

# Technologia produkcji metanu z pokładów węgla poprzez zatłaczanie CO<sub>2</sub> – przegląd doświadczeń uzyskanych w trakcie realizacji projektu CARBOLAB

Technology of methane production from coal seams through CO<sub>2</sub> injection – the review of tests collected during the implementation of CARBOLAB project



*Dr inż. Alicja Krzemień\**



*Mgr inż. Jacek Skiba\**



*Dr inż. Aleksandra Koteras\**



*Dr inż. Adam Duda\**

**Treść:** Artykuł przedstawia doświadczenia uzyskane w trakcie realizacji europejskiego projektu pn. „CARBOLAB”, finansowanego przez Fundusz Badawczy Węgla i Stali w latach 2009–2013. Projekt obejmował podziemne testy zatłaczania CO<sub>2</sub> do pokładów węgla i uzyskiwanie metanu, który wypierany przez dwutlenek węgla, mógł być transportowany na powierzchnię. Głównym celem projektu było określenie możliwości zastosowania technologii ECBM (*Enhanced Coal Bed Methane Recovery*) w określonych warunkach dołowych. Przedstawione w artykule badania pozwoliły na określenie długoterminowego bezpieczeństwa dla składowania CO<sub>2</sub> w pokładach węgla. Na potrzeby projektu zidentyfikowano różne rodzaje zagrożeń związanych ze stosowaną technologią oraz opracowano scenariusze rozwoju niebezpiecznych zdarzeń, które w konsekwencji mogłyby prowadzić do wycieku CO<sub>2</sub> z miejsca składowania. Nieprawidłowo przeprowadzony proces może prowadzić do zniszczenia instalacji zabudowanej pod ziemią jak i na powierzchni, zanieczyszczenia lub wycieku CO<sub>2</sub> lub CH<sub>4</sub>, a w konsekwencji doprowadzić do nieodwracalnych zmian w ekosystemach.

**Abstract:** This paper presents the tests collected during the implementation of the European project as “CARBOLAB”, funded by the Coal and Steel Research Fund between 2009 and 2013. The project was implemented within the framework of the underground tests of CO<sub>2</sub> injection into coal seams and extraction of methane which, supported by CO<sub>2</sub>, may have been released to the surface. The main purpose of the project was to determine the possibility of application of the ECBM (*Enhanced Coal Bed Methane Recovery*) technology in particular underground conditions. The tests presented in this paper allowed to determine the protection of safety for the storage of CO<sub>2</sub> in coal seam in the long-term. The project required the identification of different hazards connected with the technology applied as well as the elaboration of scenarios for the development of hazardous events which may lead to the escape of CO<sub>2</sub> from the storage. An incorrect process may lead to the damage of the installation mounted both underground and on the surface, contamination or escape of CO<sub>2</sub> or CH<sub>4</sub>, resulting in the irreversible changes in ecosystems.

\*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

**Słowa kluczowe:**

produkcja metanu z pokładów węgla, zatłaczanie i okładowanie CO<sub>2</sub>, ryzyko stosowania technologii ECBM

**Key words:**

production of methane from coal seams, injection and storage of CO<sub>2</sub>, risk of using ECBM technology

**1. Wprowadzenie**

Projekt CARBOLAB, którego pełna polska nazwa brzmi: „Powiększenie wiedzy na temat składowania dwutlenku węgla i produkcji metanu z pokładów węgla poprzez podziemne testy »in situ«” (*Improving the knowledge of carbon storage and coal bed methane production by “in situ” underground tests*) był realizowany w latach 2009–2013 w ramach Funduszu Badawczego Węgla i Stali. W realizację projektu kierowanego przez firmę HUNOSA z Hiszpanii zaangażowani byli partnerzy z Hiszpanii, Francji oraz Polski (Główny Instytut Górnictwa). Głównym celem badań było uzyskanie wiedzy na temat możliwości składowania CO<sub>2</sub> przy jednoczesnej produkcji CH<sub>4</sub> (technologia CO<sub>2</sub>-ECBM) poprzez prowadzenie podziemnych prób w hiszpańskiej kopalni węgla kamiennego. Podstawą analiz były symulacje zachowania się całego systemu w czasie oraz identyfikacja i ocena zagrożeń, które może generować technologia CO<sub>2</sub>-ECBM. Prace realizowane w ramach projektu były ukierunkowane na analizę długoterminowego bezpieczeństwa składowania CO<sub>2</sub> w pokładach węgla.

Proces zarządzania ryzykiem obejmuje identyfikację, analizę, ocenę oraz redukcję ryzyka związanego z prowadzoną działalnością, w tym minimalizację strat. W przypadku technologii CO<sub>2</sub>-ECBM możliwe straty to zniszczenie lub utrata sprzętu oraz infrastruktury, zanieczyszczenie środowiska oraz emisje CO<sub>2</sub> lub CH<sub>4</sub> do atmosfery, aż do nieodwracalnych zmian w ekosystemach.

