

Właczanie wód do górotworu – dokumentacja hydrogeologiczna na tle przepisów prawnych

Ewa Krogulec¹, Katarzyna Sawicka¹, Sebastian Zabłocki¹



E. Krogulec



K. Sawicka



S. Zabłocki

Water injection into the rock mass – hydrogeological documentation against the background of legal regulations. Prz. Geol., 66: 222–228.

Abstract. Hydrogeological documentation in the terms of deposit exploitation, water injection to the rock formations, drainage, and other mining activity requires the characteristic of groundwater conditions, mainly in the field of groundwater hazards. Hydrogeological documentations are the basis for granting or renewing a concession. The necessity of a general description in hydrogeological documentation as a result of legal regulations is justified and understood, although broader and non-standard scope should be revised, connected with: development of research methods in hydrogeology, scope of their applicability, modern research methodology

for measurement and evaluation of hydrogeological parameters, new mining techniques. Commonly realized documents include, among other things, characteristics of hydrogeological conditions, in particular the extent of geological structure planned for water injection, depth, thickness and capacity of reservoirs, hydrogeological parameters, groundwater flow directions, isolation conditions and hydrogeological parameters of rock formations directly above reservoirs. Based on the documented work, the paper describes the problem of presenting the most important hydrogeological aspects that determine the possibility of water injection into the rock formations, the scope of hydrogeological investigations and justification of the observation and measurement conducted for the assessment of environmental hazards caused by water injection.

Keywords: hydrogeological documentation, injection, saline water, groundwater, oil and gas reservoirs, hydrogeological parameters

Zgodnie z zapisami Prawa geologicznego i górniczego (Pgg) (Ustawa, 2017) włączanie wód do górotworu to wprowadzanie wód z odwodnień wyrobisk górniczych, wód złożowych oraz wykorzystanych wód leczniczych, wód termalnych i solanek, polegające na ich włączaniu otworami wiertniczymi do formacji geologicznych izolowanych od użytkowych poziomów wodonośnych. Artykuł 90 Pgg stanowi, że dokumentację hydrogeologiczną sporządza się, np. na potrzeby a) wykonywania odwodnień w celu wydobywania kopalin oraz b) włączania wód do górotworu. W Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dn. 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich (Rozporządzenie, 2016) wskazano zakres dokumentacji hydrogeologicznej wykonywanej w związku z włączaniem wód do górotworu. W tym akcie prawnym (§10.1) zostały przedstawione podstawowe elementy dokumentacji określającej warunki hydrogeologiczne, obejmującej m.in.: charakterystykę budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych, zwłaszcza zasięgu struktury geologicznej objętej wprowadzaniem wód, głębokości, miąższości i pojemności warstwy chłonnej, jej parametrów hydrogeologicznych, kierunków przepływu wód podziemnych oraz stopnia szczelności nadkładu, a także ocenę parametrów hydrogeologicznych skał ograniczających warstwę chłonną.

Zatłaczanie wód złożowych do górotworu jest możliwe jeżeli są spełnione określone warunki geologiczne i środowiskowe. W Dyrektywie 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dn. 23 października 2000 r. ustanawiającej ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Dyrektywa, 2000) narzucono surowe

rygory w zakresie ochrony ilości i stanów wód podziemnych w celu niedopuszczenia do ich zanieczyszczenia. Dopuszcza się jednak włączanie wód o innym chemizmie niż wody użytkowe podczas poszukiwań lub eksploatacji złóż węglowodorów lub eksploatacji górniczej do tych formacji geologicznych, z których pochodziły.

Długoletnia historia zatłaczania wód do górotworu, m.in. w celu intensyfikacji eksploatacji złóż węglowodorów, nie wskazuje na zagrożenia użytkowych wód podziemnych. Jest to związane ze znaczną głębokością warstwy chłonnej, jej izolacją osadami słabo przepuszczalnymi, niskimi wartościami parametrów filtracyjnych warstw chłonnych i izolujących oraz odpowiednio dobieranym ciśnieniu włączania. Możliwe zmiany chemizmu wód złożowych wprowadzanych do otworów wynikają z przemian hydrogeochemicznych, warunkowanych m.in. zmianą temperatury i ciśnienia w otworze oraz mieszaniem się ich z wodami obecnymi w złożu.

Celem artykułu jest przedstawienie, na tle przepisów prawnych, elementów dokumentacji hydrogeologicznej w związku z włączaniem wód do górotworu, które określają możliwy jego wpływ na środowisko. W publikacji poruszono wybrane, najważniejsze aspekty związane z dokumentowaniem hydrogeologicznym, dotyczące geologicznych i hydrogeologicznych kryteriów wyboru warstw chłonnych, problemów technicznych związanych z utratą chłonności strefy przyotworowej, szacowania pojemności i zasięgu struktury objętej włączaniem wód, oceną wiarygodności danych hydrogeologicznych oraz monitoringu dedykowanego wód podziemnych.

¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; ewa.krogulec@uw.edu.pl; sawicka@uw.edu.pl; s.zablocki@uw.edu.pl.

ZARYS HISTORYCZNY WTŁACZANIA WÓD DO GÓROTWORU

Wtłaczanie wód do górotworu w celu poprawienia stanu technicznego otworów eksploatujących węglowodory lub w pozbycia się wód złożowych w przemyśle naftowym jest stosowane od 1900 r. Technologia ta, powszechnie nazywana *waterflooding*, została opracowana w USA. W latach 20. XX w. rozpoczęto praktykę wtłaczania wód do górotworu z głębokości i poziomów, z których woda pochodziła, a w 30. XX w. było to działanie powszechne w amerykańskim przemyśle naftowym, m.in. w złożu ropy naftowej Bradford w Pensylwanii, USA (Fettke, 1938). W połowie 1940 r. produkcja w wielu złożach w USA znacząco spadła, podczas gdy większość złożów w innych częściach świata była na wczesnych etapach produkcji podstawowej, co jeszcze bardziej upowszechniło wtłaczanie wód. W latach 70. XX w. *waterflooding* stosowano w większości lądowych złożów ropy naftowej w USA, Rosji i Chinach, a następnie na złożu na Morzu Północnym.

