

Problemy modelowania matematycznego przepływu wód podziemnych w rejonie wysadów solnych na przykładzie struktury Wapna

Problems of the mathematic modeling of ground water flow in the salt dome area based on the example of the Wapno Structure

Marek Rasała

Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Instytut Geologii, Zakład Hydrogeologii i Ochrony Wód, ul. Maków Polnych 16, 61-606 Poznań,
e-mail: mrasala@interia.pl

Abstract: This paper presents a numeric model of ground water flow in the Wapno salt dome area. The model was performed in order to verify a conceptual system of water circulation and to determine the influence of geological factors on the formation of hydrogeological conditions in the salt dome region. Besides, the prognosis of saline water migration from the caprock to the exploited aquifer was made. The model was performed by means of the Modflow program, which does not include the water with differentiated mineralization. This caused some serious problems during model construction and its calibration affecting the reliability of the obtained results of water balance.

Key words: conceptual model, mathematic model, salt dome, gypsum caprock, karst-fissure water

1. Wprowadzenie

W ramach realizowanych badań dotyczących rozpoznania zmian warunków hydrogeologicznych w rejonie wysadu solnego Wapna wywołanych katastrofą górniczą (1977 r.) opracowano model numeryczny aktualnego systemu krążenia wód podziemnych, obejmujący poziomy wodonośny w obrębie czapy gipsowej wysadu oraz jej kenozoicznego nadkładu i otoczenia. Względna stabilizacja warunków hydrogeologicznych przeobrażonych wskutek katastrofy pozwoliła na ilościową ocenę wód migrujących przez czapę wysadu (Rasała, 2005a). Celem modelu była również weryfikacja koncepcyjnego systemu krążenia wód, zwłaszcza w zakresie określenia wpływu elementów geologicznych na kształtowanie się warunków hydrogeolo-

gicznych w rejonie wysadu solnego Wapna. Ponadto wykonano prognozę migracji wód zasolonych spływających z czapy do użytkowego mioceńsko-oligocieńskiego poziomu wodonośnego. Model opracowano przy użyciu programu MODFLOW, bowiem nie dysponowano programem uwzględniającym obecność w układzie wód o zróżnicowanej mineralizacji. W trakcie konstrukcji i kalibracji modelu zrodziło to kilka istotnych problemów, rzutujących głównie na wiarygodność uzyskanych wyników bilansu wodnego.

2. Koncepcyjny system krążenia wód w rejonie wysadu Wapna

Hydrogeologia wysadu Wapna determinowana jest przepływem wód z kenozoicznego nadkładu poprzez czapę do lustra solnego, gdzie następuje rozpuszczanie i wynoszenie soli do otoczenia. Intensywność tego przepływu zależy od parametrów filtracyjnych czapy, kontaktów hydraulicznych oraz przede wszystkim od możliwości odbioru wód z czapy przez otoczenie. Aktualne zasilanie infiltracyjne czapy wysadu jest szczególnie intensywne w strefie wychodni gipsów (centralna część wysadu). Zasilanie pozostałych części czapy następuje również z kenozoicznych utworów nadkładu (o miąższości 20–70 m). Obniżenie się po katastrofie zwierciadła wód w czapie (o około 7 m) wywołało drenaż czwartorzędowych poziomów wodonośnych w otoczeniu czapy. Schematyczny przekrój hydrogeologiczny przez rejon wysadu Wapna przedstawiono na rycinie 1.

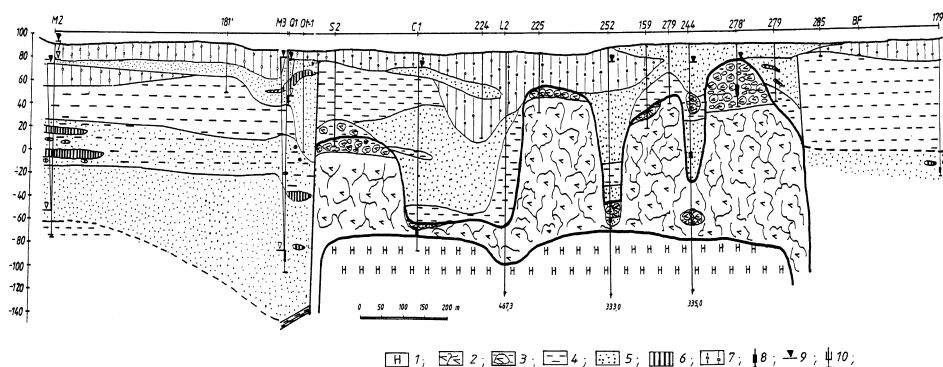
Przepływ wód przez czapę może odbywać się głównie pewnymi uprzywilejowanymi strefami, do których zaliczyć można strefy tektoniczne i głębokie formy krasowe (leje i kanały), z którymi wody czapy pozostają w ścisłym związku hydraulicznym. Przepuszczalność wraz z głębokością w czapie maleje porowatość kawernowo-szczelinowa (Rasała, 2005b). Jednak w strefie kontaktu z lustrem solnym (na głębokości 160–170 m) porowatość jest zdecydowanie większa, bowiem występują tu kawerny powstałe wskutek ługowania soli. Wymienione czynniki powodują, że wody zgromadzone w czapie nie podlegają równomiernej wymianie, a nawet pewne strefy czapy mogą być hydraulicznie izolowane. Wody górnej partii czapy (o typie $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Cl-Ca-Na}$) cechuje mineralizacja rzędu 3–4 g/l. W trakcie pionowego przepływu wód przez czapę następuje wzrost ich mineralizacji ogólnej do poziomu 30–35 g/l w dolnej partii czapy (wody typu $\text{Cl-(SO}_4\text{)-Na-(Ca)}$). Ponad lustrem solnym tworzą się solanki (typu Cl-Na) o stwierdzonej mineralizacji 61–136 g/l (Rasała, 2005a).

