

## Podziemne składowanie — sposób na dwutlenek węgla

Radosław Tarkowski\*, Barbara Uliasz-Misiak\*



R. Tarkowski

B. Uliasz-Misiak

Coraz powszechniej uważa się, że dwutlenek węgla jest główną przyczyną globalnego ocieplenia, a koncentracja tego gazu w atmosferze wzrasta z powodu działalności człowieka. Eksperci zgadzają się, że należy podjąć działania mające na celu redukcję emisji antropogenicznego CO<sub>2</sub> do atmosfery. Jednym z rozwiązań może być wychwytywanie CO<sub>2</sub> powstającego w procesach przemysłowych i składowanie tego gazu pod ziemią, w głębokich strukturach geologicznych. Problem wyłapywania i unieszkodliwiania CO<sub>2</sub> stał się aktualny na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku, co było związane z dyskusją dotyczącą efektu cieplarnianego oraz wpływu dwutlenku węgla na to zjawisko. Liczne, podjęte w tym zakresie działania, m.in. uzgodnienia międzynarodowe, europejskie, w tym unijne projekty badawcze, potwierdzają wagę przywiązywaną do unieszkodliwiania antropogenicznego dwutlenku węgla.

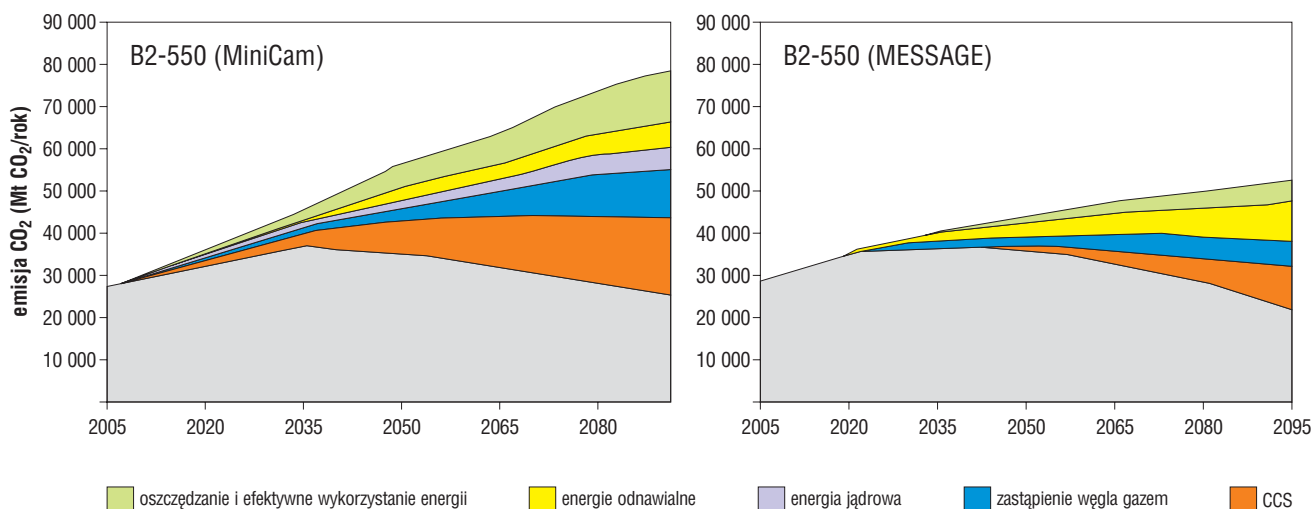
### Po co wychwytywać i składować CO<sub>2</sub>?

W okresie ostatnich 150 lat, czyli od początku ery przemysłowej, w związku z rosnącym stosowaniem paliw kopalnych, koncentracja dwutlenku węgla w atmosferze, jednego z gazów cieplarnianych, wzrosła prawie o jedną trzecią — z 280 do 365 ppm. Zjawisko to jest nadal obserwowane. Skutki zwiększenia emisji gazów cieplarnianych do atmosfery mają negatywny wpływ na życie mieszkańców Ziemi. W raporcie opracowanym przez grupę naukowców z IPCC (*Intergovernment Panel on Climate Change*) w 2001 r. (również i w kolejnych raportach) przewiduje się w XXI