W polskim górnictwie naftowym wtłaczanie wód do górotworu, nazywane kiedyś nawadnianiem złożów, stosowano pierwotnie jedynie jako jedną z wtórnych metod eksploatacji, zwiększającą wydobyte węglowodory z odwiertów. Zaczęto ją wykorzystywać w latach 40. i 50. XX w., a początkowo zastosowała ją kopalnia Lipa k. Gorlic w roku 1949. W 1956 r. technikę tę wdrożono w kopalni Osobnica (Podkarpacie), na której proces nawadniania trwał ponad 20 lat (w latach 1958–1978 zatłoczono do złoża ok. 362,8 tys. m³ wody, przy wykorzystaniu 17 odwiertów chłonnych). W Kamieniu Pomorskim nawadnianie na szerszą skalę rozpoczęto trzema odwiertami w 1976 r. (do chwili obecnej do złoża zatłoczono 783 tys. m³ wody) (Lubaś i in., 2012). W 1979 r. w kopalni Lipinki (Podkarpacie) zastosowano naprzemienne zatłaczanie do złoża wody i powietrza, czyli specyficzną odmianę klasycznej metody nawadniania. Proces wypierania ropy naftowej przez wtłaczaną wodę udoskonalano, stosując środki powierzchniowo-czynne, gazolinę wykorzystywaną jako ciecz do wtłaczania, czy też tłoczenie ciepłej wody. W Instytucie Nafty i Gazu w Krośnie opracowano oryginalną metodę zatłaczania wody do górnej części wyczerpanego pokładu. Zastosowano ją w kopalni Potok w latach 80. ub.w. (Biały, Kasza, 2011).

Aktualnie w Polsce wtłaczanie wód do górotworu jest praktyką powszechną, wykorzystywaną nie tylko w celu poprawienia warunków wydobywania, ale również do utylizacji wód złożowych lub poprodukcyjnych. Stosowana jest we wszystkich złożach, także na Morzu Północnym.

WYBRANE ASPEKTY HYDROGEOLOGICZNE W ZAKRESIE WTŁACZANIA WÓD DO GÓROTWORU

Wtłaczanie wód do górotworu regulują w Polsce trzy podstawowe ustawy: Prawo ochrony środowiska (Ustawa 2001), Prawo geologiczne i górnicze (Ustawa, 2017) oraz Ustawa o swobodzie działalności gospodarczej (Ustawa, 2004).

Zasady ochrony środowiska w związku z gospodarką złożem kopaliny regulowane ustawą Pgg określają:

– korzystanie z wód kopalnianych dla zaspokojenia potrzeb zakładu górniczego,

– wtłaczanie do górotworu wód pochodzących z odwodnienia wyrobisk górniczych, wód złożowych, wykorzystanych wód leczniczych, wód termalnych i solanek.

Wtłaczanie wód do górotworu służy z jednej strony intensyfikacji wydobywania węglowodorów i ochronie kopaliny, a z drugiej – ochronie środowiska wodnego. Ogólne zasady ochrony złóż kopaliny, zgodnie z Prawem ochrony środowiska, narzucają racjonalne gospodarowanie i kompleksowe wykorzystanie złoża. Przedsiębiorca podejmujący eksploatację kopaliny lub prowadzący tę eksploatację jest zobowiązany podejmować środki niezbędne do ochrony zasobów złoża, jak również do ochrony powierzchni ziemi oraz wód powierzchniowych i podziemnych, sukcesywnie prowadzić rekultywację terenów poeksploatacyjnych oraz przywracać do właściwego stanu inne elementy przyrodnicze. Zatłaczanie wód złożowych do górotworu może ograniczać konieczność ich zagospodarowania, oczyszczania lub utylizacji, co bezpośrednio zmniejsza możliwe negatywne skutki zanieczyszczenia użytkowych wód podziemnych. Dlatego zagospodarowanie wód złożowych poprzez zatłoczenie odpadowych wód złożowych do warstw chłonnych, oprócz korzyści ekologicznych związanych z bezodpadowym usunięciem wód wysokozmineralizowanych, zapewnia również znaczną redukcję kosztów związaną z koniecznością ich utylizacji.

Geologiczne i hydrogeologiczne kryteria wyboru warstw chłonnych

Struktury geologiczne, do których można zatłaczać wody złożowe, muszą spełniać odpowiednie warunki. Mogą one być zdefiniowane poprzez zasięg struktury geologicznej objętej wtłaczaniem wód, głębokość, miąższość i pojemność tej warstwy oraz parametry hydrogeologiczne zarówno warstwy chłonnej, jak i warstw otaczających (tab. 1). Odwiert przeznaczony do zatłaczania wód złożowych do górotworu powinien spełniać kryteria geologiczne, ekologiczne i techniczne. Kryteria geologiczne wynikają z możliwości i warunków wtłaczania wód, ekologiczne – dodatkowo warunkują bezpieczne wykonywanie tego zabiegu, możliwe przy spełnieniu warunków technicznych.

Formacja, poziom lub struktura geologiczna, do której będą wtłaczane wody złożowe, jest najczęściej rozpoznana np. poprzez badania geofizyczne, rzadziej bezpośrednie w trakcie wierceń.

