

ANDRZEJ HAŁADUS\*, RYSZARD KULMA\*, TOMASZ BURCHARD\*\*

## **Badania modelowe hydrogeologicznych skutków likwidacji odkrywkowej Kopalni Siarki Piaseczno koło Tarnobrzega**

### Słowa kluczowe

Likwidacja kopalń odkrywkowych, obliczenia prognostyczne

### Streszczenie

Likwidacja kopalń siarki w rejonie Tarnobrzega osiągnęła końcowy etap. Wzrost w Machowie, odizolowane 25-metrową warstwą ilów, napelniane jest sukcesywnie wodą z Wisły. Na uporządkowanym terenie otworowej kopalni w Jeziorku trwają zabiegi rekultywacji gruntów i stopniowo wprowadzany jest system grawitacyjnego odprowadzania wód powierzchniowych. Opóźnienie prac likwidacyjnych wystąpiło na obszarze górniczym byłej Kopalni Siarki Piaseczno, gdzie mają powstać tereny rekreacyjne ze zbiornikiem wodnym spiętrzoną do wysokości 146,0 m n.p.m.

Bezpieczne zakończenie prac likwidacyjnych w wyrobisku Piaseczno wymaga wykonania systemu melioracyjnego na terenach zagrożonych podtopieniem. Stan hydrodynamiczny istniejący obecnie (2006 r.) i etapowe prognozy możliwych zmian stosunków wodnych na terenach pogórnich były przedmiotem badań na numerycznym modelu obszaru filtracji. Wyniki tych badań określają położenie zwierciadła wody w piętrach czwartorzędowym i trzeciorzędowym oraz dopływy do projektowanych systemów drenażowych.

### **Wprowadzenie**

W kopalni Piaseczno eksploatację złoża siarki metodą odkrywkową zaprzestano w 1971 r., a piasków baranowskich na potrzeby przemysłu szklarskiego w 1980 r. (Wilk, Kulma 2004).

---

\* Dr inż., Zakład Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH, Kraków.

\*\* Mgr inż. Przedsiębiorstwo Usługowo-Produkcyjne SIGMA BP, Tarnobrzeg.

Po zakończeniu robót górniczych w wyrobisku utworzył się zbiornik wodny, którego poziom utrzymywany jest przez system pomp powierzchniowych i zrzut wód nadmiarowych do Wisły.

Zaawansowana likwidacja pobliskiej, odkrywkowej Kopalni Siarki Machów wymusiła podjęcie decyzji dotyczących dalszego przeznaczenia i sposobu użytkowania wyrobiska Piaseczno. Oczekujący na realizację od dziesięciu lat i rozpoczęty obecnie (2006 r.) program prac zakłada samoistne napełnienie odkrywki do rzędnej 146,0 m. n.p.m. wodami dopływającymi głównie z piętra czwartorzędowego. Odstąpiono w nim natomiast od pierwotnego zamiaru wykonania warstwy izolacyjnej na dnie zbiornika, jak to miało miejsce w wyrobisku Machów (Haładus i in. 1997; Kulma i in. 1998; Pantula i in. 2006).

Zbiornik wodny utworzony w wyrobisku poeksploatacyjnym Piaseczno zajmuje obecnie powierzchnię około 63 ha, przy lustrze wody położonym na rzędnej 122,4 m n.p.m. Przewiduje się, że przy docelowym spiętrzeniu wody w zbiorniku do rzędnej 146,0 m n.p.m. jego wielkość zwiększy się około 2,5 razy, tj. do około 160 ha. Zdecydowanie, bo blisko 6-krotnie, wzrośnie natomiast pojemność wodna zbiornika – z około 5,4 mln m<sup>3</sup> do około 31,4 mln m<sup>3</sup>.

## 1. Warunki hydrogeologiczne

Na obszarze Tarnobrzeskich Złóż Siarki (TZS) występuje czwartorzędowe i trzeciorzędowe piętro wodonośne (Turek 1978). Pierwsze z nich, o zwierciadle swobodnym, tworzą utwory piaszczysto-żwirowe, których miąższość zwykle nie przekracza 10 m. Nieprzepuszczalne podłoże stanowią ility krakowieckie. Warstwa wodonośna zasilana jest głównie przez opady atmosferyczne. Wykazuje również wyraźną więź hydrauliczną z wodami powierzchniowymi, w tym przede wszystkim z Wisłą.

W obrębie piętra trzeciorzędowego występuje złożę siarki. Poza strefą wychodni charakteryzuje się ono naporowymi warunkami przepływu wód podziemnych. Utworami wodonośnymi są wapienie serii chemicznej oraz podścielające je piaski i piaskowce serii baranowskiej. Średnia miąższość obu połączonych warstw wynosi przeciętnie około 30 m. Od stropu poziom trzeciorzędowy izolowany jest grubą warstwą iłów krakowieckich, a nieprzepuszczalne podłoże stanowią mioceńskie warstwy burowęglowe lub utwory kambryjskie. Zasilanie trzeciorzędowego poziomu wodonośnego ma miejsce na lewym brzegu Wisły, na zachód od wyrobiska Piaseczno, gdzie pod aluwialnymi utworami rzecznyymi ukryte są wychodnie wapieni złożowych i serii piaszczysto-piaskowcowej. W strefie tej dochodzi do połączenia czwarto- i trzeciorzędowego piętra wodonośnego.

W warunkach naturalnych podstawę drenażu obszaru TZS stanowiła Wisła. Intensywne odwadnianie złóż siarki, rozpoczęte przez byłą kopalnię Piaseczno i kontynuowane do dnia dzisiejszego także przez likwidowaną kopalnię Machów, spowodowało głębokie przeobrażenia pierwotnych stosunków wodnych, głównie w obrębie piętra trzeciorzędowego. Skutki odwadniania widoczne są również w piętrze czwartorzędowym, zwłaszcza na lewym brzegu

Wisły, gdzie powstał rozległy lej depresji. W jego centrum znajduje się wyrobisko poeksploatacyjne Piaseczno, w którym wielkość obniżenia poziomu wody wynosi obecnie (2006 r.) około 26 m.

## 2. Badania modelowe

### 2.1. Ogólne założenia modelu

Dla rozwiązywania złożonych problemów wodnych na terenach pogórnich byłych kopalń siarki w Piasecznie, Machowie i Jeziórku wykorzystywany jest numeryczny model hydrogeologiczny o zasięgu regionalnym. Został on opracowany (Kulma i in. 1998) w programie komputerowym HYDRYLIB w wersji dwuwarstwowej, a następnie przetransponowany do programu Processing MODFLOW i uzupełniony o trzecią warstwę. Model ten był wielokrotnie stosowany (Kulma i in. 2000, 2003, 2006) dla regionalnej bądź lokalnej oceny zmian stosunków wodnych na obszarze Tarnobrzeskiego Zagłębia Siarkowego.

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 może kształtować stosunki wodne w obrębie czwartorzędowego i trzeciorzędowego piętra wodonośnego. 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 sierpnia 2001 r.) kopalnia Jeziórko oraz działająca w dalszym ciągu kopalnia Osiek, zostały objęte bezpośrednimi badaniami modelowymi.

