

Ludwik Zawisza\*, Jan Macuda\*

## OCENA SZCZELNOŚCI STRUKTUR GEOLOGICZNYCH PRZEZNACZONYCH DO SKŁADOWANIA ODPADÓW PŁYNNYCH W GÓROTWORZE\*\*

### 1. WSTĘP

Do określania szczelności warstw nadległych obszaru składowania odpadów płynnych w strukturach geologicznych stosuje się metody:

- geofizyczne,
- hydrodynamiczne,
- hydrochemiczne w połączeniu z metodami hydrodynamicznymi,
- geochemiczne,
- wiertnicze.

### 2. METODY GEOFIZYCZNE

Zmiany szczelności górotworu w otoczeniu wglębnej struktury geologicznej, w której składowane są odpady płynne, mogą być wywołane niejednorodnością w budowie geologicznej oraz zmianami w tym ośrodku na skutek osiadania nadkładu lub zmianami ciśnienia w strukturze.

Metody geofizyczne mogą być wykorzystane zarówno do rozpoznania budowy geologicznej górotworu, która może wpływać na szczelność składowiska odpadów, jak i do oceny tych zmian własności hydraulicznych ośrodka skalnego, które są skutkiem istnienia naprężeń i które mogą spowodować zmiany szczelności w strefie przylegającej do magazynu. Metody sejsmiczne i geoelektryczne wydają się do tego celu szczególnie przydatne [1, 7].

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\* Praca wykonana w ramach badań statutowych Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w 2006 r.

### 3. METODY HYDRODYNAMICZNE

Metody hydrodynamiczne testowania szczelności nadkładu struktury geologicznej, w której składowane są odpady płynne, stanowią jedną z najbardziej wiarygodnych metod i zwykle dostarczają informacji o zasięgu wynikającym z geometrycznego rozmieszczenia otworów zatłaczających i obserwacyjnych [1, 7].

W zakresie testowania nadkładu struktur, w których składowane są odpady płynne, wyróżnia się dwie klasy testów hydrodynamicznych:

- 1) test interferencyjny,
- 2) test pulsacyjno-interferencyjny.

Testy te polegają na pomiarze zmian ciśnienia w otworze obserwacyjnym oddalonym o kilkadziesiąt metrów od otworu zatłaczającego (eksploatacyjnego) generującego sygnał hydrodynamiczny w warstwie wodonośnej. Zasadnicza różnica pomiędzy wymienionymi dwoma testami polega na wykorzystaniu kształtu sygnału w trakcie wykonywania i interpretacji testu pulsacyjnego w identyfikacji komunikacji pomiędzy dwoma odwiertami.

Interpretacja testu pulsacyjno-interferencyjnego nie jest zagadnieniem prostym. Informacje zbierane są zwykle z dwóch przyrządów; mogą one niekiedy być zakłócone szumem przyrządów o wielkości porównywalnej (w przypadku szczególnym) do wielkości oczekiwanego sygnału. Właściwe przefiltrowanie sygnału jest warunkiem koniecznym do przeprowadzenia dalszej analizy hydrodynamicznej.

Interpretację testu interferencyjnego przeprowadza się zwykle z użyciem modelu Theisa [5], metodą punktu przegięcia sygnału [3], metodą krzywych wzorcowych [2] oraz z użyciem symulatora przepływów niestacjonarnych.

W zakresie testowania przepuszczalności pionowej skał oraz określania izolacji poszczególnych warstw wodonośnych stosuje się próbnik RFT (*Repeat Formation Tester*) [4]. Próbnik ten jest wykorzystywany w geologii i inżynierii naftowej od roku 1975.