Zatłaczanie wód złożowych do górotworu jest możliwe, jeżeli są spełnione określone warunki geologiczne. Decydują o tym parametry i właściwości warstwy chłonnej, a o bezpieczeństwie z punktu widzenia ochrony środowiska również miąższość i litologia warstw nadkładu i warstw podścielających warstwę chłonną. Pojemność tej warstwy jest warunkowana głównie jej miąższością i rozprzestrzenieniem, przepuszczalnością, porowatością oraz składem mineralnym. Miąższość i litologia nadległych utworów nieprzepuszczalnych musi zapewniać izolację utworów wodonośnych, z uwzględnieniem zwiększonego ciśnienia wtłaczania. Tylko niektóre wartości parametrów warstwy chłonnej zostały wskazane jako zalecane (tab. 2), natomiast jej głębokość, miąższość oraz porowatość nie są definiowane w zakresie rekomendowanych wartości. Analiza wartości regionalnych wskazuje, że wtłaczanie zachodzi najczęściej na głębokości przekraczającej 1000 m, miąższość warstwy chłonnej przekracza 10 m, a porowatość osiąga maksymalnie ok. 20% (tab. 1).

Tab. 1. Wybrane cechy warstwy chłonnej i warstw otaczających
Table 1. Selected features of reservoirs and surrounding rock formations

Cechy warstw chłonnych	Oczekiwane właściwości, charakterystyka, uwagi	Przykładowe wartości regionalne
Miąższość nadkładu nad warstwą chłonną	ma wpływ na ochronę użytkowych wód podziemnych; cecha uwzględniana przy planowaniu ilości włączanych wód i wartości ciśnienia włączania	bardzo zmienna, uzależniona od głębokości warstwy chłonnej monoklina przedsudecka – 1540–1581 m
Miąższość	cecha uwzględniana przy planowaniu ilości włączanych wód i wartości ciśnienia włączania	zapadlisko przedkarpackie – 10 m monoklina przedsudecka – 77–210 m Podhale – 277 m Karpaty Zewnętrzne – 460 m Niż Polski – 18 m Oklahoma – 230 m Dakota North – 180 m
Litologia nadkładu nad warstwą chłonną	konieczna analiza litologii osadów ze względu na ocenę właściwości izolujących, pęcznienia, przepuszczalności, porowatości	bardzo zmienna
Głębokość	ma wpływ na planowanie ilości włączanych wód i wartości ciśnienia zatłaczania, ochronę użytkowych wód podziemnych	zapadlisko przedkarpackie – 964 m monoklina przedsudecka – 1460–1550 m Podhale – ok. 2400 m Karpaty Zewnętrzne – 1700 m Niż Polski – 1445 m Oklahoma – 2316 m Dakota North – 1830 m
Litologia i miąszość osadów podścielających	w przypadku znacznego ciśnienia wód w osadach podścielających, litologia i miąszość osadów podścielających może mieć wpływ na warunki zatłaczania i ochrony wód podziemnych	litologia warstwy chłonnej zróżnicowana; najczęściej opisana w sposób ogólnikowy bez danych szczegółowych.
Porowatość, przepuszczalność	cecha uwzględniana przy planowaniu ilości włączanych wód i wartości ciśnienia włączania	zapadlisko przedkarpackie – 19%; 95,4 mD monoklina przedsudecka – 4,57–15,85%; 28,6–85,52mD Niż Polski – 5,2%; 95,14 mD Oklahoma – 18%; 75 mD Dakota North – 15%; 60 mD Kansas – 850 mD
Wartość surowcowa	niska wartość surowcowa jest ekonomicznie i środowiskowo uzasadniona	nieopisywana
Jakość zatłaczanej wody złożowej	możliwość wystąpienia niekorzystnego zjawiska kolmatacji strefy przyotworowej lub korozji infrastruktury odwiertu	dane niepełne, przedstawione wybrane wskaźniki fizykochemiczne.

Tab. 2. Zalecane wartości wybranych parametrów warstw wykorzystywanych do włączania wód złożowych do górotworu
Table 2. Recommended values of selected parameters of layers used for saline water injection

Parametry i cechy warstwy chłonnej i warstw otaczających	Zalecane wartości
Przepuszczalność	przyjmuje się że warstwę chłonną stanowią utwory o przepuszczalności >0,1mD
Głębokość nadkładu (osadów słabo przepuszczalnych)	dla minimalnych ilości ciekłych odpadów (10 000 m ³ /rok) wynosi ona 500 m i nie powinna przekraczać 2000 m (Ślizowski, 2002)
Szczelność utworów nadkładu warstwy przepuszczalnej	współczynnik filtracji pionowej $k' < 1 \cdot 10^{-11}$ m/s (przepuszczalność poniżej $1 \cdot 10^{-3}$ mD) (Lewkiewicz-Małyśa, Winid, 2011)

Kolmatacja strefy przyotworowej

Jednym z największych problemów technologicznych w instalacjach służących do włączania wód złożowych do górotworu jest utrata chłonności. Zjawisko to jest najczęściej spowodowane kolmatacją strefy przyotworowej, czego objawem jest wzrost ciśnienia zatłaczania wody do tego odwiertu.

Do najważniejszych czynników powodujących kolmatację, rozumianą jako odkładanie się na ściankach instalacji

oraz w porach i szczelinach strefy przyotworowej substancji stałych (w wyniku procesów mechanicznych i chemicznych), należą: wysoka zawartość fazy stałej w zatłaczanej wodzie (zawiesin), procesy biologiczne (mikroflora bakteryjna), pęcznienie minerałów ilastych, wprowadzanie do złoża uwolnionych w wyniku korozji cząstek stałych, tworzenie się i depozycja osadów wytrąconych z zatłaczanych wód, wytrącanie się osadów w wyniku zaburzenia stabilności chemicznej mieszających się wód zatłaczanych i obecnych w złożu (wody o różnym chemizmie) oraz zmiany termodynamiczne w złożu (ciśnienia i temperatury) wywołanych przez proces zatłaczania (Witherspoon i in., 1962; Wright, Chilingarian, 1989; Bradley, 1992; Lewkiewicz-Małyśa, Winid, 2011).

Procesy hydrogeochemiczne związane z reakcjami włączanej wody złożowej z matrycą skalną i wodami obecnymi w złożu były przedmiotem licznych badań (Lewkiewicz-Małyśa, Konopka, 2009; Janoha, Kluk, 2005; Jia, Qu, 2000; Kühn i in., 2002; Liang i in., 2006; Merdhan, Yassin, 2007; Shutemov, 2013; Li i in., 2014).