Naturalnym odbiornikiem wód z czapy jest poziom mioceńsko-oligocieński (mioc.-olig.) pozostający w kontakcie z jej środkową i dolną partią. W warunkach pierwotnych drenaż ten był ograniczony i wyrażał się około 14-metrową różnicą ciśnień. Aktualna różnica ciśnień piezometrycznych, wynosząca około 7–8 m, świadczy o intensyfikacji spływu wód z czapy (Rasała, 2005a). Spływ ten szczególnie intensywnie zachodzi poprzez NE granicę czapy i wyraża się występowaniem w poziomie mioc.-olig. wód o mineralizacji wyższej (20–40 g/l) od mineralizacji wód

naturalnej aureoli wokółwysadowej (3–5 g/l). Występuje tu bowiem strefa ułatwionego kontaktu pomiędzy czapą a poziomem mioc.-olig., której powstanie jest efektem gwałtownych przemieszczeń gruntów i wód do katastrofalnie zalewanego górotworu. Aktualnie migracja zasolonych wód do poziomu mioc.-olig. odbywa się z dolnych partii czapy, a wody te od chwili katastrofy przemieściły się na odległość rzędu 200–300 m od granicy wysadu.

Po NW stronie wysadu rozpoznano nieckę przywysadową wypełnioną piaszczystymi utworami paleogeńsko-neogeńskimi do głębokości około 220 m (ryc. 1). W obrębie niecki (na głębokości około 180 m i około 50 m od granicy wysadu) występują solanki o mineralizacji około 300 g/l (otwór nr M3), które w świetle badań izotopowych spływały tu z dna lustra solnego przed katastrofą kopalni (Górski i in., 2001). Prawdopodobnie w spływie tym istotną rolę odgrywała rynna erozyjna rozcinająca czapę wysadu (sięgająca lustra solnego wysadu), której ujście z czapy znajduje się w strefie niecki przywysadowej. Zredukowane ciśnienia piezometryczne solanki (gęstość 1,2 kg/dm³) wskazują na istnienie tu anomalnie wysokiego ciśnienia w stosunku do pozostałych punktów obserwacyjnych wód poziomu mioc.-olig. Należy podkreślić, że nie jest znane rozprzestrzenienie stwierdzonej solanki, przy czym zalega ona w dolnej części poziomu mioc.-olig. Jeśli istnieją warunki, może ona grawitacyjnie przesiąkać w głąb lub – jeśli podłoże jest słabo przepuszczalne – może być rozprzestrzeniona na znacznym obszarze poziomu mioc.-olig. Można bowiem przyjąć, że spływ wód z czapy (zwłaszcza jej dolnej partii) do otaczającego poziomu (w warunkach przed katastrofą) następował głównie poprzez istniejące rozcięcie erozyjne w czapie gipsowej.

Interpretacja danych hydrodynamicznych, hydrochemicznych i izotopowych wskazuje na aktualne zmniejszenie się roli rynny erozyjnej w drenażu czapy, a tym samym ograniczeniu uległo zasilanie niecki przywysadowej. Obserwowana sto-



Ryc. 1. Przekrój hydrogeologiczny przez wysad solny w Wapnie

1 – sól; 2 – gips; 3 – rumosz gipsowy z iłem; 4 – il; 5 – piasek; 6 – węgiel brunatny; 7 – glina; 8 – zafiltrowanie otworu; 9 – zwierciadło ustabilizowane; 10 – końcówka orurowania

Fig. 1. Hydrogeological cross-section of the Wapno salt dome

1 – salt; 2 – gypsum; 3 – gypsum debris with clay; 4 – clay; 5 – sand; 6 – brown coal; 7 – till; 8 – well screen; 9 – static water level; 10 – bottom of a borehole casing

sunkowo niska mineralizacja wód ze strefy lustra solnego sugeruje ich względnie szybki odpływ, przy czym może on zachodzić strefą N i NE.