### 4. METODY HYDROCHEMICZNE W POŁĄCZENIU Z METODAMI HYDRODYNAMICZNYMI

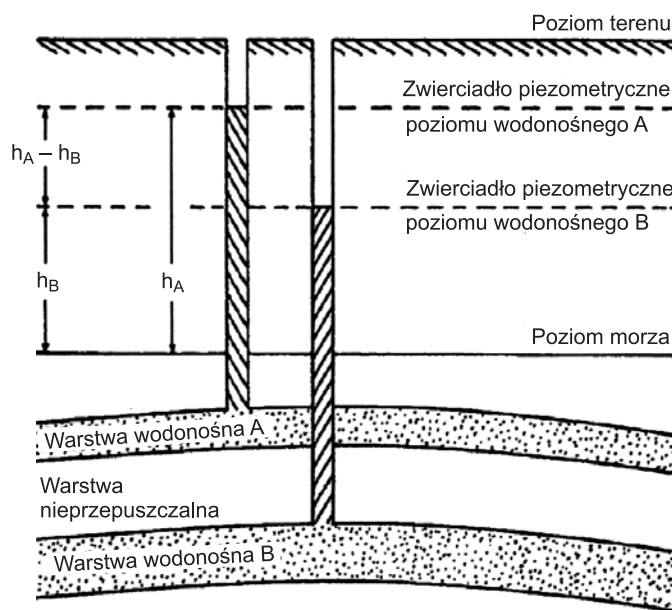
Metody hydrochemiczne w połączeniu z analizą naporów hydraulicznych (ciśnienie złożowych) w warstwach wodonośnych występujących w nadkładzie struktury, do której zatłaczane są odpady, mogą być wykorzystane do weryfikacji szczelności poszczególnych poziomów wodonośnych [6].

#### 4.1. Pomiar naporów hydraulicznych przed rozpoczęciem zatłaczania odpadów płynnych do struktury geologicznej

Jedną z metod oceny szczelności skał nadkładu struktury geologicznej jest określenie warunków hydrochemicznych i hydrodynamicznych panujących w warstwie wodonośnej, do której planuje się zatłaczanie odpadów, oraz w warstwie wodonośnej występującej bezpośrednio nad nią.

Pomiar statycznych naporów hydraulicznych w otworach obserwacyjnych przewiercających obydwie warstwy wodonośne, połączony z analizą chemiczną próbek wody pobranych z każdej warstwy wodonośnej, dostarcza cennych informacji na temat możliwości komunikacji między warstwą wodonośną, w której planuje się wytworzenie podziemnego składowania odpadów, a leżącymi wyżej warstwami wodonośnymi [6].

Na rysunku 1 przedstawiono dwie warstwy wodonośne, gdzie  $h_A$  jest wysokością słupa wody nad poziomem morza w otworze wykonanym w warstwie wodonośnej A,  $h_B$  oznacza podobną wielkość dla warstwy wodonośnej B, w której rozważane jest składowanie odpadów. Różnica naporów hydraulicznych jest równa  $(h_A - h_B)$ , przy czym warstwa wodonośna leżąca wyżej ma wyższy napór hydrauliczny.



Rys. 1. Warstwy wodonośne z różnymi wysokościami naporów hydraulicznych [6]

Gdy różnica naporów hydraulicznych ( $h_A - h_B$ ) jest duża, oznacza to, że skały nadkładu występujące nad warstwą wodonośną B stanowią nieprzepuszczalną barierę dla migracji zanieczyszczeń.

W przypadku braku różnicy naporów hydraulicznych pomiędzy warstwą A i warstwą B ( $h_A - h_B = 0$ ) istnieje niebezpieczeństwo, że skały nadkładu nad warstwą wodonośną B są nieszczelne. W takiej sytuacji skały nadkładu mogłyby być szczelne jedynie pod warunkiem, że wody w obydwu warstwach wodonośnych różnią się znacznie składem chemicznym. Oznaczałoby to bowiem, że wody złożowe nie przemieszały się ze sobą, ponieważ warstwy wodonośne oddzielone są od siebie nieprzepuszczalną barierą. Jednakże w tym przypadku szczelność skał nadkładu zalegających nad warstwą B nie jest tak pewna jak wówczas, gdy pomiędzy dwoma warstwami występują duże różnice naporów hydraulicznych i duże różnice składu chemicznego wód złożowych.

W tabeli 1 przedstawiono poszczególne przypadki dotyczące porównania wielkości naporów hydraulicznych oraz chemizmu wód złożowych w analizowanych warstwach wodonośnych oraz interpretację warunków szczelności skał nadkładu.

