

RADOSŁAW TARKOWSKI*, BARBARA ULIASZ-MISIAK**, EWA SZARAWARSKA***

Monitoring podziemnego składowania CO₂

Słowa kluczowe

Dwutlenek węgla, podziemne magazynowanie, monitoring, metody geofizyczne

Streszczenie

W artykule omówiono metody monitoringu podziemnego składowania dwutlenku węgla stosowane na świecie, a to: pomiary parametrów złożowych i eksploatacyjnych, bezpośrednie metody pomiarowe dla detekcji CO₂, pośrednie metody detekcji chmury CO₂ (profilowanie otworowe: indukcyjne, gamma, neutronowe i akustyczne, badania sejsmiczne 3-D w odstępach czasowych, sejsmika międzyotworowa i elektromagnetyczny monitoring sekwestracji CO₂, tomografię elektrooporową, monitoring grawimetryczny poziomów wodonośnych, sejsmiczny monitoring pasywny), metody monitoringu satelitarnego i lotniczego w celu badań deformacji powierzchni terenu.

Scharakteryzowano badania dotyczące monitoringu w kilku obecnie realizowanych projektach podziemnego zatłaczania dwutlenku węgla.

Wprowadzenie

Rosnąca koncentracja antropogenicznego CO₂ w atmosferze i jej wpływ na zmiany klimatyczne leżą u podstaw badań zmierzających do ograniczenia emisji tego gazu do atmosfery (White i in. 2004). Składowanie CO₂ emitowanego przez przemysł w głębokich formacjach geologicznych jest rozważane jako metoda redukcji emisji tego gazu do atmosfery. Wzrastające zainteresowanie tym sposobem unieszkodliwienia CO₂ wymaga opracowania

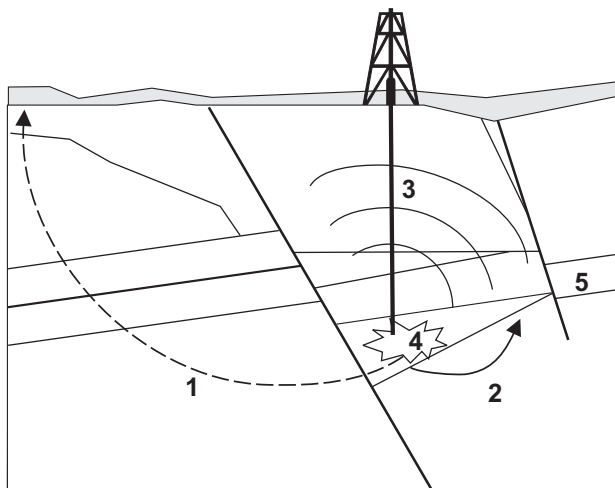
* Dr hab. inż., ** Dr inż., *** Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

Recenzował doc. dr hab. inż. Zenon Pilecki

odpowiednich technologii i oszacowania, czy metoda ta może być wdrożona bezpiecznie i efektywnie.

Jako miejsca podziemnego składowania rozważane są złoża węglowodorów, pokłady węgla, poziomy wodonośne (Emberley i in. 2002; Tarkowski, Uliasz-Misiak 2003). Złoża węglowodorów są szczególnie odpowiednie do składowania CO₂, gdyż zostały one przez naturę sprawdzone jako szczelne pułapki. W przypadku składowania CO₂ w głębokich poziomach wodonośnych szczególną uwagę zwraca się na problem szczelności geologicznej tych struktur. Składowanie CO₂ w pokładach węgla wykorzystuje chemiczne wiązanie CO₂ z matrycą skalną. W każdym rozważanym przypadku bezpieczeństwo składowania zależy nie tylko od rodzaju pułapki czy skały zbiornikowej, ale również od procesów zachodzących w złożu wskutek zatłaczania CO₂. Wycieki gazu z podziemnego składowiska dwutlenku węgla mogą następować przez nieszczelności w otworach zatłaczających i obserwacyjnych lub przez naturalne drogi migracji takie jak uskoki (rys. 1) (Moberg i in. 2002; Emberley i in. 2002).

Przypuszcza się, że po kilkuset lub kilku tysiącach lat część CO₂ rozpuści się w płynach złożowych, część wejdzie w reakcje z minerałami i utworzy matrycę skalną. Po rozpuszczeniu lub przereagowaniu CO₂ nie będzie migrował ku powierzchni, nawet przy braku dostatecznego uszczelnienia. Te dwa główne założenia są podstawą dla bezpiecznego podziemnego składowania CO₂. Realizacja tych założeń wymaga kontroli, poczynając od momentu wyboru miejsca lokalizacji składowania CO₂, a kończąc na monitoringu po zakończeniu procesu składowania i zamknięciu składowiska.