Tworząc model warunków hydrogeologicznych Tarnobrzeskiego Zagłębia Siarkowego przyjęto następujące założenia:

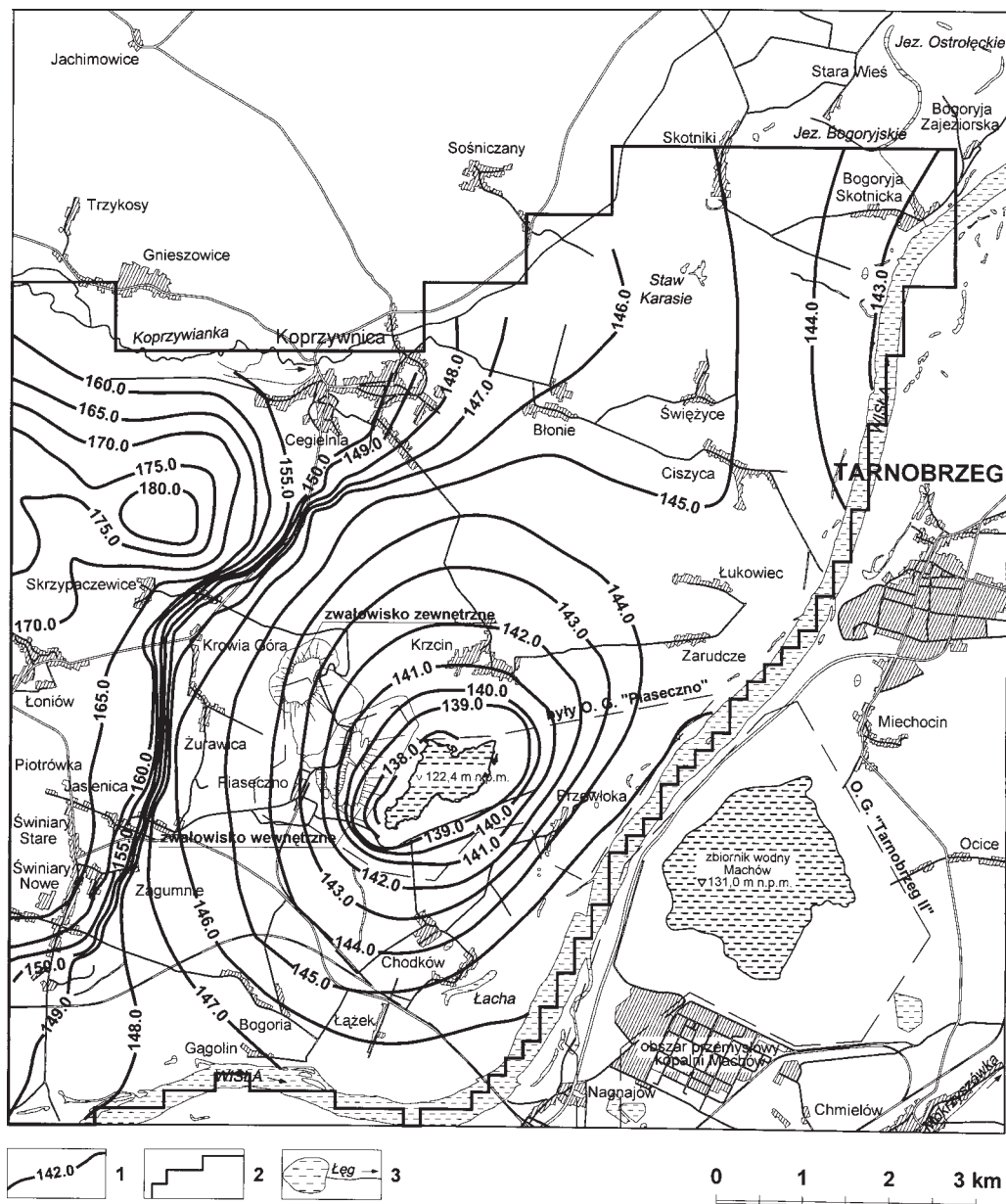
- Na całym obszarze (ok. 900 km<sup>2</sup>) występuje czwartorzędowa warstwa wodonośna o zwierciadle swobodnym (warstwa 1). Stanowią ją utwory piaszczysto-żwirowe o zmiennej przewodności, która najczęściej zawiera się w przedziale 100–600 m<sup>2</sup>/d. Trzeciorzędowa warstwa wodonośna utworzona jest przez wapienie serii chemicznej i piaszczysto-piaskowcowe utwory serii baranowskiej (warstwa 3) o przewodności na ogół 50–200 m<sup>3</sup>/d. Oba piętra wodonośne rozdzielają słabo przepuszczalne ility krakowieckie (warstwa 2), które zachowują ciągłość na całym obszarze filtracji, a brak ich tylko w rejonie wyrobiska poeksploatacyjnego w Piasecznie.
- Wszystkie rzeki i ich dopływy mają pełny 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, Babulówką i Trześniówką, dopływy Trześniówki oraz kanały Chorzelowsko–Dymitrowski, Młodochowski,

Kliszowski i Łuczek). W aktualnych warunkach (według stanu z grudnia 2005 r.) ciekł te, poza lokalnymi odcinkami, mają charakter silnie drenujący.

- Zasilanie warstwy wodonośnej następuje głównie na drodze infiltracji opadów atmosferycznych. Sprzyja temu na ogół dobra przepuszczalność utworów zalegających powyżej zwierciadła wód podziemnych, niewielkie deniwelacje terenu oraz brak większych kompleksów leśnych (z wyjątkiem Puszczy Sandomierskiej w południowo-wschodnim fragmencie obszaru badań modelowych). Średnia roczna wysokość opadów atmosferycznych w 2005 r., obliczona na podstawie pomiarów z posterunków opadowych w Baranowie Sandomierskim i Sandomierzu, wynosiła 453 mm/rok, a w latach 1991–2005 sięgała 564,0 mm/rok.
- Czwartorzędowe piętro wodonośne eksploatowane jest przez nieliczne ujęcia wód podziemnych. Łączny pobór wody wynosi około 11 100 m<sup>3</sup>/d, co stanowi około 20,0% zatwierdzonych zasobów eksploatacyjnych. Pobór ten nie powoduje istotnych zmian w układzie pola hydrodynamicznego.
- Znaczący udział w kształtowaniu stosunków wodnych mają wyrobiska poeksploatacyjne kopalń siarki. Odwadnianie utworów czwartorzędowych w rejonie odkrywki Piaseczno doprowadziło do powstania leja depresji (rys. 1) obejmującego powierzchnię około 35 km<sup>2</sup>. Drenujące oddziaływanie zbiornika wodnego tworzonego w obrębie likwidowanej odkrywki Machów jest znacznie mniejsze i praktycznie zawężone do niewielkiej strefy o szerokości 200–250 m. Istotne przeobrażenie stosunków wodnych spowodowane jest natomiast odwadnianiem serii złożowej (wapieni siarkonośnych), którego celem jest zabezpieczenie wyrobiska w Piasecznie przed nadmiernym napływem zanieczyszczonych wód trzeciorzędowych. Powierzchnia leja depresji w piętrze trzeciorzędowym spowodowanego odwadnianiem w rejonie odkrywki Machów i przez wyrobisko Piaseczno wynosi obecnie około 350 km<sup>2</sup>. W rejonie czynnej otworowej kopalni siarki w Osieku (ok. 19 km na SW od Tarnobrzega) oraz likwidowanej kopalni w Jeziorku (ok. 11 km na E od Tarnobrzega) obserwowane są lokalne stożki impresji, będące skutkiem zatłaczania wody do piętra trzeciorzędowego.

