

ANDRZEJ HAŁADUS*, RYSZARD KULMA*, LIDIA BURCHARD**

Prognozy hydrogeologiczne przebiegu likwidacji Kopalni Siarki Machów

Słowa kluczowe

Hydrogeologia, likwidacja kopalń, obliczenia prognostyczne

Streszczenie

W rejonie Tarnobrzega prace likwidacyjne w wyrobisku poeksploatacyjnym Kopalni Siarki Machów są realizowane w sposób minimalizujący zagrożenie dla środowiska naturalnego. W grudniu 2002 r. zakończono formowanie na dnie wyrobiska 25-metrowej warstwy izolacyjnej oddzielającej wody przyszłego zbiornika od zanieczyszczonych wód trzeciorzędowych. Do czasu napełnienia odkrywki wodą z Wisły będzie ona odwadniana, aby nie spowodować rozszczelnienia utworzonej warstwy izolacyjnej.

Na matematycznym modelu warunków hydrogeologicznych Tarnobrzeskiego Zagłębia Siarkowego, utworzonym w programie Modflow, wykonano prognozę zmian stosunków wodnych obejmującą końcowy okres likwidacji odkrywki Machów. Wyniki tych obliczeń pozwalają optymalizować lokalizację studni odwodnieniowych i ilości odbieranych wód trzeciorzędowych oraz określić wpływ likwidacji wyrobiska na środowisko wodne.

Z rozwiązań symulacyjnych wynika, że w miarę napełnienia odkrywki wodą można będzie znacząco ograniczyć ilość wody pompowanej z piętra trzeciorzędowego aż do całkowitego wyłączenia systemu odwadniania. Nowym istotnym ośrodkiem drenażu zanieczyszczonych wód trzeciorzędowych będzie niezlikwidowane wyrobisko górnicze byłej Kopalni Siarki Piaseczno.

Wprowadzenie

Na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych wystąpiły trudności ze zbytem siarki na rynkach światowych. Wymusiło to konieczność likwidacji w rejonie Tarnobrzega

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

** Mgr inż., Kopalnia Siarki Machów, Tarnobrzeg.

odkrywkowej Kopalni Siarki Machów. Kilka lat później, bo w 2001 r., podobny los spotkał Kopalnię Siarki Jeziórko, eksploatującą złoża metodą podziemnego wytopienia.

W marcu 1994 r. w wyrobisku Machów, o powierzchni około 460 ha, na podstawie projektu technicznego opracowanego przez Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Przemysłu Siarkowego „Siarkopol” (Kopeć, Wojteczko 1993) rozpoczęto górnicze roboty likwidacyjne. Przyjęto wodny kierunek likwidacji, po uprzednim wyprofilowaniu skarp i uszczelnieniu dna wyrobiska 25-metrową warstwą izolacyjną.

W celu niedopuszczenia do rozszczelnienia poziomej warstwy przeciwnieprzepuszczalnej oraz zapewnienia bezpiecznego prowadzenia prac likwidacyjnych w wyrobisku, proces jej tworzenia i formowania odbywał się przy zdepresjonowanym ciśnieniu wód złożowych. Obecnie (III kwartał 2002 r.) system studni głębinowych, rozmieszczonych w barierach wewnętrznych odkrywki, odbiera wodę z piętra trzeciorzędowego z wydajnością około 23 000 m³/d.

Końcowy etap prac likwidacyjnych może być zrealizowany po przygotowaniu budowlí hydrotechnicznych umożliwiających napełnienie utworzonego zbiornika wodą z Wisły, w ilości około 200 mln m³. Czas potrzebny na wykonanie tego zadania wyniesie około 5,4 miesiąca, lecz może ulec wydłużeniu, nawet do ponad jednego roku, ze względu na sezonowość występowania stanów wysokich. Odwadnianie wyrobiska poeksploatacyjnego będzie stopniowo ograniczane, w miarę napełniania zbiornika wodą. Warunkiem koniecznym jest zachowanie równowagi pomiędzy ciśnieniem hydrostatycznym wody w zbiorniku i przewidywanym wzrostem ciśnienia wód złożowych. Odbudowa ciśnienia piezometrycznego w czwartorzędowym i trzeciorzędowym piętrze wodonośnym nastąpi po osiągnięciu docelowej rzędnej lustra wody w zbiorniku, tj. 145,5 m n.p.m., i zakończeniu odwadniania wyrobiska.

1. Stan prac hydrotechnicznych związanych z likwidacją odkrywki Machów

Do końca 2002 r. zakończone zostały prace przy formowaniu ilowej warstwy izolującej dno przyszłego zbiornika wodnego. Zbocza i skarpy nadwodne są już częściowo wyprofilowane. Ponadto wykonano szeroką, na około 40 m, płaszczyznę abrazyjną oraz uformowano wyspę, o powierzchni około 8,5 ha, jako element urozmaicenia krajobrazu. W trakcie wykonywania jest przyskarpowy system dereniażu wód czwartorzędowych oraz rowy opaskowe. Na terenach bezpośrednio przylegających do wyrobiska oraz odzyskanych po zlikwidowanych obiektach technologicznych prowadzone są prace rekultywacyjne.

Wraz z postępem prac przy tworzeniu warstwy izolacyjnej systematycznie przebudowywany jest system odwadniania trzeciorzędowego piętra wodonośnego. Zlikwidowane zostały wszystkie zbędne studnie położone wewnątrz wyrobiska i poza jego obrysem. Wiercone są nowe otwory bariery zewnętrznej, która przejmie funkcję odwadniania odkrywki po wykonaniu dennej warstwy uszczelniającej. System odbioru wody będzie funkcjonował w czasie prowadzenia robót technologicznych związanych z ostatecznym formowaniem skarp brzegowych zbiornika i doprowadzaniem wody z Wisły.

Według obowiązującego programu likwidacji wyrobiska pogórniczego w Machowie pozostało jeszcze do realizacji:

— dokończenie budowy hydrotechnicznych niezbędnych do napełnienia i częściowej wymiany wody w trakcie późniejszej eksploatacji zbiornika (do końca II kwartału 2004 r.). Z prawidłowym funkcjonowaniem budowy wlotowej projektowanego zbiornika związana jest również regulacja odcinka Wisły,

— kontynuowanie prac ziemnych związanych z profilowaniem zboczy wyrobiska (do końca 2005 r.),

— rekultywacja powierzchni skarp wyrobiska oraz terenów przylegających, położonych poza linią brzegową przyszłego zbiornika rekreacyjnego (do końca 2007 r.),

— prowadzenie odwodnienia serii złożowej aż do zakończenia napełnienia zbiornika wodą z Wisły.