Rys. 1. Potencjalne ścieżki ucieczki CO₂ ze składowiska (Emberley i in. 2002)

1 — potencjalny długotrwały wyciek, 2 — nagły wyciek, 3 — indukowane zdarzenie sejsmiczne,
4 — rozerwanie skał, 5 — wyciek do poziomego wodonośnego

Fig. 1. Potential paths of CO₂ escape from the place of sequestration (Emberley et al. 2002)

1 — potential long term leakage, 2 — sudden leakage, 3 — induced seismic event, 4 — rocks' disruption,
5 — leakage to aquifer

TABELA 1

Metody monitoringu (Chalaturnyk, Gunter 2004)

TABLE 1

Methods of monitoring (Chalaturnyk, Gunter 2004)

Cel monitoringu	Sposoby monitoringu
Lokalizacja chmury CO ₂	Sejsmika refleksyjna w odstępach czasowych (2D, 3D)
	Pionowe profilowania sejsmiczne i sejsmika międzyotworowa
	Badania metodami elektrooporowymi i elektromagnetycznymi
	Satelitarne zdjęcia deformacji powierzchni terenu
	Satelitarne zdjęcia zmian wegetacji
	Pomiary grawimetryczne
	Monitoring ciśnienia złożowego
	Pobór próbek na głowicy otworu i z formacji
	Naturalne i sztuczne wskaźniki
Zmiany geomechaniczne identyfikowane w otworach obserwacyjnych lub eksploatacyjnych	
Wczesne ostrzeżenie o wadliwości miejsca magazynowania	Sejsmika refleksyjna w odstępach czasowych (2D, 3D)
	Pionowe profilowania sejsmiczne i sejsmika międzyotworowa
	Satelitarne zdjęcia deformacji powierzchni terenu
	Monitoring otworu zatłaczającego i ciśnienia złożowego
	Monitoring ciśnienia i geochemiczny w nadkładzie
	Monitoring mikrosejsmiczności lub sejsmiczny monitoring pasywny
Koncentracja i strumień CO ₂ na powierzchni ziemi	Czujniki IR do pomiaru koncentracji CO ₂
	Pobór próbek powietrza i wykorzystanie chromospektrometrii gazowej
	Naturalne i sztuczne wskaźniki
	Hiperspektralne obrazy
Stan otworu zatłaczającego, wielkość przepływu i ciśnienia	Profilowania otworowe (profilowania stanu otworu i jądrowe)
	Ciśnieniomierze wgłębne i na głowicy otworu
	Pomiary ciśnienia w przestrzeni pierścieniowej otworu
	Pomiary przepływu
	Pomiary powierzchniowe CO ₂ w pobliżu miejsca zatłaczania lub w rejonach zagrożonych
Rozpuszczalność i mineralne wiązanie	Pobór próbek płynu złożowego na głowicy lub w formacji
	Główne jony i izotopy
	Naturalne i sztuczne wskaźniki
Wyciek wzdłuż uskoku i spękań	Sejsmika refleksyjna w odstępach czasowych (2D, 3D)
	Pionowe profilowania sejsmiczne i sejsmika międzyotworowa
	Badania elektryczne i elektromagnetyczne
	Satelitarne zdjęcia deformacji powierzchni terenu
	Monitoring ciśnienia złożowego i ciśnienia w poziomie wodonośnym
	Monitoring mikrosejsmiczności lub sejsmiczny monitoring pasywny
	Pobór prób wody gruntowej i ze strefy aeracji
	Zmiany w wegetacji
Jakość wody gruntowej	Pobór próbek wody gruntowej i analizy geochemiczne z otworów monitorujących
	Naturalne i sztuczne wskaźniki

Monitoring zatłaczania i składowania CO₂ prowadzony jest przy wykorzystaniu różnych metod (tab. 1). Stosowane są metody geofizyczne, geochemiczne i inne. Ich zadaniem jest udokumentowanie jak największej ilości procesów dynamicznych związanych z wprowadzaniem do podziemnego zbiornika dwutlenkiem węgla.

1. Cele monitoringu podziemnego składowania CO₂

Podziemne składowanie CO₂ niesie ze sobą różnego rodzaju zagrożenia dla ludzi i środowiska, w skali globalnej lub lokalnej. Monitoring podziemnego składowania CO₂ leży u podstaw pomyślnego przeprowadzenia całego zabiegu. Organy nadzorcze będą wymagały zapewnienia, że podziemne składowanie jest bezpieczne i nie spowoduje znaczących zmian w środowisku (Benson, Myer 2002).

Głównym celem monitoringu podziemnego składowania CO₂ jest śledzenie lokalizacji gazu pod ziemią, kontrola czy otwory zatłaczające w trakcie zatłaczania i po jego zakończeniu nie wykazują nieszczelności, weryfikacja ilości dwutlenku węgla zatłoczonego pod ziemię, jak również kontrola parametrów związanych z zatłaczaniem. Dodatkowe cele to kontrola jakości wód podziemnych, ekosystemów i bezpieczeństwa ludzi na terenach potencjalnie narażonych na wyciek CO₂ z miejsca składowania i inne.

Przeprowadzenie bezpiecznego i efektywnego składowania CO₂ wymaga rozważenia szerokiego zakresu zagadnień dotyczących głównie bezpieczeństwa i ochrony środowiska. Najważniejsze spośród nich to: rozprzestrzenienie, lokalizacja i charakter wycieków CO₂ z miejsca składowania, prowadzenie efektywnej kontroli urządzeń zatłaczających, prędkości zatłaczania, ciśnień głowicowych i złożowych. Pierwsze z nich wymagają monitorowania pod powierzchnią ziemi rozprzestrzenienia się chmury CO₂. W przypadku wycieku ze struktury geologicznej, w której CO₂ jest składowany, konieczne jest zastosowanie również monitoringu strumienia CO₂ i jego koncentracji na powierzchni terenu (Benson, Myer 2002).