Potencjał wód zatłaczanych do wytrącania i formowania osadów mineralnych oraz ryzyko korozji należy rozpatrywać indywidualnie dla każdego złoża i osobno dla konkretnych otworów chłonnych. Zależy on bowiem bezpośrednio od składu chemicznego i stopnia mineralizacji wód oraz od zmiennych warunków temperatury i ciśnienia w otworze. Możliwość formowania się osadów pogarszających warunki pracy odwiertu i uszkadzających infrastrukturę ocenia się na podstawie indeksów stabilności

chemicznej cieczy zatłaczanej, jej mieszaniny z wodami obecnymi w złożu, a także prawdopodobieństwa wytrącania się poszczególnych faz mineralnych z tych roztworów.

Prognozowanie niekorzystnych procesów prowadzących do pogarszania się warunków pracy otworu chłonnego, a w rezultacie do nieefektywnego wykorzystania warstwy chłonnej do zatłaczania wód złożowych, jest możliwe już na etapie projektowania otworów chłonnych i sporządzania dokumentacji hydrogeologicznej. Narzędziem niezbędnym do przeprowadzania odpowiednich symulacji przebiegu procesów chemicznych w otworze i złożu jest modelowanie hydrogeochemiczne.

Modelowanie hydrogeochemiczne za pomocą programów komputerowych sprowadza się do obliczenia stanu termodynamicznego roztworów wodnych (bilans specjacji, stopień nasycenia względem określonych faz mineralnych przy zmiennych warunkach temperaturowych i ciśnieniowych) i wnioskowania o stanie równowagi w układzie faza ciekła–faza stała–faza gazowa. Warto zauważyć, że powszechnie wykorzystywane do tego celu oprogramowanie udostępniane przez US Geological Survey (programy z grupy PHREEQC) opiera się na modelu Debye-Hückela, sprawdzającym się najlepiej dla roztworów o stosunkowo małej sile jonowej (wody niskozmineralizowane) (Parkhurst, Apello, 1999).

Wody złożowe w przemyśle naftowym cechują się zazwyczaj bardzo wysokimi stężeniami składników mineralnych rozpuszczonych (mineralizacja może osiągać nawet kilkaset g/dm³). Wskazane jest zatem bardzo ostrożne podejście do uzyskiwanych rezultatów modelowania, ponieważ mogą być obciążone istotnymi błędami. Korzystanie z tego narzędzia powinno być poprzedzone rozpoznaniem zmienności mineralizacji badanych wód oraz zwróceniem szczególnej uwagi na bazę równań wykorzystywaną przez program do obliczeń.

Na rynku są dostępne programy zaprojektowane specjalnie do modelowania procesów chemicznych w roztworach o wysokiej sile jonowej i przeznaczone głównie dla przemysłu naftowego i geotermalnego (np. DownHole-SAT). Baza danych termodynamicznych i kinetycznych jest w nich najczęściej oparta na teorii Pitzera (Pitzer, 1991) lub modelu SHEMAT (Clauser, Villinger, 1990) i znacznie lepiej oddaje specyfikę reakcji w roztworach wysokozmineralizowanych. Programy te dają również większe możliwości w prognozowaniu zjawisk korozji.

Najważniejsze czynniki fizykochemiczne, które mają zasadniczy wpływ na korozyjność roztworu i których wartości analityczne, muszą być dokładnie określone, są to: zawartość dwutlenku węgla i siarkowodoru, zawartość siarczanów i chlorków, pH, twardość wody, temperatura i obecność mikroorganizmów (wpływających na zmianę pH i występowanie np. H₂S). Obecność jonów takich jak: węglany, krzemiany, fosforany i chromiany zmniejsza intensywność korozji w wyniku powstawania warstw ochronnych, a więc pasywacji metali. Szybkość korozji przebiega w wodzie o wysokiej przewodności właściwej znacznie intensywniej (Kowal, Świdzka-Bróż, 2000). Zjawisko wystąpienia lokalnej korozji wżerowej w obecności typowych wód złożowych jest zatem jak najbardziej realne.

Symulacje modelowe uwzględniają zawartość i ciśnienie dwutlenku węgla (CO₂) oraz siarkowodoru (H₂S) w roztworach, a także silnie korozyjne działanie wysokich stężeń jonów chlorkowych i siarczanowych (indeks Larso-

Tab. 3. Zakres analiz chemicznych wód złożowych do modelowania hydrogeochemicznego

Table 3. The scope of chemical analyzes for hydrogeochemical modeling

Właściwości fizykochemiczne	Temperatura, odczyn pH, TDS (mineralizacja ogólna), gęstość, zasadowość, twardość ogólna, potencjał Eh
Jony	HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , PO ₄ ³⁻ , F ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , NO ₃ ⁻ , Fe ²⁺ , Mn ²⁺
Metale	Al, Ba, B, Br, Cr, Cu, Cd, Li, Ni, Pb, Si, Sn, Sr, Zn
Gazy	CO ₂ , H ₂ S

na-Skolda wskazujący na korozję wżerową) i oceniają zmienność korozyjności wraz ze zmianą zakresu temperatury i pH. Możliwa jest również ilościowa ocena korozji poprzez określenie potencjalnej grubości warstwy usuwanego korozyjnie materiału w skali roku (mm/r).

Kolejnym warunkiem, który musi być spełniony do wiarygodnego opracowania modeli hydrogeochemicznych są rzetelne dane wejściowe w postaci szczegółowych analiz chemicznych wód zatłaczanych oraz wód złożowych *in situ* (tab. 3).