Celem oceny ryzyka jest zidentyfikowanie wszystkich możliwych zagrożeń, jakie mogą powstać w obrębie systemu, nie tylko istotnych dla samej technologii, ale również mających wpływ na szeroko rozumiane środowisko. Wiedza uzyskana w ten sposób ma na celu lepsze zrozumienie mechanizmów obejmujących dany proces w konkretnych warunkach środowiska, a w konsekwencji wpływa na ogólne bezpieczeństwo zarówno w trakcie wdrażania technologii, jej stosowania, jak i po jej zaprzestaniu. Zadanie to nie jest łatwe, gdyż wszystkie istotne informacje na temat systemu muszą być dokładnie przeanalizowane pod kątem ich wpływu na sam system oraz możliwości generowania odchyleń od normalnej jego pracy. Takie podejście zapewnia skuteczną identyfikację oraz ocenę ryzyka. Kolejnym etapem jest redukcja ryzyka, która wymaga ustalenia indywidualnych kryteriów akceptacji ryzyka, opartych na doświadczeniach samej organizacji oraz na zewnętrznych przesłankach świadczących o potencjalnej możliwości zaistnienia zdarzeń niebezpiecznych (na podstawie danych historycznych, doświadczeniach z innych projektów czy instalacji). W ten sposób zostaje określony poziom ryzyka nieakceptowanego, co pozwala na opracowanie odpowiednich działań, tj. zasadniczych zmian na etapie projektowania procesu, czy wdrożenie odpowiednich działań prewencyjnych na etapie realizacji samego procesu mających na celu minimalizację, a nawet całkowite uniknięcie strat [16].

Projekt CARBOLAB w swojej zasadniczej części ukierunkowany był na identyfikację zagrożeń oraz potencjalnych dróg wycieku CO<sub>2</sub> z kompleksu składowania. Przyjęta metodologia oceny ryzyka została oparta na wytycznych pochodzących z Dyrektywy CCS [4] i obejmowała: wstępną analizę zagrożeń (zwanych w Dyrektywie CCS „znaczącymi nieprawidłowościami”); wstępną ocenę potencjalnych dróg wycieku gazu – identyfikację scenariuszy zdarzeń niebezpiecznych; oraz ocenę przyczyn i skutków dla każdego ze scenariuszy [3].

Oprócz tego analizą zostały objęte inne zagrożenia mogące mieć miejsce w trakcie samego procesu zatłaczania, związane między innymi ze wzrostem ciśnienia w górotworze, wyciekami CO<sub>2</sub> do innych formacji geologicznych, czy brakiem produkcji CH<sub>4</sub>.

**2. CO<sub>2</sub>-ECBM – technologia zatłaczania CO<sub>2</sub> do pokładów węgla celem uzyskiwania metanu**

Ze względu na swoją dużą powierzchnię właściwą i zdolność adsorpcyjną węgiel kamienny ma naturalne właściwości magazynowania CO<sub>2</sub>. Szczególnie dobrze nadają się do tego głębokie nieeksploatowane pokłady węgla, które gdy zawierają metan pozwalają na jego odzysk poprzez zastępowanie cząsteczek metanu, cząsteczkami CO<sub>2</sub>. Metoda pozyskiwania metanu w ten sposób nosi nazwę – ECBM (Enhanced Coal Bed Methane Recovery – wspomagane odzyskiwanie metanu z pokładów węgla). Proces CO<sub>2</sub>-ECBM w pokładach węgla jest w dużej mierze analogiczny do odzyskiwania ropy naftowej poprzez zatłaczanie CO<sub>2</sub>. Jednakże pokłady węgla wyraźnie różnią się od konwencjonalnych pokładów węglowodorów mechanizmami procesów produkcji, jak również składowania. Pokłady węgla są jednocześnie skałami zbiornikowymi dla magazynowania CO<sub>2</sub> i źródłowymi dla produkcji CH<sub>4</sub> [1, 19].

Technologia iniekcji CO<sub>2</sub> do pokładów węgla, w celu zwiększenia wydobycia metanu, wykorzystuje naturalną zdolność adsorpcyjną węgla, polegającą na wymianie dwóch molekuł dwutlenku węgla na jedną molekułę CH<sub>4</sub>. Badania laboratoryjne wykazują, że CO<sub>2</sub> jako sorbat dobrze penetruje w strukturę porowatą węgla jako sorbentu, ze względu na niewielkie rozmiary cząsteczki oraz niską energię aktywacji. Uważa się ponadto, że wolny CO<sub>2</sub> skupia się głównie w makroporach, a jego ilość zależy od objętości, ciśnienia i temperatury. Proces sorpcji właściwej jest bardzo szybki, natomiast proces dyfuzji gazu zdeponowanego w węglu przebiega wolno. Szybkość dyfuzji zależy między innymi od wielkości ziaren i dlatego następuje znacznie szybciej w węglu odprężonym lub rozdrobnionym w wyniku eksploatacji. Iniekcja CO<sub>2</sub> ma na celu jego adsorpcję w strukturze porowatej węgla i wyparcie CH<sub>4</sub> do otworów eksploatacyjnych [1].

