

BARBARA ULIASZ-MISIAK*

Wpływ geologicznego składowania CO₂ na środowisko

Wprowadzenie

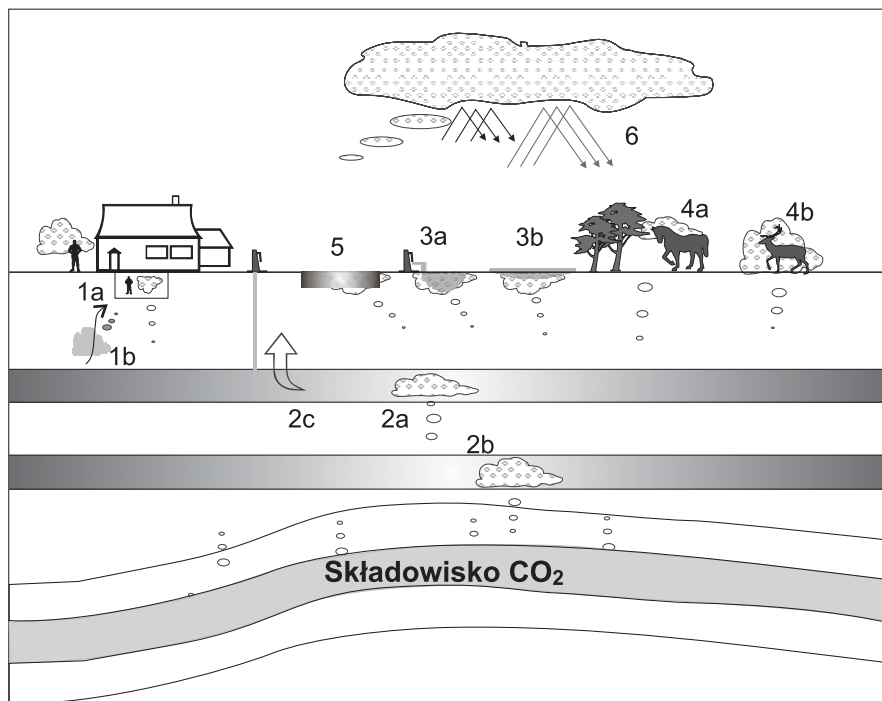
Geologiczne składowanie dwutlenku węgla (*Carbon Dioxide Capture and Storage* – CCS) rozważane jest jako jedna z możliwości ograniczenia emisji tego gazu do atmosfery i zmniejszenia jego koncentracji. Obecnie na świecie jest realizowanych kilka projektów geologicznego składowania CO₂ w skali przemysłowej (np. Sleipner, Weyburn, In Salah) oraz kilkanaście projektów badawczo-rozwojowych. Projekty te nakierowane są na określenie technicznych i technologicznych możliwości zastosowania tej technologii. Wdrożenie geologicznego składowania w skali przemysłowej wiąże się z ryzykiem wystąpienia zagrożeń dla zdrowia ludzi i środowiska, na każdym etapie tego procesu. Dlatego bezpieczeństwo składowania jest kluczowym zagadnieniem wpływającym na społeczną akceptację tej technologii oraz przepisy prawne i standardy regulujące jego stosowanie w skali przemysłowej.

Miejsca geologicznego składowania CO₂ typowane są przede wszystkim pod kątem ich szczelności. Składowanie dwutlenku węgla powinno być prowadzone przy założeniu, że gaz nie będzie wyciekał z miejsca składowania. Zakłada się, że rocznie może wyciekać ze składowiska mniej niż 0,1% całości składowanego dwutlenku węgla (Damen i in. 2006). Niezależnie od tego, czy zatłaczany gaz będzie wyciekał ze składowiska, czy też nie dwutlenek węgla będzie oddziaływał na środowisko. W szczelnym miejscu składowania CO₂ będzie wchodził w reakcje ze skałami i wodami. Jednak jego oddziaływanie nie spowoduje ujemnych dla środowiska skutków. W przypadku nieszczelności składowiska migrujący gaz będzie powodował zmiany w składzie powietrza glebowego i wód podziem-

* Dr hab. inż., Katedra Inżynierii Naftowej, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków; e-mail: uliasz@agh.edu.pl

nych, wpływał na rozwój roślin, zwiększał jego stężenie w atmosferze, a przy nagłych i dużych wyciekach stanowił zagrożenie dla ludzi i zwierząt (rys. 1).

Wpływ składowania i składowisk dwutlenku węgla na środowisko naturalne jest zagadnieniem złożonym, ze względu na skalę czasową i możliwe oddziaływania z różnymi elementami środowiska. Zakłada się, że składowanie będzie prowadzone przez długi okres czasu, w ciągu którego gaz będzie oddziaływał na środowisko. Geologiczne składowanie CO₂ jest nową technologią, większość instalacji działa od niedawna i nie dostarczają one żadnych informacji na ten temat. Wpływ podwyższonych koncentracji dwutlenku węgla na środowisko naturalne i organizmy żywe jest słabo zbadany. Badania tego rodzaju prowadzone są w miejscach wycieków CO₂ pochodzącego ze źródeł naturalnych (Krüger i in. 2009; Uliasz-Misiak (red.) 2006; West i in. 2009, 2010; Beaubien i in. 2008; Vodnik i in. 2006).



Rys. 1. Potencjalny wpływ wycieku dwutlenku węgla z podziemnego składowiska na ludzi, zwierzęta i wody (na podst. Bouc i in. 2009 ze zmianami)

- 1a – zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi spowodowane wyciekami CO₂; 1b – zagrożenie dla zdrowia ludzi spowodowane mobilizacją zanieczyszczeń; 2a – zanieczyszczenie podziemnych wód pitnych; 2b – zmiana właściwości fizykochemicznych i pogorszenie jakości wód podziemnych; 2c – spadek wydatku wód; 3a – zanieczyszczenie powierzchniowych wód pitnych; 3b – zmiana właściwości fizykochemicznych i pogorszenie jakości wód powierzchniowych; 4a – zagrożenie dla zwierząt hodowlanych; 4b – zagrożenie dla fauny i flory lądowej; 5 – zagrożenie dla mikroorganizmów glebowych; 6 – zwiększenie efektu cieplarnianego

Fig. 1. Potential influence of carbon dioxide leakage from an underground storage site on humans, animals and waters (after Bouc et al. 2009 with changes)

1. Oddziaływanie CO₂ na skały i wody podziemne

Geologiczne składowanie CO₂ ma być metodą, która pozwoli na trwałe usunięcie tego gazu z atmosfery poprzez uwięzienie go w formacji skalnej. Gaz zatłaczany do struktur geologicznych będzie oddziaływał z formacją do składowania (skałami i płynami złożowymi) oraz w przypadku migracji poza składowisko ze skałami nadkładu i wodami podziemnymi.

