

# Podziemne składowanie CO<sub>2</sub> – czym jest tak naprawdę?

Odpowiedzialne  
wykorzystywanie  
zasobów paliw kopalnych

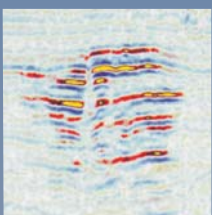
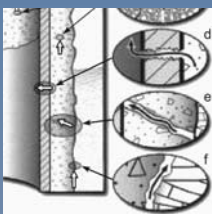
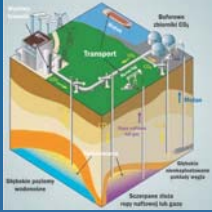
Likwidacja  
głównego źródła  
gazów cieplarnianych

Powrót węgla pod ziemię

Czas potrzebny na rozwój przyjaznych  
dla środowiska źródeł energii



CO<sub>2</sub>GeoNet jako Europejska Sieć Doskonałości



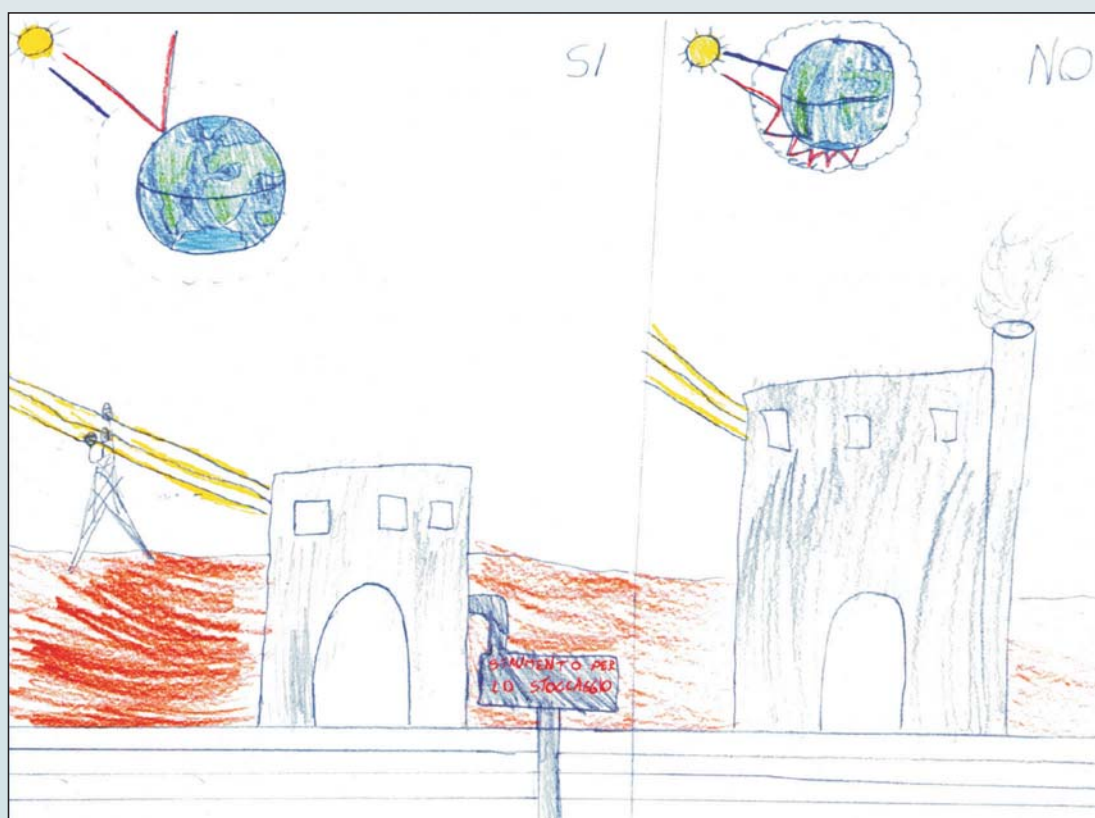
<b>Zmiana klimatu i konieczność podziemnego składowania CO<sub>2</sub></b> .....	<b>4</b>
<b>1. Gdzie i ile CO<sub>2</sub> możemy składować pod ziemią?</b> .....	<b>6</b>
<b>2. W jaki sposób możemy transportować i zatłaczać ogromne ilości CO<sub>2</sub>?</b> .....	<b>8</b>
<b>3. Co się dzieje z CO<sub>2</sub> zatłoczonym do podziemnego zbiornika?</b> .....	<b>10</b>
<b>4. Czy CO<sub>2</sub> może wyciec ze zbiornika i jakie mogą być tego skutki?</b> .....	<b>12</b>
<b>5. Jak możemy monitorować miejsce składowania CO<sub>2</sub> w głębi ziemi i na jej powierzchni?</b> .....	<b>14</b>
<b>6. Jakie kryteria bezpieczeństwa należy zastosować?</b> .....	<b>16</b>
<b>Słownik</b> .....	<b>18</b>
<b>Co może zrobić dla Ciebie CO<sub>2</sub>GeoNet?</b> .....	<b>19</b>

Broszura powstała dzięki współpracy następujących osób:  
 Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

# Wizja przyszłości



**Nigdy więcej dymiących kominów  
Rurociągi przenoszą CO<sub>2</sub> i składują go pod ziemią  
Jest to z korzyścią dla Ziemi**



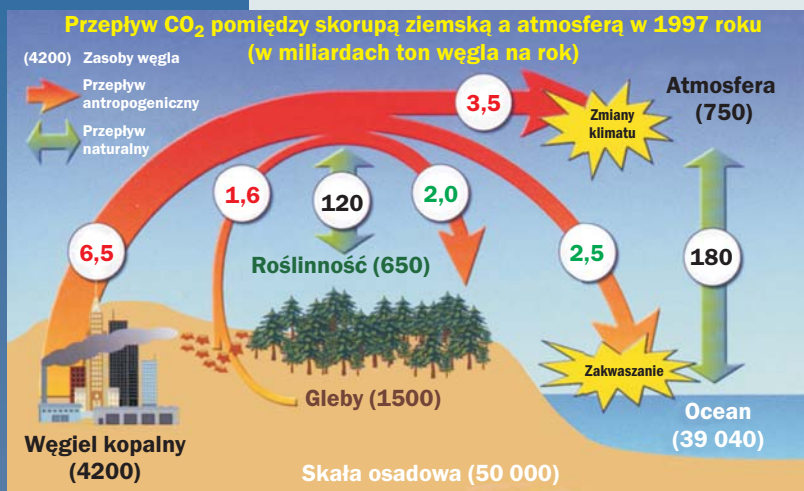
© Sepienza URS

*Massimo, lat 10, Rzym – Włochy*

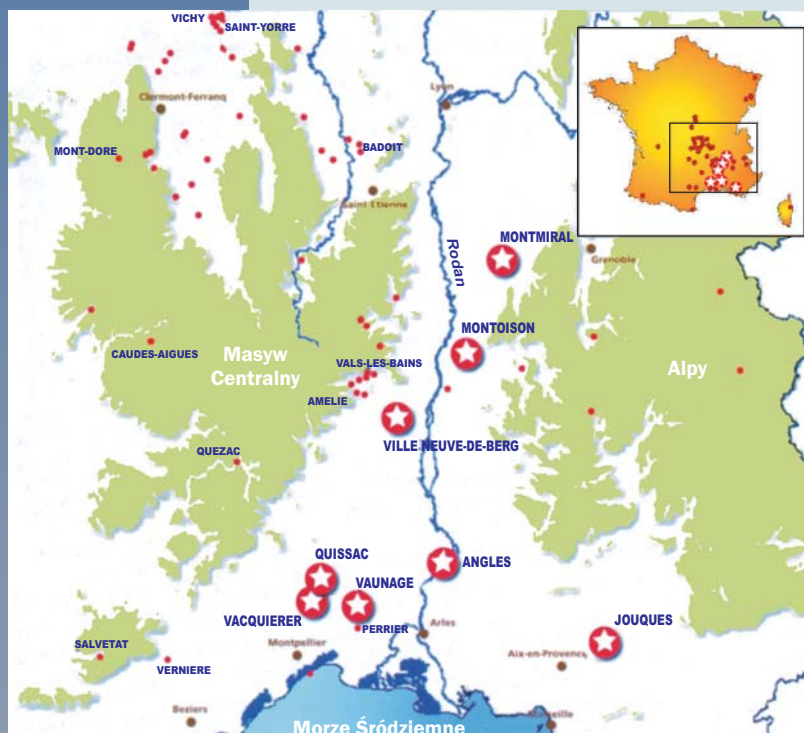
**Dla naszych dzieci  
podziemne składowanie CO<sub>2</sub> ma sens**

# Zmiana klimatu i konieczność podziemnego składowania CO<sub>2</sub>

**Rycina 1**  
Światowa emisja antropogenicznego CO<sub>2</sub> wynosi 30 miliardów ton (Gt) na rok, co odpowiada 8,1 Gt czystego węgla, z czego 6,5 Gt pochodzi ze spalania paliw kopalnych, a 1,6 Gt z wycinalnia lasów i działalności rolniczej



**Rycina 2**  
Regiony bogate w CO<sub>2</sub> we Francji



## Nadmierna emisja CO<sub>2</sub> do atmosfery

Działalność człowieka zakłóca cykl obiegu węgla na naszej planecie. Przez ok. 10 000 lat ten bardzo dobrze zrównoważony cykl obiegu, w skład którego wchodziły naturalne procesy wymiany węgla pomiędzy geosferą, biosferą, hydrosferą i atmosferą, skutkowało małą zawartością CO<sub>2</sub> w atmosferze (ok. 280 ppm, tj. 0,028%). Jednak przez ostatnie 250 lat, od początków rewolucji przemysłowej, spalanie paliw kopalnych (węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego) w celu pozyskania energii elektrycznej, energii cieplnej dla celów prze-

mysłowych i dla transportu sprawia, że nieprzerwanie zwiększa się ilość CO<sub>2</sub> emitowanego do atmosfery (**ryc. 1**). Praktycznie połowa dwutlenku węgla wyemitowanego do atmosfery przez człowieka jest wchłaniana przez rośliny i rozpuszczana w wodach oceanicznych. Powoduje to zakwaszenie wód oraz wywiera negatywny wpływ na morskie rośliny i zwierzęta. Pozostała część wyemitowanego przez człowieka dwutlenku węgla gromadzi się w atmosferze, przyczyniając się do zmian klimatu. CO<sub>2</sub> należy do gazów cieplarnianych, które zatrzymują część promieni słonecznych, powodując ocieplenie powierzchni Ziemi. Dlatego należy podjąć poważne i natychmiastowe działania mające na celu zatrzymanie wzrostu stężenia CO<sub>2</sub> w atmosferze, wynoszącego 387 ppm (obecnie odnotowuje się 38% wzrost w porównaniu z poziomem preindustrialnym), do krytycznego poziomu 450 ppm. Światowi eksperci zgadzają się, że powyżej tego poziomu poważne konsekwencje nadmiernej emisji CO<sub>2</sub> będą nieuniknione.

## Powrót węgla pod ziemię

Świat w którym żyjemy jest bardzo uzależniony od paliw kopalnych (geneza tego związku jest ściśle związana z erą przemysłową lat pięćdziesiątych XVIII wieku). Nasza transformacja w społeczeństwo bazujące na przyjaznym dla środowiska źródle energii wymagać będzie czasu i dużych nakładów finansowych. Tak naprawdę pilnie potrzebujemy krótkoterminowego rozwiązania, które pomoże ograniczyć naszą zależność od paliw kopalnych, wykorzystując je w sposób niezatrzuwający środowiska. Uzyskamy czas potrzebny na rozwinięcie technologii i infrastruktury odnawialnych źródeł energii. Jedną z możliwości jest stworzenie zamkniętego cyklu w systemie produkcji energii, dzięki któremu pierwiastek węgiel wydobyty z ziemi w formie gazu ziemnego, ropy naftowej lub węgla będzie z powrotem do niej zatlaczany w postaci dwutlenku węgla. Co ciekawe, podziemne składowanie CO<sub>2</sub> nie jest pomysłem człowieka, lecz całkowicie naturalnym, rozpowszechnionym w przyrodzie zjawiskiem występowania naturalnych zbiorników CO<sub>2</sub>, które istnieją od tysięcy, a nawet milionów lat. Przykładem może być seria ośmiu naturalnych zbiorników CO<sub>2</sub> w południowo-wschodniej Francji, odkrytych w trakcie wydobywania ropy naftowej na tych obszarach w latach sześćdziesiątych XX wieku (**ryc. 2**). Zarówno te, jak i inne tego typu zbiorniki, licznie występujące na całym świecie, dowodzą, że formacje geologiczne bardzo dobrze nadają się do składowania CO<sub>2</sub>, gdyż są wydajne i bezpieczne, gwarantując stabilność składowania na długi czas.

## Wychwytywanie i składowanie CO<sub>2</sub> obiecującą drogą zmniejszenia jego nadmiernej emisji spowodowanej działalnością człowieka

Spośród środków, które powinny zostać pilnie wdrożone w celu złagodzenia zmian klimatycznych i zmniejszenia zakwaszenia oceanów, wychwytywanie i składowanie CO<sub>2</sub> (CCS\*) może odegrać decydującą rolę, przy-

© BRGM im@ge

© BRGM im@ge

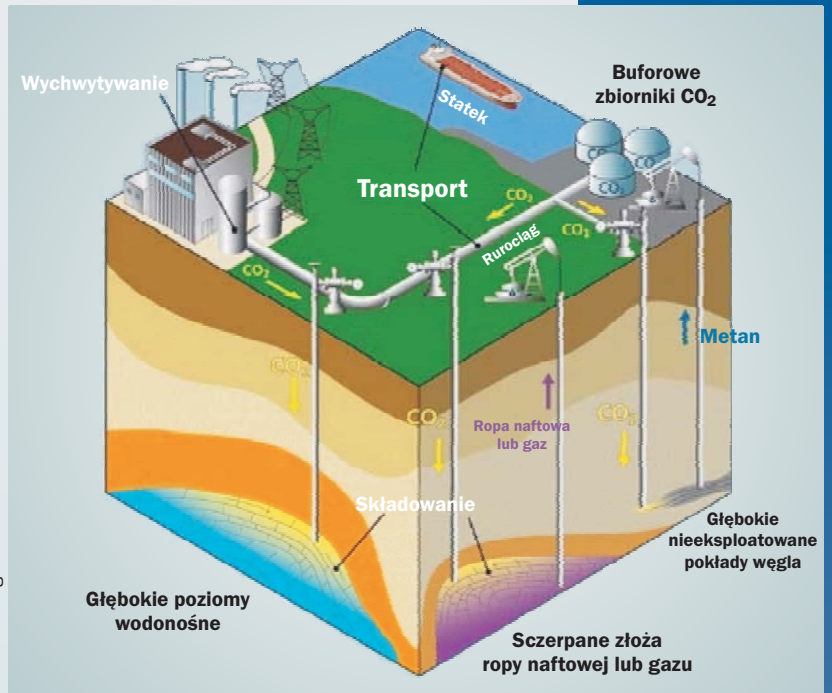
czyniąc się w 33% do redukcji CO<sub>2</sub> do poziomu wymaganego do 2050 roku. CCS opiera się na wychwytywaniu CO<sub>2</sub> z elektrowni (opalanych węglem bądź wykorzystujących gaz ziemny) i zakładów przemysłowych (hut żelaza, cementowni, rafinerii itd.), a następnie jego transporcie rurociągami bądź statkami w miejsce składowania oraz na zatłaczaniu przez specjalne otwory do odpowiednich formacji geologicznych na długi okres składowania (ryc. 3). W perspektywie światowego wzrostu liczby ludności, a co za tym idzie zwiększenia zapotrzebowania na energię w krajach rozwijających się oraz braku wielkoskalowego, alternatywnego źródła „czystej” energii, dalsze wykorzystanie paliw kopalnych w najbliższym czasie jest nieuniknione. Z wykorzystaniem technologii CCS ludzkość może rozwijać się w sposób przyjazny dla środowiska, tworząc równocześnie rodzaj pomostu dla światowej ekonomii bazującej na zrównoważonym systemie produkcji energii.