Osiągnięcie dalszego postępu w technologii CO<sub>2</sub>-ECBM wymaga prowadzenia długotrwałych testów poławych, a w praktyce zweryfikowania takich kwestii jak stabilność procesu, jego ekonomiczna opłacalność, poprawność działania technologii zatłaczania, bezpieczeństwo długoterminowego składowania oraz akceptowalność społeczna. Oprócz badań teoretycznych prowadzonych w Europie, Ameryce Północnej i Australii realizowane były badania na kilku poligonach doświadczalnych jakie zostały uruchomione w postaci takich projektów pilotowych jak „Alison”, „Tiffany” w zagłębiu San Juan (USA), projektu mikro-pilota „ARC” w Albercie (Kanada) czy projektu RECOPOL.

Badania laboratoryjne wykazują, że CO<sub>2</sub> ma większe powinowactwo do węgla niż CH<sub>4</sub>. Węgiel może adsorbować (objętościowo) w przybliżeniu dwa razy więcej CO<sub>2</sub> niż metan, stosunek ten może jednak różnić się w zależności do rodzaju węgla i wynosić nawet 10:1 w przypadku niektórych niskiej jakości amerykańskich węgli [20]. Ze względu na polskie warunki geologiczne warto wspomnieć bliżej o projekcie RECOPOL, który realizowany był w Kaniowie koło

Czechowicz-Dziedzic w obszarze górniczym KWK „Silesia” i polu koncesyjnym na wydobywanie metanu należącym do firmy Metanel S.A. W teście polowym wykorzystywane zostały dwa głębokie odwierty geologiczne, jeden istniejący MS-4 wykorzystywany do produkcji  $\text{CH}_4$  o głębokości 1200 m i drugi nowo odwiercony MS-3 o głębokości 1125 m do iniekcji  $\text{CO}_2$ . Zatlaczanie dwutlenku węgla do trzech wyselekcjonowanych pokładów zalegających poniżej 1000 m miało na celu trwałą sekwestrację  $\text{CO}_2$  w węglu przy jednoczesnym zagwarantowaniu bezpiecznych warunków dla ruchu górniczego kopalni i na powierzchni terenu. Głównym celem projektu było zbadanie i ocena możliwości ograniczenia emisji  $\text{CO}_2$  do atmosfery jako gazu odpowiedzialnego za efekt cieplarniany na Ziemi.

### 3. Główne cele i zadania projektu CARBOLAB

Głównym celem projektu CARBOLAB było zwiększenie praktycznej wiedzy na temat fizycznych i chemicznych procesów zachodzących w górotworze, które związane są z iniekcją  $\text{CO}_2$  do pokładów węgla wraz z zastosowaniem technologii ECBM. Testy zatlaczania dwutlenku węgla prowadzone były bezpośrednio w podziemnych wyrobiskach czynnej kopalni węgla kamiennego „Montsacro Pit” w północnej Hiszpanii (rejon Asturii). Celem tych prac było zebranie szczegółowych danych, które w późniejszych etapach projektu posłużyły do szczegółowej analizy oraz weryfikacji rozwoju modelu symulacyjnego przepływu gazów w pokładach węgla. Prace te obejmowały analizę danych geologicznych, geofizycznych, geochemicznych i hydrogeologicznych. Analiza ta pozwoliła na wytypowanie najodpowiedniejszego pokładu węgla, który w późniejszym etapie prac stał się poligonem badawczym. Jednym z ważniejszych zadań okazała się konieczność uzupełnienia brakujących danych dotyczących zachodzących procesów fizykochemicznych. W tym celu przeprowadzona została seria badań laboratoryjnych, które obejmowały m.in. badania fizykochemiczne wód z kopalni „Montsacro”, badania jakościowe próbek węgla oraz kompleksowe badania pokładu C12-13 w kopalni „Montsacro”, obejmujące oznaczenia metanonośności pokładu C12-13, określenie wiązłości węgla, wyznaczenie zasięgu strefy odgazowania wokół wyrobiska korytarzowego, w którym przeprowadzone zostały badania metanonośności pokładu C12-13, badania kinetyki sorpcji metanu oraz wyznaczenie współczynnika dyfuzji, wyznaczenie izoterm sorpcji węgla z pokładu C12-13 względem metanu i dwutlenku węgla. Kolejnym ważnym celem projektu była identyfikacja krytycznych parametrów fizykochemicznych, które były monitorowane przed, w trakcie, oraz po zakończeniu testów zatlaczania  $\text{CO}_2$  do pokładów węgla. W trakcie trwania eksperymentu prowadzony był monitoring geofizyczny, który obejmował tomografię sejsmiczną, metodę georadarów, mikrograwimetrię, metodę polaryzacji wzbudzonej, metodę potencjałów własnych, metodę elektrooporową oraz monitoring mikrosejsmiczny. Prowadzony był również monitoring geochemiczny, który pozwolił na ciągłą obserwację zmian stężeń gazów w węglu i różnice w poziomie pH w skałach otaczających, wzrost przewodności i zasadowości, wzrost stężenia Ca i Mg, a także wzrost wartości rozpuszczonego  $\text{CO}_2$ . W celu dokładnego scharakteryzowania miejsca poligonu doświadczalnego oraz właściwego przeprowadzenia prób zatlaczania  $\text{CO}_2$  wraz z pozyskiwaniem metanu, wykonano w rejonie doświadczenia prawie 30 otworów wiertniczych. Sam proces zatlaczania trwał około 2 miesiące. Jednym z podstawowych zadań w projekcie CARBOLAB było przeprowadzenie szczegółowej oceny i analizy ryzyka związanego z technicznymi kwestiami