2. Charakterystyka modelu hydrogeologicznego

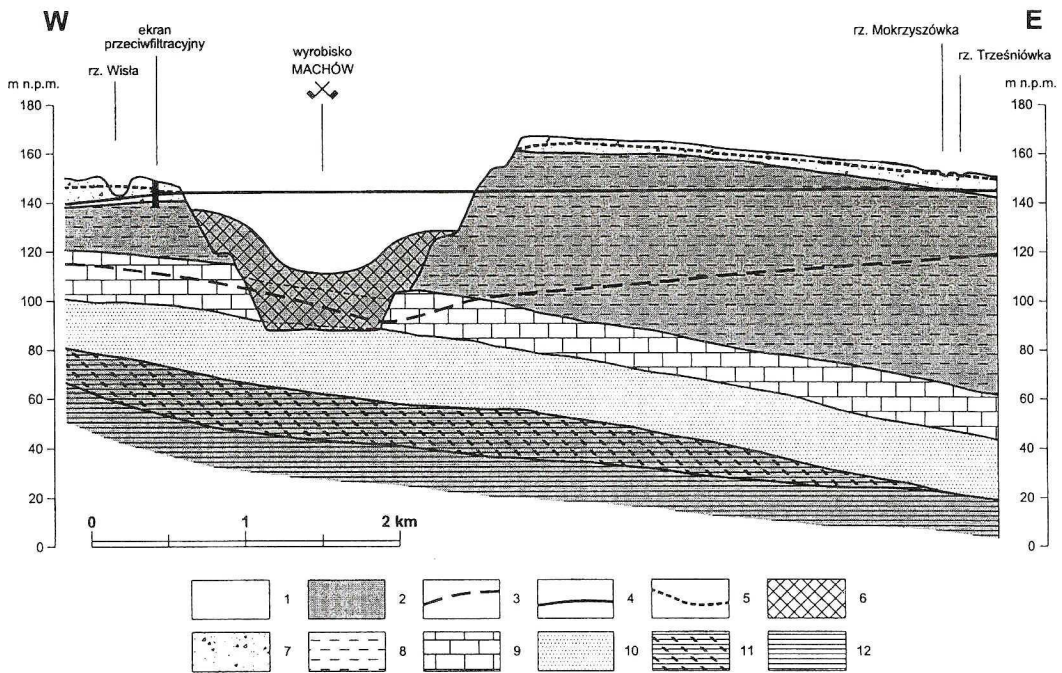
2.1. Ogólne założenia modelu

Obszar filtracji objęty badaniami modelowymi wyznaczony został na podstawie przesłanek hydrogeologicznych i techniczno-eksploatacyjnych. W jego granicach znalazły się wszystkie obiekty górnicze i ujęcia wód podziemnych, których działalność kształtuje stosunki wodne w obrębie czwartorzędowego i trzeciorzędowego piętra wodonośnego w rejonie Tarnobrzesckiego Zagłębia Siarkowego (TZS). W centralnej części obszaru badań położone są wyrobiska poeksploatacyjne odkrywkowych kopalń siarki w Machowie i Piasecznie. Również pozostałe zakłady górnicze prowadzące wydobywanie siarki metodą otworową, w tym nieczynna już od września 2001 r. kopalnia Jeziórko oraz działająca w dalszym ciągu kopalnia Osiek, zostały objęte bezpośrednimi badaniami modelowymi.

Trójwarstwowy model warunków hydrogeologicznych obszaru TZS opracowany został (Kulma i in. 1998) w oparciu o dotychczasowy stan rozpoznania geologicznego. Bezpośrednimi badaniami modelowymi objęty został obszar około 900 km² podzielony na 5562 bloki obliczeniowe o wymiarach od 200 do 800 m, zawierające się w 70 wierszach i 94 kolumnach. Przyjęty podział obszaru filtracji z wystarczającą dokładnością odwzorowuje na modelu istotne szczegóły budowy geologicznej, warunki hydrogeologiczne i elementy techniczno-eksploatacyjne zakładów górniczych. Zapewnił także poprawną symulację ujęć wód podziemnych i w miarę prawidłowe odwzorowanie linii brzegowej Wisły, zwłaszcza w bezpośrednim sąsiedztwie odkrywek. Badania symulacyjne wykonano na modelu cyfrowym z wykorzystaniem programu Processing Modflow.

Przyjęty do badań modelowych schemat warunków hydrogeologicznych przedstawia się następująco:

1. Na całym obszarze występuje czwartorzędowa warstwa wodonośna (rys. 1) o zwierciadle swobodnym. Stanowią ją utwory piaszczysto-żwirowe, w których przewaga frakcji gruboziarnistych i żwirowych występuje najczęściej w partiach spągowych. Miąższość utworów zawodnionych jest zmienna i w dużej mierze uzależniona od morfologii stropu iłów krakowieckich. Warstwa trzeciorzędowa (rys. 1), o zwierciadle naporowym, utworzona jest przez wapienie serii chemicznej i piaszczysto-piaskowcowe utwory serii baranowskiej.



Rys. 1. Schematyczny przekrój hydrogeologiczny I—I' przez złożę siarki w rejonie Tarnobrzega

1, 2 — utwory przepuszczalne (1) i nieprzepuszczalne (2), 3, 4 — zwierciadło wody piętra trzeciorzędowego, według badań modelowych — stan na wrzesień 2002 r. (3) i stan prognozowany po zakończeniu likwidacji Kopalni Siarki Machów (4), 5 — zwierciadło wody piętra czwartorzędowego, według badań modelowych, 6 — warstwa izolująca uformowana na dnie wyrobiska poeksploatacyjnego, 7 — piaski i żwiry (czwartorzęd), 8 — iły i iłołupki serii krakowieckiej (trzeciorzęd), 9 — wapienie serii złożowej (trzeciorzęd), 10 — piaski i piaskowce serii baranowskiej (trzeciorzęd), 11 — iły burowęgłowe (trzeciorzęd), 12 — łupki i piaskowce kwarcytowe (kambr)

Fig. 1. Schematic hydrogeological cross-section I—I' through the native sulphur deposit near Tarnobrzeg
1, 2 — permeable (1) and impermeable (2) rocks, 3, 4 — groundwater table in Tertiary horizon due to modelling results — data for September 2002 (3) and prognosed position after completed remediation of the Machów Mine (4), 5 — groundwater table in Quaternary horizon due to modelling results, 6 — protection layer laid down onto the pit floor 7 — sands and gravels (Quaternary), 8 — clays and clayey shales of the Krakowice Series (Tertiary), 9 — limestones of the chemical (ore) horizon (Tertiary), 10 — sands and sandstones of the Baranów Series (Tertiary), 11 — clays of the brown-coal formation (Tertiary), 12 — shales and quartzitic sandstones (Cambrian)

2. Wszystkie rzeki i ich dopływy mają bezpośredni lub pośredni kontakt hydrauliczny z czwartorzędową warstwą wodonośną. Odcinki niektórych rzek tworzyły zewnętrzne granice modelu (Kacanka, Koprzywianka i Wisła — od północy, Łęg — od wschodu, ujściowy odcinek Wisłoki — od zachodu) lub też stanowiły wewnętrzne warunki brzegowe (Wisła z jej dopływami: Zawidzianką-Broźnią, Babułówką i Trześniówką, dopływy Trześniówki oraz kanały Chorzelsko-Dymitrowski, Młodochowski, Kliszowski i Łuczek). W aktualnych warunkach (według stanu na wrzesień 2002 r.) ciekł te, poza lokalnymi odcinkami, mają charakter drenujący.

3. Zasilanie czwartorzędowej warstwy wodonośnej następuje głównie przez bezpośrednią infiltrację opadów atmosferycznych. Sprzyja temu na ogół dobra przepuszczalność utworów

zalegających powyżej zwierciadła wód podziemnych, niewielkie deniwelacje terenu oraz brak większych kompleksów leśnych (z wyjątkiem południowo-wschodnich fragmentów obszaru badań modelowych). Średnia roczna wysokość opadów atmosferycznych w latach 1997—2001, obliczona na podstawie pomiarów z posterunków opadowych w Baranowie Sandomierskim i Sandomierzu, wynosiła 633 mm/rok,

4. Czwartorzędowe piętro wodonośne eksploatowane jest przez nieliczne ujęcia wód podziemnych. Łączny pobór wody wynosi około 14 000 m³/d, co stanowi blisko 25% zatwierdzonych zasobów eksploatacyjnych. Pobór ten nie powoduje istotnych skutków w układzie pola hydrodynamicznego, a zasięgi depresyjnego oddziaływania studni są na ogół ograniczone.