Dodatkowo, powinno się monitorować inne parametry związane ze składowaniem CO₂ lub w przypadku wycieku mogące określić jego źródło, opracować schemat naprawczy i ocenić wpływ zatłaczania na środowisko naturalne. Dotyczy to w szczególności:

- oszacowania efektywności wykorzystania objętości składowania,
- dostarczenia informacji o postępie rozpuszczania i mineralnego wiązania CO₂,
- zlokalizowania uskoków i innych struktur przez które może wyciekać CO₂,
- określenia jakości wód podziemnych,
- wykrycia i monitorowania koncentracji CO₂ w strefie wadycznej i glebie,
- monitorowania wpływu na ekosystem.

Znajomość tych zagadnień pozwoli na bezpieczniejsze i efektywniejsze prowadzenie podziemnego składowania CO₂.

Program monitoringu geologicznego magazynowania CO₂ można podzielić na trzy etapy:

- monitoring operacyjny — wykonywany w czasie zatłaczania,
- monitoring weryfikacyjny,

— monitoring środowiskowy.

Etapy te różnią się między sobą intensywnością prac i czasem trwania, jak również technologią. Planując program monitoringu na złożu, dla każdego etapu, należy zdefiniować warunki projektu, przewidzieć mechanizmy przepływu płynów złożowych, odpowiedzieć na pytania natury technicznej, określić parametry jakie mają być mierzone, jak również spodziewaną wielkość tych zmian, dokonać wyboru systemu monitoringu i lokalizacji oraz zaplanować częstotliwość monitoringu (Chalaturnyk, Gunter 2004).

2. Metody monitoringu podziemnego składowania CO₂

Techniki pomiarowe stosowane w monitoringu podziemnego składowania CO₂ są zapożyczone z innych zastosowań, włączając w to przemysł naftowy, magazynowanie gazu ziemnego, składowanie odpadów ciekłych i niebezpiecznych w formacjach geologicznych, monitoring wód podziemnych, badania ekosystemów i inne (Benson i in. 2002a, 2002b). Do monitoringu zastosować można bezpośrednie pomiary stężenia CO₂ w powietrzu, glebie, wodach podziemnych oraz pośrednie mające na celu lokalizację tego gazu w strukturze (por. tab. 1) (Benson, Myer 2002).

2.1. Pomiary parametrów złożowych i eksploatacyjnych

W monitoringu podziemnego zatłaczania CO₂ konieczne jest prowadzenie pomiarów parametrów złożowych i eksploatacyjnych, w tym: prędkości zatłaczania CO₂, ciśnienia i temperatury na głowicy oraz w złożu. Pomiary te są powszechnie stosowane w przemyśle naftowym (Brown, Hartog 2002).

2.2. Bezpośrednie metody pomiarowe dla detekcji CO₂

Bezpośrednie pomiary CO₂ w powietrzu, wodzie lub glebie są istotną częścią monitoringu. Monitoruje się koncentrację CO₂ w powietrzu glebowym w pobliżu otworu zatłaczającego lub otworów zlikwidowanych, a okresowo pobliskie otwory i ujęcia wodne. Jeśli istnieją jakies przesłanki, że CO₂ wycieka ze struktury i migruje ku powierzchni, koncentracja CO₂ powinna być monitorowana w strefie wadycznej i w glebie (Strutt i in. 2002).

2.2.1. Sensory do pomiaru CO₂ w powietrzu

Pomiary stężenia CO₂ wykonywane są w powietrzu atmosferycznym i glebowym. Pomiary wykonywane są *in-situ* lub w laboratoriach. Zwykle polowe pomiary stężenia CO₂ w powietrzu glebowym lub strumieniu z gleby wykonuje się przy wykorzystaniu prostych analizatorów IR. Wykorzystuje się do tych celów również czujniki chemiczne (Shuler,

Tang 2002). Koncentracje CO₂ w próbkach powietrza glebowego mierzone są również za pomocą chromatografów i spektrometrów masowych. Jednym ze sposobów monitorowania podziemnego składowiska CO₂ może być zdalne wykrywanie wycieków CO₂ do atmosfery poprzez satelity. Stosowane obecnie detektory podczerwieni nie są jednak w stanie wykryć niewielkich wycieków, dlatego też prowadzi się badania nad zastosowaniem laserów lotniczych LIDAR i DIAL pracujących na różnych częstotliwościach (Benson, Myer 2002).

2.2.2. Metody geochemiczne i wskaźnikowe

Metody geochemiczne i wskaźnikowe są wykorzystywane dla bezpośredniego monitoringu przemieszczania się CO₂ pod powierzchnią ziemi i poznania reakcji zachodzących pomiędzy CO₂ a płynami złożowymi i minerałami. Wykonuje się badania geochemiczne próbek płynów pobieranych próbnikami ze złoża lub na głowicy otworu. W próbkach oznacza się jony główne, pH, alkaliczność, izotopy stałe, gazy łącznie z węglowodorami, CO₂ i jego izotopy. Wyniki porównuje się z pomiarami wykonanymi przed procesem zatłaczania (tłem) (Gunter i in. 1998; Gunter, Perking 2001). Zmiany w składzie cieczy, jak i gazu w czasie wskazują na oddziaływanie pomiędzy płynami złożowymi, zatłoczonym CO₂ i skałami zbiornikowymi.