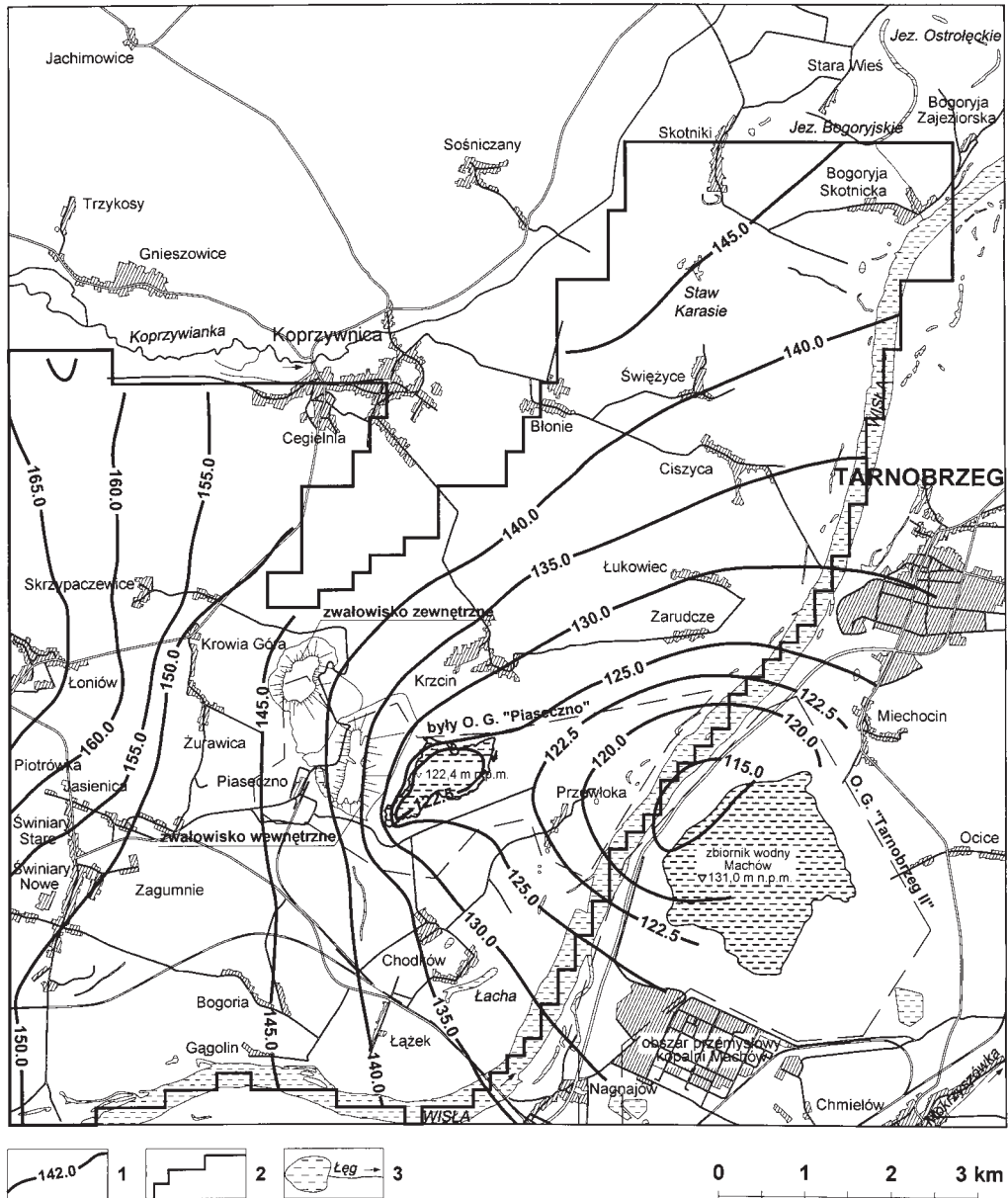
Według stanu z grudnia 2005 r. rzędna odwodnienia w odkrywce Piaseczno wynosiła 122,4 m n.p.m., a wydajność odprowadzanych do Wisły wód nadmiarowych sięgała 11 660 m<sup>3</sup>/d. Poziom napełnienia zbiornika wodnego w Machowie przekroczył rzędną 131,0 m n.p.m. Ilość wód pompowanych w tym rejonie z piętra trzeciorzędowego wynosiła 12 435 m<sup>3</sup>/d. W rejonie Jeziorka odbierano około 7700 m<sup>3</sup>/d, których część była zrzucana do Żupawki (dopływ Łęgu), a część wprowadzana otworami chłonnymi do piętra trzeciorzędowego. Odwadnianie utworów czwartorzędowych w Kopalni Siarki Osiek wynosiło 1720 m<sup>3</sup>/d, a efektywne zatłaczanie do piętra trzeciorzędowego dochodziło do 5700 m<sup>3</sup>/d.

Kierunek przepływu wód podziemnych w piętrze czwartorzędowym na obszarze TZS jest w dużej mierze zdeterminowany drenującym charakterem rzek. Układ hydroizohips wskazuje, że kierunek południowo-wschodni dominuje dla ruchu strumienia wód podziemnych na obszarze położonym na lewym brzegu Wisły, natomiast kierunek północno-



Rys. 1. Położenie piezometrycznego zwierciadła wody w czwartorzędowym piętrze wodonośnym rejonu Piaseczno koło Tarnobrzega na podstawie badań modelowych – stan obecny z grudnia 2005 r. (wariant 0)  
 1 – hydroizohipsy w m n.p.m., 2 – fragment obszaru badań modelowych objęty bilansem wód podziemnych,  
 3 – ciek i zbiorniki wód powierzchniowych

Fig. 1. Position of piezometric groundwater table in Quaternary horizon in the area of Piaseczno near Tarnobrzeg, based upon modelling (data for December, 2005) – variant 0:  
 1 – hydroisohypses (in meters a.s.l.), 2 – fragment of modelled area included into groundwater balance,  
 3 – surface flows and reservoirs



Rys. 2. Położenie piezometrycznego zwierciadła wody w trzeciorzędowym piętrze wodonośnym rejonu Piaseczna koło Tarnobrzega na podstawie badań modelowych – stan obecny z grudnia 2005 r. (wariant 0)  
 1 – hydroizohipsy w m n.p.m., 2 – fragment obszaru badań modelowych objęty bilansem wód podziemnych,  
 3 – ciek i zbiorniki wód powierzchniowych