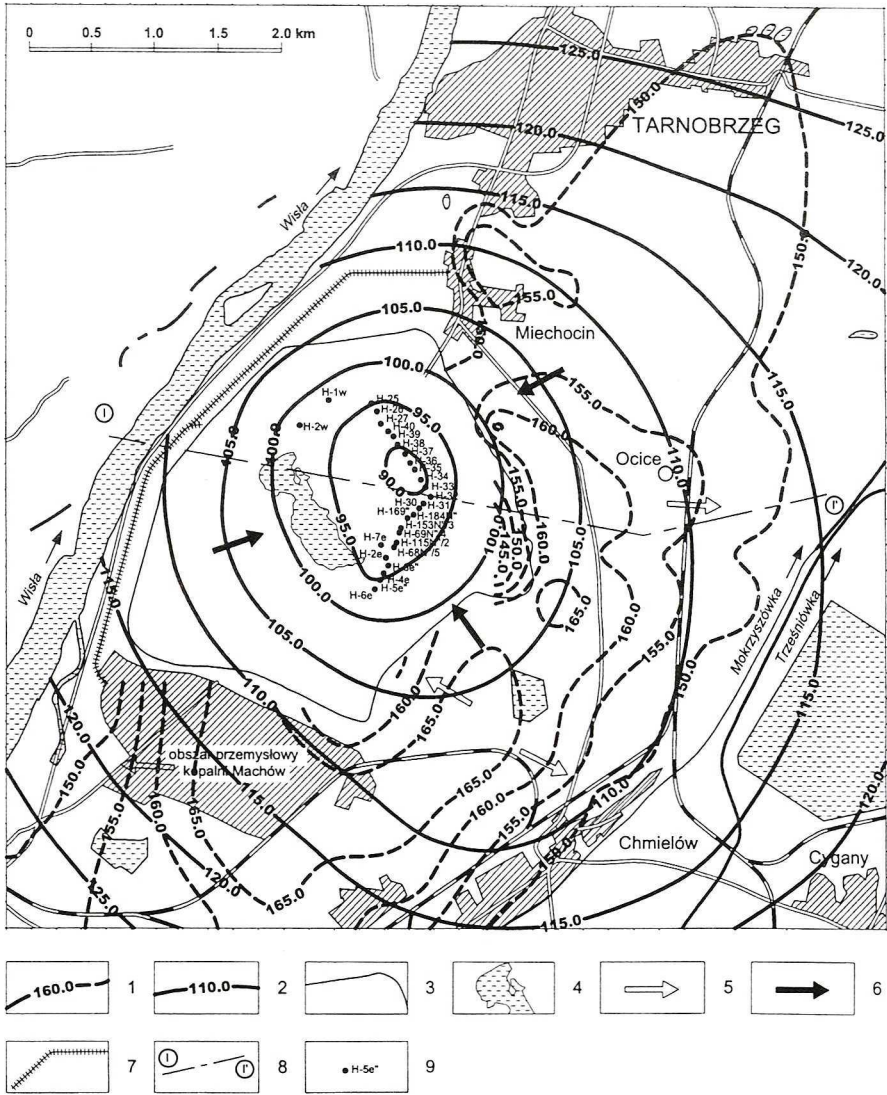
5. Znaczący udział w kształtowaniu stosunków wodnych mają wyrobiska poeksploatacyjne kopalń siarki. Odwadnianie utworów czwartorzędowych w rejonie wyrobiska poeksploatacyjnego w Piasecznie doprowadziło do powstania leja depresji obejmującego powierzchnię około 25 km². Oddziaływanie systemu drenażowego odkrywki Machów w tym piętrze wodonośnym jest niewielkie i praktycznie zawężone do strefy o szerokości 100—500 m, głównie od północno-wschodniej i wschodniej strony wyrobiska. Istotne przeobrażenia stosunków wodnych spowodowało natomiast odwadnianie serii złożowej (wapieni siarkonośnych) i baranowskiej (piaski i piaskowce). Obecny zasięg strefy zdepresjonowanej w utworach trzeciorzędowych, przy zmniejszonym odbiorze wody przez system odwadniania likwidowanej odkrywki Machów, obserwowany jest do odległości około 8 km, a jej powierzchnia wynosi ponad 200 km²,

6. Kierunek przepływu wód podziemnych w piętrze czwartorzędowym jest w dużej mierze zdeterminowany drenującym charakterem rzek. Układ hydroizohips wskazuje, że kierunek północno-wschodni dominuje dla ruchu strumienia wód podziemnych na obszarze położonym na lewym brzegu Wisły, natomiast kierunek południowo-zachodni przeważa w części prawobrzeżnej. W obu przypadkach podstawę drenażu stanowi dolina Wisły. W piętrze trzeciorzędowym przepływ strumienia wód podziemnych wymuszony jest głównie przez systemem barier studziennych kopalni Machów. Powstały lej depresji obejmując swym zasięgiem również nieczynną, ale odwadnianą odkrywkę w Piasecznie. Mimo zakończenia otworowej eksploatacji siarki w Kopalni Jeziórko utrzymuje się w tym rejonie wyraźny stożek impresji, jako skutek działania barier hydraulicznych.

2.2. Weryfikacja modelu

Przed wykonaniem obliczeń prognostycznych trójwarstwowy model hydrogeologiczny Tarnobrzесьkiego Zagłębia Siarkowego, na którym odwzorowane zostały piętra wodonośne czwartorzędowe i trzeciorzędowe rozdzielone utworami słaboprzepuszczalnymi, został poddany procesowi weryfikacji (identyfikacji). Zmiany parametrów filtracyjnych i korekta warunków brzegowych obliczeń miały jednak ograniczony charakter. Wynika to z faktu, że zasadnicze czynności dostosowawcze wykonano już wcześniej, podczas uprzednich badań symulacyjnych (Szczepański i in. 1993; Haładus, Kulma 1996, 2001; Kulma i in. 1998; Kulma, Haładus 1999, 2000).

Model cyfrowy warunków hydrogeologicznych rejonu TZS został zweryfikowany w oparciu o rejestrowane dopływy wody do systemów drenażowych zakładów górniczych, wielkości



Rys. 2. Położenie zwierciadła wód podziemnych w czwartorzędowym i trzeciorzędowym piętrze wodonośnym rejonu Machowa k. Tarnobrzega — stan na wrzesień 2002 r. po weryfikacji modelu hydrogeologicznego
 1, 2 — hydroizohipsy czwartorzędowego (1) i trzeciorzędowego (2) piętra wodonośnego w m n.p.m., 3 — granica wyrobiska pocksploatacyjnego, 4 — ciekły powierzchniowe i zbiorniki wodne, 5, 6 — główne kierunki przepływu w czwartorzędowym (5) i trzeciorzędowym (6) piętrze wodonośnym, 7 — przegroda przeciwfiltacyjna iltowo-cementowa, 8 — linia przekroju hydrogeologicznego, 9 — studnie barier wewnętrznych

Fig. 2. Position of groundwater tables in Quaternary and Tertiary horizons in the Machów area near Tarnobrzeg — data for Sept. 2002, after verification of hydrogeological model

1, 2 — hydroisohypses of Quaternary (1) and Tertiary (2) groundwater horizons in meters a.s.l., 3 — boundary of the open pit, 4 — surface flows and reservoirs, 5, 6 — main flow directions in Quaternary (1) and Tertiary (2) groundwater horizons, 7 — clay-cement counter-filtration barrier, 8 — hydrogeological cross-section line, 9 — wells of the outer barrier

poboru wody przez ujęcia głębinowe oraz pomiary zwierciadła wody w otworach obserwacyjnych, według stanu na koniec III kwartału 2002 r.