### Światowy rozwój technik CCS

Od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku są prowadzone programy badawcze nad CCS w Europie oraz w takich krajach jak USA, Kanada, Australia i Japonia. Wiele cennych informacji uzyskano dzięki pierwszym światowym wielkoskalowym projektom demonstracyjnym, w których CO<sub>2</sub> został zatłoczony pod ziemię na wiele lat: w Sleipner w Norwegii (od 1996 roku ok. 1 Mt/rok) (ryc. 4), w Weyburn w Kanadzie (od 2000 roku ok. 1,8 Mt/rok), a także w In Salah w Algierii (od roku 2004, ok. 1 Mt/rok). Międzynarodowa współpraca wspierana przez IEA-GHG\* oraz CSLF\*, polegająca na badaniach składowania CO<sub>2</sub> m.in. w wymienionych wyżej miejscach, jest szczególnie ważna. Dzięki takim badaniom możemy poszerzać naszą wiedzę dotyczącą zatłaczania dwutlenku węgla. Służą one także rozwojowi światowej wspólnoty naukowej zajmującej się tym zagadnieniem. Bardzo dobrym przykładem takich działań jest specjalny raport IPCC\*, dotyczący przechwytywania i podziemnego składowania dwutlenku węgla (2005). Raport ten przedstawia obecny stan wiedzy, a także ukazuje przeszkody, jakie muszą zostać pokonane w celu szerokiego wdrożenia tej technologii. Podstawowe badania w dziedzinie składowania CO<sub>2</sub> zostały już przeprowadzone i teraz świat z pewnością zmierza w kierunku fazy wykonania projektów demonstracyjnych. Wraz z rozwojem technicznym są tworzone ramy ustawodawcze, wykonawcze, polityczne, ekonomiczne oraz prawne. Badane jest również społeczne postrzeganie CCS i poparcie dla niego. W Europie głównym zadaniem jest stworzenie do 2015 roku 12 wielkoskalowych projektów demonstracyjnych, w celu umożliwienia wprowadzenia do 2020 roku szeroko rozpowszechnionych komercyjnych instalacji przemysłowych. W związku z tym w styczniu 2008 roku Komisja Europejska wydała „Pakiet klimatyczno-energetyczny”, który proponuje dyrektywę dotyczącą geologicznego składowania CO<sub>2</sub>, a także sugeruje podejmowanie innych działań dotyczących promocji rozwoju i bezpiecznego funkcjonowania instalacji CCS.

### Kluczowe pytania związane z geologicznym składowaniem CO<sub>2</sub>

Sieć Doskonałości CO<sub>2</sub>GeoNet została stworzona pod patronatem Komisji Europejskiej jako grupa instytucji badawczych odpowiedzialnych za utrzymanie Europy w czołówce międzynarodowych badań nad podziemnym składowaniem CO<sub>2</sub>. Jednym z zadań sieci

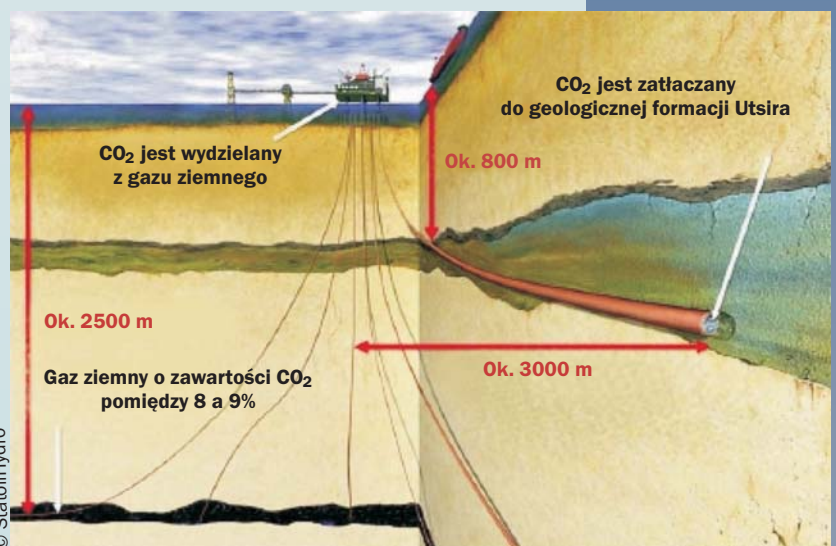


© BRGM im@ge

CO<sub>2</sub>GeoNet jest wymiana czysto naukowych informacji związanych z technicznymi aspektami geologicznego składowania dwutlenku węgla. Aby zachęcić do dialogu nad głównymi aspektami tej technologii, sieć CO<sub>2</sub>GeoNet przygotowała podstawowe odpowiedzi na najczęściej zadawane pytania. Na następnych stronach wyjaśniono jak geologiczne składowanie CO<sub>2</sub> może być zrealizowane, w jakich warunkach będzie możliwy proces zatłaczania, a także jakie kryteria muszą zostać spełnione dla bezpiecznego i wydajnego wdrażania programu składowania dwutlenku węgla.

**Rycina 3**  
W elektrowniach CO<sub>2</sub> jest wychwytywany i odseparowany od innych gazów. Następnie jest kompresowany i transportowany rurociągami lub statkami do miejsc jego geologicznego składowania: głębokich solankowych poziomów wodonośnych, wyciekających złóż gazu ziemnego i ropy naftowej, głębokich, nieeksploatowanych pokładów węgla

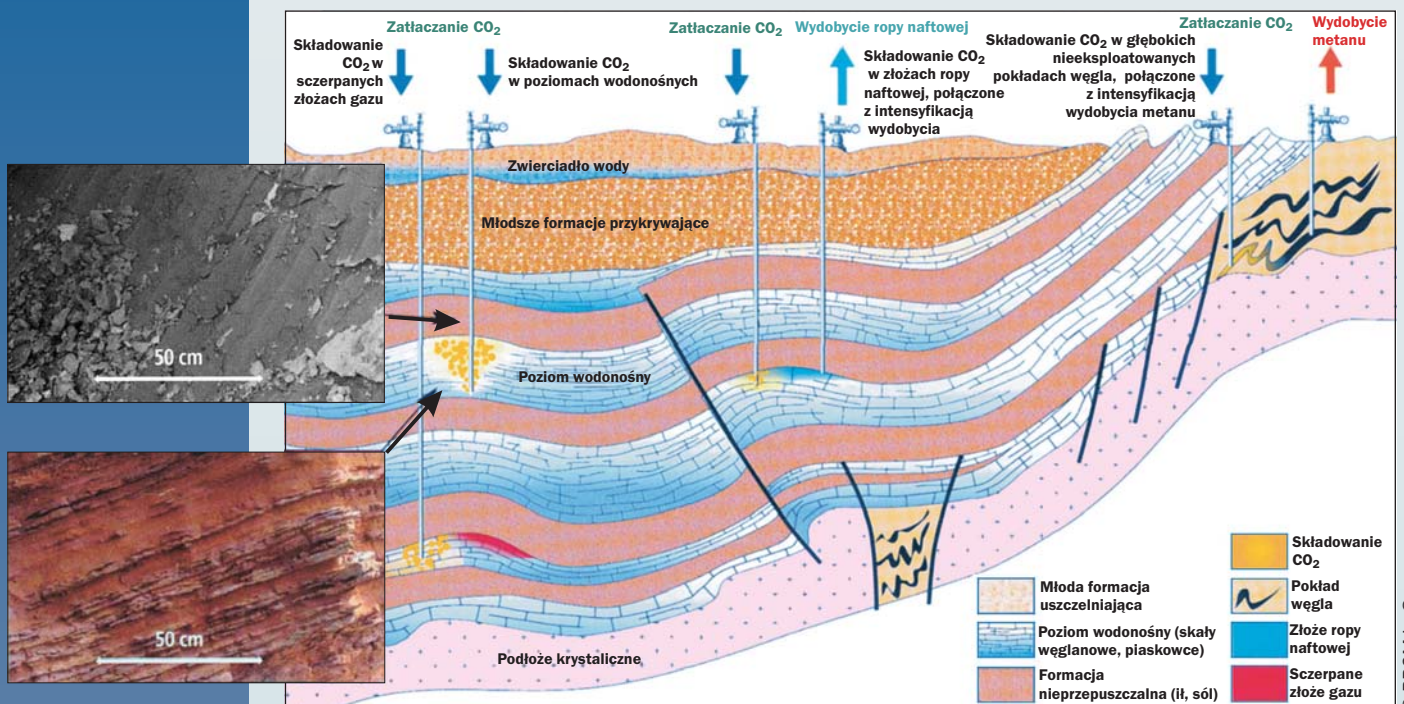
**Rycina 4**  
Pionowy przekrój poprzeczny instalacji Sleipner w Norwegii. Gaz ziemny wydobywany na głębokości 2500 m zawiera kilka procent CO<sub>2</sub>, które musi zostać usunięte, aby mógł on odpowiadać standardom komercyjnym. Zamiast uwalniać gaz do atmosfery, wychwytywany CO<sub>2</sub> zostaje zatłoczony na głębokość ok. 1000 m do piaskowcowego poziomu wodonośnego Utsira



© StatoilHydro

# Gdzie i ile CO<sub>2</sub> możemy składować pod ziemią?

Dwutlenek węgla nie może zostać zatłoczony pod ziemię w dowolnym miejscu. Najpierw trzeba znaleźć odpowiednie do tego celu formacje geologiczne. Potencjalne zbiorniki nadające się do geologicznego składowania CO<sub>2</sub> występują na całym świecie, oferując wystarczającą pojemność, aby znacząco przyczynić się do złagodzenia zmian klimatu wywołanych działalnością człowieka.



**Rycina 1**  
CO<sub>2</sub> zostaje zatłoczony do głębokich warstw geologicznych cechujących się obecnością porowatych i przepuszczalnych skał (porównaj z piaskowcem na dolnym zdjęciu), przykrytych nieprzepuszczalnymi skałami (porównaj z iltowcem na górnym zdjęciu), które zapobiegają ucieczce CO<sub>2</sub> ku powierzchni. Możliwe są trzy główne miejsca zatłaczania: 1. Szczerpane złoże ropy naftowej lub gazu ziemnego, tam gdzie jest możliwa intensyfikacja wydobycia. 2. Formacje wodonośne zawierające solankę nieprzydatną do spożycia przez ludzi. 3. Głębokie, nieeksploatowane pokłady węgla, lokalnie powiązane ze zwiększonym wydobyciem metanu

Podziemne składowanie dwutlenku węgla może się odbywać na trzy sposoby (ryc. 1):

1. W szczerpanych złożach gazu ziemnego i ropy naftowej – miejsca te zostały dobrze poznane w czasie badań i wydobycia węglowodorów, pozwalają na natychmiastowe składowanie dwutlenku węgla.
2. W głębokich poziomach solankowych – o jeszcze większym niż w przypadku szczerpanych złóż potencjale składowania, jednak poziomy te nie zostały jeszcze do końca zbadane.
3. W głębokich, nieeksploatowanych złożach węgla – będzie mógł być stosowany dopiero, gdy zostanie rozwiązany problem zatłaczania ogromnych ilości CO<sub>2</sub> do słabo przepuszczalnych złóż węgla.

## Zbiorniki

Dwutlenek węgla zatłoczony w nadające się do tego celu formacje skalne gromadzi się w przestrzeniach międzyziarnowych, a także w pęknięciach, wypierając i zastępując w ten sposób występujące tam substancje, takie jak gazy, woda czy ropa. Formacje skalne nadające się do geologicznego składowania CO<sub>2</sub> powinny się charakteryzować wysoką porowatością i przepuszczalnością. Takie formacje skalne, powstałe w wyniku deponowania osadów w przeszłości geologicznej, występują w tzw. „basenach sedimentacyjnych”. Miejscami formacje przepuszczalne przełamują się z nieprzepuszczalnymi skałami, które mogą

stanowić warstwę uszczelniającą. Baseny sedimentacyjne często są miejscem powstawania złóż węglowodorów i naturalnych obszarów, w których występuje nagromadzenie dwutlenku węgla. Jest to dowodem na ich zdolność do zatrzymywania w naturalnych pułapkach na długi czas substancji płynnych, takich jak ropa naftowa, gaz (ziemny), a nawet czysty CO<sub>2</sub>, i utrzymywania ich przez wiele milionów lat. Głębokie warstwy skalne często są przedstawiane na ilustracjach w formie uproszczonego, jednorodnego „przekładańca”, ukazując miejsca, w których możliwe jest składowanie dwutlenku węgla. W rzeczywistości struktury te składają się z nierównomiernie rozmieszczonych i miejscowo zuskokowanych formacji skalnych, zbiorników, a także skał nieprzepuszczalnego nadkładu, tworząc niejednorodną strukturę. Dogłębna wiedza na temat miejsca składowania, a także doświadczenie geologiczne są niezbędne do oceny przydatności podziemnych struktur, które zostały wytypowane do długoterminowego składowania dwutlenku węgla. Potencjalne zbiorniki (kolektory) CO<sub>2</sub> muszą spełniać wiele kryteriów. Najważniejsze z nich to:

- odpowiednia porowatość, przepuszczalność i pojemność zbiornika;
- obecność wyżej położonych, przykrywających skał nieprzepuszczalnych, tzw. uszczelnienie (np. ilt, iltowce, margle, skały solne), które zapobiegają migracji CO<sub>2</sub> do wyższych warstw;

- obecność „struktur-pułapek” – struktur antyklinalnych ze skałami nieprzepuszczalnego nadkładu, które mogą wpływać na migrację CO<sub>2</sub> wewnątrz zbiornika, w którym jest on składowany;
- położenie zbiornika poniżej 800 m pod powierzchnią ziemi, gdzie ciśnienie i temperatura są na tyle wysokie, że umożliwiają składowanie CO<sub>2</sub> w sprężonej, płynnej postaci, dzięki czemu możliwe jest zwiększenie ilości składowanego dwutlenku węgla;
- brak wody pitnej – CO<sub>2</sub> nie będzie zatłaczane do poziomów wodonośnych, które mogą być wykorzystywane przez człowieka.