Fig. 2. Position of piezometric groundwater table in Tertiary horizon in the area of Piaseczno near Tarnobrzeg, based upon modelling (data for December, 2005) – variant 0  
 1 – hydroisohypses (in meters a.s.l.), 2 – fragment of modelled area included into groundwater balance,  
 3 – surface flows and reservoirs

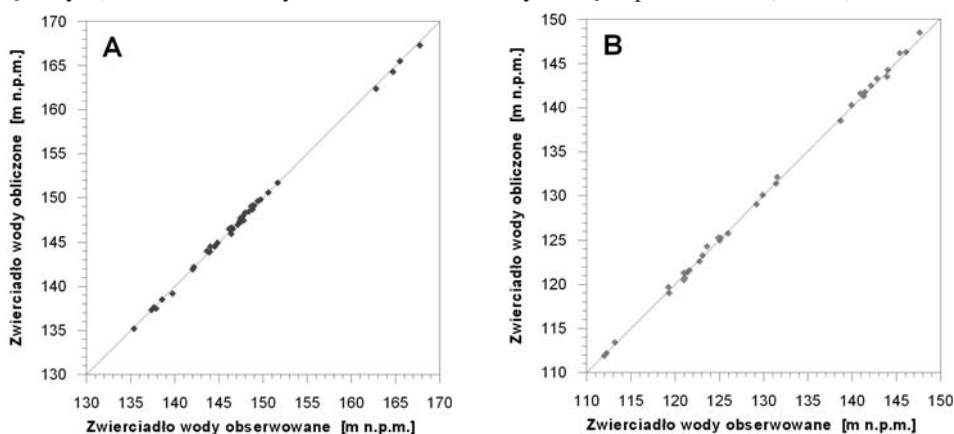
-zachodni przewała w części prawobrzeżnej. W obu przypadkach podstawę drenażu stanowi dolina Wisły. Lokalne zaburzenie tego układu spowodowane jest odwadnianiem wyrobiska pogórniczego w Piasecznie. W piętrze trzeciorzędowym przepływ strumienia wód podziemnych (rys. 2) wymuszony jest działaniem barier studziennych byłej kopalni Machów oraz drenażem wyrobiska Piaseczno.

## 2.2. Weryfikacja modelu

Zmiany parametrów filtracyjnych i korekta warunków brzegowych obliczeń, wprowadzone w trakcie kalibracji modelu, miały ograniczony charakter, ponieważ zasadnicze czynności dostosowawcze miały miejsce już wcześniej, podczas uprzednio wykonanych badań symulacyjnych (Kulma i in., *op.cit.*). Na modelu uwzględniono postęp prac likwidacyjnych oraz aktualne wydajności uzyskane przez różne systemy odbioru i zatłaczania wody w obrębie działających obiektów kopalnianych.

Do weryfikacji modelu wykorzystano wyniki pomiarów zwierciadła wód podziemnych z grudnia 2005 r. wykonane w otworach obserwacyjnych rejonu Piaseczna, Machowa i Jeziórka, tworzących sieci monitoringów lokalnych.

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. Wykazują one bardzo dużą zbieżność z odpowiadającym im obrazem pola filtracyjnego, stwierdzonym bezpośrednimi pomiarami w otworach obserwacyjnych. Uzyskana na modelu średnia dokładność odwzorowania powierzchni piezometrycznej (rys. 3) wyniosła około 0,19 m w piętrze czwartorzędowym i około 0,30 m w piętrze trzeciorzędowym, natomiast odchylenia standardowe wynoszą odpowiednio 0,25 i 0,38 m.



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

Wiarygodność modelu została również potwierdzona w niektórych składnikach bilansu wodnego opracowanego dla lewobrzeżnej części złoża siarki na obszarze TZS. Występuje w nim zadowalające podobieństwo pomiędzy wielkościami rejestrowanymi w terenie (np. odbiorem wody ze zbiornika Piaseczno) i uzyskanymi jako wynik obliczeń symulacyjnych na modelu hydrogeologicznym.

### 2.3. Obliczenia prognostyczne

#### 2.3.1. Charakterystyka przyjętych założeń

W obliczeniach prognostycznych uwzględniono możliwe scenariusze rozwoju warunków hydrodynamicznych w rejonie wyrobisk pogórnich w Machowie i Piasecznie. Stanowiły one podstawę dla dokonania oceny przebiegu zmian zachodzących w obrębie pola filtracji przy zakładanym postępie prac likwidacyjnych. Zrealizowano cztery warianty obliczeń na modelu hydrogeologicznym w warunkach filtracji ustalonej, uwzględniając kolejne etapy procesu odbudowy stosunków wodnych w piętrach wodonośnych czwartorzędowym i trzeciorzędowym.

W wariantcie 1 założono utrzymanie w wyrobisku poeksploatacyjnym Piaseczno dotychczasowej rzędnej odwodnienia wynoszącej 122,4 m n.p.m. W odkrywce Machów symulowano napełnienie wodą utworzonego zbiornika do rzędnej 145,5 m n.p.m. oraz działanie zewnętrznej bariery studni NW odprowadzającej 10 500 m<sup>3</sup>/d wody z trzeciorzędowego piętra wodonośnego. Na obszarze zlikwidowanej otworowej kopalni w Jeziórku funkcjonować będzie system grawitacyjnego odwadniania terenów pogórnich. Działalność górniczą na dotychczasowym poziomie wydobywania prowadzić będzie Kopalnia Siarki Osiek.

W wariantcie 2, na podstawie wielokrotnie powtarzanych obliczeń symulacyjnych i kontroli położenia zwierciadła wody w rejonie najbardziej zagrożonym podtopieniem (na NE od miejscowości Krzcin), określono maksymalną wysokość bezpiecznego napełnienia zbiornika Piaseczno. Wynosi ona 138,0 m n.p.m. i przy takim położeniu zwierciadła wody w zbiorniku nie występują niekorzystne zmiany stosunków wodnych na terenach otaczających. W rejonie odkrywki Machów nie będzie już funkcjonować bariera studni odwadniających NW. Kopalnia Osiek prowadzi działalność górniczą podobnie jak w wariantcie 1.

W wariantcie 3 symulowano napełnienie zbiornika do docelowej wysokości 146,0 m n.p.m., przy braku systemu melioracyjnego na terenach otaczających, natomiast w wariantcie 4 sprawdzono skuteczność działania podstawowej sieci melioracyjnej składającej się z pięciu rowów (Matuszewski, Lewandowski 1996). W obu wariantach symulowano funkcjonowanie Kopalni Siarki Osiek.

Obliczenia prognostyczne wykonano uwzględniając zwiększone o około 24,5% w stosunku do okresu weryfikacji modelu zasilanie powierzchniowe czwartorzędowej warstwy wodonośnej. Zmieniona wielkość zasilania związana była z przyjęciem średniej wysokości opadów atmosferycznych z ostatnich piętnastu lat (1991–2005).



## 2.3.2. Bilans wodny piętra czwartorzędowego

Całkowita ilość wód piętra czwartorzędowego (warstwa 1) uwzględniona w bilansie wynosi około 26 770 m<sup>3</sup>/d – w warunkach obecnego (z grudnia 2005 r.) poboru wody przez działający system odwadniania wyrobiska poeksploatacyjnego i wzrasta do blisko 30 540 m<sup>3</sup>/d – w okresie prognozy dla stanu przejściowego (warianty 1 i 2) i prognozy długoterminowej (warianty 3 i 4).