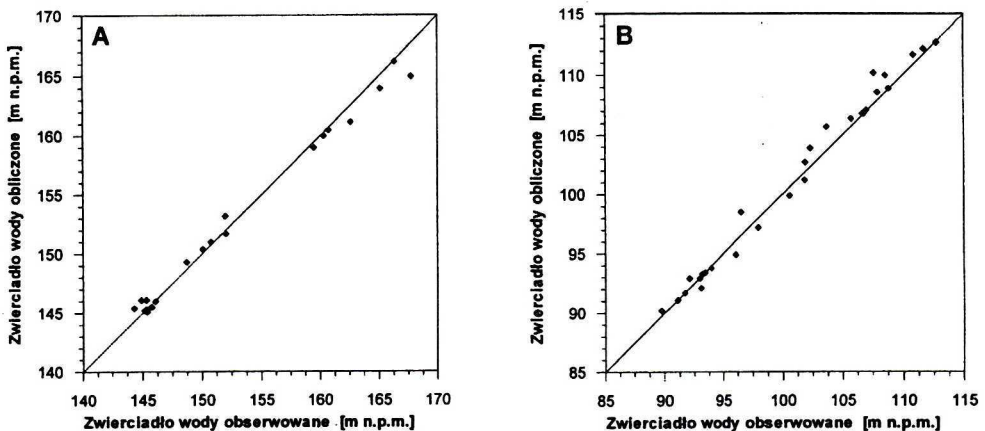
W celu identyfikacji modelu przyjęto następujący reżim warunków hydrogeologicznych:

— wyrobisko poeksploatacyjne Piaseczno jest odwadnianie. Drenaż czwartorzędowego (warstwa 1) i trzeciorzędowego (warstwa 3) piętra wodonośnego symulowano warunkami I rodzaju $H = \text{const}$. zmieniającymi się w przedziale od 121,3 do 134,5 m n.p.m. (warstwa 1) i wynoszącymi około 121,9 m n.p.m. (warstwa 3). Średni dopływ wody do odkrywki wyniósł około $9380 \text{ m}^3/\text{d}$;

— dopływy z czwartorzędowego piętra wodonośnego do odkrywki Machów odwzorowano warunkami I rodzaju, zmieniającymi się w zakresie rzędnych od 138,0 do 160,0 m n.p.m., i II rodzaju ($Q = 0$, brak zasilania z utworów nieprzepuszczalnych), uzyskując około $810 \text{ m}^3/\text{d}$ wody. Drenaż piętra trzeciorzędowego, odwadnianego studniami tworzącymi bariery wewnętrzne, zrealizowano na modelu z wykorzystaniem warunku II rodzaju symulując odbiór $22\,860 \text{ m}^3/\text{d}$ wody. W części południowo-zachodniej wyrobiska został utworzony zbiornik wód opadowych, o powierzchni około 25 ha i rzędnej 106,0 m n.p.m., odwzorowany na modelu warunkiem III rodzaju;

— w rejonie nieczynnej otworowej kopalni Jeziórko z utworów czwartorzędowych odbiera się około $9400 \text{ m}^3/\text{d}$ wody, z czego $6370 \text{ m}^3/\text{d}$ (ok. 68%) jest zatłaczane do warstwy trzeciorzędowej. Na modelu działanie studni odwadniających i chłonnych symulowano warunkami II rodzaju;

— w obrębie Kopalni Siarki Osiek warstwę czwartorzędową odwadniano z wydajnością około $1120 \text{ m}^3/\text{d}$. Do serii złożowej (warstwa 3) zatłaczano gorące wody technologiczne w ilości około $10\,730 \text{ m}^3/\text{d}$, z czego z warstwy odprężano około $5760 \text{ m}^3/\text{d}$. Efektywnie więc piętro wodonośne trzeciorzędu zasilano wodą z natężeniem około $4970 \text{ m}^3/\text{d}$. Proces zasilania utworów wodonośnych i odbioru z nich wody odwzorowano warunkami II rodzaju;



Rys. 3. Dokładność odwzorowania na modelu TZS wysokości hydraulicznych w czwartorzędowym (A) i trzeciorzędowym (B) piętrze wodonośnym

Fig. 3. Modelling accuracy of hydraulic head for the TZS model in Quaternary (A) and Tertiary (B) groundwater horizons

— sumaryczny pobór wody przez komunalne i przemysłowe ujęcia głębinowe wynosił z piętra trzeciorzędowego około $1700 \text{ m}^3/\text{d}$, a z piętra czwartorzędowego około $14\,000 \text{ m}^3/\text{d}$.

Potwierdzeniem poprawności schematyzacji hydrogeologicznej przyjętej na modelu, w zakresie wielkości parametrów filtracyjnych oraz warunków brzegowych, są mapy hydroizohips piętra czwartorzędowego i trzeciorzędowego uzyskane jako rezultat etapu weryfikacyjnego (rys. 2). Wykazują one dużą zbieżność (rys. 3) z odpowiadającym im obrazem pola filtracyjnego, stwierdzonym bezpośrednimi pomiarami w otworach obserwacyjnych. Uzyskana na modelu średnia dokładność odwzorowania powierzchni piezometrycznej wyniosła około $\pm 0,0 \text{ m}$ w piętrze czwartorzędowym i około $-0,36 \text{ m}$ w trzeciorzędowym, natomiast odchylenia standardowe wynoszą odpowiednio $0,91$ i $0,97 \text{ m}$.

Wiarygodność modelu została również potwierdzona przez zgodność pomiędzy rzeczywistymi i uzyskanymi w obliczeniach symulacyjnych dopływami do urządzeń (systemów) hydrotechnicznych.

3. Prognozy zmian stosunków wodnych w rejonie wyrobiska Machów

3.1. Odwadnianie odkrywki studniami barier wewnętrznych

Zakończenie formowania warstwy izolacyjnej w odkrywce Machów i prace budowlane przy obiektach hydrotechnicznych do napełniania zbiornika wodą z Wisły wyznaczają realia dla przebiegu ostatniej fazy prac likwidacyjnych. Należy przyjąć, że odwadnianie studniami barier wewnętrznych będzie kontynuowane co najmniej do końca 2003 r.

W tym czasie warunki dla bezpiecznego utrzymania wyrobiska, przy kontrolowanym i dopuszczalnym wzroście ciśnienia wód złożowych, zapewnia istniejący system odwadniania utworów trzeciorzędowych. Jego korzystne położenie w pobliżu centrum odkrywki, gdzie zagrożenie szybkim i nadmiernym wzrostem ciśnienia jest największe, sprzyja optymalizacji odbioru wody z warstwy wodonośnej. Minimalna wydajność studni barier wewnętrznych XIIIIN, E i W, wynikająca z obliczeń symulacyjnych na modelu (tab. 1), powinna wynosić około $16\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ — przy utrzymaniu dotychczasowej, tj. $106,0 \text{ m n.p.m.}$, wysokości napełnienia zbiornika wód opadowych w odkrywce. Można więc zmniejszyć ilość wód pompowanych z piętra trzeciorzędowego w stosunku do stanu obecnego (III kwartał 2002 r.) o $6860 \text{ m}^3/\text{d}$ wody, tj. o około $30,0\%$.