wieku wzrost temperatury na Ziemi od 1,5°C do nawet 6°C. Może to doprowadzić do zwiększenia częstotliwości ekstremalnych zjawisk pogodowych, znacznych, regionalnych zmian klimatu czy też ogromnych katastrof naturalnych. Rosnące zapotrzebowanie na energię, szczególnie wśród krajów rozwijających się, wskazuje, że ilość CO<sub>2</sub> emitowanego do atmosfery będzie rosła. Większość naukowców uważa, że w celu ograniczenia zmian klimatu ogólnoswiatowa emisja CO<sub>2</sub> powinna zostać ograniczona przynajmniej o połowę. Przyjęty przez większość krajów Protokół z Kioto (1997), zakładający zmniejszenie emisji tego gazu do roku 2012 poniżej poziomu z roku 1990, jest przykładem międzynarodowych działań podjętych w celu zmniejszenia emisji dwutlenku węgla. Podaje się kilka sposobów ograniczenia antropogenicznej emisji CO<sub>2</sub>, np. poprzez poprawę efektywności energetycznej i zmniejszenie zapotrzebowania na energię czy wykorzystanie odnawialnych źródeł energii (wiatru, słonecznej, geotermalnej). Innym, rozważanym sposobem może być unieszkodliwianie CO<sub>2</sub> w geosferze poprzez składowanie tego gazu w formacjach geologicznych. Wykresy opracowane przez IPCC (ryc. 1) pokazują, że w tym stuleciu, wraz z innymi technologiami, takimi jak energia odnawialna i bardziej efektywne wykorzystanie energii, w redukcji emisji CO<sub>2</sub> znaczącą rolę może odegrać sekwestracja. Udział sekwestracji może stanowić około ¼ redukcji emisji wymaganej do tego, aby kontrolować globalne ocieplenie (IPCC, 2005; Storing ..., 2007).

### Co to jest sekwestracja CO<sub>2</sub>?

Sekwestracja dwutlenku węgla jest rozumiana jako wychwytywanie (*capture*) lub oddzielanie (*separation*) oraz składowanie (*storage*) tego gazu, który w innym przypadku byłby wyemitowany do atmosfery i w niej pozostał



Ryc. 1. Prognozowany, globalny wpływ CCS na wielkość emisji CO<sub>2</sub> na podstawie modeli MESSAGE i MiniCAM (IPCC, 2005)

\*Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, ul. Wybickiego 7, 30-950 Kraków 65, skryt. poczt. 49; tarkowski@min-pan.krakow.pl; umb@min-pan.krakow.pl



Ryc. 2. Schemat sekwestracji dwutlenku węgla

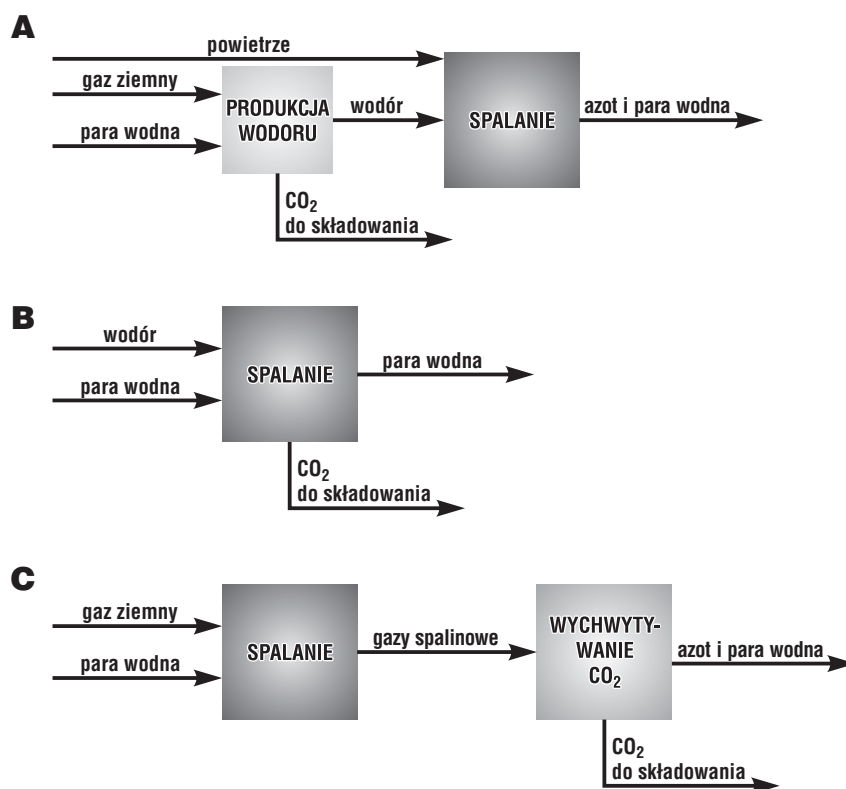
(ryc. 2). Uzasadnieniem jej prowadzenia jest umożliwienie wykorzystania paliw kopalnych i jednocześnie redukcja emisji  $\text{CO}_2$  do atmosfery, a co za tym idzie ograniczanie zmian klimatycznych. Przyjęta definicja odpowiada znaczeniu w literaturze anglojęzycznej *Carbon Capture and Storage* — CCS (Tarkowski, 2005a).

