

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE W REJONIE WYSADÓW SOLNYCH I ICH ZNACZENIE DLA BEZPIECZEŃSTWA GOSPODARCZEGO WYKORZYSTANIA STRUKTUR SOLNYCH

HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS IN SALT DOME AREAS AND THEIR SIGNIFICANCE FOR THE SAFETY OF ECONOMIC EXPLOITATION OF SALT STRUCTURES

JÓZEF GÓRSKI¹, MAREK RASAŁA¹

Abstrakt. Przedstawiono wyniki badań hydrogeologicznych pięciu wysadów solnych zlokalizowanych na Kujawach. Stwierdzono, że wysady solne usytuowane są w strefie aktywnej wymiany wód podziemnych i oddziałują na otoczenie. Oddziaływanie to można podzielić na wpływ solanek spływających od strefy lustra solnego oraz wód o niższej mineralizacji migrujących z wyższych partii czap wysadów. Omówiono zagrożenia wodne związane z pozyskiwaniem soli i magazynowaniem mediów w wysadach oraz zasady rozpoznawania warunków hydrogeologicznych i monitoringu wód podziemnych w rejonie tych obiektów.

Słowa kluczowe: wysad solny, czapa wysadu, wody zmineralizowane, solanki, monitoring kopalni soli i magazynu mediów, zagrożenia wodne.

Abstract. The paper presents the results of hydrogeological investigations of five salt domes in the Kujawy region. The salt domes are situated in active groundwater exchange zones and they affect the surrounding environment. This influence includes the effect of brines flowing from the salt mirror zone, and the effect of water of lower mineralization flowing from the upper parts of the caprock. The investigations were the basis for determination of water risks related to salt extraction and media storage, as well as for creating the rules of recognition and monitoring of hydrogeological conditions.

Key words: salt dome, caprock, mineralized waters, brines, monitoring of salt mines and media storage, water risk.

WSTĘP

Wysadowe struktury solne, zarówno w Polsce, jak i na świecie, wykorzystywane są w coraz większym stopniu nie tylko do pozyskiwania soli i solanek, ale również do magazynowania mediów (gaz, produkty naftowe) i składowania odpadów, w tym najbardziej niebezpiecznych odpadów promieniotwórczych. Rozpatruje się również możliwość ich wykorzystania do sekwestracji dwutlenku węgla, a także pozyskiwania energii.

Warunkiem bezpiecznego wykorzystania wysadowych złóż soli jest jednak nie tylko właściwe rozpoznanie geolo-

giczne tych wyjątkowo skomplikowanych struktur geologicznych oraz zastosowanie odpowiednich rozwiązań technicznych, ale również właściwe rozpoznanie warunków hydrogeologicznych. Warunki te rzutują nie tylko na bezpieczne wykorzystanie wysadów, ale mają również bardzo istotny wpływ na skalę zagrożeń środowiska w warunkach sytuacji awaryjnych. Najbardziej spektakularny przykład tego typu sytuacji w Polsce związany był z katastrofalnym zatopieniem głębinowej kopalni soli w Wapnie, co spowodowało poważne skutki środowiskowe (Ślizowski, Kortas, 1981).

¹ Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, ul. Maków Polnych 16, 61-606 Poznań; gorski@amu.edu.pl; mrasala@amu.edu.pl

Zostały zniszczone budynki i infrastruktura techniczna, a także nastąpiły długofalowe zmiany warunków hydrogeologicznych, co z kolei spowodowało zagrożenie jakości wód podziemnych użytkowych poziomów wodonośnych oraz osiadania terenu (Rasała, 2005a; Górski, Rasała, 2008).

Badania podjęte na wysadzie w Wapnie wykazały, że stopień rozpoznania warunków hydrogeologicznych w okresie przed katastrofą był bardzo słaby. Obserwacje hydrogeologiczne sprowadzały się bowiem głównie do analizy przejawów zawodnienia w wyrobiskach kopalni. Istniały tylko wrywkowe informacje o warunkach w nadkładzie czapy i w czapie (głównie z głębienia szybów); brak było natomiast jakichkolwiek informacji o warunkach hydrogeologicznych w otoczeniu wysadu.

Negatywne doświadczenia Wapna oraz rosnące zainteresowanie wysadami solnymi, jako miejscami lokalizowania obiektów strategicznych, spowodowały, że dla niektórych

struktur solnych wykonano hydrogeologiczne otwory obserwacyjne. Dało to możliwość przeprowadzenia rozpoznawczych badań hydrogeologicznych, które objęły pięć wysadów solnych zlokalizowanych na Kujawach: Wapno, Mogilno, Inowrocław, Góra i Damasławek. Wysady te różnią się budową geologiczną, szczególnie stosunkiem do nadkładu i otoczenia, a jednocześnie pozostają w różnym stanie zagospodarowania (nienaruszone, eksploatowane otworowo, magazyny substancji, objęte skutkami katastrofy górniczej). Do badań wykorzystano nie tylko otwory monitoringowe istniejące w rejonie niektórych wysadów (ujmujących z reguły wody czap), lecz także otwory hydrogeologiczne położone w ich otoczeniu, w tym studnie ujęciowe.

W artykule przedstawiono podsumowanie wyników tych kilkuletnich analiz, które zostały zrealizowane w ramach badań własnych, jak i w ramach projektu badawczego MNiSW nr 4 T12B 017 26.