Dwutlenek węgla unieszkodliwiany jest w formacjach do składowania za pomocą różnych mechanizmów pułapkowania. Mechanizmy pułapkowania działające w długim okresie czasu pozwolą na trwałe związanie CO₂; zalicza się do nich: pułapkowanie hydrodynamiczne, rozpuszczanie i mineralne wiązanie. Pierwszy mechanizm (pułapkowanie hydrodynamiczne) polega na składowaniu superkrytycznego CO₂ pod przykryciem słabo przepuszczalnych skał i nie powoduje zmian w formacji do składowania. Dwa pozostałe – rozpuszczanie i mineralne wiązanie – wywołują zmiany w miejscu składowania.

Dwutlenek węgla stopniowo rozpuszcza się w wodzie złożowej lub ropie, całkowicie lub częściowo, oraz reaguje ze skałami i wodami, powodując rozpuszczanie i wytrącanie minerałów w skałach (mineralną karbonatyzację) (Uliasz-Misiak 2008). Po zatłoczeniu dwutlenku węgla, rozpuszczanie w wodzie złożowej zachodzi do momentu osiągnięcia stanu równowagi. W danym momencie czasu formacja do składowania zawiera: „czystą” wodę złożową, pióropusz dwutlenku węgla i wodę z częściowo rozpuszczonym gazem (Flett i in. 2007). Rozpuszczalność dwutlenku węgla zależy głównie od: mineralizacji wód, ilości i rodzaju rozpuszczonych składników stałych (zwłaszcza węglanów: wapnia, magnezu, żelaza i manganu), ciśnienia i temperatury złożowej (Chang i in. 1996; Nodzeński, Hołda 2003; Ciężkowski i in. 2002). Rozpuszczalność CO₂ w wodach złożowych i węglowodorach była przedmiotem licznych badań m. in. Enick i Klara (1990), Bachu i Adams (2003), Holt i in. (1995), Koide i in. (1995), Portier i Rochelle (2005), Kaszuba i inni (2003). Badania reakcji pomiędzy wodą złożową a dwutlenkiem węgla przeprowadził Soong i inni (2004). Stwierdzili oni, że CO₂ zatłoczony do wód złożowych powoduje obniżenie pH oraz tworzenie takich minerałów jak kalcyt, dolomit, syderyt.

Mechanizm pozwalający na trwałe związanie dwutlenku węgla w matrycy skalnej to mineralne wiązanie. Woda złożowa z dwutlenkiem węgla powoduje rozpuszczanie jednych i wytrącanie innych składników mineralnych ze skał budujących formację do składowania. Jest to proces powolny i bardzo złożony. Reakcje chemiczne jakie zachodzą w matrycy skalnej zbiornika zależą od składu mineralogicznego, tekstury skał, temperatury i ciśnienia, prędkości przepływu gazu i szybkości reakcji, składu wód złożowych; a ich ogólne trendy są możliwe do przewidzenia (Czernichowski-Lauriol i in. 1996; Olsen, Stentoft 2003).

Badania zatłaczania CO₂ do piaskowców wskazują, że zachodzą tu dwa rodzaje reakcji: z lepiszczem węglanowym, anhydrytowym i innymi, podobne do reakcji zachodzących w skałach węglanowych oraz z minerałami krzemianowymi. Rezultatem ich może być rozpuszczanie skaleni (w różnym stopniu) oraz wytrącanie kryształów kaolinitu z K-skaleni i albitu, minerałów ilastych, zeolitów i węglanów (Olsen, Stentoft 2003; Tarkowski, Uliasz-Misiak 2007; Gunter i in. 2000; Gaus i in. 2005; Lagneau i in. 2005). Nie stwierdzono

reakcji kwarcu z wodami złożowymi zawierającymi dwutlenek węgla (Gunter i in. 2000; 2004; Lagneau i in. 2005; Wigand i in., 2008). W formacjach piaskowcowych zaobserwowano również proces przekształcania krzemionki (krzemiany) w minerały węglanowe (karbonatyzację). Jest to proces chemiczny, w którym przy udziale CO_2 z minerałów zawierających Ca, Mg, Na, K, powstają stabilne węglany i wodorowęglany tych metali (Olsen, Stentoft 2003).

Mineralne wiązanie może również powodować zmiany przepuszczalności i porowatości piaskowców w pobliżu otworu zatłaczającego CO_2 w wyniku rozpuszczania lepiszcza zawierającego minerały węglanowe. W dalszej odległości, w strefie niższego ciśnienia lub wyższej temperatury, minerały te mogą się wytrącać z wody nasyconej dwutlenkiem węgla (Olsen, Stentoft 2003; Labus i in. 2010).

Zatłaczanie dwutlenku węgla do skał węglanowych powoduje zmiany we właściwościach chemicznych, mechanicznych i mikrostrukturalnych tych skał. Wynikają one z faktu, że zatłaczany dwutlenek węgla obniża pH wód podziemnych, co powoduje rozpuszczanie i wytrącanie minerałów z matrycy skalnej. Zmiany objętości matrycy skalnej zmieniają strukturę porową skały, wpływając na parametry petrofizyczne formacji do składowania (Andre i in. 2007; Gaus i in. 2002; Zoback, Zinke 2002; Le Guen i in. 2007; Izgec i in. 2008). Na froncie CO_2 , gdzie gaz rozpuszcza się w wodzie, minerały węglanowe (np. kalcyt) mogą się rozpuszczać zwiększając przepuszczalność i porowatość skał węglanowych. Reakcje te prowadzą do zmiany chemizmu wody złożowej i w późniejszym czasie do wytrącania minerałów, co z kolei powoduje zmniejszenie porowatości i przepuszczalności skał (Xu i in. 2004; Izgec i in. 2007).

Większość badań wpływu zatłaczania i składowania dwutlenku węgla na wody podziemne dotyczyła wód zalegających na głębokościach większych niż 1000 metrów, gdzie CO_2 występuje w fazie gęstej gazowej. Wody pitne zalegają na mniejszych głębokościach, panuje tam niższa temperatura i ciśnienie, a dwutlenek węgla jest w fazie gazowej. Geochemiczne zachowanie dwutlenku w fazie gazowej i superkrytycznej jest różne.

W przypadku przedostania się dwutlenku węgla do wód podziemnych gaz ten spowoduje zmiany pH i ich składu mineralnego. Przeprowadzone badania wskazują, że po zatłoczeniu CO_2 do wód zalegających na głębokościach rzędu 300 m główne zmiany jakie zachodzą w chemizmie to zmiany pH i potencjału redoks. Zmniejszenie pH będzie wywoływać rozpuszczanie minerałów węglanowych, a co za tym idzie pogorszenie jakości wód pitnych ze względu na zwiększenie ich twardości (wzrost mineralizacji wód). Spadek pH może również powodować uwalnianie pierwiastków głównych i śladowych. Podwyższona kwasowość wód, związana z wyciekami dwutlenku węgla, może mieć wpływ na rozpuszczanie i mechanizmy sorpcji wielu minerałów (Wang, Jaffe 2004). Wyższa kwasowość wód wpływa na sorpcję jonów na ziarnach, która może powodować intensywniejszą desorpcję potencjalnie niebezpiecznych metali ciężkich. Proces ten może prowadzić do wzrostu zawartości poziomu tych metali i nie spełniania przez wody pitne odpowiednich norm (Jaffe, Wang 2003; Lu i in. 2010). Potencjał redoks kontroluje mobilność wielu pierwiastków, takich jak Fe, Cu, V, U i Cr. Wpływ dwutlenku węgla na wody podziemne będzie ogra-

niczany przez oddziaływania pomiędzy wodą a skałami, które zależą od ich składu mineralogicznego. Adsorpcja/desorpcja jest prawdopodobnie najważniejszym procesem kontrolującym niebezpieczne pierwiastki uruchamiane przez wyciek dwutlenku węgla. Względne znaczenie rozpuszczania/wytrącania w porównaniu do desorpcji/adsorpcji jest wrażliwe na wiele czynników, takich jak mineralogia zbiornika, parametry adsorpcji i kinetyki rozpuszczania minerałów (Zheng i in. 2009).