zatlaczania  $\text{CO}_2$ , która stała się podstawą do opracowania zintegrowanej oceny ryzyka oraz wytycznych do certyfikacji kompleksu zatlaczania dla instalacji  $\text{CO}_2$ /ECBM. Prace te opierały się głównie na identyfikacji wszystkich możliwych zagrożeń oraz na charakterystyce potencjalnych dróg migracji gazów z kompleksu składowania.

### 4. Ocena ryzyka dla procesu $\text{CO}_2$ -ECBM

Podejście przyjęte dla oceny ryzyka w projekcie CARBOLAB zostało oparte na standardzie ISO 31000:2009

Zarządzanie ryzykiem [12]: Zasady i wytyczne oraz na normie EN 31010:2010 Zarządzanie ryzykiem – Techniki oceny ryzyka [5]. Oba standardy mogą być stosowane w odniesieniu do różnych rodzajów aktywności, gdyż nie są one specyficzne dla żadnego rodzaju przemysłu, ani sektora. Ustanawiają one jedynie zasady, których przestrzeganie jest niezbędne, aby zarządzanie ryzykiem było skuteczne.

Ocena ryzyka procesowego jest pierwszym krokiem na drodze do zapobiegania zdarzeniom niebezpiecznym, w tym wypadkom i awariom. Najistotniejsze jest zidentyfikowanie wszystkich możliwych odchyłek od założonej pracy systemu, które mogą prowadzić do występowania sytuacji ryzykownych [16].

Główne ryzyko wynikające z prowadzenia procesu podziemnego składowania  $\text{CO}_2$  związane jest z możliwością wycieku gazu z formacji geologicznych. Ryzyko to określane mianem ryzyka geologicznego składowania  $\text{CO}_2$  może być rozpatrywane zarówno z punktu widzenia jego skutków dla środowiska, zdrowia i życia ludzi, jak również pod względem strat ekonomicznych, które wiążą się z nieudaniem lokowania gazu pod ziemią. W projekcie CARBOLAB największy nacisk został położony na kwestie środowiskowe składowania  $\text{CO}_2$ . Celem prac objętych projektem było stworzenie wytycznych dla oceny krótko i długoterminowego bezpieczeństwa składowania  $\text{CO}_2$ . Określenie kryteriów bezpieczeństwa oznaczało zdefiniowanie wymagań, jakie muszą być spełnione, aby proces zatlaczania i składowania miał jak najmniejszy negatywny wpływ na środowisko, zdrowie i życie ludzi oraz na inne podziemne zasoby naturalne.

W pierwszym etapie projektu najistotniejsze było określenie odpowiedniego ciśnienia zatlaczania  $\text{CO}_2$  do pokładów węgla, natomiast na etapie samego składowania ciśnienie gazu nie mogło przekraczać ciśnienia szczelinowania nadkładu (warstw skalnych znajdujących się nad pokładem węgla przeznaczonym do składowania  $\text{CO}_2$ ). W projekcie CARBOLAB warunek ten dotyczył otaczających skał, gdyż pokład węgla objęty próbą zatlaczania był prawie pionowy (nachylenie około 90÷95 stopni). Przekroczenie dopuszczalnego ciśnienia skutkowało by szczelinowaniem górotworu, a tym samym stworzyłyby warunki do wycieku gazu z miejsca składowania.

Zagadnienia bezpieczeństwa dotyczyły również metanu. Znane są przypadki migracji  $\text{CH}_4$  do studni czy piwnic prywatnych domów. Metan jest gazem obojętnym w stosunku do wody, niemniej jednak w pewnych koncentracjach może tworzyć mieszaniny wybuchowe, a tym samym być groźny dla otoczenia.

Jednym z najważniejszych aspektów sekwestracji  $\text{CO}_2$  w pokładach węgla jest bezpieczeństwo długoterminowego składowania gazu. Zmiany ciśnienia złożowego, temperatury czy zjawisko pęcznienia/kurczenia się węgla w pokładzie może wpływać na zmiany ciśnienia w samym pokładzie węgla i otaczających formacjach skalnych, aktywując przy tym otwarcie istniejących uskoków i spekań. Możliwa migracja zatlaczanego  $\text{CO}_2$  do innych formacji skalnych, czy nawet do atmosfery, stanowi źródło zagrożenia zarówno dla środowiska, jak i dla samych ludzi.

#### 4.1. Identyfikacja zagrożeń

Dla każdego procesu, w tym dla technologii CO<sub>2</sub>-ECBM, ocena ryzyka opiera się na danych zebranych dla konkretnej instalacji (charakterystyka miejsca składowania) oraz informacji pochodzących z monitoringu, zarówno na etapie zatłaczania CO<sub>2</sub>, produkcji CH<sub>4</sub>, jak i składowania CO<sub>2</sub>.