### Przemysłowe źródła emisji i sposoby wychwytywania $\text{CO}_2$

Sekwestracja  $\text{CO}_2$  umożliwi unieszkodliwienie ogromnych ilości tego gazu (milionów ton) pochodzących z dużych, przemysłowych źródeł emisji. Największe jego ilości powstają w: elektrowniach i elektrociepłowniach, hutach żelaza i stali, cementowniach, zakładach chemicznych

go też w pierwszej kolejności należałoby rozważyć podziemne składowanie  $\text{CO}_2$  przy centrach emisji czystego strumienia tego gazu (np. emisji podczas produkcji nawozów azotowych).

Obecnie istnieje kilka technologii pozwalających otrzymać skoncentrowany strumień  $\text{CO}_2$ : wychwytywanie przed spalaniem, wychwytywanie po spalaniu i tlenowe spalanie węgla (ryc. 3). Dwutlenek węgla przed zatłoczeniem pod ziemię należy oddzielić od innych gazów spalinywych i przemysłowych. Możliwe są następujące sposoby: absorpcja chemiczna (najczęściej stosowana) i fizyczna, adsorpcja fizyczna, frakcjonowanie kriogeniczne i separacja membranowa. Zastosowanie tych metod na skalę wielkoprzemysłową jest dzisiaj jednak energochłonne i kosztowne (Tarkowski, 2005a, b).

Ryc. 3. Metody wychwytywania  $\text{CO}_2$  w elektrowniach spalających gaz (na podstawie Storing..., 2007): A — przed spalaniem, B — w trakcie spalania C — po spalaniu

(rafineriach, zakładach produkcji amoniaku, tlenku etylenu, wodoru) i innych. Istotnym zagadnieniem jest tutaj zróżnicowana koncentracja  $\text{CO}_2$  w gazach spalinywych i przemysłowych. W większości przypadków jest ona niska i wynosi kilka do kilkunastu procent objętości gazów. Czysty strumień jest emitowany tylko w niektórych procesach przemysłowych. Jest to jeden z czynników wstrzymujących dzisiaj geologiczną sekwestrację dwutlenku węgla. Dłate-

### Jakie są możliwości unieszkodliwiania $\text{CO}_2$ ?

Do celów sekwestracji  $\text{CO}_2$  można wykorzystać: ekosystem ziemski, oceany oraz głębokie struktury geologiczne. Dla każdego z tych środowisk należy wypracować odpowiedni sposób sekwestracji. Unieszkodliwianie  $\text{CO}_2$  w ekosystemach ziemskich stanowi jedną z możliwości redukcji emisji  $\text{CO}_2$  do atmosfery. Pojemność ekosyste-

mów ziemskich jest jednak ograniczona. Istniejąca w przyrodzie równowaga została zachwiana poprzez wprowadzanie CO<sub>2</sub> do atmosfery (od początku ery przemysłowej) w tempie znacznie szybszym, niż może być z niej usunięty przez naturalne procesy. Ilość odizolowanego CO<sub>2</sub> można jednak zwiększyć poprzez zalesienie.

Rozważana jest również sekwestracja CO<sub>2</sub> w oceanach. Zaproponowano kilka rozwiązań zatłaczania CO<sub>2</sub> do głębin oceanicznych: iniekcja na pośrednie głębokości (1500–2000 m), iniekcja na duże głębokości (> 3 000 m), wyrzucanie do głębin oceanicznych bloków stałego dwutlenku węgla. Rozpatruje się również możliwość redukcji emisji CO<sub>2</sub> poprzez intensyfikację wzrostu fitoplanktonu. Ze względu na niemożliwe do przewidzenia skutki oddziaływania na ekosystem morski, sekwestracja w wodach oceanu budzi duży sprzeciw społeczny (IPCC, 2005).

Kolejny sposób to sekwestracja mineralna (karbonatyzacja). Polega ona na reakcji CO<sub>2</sub> z występującymi w przyrodzie minerałami lub odpadami mineralnymi, w wyniku której powstają trwałe związki węglanowe. Proces mineralnej karbonatyzacji poprzez wiązanie CO<sub>2</sub> w surowcach mineralnych, takich jak talk czy serpentyn, jest zjawiskiem występującym w przyrodzie. Minerałami, które mogą być tutaj wykorzystane, są powszechnie występujący w przyrodzie serpentyn oraz oliwin. Do wiązania CO<sub>2</sub> mogą być również zastosowane odpady mineralne, np. odpady betonowe, popioły lotne, odpady azbestowe i żużle hutnicze. Zalety tej metody to: stabilność warunków składowania przez długi czas (CO<sub>2</sub> zostaje trwale związane) oraz neutralność dla środowiska powstających w wyniku karbonatyzacji węglanów (Uliasz-Bocheńczyk i in., 2004; IPCC, 2005).