### Gdzie w Europie można znaleźć miejsca nadające się do podziemnego składowania CO<sub>2</sub>

Baseny sedimentacyjne występują powszechnie na terenie całej Europy, na przykład na Morzu Północnym i na kontynencie wokół łańcucha Alp (ryc. 2). Wiele formacji w obrębie basenów europejskich spełnia kryteria podziemnego składowania, toteż są one obecnie kartowane i opracowywane przez naukowców. Pozostała część Europy jest zbudowana ze starych, skonsolidowanych skał krystalicznych (np. duża część Skandynawii). Takie obszary nie nadają się do podziemnego składowania dwutlenku węgla. Przykładem miejsca potencjalnie nadającego się do podziemnego składowania CO<sub>2</sub> jest basen permsko-mezozoiczny, który rozciąga się od Anglii po Polskę (zaznaczony największą elipsą na ryc. 2). Na osady oddziaływał tam proces formujący skały, który pozostawił w porach przestrzeń wypełnioną solankami, ropą naftową i gazem ziemnym. Warstwy itów, które występują pomiędzy porowatymi piaskowcami, zostały ściśnięte tak, że powstały słabo przepuszczalne warstwy zapobiegające uwalnianiu płynów. Wiele formacji piaskowcowych leży na głębokościach od 1 do 4 km, gdzie ciśnienie jest wystarczająco wysokie, aby móc składować CO<sub>2</sub> w postaci fazy gęstej. Zawartość soli w wodach znajdujących się w formacjach na tej głębokości zwiększa się w przedziale od 100 do 400 g/l, a więc zawartość soli w tych formacjach jest wyższa niż w wodzie morskiej (35 g/l). Ruchy w basenie spowodowały plastyczne deformacje soli kamiennej, tworząc setki kopułokształtnych (antyklinalnych) struktur, które następnie uwięziły gaz ziemny. To właśnie te pułapki są przedmiotem badań związanych ze składowaniem CO<sub>2</sub>, a także wdrażania projektów pilotażowych na tych obszarach.

### Pojemność składowania CO<sub>2</sub>

Znajomość pojemności składowania CO<sub>2</sub> jest potrzebna politykom, legislatorom, a także przyszłym operatorom składowisk. Szacunki pojemności składowania są zazwyczaj bardzo przybliżone i opierają się na zasięgu przestrzennym potencjalnie nadających się do tego formacji skalnych. Pojemność może być szacowana na różną skalę – od skali krajowej w przypadku prostych oszacowań do skali basenów i zbiorników dla większych i dokładniejszych obliczeń, w których brana jest pod uwagę różnorodność, a także złożoność rzeczywistej budowy geologicznej.

**Pojemność objętościowa.** Bilans pojemności składowania dla poszczególnych krajów powszechnie opiera się na obliczeniach objętości porowej formacji. Teoretycznie pojemność składowania dla danej formacji może być obliczana poprzez pomnożenie obszaru formacji przez jej miąższość, jej przeciętną



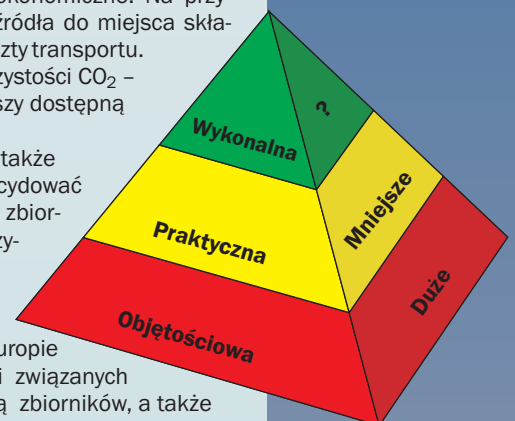
porowatość, a także przeciętną gęstość CO<sub>2</sub> w zbiorniku na określonej głębokości. Ponieważ przestrzeń między porami jest już zajęta przez wodę, tylko jej mała część może zostać użyta do składowania CO<sub>2</sub>; zazwyczaj ocenia się, że jest to 1–3%. Ten współczynnik pojemności składowania jest stosowany przy szacowaniu pojemności objętościowej.

**Pojemność praktyczna.** Bardziej realistycznej oceny pojemności można dokonać dla pojedynczego miejsca składowania na podstawie szczegółowych badań. Miąższość formacji nie jest stała, również cechy zbiornika mogą zmieniać się na niewielkich odległościach. Znajomość wielkości, kształtu i cech geologicznych struktur pozwala na zmniejszenie niepewności w obliczeniach objętości. Na podstawie tych informacji w celu oszacowania praktycznej pojemności składowania przeprowadza się symulacje komputerowe procesu zatłaczania CO<sub>2</sub> oraz jego migracji wewnątrz zbiornika.

**Pojemność wykonalna.** Pojemność jest związana nie tylko z właściwościami fizycznymi skały. Na to, czy dane miejsce nadające się do składowania CO<sub>2</sub> będzie użyte, wpływają także czynniki socjoekonomiczne. Na przykład przemieszczanie CO<sub>2</sub> od źródła do miejsca składowania będzie wpływało na koszty transportu. Pojemność zależy również od czystości CO<sub>2</sub> – obecność innych gazów zmniejszy dostępną ilość CO<sub>2</sub> w zbiorniku. Ostatecznie wybór polityczny, a także akceptacja społeczna, będą decydować o tym, czy dostępna pojemność zbiornika będzie rzeczywiście wykorzystana czy też nie.

Podsumowując, wiemy że pojemność składowania CO<sub>2</sub> w Europie jest duża, pomimo wątpliwości związanych ze złożonością i różnorodnością zbiorników, a także czynnikami socjoekonomicznymi. Europejski projekt GESTCO ocenił pojemność składowania CO<sub>2</sub> w złożach węglowodorów na obszarze Morza Północnego i na obszarach przyległych na 37 Gt. Projekt ten umożliwi utworzenie wielkich instalacji służących do zatłaczania CO<sub>2</sub>, działających w tym regionie przez kilka dekad. Aktualizacja oraz dalsza analiza pojemności składowania CO<sub>2</sub> w Europie jest przedmiotem badań w poszczególnych państwach członkowskich, a także w ramach projektu unijnego UE Geocapacity\* realizowanego dla obszaru całej Europy.

**Rycina 2**  
Mapa geologiczna Europy przedstawiająca położenie głównych basenów sedimentacyjnych (czerwone elipsy), gdzie możliwe jest występowanie podziemnych zbiorników nadających się do składowania CO<sub>2</sub> (na podstawie Mapy geologicznej Europy w skali 1:5 000 000)



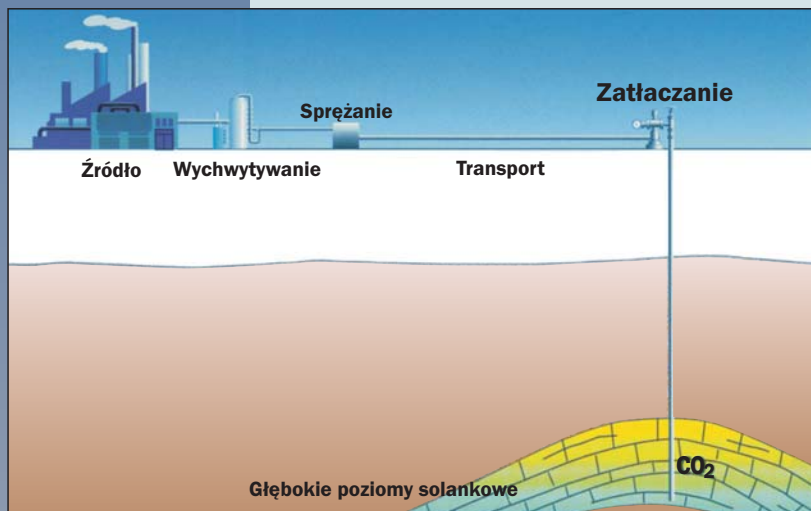
# W jaki sposób możemy transportować i zatłaczać ogromne ilości CO<sub>2</sub>?

Po wychwyceniu w instalacjach przemysłowych, dwutlenek węgla jest sprężony, transportowany, a następnie zatłaczany do formacji zbiornikowych przez jeden bądź kilka otworów. Do zatłaczania kilku milionów ton CO<sub>2</sub> rocznie musi być przygotowany cały zespół urządzeń.

## Sprężanie

Dwutlenek węgla jest sprężony do postaci gęstego płynu, który zajmuje znacznie mniej miejsca niż gaz. Kiedy CO<sub>2</sub> zostanie już wydzielony z gazów spalinowych (w elektrowni czy innej instalacji przemysłowej), otrzymuje się w efekcie stężony strumień CO<sub>2</sub>, który pozbawiony wody i sprężony jest efektywniejszy w transporcie i składowaniu (**ryc. 1**). Odwodnienie gazu jest niezbędne w celu uniknięcia korozji elementów wyposażenia i infrastruktury instalacji, a także uniknięcia tworzenia się pod wpływem wysokiego ciśnienia hydratów (stałe, podobne do lodu kryształy, które mogą zatykać elementy instalacji – zawory, rury itd.). Sprężanie jest procesem wieloetapowym, w którego skład wchodzi powtarzające się cykle: kompresji, chłodzenia i odprowadzania wody. Ciśnienie, temperatura i zawartość wody muszą być dostosowane do sposobu transportu oraz do reżimów ciśnieniowych miejsca składowania. Kluczowymi czynnikami projektowymi instalacji zatłaczania są: wskaźnik ilości zatłoczonego gazu, ciśnienie zatłaczania i opróżniania, pojemność cieplna gazu i wydajność urządzenia sprężającego. Technologia sprężania jest dostępna i powszechnie stosowana w wielu dziedzinach przemysłu.

**Rycina 1**  
Etapy geologicznego składowania dwutlenku węgla. W celu przetransportowania CO<sub>2</sub> z punktu emisji do miejsca jego bezpiecznego i trwałego składowania trzeba wykonać szereg czynności, włączając w to: wychwytywanie, sprężanie, transport i zatłaczanie



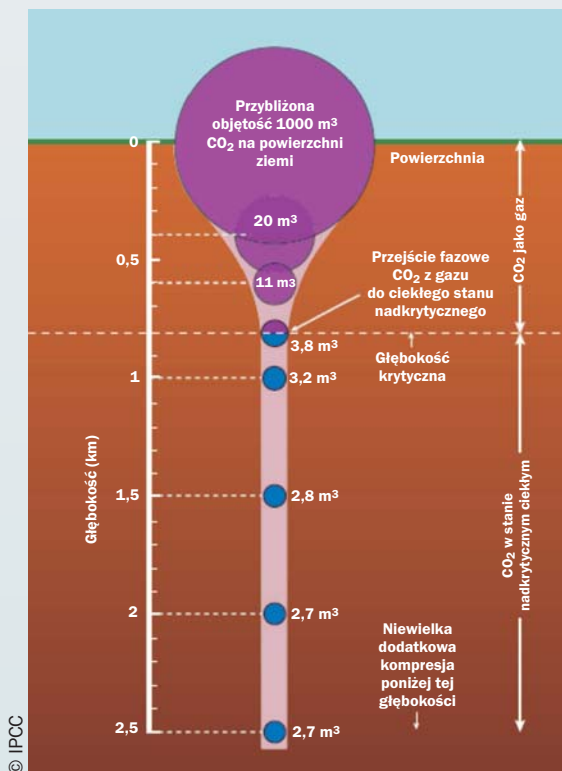
zbiorników. Tankowce używane do transportu płynnego gazu (LPG) mogą również być wykorzystywane do transportu dwutlenku węgla. W szczególności dlatego, że systemy półchłodzące są hermetyczne i oziębiane, więc CO<sub>2</sub> może być transportowany w postaci cieczy. Najnowsze statki używane do transportu LPG mają objętość do 200 000 m<sup>3</sup> i mogą przewozić 230 000 ton dwutlenku węgla. Jednak transport przy użyciu statków nie jest w stanie zapewnić logistycznie ciągłości dostaw. Ponadto w celu przeładunku CO<sub>2</sub> wymagane są w portach instalacje pośrednie.

Transport wielkich ilości CO<sub>2</sub> rurociągami jest obecnie stosowany przez firmy naftowe w celach intensyfikacji wydobycia ropy naftowej (EOR) (ok. 3000 km rurociągów na świecie, większość w USA). Pod względem kosztów transportu jest to bardziej efektywna forma transportu niż drogą morską. Gwarantuje też takie korzyści, jak zapewnienie ciągłego dopływu gazu z instalacji wychwytyjących do miejsca składowania. Istniejące rurociągi CO<sub>2</sub> funkcjonują pod wysokim ciśnieniem, tłocząc CO<sub>2</sub> w stanie nadkrytycznym, w którym zachowuje się on jak gaz, ale ma gęstość cieczy. Trzy istotne czynniki wpływają na ilość CO<sub>2</sub>, jaką rurociągi są w stanie transportować, są to: średnica rurociągu, ciśnienie robocze i grubość ścianek rury.

## Zatłaczanie

Kiedy CO<sub>2</sub> dociera do miejsca składowania, zostaje pod wysokim ciśnieniem zatłoczony do zbiornika (**ryc. 2**). Ciśnienie zatłaczania musi być odpowiednio większe niż ciśnienie zbiornika, gdyż tylko wtedy płyny znajdujące się w zbiorniku zostaną wyparte z miejsca zatłaczania. Liczba otworów zatłaczających zależy od ilości CO<sub>2</sub>, który ma być składowany, tempa zatłaczania (ilość zatłoczonego CO<sub>2</sub> na godzinę), przepuszczalności i wielkości zbiornika, maksymalnego bezpiecznego ciśnienia zatłaczania i od typu otworu. W związku z planowanym długoterminowym zatrzymaniem CO<sub>2</sub> w miejscu składowania, konieczna jest pewność co do hydraulicznej integralności formacji skalnych. Szybkie tempo zatłaczania może spowodować wzrost ciśnienia w punkcie zatłaczania, w szczególności w formacjach słabo przepuszczalnych. Ciśnienie zatłaczania zazwyczaj nie powinno przekraczać ciśnienia szczelinowania skał, gdyż może uszkodzić zbiornik lub nakład skalny. Do określenia maksymalnego ciśnienia zatłaczania stosowane są zarówno analizy geomechaniczne, jak i modele, które pozwolą na uniknięcie rozsącznienia formacji zbiornikowej.

