

Katarzyna SUCHODOLSKA  
Instytut Geologii Stosowanej, Politechnika Śląska

## **BEZPIECZEŃSTWO GEOLOGICZNEJ SEKWESTRACJI CO<sub>2</sub> – ZAGROŻENIA I PREWENCJA**

**Streszczenie.** W artykule omówiono potencjalne zagrożenia związane z procesem geologicznej sekwestracji dwutlenku węgla, na podstawie publikowanych wyników badań naukowych. Przedstawiono również sposoby zwalczania ryzyka związanego z procesami Carbon Capture and Storage (CCS).

### **GEOLOGICAL SEQUESTRATION OF CO<sub>2</sub> SECURITY - THREATS AND PREVENTION**

**Summary.** The article discusses the potential risks associated with the process of carbon dioxide sequestration, based on published results of scientific research. It also presents ways to combat the risks of Carbon Capture and Storage processes (CCS).

#### **1. Wprowadzenie**

Rozważając zagadnienie emisji gazów cieplarnianych, największy problem stanowi wysokie stężenie dwutlenku węgla. Emisje CO<sub>2</sub> powstają w głównej mierze w procesach spalania paliw kopalnych. W celu ustabilizowania stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze wiele krajów zobowiązało się do ograniczenia ich emisji. Redukcję CO<sub>2</sub> można osiągnąć na kilka sposobów, np. poprzez zalesienie, wykorzystanie na większą skalę energii odnawialnej i jądrowej oraz zastosowanie technologii ograniczających emisję CO<sub>2</sub> do atmosfery (Damen et al. 2006). Jedną z nich jest geologiczna sekwestracja. Proces ten polega na przechwyceniu przemysłowego dwutlenku węgla przed jego ucieczką do atmosfery, a następnie na iniekcji CO<sub>2</sub> w pory skalne głębokich struktur geologicznych. Formacje rozpatrywane do geologicznej sekwestracji to m.in. wyczerpane złoża ropy i gazu ziemnego, złoża węgla oraz głębokie wodonośne formacje solankowe (Knauss et al. 2005). Przed rozpoczęciem procesów sekwestracji należy znaleźć odpowiedzi na kilka ważnych pytań, dotyczących zarówno efektywności, jak i bezpieczeństwa tej technologii. Kluczowym czynnikiem wpływającym na realizację CCS (Carbon Capture and Storage) jest ryzyko związane z podziemnym składowaniem CO<sub>2</sub>. Ocena ryzyka jest pierwszym krokiem w utworzeniu strategii zarządzania i kontroli w celu eliminacji błędów i niepożądanych

efektów CCS (Damen 2007). Badania prowadzone nad potencjalnymi, podziemnymi zbiornikami CO<sub>2</sub> mogą dać odpowiedzi, dotyczące m.in. niebezpieczeństw związanych z procesem zatłaczania gazów oraz możliwości ich minimalizacji (IPPC 2005).

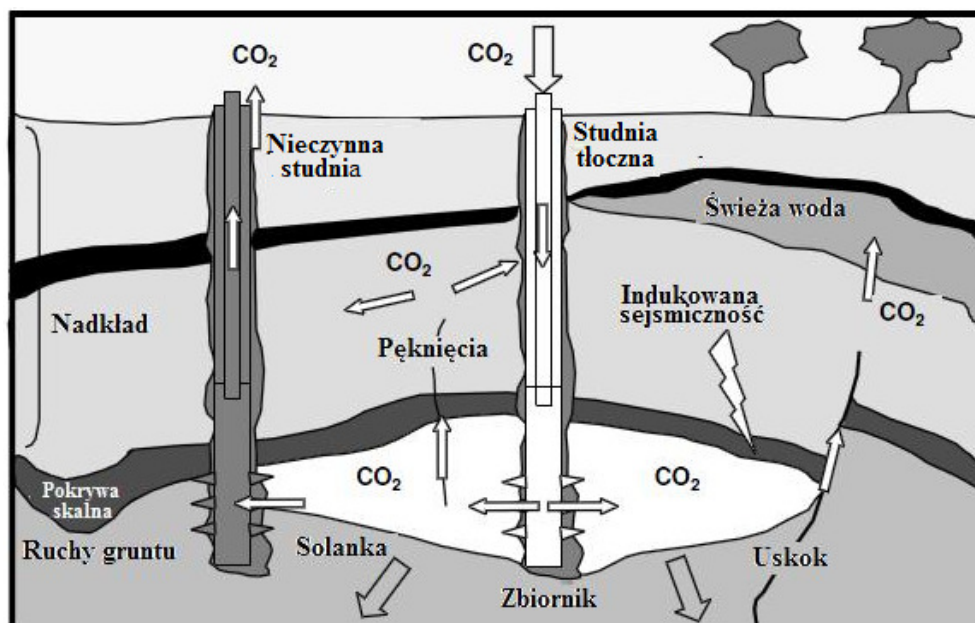
Prezentowane opracowanie ma na celu przedstawienie możliwych niebezpieczeństw związanych z procesem geologicznej sekwestracji oraz sposobów ich zwalczania, oparte na pracach naukowych i publikacjach archiwalnych.