TABELA 1

Bilans przepływu wód podziemnych na terenach pogórnich byłej Kopalni Siarki Piaseczno, według badań modelowych

TABLE 1

Groundwater budget in post-mining areas of sulphur open-pit mine "Piaseczno", after modeling studies

Składnik bilansu strumienia filtracyjnego	Natężenie przepływu strumienia filtracyjnego [m <sup>3</sup> /d]	
	Odtworzony stan obecny (z XII.2005 r. – etap weryfikacji modelu)	Prognoza długoterminowa (w warunkach działania systemu melioracyjnego)
	wariant 0	wariant 4
Czwartorzędowe piętro wodonośne – warstwa 1		
Efektywna infiltracja opadów atmosferycznych	+19727/0	+24560/0
Dopływ/odpływ przez zewnętrzne granice obszaru filtracji, w tym:	+3195/-6763	+1076/-9290
– Wisła (lewy brzeg)	+1350/-4753	+43/-7084
– Koprzywianka z Kacanką	+790/-1582	+524/-1763
– pozostałe granice od strony N i W	+1055/-428	+509/-443
Zasilanie/drenaż wewnątrz obszaru filtracji, w tym:	+839/-11900	+303/-18612
– zbiornik wody w wyrobisku Piaseczno	0/-10901	0/-5100
– pobór wód podziemnych	0/-573	0/-573
– rowy podstawowe sieci melioracyjnej	0/0	+282/-11736
– pozostałe ciek i zbiorniki powierzchniowe	+839/-426	+21/-1203
Przesączanie do/z piętra wodonośnego	+3011/-8108	+4477/-2514
Suma składników bilansu (warstwa 1)	+26772/-26771	+30416/-30416
Trzeciorzędowe piętro wodonośne – warstwa 3		
Dopływ/odpływ przez zewnętrzne granice obszaru filtracji	+1516/-4267	+3476/-1090
Zasilanie/drenaż wewnątrz obszaru filtracji (zbiornik wody w wyrobisku Piaseczno)	0/-2346	0/-423
Przesączanie do/z piętra wodonośnego	+8108/-3011	+2514/-4477
Suma składników bilansu (warstwa 3)	+9624/-9624	+5990/-5990

W zasilaniu czwartorzędowego poziomu wodonośnego główną rolę odgrywa infiltracja opadów atmosferycznych. Na etapie weryfikacji modelu efektywny dopływ wody z tego źródła wynosił około 19 730 m<sup>3</sup>/d, co stanowiło 73,7% sumy bilansowej (tab. 1). W prognozowanych stanach hydrodynamicznych, po uwzględnieniu zwiększonych opadów atmosferycznych, wielkość zasilania zbliża się do 24 600 m<sup>3</sup>/d. W zależności od rozpatrzonych sytuacji osiąga zatem od 80,5 do 83,4% ogólnej ilości wody biorącej udział w obiegu.

Stabilnym i znaczącym elementem bilansowym występującym po stronie przychodów jest przesączanie z piętra trzeciorzędowego. Osiąga ono od około 3 010 m<sup>3</sup>/d (11,2% sumy bilansowej) – w odtworzonych warunkach aktualnych (wariant 0) do 4 480 m<sup>3</sup>/d (14,7%) – w prognozie długoterminowej uwzględniającej działanie rowów melioracyjnych (wariant 4) – tab. 1. Na etapie weryfikacji modelu niewielkie znaczenie miały również dopływy wody przez zewnętrzne granice obszaru filtracji (Wisła, Koprzywianka z Kacanka), które wynosiły około 3 200 m<sup>3</sup>/d (11,9%). Ich wpływ na kształtowanie bilansu wodnego w okresie prognozy zdecydowanie maleje, dochodząc do wielkości minimalnej około 750 m<sup>3</sup>/d (2,5%) w warunkach braku systemu melioracyjnego.

Po stronie rozchodów w zestawieniu bilansowym występują: odbiór wody systemami drenażowymi położonymi w obrębie modelowanego obszaru filtracji, odpływ boczny przez jego zewnętrzne granice oraz pionowe przepływy wody przez słabo przepuszczalne ily krakowieckie do piętra trzeciorzędowego. Zwykle dominujące znaczenie mają dwa spośród trzech wymienionych czynników, a ich rola zmienia się w zależności od rozpatrzonej sytuacji.

Na etapie weryfikacji modelu (wariant 0) głównym ośrodkiem drenażu był zbiornik wodny w Piasecznie odbierający około 10 900 m<sup>3</sup>/d (40,7% sumy bilansowej). W tych warunkach duże znaczenie ma przesączanie wody do piętra trzeciorzędowego z natężeniem około 8110 m<sup>3</sup>/d (30,3%), a także odpływ przez zewnętrzne granice obszaru filtracji – około 6760 m<sup>3</sup>/d (25,3%).

Na przejściowym etapie napełnienia zbiornika do wysokości 138,0 m n.p.m. (wariant 2) należy spodziewać się wzrostu ilości wody dopływającej z utworów czwartorzędowych (ok. 15 150 m<sup>3</sup>/d, tj. 49,7% sumy bilansowej) oraz powiększonego odpływu przez zewnętrzne granice (ok. 10 360 m<sup>3</sup>/d, tj. 34,0%), zwłaszcza przez Wisłę (ok. 7370 m<sup>3</sup>/d, tj. 24,2%). Wyraźnie natomiast zmniejszy się wielkość przesączania z piętra trzeciorzędowego, które osiągnie około 3060 m<sup>3</sup>/d (około 10,0% sumy bilansowej).

W prognozie długoterminowej, która zakłada zakończenie likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego lecz nie uwzględnia działania rowów melioracyjnych (wariant 3), szczególne znaczenie będzie miał odpływ wód podziemnych przez zewnętrzne granice modelu z wydajnością około 14 730 m<sup>3</sup>/d (50,0% sumy bilansowej). Sama Wisła, a w zasadzie jej lewy brzeg, drenać będzie obszar filtracji z natężeniem 11 230 m<sup>3</sup>/d (38,1%). W dalszym ciągu znaczącą pozostanie rola zbiornika wodnego w wyrobisku piaseczańskim, do którego dopływ z utworów czwartorzędowych wyniesie około 9240 m<sup>3</sup>/d (31,4%). Pionowa wymiana wody z piętrzem trzeciorzędowym praktycznie nie ulegnie zmianie i osiągnie natężenie około 2850 m<sup>3</sup>/d (9,7%).