WYNIKI BADAŃ

Wysady solne stanowią obiekty o szczególnie skomplikowanych warunkach hydrogeologicznych, co wynika z:

- dużego zróżnicowania litologicznego i strukturalnego utworów występujących w nadkładzie czap wysadów solnych (brak nadkładu, w nadkładzie tylko otwory czwartorzędu, otwory kenozoiku, otwory kenozoiku i mezozoiku o łącznej miąższości >200 m);

- występowania bardzo skomplikowanych warunków hydrogeologicznych w obrębie czap wysadów (miąższość od 80 do 250 m), zarówno w aspekcie parametrów filtracyjnych, jak i hydrodynamiki i hydrogeochemii;

- zróżnicowanych kontaktów wód występujących w nadkładzie czapy i w czapie z otoczeniem (w otoczeniu otwory kenozoiku, kenozoiku i mezozoiku, tylko mezozoiku);

- występowania wód o dużym zróżnicowaniu zasolenia – od wód słodkich do nasyconych solanek o mineralizacji powyżej 300 g/l (w obrębie czapy oraz w otoczeniu czapy i ciała solnego);

- zróżnicowanego wpływu działalności gospodarczej na warunki hydrogeologiczne (np. eksploatacja, zakład górniczy, hałda).

W przypadku wszystkich badanych wysadów stwierdzono istnienie warunków do zasilania czap wysadów solnych wodami pochodzenia infiltracyjnego, jako efektu zróżnicowania litologicznego i strukturalnego utworów występujących w ich nadkładzie (fig. 1). Warunki zasilania czap są zróżnicowane w zależności od miąższości i litologii utworów występujących w nadkładzie, a także warunków odbioru wód migrujących do głębszych partii czapy przez otaczające otwory. Istotną rolę odgrywa również stopień przeobrażenia warunków hydrogeologicznych w wyniku działalności gospodarczej na wysadach, zarówno górniczej, jak i powierzchniowej.

Na wysadzie Wapna występują lokalnie warunki do bezpośredniego zasilania czapy wodami opadowymi w strefie

wychodni utworów czapy na terenie wyrobiska po eksploatacji gipsów, tzw. gipsiaka. Podobne warunki mogą istnieć również na terenie wysadu w Inowrocławiu.

Badania czap wysadów solnych wykazały, że cechują się one porowatością kawernowo-szczelinową (Rasała, 2005b). Rejestruje się również formy krasowo-subrozcyjne i rozcięcia erozyjne utworów czapy wypełnione utworami piaszczystymi, sięgające lokalnie aż do lustra solnego (Góra, Wapno). Badania przepuszczalności metodą Paramex (Marciniak, 1999) czap wysadów Wapno, Góra i Mogilno wykazały zmienność współczynnika filtracji w szerokim zakresie, od 10^{-6} do 10^{-3} m/s. W strefach dobrze rozwiniętych systemów krasowych uzyskano współczynniki filtracji przekraczające 10^{-3} m/s, zaś w strefach o przepuszczalności mikroszczelinowej – 10^{-6} m/s. Należy dodać, że badania metodą Paramex pozwoliły na rozdzielenie w niektórych otworach przepuszczalności kanałowej i szczelinowej, w tym makro- i mikroszczelinowej (Marciniak i in., 2003).

W czapach wysadów solnych Wapno, Mogilno i Góra stwierdzono warunki hydrodynamiczne odzwierciedlające naturalny przepływ wód z górnych partii czapy w kierunku lustra solnego i jednocześnie sływ ku częściom brzeżnym. Czapy tych wysadów, a także wysadu Inowrocław, są w pełni zawodnione i łącznie z występującym ponad nimi nadkładem tworzą lokalne strefy zasilania wód podziemnych. Odmiennie warunki stwierdzono jedynie w przypadku czapy wysadu Damasławek, cechującej się głębszym zaleganiem i największą miąższością. W czapie tej stwierdzono jedynie lokalne zawodnienie, głównie w partiach stropowych, a także silne związki zawodnienia z rozpoznаныmi geofizycznie strefami dyslokacyjnymi (Krzywiec i in., 2000). W czapach wysadów poddanych działalności górniczej intensywność wymiany wód uległa istotnemu zwiększeniu. Dotyczy to w szczególności wysadu Wapna, gdzie główny wpływ na to zjawisko miało katastrofalne zatopienie kopalni. W obrębie