Geologiczna sekwestracja CO<sub>2</sub>, jest tym sposobem na unieszkodliwianie dwutlenku węgla, z którym wiąże się

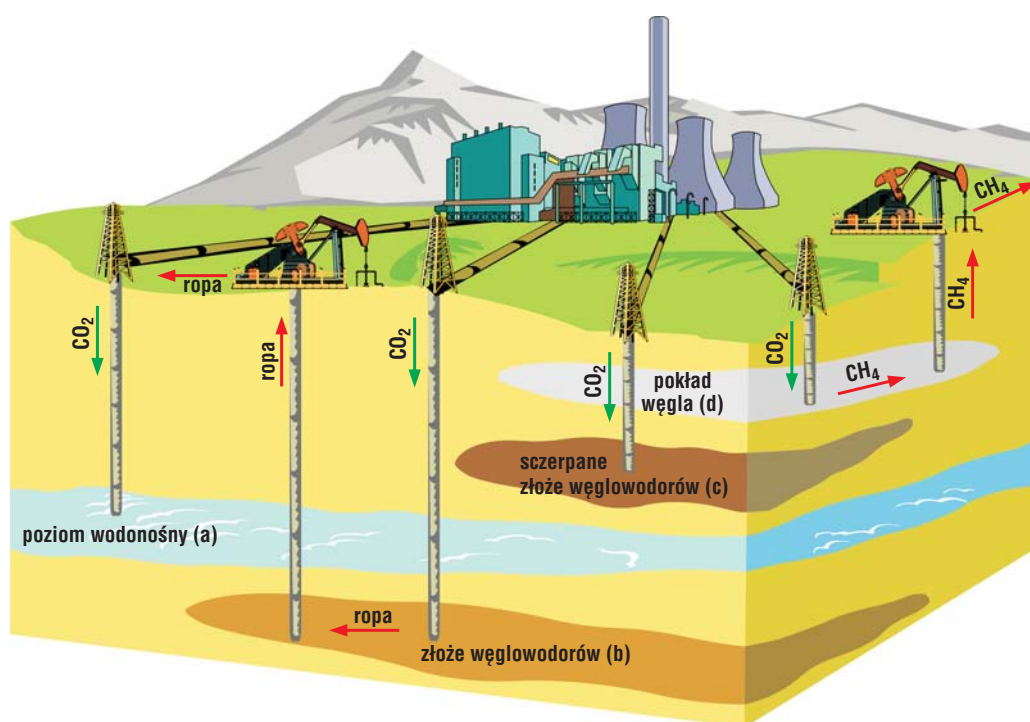
duże nadzieje. Polega ona na składowaniu CO<sub>2</sub> w głębokich strukturach geologicznych.

### Czy CO<sub>2</sub> może być składowany pod ziemią?

Dwutlenek węgla może być składowany pod ziemią (ryc. 4) — jest to nowe wyzwanie, które wymaga rozwiązania licznych i złożonych problemów; dotyczą one zagadnień geologicznych, złożowych, technicznych i innych. Jako podstawowy warunek, decydujący o możliwości podziemnego składowania CO<sub>2</sub>, wymienia się występowanie skał osadowych o dużej miąższości, znacznym rozpręśzieniu, dobrych właściwościach kolektorskich i posiadających izolujący nadkład skalny. Takie warunki spełniają duże baseny sedymentacyjne. Tylko niektórzy przemysłowi emitenci CO<sub>2</sub> znajdują w pobliżu swoich zakładów miejsca o uwarunkowaniach geologiczno-złożowych umożliwiających podziemne składowanie CO<sub>2</sub> (Tarkowski & Uliasz-Misiak, 2003; IPCC, 2005).

Zatłaczanie CO<sub>2</sub> do skał zbiornikowych jest praktyką stosowaną od kilkudziesięciu lat w przemyśle naftowym. W celu poprawienia stopnia odropienia złoża stosuje się zatłaczanie różnych płynów (EOR — *Enhanced Oil Recovery* — intensyfikacja wydobycia ropy), w tym dwutlenku węgla; jest to dzisiaj działalność komercyjna. W operacjach CO<sub>2</sub>-EOR są stosowane technologie wychwycenia, transportu, zatłaczania i monitorowania CO<sub>2</sub> — zasadnicze elementy geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub>.

W odróżnieniu od czasowego przechowywania gazu ziemnego w podziemnych magazynach gazu (PMG), zatłaczanie CO<sub>2</sub> do głębokich warstw geologicznych stwarza nowe wyzwania; dotyczy to m.in. czasu składowania (liczonego w setkach lub tysiącach lat), objętości składowanego gazu, uwarunkowań prawnych, bezpieczeństwa i społecznej akceptacji.



**Ryc. 4.** Opcja geologicznego składowania dwutlenku węgla: a) składowanie w poziomach wodonośnych, b) składowanie wraz z intensyfikacją wydobycia ropy, c) składowanie w szcerpanych złożach węglowodorów, d) składowanie wraz z wydobywaniem metanu

## W jakich strukturach CO<sub>2</sub> może być podziemnie składowany?

Rozważa się zatłaczanie CO<sub>2</sub> do głębokich, solankowych poziomów wodonośnych, eksploatowanych i szcerpanych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego oraz głębokich pokładów węgla — ryc. 4 (Tarkowski & Uliasz-Misiak, 2003).