W rozpatrzonym scenariuszu badań symulacyjnych uwzględniającym działanie pięciu rowów melioracyjnych (wariant 4) uwidaczniają się dalsze, znaczące zmiany w bilansie wodnym piętra czwartorzędowego. Podstawowym elementem drenażu będzie w tych warunkach dopływ do wewnętrznych systemów odbioru wody, który osiągnie sumaryczną wydajność 18 610 m<sup>3</sup>/d (61,2% sumy bilansowej). Główny udział w tym dopływie będzie miał drenaż przez rowy – 11 740 m<sup>3</sup>/d (38,6%) i zbiornik wodny w Piasecznie – 5100 m<sup>3</sup>/d (16,8%). Zewnętrzne granice obszaru filtracji w dalszym ciągu pozostaną aktywne, ale natężenie odbioru wody znacznie zmaleje do około 9290 m<sup>3</sup>/d (30,5%). Zasadniczo nie zmieni się natomiast przesączanie z piętra trzeciorzędowego, które osiągnie wydajność około 2510 m<sup>3</sup>/d (8,3%).

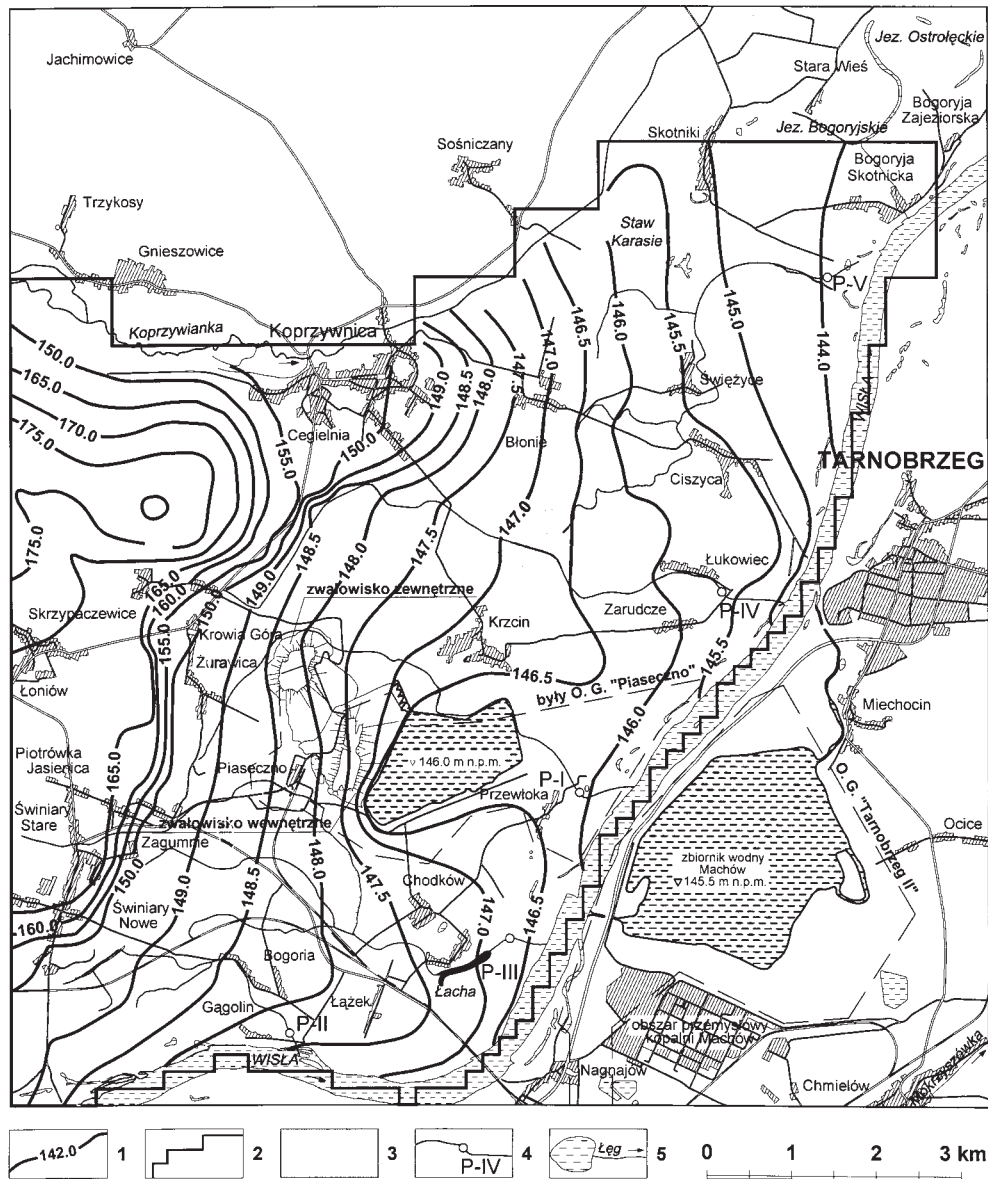
### 2.3.3. Bilans wodny piętra trzeciorzędowego

Bilans wodny w trzeciorzędowym piętrze wodonośnym wyznaczają głównie czynniki zewnętrzne w postaci dopływu i odpływu wody przez przyjęte granice obszaru filtracji oraz pionowej wymiany wody z nadległym piętrzem wodonośnym. Całkowita ilość krążących wód wynosi obecnie (wariant 0) około 9620 m<sup>3</sup>/d (przy znacznym odbiorze wody przez system odwadniania wyrobiska w Machowie) i zmniejszy się do 5890–5990 m<sup>3</sup>/d w warunkach, jakie nastąpią po likwidacji wyrobisk pogórnicych (wariant 3 i 4). Na tle tych zmian obserwować można malejący odbiór wody z piętra trzeciorzędowego przez zbiornik wodny w Piasecznie. Obecnie dopływ ten wynosi około 2350 m<sup>3</sup>/d (24,4% sumy bilansowej piętra trzeciorzędowego), zmniejsza się do 1800 m<sup>3</sup>/d (25,5%) w warunkach przejściowej wysokości napełnienia zbiornika (138,0 m n.p.m.), a ustabilizuje się na około 420 m<sup>3</sup>/d (7,1%) po osiągnięciu stanu docelowego (146,0 m n.p.m.).