Przeprowadzono prace laboratoryjne nakierowane na oszacowanie stopnia mobilizacji kationów ze skał poziomu wodonośnego pod wpływem zatłaczanego dwutlenku węgla. Stwierdzono, że po zatłoczeniu gazu w krótkim okresie czasu (kilka godzin – dwa dni) następuje szybka mobilizacja kationów, potem ich koncentracja stabilizuje się lub obniża. Na podstawie badań wydzielono dwie grupy kationów, które pod wpływem dwutlenku węgla zachowują się na różne sposoby. Typ pierwszy to kationy: Ca, Mg, Si, K, Sr, Mn, Ba, Co, B, i Zn. Ich stężenie po wprowadzeniu CO₂ szybko wzrosło i ustabilizowało się pod koniec badań (koncentracje podwyższone w trakcie eksperymentu). Koncentracje kationów drugiego rodzaju (Fe, Al, Mo, U, V, As, Cr, Cs, Rb, Ni i Cu) wzrastają po wprowadzeniu CO₂, potem spadają do poziomu niższego niż przed wprowadzeniem gazu. Stężenia kationów drugiego rodzaju obniżają się ze względu na adsorpcję zachodzącą podczas mineralnego buforowania wywołanego przez zmianę pH i wzrost koncentracji innych kationów (Lu i in. 2010).

Badaniami stwierdzono, że w przypadku wycieku CO₂ ze składowiska, minerały węglanowe – zwykle występujące w skałach poziomów wodonośnych – stwarzają potencjalne zagrożenie dla jakości wód pitnych. Rozpuszczanie minerałów węglanowych zawierających śladowe ilości minerałów ciężkich (Mn, Br i Sr) stanowi największe zagrożenie dla jakości wód pitnych, związane z wyciekiem dwutlenku węgla. Dodatkowo, minerały węglanowe podnoszą zasadowość wód zwiększając koszty ich uzdatnienia (Lu i in. 2010).

Większość badań (laboratoryjnych i modelowych) oddziaływania dwutlenku węgla na wody pitne przeprowadzono dla najbardziej pesymistycznych scenariuszy wycieku tego gazu ze składowiska (bardzo duży wyciek). W rzeczywistości stosunek ilości gazu jaka przedostanie do poziomu wodonośnego do jego wielkości będzie mniejszy. W związku z tym pogorszenie jakości wód pitnych może wystąpić jedynie w pobliżu punktu wycieku (Lu i in. 2010).

2. Oddziaływanie składowanego CO₂ na ludzi i zwierzęta

Dwutlenek węgla wyciekający ze składowiska będzie przenikał do skał, gleby, wód podziemnych i atmosfery. Wpływ podwyższonej koncentracji CO₂ na lądowe i morskie ekosystemy oraz ludzi jest obecnie przedmiotem licznych badań.

Węgiel jest pierwiastkiem niezbędnym do wszelkich procesów życiowych na Ziemi. Występuje on w postaci gazowej – dwutlenek węgla (w atmosferze i rozpuszczony w wodzie – jony wodorowęglanowe (HCO₃⁻) i węglanowe (CO₃⁻²)) oraz stałej – w szczątkach roślinnych (węgiel kamienny, brunatny i ropa naftowa) i zwierzęcych (np. muszle zbudowa-

ne z węgla wapnia). Węgiel (pierwiastek chemiczny) i jego związki krążą między światem organicznym i nieorganicznym. Najbardziej intensywna wymiana przebiega między atmosferą i organizmami żywymi oraz między atmosferą i wodami powierzchniowymi. Rośliny pobierają dwutlenek węgla z atmosfery w procesie fotosyntezy, natomiast zwierzęta oddają CO₂ do atmosfery w procesie oddychania. Związany przez rośliny węgiel tworzy materię organiczną, z której korzystają zwierzęta i drobnoustroje. Następnie martwe szczątki roślin i zwierząt są rozkładane na związki nieorganiczne, w tym również na dwutlenek węgla, który powraca do atmosfery i wód. Podobnie CO₂ rozpuszczony w wodach przyswajany jest przez znajdujące się w nich żywe organizmy (Bryła 2002). Rozwój przemysłowy, któremu towarzyszy wzrost emisji do atmosfery CO₂ ze źródeł antropogenicznych spowodował zakłócenia w obiegu węgla. Do zaburzenia tego cyklu przyczynia się również nadmierna eksploatacja i niszczenie obszarów zielonych na Ziemi, które wpłynęły na zmniejszenie możliwości asymilacyjnych tych terenów. Wszystko to powoduje wzrost stężenia dwutlenku węgla w powietrzu atmosferycznym (Craig 2003).

Dwutlenek węgla wydzielany jest przez wszystkie organizmy żywe w procesie oddychania jako produkt ich metabolizmu (przemiany materii). Jest gazem bezbarwnym, bezwonny, cięższym od powietrza i nietoksycznym. Ma istotne znaczenie dla organizmu człowieka ponieważ wpływa m. in. na odczyn krwi i szybkość pracy serca. Ludzie, jak większość organizmów żywych, w procesach oddychania komórkowego pochłaniają tlen i wytwarzają dwutlenek węgla. Oddychanie jest procesem, w którym wdychamy O₂ z powietrza i usuwamy CO₂ z naszych organizmów. Przeciętnie wdychane powietrze zawiera około 21% tlenu i 0,04% dwutlenku węgla, w wydychanym powietrzu jest odpowiednio 16% i 3,5% wymienionych gazów. Oddziaływanie CO₂ na ludzi zależy od koncentracji gazu, czasu ekspozycji oraz różnych specyficznych czynników, takich jak: wiek, stan zdrowia, aktywność fizyczna, styl życia. Wrażliwość ludzi na działanie dwutlenku węgla jest bardzo zróżnicowana; wpływ na organizm ludzki rośnie przy jednoczesnym obniżaniu się zawartości tlenu w powietrzu. Wysoka koncentracja CO₂ w powietrzu powoduje zmniejszenie zawartości w nim tlenu, co wpływa na jego toksyczność. Zbyt mała zawartość tlenu w powietrzu prowadzi do uduszenia. Typowa zawartość O₂ w powietrzu wynosi 21%, może wahać się od 19,5% do 23,5%. Poniżej 17% tlenu w powietrzu występują problemy z oddychaniem (krótki oddech i mniejsza wydolność oddechowa) oraz wzrost prędkości tętna. Przy stężeniach tlenu w powietrzu rzędu 6–10% w ciągu kilku minut następuje śmierć (Rice 2003, 2004; Benson i in. 2002; Targowski 2005). Wzrost koncentracji dwutlenku węgla w powietrzu powoduje u ludzi między innymi takie efekty jak wzrost częstotliwości oddychania, trudności w oddychaniu, bóle głowy, utrata przytomności (tab. 1). Przy stężeniach powyżej 30% CO₂ w powietrzu śmierć następuje po kilku minutach (West i in. 2005; Rice 2003, 2004; Stenhouse i in. 2009; Targowski 2005). W przypadku długotrwałej ekspozycji ludzi na niewielkie stężenia CO₂ (1,5–3%) w powietrzu, przy normalnej zawartości tlenu, stwierdzono zmiany w metabolizmie (Rice 2003, 2004).