## 2. Zagrożenia związane z procesem geologicznej sekwestracji

Przed rozpoczęciem procesów podziemnego składowania dwutlenku węgla na skalę globalną należy zwrócić szczególną uwagę na kwestię bezpieczeństwa (Benson 2006). Należy zbadać, w jakim stopniu geologiczna sekwestracja będzie miała wpływ na zdrowie ludzkie i środowisko naturalne. Problematyką tą zajmował się m.in. Damen (2007), który w swojej pracy przedstawił główne zagrożenia związane z procesem geologicznej sekwestracji. Pierwszym możliwym do wykrycia zagrożeniem związanym z sekwestracją CO<sub>2</sub> są instalacje zatłaczania (rurociągi przesyłowe, stacje dostaw CO<sub>2</sub>, punkty wtrysku CO<sub>2</sub>, sieci dystrybucyjne, system monitoringu). Główne ryzyko stanowią nieszczelne rurociągi przesyłowe (pęknięcia, dziury), co skutkuje, po pierwsze uwolnieniem do atmosfery dużych ilości dwutlenku węgla, po drugie stwarza realne zagrożenie dla życia pracowników obsługi (ciężar właściwy CO<sub>2</sub> jest większy od powietrza, co powoduje jego kumulację w miejscu uszkodzenia) (Damen et. al., 2006, Benson, 2006).

Najszerzej analizowanym problemem jest potencjalne ryzyko związane z podziemnym składowaniem CO<sub>2</sub> (np. Damen, 2007, Gaus, 2010, Knauss, 2006, Labus, 2009). Zagadnienia te przedstawiono na rysunku 1, obejmują one:

- ucieczki CO<sub>2</sub> – migracje poprzez skały izolujące do atmosfery,
- ucieczki CH<sub>4</sub> – migrację CH<sub>4</sub> poprzez skały izolujące do atmosfery w rezultacie przemieszczenia go przez zatłoczony CO<sub>2</sub>,
- indukowaną sejsmiczność – drgania wywołane zatłaczaniem gazu,
- ruchy gruntu wynikłe z oscylacji powierzchni spowodowanych zmianami ciśnienia złożowego,
- nieprzewidziane przemieszczenia wód podziemnych do innych poziomów wodonośnych poprzez połączenia hydrauliczne (Damen et al., 2006, Labus, 2009).



Rys. 1. Ryzyko geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub>. Czarne i białe strzałki obrazują przepływ gazów, białe strzałki przedstawiają przemieszczenie solanek (Damen et al., 2006)

Fig. 1. The risk of geological sequestration of CO<sub>2</sub>. Black and white arrows show the flow of gases, white arrows show the movement of brines (Damen et al., 2006)