Naturalne wskaźniki (izotopy C, O, H oraz gazy szlachetne) mogą być źródłem informacji na temat przemieszczania się dwutlenku węgla pod powierzchnią ziemi oraz reakcji zachodzących w formacji skalnej (wytrącanie minerałów, rozpuszczanie skały zbiornikowej oraz zmiany jej przepuszczalności i porowatości) (Benson, Myer 2002; White i in. 2004). Pomiary ilości gazów szlachetnych dostarczają przydatnych informacji ze względu na to, że są to pierwiastki obojętne, nie reagujące ze skałami i płynami złożowymi. Izotop węgla ($\delta^{13}\text{C}$) wykorzystywany jest do śledzenia ilości zatłoczonego CO₂. Stosunek izotopów ¹³C/¹²C może wskazać na pochodzenie CO₂, gdyż gaz antropogeniczny różni się składem izotopowym od tego znajdującego się w atmosferze.

Celem oszacowania zakresu w jakim CO₂ reaguje z płynami złożowymi i minerałami wprowadza się wskaźniki — związki chemiczne (np. SF₆), mające zerową lub bardzo niską koncentrację pod powierzchnią ziemi. Są one wykrywalne przy niskich koncentracjach, charakteryzują się stałymi parametrami w warunkach złożowych, są bezpieczne dla środowiska oraz są łatwo wykrywalne.

Monitoring geochemiczny prowadzony na złożu Weyburn od 2000 roku wykazał znaczne zmiany w składzie chemicznym i izotopowym wód złożowych, zmiany pH o 0,5 i podwojenie alkaliczności w wyniku rozpuszczania kalcytu wywołanego reakcją z zatłoczonym dwutlenkiem węgla (Emberley i in. 2002).

2.3. Pośrednie metody pomiarów detekcji chmury CO₂

Poniżej scharakteryzowano metody wykrywania CO₂, stosowane dla śledzenia przesuwania się chmury tego gazu w miejscach gdzie nie ma otworów monitorujących. Do

pośrednich metod monitoringu zaliczamy: profilowanie otworowe (indukcyjne, gamma, neutronowe i akustyczne), monitoring geofizyczny (sejsmika, metody elektromagnetyczne, grawimetria), pomiary deformacji powierzchni terenu (przy użyciu inklinometru i bazujące na pomiarach satelitarnych). Użyteczność tych metod określona jest przez: próg wykrywalności CO₂, zakres w jakim sygnał jest jednoznacznie związany z obecnością CO₂, możliwością oceny ilościowej.

Największe doświadczenia dotyczące monitoringu zatłaczania CO₂ zgromadzono w ramach projektu Sleipner. Stwierdzono, że bardzo dobre efekty monitorowania chmury CO₂ daje wykorzystanie trójwymiarowych badań sejsmicznych (Arts i in. 2002).

2.3.1. Metody geofizyczne

Monitoring wykorzystujący techniki geofizyczne pozwala na kontrolowanie znacznych obszarów. Monitoring międzyotworowy jest techniką dostarczającą większą ilość informacji niż dane z pojedynczego otworu zastosowanie zaś trzeciego otworu pozwala na stworzenie trójwymiarowego obrazu. W przypadku większych interwałów głębokościowych, ze względu na to, że CO₂ ma mniejszą gęstość i większą ściśliwość niż ropa i woda złożowa, mogą być stosowane również metody elektrooporowe, grawimetryczne i sejsmiczne. Metody grawimetryczne rejestrują zmiany gęstości, elektryczne reagują na zmiany oporności pozornej, sejsmika natomiast rejestruje zmiany gęstości i sprężystości. Właściwości fizyczne CO₂, płynów złożowych i ich mieszanin są znane, dlatego też można podjąć próbę oszacowania zmian jakie wystąpią we właściwościach geofizycznych po wprowadzeniu CO₂ do zbiornika.

Profilowania otworowe (indukcyjne, gamma, neutronowe i akustyczne). W przypadku geologicznego składowania CO₂ profilowanie otworowe wykonywane jest przede wszystkim w celu stwierdzenia stanu otworu i zlokalizowania uszkodzeń jako potencjalnych miejsc wycieku CO₂. Są to jednak metody o małej dokładności nie zawsze pozwalające na wykrycie niewielkich uszkodzeń.

Metody sejsmiczne. Metody sejsmiczne umożliwiają zlokalizowanie chmury CO₂. Do monitoringu podziemnego składowania stosuje się zdjęcia sejsmiczne 3-D wykonywane w odstępach czasowych, sejsmikę międzyotworową i sejsmiczny monitoring pasywny.

Badania sejsmiczne w odstępach czasowych pozwalają na stwierdzenie zmian wywołanych zatłaczaniem dwutlenku węgla do formacji geologicznej. Obiecującą techniką są zdjęcia sejsmiczne 3-D wykonywane w odstępach czasowych, co może pomóc w wykryciu przemieszczania się dwutlenku węgla w formacji geologicznej. Wpływ CO₂ na sygnał sejsmiczny jest znaczący, obecność gazu przejawia się wzrostem współczynnika odbicia. Poniżej chmury CO₂ obserwuje się efekt *push down* (opadnięcie) wywołany mniejszą prędkością fali w skale nasyconej gazem w stosunku do tej nasyconej wodą. Ponieważ wpływ CO₂ na obraz sejsmiczny jest duży zarówno w zakresie amplitud jak i obserwowanego efektu *push down*, wydaje się, że wykonywane co jakiś czas badania sejsmiczne mogą być odpowiednią techniką geofizyczną służącą do monitoringu zatłaczania CO₂ (Arts i in. 2002).