**Tabela 1**

Interpretacja szczelności skał nadkładu na podstawie danych hydrochemicznych i hydrodynamicznych analizowanych poziomów wodonośnych [6]

Lp.	Różnica naporów hydraulicznych w analizowanych warstwach wodonośnych	Różnica składu chemicznego wód w analizowanych warstwach wodonośnych	Interpretacja
1	Znacząca	Znacząca	Bardzo dobry poziom uszczelniający
2	Nieistotna	Znacząca	Prawdopodobnie dobry poziom uszczelniający, konieczność dalszych badań
3	Znacząca	Nieistotna	Prawdopodobnie dobry poziom uszczelniający, konieczność dalszych badań
4	Nieistotna	Nieistotna	Uszczelnienie niepotwierdzone, prawdopodobnie warstwa nie posiada zdolności izolacyjnych

#### 4.2. Pomiar naporów hydraulicznych po rozpoczęciu zatłaczania odpadów płynnych do struktury geologicznej

Po rozpoczęciu zatłaczania odpadów płynnych do górotworu, otwory obserwacyjne, które były używane do pomiaru statycznych naporów hydraulicznych, mogą służyć do monitorowania szczelności warstw nadkładu. Stabilizacja płynu (wody) w otworze wiertniczym w warstwie wodonośnej A, w trakcie zatłaczania odpadów do warstwy B, stanowi dowód na szczelność skał nadkładu. Natomiast stale wzrastający napór hydrauliczny w warstwie wodonośnej A wskazuje na to, że istnieje komunikacja pomiędzy warstwą A i warstwą B poprzez skały nadkładu. Otwory obserwacyjne odgrywają ogromną rolę w kontroli podziemnych warunków składowania odpadów płynnych w strukturach geologicznych.

## 5. METODY GEOCHEMICZNE

Metody geochemiczne, a szczególnie powierzchniowe zdjęcia gazowe, znajdują zastosowanie w prospekcji poszukiwawczej oraz w zagadnieniach ochrony środowiska. Bezpośrednio metody geochemiczne, w postaci zdjęcia gazowego, wykorzystuje się do śledzenia migracji metanu i gazów toksycznych z pokładów węgla do środowiska, do monitoringu podziemnych magazynów gazu oraz do kontroli procesu wiercenia i eksploatacji odwiertów

gazowych [1, 7]. Metoda powierzchniowego zdjęcia geochemicznego może być szczególnie przydatna do wykrywania migracji gazów ze struktur geologicznych, w których składowane są odpady gazowe.

### **5.1. Zakres badań geochemicznych**

Metody badań geochemicznych dotyczą głównie oznaczania metanu i gazów toksycznych w powietrzu glebowym. Obejmują one również analizę gruntu i wody na zawartość substancji mineralnych, radioaktywnych i bakteriologicznych oraz analizę fizykochemicznych własności skał [7].

Badania geochemiczne dzieli się na badania powierzchniowe i badania wgłębne.

Przedmiotem badań powierzchniowych są [1, 7]:

- mieszaniny gazów zawartych w gruncie,
- próbki płytko zalegających skał,
- wody podziemne i powierzchniowe.

Natomiast przedmiotem badań wgłębnych jest materiał skalny uzyskany w trakcie wiercenia odwiertów.

### **5.2. Geochemiczne badania powierzchniowe**

Zdjęcie geochemiczne jest to powierzchniowe kartowanie geochemiczne, które może mieć bardzo wiele odmian, w zależności od zastosowanej metody badawczej. Wśród zdjęć geochemicznych wyróżnić można m.in. zdjęcia:

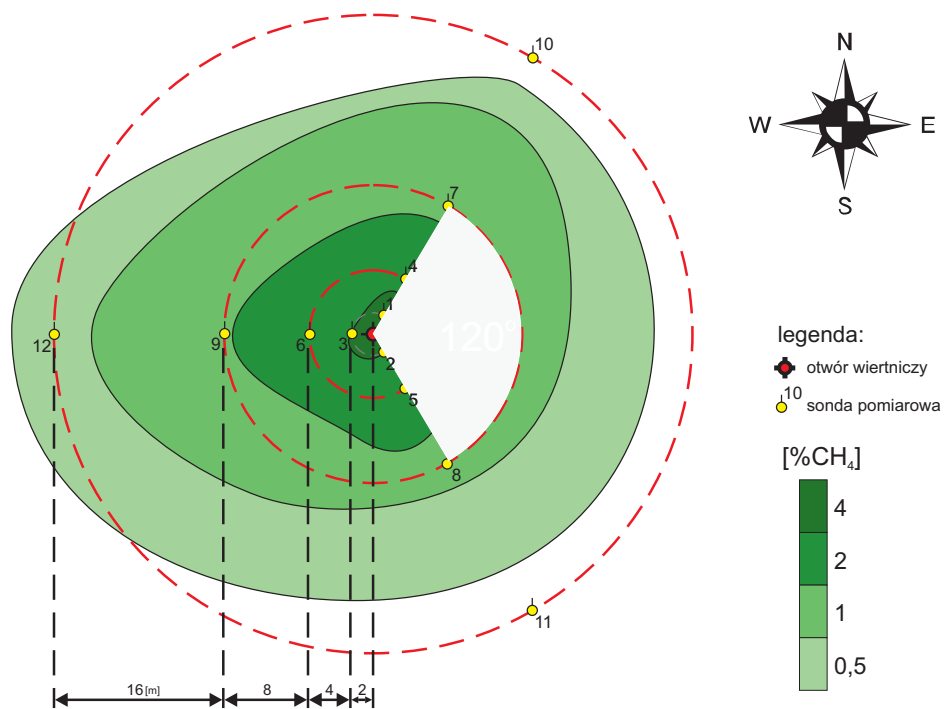
- gazowe,
- bitumiczne,
- mikrobiologiczne,
- hydrogeochemiczne.

Najczęściej stosowaną formą wykrywania ekshalacji gazu ziemnego jest zdjęcie gazowe, nazywane także metodą atmogeochemiczną lub atmochemiczną.

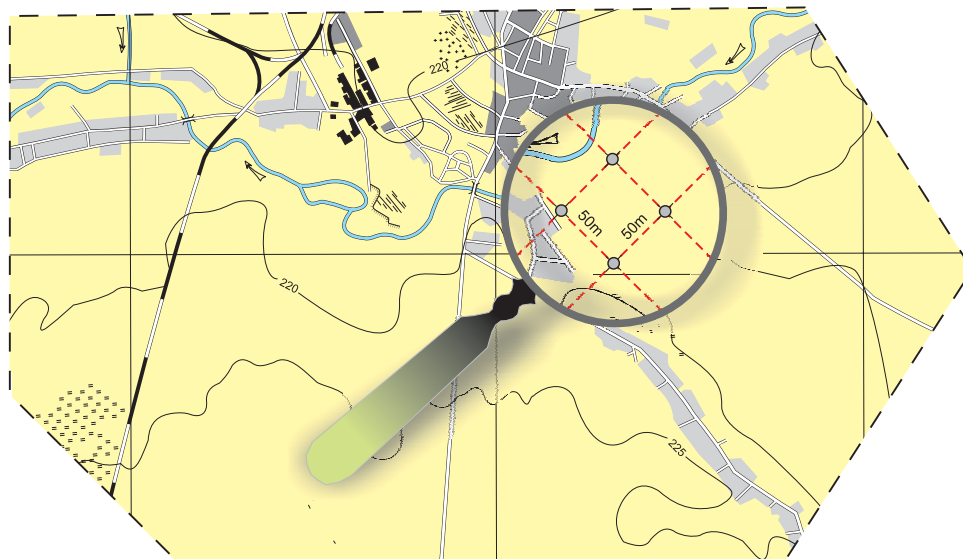
Powierzchniowe zdjęcia gazowe wykonuje się poprzez pobranie próbek powietrza glebowego (właściwie gruntowego) z głębokości 2÷10 m lub pobranie próbek wody, a następnie określenie w nich zawartości lotnych węglowodorów lub innych gazów toksycznych.

Z punktu widzenia celu i sposobu prowadzenia obserwacji geochemicznych, zdjęcia gazowe podzielić można na:

- punktowe, czyli w dowolnym punkcie, gdzie identyfikacja węglowodorów gazowych oparta jest na zasadzie „zero-jedynkowej” (jako wynik pozytywny przyjmuje się „1” a negatywny „0”);
- profilowe, wokół jednego punktu: z przyjętym krokiem lub przy zagęszczonym kroku, gdzie krok stanowi stopień dokładności zdjęcia (rys. 2);
- powierzchniowe, w tym wypadku całą powierzchnię badanego rozległego obszaru pokrywa się regularną (zwykle kwadratową) siatką punktów pomiarowych (rys. 3).