Bardzo przydatna jest również wiedza o składzie mineralnym szkieletu skalnego warstwy chłonnej (do realnej oceny rozpuszczania bądź wytrącania faz mineralnych występujących w utworach złożowych). Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że najczęściej wykonywany zakres analiz chemicznych wód towarzyszących złożom ropy naftowej i gazu jest niewystarczający. Bardzo często nie obejmuje on nawet wszystkich jonów głównych, koniecznych do wykonania bilansu jonowego próbki wody i oceny jakości analizy laboratoryjnej. Zbyt wąski zakres badań chemicznych oraz analizy złej jakości uniemożliwiają przeprowadzenie prawidłowych symulacji hydrogeochemicznych.

Szacowanie pojemności i zasięgu struktury objętej wtłaczaniem wód

Ustalenie ilości wód złożowych do wtłaczania w strukturę geologiczną jest możliwe na podstawie obliczeń empirycznych, rzadziej modelowych. Wykonanie badań bezpośrednich lub testów w otworze realizuje się praktycznie dopiero w fazie jego udostępniania. Na etapie dokumentowania hydrogeologicznego (załącznik do wniosku o uzyskanie koncesji) można jedynie szacować ilość wody przewidywaną do wprowadzenia w górotwór na podstawie rozpoznania warunków geologiczno-złożowych, prognozowanego przebiegu eksploatacji oraz bilansu wydobytych płynów złożowych.

Obliczenia ilości wód złożowych możliwych do zatłoczenia do warstwy chłonnej wykonuje się najczęściej dwoma metodami:

– z wykorzystaniem danych dotyczących prognozowanego wydobywania węglowodorów (gazu ziemnego i kondensatu) ze złoża oraz znanej wartości współczynnika obciążeniowego gazu,

– na podstawie wzorów empirycznych, w których wykorzystano dane pochodzące z prognozy eksploatacji węglowodorów (gazu ziemnego i kondensatu) ze złoża, w tym spodziewanego ubytku zasobów i spadku ciśnienia złożowego, oraz znajomości składu chemicznego gazu.

Obliczenia ilości wód złożowych w przypadku trwającej iniekcji wód w złożu można skorygować poprzez analogię z innymi złożami.

Prognozowany zasięg strefy wtłoczonej cieczy w warstwie wodonośnej najczęściej określa się, stosując wzór Theisa (Rogoż, 1992, 2004, 2012), przy założeniu, że lej represyjny rozwija się i rozszerza w funkcji czasu. Odległość frontu zatłoczonych wód złożowych R_f [1] od odwiertu tłocznego po czasie t_o od rozpoczęcia wtłaczania ze stałą wydajnością Q określa się ze wzoru:

$$R_f = \sqrt{\frac{Qt_o}{\pi Mn_{ef}}} \quad [1]$$

gdzie:

Q – wydajność tłoczenia [m^3/rok],

t_o – czas [s],

M – średnia miąższość efektywna serii chłonnej [m],

n_{ef} – współczynnik porowatości efektywnej [%].

Wzór Theisa stosuje się do pionowych otworów tłocznych. Nie uwzględnia on zmiany wydajności ani ciśnienia wtłaczania i daje zazwyczaj mocno zawyżone wyniki. Proponowana w przypadku otworów pionowych korekta wzoru na zasięg propagacji wtłaczanej cieczy R_f [2]. Polega na zastąpieniu współczynnika porowatości efektywnej iloczynem ciśnienia wtłaczania i współczynnika pojemności sprężystej β^* :

$$R_f = \sqrt{\frac{Qt}{\pi MP_n \beta^*}} \quad [2]$$

gdzie:

P_n – ciśnienie wtłaczania,

β^* – współczynnik pojemności sprężystej.

W obliczeniach przyjmuje się uśredniane parametry warstwy chłonnej dla zasięgu oddziaływania, a w przypadku braku informacji – parametry z konkretnego, przewidzianego do zatłaczania otworu.

W obliczeniach frontu zatłoczonych wód złożowych R_f od odwiertu tłocznego najczęściej nie uwzględniano procesu dyfuzji i dyspersji, co wynika z braku dostępnych wiarygodnych danych. W przypadku wtłaczania wód do warstw chłonnych, w których szczeliny odgrywają podstawową rolę w przewodzeniu wody, proces dyfuzji można uznać za nieistotny w porównaniu do oddziaływania procesu dyspersji. Określenie wielkości dyspersji wiąże się z koniecznością wyznaczenia współczynnika dyspersji hydrodynamicznej D_h^* , poprzez obliczenie stałych dyspersji podłużnej α_L i poprzecznej α_T , których wyznaczenie w warunkach laboratoryjnych nie może być bezpośrednio transponowane do warunków terenowych. Wyniki przeprowadzonych badań polowych stałej dyspersji podłużnej zależą nie tylko od litologii i charakteru warstwy wodonośnej, ale również od odległości propagacji zanieczyszczenia (Zheng, Bennet, 2002). Należy podkreślić, że stosunek stałych dyspersji α_L do α_T można uznać za stały zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i terenowych jako 10 : 1 (Spitz, Moreno, 1996). W tabeli 4 zestawiono wyniki wybranych badań polowych, z których wynika, że zmienność uzyskiwanej stałej dyspersji podłużnej może się różnić dla poszczególnych typów litologicznych nawet

Tab. 4. Wielkość stałej dyspersji podłużnej w zależności od litologii wodonośności i odległości propagacji zanieczyszczenia (dane z Envirobrowser, za: Małeckim i in., 2006)

Table 4. The size of the longitudinal dispersion constant depending on the lithology of the aquifer and the distance of propagation of pollution (data from Envirobrowser, taken from: Małecki et al., 2006)

Litologia	Odległość propagacji zanieczyszczenia [m]	Stała dyspersji podłużnej α_L [m]
Aluwia	6,4–10 000,0	3,0–61,0
Utory fluwioglacjalne	0,08–20 000,0	0,5–30,5
Piaskowce	3,0–50 000,0	0,16–200
Wapienie	8,0–32 000,0	1,0–170,0
Kreda	8,0	1,0–3,1
Dolomity	21,3–250,0	2,1–38,0
Skąły krystaliczne	5,0–538,0	0,5–134,0

o dwa rzędy wielkości. Dlatego, z powodu braku danych bezpośrednich, propozycja praktycznego stosowania w obliczeniach polowych przybliżonej wartości stałej dyspersji podłużnej równej 1/10 części skali przestrzennej systemu hydrogeologicznego (Fetter, 2001).