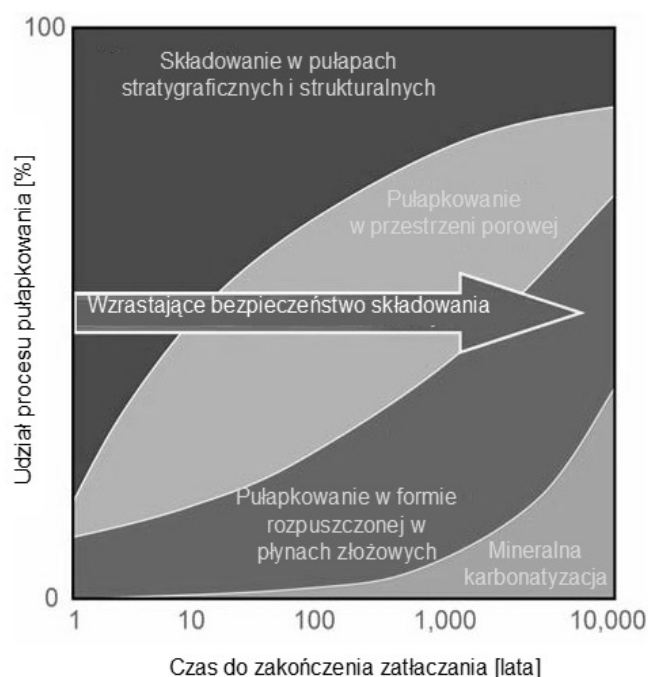
## 2.1. Ucieczki dwutlenku węgla

Zatłoczony dwutlenek węgla może potencjalnie migrować w formacjach geologicznych w kierunku poziomym, jak i pionowym i ostatecznie wyciekać do atmosfery. Możliwość wystąpienia tego zjawiska jest uzależniona od szczelności otworu tłoczego oraz uszczelniających skał nadkładu i mechanizmu pułpowania (Labus, 2009). Do mechanizmów wychwytywania CO<sub>2</sub> w poziomach wodonośnych należą (rys. 2):

- *pułpowanie strukturalne* – po zatłoczeniu CO<sub>2</sub> do zbiorników węglowodorów, gazowy lub nadkrytyczny CO<sub>2</sub> może powodować wzrost wyporności w zbiorniku, a w konsekwencji wypieranie gazu ze struktur geologicznych ku powierzchni. Dlatego ważna jest obecność pułpek geologicznych, np. skał nadkładu o niskiej przepuszczalności,
- *pułpowanie hydrodynamiczne* – CO<sub>2(aq)</sub> i CO<sub>2(g)</sub> znajdujący się w głębokich solankowych poziomach wodonośnych, może pozostawać w nich tys. do mln lat od momentu iniekcji, dzięki powolnej infiltracji wód złożowych,
- *pułpowanie rezydualne* – CO<sub>2</sub> zostaje uwięziony w przestrzeniach porowych, spowodowanych siłami kapilarnymi,
- *pułpowanie w postaci rozpuszczonej* – wysoka rozpuszczalność CO<sub>2</sub> w wodzie oraz ropie jest cechą ułatwiającą sekwestrację tego gazu. CO<sub>2</sub> wprowadzony do górotworu

znajduje się pierwotnie w postaci cieczy nadkrytycznej; proces rozpuszczania w wodach złożowych przebiega w różnych warunkach, w czasie szacowanym na 5000 – 100 000 lat (np. Ennis-King, Paterson, 2003). Całkowite rozpuszczanie gazu gwarantuje bezpieczeństwo składowania pod warunkiem niezmiennych parametrów ciśnienia i temperatury,

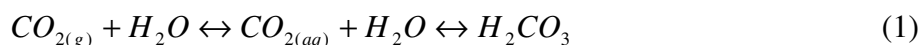
- *pułapkowanie mineralne* – CO<sub>2</sub> może reagować z minerałami i materią organiczną zawartą w formacji geologicznej, w rezultacie zostaje trwale związany z matrycą skalną (Damen, 2007, Gaus, 2010, Labus et al., 2011).



Rys. 2. Podstawowe zagadnienia bezpieczeństwa geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub> (IPCC 2005)  
Fig. 2. Basic safety issues of geological CO<sub>2</sub> sequestration (IPCC 2005)

Za najbardziej skuteczne jest uważane składowanie CO<sub>2</sub> poprzez związanie go z fazą stałą, np. krystalizację minerałów węglanowych lub sorpcję gazu w pokładach węgla (pułapkowanie mineralne) (Labus et al., 2011).