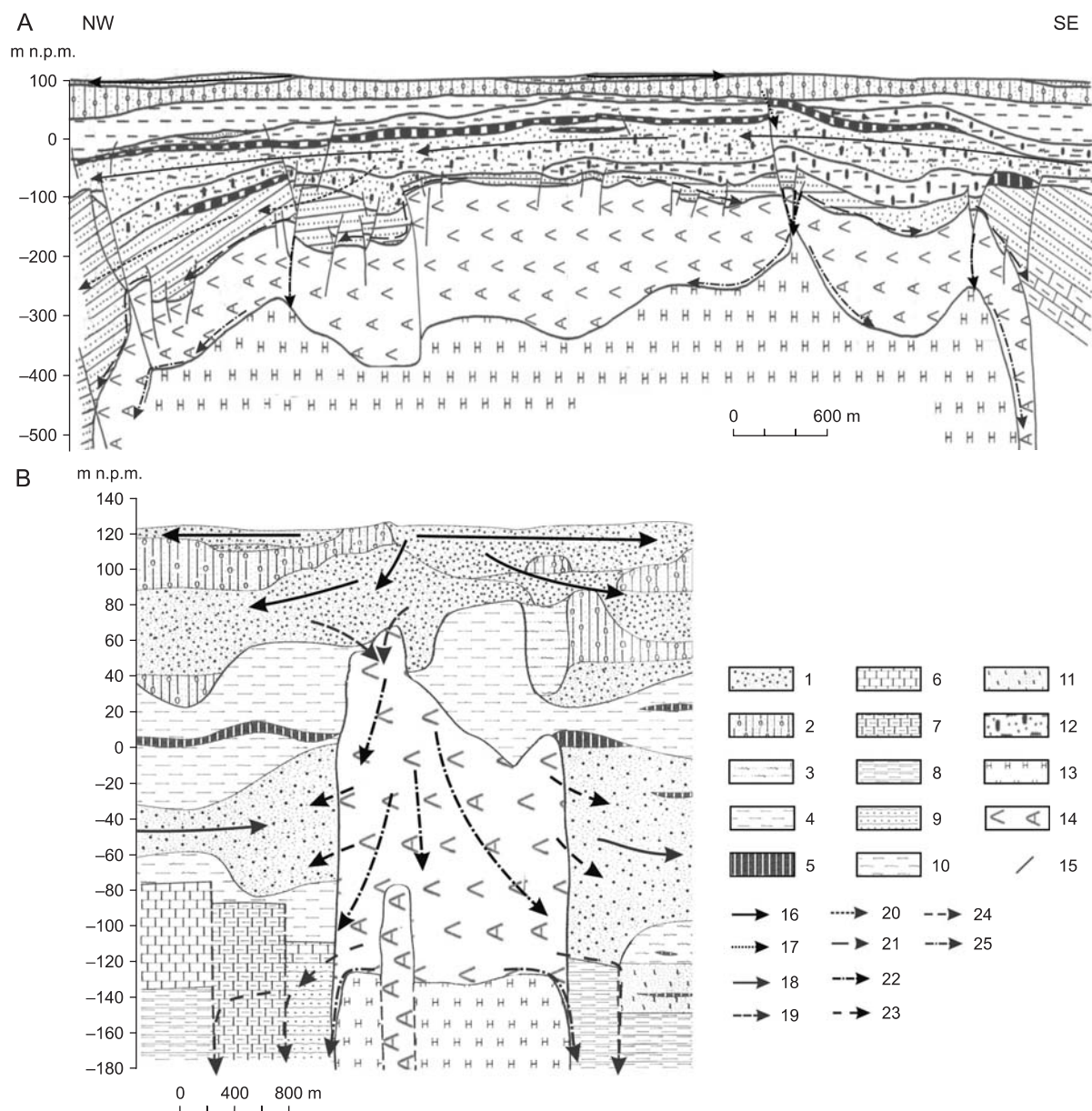


Fig. 1. Konceptyjne systemy przepływu wód podziemnych w rejonie wysadów Damasławek (A) i Mogilno (B)

1 – piaski i żwiry, 2 – gliny lodowcowe, 3 – mułki, 4 – iły, 5 – węgiel brunatny, 6 – wapienie, 7 – margle, 8 – ilowce, 9 – piaskowce, 10 – mułowce, 11 – dolomity, 12 – piaski glaukonitowe, 13 – sól kamienna, 14 – gipsy i anhydryty czap wysadów, 15 – uskoki, 16 – przepływ wód w utworach czwartorzędowych, 17 – lokalne zasilanie poziomu mioceno-oligocenońskiego w nadkładzie czapy, 18 – przepływ wód poziomu mioceno-oligocenońskiego, 19 – zasilanie czapy, 20 – przypuszczany przepływ wód w utworach górnej kredy w nadkładzie czapy, 21 – przepływ wód w stropowej partii czapy, 22 – przepływ wód w czapach, 23 – prawdopodobny, ograniczony spływ wód z czapy do regionalnego poziomu mioceno-oligocenońskiego, 24 – spływ wód z czapy do utworów mezozoicznych, 25 – przepływ solanek

Conceptual systems of underground water circulation in the salt dome areas: Damasławek (A) and Mogilno (B)

1 – sands and gravels, 2 – glacial clays, 3 – silts, 4 – argils, 5 – lignites, 6 – limestones, 7 – marls, 8 – clay shales, 9 – sandstones, 10 – mudstones, 11 – dolomites, 12 – glauconitic sands, 13 – rock salt, 14 – gypsum and anhydrites of the domes' caprocks, 15 – faults, 16 – water flows in Quaternary deposits, 17 – local recharge of the Miocene-Oligocene aquifer in the caprock's cover, 18 – water flows in the Miocene-Oligocene aquifer, 19 – caprock recharge, 20 – probable water flow in Upper Cretaceous deposits in the caprock cover, 21 – water flows in the top of the caprock, 22 – water flows in the caprock, 23 – probable, limited water inflow from the caprock to the regional Miocene-Oligocene aquifer, 24 – water flow from the caprock to Mesozoic deposits, 25 – flow of brines

wszystkich analizowanych czap solnych zaznacza się zbliżony układ warunków hydrogeochemicznych, określony litologią ośrodka, a modyfikowany przez warunki zasilania i odpływu wód z czapy. Chemizm wód z górnych partii czap determinowany jest głównie rozpuszczaniem gipsów

z niewielkim udziałem soli chlorkowych, przy pełnym nasyceniu w zakresie jonów SO_4 i Ca. Mineralizacja tych wód wynosi około 4 g/l i wzrasta w głąb czap do 35–40 g/l, przy zmieniającym się typie wód z $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Cl-Ca-Na}$ na $\text{Cl-SO}_4\text{-Na-Ca}$. W spągowych partiach czap, o miąższości

nieprzekraczającej kilkunastu metrów, w wyniku ługowania soli z lustra solnego tworzą się solanki typu Cl–Na, o mineralizacji ogólnej mogącej osiągać stan nasycenia (>300 g/l). Występowanie takich wód stwierdzono w dolnej partii czapy wysadu Góra.