**Głębokie, solankowe poziomy wodonośne**, zbudowane z porowatych i przepuszczalnych skał osadowych, dobrze nadają się do podziemnego składowania CO<sub>2</sub>. Występują one powszechnie na obszarach dużych basenów sedymentacyjnych. W odróżnieniu od złóż węglowodorów stopień ich rozpoznania jest bardzo zróżnicowany, zwykle dużo gorszy. Pojemność składowania w poziomach wodonośnych, znacznie większa niż w złożach ropy naftowej i gazu ziemnego, wpływa na znaczne zainteresowanie tymi miejscami. Opcja ta wymaga jednak dalszych badań oraz zgromadzenia nowych doświadczeń.

**Złoża węglowodorów** (szcerpane lub eksploatowane złoża gazu ziemnego i ropy naftowej) są dobrymi miejscami do sekwestracji CO<sub>2</sub>. Są one naturalnymi pułapkami, w których ropa i gaz były uwięzione przez wiele milionów lat. Ich budowa została dobrze poznana, a szczelność sprawdzona przez naturę. W tym przypadku można również wykorzystać istniejącą infrastrukturę, służącą do eksploatacji węglowodorów.

**Głębokie, nieeksploatowane pokłady węgla**. Dwutlenek węgla może być zatłoczony do głębokich, nieeksploatowanych pokładów węgla, gdzie nastąpi jego adsorpcja, wiążąca go na stałe w matrycy węglanowej. W przypadku zatłaczania do pokładów węgla zawierających metan, dwutlenek węgla będzie go zastępował. Jedną z metod sekwestracji dwutlenku węgla jest metoda pozyskiwania metanu ECBM (*Enhanced Coal Bed Methane* — wspomagane odzyskiwanie metanu z pokładów węgla) poprzez zatłaczanie CO<sub>2</sub>.

### Jaką ilość CO<sub>2</sub> możemy pomieścić pod ziemią?

Jednym z podstawowych czynników decydujących o przydatności formacji geologicznej do podziemnego składowania CO<sub>2</sub> jest jej potencjał, a w przypadku konkretnej struktury geologicznej przeznaczony na składowanie — jej pojemność. Potencjał podziemnego składowania zależy od wielu czynników. Łatwiej jest go określić dla szcerpanych złóż węglowodorów, znacznie trudniej dla poziomów wodonośnych. W ocenach światowego potencjału składowania CO<sub>2</sub>, wykonanych przez różnych autorów i instytucje dla różnych typów zbiorników, są podawane wielkości: 126–400 Gt CO<sub>2</sub> dla złóż ropy naftowej, 500–800 Gt CO<sub>2</sub> dla złóż gazu ziemnego, 60–200 Gt CO<sub>2</sub> dla głębokich nieeksploatowanych pokładów węgla (ECBM) i 200–56 000 Gt CO<sub>2</sub> dla poziomów wodonośnych. Pojemność konkretnej struktury przeznaczony do podziemnego składowania CO<sub>2</sub> powinna być rzędu stu milionów ton i większa (Hendriks i in., 2004; IPCC, 2005).

### Jakie są koszty sekwestracji geologicznej CO<sub>2</sub>?

Koszty geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub> są uzależnione od licznych czynników: ilości składowanego gazu, kosz-

tów wychwytywania, transportu, sprężania i zatłaczania, odległości źródła emisji od miejsca składowania, lokalizacji miejsca składowania (na lądzie lub pod dnem oceanu), kosztów otworów wiertniczych, wielkości i chłonności zbiornika, infrastruktury i innych. Wśród trzech etapów geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub> (por. ryc. 2): wychwytywania, transportu i składowania, pierwszy jest najbardziej kapitałochłonny. Podawane przez różnych autorów koszty unieszkodliwiania dwutlenku węgla są bardzo zróżnicowane. Koszty transportu i podziemnego składowania są niewielkie w porównaniu z kosztami wydzielenia CO<sub>2</sub> z gazów spalinowych i przemysłowych. Według szacunków kosztów podziemnej sekwestracji CO<sub>2</sub>, wykonanych przez TNO-ECOFYS w 2004 roku, koszty wychwytu wynoszą 26–45 €/t CO<sub>2</sub>, sprężania 6–10 €/t CO<sub>2</sub>, transportu rurociągami 1–6 €/t CO<sub>2</sub>, a 1–7 €/t CO<sub>2</sub> to koszty składowania — w zależności od rodzaju i głębokości zalegania zbiornika (Hendriks i in., 2004).