Zasadnicze znaczenie dla procesu mineralnej sekwestracji dwutlenku węgla ma reakcja pomiędzy CO<sub>2</sub> a wodami podziemnymi, która prowadzi do powstawania kwasu węglowego:



Reakcje te doprowadzają do spadku pH roztworu, co daje początek procesom dysocjacji kwasu węglowego:



Dysocjacja kwasu węglowego zapoczątkowuje kolejne reakcje z minerałami węglanowymi, krzemianami i siarczanami, które prowadzą do wiązania CO<sub>2</sub> w fazach mineralnych lub znajdujących się w roztworze. Wyżej wymienione minerały odznaczają się szybką kinetyką reakcji, co w rezultacie przekłada się na szybkość uzyskania równowagi geochemicznej z roztworem. Dlatego procesy te są kluczowe podczas fazy zatłaczania CO<sub>2</sub> i jego wpływu na środowisko otaczające zbiornik (Gaus 2010, Labus et. al. 2011).

Wyeksploatowane złoża ropy i gazu ziemnego mogą stanowić ważne struktury dla geologicznej sekwestracji dwutlenku węgla. Gaz ziemny i ropa były ułożone w złożach bez wycieków przez mln lat, co może świadczyć o możliwościach zastosowania CCS. Ewentualne ucieczki zatłoczonego CO<sub>2</sub> mogą następować przez otwory wykorzystywane do lokowania. Dotyczy to otworów nieprawidłowo zlikwidowanych, może także wynikać z korozji cementu i orurowania. Ograniczenie roli skał uszczelniających może odbywać się pod działaniem następujących procesów:

- Wyciek kapilarny – skutek ciśnienia fluidów w złożu przewyższającego ciśnienie wejścia dla kapilar skał nadkładu – uszczelniających.
- Dyfuzja CO<sub>2</sub> przez skały nadkładu.
- Ucieczka przez szczeliny i spękania powstałe podczas wcześniejszej eksploatacji złoża lub podczas zatłaczania. Ryzyko wycieku jest niskie do momentu, gdy ciśnienie przechowywania nie przekracza początkowego ciśnienia w zbiorniku.
- Wyciek przez strefy o zwiększonej przepuszczalności wywołanej reakcją CO<sub>2</sub> ze skałami nadkładu.
- Ucieczka przez nieciągłości tektoniczne. Ryzyko wycieku można zminimalizować przeprowadzając szczegółową analizę geologiczną zbiorników przed rozpoczęciem iniekcji CO<sub>2</sub> (Damen, 2007).

Ucieczka z głębokich poziomów solankowych może przebiegać pod wpływem wymienionych wyżej procesów, z tą jednak różnicą, iż skały nadkładu mogą charakteryzować się lepszymi własnościami przepuszczalności niż w przypadku złóż węglowodorów. Z drugiej jednak strony poziomy solankowe nie są połączone z powierzchnią przez tak liczne otwory jak w przypadku opisywanych złóż.

## 2.2. Ucieczki metanu

Iniekcja CO<sub>2</sub> do wykorzystanych złóż ropy i gazu ziemnego, niekopalnych pokładów węgla i głębokich solankowych poziomów wodonośnych może doprowadzić do wycieku

metanu. Najbardziej prawdopodobnym scenariuszem jest adsorpcja CO<sub>2</sub> na powierzchni węgla, przy równoczesnym wyparciu i ucieczce CH<sub>4</sub>. W chwili obecnej nie posiadamy wiedzy na temat procesów fizycznych i chemicznych, które mogą występować podczas zatłaczania CO<sub>2</sub> do pokładów węgla (Damen et al., 2006).

### **2.3. Indukowana sejsmiczność**

Iniekcja dużych ilości CO<sub>2</sub> do zbiornika podziemnego może prowadzić do zwiększenia ciśnienia porów, co w konsekwencji prowadzi do zmian naprężeń mechanicznych w górotworze (pęknięcia, aktywność sejsmiczna – mikrowstrząsy). Ich skutkiem mogą być np. uszkodzenia skał nadkładu. Jednakże dotychczas zaobserwowane emisje CO<sub>2</sub> są znikome, co sugeruje, że prawdopodobieństwo aktywności sejsmicznej jest małe. W celu minimalizacji ryzyka należy prowadzić kontrolę ciśnienia wtrysku, naprężeń miejscowych i porów skalnych (Damen et al., 2006).