Na wskaźnik regulujący zatłaczanie CO<sub>2</sub> do formacji mogą wpływać procesy chemiczne. W zależności od rodzaju skał zbiornika, składu płynów, a także charakterystyki zbiornika (takich jak temperatura, ciśnienie, objętość, koncentracja itd.) w pobliżu otworu zatłaczającego mogą wystąpić procesy mineralnego rozpuszczania i wytrącania. Mogą one prowadzić do



**Rycina 2**  
**Na głębokości ok. 0,8 km zatłoczony CO<sub>2</sub> przechodzi w stan nadkrytyczny. Jego objętość zmniejsza się dramatycznie z 1000 m<sup>3</sup> na powierzchni do 2,7 m<sup>3</sup> na głębokości 2 km. Czynnikiem ten sprawia, że geologiczne składowanie wielkich ilości CO<sub>2</sub> jest niezwykle atrakcyjne**

zwiększenia bądź zmniejszenia wskaźnika zatłaczania gazu. Przy zatłaczaniu CO<sub>2</sub> część gazu rozpuszcza się w solance znajdującej się w zbiorniku, nieznacznie zmniejszając jej odczyn pH\*, który jest stabilizowany przez procesy rozpuszczania minerałów węglanowych występujących w skałach zbiornikowych. Węglany reagują jako pierwsze, ponieważ są najbardziej reaktywne, rozpuszczanie następuje z chwilą zatłaczania. Proces ten może zwiększyć porowatość skały i wpłynąć na możliwości zatłaczania. Jednak rozpuszczone węglany mogą się ponownie wytrącać i kolmatować strefę przyotworową. Znaczny strumień CO<sub>2</sub> może zostać użyty do ograniczenia obniżenia przepuszczalności strefy przyotworowej, oddalając strefę wytrącania od otworu.

Kolejnym zjawiskiem wywołanym przez zatłaczanie jest dehydratacja. Po etapie zakwaszania, woda z solanki w okolicy otworu rozpuszcza się w zatłoczonym suchym gazie, co powoduje wzrost jej mineralizacji. Może wtedy dojść do wytrącenia się soli z powstałego roztworu przesyconego i do zmniejszenia przepuszczalności skał w pobliżu otworu.

Omówione wyżej zagadnienia są uzależnione od interakcji złożonych procesów występujących lokalnie wokół otworu zatłaczającego CO<sub>2</sub>, a także w dużej

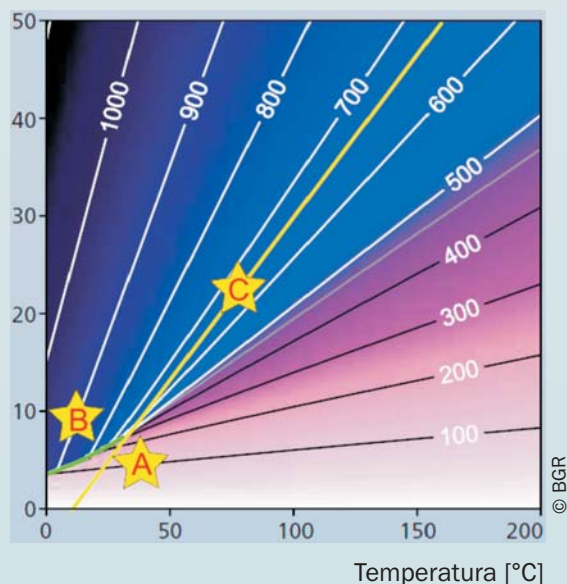
mierze są zależne od czasu i odległości od otworu. Do oceny tych efektów stosuje się symulacje numeryczne. Strumień przepływu zatłaczania powinien być uważnie monitorowany w celu kontroli procesu, który może ograniczać zatłaczanie pożądanymi ilościami dwutlenku węgla.

## Skład strumienia CO<sub>2</sub>

Zarówno skład, jak i czystość strumienia CO<sub>2</sub>, który jest efektem procesu wychwytywania, mają znaczący wpływ na wszystkie dalsze aspekty składowania dwutlenku węgla. Obecność kilku procent innych substancji, takich jak woda, siarkowodór (H<sub>2</sub>S), tlenki siarki i azotu (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), azot (N<sub>2</sub>) i tlen (O<sub>2</sub>), wpłynie na fizyczne i chemiczne właściwości CO<sub>2</sub>, a także na jego zachowanie i oddziaływanie. Dlatego też obecność takich substancji musi być dokładnie przeanalizowana na etapie planowania procesów sprężania, transportu i fazy zatłaczania, a także przy dostosowywaniu warunków operacyjnych i instalacji.

Podsumowując, transport oraz zatłaczanie ogromnych ilości dwutlenku węgla są obecnie możliwe do realizacji, jednak jeśli geologiczne składowanie CO<sub>2</sub> ma być powszechnie stosowane, wszystkie te etapy muszą zostać wkomponowane w każdy projekt składowania. Kluczowymi parametrami są właściwości termodynamiczne strumienia dwutlenku węgla (ryc. 3), dawki przepływu dziennego, opory i warunki zbiornikowe.

Ciśnienie [MPa]



**Rycina 3**  
**Gęstość czystego CO<sub>2</sub> (w kg/m<sup>3</sup>) jako funkcja temperatury i ciśnienia. Żółta linia przedstawia typowe ciśnienie i gradient temperatury w basenie sedymentacyjnym. Na głębokościach większych niż 800 m (~8 MPa) warunki panujące w zbiorniku sprzyjają wysokim gęstościom (niebieskie cienie). Zielona krzywa przedstawia fazę graniczną między gazową a ciekłą postacią dwutlenku węgla. Typowe warunki ciśnienia i temperatury dla wychwytywania, transportu i składowania są przedstawione kolejno jako A, B i C**

# Co się dzieje z CO<sub>2</sub> zatłoczonym do podziemnego zbiornika?

Dwutlenek węgla zatłoczony do zbiornika unosi się, wypełniając przestrzeń między porami pod skałami nadkładu. Z czasem część CO<sub>2</sub> rozpuści się i ostatecznie zostanie zamieniony w minerały. Te procesy odbywają się w różnych przedziałach czasowych i zapewniają trwałe uwężnienie gazu.

## Mechanizm pułapkowania

Dwutlenek węgla zatłoczony do zbiornika wypełnia przestrzeń między porami skał, które w większości przypadków są wypełnione solanką. Wraz z zatłoczeniem CO<sub>2</sub> zaczyna funkcjonować szereg mechanizmów pułapkowania. Pierwszy z nich jest uważany za najbardziej istotny i zapobiegający przemieszczaniu się CO<sub>2</sub> ku powierzchni. Pozostałe trzy wpływają na podwyższenie wydajności i bezpieczeństwa składowania w czasie.

### 1. Gromadzenie pod nieprzepuszczalnym nadkładem (pułapkowanie strukturalne)

Jako że gęsty CO<sub>2</sub> jest lżejszy od wody, rozpoczyna się jego przemieszczanie ku stropowi. Ruch ten zatrzymuje się, kiedy CO<sub>2</sub> napotyka na nieprzepuszczalne warstwy skalne, tzw. skały uszczelniające. Właśnie te skały nieprzepuszczalnego nadkładu, składające się głównie z ilów lub soli, pełnią rolę pułapki, zapobiegając dalszemu przemieszczaniu się CO<sub>2</sub> ku górze, co prowadzi do jego akumulacji bezpośrednio poniżej. **Rycina 1** ilustruje przemieszczanie się CO<sub>2</sub> ku górze przez porowate przestrzenie skalne (niebieskie) do momentu, kiedy osiągnie on poziom warstwy nieprzepuszczalnej.

### 2. Unieruchomienie w małych porach (pułapkowanie rezydualne)

Unieruchomienie rezydualne występuje wówczas, gdy przestrzeń między porami w skałach zbiornika są tak wąskie, że CO<sub>2</sub> nie może poruszać się do góry, pomimo różnicy gęstości z otaczającą wodą. Ten proces występuje głównie w trakcie migracji CO<sub>2</sub> i zazwyczaj potrafi unieruchomić kilka procent zatłoczonego CO<sub>2</sub>, w zależności od właściwości skał zbiornika.

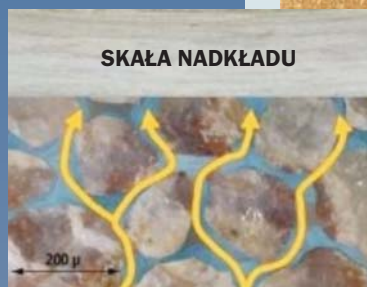
### 3. Rozpuszczanie

Mały odsetek zatłoczonego dwutlenku węgla rozpuszcza się w solance występującej w przestrzeni między porami w zbiorniku. W konsekwencji rozpuszczania woda nasycona CO<sub>2</sub> jest cięższa od wody niezawierającej CO<sub>2</sub>, co prowadzi do jej migracji w dół zbiornika. Szybkość rozpuszczania zależy od kontaktu pomiędzy CO<sub>2</sub> i słoną wodą. Ilość CO<sub>2</sub> jaka może ulec rozpuszczeniu jest ograniczona przez maksymalne stężenie, jednak z powodu ruchu zatłoczonego CO<sub>2</sub> w górę i wody z rozpuszczonym CO<sub>2</sub> w dół występuje ciągłe odnawianie kontaktu pomiędzy solanką a dwutlenkiem węgla, co zwiększa ilość CO<sub>2</sub>, która może zostać rozpuszczona. Z powodu wąskich przestrzeni między porami procesy te zachodzą dość wolno. Wstępne obliczenia wykonane w ramach projektu Sleipner wskazują, że po 10 latach zostanie rozpuszczone ok. 15% dwutlenku węgla.

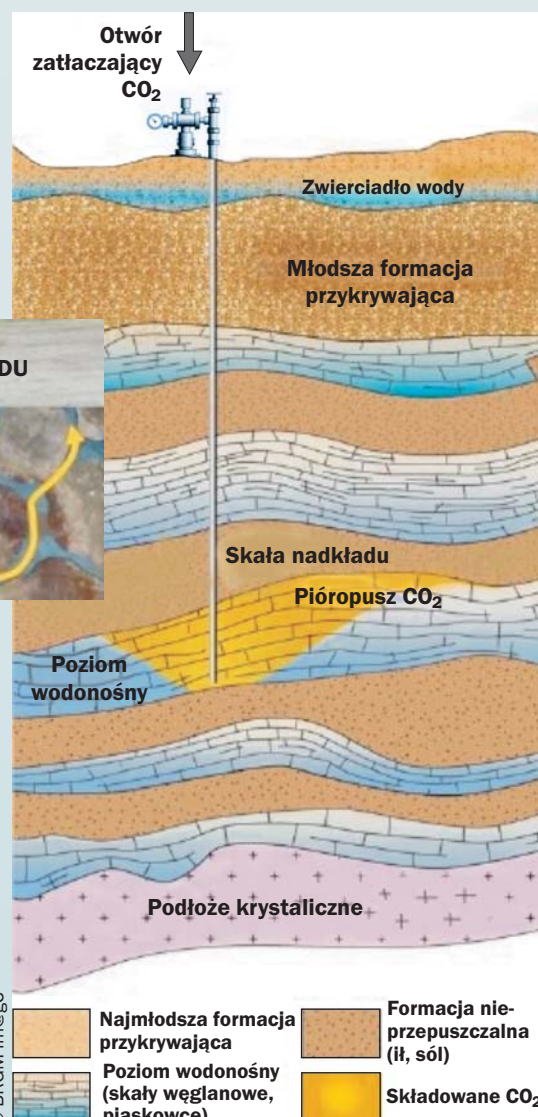
### 4. Mineralizacja (pułapkowanie mineralne)

Dwutlenek węgla, szczególnie w połączeniu z solanką znajdującą się w zbiorniku, może reagować z minerałami tworzącymi skały. Niektóre minerały mogą zostać rozpuszczone, podczas gdy inne mogą się wytrącać w zależności od wielkości pH i od obecności minerałów wchodzących w skład skał zbiornika (**ryc. 2**).

Widok  
mikroskopowy



**Rycina 1**  
Zatłoczony CO<sub>2</sub>, lżejszy od wody, ma skłonność do wznoszenia się, jednak taki ruch jest zatrzymywany przez leżące wyżej nieprzepuszczalne warstwy skalne

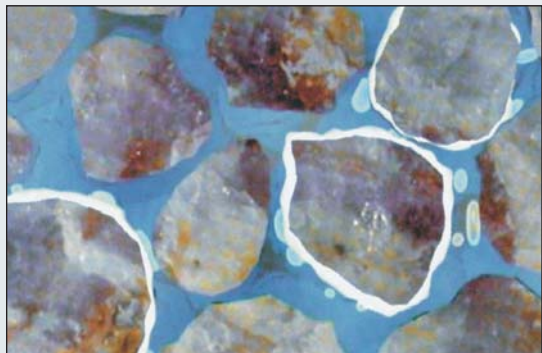


© BRGM im@ge

## Skąd to wszystko wiemy?

Znajomość procesów pułapkowania pochodzi z czterech głównych źródeł:

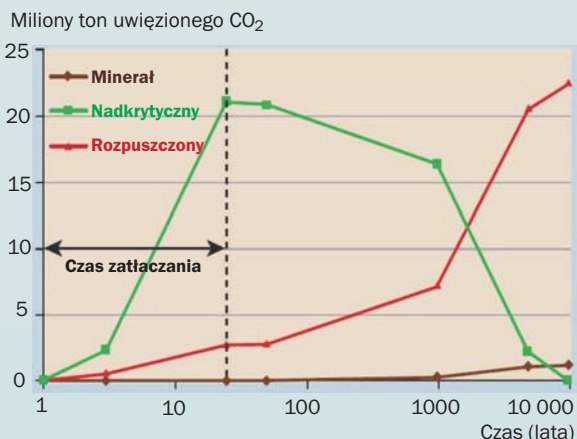
- **Pomiarów laboratoryjnych** – badania na niewielką skalę procesu mineralizacji, przepływu i rozpuszczania mogą być przeprowadzone na próbkach skalnych, dających wyobrażenie o krótkotrwałych procesach zachodzących na niewielką skalę.
- **Symulacji numerycznych** wykorzystywanych do przewidywania zachowania CO<sub>2</sub> w długim czasie (ryc. 4). Eksperymenty laboratoryjne są wykorzystywane do kalibrowania symulacji numerycznych.
- **Badań naturalnych zbiorników CO<sub>2</sub>**, w których gaz ten (głównie pochodzenia wulkanicznego) został uwięziony pod ziemią na długi czas, często na wiele milionów lat. Miejsca te, nazywane „naturalnymi odpowiednikami”\*, dostarczają informacji na temat zachowania się gazów i o długoterminowych konsekwencjach obecności CO<sub>2</sub> pod powierzchnią ziemi.
- **Monitorowaniu istniejących projektów demonstracyjnych geologicznego składowania CO<sub>2</sub>**, takich jak Sleipner (na obszarze morskim Norwegii), Weyburn (w Kanadzie), In Salah (w Algierii) i K12-B (na obszarze morskim Holandii). Wyniki symulacji w krótkim czasie mogą być porównane z rzeczywistymi danymi i pomóc w ulepszeniu modeli.