Sejsmika międzyotworowa zastosowana do pomiarów CO₂ może umożliwić prześledzenie zmian właściwości zbiornika z dokładnością kilku metrów. Pomiarы wykonywane w odstępach czasowych pozwalają na ukazanie zmian zachodzących w okolicy otworów przed, w trakcie jak i po zatłoczeniu CO₂ oraz oszacowanie zmian ciśnienia, nasycenia wodą i nasycenia CO₂ (Hoversten i in. 2002).

Sejsmiczny monitoring pasywny jest techniką mającą na celu zobrazowanie dynamicznej reakcji zbiornika na zatłaczanie dwutlenku węgla. Metoda ta może być uzupełnieniem innych metod monitoringu obrazujących przemieszczanie się CO₂ w zbiorniku. Zatłaczanie CO₂ powoduje deformację skał. Deformacje związane z tymi zjawiskami mogą wywołać zarówno dyskretne emisje akustyczne, jak i mikrotrzęsienia ziemi. Mogą być one również związane ze zmianami ciśnienia wynikającymi z ruchu gazu. Czasowe i przestrzenne wariacje w rozkładzie mikrosejsm mogą być wykorzystane do śledzenia ruchu gazu oraz do stworzenia modelu geomechanicznego, wiążącego zmiany ciśnienia z ruchem gazu. Przykład złoża Weyburn dowodzi, że pasywny monitoring sejsmiczny dobrze pokazuje dyskretne zdarzenia sejsmiczne w czasie zatłaczania CO₂. Lokalizacja tych zdarzeń rozciąga się od otworu zatłaczającego do sąsiedniego otworu eksploatacyjnego — gdzie następuje zwiększone wydobycie gazu (Maxwell i in. 2004).

Monitoring międzyotworowy metodami elektromagnetycznymi (EM). Metoda międzyotworowych zdjęć elektromagnetycznych wykorzystuje różnice w indukowanych polach elektromagnetycznych, w różnych materiałach. Skały zawierające wodę przewodzą prąd znacznie lepiej niż te wypełnione ropą. EM może być uzupełnieniem zdjęć sejsmicznych, które mają ograniczoną zdolność rozróżniania ropy i innych cieczy. Zdjęcia sejsmiczne są najlepsze do odwzorowania struktury geologicznej, podczas gdy metody EM są bardziej wrażliwe na różne typy płynów znajdujących się w skale.

Tomografia metodą elektrooporową (ERT). Dwutlenek węgla charakteryzuje się wysoką opornością, dlatego też metody elektrooporowe są odpowiednie dla monitoringu składowania w formacjach zawierających wodę złożową. Obecnie stosuje się tomografię o wysokiej rozdzielczości rejestrującą właściwości elektryczne w celu charakterystyki złoża oraz monitoringu przepływu płynów (np. wyciek podziemnych zbiorników). Do monitoringu podziemnego składowania CO₂ stosuje się pomiary ERT wykorzystujące jako elektrody podpowierzchniową infrastrukturę złoża (orudowanie otworów). Modelowania numeryczne i badania laboratoryjne potwierdzają, że zmiany w oporności, np. w wyniku migracji CO₂ w złożu, mogą być zobrazowane przy wykorzystaniu ERT (Newmark i in. 2002).

Monitoring grawimetryczny. Grawimetria ma niższą rozdzielczość niż sejsmika, jednakże powtarzane bardzo precyzyjne pomiary mikrogravimetryczne mogą zapewnić lepsze informacje dotyczące rozkładu gęstości i masy CO₂. Dzięki tym badaniom może zostać wykryta ucieczka przez nadkład skalny znacznych ilości dwutlenku węgla. Metoda ta pozwala również uzyskać informację dotyczącą rozpuszczania CO₂ w wodzie złożowej. Prowadzone na złożu Sleipner badania grawimetryczne dowodzą, że takie pomiary wykonywane w odstępach czasowych mogą wykryć zarówno pionowe przemieszczenia podłoża

(w przypadku złoża Sleipner dna morskiego) rzędu 0,5 cm jak i anomalie grawimetryczne rzędu 5 μ Gal. (Buller i in. 2004).

2.3.2. Deformacje powierzchni terenu, monitoring satelitarny i lotniczy

Postęp w technice zobrazowań satelitarnych dostarcza nowych możliwości do wykorzystania deformacji powierzchni terenu i obrazów spektralnych do pośredniego wyznaczania migracji CO₂. Zatloczony pod powierzchnię Ziemi dwutlenek węgla może spowodować wzrost ciśnienia formacji geologicznej do takiego stopnia, że wywoła to niewielkie wypiętrzenie powierzchni Ziemi. Istnieją urządzenia mierzące takie deformacje z dokładnością do części milimetra (np. pochyłomierze). W połączeniu z zastosowaniem metod monitoringu satelitarnego i lotniczego można identyfikować małe, okresowe zmiany powierzchni, które mogą być wskaźnikiem zmian ciśnienia wywołanych zatłaczaniem CO₂ (Shuler, Tang 2002).

Technika ta była stosowana dotychczas np. w monitoringu złożowym, badaniach poziomów wodonośnych oraz w wykrywaniu CO₂ pochodzącego z odgazowania wulkanu Mammoth Mountain w Kalifornii (Vasco i in. 2001; Benson, Myer 2002). Uważa się, że rozwój tych technologii może dostarczyć użytecznych i stosunkowo niedrogich metod monitoringu migracji CO₂ na powierzchni i w zróżnicowanych ekosystemach.