### **2.4. Ruchy gruntu**

Wywołane są zmianami ciśnienia w zbiornikach. Efektem są uszkodzenia budynków i infrastruktury powierzchniowej oraz osiadanie terenu. Mechanizm osiadania został rozpoznany i częściowo udokumentowany (np. złożę gazu ziemnego Groningen), ale ewentualne skutki są trudne do oszacowania (Damen, 2007).

## **3. Iniekcja gazów kwaśnych – szansa czy zagrożenie?**

Koszty separacji i kompresji CO<sub>2</sub> ze źródeł punktowych (np. elektrownie węglowe) szacuje się na około 75% całkowitych kosztów geologicznej sekwestracji. Wydatki te można zmniejszyć poprzez niecałkowite oczyszczanie przemysłowego CO<sub>2</sub>. Przeprowadzone badania skupiały się na problemach sekwestracji geologicznej CO<sub>2</sub>, nie oceniały jednak wpływu mieszanin gazów, tj. NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>S na proces zatłaczania i długoterminowego składowania. Obecnie naukowcy coraz częściej podejmują tematykę geologicznej sekwestracji gazów kwaśnych (39 projektów w Kanadzie, 16 wdrożeń w USA) (Damen, 2007). Badania w kierunku iniekcji mieszanin gazów kwaśnych prowadzili m.in. Knauss, Johnson, Steefel (2005). Po przeprowadzeniu doświadczeń eksperymentalnych stwierdzili, że nawet duże ilości H<sub>2</sub>S zatłaczane jednocześnie z CO<sub>2</sub> nie powinny stanowić problemu w procesie geologicznej sekwestracji. Natomiast w warunkach sprzyjających utlenianiu siarki

ilość SO<sub>2</sub> w mieszaninie powinna być znikoma, ze względu na wytwarzane niskie pH (Knauss et al., 2005).

#### 4. Podsumowanie

Geologiczna sekwestracja dwutlenku węgla to proces przyszłościowy, który pozwoli ograniczyć jego stężenie w atmosferze. Jak każda technologia, niesie ona ze sobą korzyści, ale również ryzyko, związane z niekontrolowanymi wyciekami CO<sub>2</sub>. Dlatego tak ważne jest prowadzenie badań w celu identyfikacji oraz eliminacji potencjalnego ryzyka. Według Bensona (2006) działania prowadzone aktualnie są bezpieczne, a dobre praktyki pozwalają zmniejszyć zagrożenia i ich szkodliwy wpływ na środowisko naturalne. Według Intergovernmental Panel on Climate Change (w skrócie IPCC) przy odpowiednim monitoringu ryzyko związane z procesami Carbon Capture and Storage (CCS) jest porównywalne z ryzykiem bieżącej działalności, tj. magazynowania gazu ziemnego czy usuwania gazów kwaśnych (IPCC 2006). Również Damen (2007) przychyliła się do potwierdzenia bezpieczeństwa CCS, argumentując, że średnia roczna stopa wycieku CO<sub>2</sub> wynosi mniej niż 0,1% ilości zatłoczonego gazu.

Dzięki programom badawczym zidentyfikowano wiele problemów związanych z CCS, jednakże pozostają jeszcze kwestie, wymagające głębszego poznania, m.in.:

- oszacowanie rzeczywistego tempa ubytku sekwestrowanego CO<sub>2</sub> poprzez zróżnicowane cieczi,
- oddziaływania CO<sub>2</sub> na orurowanie i cementacje otworów,
- trwałości nadkładu oraz skał izolujących,
- rozpuszczalności CO<sub>2</sub> w solankach w warunkach połowych (w terenie),
- fizykochemicznych reakcji zachodzących w pokładach węgla wskutek zatłaczania CO<sub>2</sub>,
- wpływu ucieczek gazu na wody podziemne i ekosystemy (Gaus, 2010, Benson, 2006, Damen, 2007).