**Rycina 2**  
Migrujący gęsty CO<sub>2</sub> (jasne, niebieskie bąbelki), rozpuszcza się i reaguje z ziarnami skał, prowadząc do wytrącania się minerałów węglanowych na obrzeżach ziarn (białe)

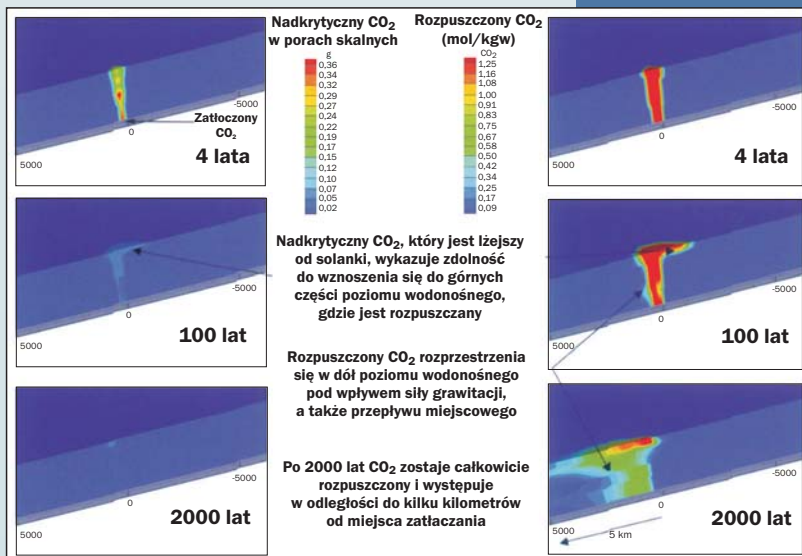
Jak dowodzą badania z projektu Sleipner, wskutek procesu mineralizacji tylko relatywnie mała część CO<sub>2</sub> zostanie unieruchomiona po bardzo długim czasie. Po upływie 10 000 lat jedynie 5% zatłoczonego CO<sub>2</sub> zostanie zmineralizowane, podczas gdy 95% będzie rozpuszczone, bez udziału CO<sub>2</sub> w fazie gęstej.

W mechanizmie pułapkowania ważna jest specyfika miejsca lokalizacji składowiska. Na przykład w zbiornikach antyklinalnych dwutlenek węgla powinien pozostawać głównie w fazie gęstej nawet po upływie bardzo długiego czasu, podczas gdy w płaskim zbiorniku, takim jak Sleipner, większość zatłoczonego CO<sub>2</sub> zostanie rozpuszczona bądź zmineralizowana. Zmiany ilości uwięzionego CO<sub>2</sub> dla różnych mechanizmów pułapkowania w projekcie Sleipnera ilustruje rycina 3.



**Rycina 3**  
Zmiany ilości CO<sub>2</sub> uwięzionego w różny sposób w zbiorniku Sleipner zgodnie z symulacją przepływu. Dwutlenek węgla zostaje uwięziony w fazie nadkrytycznej przez mechanizmy 1 i 2, w formie rozpuszczonej przez mechanizm 3 oraz w formie mineralnej przez mechanizm 4

**Rycina 4**  
Modelowanie 3D migracji CO<sub>2</sub> w poziomie wodonośnym po zatłoczeniu 150 000 ton w ciągu 4 lat w poziomie wodonośnym jury środkowej we Francji. Przedstawiono tutaj nadkrytyczny CO<sub>2</sub> (po lewej stronie) i CO<sub>2</sub> rozpuszczony w solance (po prawej) po upływie 4, 100 i 2000 lat od rozpoczęcia zatłaczania. Symulację oparto na danych terenowych i eksperymentalnych



Jedynie przez ciągłe porównywanie i powtórne sprawdzanie tych czterech źródeł informacji możliwe jest uzyskiwanie wiarygodnych danych na temat wszystkich procesów zachodzących 1000 m poniżej powierzchni ziemi.

Podsumowując, wiemy że niebezpieczeństwo związane z miejscem składowania CO<sub>2</sub> wzrasta wraz z upływem czasu. Najistotniejszym zagadnieniem jest znalezienie zbiornika ze skałami nieprzepuszczalnego nadkładu, który zatrzyma CO<sub>2</sub> (pułapkowanie strukturalne). Procesy związane z rozpuszczaniem, mineralizacją i rezydualnym pułapkowaniem zapobiegają migracji CO<sub>2</sub> ku powierzchni.

# Czy CO<sub>2</sub> może wyciec ze zbiornika i jakie mogą być tego skutki?

Miejsce składowania CO<sub>2</sub> jest bardzo starannie wybierane na podstawie badań naturalnych odpowiedników, w związku z czym nie przewiduje się wystąpienia w nim żadnych znaczących wycieków. Naturalne zbiorniki zawierające gaz pomagają nam zrozumieć warunki, w jakich gaz zostaje uwięziony bądź jest uwalniany. Ponadto miejsca wycieku pokazują nam możliwe efekty wycieku dwutlenku węgla.

## Drogi wycieku

Wyciek dwutlenku węgla może być spowodowany przez człowieka (np. głębokie otwory wiertnicze) lub nastąpić w sposób naturalny (np. poprzez systemy pęknięć i uskoków). Zarówno czynne, jak i nieczynne otwory wiertnicze mogą stanowić drogę migracji CO<sub>2</sub>, ponieważ istnieje połączenie pomiędzy powierzchnią a zbiornikiem, a ponadto rury są zbudowane z materiałów wytworzonych przez człowieka i po długim czasie użytkowania mogą podlegać korozji (ryc. 1). Dodatkową komplikacją jest to, że nie wszystkie otwory zostały wykonane przy użyciu tych samych technik, dlatego też nowsze z nich są bezpieczniejsze niż starsze. W obu przypadkach ryzyko wycieku przez otwory jest małe, ponieważ oba rodzaje otworów – nowe i stare – mogą być bardzo skutecznie monitorowane przy użyciu czułych metod geochemicznych i geofizycznych. Ponieważ obecnie ta technologia wiertnicza funkcjonuje w przemyśle naftowym, może być stosowana do wszelkich działań naprawczych.

Przepływ wzdłuż naturalnych pęknięć i uskoków, które mogą występować w nadkładzie skalnym, jest bardziej złożony, ponieważ mamy do czynienia z nieregularnymi, planarnymi ciałami o zmiennej przepuszczalności. Dobre zrozumienie pod względem naukowym i technicznym tych dwóch naturalnych systemów: „przeciekającego” i „nieprzeciekającego”, pozwoli nam na takie projektowanie składowania CO<sub>2</sub>, że systemy te będą miały te same cechy, co zbiorniki występujące w warunkach naturalnych, w których CO<sub>2</sub> i metan są uwięzione od tysięcy, a nawet od milionów lat.

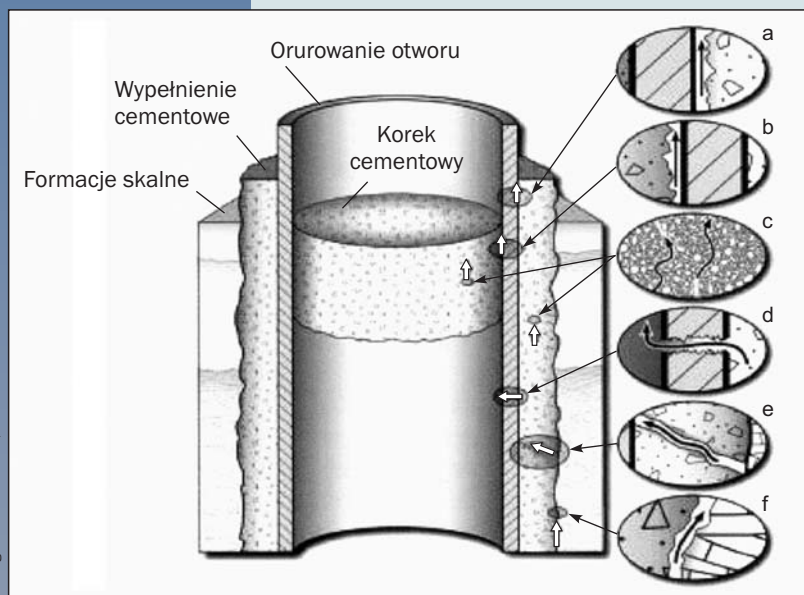
## Naturalne odpowiedniki: czego się nauczyliśmy

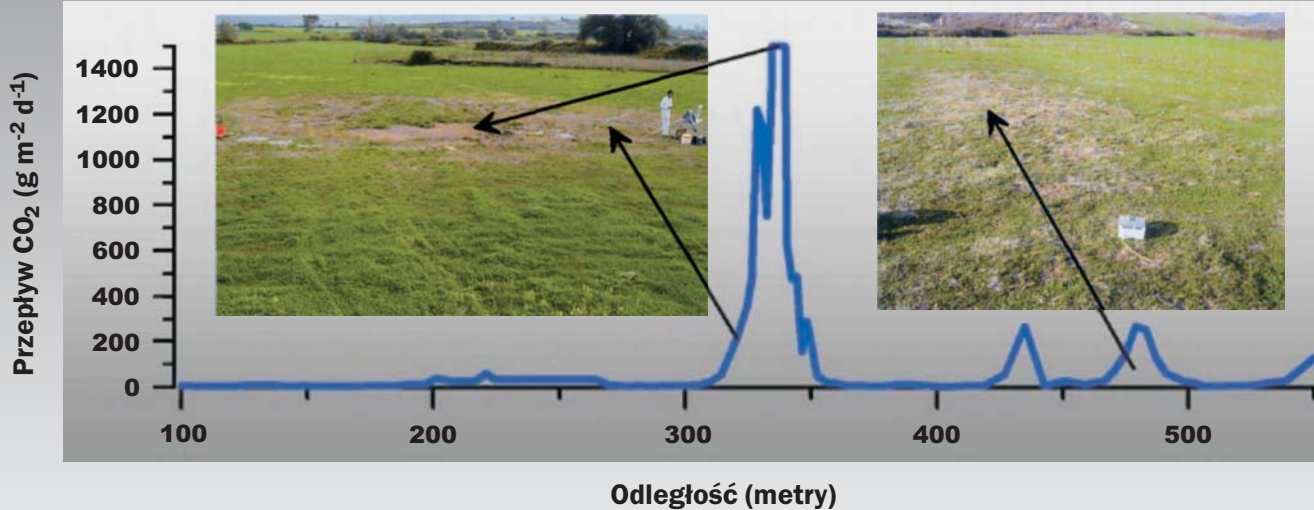
Naturalne odpowiedniki (tzw. analogi) są niezwykle przydatnym źródłem informacji, służącym lepszemu zrozumieniu procesów związanych z głęboką migracją gazów i naturalną wymianą gazów pomiędzy ziemią i atmosferą. Główne wnioski pochodzące z badań nad licznymi „przeciekającymi” i „nieprzeciekającymi” naturalnymi zbiornikami gazowymi są następujące:

- pod wpływem sprzyjających warunków geologicznych naturalnie wytworzony gaz może zostać uwięziony na setki tysięcy, a nawet miliony lat;
- odizolowane zbiorniki gazu oraz komory występują nawet w najmniej korzystnych warunkach geologicznych (obszary wulkaniczne);
- migracje jakichkolwiek znaczących ilości gazu wymagają adwekcji (tj. przepływu wywołanego ciśnieniem), ponieważ dyfuzja jest bardzo powolnym procesem;
- aby zachodziła adwekcja, warunki przepływu występujące w zbiorniku muszą być bliskie ciśnieniu litostatycznemu w celu utrzymania rozwarcia uskoku i pęknięć lub mechanicznego tworzenia nowych dróg;
- obszary, gdzie gaz pochodzenia naturalnego wycieka na powierzchnię, są usytuowane niemal wyłącznie w silnie spękanych rejonach wulkanicznych bądź sejsmicznych, tam gdzie szczeliny gazowe leżą wzdłuż aktywnych bądź niedawno aktywnych uskoku;
- znaczące wycieki gazu zdarzają się rzadko i mają tendencje do występowania głównie w mocno zuskokowanych obszarach wulkanicznych i geotermicznych, gdzie CO<sub>2</sub> jest stale produkowane w wyniku naturalnych procesów;
- anomalie gazowe na powierzchni występują zazwyczaj w miejscach, które wykazują ograniczony przestrzenny wpływ na środowisko przy powierzchni.

Aby nastąpił wyciek, potrzebna jest kombinacja pewnych określonych warunków. W rezultacie, jest mało prawdopodobne, że dobrze dobrane i uważnie rozpoznane pod kątem inżynierskim miejsce geologicznego składowania CO<sub>2</sub> będzie nieuszczelne. Chociaż potencjalnie możliwość wycieku jest mała, muszą zostać w pełni zrozumiane procesy związane z wyciekami oraz wszelkie efekty działań w celu wybrania, zaprojektowania i obsługi możliwie najbezpieczniejszych geologicznie miejsc do składowania dwutlenku węgla.

