po przyjęciu takiego założenia zostały wykonane badania modelowe (Kulma i in. 2000 r.), w których uwzględnione zostały różne fazy likwidacji wyrobisk poeksploatacyjnych Piaseczno i Machów. Wyniki badań symulacyjnych wykorzystane zostały dla oceny hydrochemicznych skutków likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego.

Skład chemiczny wody w zbiorniku Piaseczno kształtuje się pod wpływem strumieni filtracyjnych charakteryzujących się zróżnicowanym natężeniem przepływu i składem chemicznym. Głównymi wskaźnikami zanieczyszczenia, przyjętymi w obliczeniach, są chlorki i siarczany. Chlorki potraktowano jako wskaźnik idealny służący do identyfikacji źródeł zasilania zbiornika. Jon siarczanowy wykorzystano zarówno do identyfikacji tych źródeł, jak i do wyjaśnienia procesów zachodzących w zbiorniku.

Wpływ poszczególnych strumieni zasilających zbiornik Piaseczno na wzrost koncentracji chlorków i siarczanów jest zróżnicowany. Wody opadowe i pochodzące ze spływu powierzchniowego dostarczają niewielki ładunek, nie mający istotnego znaczenia dla formowania się składu chemicznego wód zbiornikowych. Obecnie (2000 r.) największy wpływ na wzrost stężenia chlorków mają wody podziemne zanieczyszczone na skutek infiltracji zasolonych wód z Wisły (ok. 40%) i wody dopływające z trzeciorzędowego piętra wodonośnego od strony zachodniej, tj. głównie z obszaru składowiska wewnętrznego (ok. 42%). Głównym źródłem siarczanów jest strumień dopływający od strony składowiska, skąd pochodzi około 84% ładunku wnoszonego do odkrywki.

Z bilansów hydrochemicznych wykonanych dla rozwiązań prognostycznych wynika, że tempo piętrzenia wody w odkrywce Piaseczno i likwidacja systemu odwadniania wyrobiska Machów będą miały istotny wpływ na zmiany składu chemicznego wód zbiornikowych. Spiętrzenie wody do wysokości 130,0 i 138,0 m n.p.m., przy równoczesnym odwadnianiu odkrywki KS Machów, powinno spowodować poprawę jakości wód zbiornikowych.

Wyłączenie odwadniania odkrywki Machów i odbudowa wysokości hydraulicznej w tym rejonie powinny spowodować pogorszenie jakości wody w zbiorniku Piaseczno, pomimo jej spiętrzenia do tych samych wysokości. W dopływie wody z piętra trzeciorzędowego będzie wzrastał udział wód o wyższej mineralizacji, napływających głównie od strony Machowa. Należy się spodziewać wzrostu koncentracji chlorków i siarczanów — przy wysokości piętrzenia 130 m n.p.m., oraz ich obniżenia — przy wysokości piętrzenia 138,0 m n.p.m.

W stanie docelowym w wodach zbiornika Piaseczno powinien nastąpić wyraźny spadek ilości siarczanów do około 530 mg/dm^3 , tj. o około 34% w stosunku do stanu obecnego. Więcej będzie natomiast chlorków, o około 20%, a ich zawartość wzrośnie do około 213 mg/dm^3 . Zmniejszy się zdecydowanie ładunek soli zrzucany do Wisły, z około $14\,600 \text{ kg} (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})/\text{d}$ — w 2000 r. do około $4800 \text{ kg} (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})/\text{d}$ — po zakończeniu procesu likwidacji. Przyczyną tego będzie głównie spadek ilości wód odprowadzanych ze zbiornika. W stanie docelowym powinna jednak nastąpić poprawa jakości wody w stosunku do obserwowanej obecnie.

Z przedstawionych względów korzystne dla ochrony jakości wód zbiornikowych jest niezwłoczne rozpoczęcie prac likwidacyjnych w odkrywce Piaseczno, zmierzające do jak najszybszego wyłączenia pomp i rozpoczęcia piętrzenia wody w zbiorniku.