Większość badań dotyczących oddziaływania dwutlenku węgla na ekosystem i organizmy żywe była prowadzona dla stężeń bardzo dużych i nieznacznie podwyższonych,

TABELA 1

Efekty oddziaływania dwutlenku węgla na organizm człowieka (na podst. Rice 2003; Targowski 2005)

TABLE 1

The effects of carbon dioxide on the human organism (after Rice 2003; Targowski 2005)

Stężenie CO ₂ [%]	Efekt działania na organizm ludzki
0,035–0,045%	Świeże powietrze atmosferyczne
1,0%	Lekki wzrost częstości oddychania o około 37%
1,5%	Maksymalna tolerowana dawka dla pracowników w specyficznych warunkach (pod kontrolą medyczną): browary, łodzie podwodne
2,0%	Głębszy oddech, wzrost częstości oddychania o około 50%, ekspozycja przez kilka godzin powoduje bóle głowy
3,0%	Utrudnione oddychanie, wzrost częstości oddychania, osłabienie słuchu, ból głowy, wzrost ciśnienia krwi i pulsu
4,0–5,0%	Wyraźnie pogłębiony oddech, wzrost częstości oddychania o około 100%, po około 30 minutach ekspozycji może pojawić się odczucie braku swobody oddychania
7,2%	Wzrost częstości oddychania o około 200%, ból głowy, duszności
8,0–10,0%	Oddychanie wymaga zwiększonego wysiłku, ból głowy, zaburzenia widzenia, dzwonięcie w uszach, po kilku minutach ekspozycji może nastąpić utrata przytomności
10,0% do 100,0%	Gwałtowna i szybka utrata przytomności, przedłużająca się ekspozycja prowadzi do śmierci przez uduszenie

nieliczne przy koncentracjach pośrednich z krótką lub długoterminową ekspozycją (Stenhouse i in. 2009). Wpływ podwyższonych koncentracji na ekosystem badano na podstawie obserwacji prowadzonych w obszarach ekshalacji wulkanicznych i źródeł wód nasyconych dwutlenkiem węgla. W analizach wykorzystywano wiedzę z zakresu fizjologii porównawczej i podstawowej, konserwacji żywności, technologii kosmicznych i badań w podwyższonej zawartości tego gazu w powietrzu (Benson i in. 2002).

Spośród organizmów żywych specyficzną grupą są mikroorganizmy żyjące pod ziemią, funkcjonują one w warunkach ograniczonego dostępu do źródeł energii oraz składników odżywczych. Dzięki swej specyfice mogą się przystosować do bardzo zróżnicowanych środowisk (Sadowsky, Schortemeyer 1997). Niektóre mikroby mogą przetrwać w atmosferze o bardzo dużym stężeniu CO₂ (dochodzącym do 100%), przy śladowej zawartości tlenu, jednak dla niektórych koncentracja 10% może być zabójcza (West i in. 2005; Benson i in. 2002). Również grzyby to organizmy odporne na wysokie koncentracje dwutlenku węgla (tab. 2), niektóre gatunki wykazują znaczny wzrost przy stężeniach rzędu 15–25% (Benson i in. 2002).

Badania mikrobiologiczne (składu jakościowego i ilościowe mikroorganizmów) terenów naturalnych wycieków dwutlenku węgla w rejonie Muszyny w glebach o zawartości CO₂

TABELA 2

Oddziaływanie podwyższonych stężeń dwutlenku węgla na zwierzęta i rośliny (na podst. West i in. 2005)

TABLE 2

The influence of elevated concentrations of carbon dioxide on animals and plants (after West et al. 2005)

Zwierzęta		Stężenia [%]	Efekt działania
Bezkręgowce lądowe	owady (<i>Cryptolestes ferrugineus</i>)	15%	śmierć po około 42 dniach
		100%	śmierć po około 2 dniach
	bezkęgowce żyjące w glebie	20%	u większości gatunków stwierdzono zmiany w zachowaniu
		11–50%	śmiertelna dla 50% gatunków
Kręgowce lądowe	gryzonie	2%	obserwacje w norach i gniazdach
	susły	4%	
	ptaki	9%	
Rośliny	drzewa	20–90%	wymieranie drzew (Mammoth Mountain, USA) spowodowane prawdopodobnie zaburzeniami w oddychaniu korzeniowym
Grzyby		15–20%	znaczący spadek wzrostu spor dwóch typów grzybów
		30%	brak mierzalnego wzrostu spor
		50%	brak kiełkowania spor

od 1,5 do powyżej 25% wykazały dużą liczebność bakterii z grupy amonifikatorów, nityfikatorów i rodzaju *Azotobacter*. Stwierdzono, że podwyższona ilość bakterii beztlenowych może świadczyć o przystosowaniu się tych mikroorganizmów do zwiększonych ilości dwutlenku węgla w glebach (Uliasz-Misiak (red.) 2006). Testy mikrobiologiczne przeprowadzone w rejonach wycieków CO₂ w Laachen See w Niemczech, wykazały znaczne różnice pomiędzy składem jakościowym mikroorganizmów zasiedlających strefy o zróżnicowanych stężeniach dwutlenku węgla (od 20% do 90%). Stwierdzono, że ekosystem łatwo adaptuje się do nowych podwyższonych koncentracji dwutlenku węgla poprzez zmianę zasiedlających go gatunków lub ich adaptację w kierunku organizmów beztlenowych i acydofilnych (Krüger i in. 2009).

Tolerancja zwierząt na podwyższone stężenia CO₂ zależy głównie od mechanizmu wymiany gazowej, organów wymiany gazowej oraz medium wykorzystywanego do oddychania. Większość prowadzonych testów dotyczyła reakcji zwierząt lądowych na podwyższone zawartości CO₂; brak jest badań oddziaływania na zwierzęta wodne i wodno-lądowe. Jedyne badania przeprowadzone w środowiskach morskich były próbą oceny długoterminowego oddziaływania CO₂ na organizmy głębokomorskie (West i in. 2005).