Wiarygodność danych hydrogeologicznych, monitoring wód podziemnych

Szczególną uwagę należy poświęcić ocenie wiarygodności możliwych do pozyskania danych hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych. Dane dotyczące parametrów hydrogeologicznych struktury wodonośnej, do której będą wtłaczane wody, są zazwyczaj z punktu widzenia hydrogeologa niezadowalające. Najczęściej to wielkość współczynnika filtracji k budzi najwięcej wątpliwości z racji braku dostatecznych informacji do kompleksowego opisu zmienności przestrzennej w obrębie struktury lub ze względu na określenie jego wartości metodami innymi niż badania bezpośrednie, które uznawane są za najbardziej wiarygodne. Ponadto zazwyczaj konieczne jest przeliczenie wartości współczynnika filtracji k [3] na podstawie współczynnika przepuszczalności, uwzględniając lepkość dynamiczną η i ciężar właściwy wody γ , zgodnie z wzorem:

$$k = k_p \frac{\gamma}{\eta} \quad [3]$$

Współczynnik lepkości dynamicznej i ciężar właściwy wody, cechy zależne od jej gęstości, temperatury i ciśnienia, można określić w badaniach laboratoryjnych. Natomiast współczynnik przepuszczalności k_p , wyznaczany laboratoryjnie w pojedynczych próbkach rdzeni z różnych interwałów głębokości, ma często inną wartość niż określany w wyniku interpretacji profilowań geofizycznych za pomocą programów specjalistycznych, np. PetroWorks.

Przy ocenie wiarygodności danych hydrogeologicznych, a szczególnie takich parametrów jak współczynnik filtracji i porowatość, znaczącą rolę odgrywa proces kwasowania (Czupski, 2010). Są to różnego typu zabiegi mające na celu poprawę chłonności odwiertu, poprzez likwidację skutków kolmatacji w otworze oraz zwiększenie przepuszczalności przyotworowej strefy warstwy chłonnej (Waligóra, Sołtysiak, 2011; Chowaniec i in.,

2001; Bielec, Kępińska, 2012). Badania testowe prowadzone po zabiegach kwasowania wykazały znaczący wzrost przepuszczalności warstwy chłonnej i porowatości. Przykładowo, dla dewońskich skał węglanowych podłoża karbonu produktywnego współczynnik filtracji uzyskany w trakcie próbnych pompowań zwiększył się o ponad dwa rzędy wielkości – z poniżej 10^{-9} m/s przed kwasowaniem do $4 \cdot 10^{-7}$ m/s po jego wykonaniu (Rózkowski, 2008).

Rozwiązywanie specyficznych zagadnień związanych z problematyką monitoringu wód podziemnych w rejonie eksploatacji węglowodorów dotyczy planowania oraz projektowania optymalnych systemów obserwacyjnych. Systemy te można zaklasyfikować jako lokalne monitoringi o charakterze operacyjnym. Brak jest kompleksowych i formalnych rozwiązań w tej dziedzinie, dlatego praktyczne wytyczne dotyczące systemów monitoringowych, przez tzw. zasady dobrych praktyk, są formułowane przez środowiska naukowo-badawcze i dotyczą koncepcji, analizy oraz badań terenowych. Potencjalne zagrożenie wód podziemnych wskutek właczania wód złożowych do górotworu jest możliwe, przede wszystkim w wyniku awaryjnego wprowadzania do nich zgromadzonych na powierzchni terenu wód złożowych lub migracji zanieczyszczeń rozlanych na terenie wiertni. Czas pionowej migracji wód na obszarach, gdzie występuje duża miąższość utworów słabo przepuszczalnych, stanowi dobrą ochronę przed przenikaniem zanieczyszczeń z powierzchni terenu i jest wystarczająco długi, żeby było możliwe podjęcie działań naprawczych i unieszkodliwienie potencjalnych substancji zanieczyszczających. Rozpatrywanie zagrożenia dla jakości wód podziemnych powinno się odbywać z uwzględnieniem analizy stopnia podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia dla danego rejonu. Monitoring wód podziemnych w celu identyfikacji zagrożeń wód w rejonach właczania wód do górotworu, ze względu na potencjalne zagrożenie, planuje się incydentalnie. Ilość, rodzaj i głębokość punktów obserwacyjnych ściśle zależy od warunków hydrogeologicznych (ze szczególnym uwzględnieniem kierunków filtracji wód podziemnych), od sposobu oraz skały prowadzonych poszukiwań i późniejszej eksploatacji, a także od specyfiki zagospodarowania przestrzennego. Stąd konieczność zindywidualizowanego podejścia do opracowania koncepcji i projektu sieci monitoringowej, każdorazowo przeznaczonej dla konkretnego przedsięwzięcia, po uzasadnieniu możliwości zagrożenia wód podziemnych z opracowaniem częstotliwości badań monitoringowych (Krogulec, Sawicka, 2013, 2015).

Z punktu widzenia ochrony wód podziemnych w rejonie właczania wód złożowych do górotworu bardzo ważny jest opis właściwości fizyczno-chemicznych wód w warstwie chłonnej i wód włączanych oraz prognoza zmian warunków hydrogeochemicznych na skutek właczania wód z uwzględnieniem wpływu na użytkowe poziomy wodonośne. Zakres badań hydrogeologicznych powinien obejmować badania fizykochemiczne wód użytkowych poziomów wodonośnych oraz wód złożowych. Należy dodać, że często wody złożowe są opróbowywane w trakcie wiercenia, podczas gdy właczanie wód może odbywać się znacznie później. Badanie chemizmu wód użytkowych poziomów wodonośnych jest uzasadnione w przypadku możliwego zagrożenia wód podziemnych w wyniku np. słabej ich izolacji. Konieczna jest wówczas propozycja lokalnego, dedykowanego systemu monitoringu wód podziemnych z bazowym opróbowaniem wód użytkowych poziomów wodonośnych.