Wspólnie z rozwojem technologii dla CCS powinny iść działania wspierające, tj. testy pilotażowe, projekty regionalnych ocen pojemności struktur geologicznych, badania czynników ekonomicznych i społecznych. Dodatkowo należy promować programy badań podstawowych dla opracowania nowych metod monitorowania, które pomogą w opracowaniu dokładniejszych modeli komputerowych oraz przewidywania skutków długotrwałego składowania CO<sub>2</sub>. Ponadto, efektem tych działań powinna być regulacja przepisów

dotyczących bezpieczeństwa pracowników, społeczeństwa i środowiska, przy jednoczesnym usprawnieniu wydawania pozwoleń na magazynowanie CO<sub>2</sub> (Gaus, 2010, Benson, 2006).

## BIBLIOGRAFIA

1. Benson S. M.: Assessment of Risks from Storage of Carbon Dioxide in Deep Underground Geological Formations. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Version 1.0, USA 2<sup>nd</sup> April 2006.
2. Coninck H., Davidson O., Loos M., Metz B., Meyer L.: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Intergovernmental Panel on Climate Change 2005.
3. Damen K.: Reforming Fossil Fuel Use. The Merits, Costs and Risks of Carbon Dioxide Capture and Storage. Doctoral thesis Utrecht University, Amsterdam 2007.
4. Damen K., Faaij A., Turkenburg W.: Health safety and environmental risks of underground CO<sub>2</sub> sequestration. Overview of mechanisms and current knowledge. *Climatic Change* 2006; 74 (1-3): 289-318.
5. Ennis-King J., Paterson L.: Rate of dissolution due to convective mixing in the underground storage of carbon dioxide. W: Gale J., Kaya Y., red., Sixth International conference on Greenhouse Gas control Technologies, Kyoto, Japan, Vol. 1. Pergamon. Amsterdam 2003, p. 507-510.
6. Gaus I.: Role and impact of CO<sub>2</sub>-rock interactions during CO<sub>2</sub> storage in sedimentary rocks. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4 (2010), 73-89.
7. Knauss K. G., Johnson J. W., Steefel C. I.: Evaluation of the impact of CO<sub>2</sub>, co-contaminant gas, aqueous fluid and reservoir rock interactions on the geologic sequestration of CO<sub>2</sub> *Chemical Geology* 217 (2005), 339- 350.
8. Labus K., Bujok P., Leśniak G., Klempa M.: Badania reakcji w systemie woda – skała – gaz dla celów sekwestracji CO<sub>2</sub> w poziomach wodonośnych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
9. Labus K.: Modeling hydrochemical effects of carbon dioxide sequestration in saline aquifers of the Upper Silesian Coal Basin. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
10. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 2006.



**Abstract**

Geological sequestration is one of the key methods of reducing carbon dioxide in the atmosphere. Formations which are considered as potential repositories for CO<sub>2</sub> storage are depleted oil and natural gas deposits, coal beds and deep saline water-bearing formations. Before starting sequestration processes, we need to find answers to some key questions about the effectiveness and safety of this technology. The first potential risk associated with CO<sub>2</sub> sequestration are the injection systems, the pipelines of which may be leaky and constitute the main risk. On the other side the most widely analyzed problem is the potential risk associated with underground storage of CO<sub>2</sub> (eg Damen 2007, Gaus 2010, Knauss 2006). These issues include: escaping CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> escape, induced seismicity, ground movements and shipments to other groundwater aquifers through the hydraulic connections (Damen et al. In 2006, Labus, 2009).

The studies demonstrate the safety of CCS (Carbon Capture and Storage), for example, according to the IPCC (2006) the risk associated with CCS is comparable with the risk of ongoing activities such as storage of natural gas or acid gas removal.

However, there remain issues that require deeper knowledge, including: the impact of CO<sub>2</sub> on the piping and cementation of holes, the durability of rock overburden and isolation, the solubility of CO<sub>2</sub> in the brine in the field of gas escapes and the impact on groundwater and ecosystems (Gaus 2010, Benson 2006, Damen 2007).