Przedstawiony system krążenia wód w rejonie wysadu solnego Wapna oparty jest jedynie na punktowych obserwacjach bardzo złożonego i przestrzennie zmiennego środowiska hydrogeologicznego, dodatkowo zaburzonego katastrofą kopalni soli i jej skutkami. Dlatego dla weryfikacji przedstawionego modelu koncepcyjnego niezbędne było przeprowadzenie badań modelowych. Badania te miały posłużyć głównie weryfikacji znaczenia warstwy ilasto-gruzłowej dla kontaktu hydraulicznego czapy z poziomem mioc.-olig. i znaczenia rynny erozyjnej w drenażu czapy. Miały również rozstrzygnąć kwestię roli drenażu wód z utworów czwartorzędowych w warunkach obniżonego po katastrofie położenia wód w czapie. Ponadto, w związku ze stwierdzonym występowaniem w poziomie mioc.-olig. wokół czapy wód zasolonych, wskazane było określenie tempa ich migracji.

3. Schematyzacja i konstrukcja modelu matematycznego

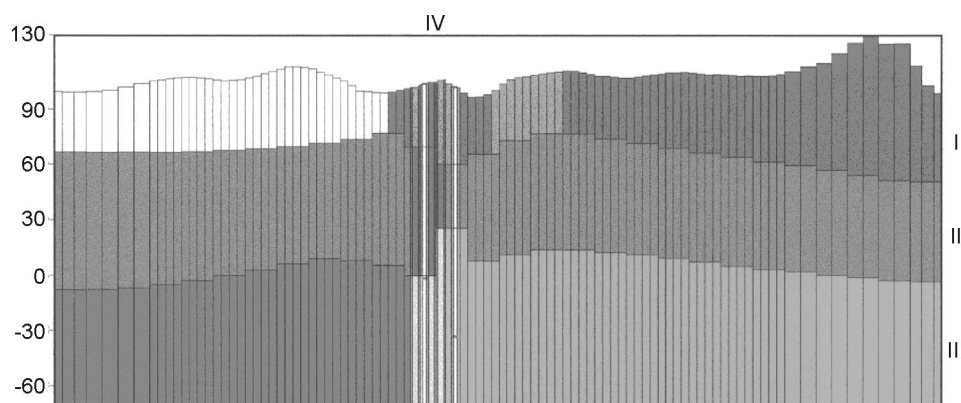
Ze względu na regionalny charakter modelu (powierzchnia 224 km²) i stopień rozpoznania obszaru, przyjęto ustalony model filtracji w systemie wodonośnym. Na badanym obszarze istnieje stosunkowo mało danych dotyczących warunków hydrogeologicznych w utworach czwartorzędowych. Lepiej rozpoznany jest poziom mioc.-olig. stanowiący podstawowe źródło zaopatrzenia w wodę na tym terenie.

Na potrzeby badań modelowych istniejące układy hydrostrukturalne i hydrodynamiczne wód podziemnych sprowadzono do 3 warstw modelu (ryc. 2). Niejednorodny poziom wodonośny w utworach mioc.-olig. (III warstwa modelu) współdziała za pośrednictwem ograniczonych kontaktów hydraulicznych poprzez warstwę rozdzielającą (jednorodna seria ilów poznańskich – II warstwa modelu) z niejednorodnym górnym poziomem wodonośnym w utworach czwartorzędowych (I warstwa modelu). Układ strukturalnie zaburzony jest przez wysad solny Wapna, którego czapa stanowi swoiste okno hydrogeologiczne pomiędzy czwartorzędowym a paleogeńsko-neogeńskim piętrzem wodonośnym, choć kontakt czapy z wodonośnymi utworami otoczenia jest ograniczony i zmienny strefowo. Wysad solny położony jest w strumieniu regionalnego przepływu wód podziemnych w poziomie mioc.-olig. z południa na północ.

Z symulacji modelowych wyłączono strefę niecki przywysadowej, uznając, że zgromadzone tu solanki nie uczestniczą w przepływie regionalnym. Jej uwzględnienie w modelu, bez uwzględnienia dużych różnic gęstości, mogłoby zdecydowanie zafałszować wielkość odpływu wód z czapy. Jako spąg modelu przyjęto rzędną 70 m p.p.m., co odpowiada średniej głębokości zalegania lustra solnego wysadu (por. niżej). Jak wynika z nielicznych danych, przyjęty spąg modelu w przybliżeniu pokrywa się ze stropem ilów podścielających poziom mioc.-olig. w bezpośrednim otoczeniu wysadu. Założenie to wynika również z braku rozpoznania spągu poziomu mioc.-olig. w granicach modelu i warunków hydrogeologicznych panujących w utworach mezozoiku na całym modelowanym obszarze (ryc. 2).