PODSUMOWANIE

1. Właczanie wód złożowych do górotworu w przemyśle naftowym jest praktyką powszechną, stosowaną nie tylko dla poprawienia warunków wydobywania, ale także wykorzystywaną do utylizacji wód złożowych lub poprodukcyjnych. Zgodnie z obowiązującymi zapisami w prawie polskim właczanie wód do górotworu wymaga sporządzenia dokumentacji hydrogeologicznej.

2. Możliwość i bezpieczeństwo właczania wód determinują parametry i właściwości warstwy chłonnej oraz miąższość i litologia warstw nadkładu i podścielających warstwę chłonną. Nie zostały zdefiniowane zalecane wartości parametrów dla różnych warunków środowiskowych. Ocena parametrów i właściwości warstw w dokumentacjach hydrogeologicznych jest dokonywana w sposób zindywidualizowany, w zależności od stopnia rozpoznania warunków geologicznych i hydrogeologicznych, możliwości i zasadności wykorzystywania danych z innych obszarów, poprzez analogię hydrogeologiczną. Ważną kwestią jest analiza wiarygodności wartości danych oraz sposób uśrednienia wartości dla obszaru złoża w przypadku pojedynczych testów. Często ocena wartości ma charakter ekspercki, ponieważ uwzględnia procesy i zabiegi, których celem jest poprawa wartości parametrów warstw i chłonności odwiertu.

3. Podczas dokumentowania ustalenie ilości wód złożowych planowanych do właczania do struktury geologicznej jest możliwe na podstawie obliczeń empirycznych, rzadziej modelowych, dlatego ma charakter szacunkowy. Wykonanie badań bezpośrednich lub testów w otworze jest realizowane praktycznie dopiero w fazie jego udostępniania.

4. Jednym z największych problemów technologicznych w instalacjach służących do właczania wód złożowych do górotworu jest utrata chłonności, spowodowana najczęściej kolmatacją strefy przyodwiertowej. Ocena i prognoza zjawiska kolmatacji powinna być wykonywana przy zastosowaniu modelowania hydrogeochemicznego, z wykorzystaniem specjalistycznych programów przeznaczonych do modelowania procesów chemicznych w roztworach o wysokiej sile jonowej (opracowanych dla przemysłu naftowego i geotermalnego).

5. W obliczeniach frontu załoczonego wód złożowych R_f od odwiertu tłocznego najczęściej nie uwzględnia się procesu dyfuzji i dyspersji, co wynika z braku dostępnych i wiarygodnych danych. W przypadku właczania wód do warstw chłonnych, w których szczeliny odgrywają podstawową rolę w przewodzeniu wody, proces dyfuzji można uznać za nieistotny w porównaniu do oddziaływania procesu dyspersji. Określenie wielkości dyspersji, najczęściej w sposób analityczny, wiąże się z koniecznością wyznaczenia lub przyjęcia miarodajnych wartości współczynnika dyspersji hydrodynamicznej.

6. Dokumentowanie hydrogeologiczne wymaga propozycji działań związanych z ochroną wód podziemnych w rejonie właczania wód złożowych do górotworu. Rekomenduje się zakres działań opracowany na podstawie rozpoznanych właściwości fizyczno-chemicznych wód w warstwie chłonnej, wód włączanych oraz prognozy zmian warunków hydrogeochemicznych na skutek właczania wód, z uwzględnieniem wpływu na użytkowe poziomy wodonośne.

Autorzy artykułu dziękują Recenzentom za konstruktywne uwagi, które przyczyniły się do uzupełnienia treści publikacji, a także pracownikom PGNiG za liczne rozmowy i uwagi na temat zakresu prowadzonych prac i oczekiwań ze strony dokumentacji hydrogeologicznej. Badania zostały sfinansowane ze środków statutowych Uniwersytetu Warszawskiego