### 2.3.4. Skutki zmian położenia zwierciadła wody

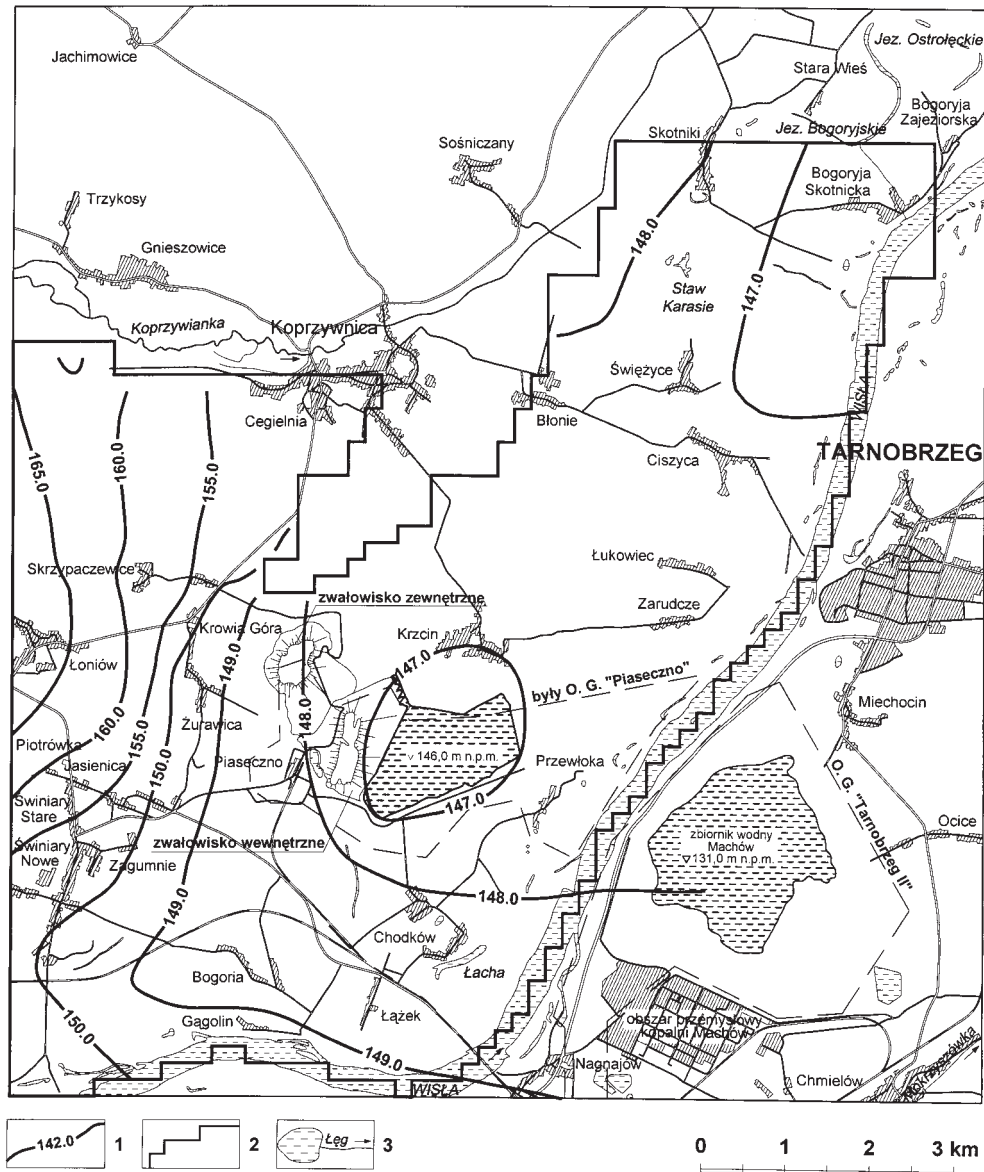
W warunkach naturalnych zwierciadło wód podziemnych w piętrach czwartorzędowym i trzeciorzędowym kształtowało się na zbliżonej wysokości od około 145,0 do 150,0 m n.p.m. (Turek 1978). Istniejące zróżnicowanie w przedziale rzędnych 122–150 m n.p.m. jest skutkiem wieloletniego odwadniania wyrobisk górniczych, które będzie się zmniejszać wraz z postępem prac likwidacyjnych.

W piętrze czwartorzędowym likwidacja odkrywki Piaseczno będzie skutkować znaczącymi zmianami w położeniu zwierciadła wody. Strefa tych zmian obejmie nie tylko najbliższe otoczenie zbiornika, ale praktycznie całą część obszaru TZS położoną na lewym brzegu Wisły (rys. 4). W warunkach napełnienia zbiornika do wysokości 138,0 m n.p.m. prognozowany wzrost wysokości zwierciadła wody wyniesie od 1,0 do 2,5 m i zajmie powierzchnię około 24 km<sup>2</sup>. Przy docelowym napełnieniu zbiornika (146,0 m n.p.m.) przyrost zawadnionej miąższości utworów przepuszczalnych (piasków i żwirów) przekracza miejscami 7,5 m, przy czym wielkości maksymalnych należy spodziewać się tylko w rejonie bezpośrednio przyległym do zbiornika, zwłaszcza po jego zachodniej stronie. W prognozie



Rys. 4. Położenie piezometrycznego zwierciadła wody w czwartorzędowym piętrze wodonośnym rejonu Piaseczna koło Tarnobrzega na podstawie badań modelowych – stan prognozowany po likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego z działającym systemem melioracyjnym na terenach otaczających (wariant 4)  
 1 – hydroizohipsy w m n.p.m., 2 – fragment obszaru badań modelowych objęty bilansem wód podziemnych,  
 3 – tereny zagrożone podtopieniem o głębokości do zwierciadła wody mniejszej niż 1,0 m p.p.t., 4 – rowy melioracyjne sieci podstawowej wraz z przepompowniami, 5 – ciekły i zbiorniki wód powierzchniowych

Fig. 4. Position of piezometric groundwater table in Quaternary horizon in the area of Piaseczno near Tarnobrzeg, based upon modelling – prognosis for remediated open pit with drainage system operating in the surrounding land – variant 4  
 1 – hydroisohypses (in meters a.s.l.), 2 – fragment of modelled area included into groundwater balance, 3 – land endangered by soaking, depth to groundwater table less than 1.0 m below surface, 4 – basic system of draining ditches with pumping stations, 5 – surface flows and reservoirs



Rys. 5. Położenie piezometrycznego zwierciadła wody w trzeciorzędowym piętrze wodonośnym rejonu Piaseczna koło Tarnobrzega na podstawie badań modelowych – stan prognozowany po likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego (wariant 4)

1 – hydroizohipsy w m n.p.m., 2 – fragment obszaru badań modelowych objęty bilansem wód podziemnych, 3 – ciek i zbiorniki wód powierzchniowych

Fig. 5. Position of piezometric groundwater table in Tertiary horizon in the area of Piaseczno near Tarnobrzeg, based upon modelling – prognosis for remediated open pit – variant 4

1 – hydroisohypses (in meters a.s.l.), 2 – fragment of modelled area included into groundwater balance, 3 – surface flows and reservoirs

długoterminowej obszar objęty zmianą położenia zwierciadła wody większą niż 1,0 m zajmie powierzchnię około 43 km<sup>2</sup> – przy braku rowów melioracyjnych i około 31 km<sup>2</sup> – w przypadku wykonania projektowanego systemu drenażowego.

Docelowa zmiana położenia zwierciadła wód podziemnych w rejonie zbiornika rekreacyjnego w Piasecznie niesie z sobą zagrożenie w postaci podtopienia części terenów leżących na lewobrzeżnej części obszaru doliny Wisły. Obszar potencjalnych podtopień, o zerowej głębokości zalegania zwierciadła wody (woda na powierzchni terenu) i obszary zagrożone podtopieniem, w obrębie których głębokość do zwierciadła wody jest mniejsza niż 0,5 m p.p.t., wystąpią na dużą skalę (na powierzchni ok. 19,4 km<sup>2</sup>) w przypadku braku systemu drenażowego. Wykonanie rowów melioracyjnych sieci podstawowej wpłynie na radykalną poprawę stosunków wodnych tego obszaru, skutkiem czego obszary zagrożone podtopieniem praktycznie nie ujawnią się, a płytkie zaleganie zwierciadła wody (od 0,5 do 1,0 m p.p.t.) może zająć powierzchnię około 1,6 km<sup>2</sup> (rys. 4).