Spośród zwierząt lądowych najbardziej odpornymi na podwyższone stężenia CO₂ są owady i niektóre gatunki bezkręgowców; mogą one przeżyć w atmosferze zawierającej

ponad 20% tego gazu (Benson i in. 2002; Nelson i in. 2005). Dość dużą tolerancję na podwyższoną koncentrację (2–9%) dwutlenku węgla wykazują również zwierzęta żyjące pod ziemią w norach, tunelach, takie jak krety, niektóre gryzonie i ptaki. Nornice to spośród ssaków zwierzęta o najwyższej odporności na CO₂ (por. tab. 2). Kęgowce lądowe wykazują bardzo różną tolerancję na CO₂, co wynika ze zróżnicowania ich narządów oddechowych. Tlenowa pojemność oddechowa płazów jest dużo mniejsza niż u ssaków, natomiast anaerobowa pojemność i tolerancja na niedotlenienie jest większa. Rezultatem tego jest najprawdopodobniej większa tolerancja płazów niż ssaków na podwyższone stężenia dwutlenku węgla (Benson i in. 2002).

Potencjalne zagrożenie związane z wyciekami CO₂ ze składowiska dla życia lub zdrowia ludzi oraz świata zwierzęcego zależą głównie od charakteru incydentu (ilość gazu, warunki meteorologiczne i ukształtowanie terenu). Ponieważ dwutlenek węgla jest cięższy od powietrza, jego wycieki mogą stanowić zagrożenie w specyficznych sytuacjach, kiedy duże ilości gazu akumulują się w obszarach nisko położonych lub słabo wentylowanych. W innych przypadkach nawet duże ilości emitowanego gazu (np. z kominów lub wulkanów) szybko rozprzestrzeniają się w atmosferze (Benson i in. 2002).

3. Oddziaływanie składowanego CO₂ na gleby i rośliny

W naturalnych systemach ekologicznych, w przypadku gdy nie ma emisji dwutlenku węgla z głębszych warstw Ziemi, jego koncentracja i strumień w powietrzu glebowym zależą głównie od fotosyntezy, oddychania korzeni, rozkładu substancji organicznej, odgazowywania wód podziemnych i wymiany z atmosferą. Wyciek CO₂ ze składowiska może wyrządzić w ekosystemie szkody, np. w uprawach. Podwyższona zawartość dwutlenku węgla w glebach może spowodować ich zakwaszenie, zmiany różnorodności biologicznej oraz składu gatunkowego roślin, a przy wysokiej koncentracji CO₂ uduszenie.

Zawartość dwutlenku węgla w glebie jest zróżnicowana w zależności od pory roku i dnia, wpływa na nią również wiele czynników, takich jak np. zawartość wody w glebie, temperatura i rodzaj roślinności (Hamada, Tanaka 2001).

Koncentracja dwutlenku węgla w powietrzu glebowym (CO₂ w fazie gazowej w przestrzeni porowej gleby) wzrasta wraz z głębokością, w związku z gradientem dyfuzji. Dyfuzja jest podstawowym mechanizmem transportu tlenu do gleby i dwutlenku węgla do atmosfery, ogranicza ona również oddychanie w środowisku glebowym. Oddychanie jest podstawowym, stałym źródłem dwutlenku węgla. W dobrze napowietrzanych glebach stężenie CO₂ na głębokości około 1 m jest poniżej 1%, w słabo napowietrzanych może przekraczać 10% (Benson i in. 2002). Wzrost koncentracji dwutlenku węgla w glebie, spowodowany np. wyciekami tego gazu ze składowiska, będzie powodował zmniejszenie jej pH. Mogą również zachodzić niezbyt duże zmiany w: mineralogii gleby (K-felsparu, kwarcu i mik), w zawartości metali ciężkich (Cr i As), w zdolności wymiennej kationów przy udziale CaO, MgO, Fe₂O₃ i Mn₃O₄ (West i in. 2009; Beaubien i in. 2008; Krüger i in. 2009; Wei i in. 2010).

Oddziaływanie podwyższonej zawartości dwutlenku węgla w atmosferze na ekosystem, szczególnie na rośliny, było przedmiotem licznych prac. Natomiast tylko nieliczne dotyczyły wpływu podwyższonej koncentracji CO₂ w powietrzu glebowym. Badania tego rodzaju były prowadzone w obszarach występowania naturalnych wycieków dwutlenku węgla (Stavesinci – Słowenia, Latera – Włochy, Mammoth Mountain – USA, Laachen See – Niemcy), gdzie dwutlenek węgla pochodzący z głębokich stref ziemi migruje ku jej powierzchni. W ostatnich latach badania te prowadzone są również pod kątem określenia potencjalnego wpływu wycieków dwutlenku węgla na ekosystem (Beaubien i in. 2008; Vodnik i in. 2006; West i in. 2009).

Doświadczenia prowadzone w ramach projektu *Free-Air CO₂ Enrichment Project* (FACE) finansowanego przez USDA (www.uswcl.ars.ag.gov) wykazały, że niewielkie stężenia CO₂ w atmosferze pozytywnie wpływają na plony zbóż. Rośliny łatwo się adaptują do nieznacznie podwyższonej zawartości dwutlenku węgla, przemieszczając biomasę w korzeniach, łodygach i liściach. Jednak po upływie dziesiątek lub setek lat oddziaływania nawet niewielkich stężeń CO₂ może dojść do zmian w składzie gatunkowym roślin. Dotychczas nie określono dokładnie jak oddziałują na rośliny różne stężenia dwutlenku węgla, od podwyższonej zawartości tego gazu w powietrzu (FACE) do poziomu śmiertelnego.

Negatywny wpływ podwyższonego stężenia dwutlenku w powietrzu glebowym na rośliny jest znany, jednak są to bardzo złożone oddziaływania. Wysokie stężenia CO₂ mogą wpływać na glebę i procesy korzeniowe, obniżać pH gleby, potencjał redoks i dostępność substancji pokarmowych oraz zakłócać działanie korzeni. Kiedy wysoka koncentracja CO₂ występuje równoległe z brakiem tlenu oddziaływanie dwutlenku węgla jest połączone ze zjawiskiem niedotlenienia. Wysokie stężenia CO₂ w glebie mogą oddziaływać na pędy i inne części nadziemne roślin. Dodatkowo mogą wpływać na procesy zachodzące w roślinach nad powierzchnią ziemi (fotosynteza, oddychanie) (Vodnik i in. 2006).

Proces powodujący wymieranie drzew – jak np. w Mammoth Mountain w Kalifornii – nie jest dokładnie poznany. Najprawdopodobniej powodem jest wstrzymanie oddychania w strefie korzeniowej wywołane niedotlenieniem, nadmiarem dwutlenku węgla lub zakwaszeniem środowiska glebowego. W przypadku występowania w glebie dużych koncentracji CO₂ następuje obumieranie korzeni, a co za tym idzie całych roślin. Długotrwałe oddziaływanie (tygodnie lub lata) przy stężeniach rzędu 20% i większych może prowadzić do powstania strefy śmierci, w której nie przeżywa żadna flora. Przyjmuje się, że koncentracja dwutlenku węgla rzędu 20–30% jest wartością krytyczną dla roślin i ogólnie ekosystemu, powyżej której następuje obumieranie roślin. Obserwacje dokonane podczas naturalnego wycieku CO₂ z jeziora Nyos wskazują, że ogólnie rośliny mają znacznie wyższą niż zwierzęta tolerancję na ekspozycję na ekstremalnie wysokie, krótkotrwałe stężenia dwutlenku węgla (Benson i in. 2002; Damen i in. 2006).