3. Przykłady monitoringu podziemnego składowania dwutlenku węgla

Obecnie na świecie działa kilka projektów zatłaczania i magazynowania CO₂, których istotną częścią jest monitoring mający na celu kontrolę i obserwację zachowania się CO₂ pod powierzchnią ziemi. Dotychczas zrealizowano dwa duże projekty dotyczące monitoringu: projekt SACS — składowanie w poziomach wodonośnych oraz projekt Weyburn. Prowadzone są mniejsze projekty monitoringu i zatłaczania CO₂: poziomy wodonośny — projekt Frio Brine (Teksas, USA), projekt sekwestracji CO₂ Nigatta (Japonia), projekt Mountaineer (Wirginia, USA); wyeksploatowane złoża ropy naftowej — projekt West Pearl Queen (Nowy Meksyk, USA), Teapot Dome (Wyoming, USA), Sibilla (Włochy) (Gale 2004).

Wymienione projekty dostarczyły bardzo cennych informacji dotyczących rozprzestrzeniania się zatłoczonego CO₂. W celu lepszego zrozumienia procesów związanych z podziemnym składowaniem CO₂ planowana jest realizacja kolejnych projektów monitoringu: CO2ReMoVe, InSalah (Algieria), Snohvit (Morze Barentsa).

SACS 1 i 2 (złóże Sleipner)

Pierwsze przemysłowe przedsięwzięcie zatłaczania i składowania CO₂ prowadzone jest przez firmę Statoil na Morzu Północnym na złożu Sleipner, gdzie od 1996 roku dwutlenek węgla zatłaczany jest do poziomu wodonośnego. Równocześnie z operacjami przemy-

słowymi, w ramach projektu SACS 1 i 2 (Saline Aquifer CO₂ Storage) na złożu Sleipner w latach 1999—2002 realizowano badania monitoringu CO₂.

Przed rozpoczęciem zatłaczania wykonano szereg badań w celu rozpoznania zbiornika (formacja Utsira): zdjęcie sejsmiczne 3D, profilowania otworowe, modelowanie zachowania się zbiornika, badanie rdzeni zarówno z formacji docelowej, jak i z nadkładu skalnego. Przemieszczanie się CO₂ monitoruje się za pomocą zdjęć sejsmicznych 3D w odstępach czasowych (lata 1999, 2001, 2002). Przeprowadzono także badanie grawimetryczne (2002); kolejne planuje się w roku 2005. Dodatkowo prowadzi się badania dotyczące zachowania się zbiornika, w warunkach zatłaczania CO₂, reakcji geochemicznych, przepływu płynów złożowych (Arts i in. 2004).

Wyniki projektu SACS pokazują, że zatłoczony pod ziemię CO₂ można z powodzeniem monitorować przy użyciu sejsmiki *time lapse seismic* (zdjęcia sejsmiczne wykonywane w odstępach czasowych). Badania geochemiczne, w tym symulacje komputerowe, pozwoliły na przebadanie problemów dotyczących oddziaływań płyn–skała–dwutlenek węgla oraz na lepsze poznanie mechanizmów wiązania zatłaczanego gazu. W ramach tego projektu opracowano również poradnik — „Best Practise Manual” (Chadwick i in. 2002).

Weyburn

W Kanadzie w maju 2000 roku firma EnCana rozpoczęła zatłaczanie CO₂ do szcherpanego złoża węglowodorów w celu zwiększenia wydobycia ropy naftowej z jednoczesnym składowaniem dwutlenku węgla. Równocześnie realizowany jest międzynarodowy projekt dotyczący monitoringu zatłaczania i składowania CO₂ (CO₂ Geological Storage R&D Project).

Program monitoringu podzielono na kilka kluczowych zadań (Brown i in. 2004):

- badanie próbek płynów złożowych;
- przygotowanie „ram geologicznych”, tzn. ustalenie i zrozumienie warunków w jakich tworzył się zbiornik;
- analizy geochemiczne mające na celu śledzenie reakcji zachodzących między zatłoczonym CO₂ a matrycą skalną. Pobrano próbki przed rozpoczęciem procesu zatłaczania w celu ustalenia tła, które stanowi poziom odniesienia dla kolejnych wyników. Analizy te pozwalają na określenie składu izotopowego węgla (jako dwutlenku węgla) w pobliżu otworów, co umożliwi określenie źródła CO₂;
- analizy geofizyczne obejmujące zdjęcia sejsmiczne 3D przed rozpoczęciem zatłaczania w celu ustalenia stanu zbiornika i późniejszego porównania wyników kolejnych zdjęć sejsmicznych 3D wykonanych w odstępach czasowych w czasie zatłaczania, jak i po jego zakończeniu; dodatkowo wykonano pionowe profilowania sejsmiczne oraz sejsmikę międzyotworową;
- oszacowanie zagrożenia jakie stanowi zbiornik z CO₂, które można dokonać po wykonaniu wyżej wspomnianych badań oraz przeanalizowaniu sposobów wykorzystania terenu w przyszłości.

Rezultaty dotychczas przeprowadzonych badań wskazują na możliwość monitorowania CO₂ w złożach ropy naftowej przy wykorzystaniu metod geochemicznych monitoringu,

metod sejsmiki powierzchniowej, sejsmiki międzyotworowej, drogi migracji poza złożę i długoterminowego zachowania się zatłoczonego gazu (Gale 2004).

Nagaoka

Od 2003 roku w Japonii zatłacza się dwutlenek węgla do poziomu wodonośnego na złożu Nagaoka. Główną metodą zastosowaną do monitoringu zachowania się CO₂ w zbiorniku jest zdjęcie sejsmiczne 3D (2003 r., oraz kolejne planowane na rok 2005).