Wody występujące w czapach mogą spływać do otaczających poziomów wodonośnych, przy czym można wyróżnić: spływ wód z górnych i środkowych partii czapy niekontaktujących się ze strefą lustra solnego oraz spływ wód z subrozji lustra solnego. Spływ wód z subrozji lustra solnego do otaczającego poziomu wodonośnego został jednoznacznie stwierdzony jedynie w przypadku wysadu Wapno, gdzie w otworze położonym w odległości około 50 m od granicy wysadu, w dolnych partiach poziomu mioceńsko-oligocenińskiego wykryto solankę o stężeniu 304 g/l. Badania izotopowe tej solanki wykazały, że powstała ona przed 1954 r. (brak trytu). „Wiek” radiowęglowy wskazuje, że jest to woda holocenińska, co potwierdza również skład izotopów stabilnych. Solanki, lecz o zróżnicowanym stopniu zasolenia, stwierdzono także w głębokich otworach w rejonie wysadów Mogilno, Damasławek i Góra. Ich geneza może być zarówno związana z migracją wód z subrozji lustra solnego, jak i z ługowaniem soli z głębszych partii diapiru solnego. Spływ wód z partii czapy niekontaktujących się ze strefą lustra solnego rozpoznano w rejonie wysadów Wapno, Góra i Inowrocław. Brak danych potwierdzających to zjawisko na wysadzie Mogilno.

W przypadku wysadów Góra i Inowrocław zaznacza się wpływ wód z czapy zarówno na poziomy czwartorzędowe, jak i na poziom w utworach mioceńsko-oligocenijskich oraz kredowych za pośrednictwem przywysadowych utworów jury. Stopień oddziaływania na chemizm wód jest tu jednak bardzo zróżnicowany przestrzennie, co wynika z litologii

utworów mezozoiku oraz warunków infiltracyjnego zasilania poziomów wodonośnych. W związku z tym w studniach otaczających te wysady obserwuje się zarówno wody słodkie, jak i o wyraźnie podwyższonej mineralizacji (do 3 g/l). Również w rejonie wysadu Wapno, lecz w trakcie badań bezpośrednio po katastrofie kopalni soli, zarejestrowano w poziomie mioceńsko-oligocenijskim aureolę wód wokół czapy o zasoleniu 3 g/l. W wyniku katastrofy nastąpiło strefowe udroźnienie kontaktu między dolną partią czapy a tym poziomem, co skutkuje aktualnym zasoleniem wód w tym poziomie w granicach 10–35 g/l.

Podsumowując wyniki rozpoznania warunków hydrogeologicznych w rejonie analizowanych wysadów należy stwierdzić, że są to obiekty oddziałujące aktywnie na otoczenie. Oddziaływanie to, w świetle wyników badań na wysadzie Wapno, należy jednak rozdzielić na oddziaływanie solanek spływających ze strefy lustra solnego oraz wód o podwyższonym zasoleniu z czapy, z partii niekontaktujących się ze strefą lustra. Największe zagrożenie stanowią solanki z lustra solnego, które najprawdopodobniej występują nie tylko przy wysadzie w Wapnie, gdzie potwierdzone zostało to jednym otworem badawczym, ale również wokół innych analizowanych wysadów. Problem ten wymaga niewątpliwie szczegółowego rozpoznania. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że w spągowych partiach użytkowych poziomów wodonośnych, w tym zwłaszcza poziomu mioceńsko-oligocenijskiego, w rejonach wysadów występują bardzo stężone solanki. Należy dodać, że występowanie silnie stężonych solanek z subrozji lustra solnego wykazały również szeroko zakrojone badania na wysadzie Gorleben (Klinge i in., 2000), a także badania wysadów w Stanach Zjednoczonych w rejonie Zatoki Meksykańskiej.

ZAGROŻENIA WODNE EKSPLOATOWANYCH WYSADÓW SOLNYCH

Na podstawie badań wysadów solnych, a także uwzględniając dane literaturowe należy stwierdzić, że stan rozpoznania i monitoringu warunków hydrogeologicznych wysadów jest w większości niewystarczający dla zapewnienia bezpieczeństwa ich gospodarczego wykorzystania. Dotyczy to zarówno kopalń głębinowych, jak i otworowych, powiązanych z magazynowaniem substancji. Dotychczas problem ten był analizowany głównie pod kątem zagrożeń wodnych podczas eksploatacji soli. W przypadku kopalń głębinowych sprawdzało się to przede wszystkim do obserwacji przejawów zawodnienia w wyrobiskach: wydatek i czas trwania, skład chemiczny i izotopowy wycieków i jego zmiany (Zuber i in., 1979; 2000; Ślizowski, 1980; Wilk, 1980; Wilk, Kulma, red., 2004). Podejście takie okazało się niewystarczające dla zapobieżenia katastrofalnemu zatopieniu kopalni w Wapnie.