Badania wpływu na ekosystem i rośliny dwutlenku węgla zatłaczanego do gruntu przeprowadzono na eksperymentalnym pastwisku w pobliżu Nottingham (Wlk. Brytania). Analizowano wpływ podwyższonych stężeń dwutlenku węgla na rośliny jedno- i dwuliścienne. Przy bardzo wysokich koncentracjach (powyżej 75% na głębokości 20 cm) rośliny żółkły i stawały się brązowe, aż do uschnięcia. Przy niższych koncentracjach (do 45% na głą-

bokości 20 cm) dominującą grupę roślin stanowiły trawy. Na obszarach, na których nie zatłaczano dwutlenku węgla (porównawczych) obserwowano większą ilość gatunków roślin. Może to sugerować, że rośliny jednoliścienne są bardziej tolerancyjne na wyższe stężenia dwutlenku węgla niż rośliny dwuliścienne. Jakkolwiek inne czynniki, takie jak: fotosynteza, wiek roślin i stężenie azotu mogą wywoływać podobne rezultaty. Podobne obserwacje dokonano również w obszarach występowania naturalnych wycieków dwutlenku węgla we Włoszech (Beaubien i in. 2008; West i in. 2009)

Podsumowanie

Wdrożenie technologii CCS w skali przemysłowej wymaga oszacowania potencjalnego ryzyka dla środowiska naturalnego i ludzi, jakie wiąże się z wyciekami dwutlenku węgla ze składowiska.

Dwutlenek węgla zatłoczony do wód podziemnych powoduje obniżenie pH oraz tworzenie takich minerałów jak kalcyt, dolomit, syderyt. Minerale węglanowe i krzemianowe budujące formacje do składowania CO₂ mogą ulegać rozpuszczeniu i wytrącaniu w wyniku obniżenia pH wód złożowych. Zmiany objętości matrycy skalnej zmieniają strukturę porowatą skał, wpływając na parametry petrofizyczne formacji do składowania.

Wyciek CO₂ ze składowiska będzie powodował zmiany w składzie powietrza glebowego i wód podziemnych, wpływał na rozwój roślin, zwiększał stężenie tego gazu w atmosferze, a przy nagłych i dużych wypływach stanowił zagrożenie dla ludzi i zwierząt. Przedostanie się do wód pitnych dwutlenku węgla może spowodować pogorszenie ich jakości związane ze wzrostem ich mineralizacji (twardości) oraz mobilizacją kationów metali ciężkich.

Wrażliwość ludzi na działanie dwutlenku węgla jest bardzo zróżnicowana i zależna między innymi od koncentracji gazu i czasu ekspozycji oraz czynników fizjologicznych i zdrowotnych. Stężenia CO₂ do 1,5% nie wywołują większych efektów ubocznych. Wzrost koncentracji powoduje szereg negatywnych skutków, takich jak: wzrost częstotliwości oddychania, trudności w oddychaniu, bóle głowy, utrata przytomności. Przy stężeniach powyżej 30% CO₂ w powietrzu śmierć następuje po kilku minutach.

Mikroorganizmy i grzyby żyjące pod powierzchnią ziemi są organizmami o dobrej tolerancji na podwyższone i wysokie stężenia dwutlenku węgla. Spośród zwierząt, największą odporność wykazują susły, niektóre gryzonie i ptaki. Nornice to zwierzęta o najwyższej odporności na CO₂ spośród ssaków. Przypuszcza się, że płazy wykazują większą tolerancję niż ssaki na podwyższone stężenia dwutlenku węgla.

Podwyższone stężenie dwutlenku węgla w powietrzu glebowym ma negatywny wpływ na rośliny. Koncentracja dwutlenku węgla rzędu 20–30% jest wartością krytyczną dla roślin, powyżej tej wartości następuje ich obumieranie. Przypuszcza się, że rośliny jednoliścienne są bardziej tolerancyjne na wyższe stężenia dwutlenku węgla niż dwuliścienne. Przyjmuje się, że rośliny mają znacznie wyższą niż zwierzęta tolerancję na ekspozycję na ekstremalnie wysokie, krótkotrwałe stężenia dwutlenku węgla.

LITERATURA

- Andre' L., Audigane P., Azaroual M., Menjoz A., 2007 – Numerical modeling of fluid–rock chemical interactions at the supercritical CO₂-liquid interface during CO₂ injection into a carbonate reservoir, the Dogger aquifer (Paris Basin, France). *Energy Conversion and Management* 48, s. 1782–1797.
- Bachu S., Adams J.J., 2003 – Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: Capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution. *Energy Conversion and Management* 44 (20), s. 3151–3175.
- Beaubien S.E., Ciotoli G., Coombs P., Dictor M.C., Kruger M., Lombardi S., Pearce J.M., West J.M., 2008 – The impact of a naturally occurring CO₂ gas vent on the shallow ecosystem and soil chemistry of a Mediterranean pasture (Latera, Italy). *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2, s. 373–387.
- Benson S., Hepple M.R., Apps J., Tsang C.F., Lippmann M., 2002 – Lessons Learned from Natural and Industrial Analogues for Storage of Carbon Dioxide in Deep Geological Formations. LBNL-51170. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
- Bouc O., Audigane P., Bellenfant G., Fabriol H., Gastine M., Rohmer J., Seyedi D., 2009 – Determining safety criteria for CO₂ geological storage. *Energy Procedia* 1, s. 2439–2446.
- Bryła H., 2002 – *Leksykon ekologii i ochrony środowiska*. Wyd. Oficyna Wydawnicza Tempus, Gdańsk.
- Chang Y., Coats B., Nolen J., 1996 – A compositional model for CO₂ floods including CO₂ solubility in water. Paper SPE 35164, Presented at the 1996 SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference held in Midland, Texas, USA, March 27–29.
- Ciężkowski W., (red.) 2002 – *Występowanie, dokumentowanie i eksploatacja endogenicznego dwutlenku węgla w Polsce*. Wrocław.
- Craig J.R., Vaughan D.J., Skinner B.J., 2003 — *Zasoby Ziemi*. Wyd. PWN Warszawa.
- Czernichowski-Lauriol I., Sanjuan B., Rochelle C., Bateman K., Pearce J.M., Blackwell P., 1996 – Analysis of the geochemical aspects of the underground disposal of CO₂. [W:] Apps, J.A., Tsang, C.F. (Eds.), *Deep Injection Disposal of Hazardous and Industrial Waste: Scientific and Engineering Aspects*. Academic Press, s.565–585.
- Damen K., Faaij A.E., Turkenburg W., 2006 – Health, Safety and Environmental Risks of Underground CO₂ Storage – Overview of Mechanisms and Current Knowledge. *Climatic Change* (2006).
- Enick R.M., Klara S.M., 1990 – CO₂ solubility in water and brine under reservoir conditions. *Chemical Engineering Communications* 90, s. 23–33.
- Flett M.A., Gurton R.M., Taggart I.J., 2005 – Heterogeneous saline formations: Long-term benefits for geo-sequestration of greenhouse gases. [W:] *Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Technologies (GHGT-7)*, E.S. Rubin, D.W. Keith and C.F. Gilboy (eds.), September 5–9, 2004, Vancouver, Canada, Elsevier, vol. I, s. 501–510.
- May F., Möller I., Lagneau V., Pipart A., Catalette H., 2005 – Reactive transport modeling of CO₂ sequestration in deep saline aquifers. *Oil Gas Sci. Technol.* 60, s. 231–247.
- Gaus I., Azaroual M., Czernichowski-Lauriol I., 2002 – Preliminary modeling of the geochemical impact of CO₂ injection on the caprock at Sleipner. BRGM Report BRGM/RP-52081-FR.
- Gaus I., Azaroual M., Czernichowski-Lauriol I., 2005 – Reactive transport modeling of the impact of CO₂ injection on the clayey cap rock at Sleipner (North Sea). *Chem. Geol.* 217, s. 319–337.
- Gunter W.D., Perkins E.H., Hutcheon I., 2000 – Aquifer disposal of acid gases; modeling of water–rock reactions for trapping of acid gases. *Appl. Geochem.* 15, s. 1085–1095.
- Gunter W.D., Bachu S., Benson S., 2004: The role of hydrogeological and geochemical trapping in sedimentary basins for secure geological storage for carbon dioxide. [W:] S. J. Holt J., Jensen J.-T., Lindeberg E., 1995: Underground storage of CO₂ in aquifers and oil reservoirs. *Energy Conversion and Management* 36 (6–9), s. 535–538.
- Hamada Y., Tanaka T., 2001 – Dynamics of carbon dioxide in soil profiles based on long-term field observation. *Hydrol. Process.* 15, s. 1829–1845.
- Holt J., Jensen J.-T., Lindeberg E., 1995 – Underground storage of CO₂ in aquifers and oil reservoirs. *Energy Conversion and Management* 36 (6–9), s. 535–538.