Przed rozpoczęciem zatłaczania przeprowadzono następujące obserwacje i pomiary (Kikuta i in. 2004):

- sejsmiczną tomografię międzyotworową mającą na celu ustalenie tła, a następnie określenie stref w których znajdował się CO₂;
- profilowanie otworowe (indukcyjne, gamma, neutronowe, akustyczne), wykonane po rozpoczęciu zatłaczania CO₂ w celu określenia momentu dotarcia zatłoczonego CO₂ do otworów obserwacyjnych;
- pomiary ciśnienia i temperatury na wylocie otworu i na poziomie zbiornika prowadzone w celu określenia zachowania się CO₂ pod powierzchnią;
- sejsmiczność indukowana.

Frio Brine Pilot

Jest to pilotażowy projekt zatłaczania CO₂ do piaskowców charakteryzujących się wysoką przepuszczalnością i dużą pojemnością. Zatłaczanie rozpoczęte jesienią 2004 roku poprzedzono licznymi pracami, które obejmowały m.in. zdjęcie sejsmiczne 3D, różnego rodzaju profilowania w otworach obserwacyjnych, badania rdzeni z formacji Frio, badania geochemiczne, sejsmikę międzyotworową, pionowe profilowania sejsmiczne oraz monitoring powierzchniowy wód. Planowany monitoring przemieszczania się zatłoczonego CO₂ będzie wykonany poprzez:

- narzędzia RST (Reservoir Saturation Tool) — badające nasycenie zbiornika;
- pobranie próbek wód złożowych oraz gazu; trzy wskaźniki zostaną wykorzystane w celu śledzenia CO₂: naturalne i wprowadzone gazy szlachetne; wprowadzone wskaźniki perfluorowęglanowe oraz naturalny stały skład izotopowy węgla i tlenu wCO₂;
- hydrologiczne zachowanie się dwóch faz (solanka i CO₂) będzie testowane przy użyciu przejściowej kontroli ciśnienia;
- pionowe profilowania sejsmiczne oraz sejsmikę międzyotworową powtarzaną po zatłoczeniu;

Profilowania, geochemia wód i gazu oraz powierzchniowy monitoring będą powtarzane w odstępach czasowych przez kilka miesięcy od 2004 roku do czasu ustalenia się warunków zbliżonych do pierwotnych.

In Salah

Projekt, którego celem jest magazynowanie CO₂ pod ziemią. Zatłaczanie CO₂ do poziomu wodonośnego rozpoczęło się w połowie 2004 roku i poprzedzone było badaniami, mającymi na celu ustalenie tła. Monitoring będzie oparty na profilowaniach otworowych,

badaniach sejsmicznych, analizach geochemicznych reakcji zachodzących między zatłoczonym CO₂ a skałami zbiornikowymi oraz na powierzchniowej kontroli ewentualnych wycieków CO₂ ze zbiornika (Riddiford i in. 2004).

Podsumowanie

Opisano szereg metod monitoringu podziemnego składowania dwutlenku węgla. Różnią się one między sobą przede wszystkim dokładnością, a co za tym idzie — kosztami. Te które mogą dać najdokładniejszy obraz sytuacji pod powierzchnią ziemi są kosztowne i przez to nie zawsze brane pod uwagę. Zastosowanie jak największej liczby metod, które często się wzajemnie uzupełniają, może zapewnić bardzo dokładną informację o zatłoczonym CO₂. Prezentacja przykładowych projektów zatłaczania dwutlenku węgla pokazuje jak dużą wagę przywiązuje się do monitoringu, gdyż tylko dzięki niemu można zapewnić bezpieczne magazynowanie CO₂ przez setki lat.

Kolejne lata będą niewątpliwie pogłębiały wiedzę na ten temat i pozwolą na określenie takiej kombinacji opisanych metod dla poszczególnych przypadków magazynowania CO₂, aby było one jak najbardziej efektywne i zapewniały bezpieczeństwo składowania CO₂ na wiele lat.

LITERATURA

- Arts R., Eiken O., Chadwick A., Zweigel P., Vander Meer L., Zinszer B., 2002 — Monitoring of CO₂ injected at Sleipner using time lapse seismic data. 6 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 1—4 October 2002.
- Arts R., Chadwick A., Eiken O., Zweige P., 2003 — Interpretation of the 1999 and 2001 time-lapse seismic data (WP 5.4) — TNO report NITG 03-064-B. Date 20 February 2003.
- Arts R., Chadwick A., Eiken O., 2004 — Recent time-lapse seismic data show no indication of leakage at the Sleipner CO₂ — injection site. 7 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), Vancouver, Canada, 5—9 September 2004.
- Benson S., Myer L., 2002 — Monitoring to ensure safe and effective geologic sequestration of carbon dioxide, IPCC workshop on carbon dioxide capture and storage, 2000.
- Benson S.M., Hepple R., Apps J., Tsang C.F., Lippmann M., 2002a — Lessons Learned from Natural and Industrial Analogues for Storage of Carbon Dioxide in Deep Geologic Formations, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51170.
- Benson S.M., Apps J., Hepple R., Lippmann M., Tsang C.F., Lewis C., 2002b — Health, Safety, and Environmental Risk Assessment for Geologic Storage of Carbon Dioxide: Lessons Learned from Industrial and Natural Analogues. 6 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 1—4 October, 2002.
- Brown G.A., Hartog A., 2002 — Optical Fiber Sensors in Upstream, Oil and Gas. *Journal of Petroleum Technology*.
- Brown K., Jazrawi W., Moberg R., Wilson M., 2004 — Role of Enhanced Oil Recovery in Carbon Sequestration the Weyburn Monitoring Project, a case study. 7 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), Vancouver, Canada, 5—9 September 2004.