Wysokie koszty wychwytywania CO<sub>2</sub> są dziś główną przeszkodą do wprowadzenia podziemnego składowania dwutlenku węgla. Przede wszystkim powinna nastąpić redukcja kosztów wychwytywania i oddzielania CO<sub>2</sub> z gazów spalinowych i przemysłowych. Zmniejszenie kosztów wychwytywania poniżej 30 €/t CO<sub>2</sub> znacząco przyspieszy powszechność sekwestracji antropogenicznego dwutlenku węgla. Nie bez znaczenia jest tutaj wprowadzenie handlu emisjami CO<sub>2</sub> w krajach UE.

### Czy istnieją uregulowania prawne dotyczące podziemnego składowania CO<sub>2</sub>?

Nie zostały podpisane międzynarodowe, europejskie lub krajowe unormowania prawne, które obejmowałyby wszystkie, a przynajmniej większość zagadnień dotyczących podziemnego składowania dwutlenku węgla. Zaakceptowanie podziemnego składowania dwutlenku węgla będzie wymagało od społeczności międzynarodowej ustanowienia nowych i odwołania się do istniejących regulacji prawnych związanych z podziemnym magazynowaniem gazów. Skuteczny system regulacyjny jest niezbędny, aby zapewnić przyszłym inwestorom poczucie komfortu w trakcie bezpiecznego i wydajnego przeprowadzania operacji związanych z wychwytem, transportem i podziemnym składowaniem CO<sub>2</sub>. Standardy i unormowania prawne powinny być ustanawiane na podstawie doświadczeń w przemyśle naftowym, co powinno dać pewność, że uzyskane procedury będą zarówno praktyczne, jak i przynoszące wymierne korzyści.

### Czy istnieje ryzyko związane ze składowaniem CO<sub>2</sub>?

Podziemne składowanie dwutlenku węgla może stwarzać zagrożenie dla ludzi i środowiska. Niebezpieczeństwo w postaci dużego wycieku gazu może pojawić się w czasie transportu rurociągami do miejsc podziemnego składowania lub w przypadku wydostania się gazu ze składowiska.

Wynikające z podziemnego składowania dwutlenku węgla zagrożenia dla ludzi i środowiska należy minimalizować przez odpowiednie projektowanie i monitorowanie wszystkich etapów tego przedsięwzięcia. Monitoring podziemnego składowania CO<sub>2</sub> leży u podstaw pomyślnego przeprowadzenia całego zabiegu. Głównym jego celem jest śledzenie lokalizacji gazu pod ziemią, kontrola szczelności otworów w trakcie zatłaczania i po jego zakończeniu,

weryfikacja ilości dwutlenku węgla zatłoczonego pod ziemię, kontrola parametrów związanych z zatłaczaniem.

### Kto może być zainteresowany podziemnym składowaniem CO<sub>2</sub>?

Podziemne składowanie dwutlenku węgla dotyczy wielu dziedzin nauki i jest w kręgu zainteresowania: polityków ustalających opłaty za emisję i wprowadzających w życie ustalenia międzynarodowe dotyczące wielkości emisji, zakładów przemysłowych stojących przed problemem ograniczenia poziomu emisji, potencjalnych inwestorów poszukujących nowych rynków, firm naftowych wykorzystujących zatłaczanie do intensyfikacji wydobywania ropy naftowej lub zamierzających udostępnić swoje szczerpane złoża do składowania tego gazu, przedstawicieli różnych dziedzin nauki: geologów, inżynierów złożowych, górników, chemików i innych.

### Czy i gdzie odbywa się podziemne składowanie CO<sub>2</sub> na świecie?

Na świecie działają liczne badawcze instalacje podziemnego zatłaczania CO<sub>2</sub> (ryc. 5). Od lat siedemdziesiątych XX wieku w Ameryce Północnej pracuje kilkadziesiąt instalacji zatłaczania CO<sub>2</sub> w celu intensyfikacji wydobywania ropy naftowej (CO<sub>2</sub>-EOR). W Norwegii, na Morzu Północnym działa pierwsza przemysłowa instalacja zatłaczania CO<sub>2</sub> (Sleipner). W maju bieżącego roku została uruchomiona kolejna instalacja Snøhvit na Morzu Barentsa. Cel założenia instalacji Sleipner i Snøhvit był czysto środowiskowy — uniknięcie emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery (IPCC, 2005; Storing ..., 2007).