Prognozowany układ zwierciadła wody w trzeciorzędowym piętrze wodonośnym zapewnia utrzymanie wzrostu wysokości hydraulicznej poniżej poziomu dopuszczalnego (Kulma i in. 2002). Stan ten różni się dość znacznie od uzyskanego dla etapu weryfikacji modelu. Zmniejszenie ilości odbieranej wody powinno skutkować wzrostem położenia piezometrycznego zwierciadła wody w centrum odkrywki o około 16 m .

3.2. Odwadnianie odkrywki studniami barier zewnętrznych

Przed rozpoczęciem napełniania wodą zbiornika Machów zaistnieje konieczność wyłączenia i zlikwidowania studni barier wewnętrznych. Przewiduje się wówczas uruchomienie barier

TABELA 1

Prognoza wydajności systemu odwadniania Kopalni Siarki Machów w końcowym okresie jej likwidacji

TABLE 1

Prognosis of the effectiveness of the dewatering system at the Machowr sulphur mine at the end phase of liquidation

Okres prognozy, na koniec roku	Wydajność systemu odwadniania [m ³ /d]				Wysokość napęnienia zbiornika [m n.p.m.]
	bariery wewnętrzne	bariery zewnętrzne			
		NW	NE	suma	
2002*	22 860	—	—	—	106,0**
2003	16 000	—	—	—	106,0**
2004	—	12 480	6 720	19 200	106,0**
po roku 2004	—	11 050	5 950	17 000	110,0
	—	3 510	1 890	5 400	130,0
	—	—	—	—	145,5

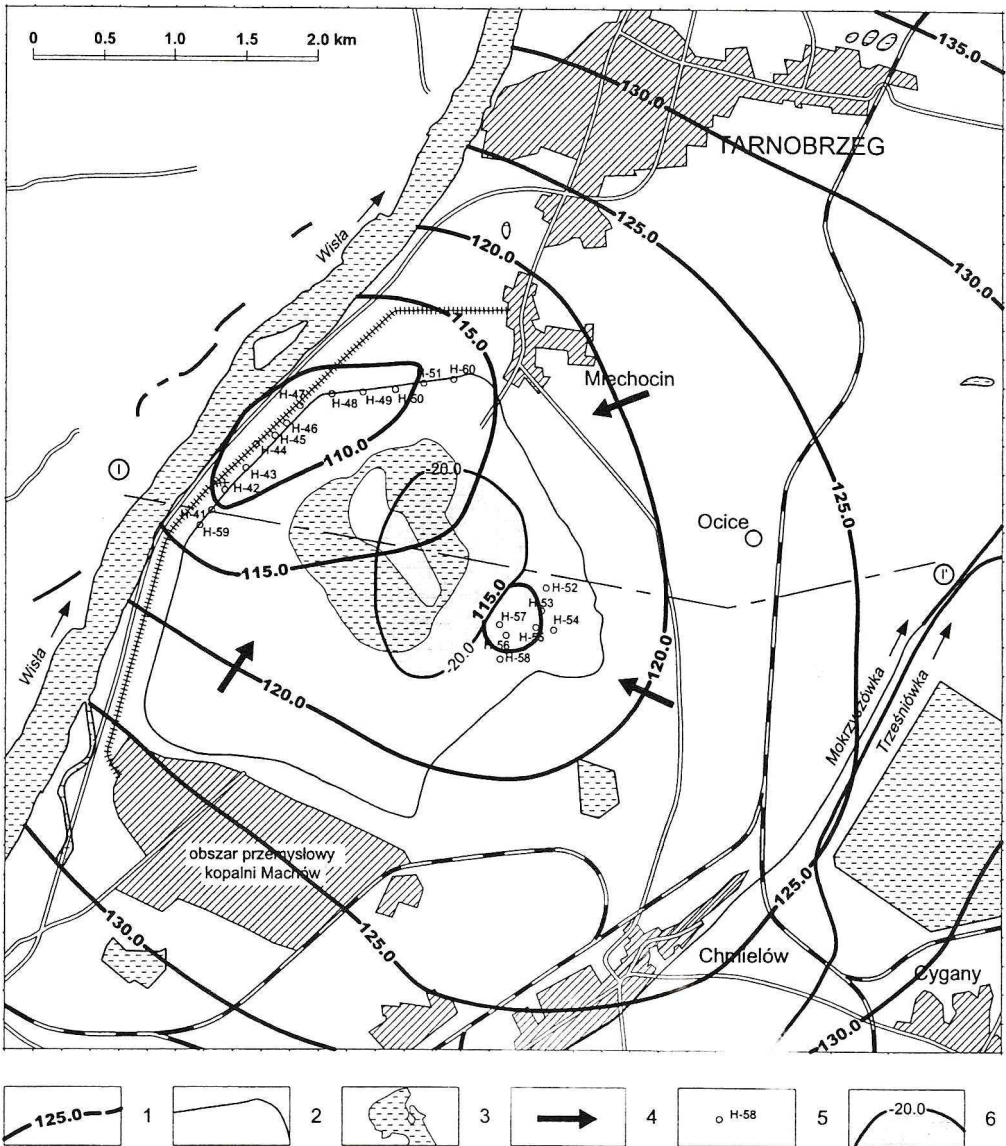
* Weryfikacja modelu według stanu na III kwartał 2002 r.

** Zbiornik częściowo napęnlony wodami opadowymi.

zewnętrznych, w których studnie rozmieszczone będą poza linią brzegową przyszłego zbiornika wodnego. Od strony północno-zachodniej i północnej zbiornika będzie to bariera NW — utworzona przez 13 studni, natomiast od strony północno-wschodniej bariera NE — na którą składa się 7 studni (rys. 4). Peryferyjne położenie studni, w stosunku do aktualnie działającego systemu odwadniania, musi zapewnić utrzymanie dopuszczalnych wysokości ciśnień w piętrze trzeciorzędowym. Będzie to jednak możliwe przy odpowiednio większych wydajnościach barier zewnętrznych. Prognozowany odbiór wody (tab. 1) wyniesie 19 200 m³/d, przy czym otwory studzienne bariery NW powinny osiągać wydajność 12 500 m³/d, a studnie bariery NE odbierać pozostałe 6700 m³/d.

Lej depresji utworzony w wyniku działania tych studni będzie charakteryzował się dwudzielnością. Większego obniżenia zwierciadła wody należy spodziewać się w bezpośrednim otoczeniu bariery NW, mniejszego o około 10 m — w pobliżu bariery NE. Wzrost wysokości zwierciadła wody w centrum wyrobiska, w stosunku do stanu przyjętego jako wyjściowy do obliczeń symulacyjnych (wrzesień 2002 r.), przekroczy 22 m.

Rozpoczęcie napełniania zbiornika wodą z Wisły spowoduje zmianę sytuacji hydrodynamicznej w trzeciorzędowym piętrze wodonośnym, ponieważ słup wody nad utworzoną warstwą izolacyjną stanie się dodatkowym elementem równowagi ciśnień. W związku z tym, wraz z podnoszeniem się lustra wody w zbiorniku będą wzrastać dopuszczalne wysokości zwierciadła wody w warstwie trzeciorzędowej. W obliczeniach symulacyjnych uwzględniono tylko wybrane stany, przy których różnice wysokości zwierciadła wody w zbiorniku są znaczące.



