

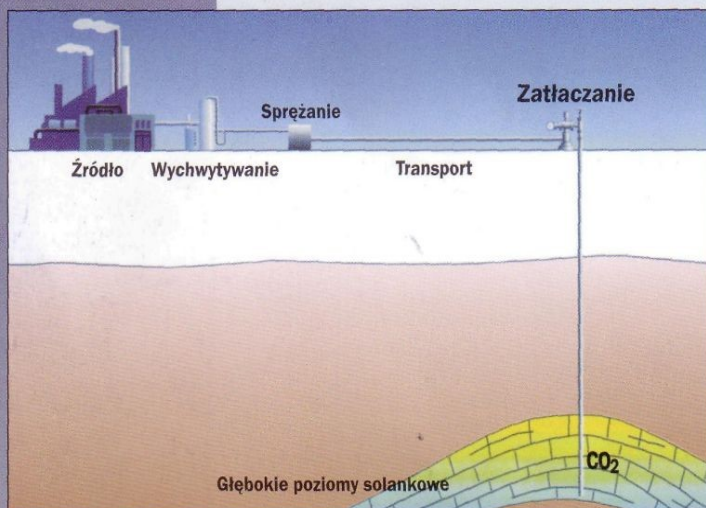
# W jaki sposób możemy transportować i zatłaczać ogromne ilości CO<sub>2</sub>?

Po wychwyceniu w instalacjach przemysłowych, dwutlenek węgla jest sprężany, 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 sprężany 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 urządzeń 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



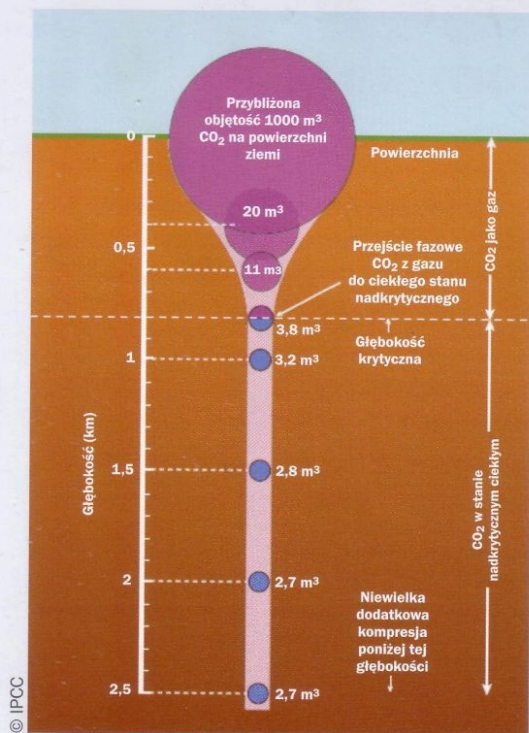
zbiorników. Tankowce używane do transportu płynnego gazu (LPG) mogą również być wykorzystywane do transportu dwutlenku węgla. W szczególności dlatego, że systemy półchłodzące są hermetyczne i oziębiane, więc CO<sub>2</sub> może być transportowany w postaci cieczy. Najnowsze statki używane do transportu 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 przeladunku 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 rozszczelnienia 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 zakwaszenia, 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

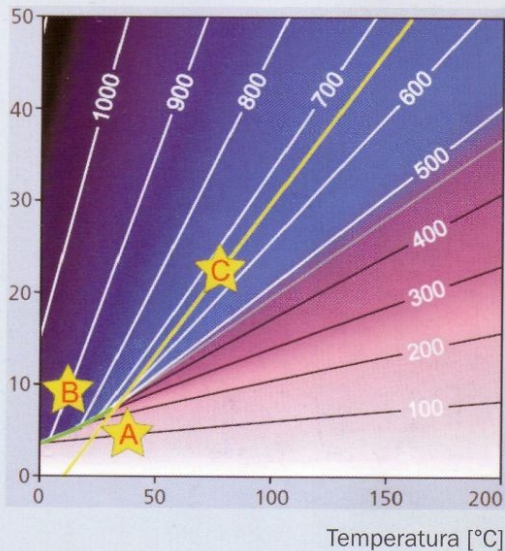
mierze są zależne od czasu i odległości od otworu. Do oceny tych efektów stosuje się symulacje numeryczne. Strumień przepływu zatłaczania powinien być uważnie monitorowany w celu kontroli procesu, który może ograniczać zatłaczanie pożądaných ilości dwutlenku węgla.

### 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