Najważniejsze dane wykorzystywane do oceny ryzyka procesu CO<sub>2</sub>-ECBM obejmują:

- geologię i geofizykę (sejsmiczność naturalna, zachowanie się uskoków/spękań w sąsiedztwie miejsca składowania itd.),
- hydrogeologię (w szczególności obecność warstw wodonośnych przeznaczonych na wody pitne, poziomów i pięter wodonośnych);
- inżynierię zbiornika (w tym wyliczenia wolumetryczne objętości porów dla celów zatłaczania CO<sub>2</sub> i ostatecznej pojemności składowania, głębokość, przepuszczalność, porowatość);
- geochemię (współczynniki rozpuszczalności, współczynniki mineralizacji);
- geomechanikę (przepuszczalność, ciśnienie szczelinowania);
- obecność i stan naturalnych i antropogenicznych dróg, w tym odwiertów eksploatacyjnych i otworów wiertniczych, które mogłyby stanowić drogi wycieków.

Pierwszym krokiem do ustanowienia kryteriów akceptacji ryzyka jest zdefiniowanie normalnego i przewidywanego zachowania się kompleksu składowania, zarówno w trakcie zatłaczania, jak i po jego zakończeniu. Niektóre zjawiska w trakcie realizacji procesu zatłaczania mogą wynikać z charakteru kompleksu i jego specyficznych właściwości geologicznych, a ich obecność nie będzie miała znaczącego wpływu na przebieg procesu. Najważniejszym aspektem brany pod uwagę powinno być zachowanie się gazu, tj. jego migracja, proces uwięzienia, rozpuszczania czy produkcji. Przy prawidłowo przeprowadzonym procesie CO<sub>2</sub>-ECBM nie przewiduje się wycieków gazu z kompleksu składowania.

Kolejnym krokiem jest zdefiniowanie zewnętrznego i wewnętrznego kontekstu społeczno-prawnego, który pozwoli na określenie kryteriów akceptacji ryzyka. Należy wziąć pod uwagę zarówno opinie samych interesariuszy, przyjęte w danym kraju standardy, prawo, a nawet politykę w tym zakresie, czy też inne lokalne wymagania, a także doświadczenia samej organizacji realizującej przedsięwzięcie.

W chwili obecnej w Europie nie istnieją jednoznaczne kryteria dla podziemnego składowania CO<sub>2</sub>, zarówno w kontekście środowiskowym, ani w odniesieniu do zdrowia i życia ludzi. Niemniej jednak przy ustalaniu kryteriów akceptacji ryzyka należy brać pod uwagę możliwe ścieżki aktywacji zagrożeń (znaczących nieprawidłowości) i ich wpływ na poszczególne elementy szeroko rozumianego środowiska:

- a) Ekosystemy – mając na uwadze, że obecność CO<sub>2</sub> w środowisku, w niskich koncentracjach, jest zjawiskiem naturalnym i nieszkodliwym, a nawet niezbędnym do rozwoju życia, należy brać pod uwagę tylko znaczące wpływy CO<sub>2</sub> tj. nagłe uwolnienie ogromniej ilości CO<sub>2</sub> z jeziora Nyos [13, 17].
- b) Zasoby wodne – możliwość rozpuszczenia CO<sub>2</sub> w wodzie – usuwanie jonów węglanowych i wytwarzanie jonów wodorowęglanowych, przy spadku wartości pH. W tym przypadku normy jakości wody pitnej mogą być wykorzystane jako wartości progowe dla oceny ryzyka.
- c) Gleba i uprawy – wysokie stężenie CO<sub>2</sub> (wyciek CO<sub>2</sub>) może spowodować utratę plonów.
- d) Ludzie – niektóre kryteria ryzyka mogą być zaadaptowane z badań nad ryzykiem procesowym oraz z innych

przepisów dotyczących narażenia człowieka na CO<sub>2</sub>. W tym przypadku wszystkie międzynarodowe oraz krajowe przepisy dotyczące intensywności działania i stopnia toksyczności ostrej CO<sub>2</sub> na ludzi muszą być brane pod uwagę. W przypadku wycieku CO<sub>2</sub> na powierzchnię, w miejscach o słabej wentylacji, takich jak piwnice czy obniżenia w ziemi, może dochodzić do szkodliwych koncentracji gazu, które mogą być przyczyną śmierci ludzi czy zwierząt (stężenia CO<sub>2</sub> powyżej 40 000 ppm mogą powodować utratę przytomności, a stężeniach powyżej 100 tysięcy ppm śmierć).

- e) Budynki – należy brać pod uwagę możliwe ruchy geotechniczne lub wstrząsy indukowane szczelinowaniem w odniesieniu do lokalnych warunków sejsmicznych.
- f) Jakość strumienia CO<sub>2</sub> wykorzystywanego do składowania – strumień ten powinien składać się z samego CO<sub>2</sub>, a tym samym powinien być wolny od zanieczyszczeń oraz innych dodatkowych substancji. Operator składowiska powinien akceptować i zatłaczać strumień CO<sub>2</sub> tylko wtedy, gdy przeprowadzono analizę jego składu i ocenę ryzyka, oraz jeżeli ta ocena wykazała, że poziomy zanieczyszczeń są zgodne z kryteriami określonymi w Dyrektywie CCS [4].