Rys. 4. Położenie zwierciadła wody w trzeciorzędowym piętrze wodonośnym rejonu Machów koło Tarnobrzega — stan prognozowany po napełnieniu zbiornika do wysokości 110,0 m n.p.m.

- 1 — hydroizohipsy w m n.p.m., 2 — granica wyrobiska górniczego, 3 — ciekły powierzchniowe i zbiorniki wodne, 4 — kierunki przepływu strumienia wód podziemnych, 5 — studnie barier zewnętrznych, 6 — przyrost wysokości zwierciadła wody w stosunku do stanu z końca 2002 r. większy niż 20 m

Fig. 4. Position of groundwater table in Tertiary horizon in Machów area near Tarnobrzeg — prognosed for reservoir filling to the elevation 110.0 meters a.s.l.

- 1 — hydroisohyps in meters a.s.l., 2 — boundary of the open pit, 3 — surface flows and reservoirs, 4 — groundwater flow directions, 5 — wells of outer barrier, 6 — increment of groundwater table elevation referred to position at the end of 2002 (over 20 meters)

Stan prognozowany przy napełnieniu zbiornika do wysokości 110 m n.p.m.

Złagodzenie kryterium dopuszczalnej wysokości hydraulicznej, w niektórych fragmentach obszaru wypełnionych już wodą, pozwala na zmniejszenie intensywności odwadniania wyrobiska poeksploatacyjnego. Przy założeniu, że zmiana warunków odbioru wody będzie równomierna, tj. dotyczy w jednakowym stopniu studni barier NW i NE, powinny one osiągać łączny wydatek 17 000 m³/d (tab. 1). Obniżenie wydajności systemu odwadniającego w stosunku do stanu poprzedniego, tj. przy istnieniu lokalnego zbiornika wody opadowej, wyniesie około 11,5%.

Zmniejszenie odbioru wody przez studnie odwadniające barier zewnętrznych wpłynie na zmianę układu hydrodynamicznego. Ilość wody odbieranej przez barierę NE wyniesie około 6 000 m³/d i będzie blisko dwukrotnie mniejsza niż sumaryczna wydajność studni bariery NW, przekraczająca 11 000 m³/d.

Ograniczenie odbioru wody z piętra trzeciorzędowego spowoduje dalszy wzrost wysokości zwierciadła wody w rejonie tworzonego zbiornika Machów (rys. 4). Zmiany położenia zwierciadła wody w stosunku do stanu wyjściowego wynoszą: w rejonie bariery NW — wzrost o około 5 m, w rejonie bariery NE — wzrost o około 18 m i w centralnej części zbiornika — wzrost o około 25 m.

Stan prognozowany przy napełnieniu zbiornika do wysokości 130 m n.p.m.

Doprowadzenie wody z Wisły, w ilości około 45 mln m³, będzie skutkowało wyższym poziomem wody w zbiorniku rekreacyjnym Machów, który osiągnie rzędną około 130 m n.p.m. Taki stan napełnienia zbiornika sprzyja dalszemu ograniczeniu wydajności studni tworzących system odwadniający. Zachowanie dopuszczalnych wysokości zwierciadła wody w piętrze trzeciorzędowym, które nie naraża na rozszczelnienie utworzonej warstwy izolacyjnej, wymagać będzie pompowania wody z natężeniem 5 400 m³/d (tab. 1). Z ilości tej studnie bariery NW powinny odebrać około 3500 m³/d, a bariery NE około 1900 m³/d. Oznacza to, że studnie barier zewnętrznych będą mogły osiągać wydajności o około 23,6% mniejsze od poboru aktualnego (III kwartał 2002 r.).

Skutkiem zmniejszonej ilości odbieranej wody będzie wzrost wysokości hydraulicznych (rys. 5), który w tej sytuacji, na całym obszarze zbiornika, przekroczy wielkość 30 m (w stosunku do początkowego położenia zwierciadła wody z września 2002 r.). Maksymalny przyrost wysokości hydraulicznej, wynoszący około 47 m, obejmuje centralną część byłego wyrobiska eksploatacyjnego pomiędzy barierami NW i NE.

Prognozowany układ zwierciadła wody w piętrze trzeciorzędowym ulegnie kolejnej modyfikacji. Wyraźnym ośrodkiem drenażu stanie się w tej sytuacji zbiornik wody Piaseczno (na lewobrzeżnej części doliny Wisły). W jego obrębie zwierciadło wody będzie leżeć już o około 8 m poniżej poziomu wody w zbiorniku Machów. Powstała sytuacja hydrodynamiczna spowoduje odwrócenie dotychczasowego kierunku przepływu strumienia wód podziemnych, co skutkować będzie również zwiększeniem dopływów do wyrobiska byłej Kopalni Siarki Piaseczno.



Rys. 5. Położenie zwierciadła wody w trzeciorzędowym piętrze wodonośnym rejonu Machowa koło Tarnobrzega — stan prognozowany po napełnieniu zbiornika do wysokości 130,0 m n.p.m.
 1 — hydroizohipsy w m n.p.m., 2 — granica wyrobiska górniczego, 3 — ciekły powierzchniowy i zbiorniki wodne,
 4 — kierunki przepływu strumienia wód podziemnych, 5 — studnie barier zewnętrznych, 6, 7 — przyrost wysokości zwierciadła wody w stosunku do stanu z końca 2002 r. wynoszący 20—40 m (6) i większy niż 40 m (7)

Fig. 5. Position of groundwater table in Tertiary horizon in Machów area near Tarnobrzeg — prognosed for reservoir filling to the elevation 130.0 meters a.s.l.

1 — hydroisohypses in meters a.s.l., 2 — boundary of the open pit, 3 — surface flows and reservoirs,
 4 — groundwater flow directions, 5 — wells of outer barrier, 6, 7 — increment of groundwater table elevation referred to position at the end of 2002, between 20 and 40 meters (6) and over 40 meters (7)

3.3. Zaprzestanie odwadniania odkrywki

Osiągnięcie docelowej wysokości napełnienia zbiornika Machów (145,5 m n.p.m.) oznacza dalszy wzrost położenia zwierciadła wody. Wzrost ten (impresja) przekroczy w rejonie utworzonego zbiornika wielkość 55 m. Będzie to praktycznie całkowita odbudowa ciśnienia wody w piętrze trzeciorzędowym w warunkach zakończenia procesu likwidacyjnego Kopalni Siarki Machów i utrzymywanym w dalszym ciągu odwadnianiu wyrobiska poeksploatacyjnego w Piasecznie. W obrębie byłej otworowej Kopalni Siarki Jeziórko warstwa trzeciorzędowa nie będzie już sztucznie zasilana wodami zatłaczanymi do barier hydraulicznych.

Skutki likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego w Machowie obejmą zwłaszcza trzeciorzędowe piętro wodonośne, w którym nastąpi całkowity zanik strefy zdepresjonowanej wokół byłej kopalni, wywołany jej odwadnianiem. Układ zwierciadła wody (rys. 6) kształtowany będzie przez napływ wód podziemnych z kierunku wschodniego, w stronę odkrywki w Piasecznie, wytwarzającej w dalszym ciągu stabilny lej depresji.