W realnych warunkach, o stałym bądź okresowym występowaniu obszarów podtopień decydować będzie rzeczywiste natężenie opadów i czas ich trwania oraz lokalne deniwelacje terenu, których uwzględnienie na modelu hydrogeologicznym było praktycznie niemożliwe.

Skutki likwidacji wyrobiska poeksploatacyjnego w Piasecznie obejmą również trzeciorzędowe piętro wodonośne. Zaniechanie odwadniania tego piętra w obrębie tworzonego zbiornika w Machowie (studniami bariery zewnętrznej NW) doprowadzi rychło do zaniku regionalnego leja depresji, jaki utrzymywał się wokół wyrobiska tej kopalni przez ostatnie czterdzieści lat. Prognozowany układ piezometrycznego zwierciadła wody (rys. 5) kształtowany będzie przez napływ strumieni wód podziemnych głównie z kierunku zachodniego, południowo-zachodniego i północno-zachodniego w stronę odkrywki w Piasecznie, wytwarzającej w dalszym ciągu niewielki lej depresji.

Strefa odbudowy ciśnienia wód podziemnych w piętrze trzeciorzędowym obejmie rozległy obszar rozciągający się od terenów położonych na zachód od byłej odkrywkowej kopalni Piaseczno aż do leżących na wschodzie terenów pogórnich likwidowanej kopalni w Jeziórku. W stosunku do obecnego (2005 r.) stanu hydrodynamicznego spodziewany przyrost wysokości zwierciadła wody (impresja) przekroczy 15–20 m w rejonie zbiornika Piaseczno i maksymalnie osiągnie około 35 m w rejonie zbiornika Machów.

Likwidacja wyrobiska pogórniczego w Piasecznie nie spowoduje negatywnych skutków w środowisku wodno-gruntowym piętra trzeciorzędowego. Przywróci natomiast warunki zbliżone do naturalnych, jakie istniały przed rozpoczęciem eksploatacji złóż siarki w rejonie Tarnobrzega.

### **Podsumowanie**

Prognozy stanu wód podziemnych i przepływów w piętrach czwartorzędowym i trzeciorzędowym na obszarze TZS wykonano wykorzystując trójwarstwowy model numeryczny

o zasięgu regionalnym. Jego weryfikacja doprowadziła do uzyskania wysokiej zgodności pomiędzy układem rzeczywistym i odtworzonym w badaniach modelowych.

Z obliczeń prognostycznych wynika, że skutki hydrogeologiczne, jakich należy oczekiwać na poszczególnych etapach procesu likwidacyjnego wyrobiska w Piasecznie, zależą w dużej mierze od osiągniętej wysokości napełniania zbiornika i postępu prac w likwidowanej odkrywcze Machów.

Bezpieczną wysokością położenia zwierciadła wody w zbiorniku Piaseczno, nie powodującą negatywnych zmian w środowisku wodno-gruntowym, jest rzędna 138,0 m n.p.m. Jej utrzymanie wymagać będzie odprowadzania do Wisły wód nadmiarowych ze średnią wydajnością około 15 150 m<sup>3</sup>/d.

Finalne skutki działań likwidacyjnych wyrobiska poeksploatacyjnego Piaseczno niosą z sobą zagrożenie w postaci podtopienia terenów położonych w jego otoczeniu. Napełnienie zbiornika wodnego do rzędnej 146,0 m n.p.m. wymagać będzie budowy systemu melioracyjnego, składającego się z rowów drenażowych sieci podstawowej i szczegółowej. Odbierać będą one wody podziemne z natężeniem około 11 740 m<sup>3</sup>/d, natomiast utrzymanie docelowej wysokości zwierciadła w zbiorniku będzie możliwe przy odprowadzaniu do Wisły około 5100 m<sup>3</sup>/d wody.

#### LITERATURA

- Haładus A., Kulma R., Kania J., 1997 – Wariantowe prognozy kształtowania się poziomu wód podziemnych w rejonie wyrobiska Piaseczno z określeniem rejonów wymagających odwadniania. Przedsiębiorstwo Usługowo-Consultingowe GEA sp. z o.o., Kraków.
- Kulma R. i in., 1998 – Dokumentacja hydrogeologiczna pt. Prognoza skutków środowiskowych w związku z planowanym zaprzestaniem odwadniania kopalni odkrywkowej siarki w Machowie. AGH, Kraków.
- Kulma R., Haładus A., Kania J., 2000 – Aktualizacja prognozy hydrogeologicznych skutków niezależnej likwidacji wyrobiska Piaseczno w warunkach braku dennej warstwy izolacyjnej na podstawie badań modelowych. AGH, Kraków.
- Kulma R. i in., 2003 – Dokumentacja określająca warunki hydrogeologiczne likwidowanego zakładu górniczego odkrywkowej Kopalni Siarki „Machów”. PU-P SIGMA BP Sp. z o.o. w Tarnobrzegu.
- Kulma R. i in., 2006 – Dokumentacja określająca warunki hydrogeologiczne w rejonie likwidowanego wyrobiska byłej Kopalni Siarki „Piaseczno”. PU-P SIGMA BP Sp. z o.o. w Tarnobrzegu.
- Matuszewski J., Lewandowski R., 1996 – Studium programowo-przestrzenne likwidacji wyrobiska Piaseczno. Hydroprojekt – Warszawa Sp. z o.o., Warszawa.
- Pantula Z., Burchard T., Kirejczyk J., Kiciński C., 2006 – Projekt techniczny prac zabezpieczających i rekultywacji wyrobiska byłej Kopalni Siarki „Piaseczno”. PUP SIGMA BP Sp. z o.o. w Tarnobrzegu.
- Turek S., 1978 – Ciśnienie oraz własności fizyczne i chemiczne wód mioceńskich poziomu wodonośnego w rejonie Tarnobrzega przed eksploatacją złoża siarki. Biuletyn IG, nr 309, Warszawa.
- Wilc Z., Kulma R. (red.), 2004 – Hydrogeologia polskich złóż kopalni i problemy wodne górnictwa. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.

**MODELLING OF HYDROGEOLOGICAL CONSEQUENCES OF THE CLOSURE OF NATIVE SULPHUR OPEN-PIT MINE PIASECZNO NEAR TARNOBZEG****Key words**

Open-pit closure, prognostic calculations

**Abstract**

The closure of native sulphur mines in the vicinity of Tarnobrzeg has reached a final stage. The open pit in Machów, isolated with 25-meters-thick clay layer, is successively filled with water from the Vistula River. In the Jeziórko borehole mine land remediation is under way and gravitational drainage system is under construction. Delay in closure operations took place in the area of the Piaseczno Mine where recreational center has been designed around a water reservoir of water table altitude 146.0 m a.s.l.

The safe closure and remediation of the Piaseczno open-pit requires the construction of drainage system in the area endangered by soaking. The current (data for the year 2006) hydrodynamic conditions and prognoses of future changes of aquatic environment possible in the post-mining land were analysed with the numerical filtration model. The results enabled the identification of the position of groundwater tables in Quaternary and Tertiary horizons along with the discharge of designed drainage systems.