- Izgec O., Demiral B., Bertin H., Akin S., 2008 – CO₂ injection into saline carbonate aquifer formations II: Comparison of numerical simulations to experiments. *Transp. in Por. Media* 73, s. 57–74.
- Jaffe P.R., Wang S., 2003 – Potential effect of CO₂ releases from deep reservoirs on the quality of fresh-water aquifers'. [W:] Gale, J. and Kaya, Y. (eds), *Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Kyoto, vol. II, Pergamon, Amsterdam, s. 1657–1660.
- Kaszuba J., Janeck D., Sno M., 2003 – Carbon dioxide reaction processes in a model brine aquifer at 200°C and 200 bars: implications for geologic sequestration of carbon. *Appl. Geochem.* 18, s. 1065–1080.
- Koide H., Takahashi M., Tsukamoto H., 1995 – Self-trapping mechanisms of carbon dioxide in the aquifer disposal. *Energy Conversion and Management* 36 (6–9), s. 505–508.
- Krüger M., West J., Frerichs J., Oppermann B., Dictor M-C., Jouliand C., Jones D., Coombs P., Green K., Pearce J., 2009 – Ecosystem effects of elevated CO₂ concentrations on microbial populations at a terrestrial CO₂ vent at Laacher See, Germany. *Energy Procedia* 1, s. 1933–1939.
- Labus K., Tarkowski R., Wdowin M., 2010 – Ocena pojemności składowania CO₂ na podstawie modelowania hydrogeochemicznego relacji woda-skala-gaz w obrębie potencjalnego repozytorium w rejonie Bełchatowa. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 26, z. 2, s. 69–84.
- Lagneau V., Pipart A., Catalette H., 2005 – Reactive transport modeling of CO₂ sequestration in deep saline aquifers. *Oil Gas Sci. Technol.* 60, s. 231–247.
- Le Guen Y., Renard F., Hellmann R., Brosse E., Collombet M., Tisserand D., Gratier J.-P., 2007 – Enhanced deformation of limestone and sandstone in the presence of high pCO₂ fluids, *J. of Geophys. Res.*, 112, B05421, doi:10.1029/2006JB004637.
- Lu J., Partin J.W., Hovorka S.D., Wong C., 2010 – Potential risks to freshwater resources as a result of leakage from CO₂ geological storage: a batch-reaction experiment. *Environ Earth Sci.* 60, s. 335–348.
- Nelson Ch.R., Evans J.M., Sorensen J.A., Steadman E.N., Harju J.A., 2005 – Factors Affecting the Potential for CO₂ Leakage from Geologic Sinks. *Plains CO₂ Reduction (PCOR) Partnership*. www.netl.gov.pl, s. 36.
- Nodzeński A., Hołda S., 2003 – Oddziaływanie fizykochemiczne dwutlenku węgla ze środowiskiem centrów magazynowania. *Polityka Energetyczna* t. 6, z. spec., s. 357–366.
- Olsen D., Stentoft N., 2003 – Chemical and Physical Interaction of CO₂ and Carbonate Rock. *Geological Survey of Denmark and Greenland Ministry of Environment, Raport 2003/41*. *Archiwum BRGM*.
- Portier S., Rochelle C., 2005 – Modeling CO₂ solubility in pure water and NaCl-type waters from 0 to 300°C and from 1 to 300 bar. Application to the Utsira Formation at Sleipner. *Chem. Geol.* 217, s. 187–199.
- Rice S.A., 2003 – Health Effects of Acute and Prolonged CO₂ Exposure in Normal and Sensitive Populations. *Second Annual Conference on Carbon Sequestration – May 5–8, 2003, Alexandria, Virginia, USA*, s. 1–10.
- Rice S.A., 2004 – Human Health Risk Assessment of CO₂: Survivors of Acute High-Level Exposure and Populations Sensitive to Prolonged Low-Level Exposure. *Third Annual Conference on Carbon Sequestration, May 3–6, 2004, Alexandria, Virginia, USA*, s. 1–9.
- Sadowsky M.J., Schortemeyer M., 1997 – Soil microbial responses to increased concentration of atmospheric CO₂. *Global Change Biol.* 3, s. 217–224.
- Soong Y., Goodman A.L., Mc Carthy-Jones J.R., Baltrus J.P., 2004 – Experimental and simulation studies on mineral trapping of CO₂ with brine. *Energy Conversion and Management* 45, s. 1845–1859.
- Stenhouse M., Arthur R., Zhou W., 2009 – Assessing environmental impacts from geological CO₂ storage. *Energy Procedia* 1, s. 1895–1902.
- Tarkowski L., 2005 – Dwutlenek węgla w środowisku człowieka. (www.wentylacja.com.pl)
- Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., 2007 – Oddziaływanie CO₂ na skały zbiornikowe w celu określenia ich przydatności dla geologicznego unieszkodliwiania dwutlenku węgla. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 23, z. 3, s. 109–117.
- Uliasz-Misiak B. (red.), Barabasz W., Frączek K., Grzyb J., Królik W., Tarkowski R., 2006 – *Badania mikrobiologiczne wycieków CO₂ w rejonie Muszyny w celu opracowania metod biomonitoringu*. *Studia Rozprawy Monografie* nr 136, s. 65.
- Uliasz-Misiak B., 2008 – *Pojemność podziemnego składowania CO₂ dla wybranych mezozoicznych poziomów wodonośnych oraz złóż węglowodorów w Polsce*. *Studia Rozprawy Monografie* nr 142, Kraków, s. 114.