**Rycina 1**  
Możliwe drogi ucieczki CO<sub>2</sub> w otworze. Ucieczka poprzez materiały zmienione w wyniku reakcji chemicznych (c, d, e) lub wzdłuż powierzchni styku (a, b, f)





**Rycina 2**  
Wpływ wycieków CO<sub>2</sub> na roślinność z dużymi (lewy) i mniejszymi (prawy) zmianami. Oddziaływanie jest ograniczone do obszaru, w którym doszło do wycieku CO<sub>2</sub>

### Wpływ składowanego CO<sub>2</sub> na ludzi

Dwutlenek węgla towarzyszy nam przez cały czas. Jest on niebezpieczny dla zdrowia tylko przy bardzo wysokim stężeniu; przy wartości do 50 000 ppm (5%) powoduje bóle i zawroty głowy oraz mdłości. Wyższe stężenie tego gazu, przy zbyt długiej ekspozycji, może spowodować śmierć przez uduszenie, zwłaszcza kiedy stężenie tlenu w powietrzu spada poniżej 16%, granicznego poziomu wymaganego do podtrzymania ludzkiego życia. Jednak w przypadku gdy CO<sub>2</sub> wycieknie na otwarty, płaski obszar, zostaje on szybko rozproszony w powietrzu, nawet przy słabym wietrze. Potencjalne ryzyko dla populacji jest więc ograniczone do strefy otaczającej wyciek bądź do zagłębień terenu, gdzie stężenie może wzrastać, gdyż CO<sub>2</sub> jest gęstszy od powietrza i gromadzi się przy powierzchni ziemi. Znajomość charakterystyki obszarów, na których dochodzi do wycieku gazu, jest przydatna w zapobieganiu ryzyku wycieku i wstrzymaniu się od wszelkich działań na tych terenach. W rzeczywistości, wiele osób żyje na obszarach cechujących się naturalnym wydzielaniem gazu. Na przykład we Włoszech w Ciampino, w pobliżu Rzymu, w odległości 30 metrów od przewodów gazowych, gdzie stężenie CO<sub>2</sub> w glebie osiąga 90% i około 7 ton CO<sub>2</sub> jest uwalniane dziennie do atmosfery, ulokowano osiedla mieszkaniowe. Ich mieszkańcy unikają niebezpieczeństwa stosując proste środki ostrożności. Należą do nich m.in. unikanie nocowania w nisko położonych miejscach, jak również dbanie o to, żeby domy były dobrze przewietrzane.

### Wpływ na środowisko

Potencjalne oddziaływanie podziemnego składowania CO<sub>2</sub> na ekosystem zmienia się w zależności od tego, czy miejsce składowania zostało umiejscowione na morzu czy na lądzie.

W ekosystemach morskich głównym skutkiem wycieku CO<sub>2</sub> będzie lokalne obniżenie pH i związane z tym oddziaływanie głównie na zwierzęta żyjące na dnie morza, które nie mogą opuścić tego obszaru. Jednak następstwa tego zdarzenia będą przestrzennie ograniczone, a ekosystem wkrótce po ustaniu wycieku będzie wykazywał oznaki regeneracji.

W ekosystemach lądowych oddziaływanie można scharakteryzować w następujący sposób:

- **Wegetacja** – chociaż stężenie CO<sub>2</sub> w glebie w wielkości do około 20–30% może sprzyjać nawożeniu i zwiększeniu tempa wzrostu pewnych gatunków roślin, jednak wartości powyżej tego progu dla niektórych gatunków mogą okazać się zabójcze. Dzieje się tak szczególnie w miejscach otaczających strefę wycieku gazu, natomiast już kilka metrów dalej wegetacja roślin przebiega bez zakłóceń (ryc. 2).
- **Jakość wód podziemnych** – skład chemiczny wód podziemnych może się zmieniać poprzez dodanie CO<sub>2</sub> wraz z tym, jak woda staje się bardziej kwaśna, a pierwiastki ze skał i minerałów poziomu wodonośnego zostają uwolnione. Nawet jeśli CO<sub>2</sub> wycieknie do poziomów wody pitnej, skutki tego pozostaną skoncentrowane w jednym miejscu, a wielkość oddziaływań takiego wycieku jest obecnie badana przez naukowców. Co ciekawe, wiele poziomów wodonośnych w całej Europie jest wzbogaconych w naturalny CO<sub>2</sub>, a woda z nich jest butelkowana i sprzedawana jako „gazowana woda mineralna”.
- **Integralność skał** – zakwaszenie wód podziemnych może powodować rozpuszczanie skał i spadek integralności strukturalnej, tworząc leje krasowe. Jednak ten typ oddziaływania występuje tylko pod wpływem bardzo specyficznych warunków geologicznych i hydrologicznych (tektonicznie aktywne poziomy wodonośne odznaczające się wysokim przepływem, występowanie minerałów bogatych w węglany). Taka sytuacja jest mało prawdopodobna w strefie powyżej utworzonego przez człowieka miejsca geologicznego składowania.

Podsumowując, ponieważ wpływ ewentualnych wycieków CO<sub>2</sub> będzie zależeć od konkretnego miejsca, zatem dogłębna znajomość budowy geologicznej podłoża pozwoli nam zidentyfikować potencjalne drogi, którymi mógłby migrować gaz, wybrać miejsca w których ryzyko potencjalnego wycieku jest najmniej oraz przewidywać zachowanie się gazu.

# Jak można monitorować miejsce składowania CO<sub>2</sub> w głębi ziemi i na jej powierzchni?

**Wszystkie miejsca składowania CO<sub>2</sub> powinny być monitorowane z powodów bezpieczeństwa, środowiskowych, społecznych i ekonomicznych. Strategia monitoringu musi zostać wypracowana w zależności od tego, co dokładnie ma być monitorowane i w jaki sposób.**

## Dlaczego potrzebny jest monitoring?

Monitorowanie złoża będzie niezbędne, żeby przekonać się, czy podstawowy cel geologicznego składowania CO<sub>2</sub> – długoterminowa izolacja antropogenicznego CO<sub>2</sub> od atmosfery – został osiągnięty. Jest wiele powodów, dla których monitoruje się miejsca składowania. Zaliczamy do nich:

- **cele operacyjne:** w celu kontroli i optymalizacji procesu zatłaczania;
- **względy bezpieczeństwa i ochrony środowiska:** w celu zapobiegania lub minimalizacji oddziaływania składowanego CO<sub>2</sub> na ludzi, przyrodę i ekosystemy znajdujące się w pobliżu miejsca składowania, a także dla złagodzenia globalnych zmian klimatycznych;
- **cele społeczne:** dostarczenie społeczeństwu informacji potrzebnych do zrozumienia bezpieczeństwa związanego z miejscem składowania, a także działania mające na celu zdobycie społecznego zaufania;
- **cele finansowe:** stworzenie rynku zaufania dla technologii CCS i weryfikowanie zatłoczonych ilości CO<sub>2</sub> tak, aby były one uznawane za tzw. „emisję unikatową” w przyszłych fazach działań Wspólnotowego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji (ETS).

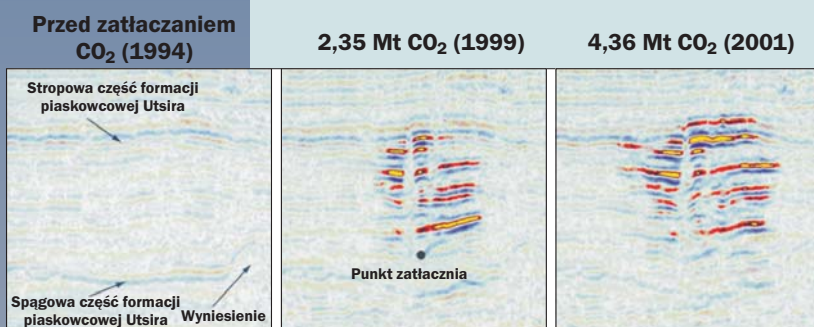
Monitorowanie zarówno stanu początkowego środowiska (zerowy), jak i późniejszego stanu składowiska stanowi istotne prawne wymaganie wskazane w Dyrektywie EC w kwestii CCS, opublikowanej w formie szkicu 23 stycznia 2008 roku. Wykonawcy powinni wykazać zgodność przebiegu procesu składowania z regulacjami zarówno obecnie, jak i w późniejszym okresie. Monitorowanie jest ważnym elementem, który zmniejszy niepewność co do miejsca składowania, i dlatego powinno być silnie powiązane z działaniami organów zarządzających na rzecz bezpieczeństwa.

## Jakie są cele monitoringu?

Monitorowanie może być prowadzone w różnym celu, dotyczyć procesów zachodzących w poszczególnych częściach składowiska i obejmować:

- Śledzenie obrazu pióropusza CO<sub>2</sub> w momencie jego migracji z miejsca zatłoczenia – dostarcza to kluczowych danych do kalibrowania modeli, które przewidują przyszłe rozmieszczenie CO<sub>2</sub> w złożu (w miejscu zatłoczenia). Dostępnych jest wiele gotowych technik, a w szczególności powtarzalne badania sejsmiczne, które są skutecznie stosowane w kilku projektach demonstracyjnych i pilotażowych (**ryc. 1**).
- Monitorowanie integralności skał nieprzepuszczalnego nadkładu – konieczne do oceny czy CO<sub>2</sub> jest izolowany wewnątrz zbiornika, a także do czasowego ostrzegania o jakiegokolwiek nieoczekiwanej migracji CO<sub>2</sub> ku górze. Może to być szczególnie istotne w trakcie fazy zatłaczania, kiedy to ciśnienie zbiornika chwilowo, ale znacznie wzrasta.
- Monitorowanie stanu otworu wiertniczego jest ważne, ponieważ głębokie otwory są potencjalnymi drogami migracji CO<sub>2</sub> ku powierzchni. Zarówno otwory służące do zatłaczania CO<sub>2</sub>, jak i otwory obserwacyjne lub otwory wcześniej istniejące, ale zlikwidowane, muszą być uważnie monitorowane, szczególnie w trakcie fazy zatłaczania, a także później w celu zapobiegania nagłym ucieczkom dwutlenku węgla. Monitorowanie służy również weryfikacji, czy wszystkie niepotrzebne już otwory zostały skutecznie zlikwidowane. W celu wczesnego ostrzegania i zagwarantowania bezpieczeństwa, wewnątrz bądź ponad otworami mogą zostać zainstalowane geofizyczne i geochemiczne systemy monitorujące, standardowo stosowane w przemyśle wydobywania ropy i gazu.
- Monitorowanie migracji w nadkładzie. W miejscach składowania, gdzie dodatkowo warstwy skalne położone na mniejszych głębokościach mają zbliżone właściwości do skał nieprzepuszczalnego nadkładu, solanka może tworzyć kluczowy element zmniejszający ryzyko ucieczki CO<sub>2</sub> do morza bądź do atmosfery. Jeśli monitorowanie wewnątrz zbiornika lub wokół skał nadkładu wskazuje na nieoczekiwane ruchy (migracje) przez skały nadkładu, wtedy konieczny będzie monitoring nadkładu. W przypadku nadkładu można zastosować wiele technik wykorzystywanych do zobrazowania pióropusza lub do monitorowania integralności skał uszczelniających.
- Obserwacje powierzchni wycieku oraz atmosferyczna detekcja i pomiary. Aby mieć pewność, że zatłoczony CO<sub>2</sub> nie będzie migrować ku powierzchni, można zastosować szereg technik geochemicznych, biochemicznych i teledetekcyjnych służących zlokalizowaniu wycieku oraz ocenie i monitorowaniu rozkładu CO<sub>2</sub> w glebie i jego rozproszeniu w atmosferze lub w środowisku morskim (**ryc. 2**).
- Kontrola ilości składowanego CO<sub>2</sub> w aspekcie prawnym i podatkowym. Chociaż ilość zatłoczonego CO<sub>2</sub> może być bez trudu zmierzona na głowicy otworu, oszacowanie ilościowe w zbiorniku stanowi

**Rycina 1**  
Obraz sejsmiczny monitorowania pióropusza CO<sub>2</sub> w pilotażowym projekcie Sleipner przed zatłaczaniem (które rozpoczęto w 1996 r.)  
I po zatłaczaniu (odpowiednio 3 i 5 lat później)



wyzwanie techniczne. Jeśli do wycieku dojdzie blisko powierzchni, to ilość CO<sub>2</sub>, która zostanie uwolniona, będzie włączona do rozliczeń w ramach narodowych programów dotyczących gazu cieplarnianego i przyszłych ustaleń ETS.

- Obserwacje ruchów powierzchni ziemi i mikro-sejsmiczności. Zwiększone ciśnienie w zbiorniku związane z zatłaczaniem CO<sub>2</sub> może, w określonych przypadkach, zwiększać możliwość wystąpienia potencjalnych mikrowstrząsów i niewielkich ruchów powierzchni ziemi. Dostępne są techniki mikro-sejsmicznego monitorowania i zdalnie sterowane metody (wykorzystywane w lotnictwie i w satelitach), zdolne do odnotowania bardzo małych zniekształceń powierzchni.

### W jaki sposób przeprowadza się monitorowanie?

Obecnie jest stosowana szeroka gama technik monitorujących, wykorzystywanych w projektach naukowych i demonstracyjnych. Do technik tych zalicza się również metody monitoringu CO<sub>2</sub> oraz te, które pośrednio mierzą jego oddziaływanie na skały, ciecze i środowisko. Metody bezpośrednie to analizy cieczy pozyskiwanych z głębokich otworów wiertniczych oraz pomiary stężenia gazu w glebie czy atmosferze. Do metod pośrednich należą badania geofizyczne i monitorowanie zmian ciśnienia w otworach, jak również zmiany pH w wodach gruntowych.

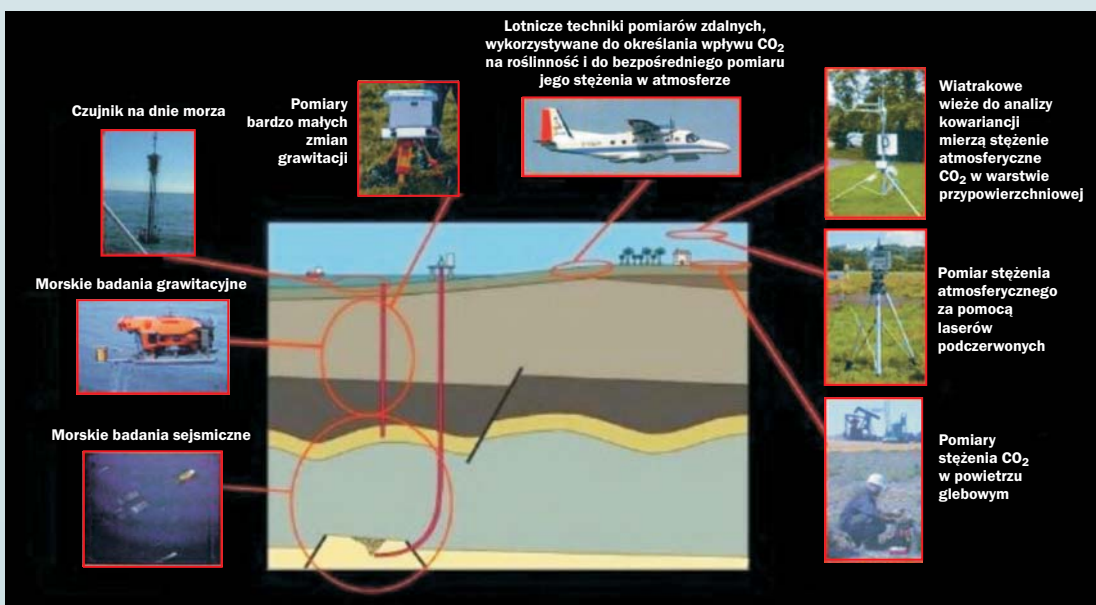
Monitoring będzie konieczny bez względu na to, czy miejsce składowania znajduje się na morzu, czy też na lądzie. Wybór najodpowiedniejszej techniki monitoringu będzie zależał od technicznych i geologicznych cech miejsca składowania oraz od celów monitorowania. Obecnie dostępna jest szeroka gama technik monitorujących (ryc. 3), wiele z nich jest wykorzystywanych w przemyśle rafineryjnym i gazowym. Techniki te są obecnie adaptowane na potrzeby składowania dwutlenku węgla. Prowadzone są również badania zarówno nad optymalizacją istniejących metod, jak i nad rozwojem nowych. Mają one na celu: ulepszenie rozwiązań oraz ich niezawodności skuteczności, zmniejszenie kosztów, a także automatyzację działań.