Stosunkowo najwięcej danych geologicznych i hydrogeologicznych pochodzi z rejonu wysadu solnego, który stanowi jednak tylko niewielki fragment modelowanego obszaru (rozmiary czapy 900×450 m). Warunki hydrogeologiczne w obrębie czapy zamodelowano w układzie trójwarstwowym w nawiązaniu do otoczenia. I warstwa od powierzchni terenu do około 70 m n.p.m. (średnia wysokość czapy gipsowej w brzeźnych częściach wysadu) odwzorowuje nadkład czapy. Jedynie dla centralnej części wysadu, gdzie występują wychodnie czapy gipsowej przyjęto wartości filtracyjne ośrodka takie same jak dla II warstwy w granicach wysadu. Środkowa (II) warstwa odwzorowuje czapę gipsową, w obrębie której dość nieregularnie, choć licznie, występują formy krasowe i subrozcyjne. Jako spąg warstwy (0 m n.p.m.) przyjęto głębokość osiąganą przez większość lei krasowych, wypełnionych różnorodnymi osadami kenozoicznymi. Dolną (III) warstwę stanowią spękane gipsy (lecz o gorszych parametrach filtracyjnych w stosunku do wyżej ległych) dochodzące do lustra solnego. Ze względu na aktualnie mało wiarygodne informacje o położeniu lustra solnego, przemodelowanego w wyniku katastrofy, przyjęto jego położenie na 70 m p.p.m., tj. jego średnie położenie ustalone na podstawie danych z wierceń. Takie rozwiązanie nie ma wpływu na solanki, które występują w jego obniżeniach, bowiem nie uczestniczą one w przepływie konwekcyjnym (wody stagnujące). Początkowe parametry filtracyjne wydzielonych warstw modelu przyjęto na podstawie: wyników próbnych pompowań, danych literaturowych, wyników badań metodą Paramex (czapa i jej paleogeńsko-neogeńskie otoczenie).

Powierzchnię modelu podzielono początkowo regularną siatką kwadratową o boku 500 m. W trakcie modelowania dla uszczegółowienia niektórych nanoszonych elementów (które w trakcie tarowania okazały się niezbędne), zwłaszcza



Ryc. 2. Przykładowy przekrój przez model matematyczny wysadu solnego Wapna i jego otoczenia

I – I warstwa modelu – utwory czwartorzędowe; II – II warstwa modelu – iły serii poznańskiej; III – III warstwa modelu – poziom mioceno-oligoceni; IV – czapa wysadu

Fig. 2. The exemplary cross-section of the mathematic model of the Wapno salt dome and its surrounding

I – I level of the model – Quaternary sediments; II – II level of the model – Poznań Formation clay; III – III level of the model – Miocene and Oligocene aquifer; IV – caprock

w obrębie wysadu, wprowadzono dodatkowe kolumny i wiersze (najmniejsze bloki mają wymiar 25×125 m).

Na podstawie sporządzonych map hydroizohips zadano warunki brzegowe I rodzaju typu $H = \text{const}$, na południowej i północnej granicy obszaru w warstwie I i III modelu. Infiltrację efektywną opadów atmosferycznych odwzorowano warunkiem brzegowym II rodzaju $Q = \text{const}$. w postaci stałego zasilania powierzchniowego. Wyodrębniono 5 stref o zróżnicowanej infiltracji efektywnej od 15 do 150 mm, które podczas tarowania uległy zmianom. Ujęcia wód podziemnych odwzorowano, zadając warunki brzegowe II rodzaju $Q = \text{const}$. i wprowadzając wielkość aktualnego poboru wód podziemnych. Warunki brzegowe III rodzaju $Q = f(H)$ wewnętrzne zastosowano w celu odwzorowania związku wód powierzchniowych i wód podziemnych pierwszej warstwy wodonośnej.