Czas wymiany wody w zbiorniku Piaseczno, w miarę wzrostu wysokości jego napełnienia, wydłuży się z około 1 roku obecnie do ponad 13 lat w stanie docelowym. Będzie go więc charakteryzować powolna wymiana wód. W dolnej części zbiornika mogą zatem gromadzić się wody o podwyższonym zasoleniu i zawierające siarkowodór. Stratyfikacja gęstościowa powinna jednak powstrzymać jego migrację do górnych warstw w ilościach, które nie mogłyby być utlenione w strefie mieszania się wód (epilimnionie).

LITERATURA

- Bajkiewicz-Grabowska E., 1997 — Regionalne warunki hydrologiczne. Zakład Systemów Pomiarowych, Wiązowna k. Warszawy.
- Dojlido J., 1995 — Chemia wód powierzchniowych. Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok.
- Kania J., Haładus A., 1999 — Prognoza zmian jakości wód zbiornikowych w warunkach likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego Piaseczno. Gosp. Sur. Min., t. 15, z. 2, Kraków.
- Kirejczyk J., Pantuła Z., 1997 — Aktualizacja programu likwidacji wyrobiska górniczego w Piasecznie w składowaniu z zaktualizowanym programem likwidacji Kopalni Siarki Machów. Opracowanie OBR PS „Siarkopol”, Tarnobrzeg.
- Kirejczyk J., Uberman R., Matuszcwski J., 2000 — Studium nowego sposobu likwidacji wyrobiska Piaseczno. OBR PS Siarkopol, Tarnobrzeg.
- Kopeć J., Wojteczko T., 1993 — Projekt techniczny likwidacji wyrobiska górniczego Kopalni Siarki Machów. OBR PS Siarkopol, Tarnobrzeg.
- Kulma R., Haładus A., 2000 — Aktualizacja prognoz związanych z odwadnianiem utworów trzeciorzędowych w Kopalni Siarki Machów na podstawie badań modelowych (etap II — okres działania barier zewnętrznych). AGH, Kraków.
- Kulma R., Haładus A., 2001 — Hydrodynamiczne skutki likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego siarki w Piasecznie koło Tarnobrzega przy braku dennej warstwy izolacyjnej. Gosp. Sur. Min., t. 17, z. 1, Kraków.
- Szczyptański A., Haładus A., Kulma R., 1994 — Prognoza hydrogeologicznych skutków likwidacji wyrobiska Kopalni Siarki Machów (część hydrodynamiczna — badania modelowe). AGH, Kraków.

WATER QUALITY FORMATION CONDITIONS IN THE PIASECZNO RESERVOIR NEAR TARNOBZEG DURING LIQUIDATION OF OF THE POST- EXPLOITATION SULPHUR EXCAVATION**Key words**

Hydrogeochemistry, mine liquidation, prognostic calculations

Abstract

One of the more serious problems occurring in the region of Tarnobrzeg in recent years is the liquidation of the sulphur mines Machow and Piaseczno in a manner that would minimize the threat to the natural environment. The liquidation program indicates that in place of the mining excavations recreational water reservoirs are to be built. In the Machow excavation a 25 metre thick layer of cracovian clay is being built in order to isolate the water in the future reservoir from contaminated Tertiary waters. Since 1981, when mining activities at the Piaseczno excavations were ceased, a water reservoir has existed with the water level being maintained by directing excess water into the Vistula river. As a result of financial difficulties a isolating layer was not constructed at the Piaseczno excavation.

The prognosed changes to the water quality at the Piaseczno are based on simulation modelling results on a hydrogeological conditions model of the Tarnobrzeg Sulphur Depression. The various solutions considered the variations in the water level height at the Piaseczno reservoir and the expected proress of liquidation at the Machow mine. The basis for the hydrogeochemical balance, enabling an estimation of the water quality in the reservoir was the discharge quantity of feeder streams as well as the concentration of indicator chloride and sulphate ions.

At present as well as in the prognosis, the largest contaminant load is transported into the reservoir by feeder streams filtration flows from the direction of waste disposal sites. In the final stage the concentration of the chloride ion in the reservoir waters caused by this feeder streams filtration stream flow will amount to about 42% of the total concentration while for sulphates it is about 84%.

Prognostic calculations indicate that the water quality in the Piaseczno reservoir will be significantly influenced by progress and initial liquidation work relations in both post-exploitation excavations. Periodically, degradation of the water quality may occur however under the expected conditions it will improve in relation to the water quality currently observed.