### Strategia monitorowania

W momencie planowania strategii monitoringu należy podjąć wiele decyzji w zależności od warunków geologicznych i inżynierskich określonych dla każdego miejsca składowania. Należą do nich m.in.: geometria i głębokość zbiornika, oczekiwane rozpręstrzenie się CO<sub>2</sub>, potencjalne drogi wycieku, geologia skał nadkładu, czas zatłaczania i wielkość przepływu, cechy powierzchni, takie jak ukształtowanie terenu, gęstość zaludnienia, infrastruktura i ekosystemy. Kiedy już zostaną podjęte decyzje co do wykorzystania najbardziej odpowiednich technik pomiaru i lokalizacji, przed zatłaczaniem muszą zostać przeprowadzone podstawowe badania, służące za punkt odniesienia dla przyszłych pomiarów. Każdy z programów monitorujących musi być elastyczny, w celu umożliwienia wprowadzenia zmian w miarę rozwoju projektu składowania. Strategia monitoringu, będąca w stanie połączyć wszystkie wyżej wymienione zagadnienia, zwiększając równocześnie efektywność kosztów, stworzy decydujący element dla analizy ryzyka i weryfikacji bezpieczeństwa oraz wydajności miejsca składowania.

Podsumowując, wiadomo że monitoring miejsca składowania CO<sub>2</sub> jest obecnie możliwy za pomocą wielu technik zarówno już dostępnych na rynku, jak i jeszcze rozwijanych. Obecnie są prowadzone badania nie tylko po to, aby rozwijać nowe narzędzia, ale także w celu optymalizacji procesu monitoringu i redukcji kosztów.

**Rycina 3**  
Przykłady rozwiązań technicznych umożliwiających monitorowanie różnych składników systemu składowania CO<sub>2</sub>



**Rycina 2**  
Boja monitorująca z panelami słonecznymi jako źródło energii, pływaki i aparaty służące do pobierania próbek gazu z dna oceanu

# Jakie kryteria bezpieczeństwa należy zastosować?

**W celu zapewnienia bezpieczeństwa składowania i jego wydajności, muszą zostać nałożone poprzez organy prawodawcze, a następnie przestrzegane przez wykonawców odpowiednie warunki projektowania i realizacji projektu.**

Geologiczne składowanie CO<sub>2</sub> jest obecnie szeroko akceptowanym i wiarygodnym sposobem na złagodzenie zmian klimatu. Zanim jednak zostaną podjęte szersze działania na skalę przemysłową, należy ustanowić kryteria bezpieczeństwa w odniesieniu do ludzkiego zdrowia i lokalnego środowiska. Takie kryteria mogą być definiowane jako wymagania nałożone na wykonawców przez organy prawodawcze, w celu zagwarantowania minimalnego wpływu składowanego CO<sub>2</sub> na bezpieczeństwo i zdrowie mieszkańców oraz na środowisko naturalne (łącznie z zasobami wód gruntowych) w krótko-, średnio- i długoterminowym okresie.

Jedną z kluczowych kwestii geologicznego składowania CO<sub>2</sub> jest stabilność miejsca składowania, dlatego też oczekuje się, że miejsca te nie będą przeciekać lub zachowywać się w sposób nieprzewidywalny. Jednak scenariusz „Co się stanie jeśli?” zakłada, że musi zostać oszacowane potencjalne ryzyko, a od wykonawców wymagane jest stosowanie środków, które będą zapobiegać wyciekom bądź nieprawidłowym zjawiskom w miejscu składowania. Zgodnie z IPCC, zatłoczony CO<sub>2</sub> musi pozostać pod ziemią przynajmniej przez 1000 lat, co pozwoli na stabilizację stężenia CO<sub>2</sub> zawartego w atmosferze bądź na jego zmniejszenie wskutek naturalnej wymiany z wodami oceanu, minimalizując w ten sposób wzrost temperatury przy powierzchni, rosnącej wskutek globalnego ocieplenia. Jednak lokalne oddziaływanie składowanego CO<sub>2</sub> powinno być oszacowane w skali czasowej obejmującej okres od kilku dni do wielu tysięcy lat.

Projekt zatłaczania dwutlenku węgla powinien uwzględniać kilka etapów (**ryc. 1**).

Bezpieczeństwo będzie zapewnione poprzez:

- rozważny dobór i rozpoznanie miejsca składowania,
- ocenę bezpieczeństwa,
- działania korygujące,
- odpowiedni plan monitoringu,
- odpowiedni plan naprawy.

Istotne, związane z tym cele to:

- zagwarantowanie, że CO<sub>2</sub> pozostanie w zbiorniku,
- zachowanie szczelności otworu,
- zachowanie fizycznych właściwości zbiornika (łącznie z porowatością, przepuszczalnością, zatłaczalnością), a także nieprzepuszczalności skał nadkładu,
- uwzględnienie składu strumienia CO<sub>2</sub>, ze zwróceniem

szczególnej uwagi na wszelkie zanieczyszczenia, które nie zostały wyeliminowane w trakcie procesu wychwytywania; takie działania mają przeciwdziałać niekorzystnym interakcjom w otworze, zbiorniku, w skałach nadkładu i w przypadku wycieku do wyżej leżących poziomów wody gruntowej.

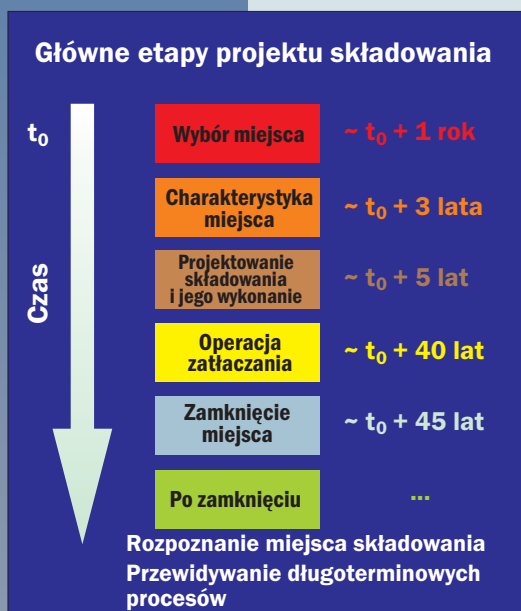
## Kryteria bezpieczeństwa projektu

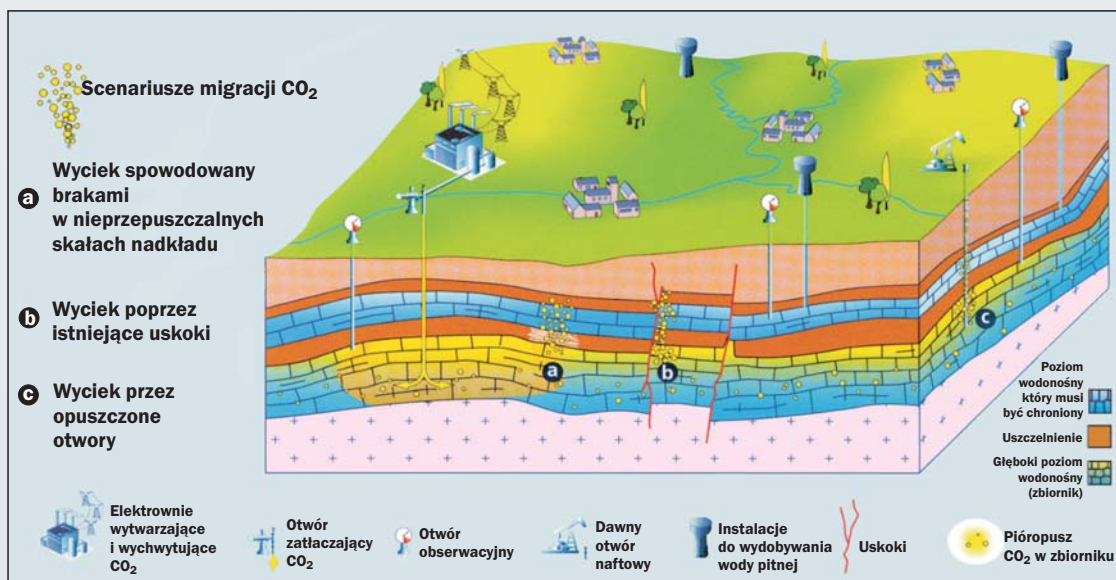
Kwestie bezpieczeństwa muszą zostać rozstrzygnięte zanim dojdzie do rozpoczęcia prac. W związku z wyborem miejsca składowania, do głównych elementów, które muszą zostać zbadane, należą:

- zbiornik i skały uszczelniające;
- nadkład, szczególnie warstwy nieprzepuszczalne, mogące pełnić funkcję drugiego poziomu uszczelniającego;
- obecność przepuszczalnych uskoków bądź otworów – potencjalnych dróg ucieczki CO<sub>2</sub> na powierzchnię,
- poziomy wody pitnej;
- ograniczenia środowiskowe oraz związane z załudnieniem terenu.

Do rozpoznania geologii i geometrii miejsca składowania są wykorzystywane techniki poszukiwań gazu i ropy naftowej. Przepływ cieczy oraz chemiczne i geomechaniczne modelowanie CO<sub>2</sub> wewnątrz zbiornika pozwalają na przewidywanie zachowania CO<sub>2</sub> w długim czasie oraz zdefiniowanie parametrów wydajnego zatłaczania. W rezultacie, dokładny opis miejsca składowania powinien umożliwić zdefiniowanie „normalnego” scenariusza zachowania CO<sub>2</sub> po zatłoczeniu w odpowiedniej lokalizacji, co do której mamy pewność, że CO<sub>2</sub> pozostanie w miejscu składowania. W wyniku oceny ryzyka brane są pod uwagę mniej prawdopodobne scenariusze przyszłych zachowań zatłoczonego CO<sub>2</sub>, między innymi występowanie nieoczekiwanych zdarzeń. W szczególności ważne jest przewidywanie potencjalnych dróg wycieków i ich skutków (**ryc. 2**). Każdy ze scenariuszy wycieku powinien zostać przeanalizowany przez ekspertów i tam gdzie to jest możliwe, należy zastosować modelowanie numeryczne w celu oceny prawdopodobieństwa jego wystąpienia i potencjalnej uciążliwości zjawiska. Na przykład rozprzestrzenianie się zasięgu pióropuszu CO<sub>2</sub> powinno zostać uważnie skartowane w celu wykrycia jakichkolwiek powiązań ze strefą uskokową. Wrażliwość na zmiany parametrów wejściowych, jak i wszelkie wątpliwości, powinny zostać uważnie oszacowane przy ocenie ryzyka. Ocenę potencjalnego oddziaływania CO<sub>2</sub> na ludzi i środowisko należy wziąć pod uwagę podczas badań nad oceną oddziaływania, co jest powszechną praktyką w trakcie procesu udzielania zezwolenia na instalacje przemysłowe. W procesie tym oba scenariusze – „normalny” i „przeciekający” – będą badane w celu oszacowania potencjalnego ryzyka związanego z instalacją. Program monitoringu, po-

**Rycina 1**  
Główne etapy projektu składowania





cząwszy od krótko- do długoterminowego, powinien zostać opracowany zgodnie z analizami oceny ryzyka, a także powinien kontrolować podstawowe parametry definiowane w różnych scenariuszach. Główne cele obejmują: stworzenie obrazu migracji pióropusza CO<sub>2</sub>, sprawdzanie integralności skał uszczelniających i otworu, wykrywanie jakichkolwiek wycieków CO<sub>2</sub>, ocenianie jakości wód gruntowych i zagwarantowanie, że CO<sub>2</sub> nie wydostanie się na powierzchnię. Plan łagodzenia i naprawy skutków wycieku należy do ostatnich elementów oceny bezpieczeństwa, a jego wynikiem jest utworzenie listy działań naprawczych, jakie powinny zostać podjęte w przypadku wycieku bądź nieprawidłowych zachowań. Dotyczy to integralności skał uszczelniających i kwestii ewentualnej awarii otworu, zarówno w trakcie zatłaczania, jak i po nim, i odnosi się do zagadnień radykalnej remediacji miejsca składowania, z odbiorem gazu już zatłoczonego włącznie.

Obecnie istniejące *know-how* obejmuje techniki standardowe stosowane dla ropy i gazu ziemnego, takie jak likwidacja otworów, zmniejszanie ciśnienia zatłaczania, częściowe albo całkowite wydobycie gazu, wydobycie wody w celu zmniejszenia ciśnienia, powierzchniowe wydobycie gazu itd.

### Kryteria bezpieczeństwa w trakcie prac oraz po ich zakończeniu

Główne zagadnienie związane z bezpieczeństwem jest powiązane z fazą operacyjną: po tym jak zatłaczanie zostanie zatrzymane, spadek ciśnienia sprawi, że miejsce stanie się bezpieczniejsze.