4. Kalibracja i weryfikacja modelu matematycznego

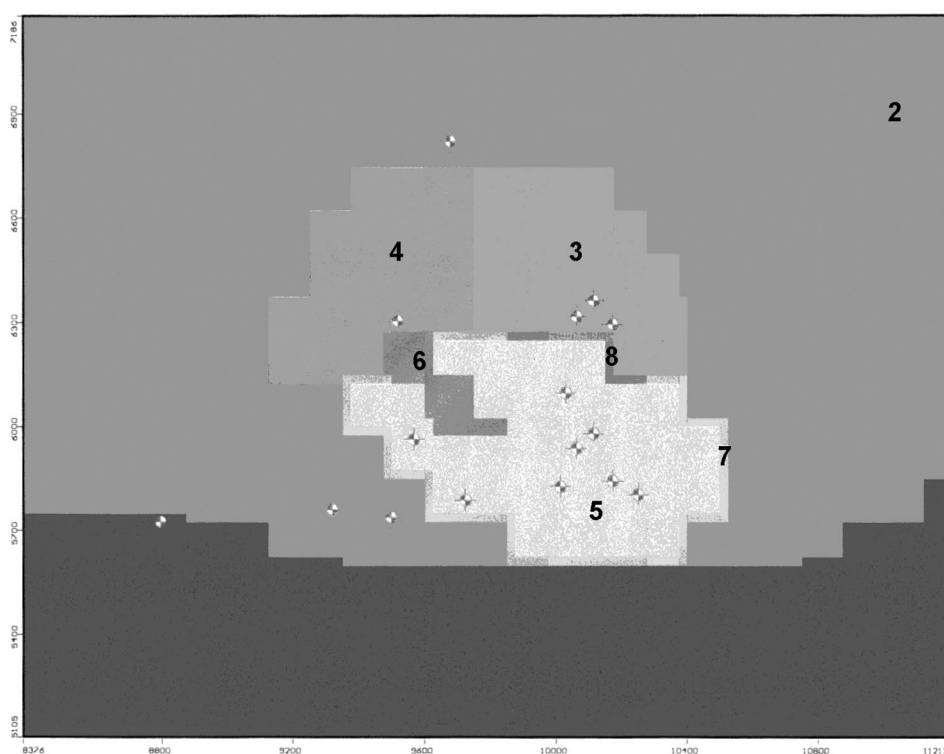
Bazową dla kalibracji mapę hydroizohips poziomu mioc.-olig. opracowano na podstawie danych pochodzących z okresu powstawania okolicznych ujęć (lata 70. i 80.). Natomiast układ hydrodynamiczny panujący na wysadzie i w jego najbliższym otoczeniu oparto na rozpoznaniu hydrogeologicznym z 2001 r. Takie rozwiązanie przyjęto przy założeniu realnego braku oddziaływań hydrodynamicznych ujęć na wysad i jego najbliższe otoczenie. Słabe rozpoznanie czwartorzędowych poziomów wodonośnych w szerokim otoczeniu wysadu (I warstwa) spowodowało, że weryfikację oparto głównie na rozpoznaniu budowy geologicznej i poziomu wód gruntowych.

Ograniczona liczba informacji hydrogeologicznych, która mogła być wykorzystana do modelu, sprawiła, że właściwe kalibrowanie modelu przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie wykonano tarowanie poziomu mioc.-olig., a jako weryfikatory posłużyły studnie spełniające rolę piezometrów. Kalibrację prowadzono metodą kolejnych przybliżeń. Zmianom podlegały własności filtracyjne ośrodka oraz przepuszczalność ilów serii poznańskiej. Uzyskane różnice między położeniem zwierciadła wód podziemnych wynikającym z pomiarów a wartościami uzyskanymi z badań modelowych, mieszczą się w większości bloków obliczeniowych w granicach 1 m. Jedynie w zachodniej części modelu odstępstwa wyniosły do 2 m i mogą wynikać z nieuwzględnienia możliwości ascenzji wód z podłoża i/lub zasilającej roli występującego tu jeziora rynnowego. Zaznaczyć należy jednak, że jest to strefa o słabym rozpoznaniu poziomu mioc.-olig. Z racji jego znacznego oddalenia od wysadu nie ma on istotnego znaczenia dla rozwiązywanego problemu.

W drugim etapie tarowania analizowano (przy eksploatacji studzien) wysad solny Wapna. W związku z występowaniem tu wód o zróżnicowanej mineralizacji (od 1 do 136 g/l) przyjęto do kalibracji zredukowane względem gęstości wysokości hydrauliczne. Początkowo próbowano uzyskać różnicę ciśnień na pograniczu czapy i mioc.-olig. poziomu wodonośnego poprzez znaczne różnicowanie parametrów filtracyjnych obu zbiorników, jednak uzyskiwane wyniki odbiegały znacząco od

wartości stwierdzonych. Dlatego wokół dolnej części czapy (III warstwa) zastosowano wydzielenie utworów słabo przepuszczalnych w blokach o szerokości 25 m. Zrezygnowano z założenia warunków brzegowych wewnętrznych I rodzaju z uwagi na ograniczenie elastyczności modelu. W toku kalibracji słabo przepuszczalną warstwę wokół wysadu różnicowano pod względem parametrów filtracyjnych: lepsze po NE stronie czapy i gorsze na pozostałym obwodzie. Dalsze tarowanie wykazało ponadto konieczność przeprowadzenia przez czapę strefy drenażowej (rynnę erozyjnej), wychodzącej w stronę niecki przywysadowej będącej w kontakcie z poziomem mioc.-olig. (ryc. 3). Rynna erozyjnej nie przeprowadzono ostatecznie przez całą czapę, zgodnie z koncepcją Ratajczaka (2000), bowiem takie próby skutkowały głębokim drenażem niemal całej czapy. Ponadto jej spąg dość stromo obniża się w kierunku NW (nie osiągając w części południowej wysadu lustra solnego), zaś na modelu objęłaby ona całą miąższość warstwy.