Istotne zagrożenia środowiskowe istnieją jednak również przy eksploatacji otworowej złóż soli oraz wykorzystywaniu wysadów do magazynowania mediów. W tym ostatnim

przypadku pojawia się nowe zagrożenie: możliwość przedostawania się niebezpiecznych substancji (np. węglowodórów) do środowiska hydrogeologicznego, co zdarzyło się już w przypadku wysadów w rejonie Zatoki Meksykańskiej. Przy otworowej eksploatacji soli nie można bezpośrednio badać wód w wyrobiskach. Jednocześnie do dziś nie opracowano kryteriów oceny zagrożenia wodnego dla otworowych kopalń soli, składowisk odpadów i magazynów w wysadowych złożach soli. Dlatego na kanwie przeprowadzonych badań zdefiniowano czynniki mające wpływ na ocenę zagrożenia wodnego eksploatowanych otworowo złóż soli i magazynowania w tych wyrobiskach mediów.

Zagrożenia wodne górotworów solnych eksploatowanych i wykorzystywanych otworowo są trudne do rozpoznania. Ich istotę stanowi możliwość zaistnienia połączeń wód okołozłożowych z płynami zgromadzonymi w komorach kopalni czy magazynu. Zjawisko to może być efektem penetracji ciała solnego przez wody zewnętrzne w kierunku komór,

jak i płynów z komór na zewnątrz. Jeśli wyrobiska są wypełnione, pierwszy proces – z racji wysycenia migrującej cieczy i braku odbiornika wewnątrz złoża – jest zdecydowanie wolniejszy i można założyć, że ma ograniczony zasięg i dotyczy głównie soli potasowo-magnezowych. W rdzeniach wiertniczych z wysadu solnego Gorleben zaobserwowano strefy wypłukiwania soli K–Mg, sięgające do głębokości 90–130 m. Głębokość ta może ulec jednak zmianie, jeśli filary poddane są silnym odkształceniom kruchym (rozwój szczelin, obwały itp.). Może również zaistnieć połączenie hydrauliczne (w obrębie filarów) migrujących oddolnie i odgórnie obu płynów. Taki mechanizm procesu uznaje się za najbardziej prawdopodobny. W przypadku magazynowania gazów (wyższe ciśnienie od hydrostatycznego w otoczeniu) wdarcie się wód zewnętrznych do komór może nastąpić po zmniejszeniu się w wyniku sukcesywnych ucieczek ciśnień magazynowych lub w wyniku gwałtownego uwolnienia się gazów do otoczenia.

Czynniki istotne dla oceny zagrożenia wodnego można usystematyzować jako: geologiczne, hydrogeologiczne, eksploatacyjne i inne:

Czynniki geologiczne – rozpoznanie budowy geologicznej złoża i jego otoczenia warunkuje bezpieczną eksploatację górotworu: zachowanie filarów bezpieczeństwa, unikanie eksploatacji stref z dużymi wystąpieniami soli K–Mg, soli Z3 i Z4 oraz rejonów stref tektonicznych i intensywnej tektoniki solnej, co rzutuje na stabilność wyrobisk. Szczególnie należy uwzględnić:

- stopień rozpoznania cech geometryczno-tektonicznych złoża: granice, tektonika wewnętrzna, zwłaszcza wystąpienia skał „wodonośnych” w ciele solnym;

- stopień rozpoznania budowy geologicznej i tektoniki otoczenia złoża;

- wykształcenie litologiczne czap, decydujące m.in. o ich stopniu zawodnienia i parametrach filtracyjnych, jak również obecność w nich stref dyslokacyjnych oraz głębokich form krasowo-subrozoyjnych, często wypełnionych materiałem piaszczystym.

Czynniki hydrogeologiczne – rozpoznanie warunków hydrogeologicznych w rejonie złoża to wskazanie źródeł zagrożenia wodnego, ocena stopnia zagrożenia i wskazanie racjonalnych metod przeciwdziałania tym zagrożeniom. Za najistotniejsze uznaje się:

- stopień rozpoznania poziomów wodonośnych w nadkładzie złoża i w czapie oraz kontaktów hydraulicznych pomiędzy nimi oraz wodami powierzchniowymi;

- stopień rozpoznania poziomów wodonośnych w otoczeniu złoża i kontaktów hydraulicznych pomiędzy czapą a otoczeniem oraz ciałem solnym a otoczeniem;

- przepuszczalność i stopień zawodnienia czapy i jej nadkładu;

- tempo wymiany wód w systemie przepływu nadkład–czapa–otoczenie, tempo ługowania skał siarczanych i salinarnych;

- stopień rozbudowy monitoringu hydrogeologicznego złoża.

Czynniki eksploatacyjne – sposób eksploatacji lub magazynowania mediów, geomechanika górotworu, monitoring geometrii wyrobisk to elementy rzutujące na stopień zagrożenia wodnego kopalni i magazynu. Spośród tych czynników najważniejsze to:

- geometria filarów ochronnych: półki stropowej, filarów brzeżnych, filarów międzykomorowych;

- system eksploatacji soli (rodzaj wypełnienia przestrzeni eksploatacyjnych, zakres ciśnień eksploatacyjnych, stosowanie zabezpieczeń eksploatacyjnych);

- system magazynowania (ciśnienie magazynowe, wiek komór magazynowych);

- geomechanika złoża (czas eksploatacji/magazynowania, rodzaj i rozkład osiadań powierzchni, kształt i konwergencja wyrobisk);

- wyniki monitoringu złoża (pomiarów echosondowe wyrobisk, pomiarów ciśnień płynów w przerwach eksploatacyjnych oraz podczas magazynowania i eksploatacji, pomiarów konwergencji komór podczas spoczynku, badania hydrochemiczne uzyskiwanych solanek podczas eksploatacji, pomiarów geodezyjne).