Przekonanie o możliwości bezpiecznego zatłaczania oraz składowania CO<sub>2</sub> jest poparte doświadczeniem firm przemysłowych. Dwutlenek węgla należy do dość powszechnie stosowanych produktów w różnych gałęziach przemysłu, więc jego obsługa nie stwarza nowych problemów. Planowanie i kontrola operacji będzie opierać się głównie na doświadczeniu zdobytym w przemyśle rafineryjnym, w szczególności sezonowym składowaniu naturalnego gazu lub wzbogaconym odzyskiwaniu ropy (EOR). Do głównych parametrów, które powinny być kontrolowane należą:

- ciśnienie zatłaczania i współczynnik przepływu – pierwsze z nich powinno być utrzymywane poniżej ciśnienia szczelinowania, to jest ciśnienia, powyżej którego powstają pęknięcia wewnątrz skał uszczelniających;

- zatłoczona objętość, w celu poznania prognoz zdefiniowanych przy użyciu modelowania;
- skład zatłoczonego strumienia dwutlenku węgla;
- szczelność otworu bądź otworów do zatłaczania, a także otworu zlokalizowanego w obrębie lub w pobliżu rozszerzającego się pióropusza CO<sub>2</sub>;
- rozprzestrzenianie się pióropusza CO<sub>2</sub> i wykrywanie wszelkich wycieków;
- stabilność gruntu.

W trakcie zatłaczania faktyczne zachowanie CO<sub>2</sub> powinno być porównywane z przewidywanym. W przypadku wykrycia jakichkolwiek nieprawidłowych zachowań, program monitorujący powinien zostać uaktualniony, a także należy podjąć działania korygujące. W przypadku podejrzenia wycieku, mogłyby się one skupić na określonym obszarze miejsca składowania, począwszy od zbiornika aż do powierzchni terenu. Umożliwiłoby to wykrycie migracji CO<sub>2</sub>, a także jakichkolwiek niekorzystnych oddziaływań, które mogłyby być szkodliwe dla zbiorników wody pitnej, środowiska i wreszcie dla ludzi.

Kiedy zatłaczanie zostaje zakończone, rozpoczyna się faza zamknięcia: otwory powinno się odpowiednio zakończyć i zamknąć, programy do modelowania i monitorowania powinny być uaktualnione, i jeśli to konieczne – powinny być podjęte środki korygujące służące redukcji ryzyka. Kiedy poziom ryzyka będzie wystarczająco niski, nadzór nad miejscem składowania zostanie przeniesiony do władz krajowych, a monitoring może zostać zminimalizowany bądź zatrzymany.

Propozycje zawarte w Europejskiej Dyrektywie ustanawiają legalne ramy zapewniające, że przechwytywanie i składowanie CO<sub>2</sub> stanowi dostępną opcję poprawy sytuacji, i że zadanie to może zostać wykonane w sposób bezpieczny i odpowiedzialny.

Podsumowując, kryteria bezpieczeństwa są niezbędnym elementem potrzebnym do przeprowadzenia pomyślnych działań przemysłowych składowania dwutlenku węgla. Muszą one zostać indywidualnie dostosowane do każdego miejsca składowania. Kryteria te będą w szczególności ważne dla zagadnień związanych z akceptacją społeczną i niezbędne w procesie uzyskiwania koncesji, w którym ciała prawodawcze muszą zdecydować o stopniu szczególności wymagań bezpieczeństwa.

**CCS:** wychwytywanie i składowanie CO<sub>2</sub>.

**Chłonność:** opisuje łatwość z jaką płyny (takie jak CO<sub>2</sub>) mogą zostać zatłoczone do formacji geologicznych. Jest definiowana jako wydajność zatłaczania dzielona przez różnicę ciśnień między punktem zatłaczania na dnie otworu a formacją.

**Ciśnienie litostatyczne:** siła wywierana na skały znajdujące się pod powierzchnią ziemi przez skały leżące wyżej. Wraz z wzrostem głębokości ciśnienie litostatyczne rośnie.

**CSLF:** Carbon Sequestration Leadership Forum. Międzynarodowa inicjatywa ds. zmian klimatu, której działalność skupia się na rozwoju ulepszonych i efektywniejszych pod względem kosztów technologii służących przechwytywaniu dwutlenku węgla, jego transportu i długoterminowego podziemnego składowania.

**Enhanced Oil Recovery (EOR):** technika umożliwiająca zwiększenie wydobycia ropy naftowej poprzez zatłaczanie płynów (takich jak para wodna czy CO<sub>2</sub>), która stymuluje uruchamianie ropy w złożu.

**EU Geocapacity:** prowadzony obecnie europejski projekt badawczy, mający za zadanie oszacowanie całkowitej dostępnej w Europie geologicznej pojemności składowania i przeznaczonej do składowania antropogenicznego dwutlenku węgla.

**GESTCO:** zakończony europejski projekt badawczy, mający na celu ocenę możliwości składowania CO<sub>2</sub> w ośmiu krajach (Norwegii, Danii, Wielkiej Brytanii, Belgii, Holandii, Niemczech, Francji i Grecji).

**IEA-GHG:** Międzynarodowa Agencja ds. Energii – Program gazu cieplarnianego R&D. Międzynarodowa współpraca, która ma za zadanie określenie technologii, zmniejszającej emisję gazów cieplarnianych, propagowanie wyników oraz wytyczanie celów badań, rozwijanie, przedstawianie i promocję odpowiednich prac.

**IPCC:** Międzyrządowy Panel ds. Zmian Klimatu. Organizacja założona w 1998 roku przez WMO (Światową Organizację Meteorologiczną) i UNEP (Program ds. Środowiska Narodów Zjednoczonych) w celu oceny naukowych, technicznych i socjoekonomicznych informacji związanych ze zrozumieniem zmian klimatycznych, potencjalnego wpływu tych zmian, a także możliwości dostosowania i złagodzenia ich skutków. IPCC wraz z Alem Gorem zostali uhonorowani w 2007 roku Nagrodą Nobla.

**Mikrosejsmiczność:** drobne wstrząsy lub wibracje w skorupie ziemskiej, niepowiązane z trzęsieniami ziemi, które mogą być spowodowane różnymi zarówno naturalnymi, jak i sztucznymi czynnikami.

**Nadkład:** warstwa geologiczna leżąca między warstwą uszczelniającą zbiornika a powierzchnią terenu (bądź dna morskiego).

**Nadkrytyczny stan:** stan płynu przy temperaturze i ciśnieniu przekraczających krytyczne wartości (31,03° i 7,38 MPa dla CO<sub>2</sub>). Właściwości takich cieczy są zmienne – od bardziej gazowych przy niskim ciśnieniu, do bardziej ciekłych przy ciśnieniu wysokim.

**Naturalne odpowiedniki:** naturalne złoża dwutlenku węgla. Występują zarówno miejsca „przeciekające”, jak i „nieprzeciekające”. Badania nad nimi mogą pogłębić wiedzę na temat długoterminowego składowania CO<sub>2</sub> w głębokich strukturach geologicznych.

**Otwór wiertniczy:** głębokie, cylindryczne wyrobisko o małej średnicy wykonane metodami wiertniczymi (takie jak np. otwór, z którego wydobywa się ropę naftową).

**pH:** miara kwasowości roztworu, gdzie wartość pH = 7 oznacza odczyn obojętny.

**Pióropusz CO<sub>2</sub>:** przestrzenne rozmieszczenie CO<sub>2</sub> w stanie nadkrytycznym wewnątrz warstw skalnych.

**Porowatość:** procent całkowitej objętości skały, która nie jest zajmowana przez minerały. Pustki te nazywane są porami i mogą zostać wypełnione przez różne płyny; zazwyczaj w zalegających głęboko skałach jest to słona woda, ale również może to być ropa naftowa, gaz (np. metan), a także naturalnie powstały dwutlenek węgla.

**Poziom wodonośny:** przepuszczalne ciało skalne zawierające wodę. Najbardziej przypowierzchniowe poziomy wodonośne zawierają słodką wodę używaną do celów konsumpcyjnych. Poziomy znajdujące się na większej głębokości są wypełnione słoną wodą, która nie nadaje się do wykorzystania. Nazywane są one solankowymi poziomami wodonośnymi.

**Przepuszczalność:** zdolność porowatej skały do przenoszenia płynów; jest to miara względnej łatwości przepływu cieczy pod wpływem gradientu ciśnienia.

**Solanka:** bardzo słona woda, zawierająca wysokie stężenie rozpuszczonych soli.

**Uszczelnienie:** nieprzepuszczalna warstwa skalna, która pełni funkcję bariery dla migrujących płynów lub gazów, tworząc pułapkę w sytuacji, kiedy znajduje się powyżej zbiornika.

**Zbiornik:** ciało skalne lub osad wystarczająco porowate i przepuszczalne, aby mógł nadawać się do składowania dwutlenku węgla. Piaskowce i wapienie należą do skał, które najczęściej tworzą zbiorniki.

## Dodatkowe informacje:

**Specjalne Raporty CCS Międzyrządowego Panelu ds. Zmiany Klimatu (IPCC):**

[http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_wholereport.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf)

**Strona Komisji Europejskiej dotycząca CCS:**

<http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/>

**Dyrektywa Komisji Europejskiej:**

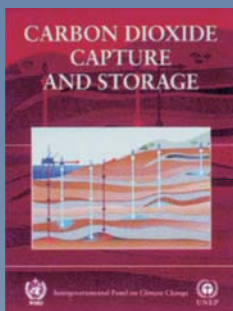
[http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/eccc1\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/eccc1_en.htm)

**System Handlu Emisjami:**

<http://ec.europa.eu/environment/climat/emission.htm>

**Strona narzędzi monitoringu IEA-GHG:**

[http://www.co2captureandstorage.info/co2tool\\_v2.1beta/introduction.html](http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html)



# Co może zrobić dla ciebie CO<sub>2</sub>GeoNet



**CO<sub>2</sub>GeoNet** jest Europejską Siecią Doskonałości, której działalność polega na dostarczaniu bezstronnych i naukowych informacji związanych z bezpieczeństwem i efektywnością geologicznego składowania dwutlenku węgla. Sieć ta jest oparta na partnerstwie ponad 150 naukowców pracujących w 13 publicznych instytucjach badawczych, a każdy z partnerów ma znaczącą pozycję międzynarodową w każdej dziedzinie badań nad magazynowaniem dwutlenku węgla. Sieć jest sponsorowana przez Komisję Europejską w ramach szóstego programu ramowego.

## Do instytucji działających w ramach sieci należą:

BGR , BGS , BRGM , GEUS , Heriot Watt University , IFP , Imperial College , NIVA , OGS , IRIS , SINTEF , TNO , Sapienza University of Rome .



## Działalność sieci

Naukowcy działający w Sieci wspólnie pracują nad pogłębianiem wiedzy związanej z geologicznym składowaniem CO<sub>2</sub>, a także nad narzędziami potrzebnymi do jego bezpiecznego zastosowania. Są oni zaangażowani w projekty badawcze o wysokim priorytecie, dotyczące każdego poziomu realizacji zadania: zbiornika, nieprzepuszczalnego nadkładu, potencjalnych dróg migracji CO<sub>2</sub> ku powierzchni terenu, potencjalnych oddziaływań na ludzi i lokalne ekosystemy w przypadku wycieku, powszechnego uświadamiania i komunikowania się ze społeczeństwem.

Działalność CO<sub>2</sub>GeoNet opiera się na zdolności do tworzenia interdyscyplinarnych zespołów specjalistów z dużym doświadczeniem, pozwalając na lepsze zrozumienie indywidualnych aspektów geologicznego składowania i wzajemnych powiązań wewnątrz większego i bardziej złożonego systemu.

Oprócz działalności badawczej, CO<sub>2</sub>GeoNet dodatkowo oferuje:

- szkolenie i doskonalenie naukowców oraz inżynierów, którzy będą obsługiwać proces składowania dwutlenku węgla;
- doradztwo naukowe oraz badanie zgodności wniosków o finansowanie projektów (jakość geotechniczna, działania mające na celu ochronę środowiska, kontrolę ryzyka, planowanie i uregulowania prawne itd.);
- rozpowszechnianie niezależnych i bezstronnych informacji opartych na wynikach badań;
- angażowanie partnerów oraz udzielanie im pomocy w rozwiązywaniu problemów i potrzeb.

W celu zwiększenia świadomości społecznej związanej z geologicznym składowaniem CO<sub>2</sub>, jako realnej możliwości złagodzenia zmian klimatu, CO<sub>2</sub>GeoNet zmagą się z podstawowym pytaniem: „Co tak naprawdę znaczy geologiczne składowanie CO<sub>2</sub>?”. Zespół wybitnych naukowców CO<sub>2</sub>GeoNet przygotował wyczerpujące odpowiedzi na sześć związanych z tym tematem pytań, zgodnie z istniejącym stanem wiedzy, będącym wynikiem wieloletnich badań w Europie, a także na bazie doświadczenia uzyskanego z projektów demonstracyjnych na całym świecie. Głównym celem tych zabiegów jest upowszechnienie wśród szerokiej rzeszy odbiorców jasnych i bezstronnych informacji naukowych i zachęcenie do dialogu związanego z podstawowymi pytaniami dotyczącymi technicznych aspektów geologicznego składowania dwutlenku węgla.

Działania te, streszczone w niniejszej broszurze, zaprezentowano w trakcie pierwszych warsztatów Sieci pt. „Training and Dialogue”, które odbyły się w Paryżu 3 października 2007 roku. W warsztatach i szkoleniu brali udział: partnerzy projektu, przedstawiciele przemysłu, inżynierowie, naukowcy, stratedzy, dziennikarze, przedstawiciele instytucji pozarządowych, socjologowie, nauczyciele i studenci. W sumie w warsztatach i szkoleniu wzięło udział 170 osób z 21 krajów. W trakcie warsztatów uczestnicy mieli możliwość dzielenia się swoimi poglądami i poszerzenia swojej wiedzy związanej z podziemnym składowaniem CO<sub>2</sub>.

Zainteresowanych bardziej szczegółowymi informacjami dotyczącymi możliwości zorganizowania podobnych szkoleń związanych z podziemnym składowaniem CO<sub>2</sub> prosimy o kontakt z sekretariatem CO<sub>2</sub>GeoNet [info@co2geonet.com](mailto:info@co2geonet.com) bądź o odwiedzenie naszej strony na [www.co2geonet.eu](http://www.co2geonet.eu).

# CO<sub>2</sub>GeoNet

## Europejska Sieć Doskonałości w zakresie geologicznego składowania dwutlenku węgla



[www.co2geonet.eu](http://www.co2geonet.eu)

**Sekretariat:** [info@co2geonet.com](mailto:info@co2geonet.com)

**BGS** Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFP**, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Sapienza University of Rome Dip. Scienze della Terra.



Broszura została przetłumaczona i opracowana przez **IGSMiE PAN** w ramach prac konsorcjum (**PIG-PIB** – lider, AGH, GIG, INiG, IGSMiE PAN i PBG) realizującego krajowy program „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania”, na zlecenie Ministerstwa Środowiska, finansowany ze środków **NFOŚiGW** Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Adaptacja wersji polskiej – Anna Majewska (PIG-PIB)