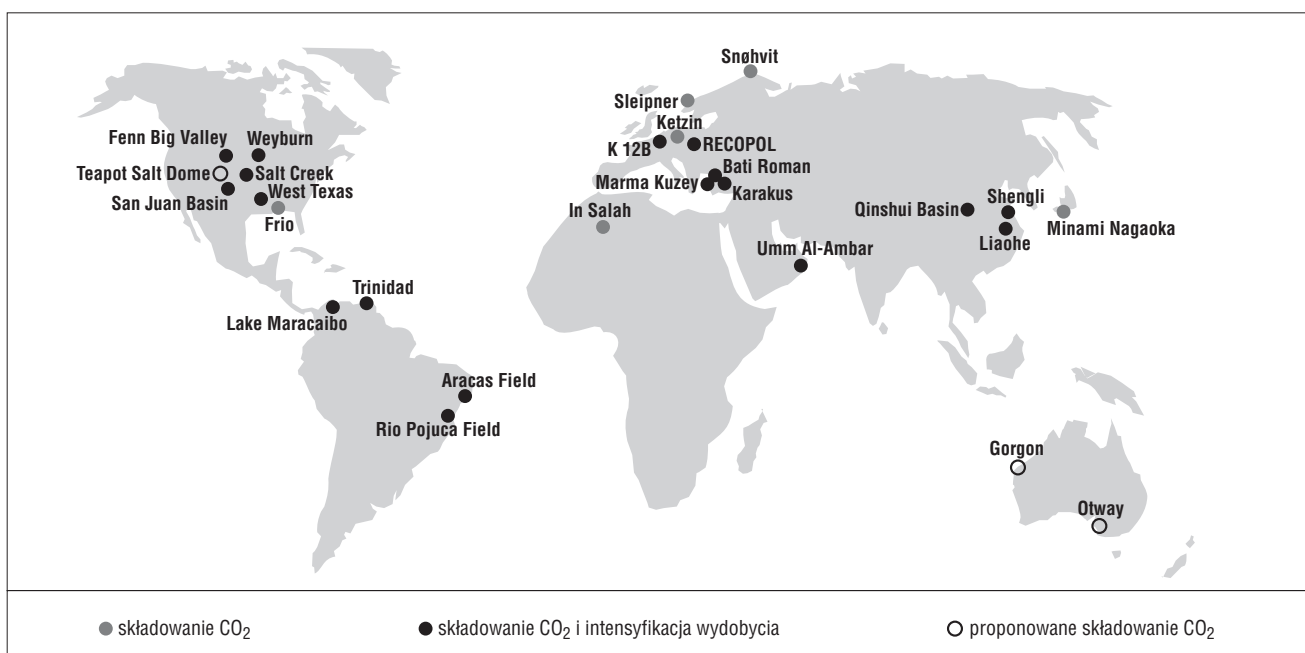
**Projekt Sleipner.** Od 1996 r. firma *Statoil* zatłacza CO<sub>2</sub> pochodzący ze złoża gazu ziemnego Sleipner West (rocznie w przybliżeniu 1 Mt) do formacji Utsira — solankowego poziomu wodonośnego, znajdującego się około 1000 metrów pod dnem Morza Północnego. Dwutlenek węgla jest składnikiem eksploatowanego gazu ziemnego,

który musi być oddzielony przed sprzedażą metanu. Proces ten jest prowadzony na specjalnej platformie przed przetworzeniem gazu rurociągiem na ląd. Po separacji CO<sub>2</sub> zostaje sprężony, pozbawiony wilgoci i zatłoczony do formacji Utsira. Wyniki Projektu Sleipner potwierdzają możliwość składowania CO<sub>2</sub> w głębokich poziomach wodonośnych.

**Projekt Weyburn.** Firma *PanCanadian Resources* zastosowała technikę CO<sub>2</sub>-EOR do eksploatacji złoża ropy naftowej Weyburn w Kanadzie. Celem było wydłużenie czasu eksploatacji złoża o kolejnych 20 lat oraz uzyskanie dodatkowego wydobywania 122 milionów baryłek ropy. Dwutlenek węgla jest transportowany transgranicznym rurociągiem (o długości 325 km) z fabryki w Beulah (USA, Północna Dakota) na pole naftowe Weyburn. Dziennie zatłacza się do złoża 5000 ton CO<sub>2</sub>. Zakłada się, że w ten sposób około 20 mln ton CO<sub>2</sub> zostanie uwięzionych w złożu. Oprócz eksploatacji złoża Weyburn są prowadzone również badania, których celem jest poznanie geologicznych i geochemicznych procesów, wpływających na składowanie CO<sub>2</sub> w warstwach geologicznych.

### Czy w Polsce realizuje się prace w zakresie podziemnego składowania CO<sub>2</sub>?

Na Górnym Śląsku, w ramach Projektu RECOPOL (*REduction of CO<sub>2</sub> storage in coal seams in the Silesian COal Basin in POLand — Redukcja emisji CO<sub>2</sub> poprzez składowanie w pokładach węgla w GZW w Polsce*), Główny Instytut Górnictwa w Katowicach zbudował badawczą instalację zatłaczania CO<sub>2</sub> do pokładów węgla. Głównym celem tego projektu, realizowanego w ramach 5. PR UE, była ocena możliwości redukcji emisji gazów cieplarnianych poprzez sekwestrację CO<sub>2</sub> w pokładach węgla oraz możliwość składowania CO<sub>2</sub> z jednoczesnym wydobywaniem metanu zawartego w głębokich, nieeksploatowanych pokładach węgla. Pilotowa instalacja zatłaczania jest zlokalizowana w miejscowości Kaniów i składa się z dwóch otworów produkcyjnych i jednego zatłaczającego. Zatła-