- Vodnik D., Kastelec D., Pfanz H., Macek I., Turk B., 2006 – Small-scale spatial variation in soil CO₂ concentration in a natural carbon dioxide spring and some related plant responses. *Geoderma* 133, s. 309–319.
- Wang S., Jaffe P.R., 2004 – Dissolution of a mineral phase in potable aquifers due to CO₂ releases from deep formations; effect of dissolution kinetics. *Energy Conversion and Management* 45, s. 2833–2848.
- Wei Y., Maroto-Valer M., Steven M.D., 2010 – Environmental Consequences of Potential Leaks of CO₂ in Soil. *Energy Procedia*.
- West J.M., McKinley I.G., Palumbo-Roe B., Rochelle C.A., 2010 – Potential impact of CO₂ storage on subsurface microbial ecosystems and implications for groundwater quality. *Energy Procedia*, 2010.
- West J.M., Pearce J., Bentham M., Maul P., 2005 – Issue Profile: Environmental Issues and the Geological Storage of CO₂. *European Environment* 15, s. 250–259.
- West J.M., Pearce J.M., Coombs P., Ford J.R., Scheib C., Colls J.J., Smith K.L., Steven M.D., 2009 – The impact of controlled injection of CO₂ on the soil ecosystem and chemistry of an English lowland pasture. *Energy Procedia* 1, s. 1863–1870.
- Wigand M., Carey J.W., Schutt H., Spangenberg E., Erzinger J., 2008 – Geochemical effects of CO₂ sequestration in sandstones under simulated in situ conditions of deep saline aquifers. *Applied Geochemistry* 23, s. 2735–2745.
- Xu T., Apps J.A., Pruess K., 2005 – Mineral sequestration of carbon dioxide in a sandstone-shale system. *Chemical Geology* 217, s. 295–331.
- Zheng L., Apps J.A., Zhang Y., Xu T., Birkholzer J.T., 2009 – Reactive transport simulations to study groundwater quality changes in response to CO₂ leakage from deep geological storage. *Energy Procedia* 1, s. 1887–1894.
- Zoback M.D., Zinke J.C., 2002 – Production-induced normal faulting in the Valhall and Ekofisk oil fields. *Pure and App. Geophys.* 159, s. 403–420.

WPLYW GEOLOGICZNEGO SKŁADOWANIA CO₂ NA ŚRODOWISKO

Słowa kluczowe

Geologiczne składowanie CO₂, wpływ na środowisko, geochemia, wody pitne, oddziaływanie CO₂ na ludzi, zwierzęta i rośliny

Streszczenie

Geologiczne składowanie dwutlenku węgla powinno być prowadzone przy założeniu braku wycieków z miejsc składowania. Jednak niezależnie od tego, czy zatłaczany gaz będzie wyciekał ze składowiska, czy też nie składowany dwutlenek węgla będzie oddziaływał na środowisko.

W szczelnym składowisku zatłaczany dwutlenek węgla będzie rozpuszczał się w płynach złożowych (wodzie podziemnej i ropie) oraz wchodził w reakcje ze skałami formacji do składowania. Rozpuszczanie CO₂ w wodzie podziemnej będzie powodowało zmianę jej pH i chemizmu. Oddziaływanie z matrycą skalną miejsca składowania spowodują nie tylko zmianę składu mineralogicznego, ale również parametrów petrofizycznych wywołane wytrącaniem i rozpuszczaniem minerałów.

Wyciek CO₂ z miejsca składowania może wywołać zmiany w składzie powietrza glebowego i wód podziemnych, wpłynąć na rozwój roślin, a przy nagłych i dużych wypływach będzie stanowił zagrożenie dla ludzi i zwierząt. Dwutlenek węgla może spowodować pogorszenie jakości wód pitnych związane ze wzrostem ich mineralizacji (twardości) oraz mobilizacją kationów metali ciężkich. Wzrost zawartości tego gazu w glebie prowadzi do jej zakwaszenia i ma negatywny wpływ na rośliny. Koncentracja dwutlenku węgla rzędu 20–30% jest wartością krytyczną dla roślin, powyżej której następuje ich obumieranie.

Wpływ podwyższonych koncentracji dwutlenku węgla na organizm ludzki jest zależny od stężenia gazu, czasu ekspozycji oraz czynników fizjologicznych. Zawartości CO₂ w powietrzu do 1,5% nie wywołują u ludzi efektów ubocznych. Koncentracja powyżej 3% powoduje szereg negatywnych skutków, takich jak: wzrost częstotliwości

oddychania, trudności w oddychaniu, bóle głowy, utrata przytomności. Przy stężeniach powyżej 30% CO₂ w powietrzu śmierć następuje po kilku minutach.

Mikroorganizmy i grzyby żyjące pod powierzchnią ziemi mają dobrą tolerancję na podwyższone i wysokie stężenia dwutlenku węgla. Spośród zwierząt największą odporność wykazują bezkręgowce, niektóre gryzonie i ptaki.

THE INFLUENCE OF GEOLOGICAL CO₂ STORAGE ON THE ENVIRONMENT

Key words

CO₂ geological storage, environmental impact, geochemistry, drinking water, influence of carbon dioxide on humans, animals and plants

Abstract

Geological carbon dioxide storing should be carried out with the assumption that there are no leakages from the storage sites. However, regardless of whether the gas which is injected in leaks from the storage site or not, the carbon dioxide stored will influence the environment.

In a tight storage site the carbon dioxide injected in will dissolve in the reservoir liquids (groundwater and oil) and react with the rocks of the storage formation. Dissolving CO₂ in underground water will result in the change of its pH and chemism. The reactions with the rock matrix of the storage site will not only trigger changes in its mineralogical composition, but also in the petrophysical parameters, because of the precipitation and dissolution of minerals.

A leakage of CO₂ from its storage site can trigger off changes in the composition of soil air and groundwater, influence the development of plants, and in case of sudden and large leaks it will pose a threat for people and animals. Carbon dioxide can cause deterioration of the quality of drinking waters related to the rise in their mineralization (hardness) and the mobilization of heavy metals' cations. A higher content of this gas in soil leads to a greater acidity and negatively affects plants. A carbon dioxide concentration of ca. 20–30% is a critical value for plants above which they start to die.

The influence of high concentrations of carbon dioxide on the human organism depends on the concentration of gas, exposure time and physiological factors. CO₂ content in the air of up to 1.5% does not provoke any side effects in people. A concentration of over 3% has a number of negative effects, such as: higher respiratory rate, breathing difficulties, headaches, loss of consciousness. Concentrations higher than 30% lead to death after a few minutes.

Underground microorganisms and fungi have a good tolerance to elevated and high concentrations of carbon dioxide. Among animals the best resistance is found in invertebrates, some rodents and birds.