W ocenie zagrożenia wodnego górotworu należy uwzględnić również liczbę i stan otworów wiertniczych z potencjalnymi i realnymi wadami konstrukcyjnymi (zła likwidacja, cementacja rur, szczelność rur), które mogą stanowić drogi migracji wody i mediów. Zagrożenia wiążą się również z ewentualnymi błędami eksploatacyjnymi – przeekspluowanie komór w niektórych interwałach, przekroczenie ciśnień technologicznych, brak reakcji na niekorzystne zmiany ciśnień na głowicach otworów itp.

SKUTKI SYTUACJI AWARYJNYCH ORAZ ZNACZENIE ROZPOZNANIA I MONITORINGU WÓD PODZIEMNYCH

Powstanie połączenia hydraulicznego pomiędzy komorą eksploatacyjną a otoczeniem będzie prowadzić (ze względu na wyższe ciśnienia hydrostatyczne w obrębie komór) do przepływu wód i mediów na zewnątrz górotworu. Procesowi temu może towarzyszyć wymuszony rozwój dróg tranzytowych w filarze ochronnym. W warunkach ługowania migrującym płynem będzie ciecz o niepełnym nasyceniu. Z kolei rozszczelnieniu i ucieczce magazynowanych mediów

(o mniejszym ciężarze właściwym od wód otoczenia) towarzyszyć będzie napływ do komory wód z otoczenia (rozwój strefy połączenia).

Rozszczelnienie się komory ługowniczej i związany z nim wypływ wody do otoczenia, z racji występowania w otoczeniu złoża, w strefie lustra solnego i wokół słupa solnego, solanek już w warunkach naturalnych, nie spowoduje istotnych skutków środowiskowych. Jednak w skrajnym przypadku

wpływ cieczy z komory może doprowadzić do powstania znacznej pustki w filarze ochronnym. Pustka taka może naruszyć statykę filaru oraz skał otaczających i nastąpi grawitacyjne przetransportowanie do komory skał z otoczenia (zarówno przez filar stropowy, jak i boczny) i w efekcie w rejonie tej strefy nastąpi rozwój deformacji ciągłych i nieciągłych powierzchni. Jednocześnie zapadowy ruch gruntów przyczyni się do poprawy kontaktów hydraulicznych między poziomami wodonośnymi w czapie i jej nadkładzie oraz w otoczeniu wysadu (mechanizm samonapędzający się). Powstanie wówczas uprzywilejowana strefa wymiany wód podziemnych, która przyczyni się do intensywnego, powierzchniowego ługowania soli i przestrzennego ługowania czapy. Doprowadzi to do wzrostu mineralizacji wód w otoczeniu. Będą to skutki w zasadzie nieodwracalne, a sam proces może nasilać się w czasie.

Jeszcze poważniejsze skutki geośrodowiskowe wystąpią w przypadku uwolnienia się z komory/komór znacznych ilości magazynowanych substancji, szczególnie ropopochodnych. Substancje ropopochodne z powodu mniejszej gęstości będą migrowały ku czapie, a następnie poprzez czapę ku powierzchni. Bez uruchomienia natychmiastowych środków zaradczych w postaci sieci otworów do odpompowywania wody z ropą z czapy, dojdzie do skażenia środowiska o rozmiarach trudnych do przewidzenia (katastrofa ekologiczna). Z kolei przy gwałtownym rozszczelnieniu komory magazynowej gazu (np. jako efekt zbyt wysokich ciśnień magazynowych) może dojść do nagromadzenia się gazu w czapie i w jej przepuszczalnym nadkładzie (pułapki hydrostrukturalne). W takiej sytuacji wody wcześniej występujące w czapie odpłyną w kierunku mniejszych ciśnień (otoczenie) oraz do komory przez rozszczelnioną półkę stropową. Gaz gromadzący się w czapie będzie pod coraz wyższym ciśnieniem i w efekcie może nawet nastąpić gwałtowna erupcja gazu z wodą na powierzchni. Jeśli nadkład czapy będzie przepuszczalny, uwalniany z komory gaz może uciekać na znacznym obszarze. Wtórne zalanie czapy będzie skutkowało poprawą parametrów filtracyjnych jej utworów, a przy gwałtownych erupcjach gazu, w wyniku wymuszonego przepływu wód, mogą wystąpić deformacje nieciągłe terenu.

Poza danymi eksploatacyjnymi zaistnienie podobnych procesów można zidentyfikować poprzez monitoring warunków hydrogeologicznych w otoczeniu kopalni/magazynu na podstawie rozbudowanej sieci otworów obserwacyjnych. Wskaźnikami takich awaryjnych procesów będą:

– istotne zmiany ciśnień piezometrycznych w poziomach otaczających złoża;

– zmiany chemizmu wód poziomów otaczających złoża, w tym pojawienie się magazynowanych substancji.

Skutki ewentualnych katastrof magazynów (ekonomiczne, gospodarcze i środowiskowe) są nieporównywalne z kosztami niezbędnych badań, w tym hydrogeologicznych. Właściwie zaprojektowany i prowadzony monitoring hydrogeologiczny otoczenia złoża może dać ważne informacje dla racjonalnej eksploatacji złoża. W sytuacjach kryzysowych środkiem zaradczym może być wyłączenie z użytkowania na przykład jednej komory magazynowej i wypełnienie jej nasyconą solanką. Rozpoznanie wymienionych elementów hydrogeologicznych może pozwolić jednocześnie (w tym na podstawie badań modelowych) na prognozę przebiegu sytuacji awaryjnej i prognozę jej skutków.