Pierwszym etapem oceny ryzyka jest identyfikacja zagrożeń, czyli ustalenie, jakie czynniki/zdarzenia mogą w negatywny sposób wpłynąć na osiągnięcie celów przedsięwzięcia. W tym przypadku uniemożliwić bezpieczne i efektywne zatłoczenie CO<sub>2</sub> wraz z produkcją CH<sub>4</sub> oraz późniejsze składowanie CO<sub>2</sub> w pokładach węgla. Proces ten wraz z identyfikacją potencjalnych przyczyn i skutków zagrożeń prowadzi do ustalenia scenariuszy rozwoju zdarzeń niebezpiecznych.

#### 4.2. Scenariusze zdarzeń niebezpiecznych

Przeprowadzona w projekcie identyfikacja ryzyka pozwoliła na zdefiniowanie czternastu różnych scenariuszy zdarzeń niebezpiecznych, które mogą wystąpić podczas prowadzenia procesu CO<sub>2</sub>-ECBM. Spośród nich do dalszej analizy wybrano dwanaście opisanych między innymi przez Bouc O., Condor, Farret, Gerstenberger i Le Guenan, [2,3,6,7,8,15] w publikacjach poświęconych ocenie ryzyka.

Scenariusze te to:

1. Wyciek poprzez czynny otwór wiertniczy,
2. Naruszenie ciągłości górotworu w otoczeniu otworu iniekcyjnego,
3. Naruszenie ciągłości górotworu w otoczeniu kompleksu składowania,
4. Przekroczenie zakładanych granic migracji CO<sub>2</sub>,
5. Wyciek przez nadkład,
6. Wyciek przez uskoki
- 7a. Wyciek przez zlikwidowany/zacementowany otwór wiertniczy,
- 7b. Wyciek przez niewłaściwie zlikwidowany otwór wiertniczy,
8. Akumulacja CO<sub>2</sub> w innym zbiorniku/pokładzie,
9. Niekontrolowany wzrost/spadek ciśnienia,
10. Wyciek spowodowany inną działalnością w otoczeniu kompleksu składowania,
11. Wyciek spowodowany sejsmicznością naturalną lub indukowaną,
12. Wyciek do czynnej/zlikwidowanej kopalni węgla
13. Brak lub małe nasycenie pokładu węgla metanem.

Po zdefiniowaniu systemu i przy uwzględnieniu opinii ekspertów, do dalszej analizy zostało wybranych dwanaście scenariuszy, przy czym dwa zostały zintegrowane w jednym. Dla każdego scenariusza opracowane zostały odpowiednie

drzewa błędów i drzewa zdarzeń, w celu określenia potencjalnych przyczyn i skutków. Podejście to wymagało zdefiniowania zdarzenia szczytowego, czyli zdarzenia, które wywołuje utratę kontroli nad zagrożeniem (utrata właściwości systemu/procesu, fizyczne uszkodzenie elementów systemu) i identyfikację wszystkich przyczyn, czyli pojedynczych błędów, które mogą prowadzić do zaistnienia zdarzenia szczytowego, jak również możliwych skutków tego zdarzenia.

Zgodnie z aktualnym stanem wiedzy, przeprowadzenie tego typu badań musi bazować na ocenie eksperckiej przeprowadzonej przez ekspertów z zakresu różnych dziedzin, bezpośrednio lub pośrednio związanych z problematyką prowadzonych badań. Eksperti podczas prowadzonej oceny bazują na:

- doświadczeniach historycznych (wypadki, awarie, zdarzenia potencjalnie wypadkowe, czyli zarówno „twardych” danych historycznych zbieranych wewnątrz przedsiębiorstwa, historycznych danych publikowanych przez podobne firmy), oraz
- wiedzy zdobytej przez eksperta podczas jego dotychczasowych doświadczeń w zakresie badanego problemu, jak np.: technologii CO<sub>2</sub>/ECBM, ale również w zakresie badań pokrewnych mających związek z badanym tematem, jak np.: górnictwo podziemne węgla, wiertnictwo, górnictwo gazu i ropy, a w szczególności problematyka wspomaganie wydobywania przez zatłaczanie CO<sub>2</sub>.

Po wstępnej analizie scenariuszy można przyjąć, że reprezentują one następujące „zdarzenia szczytowe”:

- wyciek pionowy (scenariusze 1, 5, 6, 7a, 7b i 8),
- migracja boczna (scenariusz 4),
- zaburzenia hydromechaniczne (scenariusze, 2, 3 i 9),
- scenariusze ryzyka związane z czynnikami zewnętrznymi (scenariusze 10 do 13).