Ostatecznie kalibrowanie czapy gipsowej i otaczającego ją poziomu mioc.-olig. dokonano poprzez przeprowadzanie korekt współczynnika filtracji poziomej dla warstwy otaczającej czapę oraz współczynnika filtracji pionowej dla czapy gipsowej. Modyfikowano również infiltrację efektywną w rejonie wychodni czapy. Wyt-



Ryc. 3. Mapa konstrukcji III warstwy modelu w rejonie wysadu po kalibracji

1–8 wydzielone utwory na modelu matematycznym; objaśnienia w tabeli 1

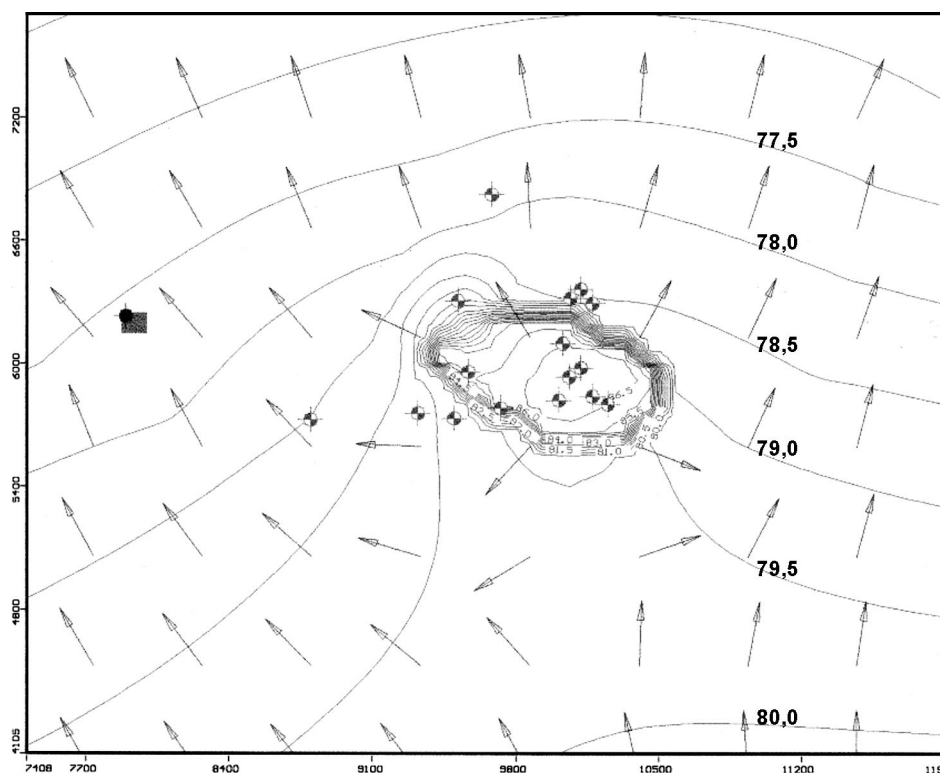
Fig. 3. The construction map of the III model level in the salt dome area after calibration

1–8 deposits chosen for the mathematic model; for explanation see Table 1

rowane położenie zwierciadła wód górnej partii czapy w stosunku do stwierdzonej było niższe o około 0,8 m, zaś dla dolnej o około 1,5 m, natomiast dla solanek ponad lustrem solnym – 4 m.

5. Wyniki modelu matematycznego

Podczas tarowania czapy wysadu i jej otoczenia wyróżniono strefy o zróżnicowanej przepuszczalności na kontakcie czapy i poziomym mioc.-olig. Ułatwiony kontakt hydrauliczny panuje w strefie północnej, gdzie występowały przepływy osadów do kopalni podczas jej katastrofального zatapiania, oraz u wylotu rozcięcia erozyjnego przebiegającego przez czapę w kierunku NW. Na wytarowanym modelu po NE stronie wysadu w obrębie utworów paleogenu i neogenu zaznacza się również, potwierdzona pomiarami metodą Paramex (Górski in., 2001), strefa o lepszych parametrach filtracyjnych, co może być związane z ich rozluźnieniem podczas przepływu fluidalnego do wysadu w trakcie katastrofy. Dla utworów czapy uzyskano



Ryc. 4. Wytarowana mapa hydroizohips czapy wysadu solnego i poziomu mioceniśko-oligoceniśkiego w jej otoczeniu

Fig. 4. The calibrated hydroisohypse map of the salt dome caprock as well as Miocene and Oligocene aquifer within its surrounding

znacznie większe wartości współczynnika filtracji pionowej od poziomej, co oddaje szczelinowo-krasowy charakter przewodności ośrodka i wymuszony układem hydrodynamicznym dominujący pionowy kierunek przepływu wód. Parametry filtracyjne wybranych utworów uzyskane w wyniku tarowania przedstawia tabela 1.

W obrazie hydrodynamicznym pierwszej warstwy modelu wokół wysadu rozbudował się szeroki lej depresji wynikający z drenażu poziomego przez czapę. Nie ma jednak pomiarowej możliwości weryfikacji jego zasięgu i głębokości. Z kolei w poziomie mioc.-olig. zaznaczyło się zaburzenie regionalnego układu hydrodynamicznego w strefie wokółwysadowej, gdzie czapa wysadu spełnia dla tego poziomu rolę „studni chłonnej” (ryc. 4).