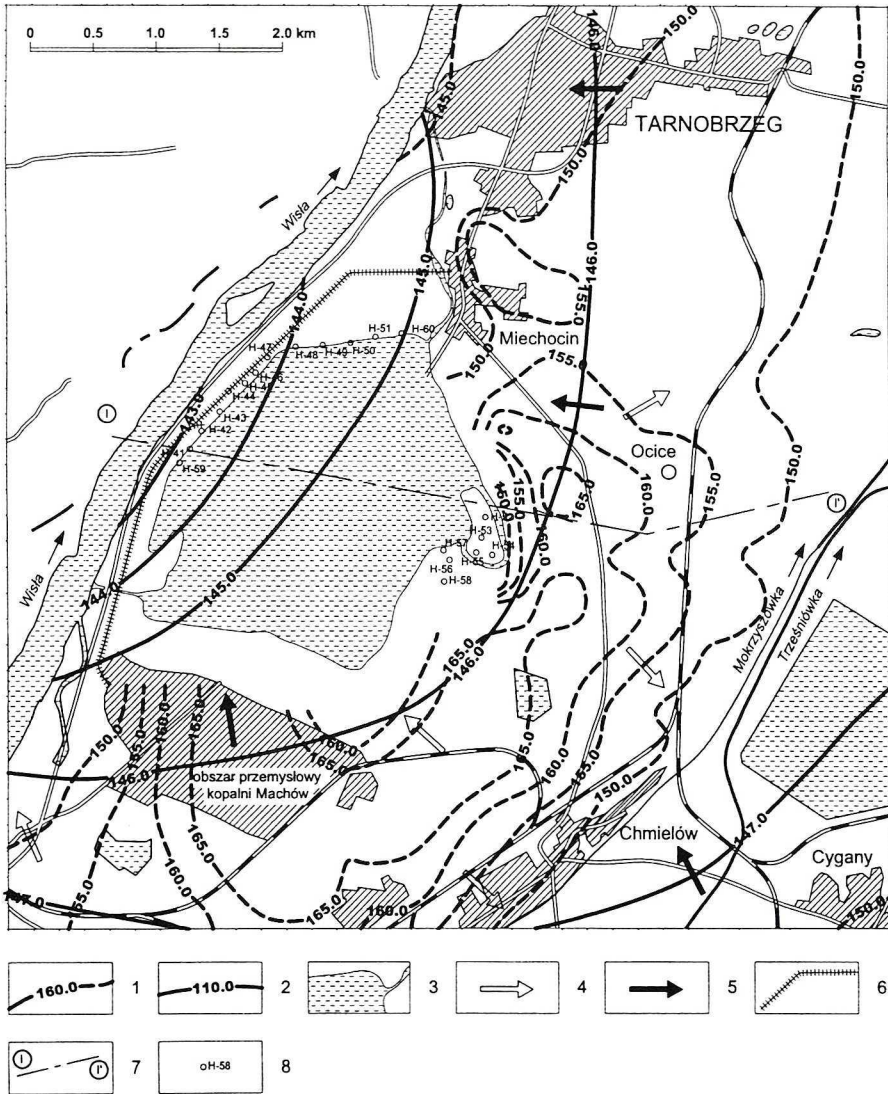
Konsekwencją powstałej sytuacji hydrodynamicznej będzie zwiększenie dopływu silnie zmineralizowanych wód trzeciorzędowych do zbiornika wodnego w odkrywce Piaseczno przy założeniu utrzymania w nim lustra wody na dotychczasowej rzędnej około 122,0 m n.p.m. W dalszej perspektywie czasowej może to wpłynąć na pogorszenie jakości wód zbiornikowych (Haładus, Kulma 2001).

Dopływ zanieczyszczonych siarkowodorem wód trzeciorzędowych nie zagraża zbiornikowi rekreacyjnemu w Machowie. Wykonana 25-metrowa warstwa izolacyjna oraz zrównoważony rozkład ciśnień złożowych praktycznie uniemożliwiają przesączanie wody do akwenu. Likwidacja odkrywki Machów nie wywoła negatywnych skutków w środowisku wodno-gruntowym piętra trzeciorzędowego. Spowoduje jednakże przywrócenie warunków zbliżonych do naturalnych.

W piętrze czwartorzędowym likwidacja wyrobiska Machów w niewielkim stopniu wpłynie na bilans wodny i położenie zwierciadła wody (rys. 6). W części obszaru położonej na prawym brzegu Wisły strefa tych zmian sięgnie na odległość od 100 do 500 m od odkrywki, a więc obejmie najbliższe otoczenie zbiornika. Prognozowany wzrost wysokości zwierciadła wody wynosi najczęściej 0,5—1,5 m, a tylko lokalnie przekroczy 5 m.

Zmiana położenia zwierciadła wód podziemnych w rejonie zbiornika rekreacyjnego w Machowie nie spowoduje zagrożenia w postaci podtopienia terenów na prawobrzeżnej części obszaru doliny Wisły. Głębokość do zwierciadła wody będzie najczęściej utrzymywać się w przedziale 2,5—10,0 m p.p.t. Płytsze zaleganie wód podziemnych piętra czwartorzędowego (ok. 1,0 m p.p.t.) było, i jest w dalszym ciągu, obserwowane na zalewowej terasie Wisły oraz w dorzeczu Trześniówki i Mokrzychówki (po wschodniej stronie wyrobiska). Te niewielkie rejon potencjalnych podtopień położone są poza strefą oddziaływania systemu drenażowego likwidowanej odkrywki i w żaden sposób nie są z nią związane.

Przeciwnych skutków, w postaci obniżonego zwierciadła wód podziemnych, można spodziewać się w strefie projektowanej trasy kanału odprowadzającego, przebiegającej między Kajmowem a Tarnobrzegiem (rys. 6). Powstała depresja może miejscami nieznacznie przekraczać wielkość 2,0 m i na pewno nie będzie miała istotnego wpływu na zmiany stosunków wodnych w tej części obszaru.



Rys. 6. Prognozowane położenie zwierciadła wody w czwartorzędowym i trzeciorzędowym piętrze wodonośnym rejonu Machowa koło Tarnobrzega — stan docelowy po napełnieniu zbiornika do wysokości 145,5 m n.p.m.
 1, 2 — hydroizohipsy czwartorzędowego (1) i trzeciorzędowego (2) piętra wodonośnego w m n.p.m., 3 — ciekii powierzchniowe i zbiorniki wodne, 4, 5 — główne kierunki przepływu w czwartorzędowym (4) i trzeciorzędowym (5) piętrze wodonośnym, 6 — przegroda przeciwfiltacyjna iłowo-cementowa, 7 — linia przekroju hydrogeologicznego, 8 — studnie barier zewnętrznych

Fig. 6. Position of groundwater table in Tertiary horizon in Machów area near Tarnobrzeg — expected after final flooding to the elevation 145.4 meters a.s.l.
 1, 2 — hydroisohypses of Quaternary (1) and Tertiary (2) groundwater horizons in meters a.s.l., 3 — surface flows and reservoirs, 4, 5 — main flow directions in Quaternary (4) and Tertiary (5) horizons, 6 — clay-cement counter-filtration barrier, boundaries of the open pit, 7 — hydrogeological cross-section line, 8 — wells of the outer barrier

W bilansie wodnym rejonu Machowa również nie zajdą znaczące zmiany. Prognozowany drenaż czwartorzędowej warstwy wodonośnej przez zbiornik wodny (ok. 800 m³/d) oraz kanał odprowadzający (ok. 1000 m³/d) będzie w sumie ponad 2-krotnie większy od wydajności, z jaką odbierane były wody podziemne tego piętra wodonośnego przez system odwadniania kopalni.