Ryc. 5. Lokalizacja istniejących i proponowanych instalacji składowania CO<sub>2</sub> (na podst. IPCC, 2005 — ze zmianami)

czanie CO<sub>2</sub> rozpoczęto w sierpniu 2004 r. i trwało ono do czerwca 2005 r. Łącznie zatłoczono 760 ton CO<sub>2</sub>. Iniekcja dwutlenku węgla do pokładów węgla zakończyła się pomyślnie dla polskiego zespołu z GIG, pod kierownictwem prof. P. Krzystalika.

### **Geologiczna sekwestracja CO<sub>2</sub> — mit czy rzeczywistość?**

Wyniki licznych projektów badawczych i pierwsze działające instalacje przemysłowe wskazują, że geologiczna sekwestracja CO<sub>2</sub> ma przyszłość, a opcja podziemnego składowania CO<sub>2</sub> może się stać skutecznym instrumentem w walce z ociepleniem klimatu. Geologiczna sekwestracja CO<sub>2</sub> wiąże się jednak z nowymi wyzwaniem i wymaga rozwiązania licznych problemów. Okres składowania CO<sub>2</sub> ocenia się na kilkadziesiąt lat i więcej. Wobec ogromnej ilości gazu przeznaczonego do unieszkodliwienia konieczne jest: opracowanie nowych, tańszych technologii oddzielania CO<sub>2</sub> z gazów spalinowych i przemysłowych, określenie oddziaływań fizykochemicznych CO<sub>2</sub> ze skałami, opracowanie metod monitoringu, aspektów prawnych podziemnego składowania i innych. Duże zainteresowanie problematyką geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub>, jak również handel emisjami CO<sub>2</sub>, rokuje szybkie rozwiązanie większości problemów. Zmiany wielkości opłat, kary za przekroczenie emisji CO<sub>2</sub>, handel emisjami, większe wykorzystanie CO<sub>2</sub> do intensyfikacji wydobywania ropy naftowej, nowe i tańsze technologie oddzielania CO<sub>2</sub> z gazów spalinowych i przemysłowych, w niedalekiej przyszłości uczynią z podziemnego składowania CO<sub>2</sub> przedsięwzięcie opłacalne ekono-

micznie. Ze względu na doświadczenie oraz kapitałochłonność inwestycji firmy naftowe i energetyczne odegrają w tym główną rolę.

Dr hab. inż. Radosław Tarkowski i dr inż. Barbara Uliasz-Misiak są specjalistami w zakresie podziemnego składowania dwutlenku węgla, autorami licznych publikacji w tym zakresie. Kierują kilkoma krajowymi projektami dotyczącymi geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub>, uczestniczą w realizacji projektów 6. PR UE (CO<sub>2</sub>SINK, EU GeoCapacity, CO<sub>2</sub>ReMoVe). Zakład Geotechnologii IGSMiE PAN, w którym pracują, zajmuje się różnymi aspektami podziemnego składowania CO<sub>2</sub> oraz utylizacją CO<sub>2</sub> poprzez mineralną karbonatyzację (<http://www.min-pan.krakow.pl/zaklady/tark>).

### **Literatura**

- HENDRIKS C., GRAUS W. & VAN BERGEN F. 2004 — Global carbon dioxide storage potential and costs. *Ecofys and TNO.EEP-02001* 2004: 59.
- IPCC 2005 — IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, B. Metz, O. Davidson, H.C. de Coninck, M. Loos, and L.A. Meyer (red.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: 442.
- Storing CO<sub>2</sub> underground 2007 IEA Greenhouse Gas R&D Programme. <http://www.ieagreen.org.uk/>:17.
- TARKOWSKI R. 2005a — Geologiczna sekwestracja CO<sub>2</sub>. *Studia, Rozprawy, Monografie*, 132: 106.
- TARKOWSKI R. (red.) 2005b — Podziemne składowanie CO<sub>2</sub> w Polsce w głębokich strukturach geologicznych (ropo-, gazo- i wodonośnych). Wyd. IGSMiE PAN, Kraków: 174.
- TARKOWSKI R. & ULIASZ-MISIAK B. 2003 — Podziemne magazynowanie dwutlenku węgla. *Prz. Geol.*, 5: 402–409.
- ULIASZ-BOCHEŃCZYK A., MAZURKIEWICZ M., MOKRZYCKI E. & PIOTROWSKI Z. 2004 — Utylizacja dwutlenku węgla poprzez mineralną karbonatyzację. *Polit. Energ.*, 7: 541–554.