Bilans wód piętra czwartorzędowego jest uproszczony i prawdopodobnie obarczony znacznym błędem, w związku z wcześniej podkreślanym brakiem danych hydrogeologicznych. Z bilansu wynika, że obecnie zasilanie opadowe czapy (wg modelu 125 m³/d) stanowi jedynie 9% całego dopływu wód do czapy. Natomiast z czapy do poziomu mioc.-olig. w warunkach aktualnej eksploatacji spływa 1446 m³/d wody. Przy dwukrotnie większej eksploatacji wszystkich ujęć spływ ten jest nieznacznie większy i wynosi 1480 m³/d. Udział rozcięcia erozyjnego w drenażu czapy uzyskano na poziomie 20% całkowitego spływu.

Przyjmując, że w ciągu doby z czapy do poziomu mioc.-olig. spływa około 1450 m³/d wody, a średnia zawartość w nich jonów Na-Cl wynosi około 20 g/l, w ciągu roku z czapy i lustra solnego wynoszonych jest około 10,5 tys. ton soli, w wyniku czego powstaje pustka o objętości około 5 tys. m³/rok. Wytarowany model hydrodynamiczny posłużył również do opracowania szacunkowej prognozy konwekcyjnej migracji z czapy wód zasolonych w oparciu o program MODPATH. Wody spływające z czapy przemieszczają się będą w poziomie mioc.-olig. stosunkowo

Tabela 1. Parametry filtracyjne wybranych utworów wg modelu numerycznego
Table 1. Filtration parameters of the chosen deposits according to the numeric model

| Warstwa modelu | Utwory | Współczynnik filtracji poziomej [m/d] | Współczynnik filtracji pionowej [m/d] | Współczynnik odsączalności grawitacyjnej |
|----------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| I | nadkład czapy | 0,8 | 1,3 | 0,07 |
| | czapa w strefie wychodni | 0,1 | 1,0 | 0,08 |
| II | czapa | 0,1 | 1,0 | 0,08 |
| | wypełnienie rynny erozyjnej | 0,3 | 0,3 | 0,06 |
| III | miocieńsko-oligoceńskie (1)* | 1,9 | 0,8 | 0,07 |
| | miocieńsko-oligoceńskie (2)* | 5,0 | 2,0 | 0,1 |
| | miocieńsko-oligoceńskie (3)* | 10,0 | 4,0 | 0,12 |
| | miocieńsko-oligoceńskie (4)* | 1,0 | 0,5 | 0,12 |
| | czapa (5)* | 0,15 | 0,4 | 0,06 |
| | wypełnienie rynny erozyjnej (6)* | 0,6 | 0,4 | 0,07 |
| | izolacja czapy (7)* | 0,025 | 0,001 | 0,01 |
| | izolacja czapy (8)* | 0,032 | 0,001 | 0,03 |

* lokalizacja wydzielonych utworów na rycinie 3

wolno (około 17 m/rok) i po około 100 latach (biorąc pod uwagę już ich obecny zasięg) dotrą na odległość około 2 km. Aktualnie nie tworzą one realnego zagrożenia dla istniejących ujęć wód z tego poziomu.

6. Wiarygodność i ograniczenia modelu. Podsumowanie

Na wiarygodność wyników symulacji matematycznej rzutuje zarówno stopień rozpoznania warunków hydrogeologicznych, jak i ograniczenia zastosowanego programu. Spośród czynników hydrogeologicznych zasadnicze znaczenie mają:

- słabe rozpoznanie warunków hydrogeologicznych w utworach czwartorzędowych w szerszym otoczeniu wysadu;
- brak rozpoznania kontaktów hydraulicznych pomiędzy czapą a mezozoicznym otoczeniem. Spływ solanek do utworów mezozoiku odbywać się może lokalnie bezpośrednio z czapy, jak też pośrednio poprzez utwory paleogenu i neogenu.

Wykonany model jest uproszczonym odzwierciedleniem złożonego systemu hydrogeologicznego, w obrębie którego występuje transport mas zarówno konwekcyjny, jak i grawitacyjny (dyferencjacja gęstościowa) związany ze spływami solanek: w obrębie czapy wysadu i poza nią. Dlatego z symulacji numerycznych wyłączono strefy występowania solanek w obrębie deniwelacji lustra solnego i niecki przywysadowej. Program MODFLOW nie uwzględnia gęstości wód i dokonuje obliczeń jak dla wody słodkiej. Dla odzwierciedlenia warunków hydrodynamicznych wód zasolonych w modelu zastosowano zredukowane (względem gęstości cieczy) wysokości hydrauliczne. Występowanie w spągu czapy wysadu i w utworach paleogenu i neogenu wokół czapy wód o dużej gęstości ($> 1,1 \text{ g/cm}^3$), a więc mniej mobilnych, może zasadniczo wpływać na intensywność wymiany wód, w tym na ilość wód spływających z czapy do otoczenia, a w konsekwencji na zasięg strefy drenażu wód w utworach czwartorzędu. Tym samym oznaczać to może, że uzyskane na podstawie modelu wartości spływu wód do otoczenia mogą być przeszacowane.