Podsumowanie

Prace likwidacyjne realizowane w wyrobisku poeksploatacyjnym Kopalni Siarki Machów zmierzają do zakończenia. W grudniu 2002 r., na dzień przyszłego zbiornika wodnego o charakterze rekreacyjnym, została uformowana 25-metrowa warstwa izolacyjna. Aby nie nastąpiło jej rozszczelnienie musi być kontynuowane odwadnianie odkrywki do czasu napełnienia zbiornika wodą z Wisły.

W końcowym okresie likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego system studni odwadniających podlega ciągłym zmianom. Wynikają one z konieczności przeniesienia studni barier wewnętrznych (ze spągu złoża i warstw nadrudzia) poza zarys przyszłego zbiornika wodnego (bariery zewnętrzne). Ilość odbieranych wód złożowych ma zapewnić utrzymanie dopuszczalnych wysokości hydraulicznych w obrębie likwidowanej odkrywki.

Likwidacja wyrobiska poeksploatacyjnego spowoduje radykalne zmiany stosunków wodnych w obrębie trzeciorzędowego piętra wodonośnego. Prognoza tych zmian została opracowana w oparciu o wyniki badań symulacyjnych wykonanych na modelu hydrogeologicznym Tarnobrzесьkiego Zagłębia Siarkowego (Kulma i in. 1998). Pozwoliła ona określić wydajności systemu odwadniania złoża w poszczególnych fazach procesu likwidacji kopalni oraz zmieniające się układy pola hydrodynamicznego.

Obecnie (III kwartał 2002 r.) studnie barier wewnętrznych odbierają wodę z piętra trzeciorzędowego osiągając wydajność 22 860 m³/d. Z prognozy wynika, że przy obecnym systemie odwadniania wyrobiska ilości pompowanych wód można zmniejszyć do 16 000 m³/d, tj. o około 30%.

Uruchomienie barier studni zewnętrznych będzie, zwłaszcza w pierwszej fazie, wymagało zwiększenia ilości wód odbieranych do 19 200 m³/d. Z chwilą rozpoczęcia napełnienia odkrywki wodą, w miarę wzrostu słupa wody nad utworzoną warstwą izolacyjną, możliwe stanie się łagodzenie kryterium dopuszczalnej wysokości hydraulicznej w warstwie wodonośnej. Przy położeniu lustra wody w zbiorniku na rzędnej 110,0 m n.p.m., wymagane będzie pompowanie wody z warstwy trzeciorzędowej z wydajnością 17 000 m³/d (obniżenie wydatku o ok. 26%), a przy rzędnej 130,0 m n.p.m. ilości te można zmniejszyć do 5 400 m³/d (o ok. 76%). Zbliżając się do maksymalnej rzędnej napełnienia wyrobiska wodą, tj. 145,5 m n.p.m., można wyłączyć jego system odwadniania.

Ograniczenie intensywności odwadniania spowoduje wzrost ciśnienia w trzeciorzędowym piętrze wodonośnym, zwłaszcza w centralnej części odkrywki. Impresja zwierciadła wody, w porównaniu ze stanem z września 2002 r., wzrośnie o około 47 m — przy napełnieniu zbiornika do rzędnej 130,0 m n.p.m. i około 55 m — przy stanie docelowym.

Likwidacja systemu odwadniania wyrobiska poeksploatacyjnego w Machowie spowoduje, że znaczącym ośrodkiem drenażu w rejonie tarnobrzeskich złóż siarki stanie się nie-likwidowane wyrobisko byłej Kopalni Siarki Piaseczno, położone na lewym brzegu Wisły. Jego drenująca rola będzie stopniowo zwiększać się, a po przekroczeniu wysokości wody 130,0 m n.p.m. w zbiorniku Machów okaże się dominująca. Zaniechanie poboru wody przez studnie barier zewnętrznych będzie skutkowało wzrostem ilości i znacznym pogorszeniem się jakości wody pompowanej oraz odprowadzanej do Wisły ze zbiornika w Piasecznie.

Powstanie zbiornika Machów spowoduje w piętrze czwartorzędowym niewielkie podniesienie się zwierciadła wody, najczęściej o 0,5—1,5 m, tylko lokalnie przekraczające 5,0 m. Nie doprowadzi to do podtopień terenu na obszarze prawobrzeżnej części doliny Wisły.

LITERATURA

- Haładus A., Kulma R., 1996 — Aktualizacja wyników dotychczas wykonanych badań modelowych dla wyrobisk poeksploatacyjnych Machów i Piaseczno z uwzględnieniem harmonogramu skojarzonej ich likwidacji. AGH, Kraków.
- Haładus A., Kulma R., 2001 — Warunki formowania jakości wody w zbiorniku Piaseczno koła Tarnobrzega w czasie likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego siarki. Gos. Sur. Min. t. 17, z. 2, Kraków.
- Kopeć J., Wojteczko T., 1993 — Projekt techniczny likwidacji wyrobiska górniczego Kopalni Siarki Machów. OBR PS Siarkopol, Tarnobrzeg.
- Kulma R. (red.) i in., 1998 — Prognoza skutków środowiskowych w związku z planowanym zaprzestaniem odwadniania kopalni odkrywkowej siarki w Machowie. AGH, Kraków.
- Kulma R., Haładus A., 1999 — Aktualizacja prognoz związanych z odwadnianiem utworów trzeciorzędowych w Kopalni Siarki Machów na podstawie badań modelowych (etap I — okres działania barier wewnętrznych). AGH, Kraków.
- 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.
- Szczepański A., Kulma R., Haładus A., Jarosz Z., 1993 — Określenie warunków i sposobu odwadniania wyrobiska Machów w poszczególnych fazach likwidacji. Etap I i II — Opracowanie i weryfikacja modelu hydrogeologicznego trzeciorzędowej warstwy wodonośnej rejonu Tarnobrzega. Etap III i IV — Badania symulacyjne na modelu trzeciorzędowej warstwy wodonośnej rejonu Tarnobrzega. AGH, Kraków.

ANDRZEJ HAŁADUS, RYSZARD KULMA LIDIA BURCHARD

HYDROGEOLOGICAL PROGNOSSES FOR THE CLOSURE OF THE "MACHÓW" NATIVE SULPHUR MINE

Key words

Hydrogeology, mine closure, prognostic calculations

Abstract

In the Tarnobrzeg Sulphur District the closure and remediation of the Machów native sulphur mine is run with methods which minimize the environmental impact. In December 2002 the 25-meters-thick protection layer has

been completed which sealed the bottom of the future reservoir from the polluted waters in Tertiary formations. Until the reservoir is filled with water from the Vistula River it will be drained in order to avoid the unsealing of protection layer.

The mathematical model of hydrogeological conditions in the Tarnobrzeg Sulphur District and the MODFLOW software were applied to prognosing the changes in aquatic environment at the final stage of Machów open pit remediation. The results of calculations enable the optimization of draining wells location and the volume of drained Tertiary waters as well as the prediction of environmental impact of the mine closure.

The modelling revealed that during the flooding of the pit the volume of waters drained from the Tertiary horizon can be substantially limited until the final closure of draining system. The new, important draining center for polluted waters from Tertiary horizon will become the unremediated open pit of the Piaseczno Sulphur Mine.