- Buller A., Karstad O., de Koeijer G., 2004 — Carbon dioxide. Capture, Storage and Utilization. Research & Technology Memoir No. 5, 2004.
- Chadwick R.A., Kirby G.A., Holloway S., Gregersen U., Johannessen P.N., Arts R., 2002 — Saline Aquifer CO₂ Storage (SACS 2) — Final Report: Geological Characterisation of Utsira Sand reservoir and caprocks (Work Area 1). Keyworth, Nottingham British Geological Survey.
- Chalaturnyk R., Gunter W.D., 2004 — Geological storage of CO₂: time frames, monitoring and verification. 7 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), Vancouver, Canada, 5—9 September 2004.
- Emberley S., Hutcheon I., Shevalier M., Durocher K., Gunter W.D., Perkins E.H., 2002 — Geochemical monitoring of fluid — rock interaction and CO₂ storage at the Weyburn CO₂ injection enhanced oil recovery site, Saskatchewan, Canada. 6 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 1—4 October 2002.
- Gale J., 2004 — Overview of Worldwide Geological Storage Projects. IEA Greenhouse Gas R&D Programme CATO Project Launch Meeting Utrecht, The Netherlands 7th April 2004 — www.ieagreen.org.uk.
- Gunter W.D., Chalaturnyk R.J., Scott J.D., 1998 — Monitoring of Aquifer Disposal of CO₂: Experience from Underground Gas Storage and Enhanced Oil Recovery, Proceedings of GHGT-4, Interlaken, Switzerland.
- Gunter W.D., Perking E., 2001 — Geochemical Monitoring of CO₂ Enhanced Oil Recovery. Proceedings of the NETL Workshop on Carbon Sequestration Science, <http://www.netl.doe.gov/>.
- Hoversten G.M., Gritto R., Daley T.M., Majer E.L., Myer L.R., 2002 — Crosswell seismic and electromagnetic monitoring of CO₂ Sequestration. 6 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 1—4 October 2002.
- Kikuta K., Hongo S., Tanase D., Ohsumi T., 2004 — Field test of CO₂ injection in Nagaoka, Japan. 7 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), Vancouver, Canada, 5—9 September 2004.
- Maxwell S.C., White D.J., Fabriol H., 2004 — Passive Seismic Imaging of CO₂ Sequestration at Weyburn. Technical Abstracts, 74th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys.
- Moberg R., Stewart D.B., Stachniak D., 2002 — The IEA Weyburn CO₂ monitoring and storage project. 6 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 1—4 October 2002.
- Newmark R.L., Ramirez A.L., Daily W.D., 2002 — Monitoring carbon dioxide sequestration using electrical resistance tomography (ERT): a minimally invasive method, 6 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 1—4 October 2002.
- Riddiford F., Wright I., Bishop C., Espie T., Tourqui A., 2004 — Monitoring geological storage the in Salah gas CO₂ storage project. 7 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), Vancouver, Canada, 5—9 September 2004.
- Shuler P.J., Tang Y., 2002 — Atmospheric CO₂ monitoring systems — a critical review report of available techniques and technology gaps. Report for SMV group, The CO₂ Capture Project (CCP), 2002.
- Strutt M.H., Beaubien S.E., Baubron J.C., Brach M., Cardellini C., Granieri R., Jones D.G., Lombardi S., Penner L., Quattrocchi F., Voltattorni N., 2002 — Soil Gas as a Monitoring Tool of Deep Geological Sequestration of Carbon Dioxide: Preliminary Results from the Encana. EOR Project in Weyburn, Saskatchewan (Canada). 6 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 1—4 October 2002.
- Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., 2003 — Podziemne magazynowanie dwutlenku węgla. Przegląd Geologiczny, nr 5.
- Vasco D.W., Karasaki K., Kiyoshi K., 2001 — Coupled Inversion of Pressure and Surface Deformation Data, Water Resources Research.
- White D.J., Burrows G., Hajnal Z., Hirsche K., Hutcheon I., Majer E., Rostron B., Whittaker S., 2004 — Greenhouse gas sequestration in abandoned oil reservoirs: The International Energy Agency Weyburn pilot project. GSA Today, Volume 14, No 7, July 2004.
- Wilson E.J., Keith D.W., 2002 — Storage: understanding the rules of the underground. 6 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 1—4 October 2002.

MONITORING OF UNDERGROUND STORAGE OF CO₂**Key words**

Carbon dioxide, underground storage, monitoring, geophysical methods

Abstract

The article discusses methods used over the world for monitoring underground storage of carbon dioxide. The methods are: measurements of reservoir and exploitation parameters, direct measurements for CO₂ detection, indirect measurements for CO₂ plume detection (geophysical well — logging: induction, gamma ray, neutron, sonic; 3 D time — lapse seismics, cross-well seismics, electromagnetic monitoring of CO₂ sequestration, electric resistance tomography, gravimetric monitoring of aquifers, passive seismic monitoring), satellite and air monitoring for investigating land surface deformation.

Research on monitoring in presently operating projects of carbon dioxide underground injection is characterized.