W literaturze znaleźć można wiele przykładów sytuacji awaryjnych związanych z zagrożeniem wodnym wysadowych i pokładowych złóż soli. W Polsce dotyczą one m.in. kopalń w Wieliczce, Łęzkowicach, Kłodawie i Wapnie. Najbardziej spektakularnym przykładem jest awaryjne zatopienie kopalni soli w Wapnie w 1977 r. W wyniku rozszczelnienia półki stropowej nastąpiło gwałtowne wdarcie się wód do wyrobisk kopalni, co wywołało odwodnienie czapy i jej nadkładu, czemu towarzyszyły zapadliska ponad wysadem. Wymuszony drenaż do górotworu objął również poziom mioceńsko-oligoceński, występujący w otoczeniu czapy wysadu. W warunkach bardzo dużych spadków hydraulicznych nastąpiło strefowe udrożnienie kontaktu pomiędzy czapą a poziomem mioceńsko-oligoceńskim, co spowodowało przepływ wody wraz materiałem skalnym i doprowadziło do rozwoju wielkoskalowych deformacji nieciągłych terenu.

W wyniku katastrofального zatopienia kopalni soli w Wapnie nastąpiło głębokie przemodelowanie warunków hydrogeologicznych. Strefowe udrożnienie kontaktu pomiędzy czapą a poziomem mioceńsko-oligoceńskim spowodowało wytworzenie się warunków do drenażu wód z poziomów czwartorzędowych otaczających czapę do poziomu mioceńsko-oligoceńskiego poprzez czapę. To z kolei wywołało szybsze ługowanie gipsów i subrozję lustra solnego i stało się przyczyną rozwoju deformacji ciągłych powierzchni oraz podwyższenia zasolenia wód w otoczeniu (Rasała, 2005a). Podobna sytuacja, lecz w mniejszej skali, może mieć miejsce w rejonie wysadu Inowrocław, gdzie na początku XX w. doszło do zalania wyrobisk zlokalizowanych w czapie i na kontakcie z lustrem solnym. Słaby stopień rozpoznania hydrogeologicznego tego wysadu nie pozwala jednak na udowodnienie tej hipotezy.

WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania wybranych wysadów solnych pozwoliły nie tylko na określenie systemu krążenia wód podziemnych w ich rejonie, co ma duże znaczenie poznawcze, lecz również wskazały, że warunkiem bezpiecznej eksploatacji otworowej złóż soli i funkcjonowania magazynów

medków jest właściwe rozpoznanie warunków hydrogeologicznych, którego celem powinno być określenie:

– parametrów hydrogeologicznych, warunków hydrodynamicznych i hydrogeochemicznych poziomów wodonośnych wokół czapy i ciała solnego oraz w obrębie czapy;

– relacji hydraulicznych pomiędzy głównymi poziomami wodonośnymi;

– systemów przepływu wód w otoczeniu ciała solnego i czapy oraz tempa wymiany wód;

– zagrożeń, jakie stanowią wody podziemne dla kopalni i/lub magazynu;

– zakresu niezbędnego monitoringu hydrogeologicznego obiektu.

2. Rozpoznanie hydrogeologiczne eksploatowanych wysadów powinno objąć poziomy wodonośne w nadkładzie czapy wysadu, spągowe i stropowe partie czapy, a także poziomy wodonośne w otoczeniu wysadu, z uwzględnieniem zróżnicowania głębokościowego (nadkład, czapa, w tym w szczególności strefa lustra solnego).

3. Podsumowaniem rozpoznania warunków hydrogeologicznych w rejonie wysadu powinien być model matematyczny, pozwalający na ilościowe określenie intensywności wymiany wód w rejonie wysadu.

4. Wykonane otwory na etapie rozpoznania warunków hydrogeologicznych powinny być wykorzystane do monito-

ringu zmian tych warunków podczas eksploatacji kopalni i/lub magazynu. Monitoring hydrogeologiczny powinien być elementem zintegrowanego monitoringu obiektu i otaczającego środowiska, obejmującego również monitoring parametrów eksploatacyjnych (geometria komór, ciśnień, składu chemicznego uzyskiwanych solanek i magazynowanych substancji) oraz pomiarów geodezyjnych terenu.

5. Monitoring hydrogeologiczny powinien umożliwić identyfikację niekorzystnych zjawisk hydrogeologicznych pośrednio i bezpośrednio zagrażających kopalni (czy magazynowi mediów), takich jak np. rozszczelnienie filaru stropowego lub brzeźnego i wypływ cieczy z komór czy wzrost tempa wymiany wód w czapie i w strefie lustra solnego.

Biorąc pod uwagę aktualny stopień rozpoznania warunków hydrogeologicznych eksploatowanych wysadów solnych oraz zakres prowadzonego monitoringu hydrogeologicznego należy stwierdzić, że istnieje pilna potrzeba wypracowania właściwej metodyki badań rozpoznawczych i monitoringu warunków hydrogeologicznych wysadów solnych.