Rys. 2. Mapa koncentracji metanu w powietrzu glebowym w otoczeniu otworu wiertniczego (zdjęcie gazowe wykonane w systemie profilowym)



Rys. 3. Rozmieszczenie sond przy badaniach geochemicznych podstawowych

### 5.3. Interpretacja wyników pomiarów geochemicznych

Na podstawie danych laboratoryjnych opracowuje się mapę powierzchniowego rozkładu koncentracji węglowodorów w powietrzu glebowym. Mapy rozkładu przestrzennego oznaczonych składników w powietrzu glebowym konstruowane są za pomocą profesjonalnych programów graficznych, z wykorzystaniem standardowych i zaawansowanych pakietów geostatystycznych.

Skonstruowana mapa rozkładu koncentracji, np. metanu, pokazuje obszary maksymalnych stężeń gazu (emanacji) i zarazem sugeruje kierunki jego rozprzestrzeniania się (rys. 2).

W celu kompleksowego i precyzyjnego zinterpretowania wyników powierzchniowych badań geochemicznych dokonuje się zwykle zestawienia z innymi badaniami (geologicznymi i geofizycznymi), uwzględniając przy tym budowę geologiczną badanego obszaru.

Zasięg i natężenie powierzchniowych ekshalacji gazowych zależne są od struktury i spistości warstw przypowierzchniowych.

Bieżące wyniki badań geochemicznych są aktualne i wiarygodne tylko w danym interwale czasowym, w którym są wykonywane badania. Ma na to wpływ szereg czynników powodujących przemieszczanie się gazu w warstwach skalnych. Dlatego też najlepszym rozwiązaniem w badaniach geochemicznych jest stały monitoring geochemiczny lub okresowe kontrolne badania geochemiczne.

## 6. METODY WIERTNICZE

Otwory wiertnicze wiercone dla potrzeb podziemnego składowania odpadów (otwory zatłaczające i otwory monitorujące) powinny charakteryzować się doskonałą szczelnością, zarówno w zakresie samych połączeń rur okładzinowych stosowanych w tych otworach, jak i w zakresie stanu zacementowania tych rur w otworze. Proces cementowania rur należy wykonywać w taki sposób, aby cement dokładnie wypełniał przestrzeń między kolumną rur a ścianką otworu. Konieczne jest w tym zakresie wykonywanie badań geofizycznych, np. metodami akustycznymi w celu oceny stanu zacementowania [1].

W trakcie wiercenia otworów należy brać pod uwagę następujące czynniki:

- przewidywany profil stratygraficzno-litologiczny otworu;
- przewidywaną głębokość wiercenia;
- wielkości gradientów ciśnień złożowych oraz ciśnień szczelinowania skał;
- przewidywane wydajności płynów złożowych;
- strefy ewentualnych zaników płuczki.

Istotny wpływ na szczelność struktury mają otwory zlikwidowane. W zakresie otworów zlikwidowanych należy przeprowadzać analizę sposobu ich likwidacji. W przypadku otworów zlikwidowanych czasowo należy rozważyć możliwość ich ponownego otwarcia oraz przeprowadzenia rekonstrukcji.

## LITERATURA

- [1] Kidybiński A., Siemek J. i in.: *Ocena i możliwości wykorzystania wyrobisk górniczych likwidowanych kopalń węgla kamiennego na podziemne magazyny gazu i paliw*. Katowice, praca sfinansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, 2004
- [2] Lee J.: *Well Testing*. Dallas, SPE Textbook Series, vol. 1, 1982
- [3] Sabet M.A.: *Well Test Analysis. Contributions in Petroleum Geology and Engineering*. Houston, Gulf Publishing Company 1991
- [4] Smolen J.J., Litsay R.L.: *Formation Evaluation Test Using Wireline Formation Tester Pressure Data*. SPE 6622, 1979
- [5] Theis C.V.: *The relationship between the lowering of piezometric surface and rate and duration of discharge using groundwater storage*. Trans. AGU, 1935, 519
- [6] Witherspoon P.A., Mueller T.D., Donovan R.W.: *Evaluation of underground gas-storage conditions in aquifers through investigations of groundwater hydrology*. JPT, May 1962, 555–561
- [7] Zawisza L., Macuda J. i in.: *Klasyfikacja struktur geologicznych pod kątem możliwości składowania odpadów w górotworze*. Kraków, praca sfinansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, 2005