Wykorzystany program stworzony jest dla ośrodków o charakterze porowym, a nie szczelinowo-krasowym o podwójnej przepuszczalności. Pionowy gradient hydrauliczny obserwowany w czapie wysadu osiągnięto w trakcie modelowania, nadając większe wartości współczynnika filtracji pionowej względem filtracji poziomej. Filtracja poprzez czapę odbywać się może jednak pewnymi uprzywilejowanymi strefami (np. krasowymi), z których symulacji zrezygnowano ze względu na skalę modelu i nie w pełni rozpoznaną lokalizację i geometrię. W wyniku tarowania modelu uzyskano uśrednione parametry filtracyjne dla poszczególnych stref głębokościowych czapy.

Z kolei istniejącą różnicę ciśnień piezometrycznych (około 8 m) pomiędzy kontaktującymi się lateralnie utworami wodonośnymi – czapą wysadu i utworami paleogeńsko-neogeńskimi – rozwiązano ostatecznie, tworząc na pobocznicy czapy dodatkową warstwę o zdecydowanie gorszych parametrach filtracyjnych. Zrezy-

gnowanie w tym przypadku z warunków brzegowych wewnętrznych (I rodzaju) pozwoliło na weryfikację przestrzennej zmienności przepuszczalności strefy kontaktowej czapy z otoczeniem. Nie znana jest jednak miąższość strefy, w obrębie której odbywa się spadek ciśnień piezometrycznych (w skrajnym przypadku – nawet zeskok hydrauliczny). Według modelu strefa ta (o miąższości 25 m) jest tożsama z utworami słabo przepuszczalnymi na obwodzie czapy.

Ograniczenia wynikające z samego programu można zminimalizować, stosując inny program komputerowy (np. FEFLOW – Diersch, 2004). Na bazie takiego programu można będzie zweryfikować uzyskane wyniki bilansu wód czapy przeobrażonej wskutek katastrofy. Ponadto można będzie rozważyć znaczenie i/lub współdziałanie trzech potencjalnych źródeł dla obserwowanej (praktycznie skokowej) różnicy ciśnień piezometrycznych pomiędzy czapą a otoczeniem paleogeńsko-neogeńskim, którymi wydają się: warstwa izolacyjna wokół czapy, różnice parametrów filtracyjnych między czapą a otoczeniem oraz ograniczenie wgłębnego odpływu wód z czapy na skutek zalegania solanek w jej dolnej części i w jej otoczeniu na analogicznej lub większej głębokości.

Przeprowadzone badania modelowe wysadu solnego potwierdziły założenia przyjętego modelu koncepcyjnego. Nie dały one jednak jednoznacznych odpowiedzi w zakresie znaczenia istotnych elementów geologicznych dla systemu krążenia wód podziemnych w rejonie wysadu. Również bilans wód czapy może być obciążony znacznym błędem. Wysady solne są bardzo złożonymi i przestrzennie zmiennymi obiektami hydrogeologicznymi, których nawet przy zastosowaniu daleko posuniętej schematyzacji modelowej nie można wiarygodnie ocenić ilościowo bez szczegółowego rozpoznania hydrogeologicznego i uwzględnienia zmienności hydrodynamicznej oraz hydrochemicznej.

Literatura

- Diersch H.-J.G., 2004. Wasy Software Feflow 5.1 User's Manual. Wasy Inst. Water Resources Planning and System Reserch Ltd. Berlin.
- Górski J., Głazek J., Liszkowski J., Ratajczak R., Rasała M., 2001. Dokumentacja geologiczna badań wpływu zatopionej Kopalni Soli w Wapnie na zasoby wód podziemnych i osiadania powierzchni terenu wraz z opracowaniem modelu krążenia wód i projektem monitoringu, gmina Wapno, powiat wągrowiecki, województwo wielkopolskie. Arch. IG UAM, Poznań.
- Rasała M., 2005a. Przeobrażenia warunków hydrogeologicznych wywołane działalnością górniczą na wysadzie solnym Wapna. Rozprawa doktorska. Arch. IG UAM, Poznań.
- Rasała M., 2005b. Właściwości hydrauliczne masywu czapy gipsowej wysadu solnego Wapna. Mat. Symp. Współczesne problemy hydrogeologii. T. XII, s. 589–595.
- Ratajczak R.M., 2000. Budowa geologiczna i problemy ochrony środowiska wysadu solnego Wapna w Wielkopolsce. Rozprawa doktorska. Arch. IG UAM, Poznań.