Rezultatem przeprowadzonej oceny jest też zbiór drzew błędów/zdarzeń, które w prosty i wyczerpujący sposób przedstawiają scenariusze zdarzeń niebezpiecznych i relacje przyczyna-skutek. Zdarzenia i scenariusze mogą współdziałać, a oddziaływania te są w pełni zintegrowane w odpowiednich drzewach. Przykładem jest scenariusz dotyczący pionowych dróg migracji, który może dotyczyć wycieku gazu na powierzchnię lub też skażenia wtórnego poziomu wodonośnego (na przykład scenariusz 8). W szczególnych sytuacjach, jak na przykład w przypadku scenariusza dotyczącego zaburzeń mechanicznych (2 i 3), niekontrolowanych zmian ciśnienia (scenariusz 9) czy też oddziaływania czynników zewnętrznych (scenariusz 11), dane zdarzenie może również spowodować pionowe wycieki, spowodowane szczelinowaniem lub też reaktywacją uskoków.

#### **Scenariusz nr 1. Wyciek poprzez czynny otwór wiertniczy.**

Otwory wiertnicze są niezbędne zarówno do samego procesu zatłaczania, jak również do monitorowania przebiegu procesu. Te same odwierty, które dostarczają ważnych danych dotyczących poprawności prowadzonego procesu, mogą być potencjalnym zagrożeniem dla składowania CO<sub>2</sub> w wybranej formacji geologicznej. Integralność otworu wiertniczego zależy od kilku czynników, m.in. wieku odwiertu, sposobu likwidacji czy też zabezpieczenia, jakości wykonania, liczby ponownych uzupełnień, czy też jego historii po zamknięciu [9].

#### **Scenariusz 2 i 3. Naruszenie ciągłości górotworu w otoczeniu otworu iniekcyjnego i kompleksu składowania**

Mechaniczne zachowanie CO<sub>2</sub> w przypadku jego składowania w pokładach węgla jest różne w porównaniu do skła-

dowania w innych możliwych lokalizacjach geologicznych. Naruszenie ciągłości górotworu w pobliżu otworu iniekcyjnego/produkcyjnego może być spowodowane na przykład zbyt intensywnym zatłaczaniem CO<sub>2</sub>, a tym samym za dużą ilością wydzielanego metanu. W dłuższej perspektywie czasowej, już po zakończeniu, procesy termiczne, mechaniczne, hydrologiczne czy też chemiczne mogą mieć wpływ na integralność otoczenia otworów. Może to być spowodowane osłabieniem wytrzymałości mechanicznej skał będącym wynikiem zachodzeniem powolnych procesów mogących potencjalnie prowadzić do spękania górotworu.

#### **Scenariusz 4. Przekroczenie zakładanych granic migracji CO<sub>2</sub>**

Scenariusz ten rozpatruje sytuację, kiedy migrujący w pokładzie węgla CO<sub>2</sub> wykracza poza obszar, który został zamodelowany i określony we wstępnej fazie projektowania procesu. Możliwość zaistnienia takiej sytuacji powoduje, że może to być jeden z najbardziej wrażliwych scenariuszy w perspektywie długoterminowej, w szczególności w przypadku wychodni węgla znajdujących w pobliżu miejsca prowadzenia procesu CO<sub>2</sub>/ECBM lub też w przypadku prowadzonej w pobliżu eksploatacji. Głównymi przyczynami tego zdarzenia mogą być: błędnie przeprowadzone modelowania numeryczne migracji gazów, co powoduje różnice między przewidywanym a rzeczywistym zasięgiem migracji CO<sub>2</sub>; niewłaściwe rozpoznanie geologiczne i zła charakterystyka zbiornika, które mogą prowadzić do niedoszacowania rozprzestrzeniania się gazu; szczelinowania wywołanego przez inne wydarzenia, jak na przykład zaburzenia właściwości mechanicznych górotworu lub sejsmicznością naturalną bądź indukowaną; nieznajomością lub złym określeniem współdziałających procesów termodynamicznych, mechanicznych, hydrologicznych czy też chemicznych.

#### **Scenariusz 5. Wyciek przez nadkład**

Głównymi przyczynami tego zdarzenia może być powstanie nowych szczelin, w wyniku szczelinowania zbiornika, czy też w zjawisk sejsmicznych. Zdarzenie to może być również spowodowane przez zwiększenie przepuszczalności skał, które wynika z zachodzących reakcji pomiędzy CO<sub>2</sub> a otaczającymi skałami. Jednym z powodów może też być błędna charakterystyka i rozpoznanie zbiornika oraz jego otoczenia, jak również wspomniany już wcześniej wpływ procesów termicznych, mechanicznych, hydrologicznych czy też chemicznych zachodzących w górotworze.

#### **Scenariusz 6. Wyciek przez uskoki**

Obecności uskoków w rejonie formacji geologicznej przeznaczonej do składowania bądź też w jej otoczeniu ma duże znaczenie dla bezpieczeństwa składowania CO<sub>2</sub>. Należy pamiętać, że niektóre uskoki są potencjalną drogą migracji i wycieku CO<sub>2</sub> lub metanu inne też mogą stanowić rodzaj zabezpieczenia i izolacji struktury od np. warstw przepuszczalnych [21]. Rozważając rolę uskoków dla bezpieczeństwa składowania CO<sub>2</sub>, należy podkreślić, że obecność sejsmicznie aktywnych uskoków nie wyklucza wyboru danej lokalizacji do składowania CO<sub>2</sub> co wynika z charakterystyki danego uskoku, niemniej jednak wymaga to dokładnej analizy i wykluczenia ryzyka potencjalnego wycieku CO<sub>2</sub> ze składowiska [22].