LITERATURA

- GÓRSKI J., RASAŁA M., 2008 – Hydrogeologia wybranych wysadów solnych regionu kujawskiego – aspekty poznawcze i użytkowe. *Geologos*, **13**, *Monographiae UAM*, **5**. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań.
- KLINGE H., RÜBEL A., SUCKOW A., BEUSHAUSEN M., 2000 – Isotope hydrological studies on the salt water flow above the Gorleben salt dome. *Proc. SWIM 16*: 95–101. Międzyzdroje–Wolin.
- KRZYWIEC P., JAROSIŃSKI M., TWAROGOWSKI J. i in., 2000 – Geofizyczno-geologiczne badania stropu i nadkładu wysadu solnego „Damasławek”. *Prz. Geol.*, **48**, 11: 1005–1014.
- MARCINIAK M., 1999 – Identyfikacja parametrów hydrogeologicznych na podstawie skokowej zmiany potencjału hydraulicznego. Metoda PARAMEX. Wyd. Nauk. UAM, Poznań.
- MARCINIAK M., GÓRSKI J., RASAŁA M., 2003 – Badanie współczynnika filtracji ośrodków szczelinowych o podwójnej przepuszczalności hydraulicznej w rejonie wysadu w Wapnie. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 11, cz. 2: 395–402. Gdańsk.
- RASAŁA M., 2005a – Przeobrażenia warunków hydrogeologicznych wywołane działalnością górniczą na wysadzie solnym Wapna. Rozprawa doktorska. Arch. IG UAM, Poznań.
- RASAŁA M., 2005b – Własności hydrauliczne masywu czapy gipsowej wysadu solnego Wapna. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 12: 589–595. UMK, Toruń.
- ŚLIZOWSKI K., 1980 – Zagrożenie wodne w kopalniach soli. *Zesz. Nauk. AGH, Górnictwo*, **814**.
- ŚLIZOWSKI K., KORTAS G., 1981 – Zagrożenie powierzchni spowodowane eksploatacją wysadów solnych na przykładzie Kopalni Soli im. T. Kościuszki w Wapnie. *Ochr. Ter. Górn.*, **51**: 33–40.
- WILK J., 1980 – Hydrogeologiczne przyczyny powstawania szkód górniczych w rejonach wysadów solnych. *Ochr. Ter. Górn.*, **51**: 41–45.
- WILK Z., KULMA R. (red.), 2004 – Hydrogeologia polskich złóż kopalni i problemy wodne górnictwa. AGH, Kraków.
- ZUBER A., GRABCZAK J., GARLICKI A., 2000 – Catastrophic and dangerous inflows to salt mines in Poland as related to the origin of water determined by isotope methods. *Environ. Geol.*, **39**: 299–311.
- ZUBER A., GRABCZAK J., KOLONKO M., 1979 – Environmental and artificial tracers for investigating leakages into salt mines. *Isotope Hydrology*, **1**: 45–63.

SUMMARY

The research showed that the salt domes are characterized by very complicated hydrogeological conditions resulting particularly from:

– lithological and structural differentiation of the sediments overlaying the cap rocks;

– occurrence of very complicated hydrogeological conditions within the salt domes, concerning filtration parameters, hydrodynamics and hydrogeochemistry;

– different ways of hydraulic contact with the surroundings, occurring within and above the cap rocks;

– occurrence of variable salinity water – from fresh water to brines (>300 g/l);

– different effects of human activities on the hydrogeological conditions (i.e. exploitation, mining, slag heap).

It was found that all of the salt domes are recharged by infiltration. The infiltration conditions of the caprock vary, depending on the thickness and lithology of the overlying sediments as well as migration conditions to the deeper parts of the caprock through the surrounding sediments. Research on the cap rocks showed that they have void-fissure porosity. There are also erosional incisions within the caprock filled with sandy deposits reaching down to the salt mirror.

Research on the permeability performed by means of the Paramex method in the Wapno, Góra and Mogilno salt domes revealed that hydraulic conductivity changes within a wide range of 10^{-6} to 10^{-3} m/s. Hydraulic conductivity in zones of well-developed karst systems exceeds 10^{-3} m/s. Permeability of microfissure zones reaches the values of 10^{-6} m/s.

The hydrodynamic conditions within the Wapno, Mogilno and Góra salt domes reflect the natural groundwater flow from the upper parts of caprock towards the salt mirror and simultaneously towards the edges. The cap rocks of these salt domes (also in the Inowrocław salt dome) are entirely saturated and form, together with the overlying layers, local groundwater recharge zones. Different conditions were found only in the case of the in Damasławek salt dome caprock, which is located deeper and is thicker than the other ones. Only the upper parts of the caprock and its dislocation zones are saturated.

The hydrogeochemical systems within the caprocks are similar, determined by the lithology and modified by the recharge and outflow conditions. The groundwater chemistry in the upper parts of the caprocks is determined mainly by dissolution of gypsum (and to a smaller degree also by sodium chloride) with the full saturation of SO_4^{2-} and Ca^{2+} ions. The water mineralization is approximately 4 g/l and increases deeper into the caprock, reaching 35–40 g/l, with the water type changing to Cl– SO_4 –Na–Ca. In the bottom part of the caprocks, where their thickness does not exceed a few metres, Cl–Na water type occurs with the mineralization above 300 g/l as a result of salt mirror leaching.

Water can flow towards the surrounding aquifers within the caprocks. There are groundwater flows from the upper and middle parts of the caprocks without any contact with the salt mirror, and from the salt mirror subsidence. The flow from the salt mirror subsidence to the surrounding aquifers was found only in the Wapno salt dome area, where the brine of 304 g/l concentration was observed in a borehole tapping the bottom part of the Miocene-Oligocene aquifer. In case of the Góra and Damasławek salt domes, the influence of caprock's water on the Quaternary, Miocene-Oligocene and Cretaceous (through the Jurassic sediments occurring by the salt dome) aquifers was observed.

In the paper presents the recommendations concerning the rules of hydrogeological recognition and monitoring of the solution mining and salt domes used for media storage.