LITERATURA

- BIAŁY E., KASZA P. 2011 – O rozwoju stymulacji wydobycia w polskim górnictwie naftowym. Instytut Nafty i Gazu, Krosno. http://wykop.pl/pdf/ama/Orozwojustymulacji_wydobyciawpolskim.pdf (dostęp 10.05.2017)
- BIELEC B., KĘPIŃSKA B. 2012 – Testowanie badawcze „miękkiego kasowania” w geotermalnych otworach chłonnych. Zesz. Nauk. IGSMiE PAN, 82: 71–87.
- BRADLEY H.B. 1992 – Petroleum engineering handbook. Soc. Petrol. Eng., Richardson, USA.
- CHOWANIEC J., POPRAWA D., WITEK K. 2001 – Występowanie wód termalnych w polskiej części Karpat. Prz. Geol., 49 (8): 734–742.
- CLAUSER C., VILLINGER H. 1990 – Analysis of Conductive and Convective Heat Transfer in a Sedimentary Basin, Demonstrated for the Rheingraben. Geophys. J. Int., 100 (3): 393–414.
- CZUPSKI M. 2010 – Ocena efektywności kwasowania matrycowego formacji węglanowych. Nafta-Gaz, 66 (2): 100–106.
- DYREKTYWA 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej.
- FETTER C.W. 2001 – Applied hydrogeology 4th edition. Upper Saddle River, New Jersey.
- FETTKE C.R. 1938 – The Bradford oil field, Pennsylvania and New York. Mineral Resources Report M21, Pennsylvania Geological Survey, Harrisburg, Pennsylvania: 298–301.
- JANOHA A., KLUK D. 2005 – Aspekty chemizmu zatłaczania wód kopalnianych do horyzontów chłonnych. WUG, 11: 17–21.
- JIA H.Y., QU Z.H. 2000 – A study on formation scaling tendency for water flooding oilfields. Petrol. Explor. Dev., 28 (1): 89–91.
- KOWAL A.L., ŚWIDERSKA-BRÓŻ M. 2000 – Korozyjność wody [W:] Oczyszczanie wody. PWN, Warszawa-Wrocław: 144.
- KROGULEC E., SAWICKA K. 2013 – Organizacja sieci monitoringowych wód podziemnych w rejonach poszukiwania i udostępniania złóż węglowodorów z formacji łupkowych. Biul. Państ. Inst. Geol., 456: 327–334.
- KROGULEC E., SAWICKA K. 2015 – Groundwater protection in shale gas exploration areas – a Polish perspective. Episodes – J. Intern. Geosci., 38 (1): 9–20.
- KÜHN M., BARTELS J., PAPE H., SCHNEIDER W., CLAUSER C. 2002 – Modeling Chemical Brine-Rock Interaction in Geothermal Reservoirs. Chapter Water-Rock Interaction. Volume 40 of the series Water Science and Technology Library, 147–169.
- LEWKIEWICZ-MAŁYSA A., KONOPKA E. 2009 – Ochrona naturalnych właściwości zbiornikowych górotworu jako składowiska odpadów wód złożowych. Górnictwo i Geoinżynieria, 33 (4): 177–188.
- LEWKIEWICZ-MAŁYSA A., WINID B. 2011 – Geologiczne i geochemiczne aspekty chłonności otworów wykorzystywanych do zatłaczania wód złożowych. Rocz. Ochr. Środ., 13: 1985–2000.
- LIANG G.C., ZHENG Y.P., ZHANG J.H. 2006 – The scaling mechanism and antiscala measures of lu-liang oil field production system. J.-South. Petrol. Inst., 28 (6): 69.
- LI Z., ZHANG D., QIN G., GUO L., LI W. 2014 – Studies on the Scaling of High Pressure and Low Permeability Oil Reservoir Water Injection Well. Adv. Petrol. Explor. Dev., 8 (1): 1–8.
- LUBAŚ J., SZOTT, W., DZIADKIEWICZ M. 2012 – Analiza możliwości zwiększenia stopnia szczypania zasobów złóż ropy naftowej w Polsce. Nafta-Gaz, 8: 481–489.
- MAŁECKI J.J., NAWALANY M., WITCZAK S., GRUSZCZYŃSKI T. 2006 – Wyznaczanie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym dla potrzeb badań hydrogeologicznych i ochrony środowiska. Poradnik metodyczny. Ministerstwo Środowiska. Warszawa.
- MERDHAH A.B.B., YASSIN A.A.M. 2007 – Barium Sulfate Scale Formation in Oil Reservoir During Water Injection at High-Barium Formation Water. J. Appl. Sci., 7 (17): 2393–2403.
- PARKHURST D.L., APPELLO C.A.J. 1999 – User’s guide to PHREEQC (Version 2). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculation. USGS, Water-resources investigations report, 99–4259.
- PITZER K.S. 1991 – Ion interaction approach: Theory and data correlation. [W:] Pitzer K.S. (red.), Activity Coefficients in Electrolyte Solutions CRC Press Boca Raton, 2nd Edition, 76–153.
- ROGOŹ M. 1992 – Geologiczne i środowiskowe uwarunkowania włączania cieczy do górotworu. Prz. Gór., 10.
- ROGOŹ M. 2004 – Hydrogeologia kopalniana z podstawami hydrogeologii ogólnej. GIG, Katowice.
- ROGOŹ M. 2012 – Metody obliczeniowe w hydrogeologii. Wyd. Śląsk, Katowice.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. Dz.U. z 2016 r. poz. 2033.
- RÓŹKOWSKI A. 2008 – Środowisko hydrogeologiczne utworów podłoża karbonu produktywnego w zapadlisku górnośląskim. Prz. Geol., 56 (6): 490–494.
- SHUTEMOV D. 2013 – Modeling and Management of Scale Potential in an Oil Field Production Network. Norwegian University of Science and Technology. <http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:648700/FULLTEXT01.pdf> (dostęp 10.05.2017).
- ŚLIZOWSKI K. 2002 – Hydrogeologiczne i górnicze kryteria składowania ciekłych odpadów niebezpiecznych w głębokich strukturach przepuszczalnych. Tech. Poszuk. Geol., 1–2: 29–36.
- SPITZ K., MORENO J. 1996 – A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling. Wiley.
- USTAWA o swobodzie działalności gospodarczej. Dz.U. z 2004 r. nr 173 poz. 1807 z późn. zm.
- USTAWA Prawo geologiczne i górnicze. Dz.U. z 2017 r. poz. 2126.
- USTAWA Prawo ochrony środowiska. Dz.U. nr 62 poz. 627 z 2001 r. z późn. zm.
- WALIGÓRA J., SOŁTYSIAK M. 2011 – Zatłaczanie wód pozabiegowych w utwory serii węglanowej dewonu w uzdrowisku Ustroń. Biul. Państ. Inst. Geol., 12/2: 701–708.
- WITHERSPOON P.A., MUELLER T.D., DONAVAN R.W. 1962 – Evaluation of underground gas-storage conditions in aquifers through investigations of groundwater hydrology. J. Petrol. Eng., 14 (5): 555–561.
- WRIGHT C.C., CHILINGARIAN G.V. 1989 – Water quality for subsurface injection. [W:] Robertson J.O., Chilingarian G.V., Kumar S. (red.), Surface Operations in Petroleum Production. Elsev. Sci., 119–171.
- ZHENG G.C., BENNETT G.D. 2002 – Applied Contaminant Transport Modeling, 2nd Edition. John Wiley & Sons.

Praca wpłynęła do redakcji 17.10.2017 r.
Akceptowano do druku 7.02.2018 r.