#### **Scenariusz 7a. Wyciek przez zlikwidowany/zacementowany otwór wiertniczy**

#### **Scenariusz 7b. Wyciek przez niewłaściwie zlikwidowany otwór wiertniczy**

Scenariusze te dotyczą kwestii możliwości ucieczki gazów przez otwory wiertnicze. Rozważaniom poddane są

zarówno otwory zlikwidowane lub zabezpieczone, jak też te źle zlikwidowane lub opuszczone bez zabezpieczenia, co do których zachodzi podejrzenie możliwości ucieczki mediów złożowych, np. wskutek nieszczelności zacementowania. Likwidacja otworów wiertniczych prowadzona powinna być wg określonych wymagań. Niemniej jednak znane są przypadki zaniechania i nieprawidłowości w tym zakresie. Inną kwestią jest też czas, w którym dany otwór był likwidowany, użyte do likwidacji materiały, jakość wykonania prac jak również środowisko/otoczenie otworu. Należy pamiętać, że nawet przy prawidłowej likwidacji otworu zawsze istnieje pewne zagrożenie dla szczelności starych otworów, wskutek oddziaływania CO<sub>2</sub> na kamień cementowy, zależnie od rodzaju i wieku cementu oraz rodzaju skał i solanek w obrębie kolektora. Dotyczy to zarówno otworów zlikwidowanych (przez zamknięcie korkiem cementowym wszystkich kolektorów), jak i wykorzystanych aktualnie do produkcji węglowodorów i monitoringu, które są zacementowane w przedziałach głębokości ponad kolektorami [10].

### Scenariusz 8. Akumulacja CO<sub>2</sub> w innym zbiorniku/pokładzie

W tym przypadku analizie zostały poddane wszystkie możliwe scenariusze prowadzące do wycieku CO<sub>2</sub> przez warstwy nadkładu i/lub uskoki, co w rezultacie prowadzić może do akumulacji CO<sub>2</sub> w zbiorniku wtórnym (warstwy wodonośnej, zbiornik gazu/ropy, pokład węgla).

### Scenariusz 9. Niekontrolowany wzrost/spadek ciśnienia

Metoda zatłaczania CO<sub>2</sub> do pokładów węgla z jednoczesnym wydobywaniem metanu oparta jest na wykorzystaniu współczynnika zastępowalności CH<sub>4</sub> przez CO<sub>2</sub>. Zmiany ciśnienia i/lub temperatury prowadzą do zmian w maksymalnej zawartości gazu. Jeśli ciśnienie spadnie znacząco, nadmiar CO<sub>2</sub> może ulec desorpcji i swobodnie migrować [11]. Iniekcja CO<sub>2</sub> i/lub pozyskiwanie gazów mogą prowadzić do wzrostu lub spadku ciśnienia w formacji zbiornikowej. To może zmienić lokalnie warunki naprężeń górotworu. Zmiany te mogą w rezultacie wywołać deformację lub nawet pęknięcia prowadzące do szczelinowania i aktywacji uskoki.

### Scenariusz 12. Wyciek do czynnej/zlikwidowanej kopalni węgla

W tym przypadku należy wziąć pod uwagę wszystkie możliwe scenariusze prowadzące do wycieku CO<sub>2</sub> poprzez nadkład/otaczający górotwór i/lub też poprzez sam pokład węgla w wyniku czego dochodzi do migracji gazów do czynnej lub zlikwidowanej kopalni węgla. Obecność kopalni w otoczeniu kompleksu składowania może doprowadzić do potencjalnej akumulacji CO<sub>2</sub> w chodnikach i może stanowić poważne zagrożenie dla człowieka.

### Scenariusz 13. Brak lub małe nasycenie pokładu węgla metanem

Scenariusz ten badano w związku z możliwym złym scharakteryzowaniem pokładu węgla, który może nie zawierać metanu lub też jego zawartość może być niewystarczająca dla produkcji CH<sub>4</sub> podczas prowadzonego procesu CO<sub>2</sub>/ECBM. Powodem może być:

- pęcznienie matrycy węglowej spowodowane adsorpcją a w konsekwencji zmniejszenie przepuszczalność pokładu;
- naturalne (np. uskoki) lub antropogeniczne (np. prowadzona eksploatacja w otoczeniu składowiska) wyczerpanie/spadek metanonośności;
- wysoka zawartość wody w węglu [1, 18].

Pozostałe dwa scenariusze: nr 10 i 11 były brane pod uwagę jako część wyżej opisanych scenariuszy. Dlatego też nie były analizowane oddzielnie.

Przykład drzewa błędów dla możliwych przyczyn został przedstawiony na rysunku 1, natomiast dla możliwych skutków na rysunku 2 zaprezentowano drzewo zdarzeń.

### 4.3. Metoda ekspercka oraz oprogramowanie iQRAS

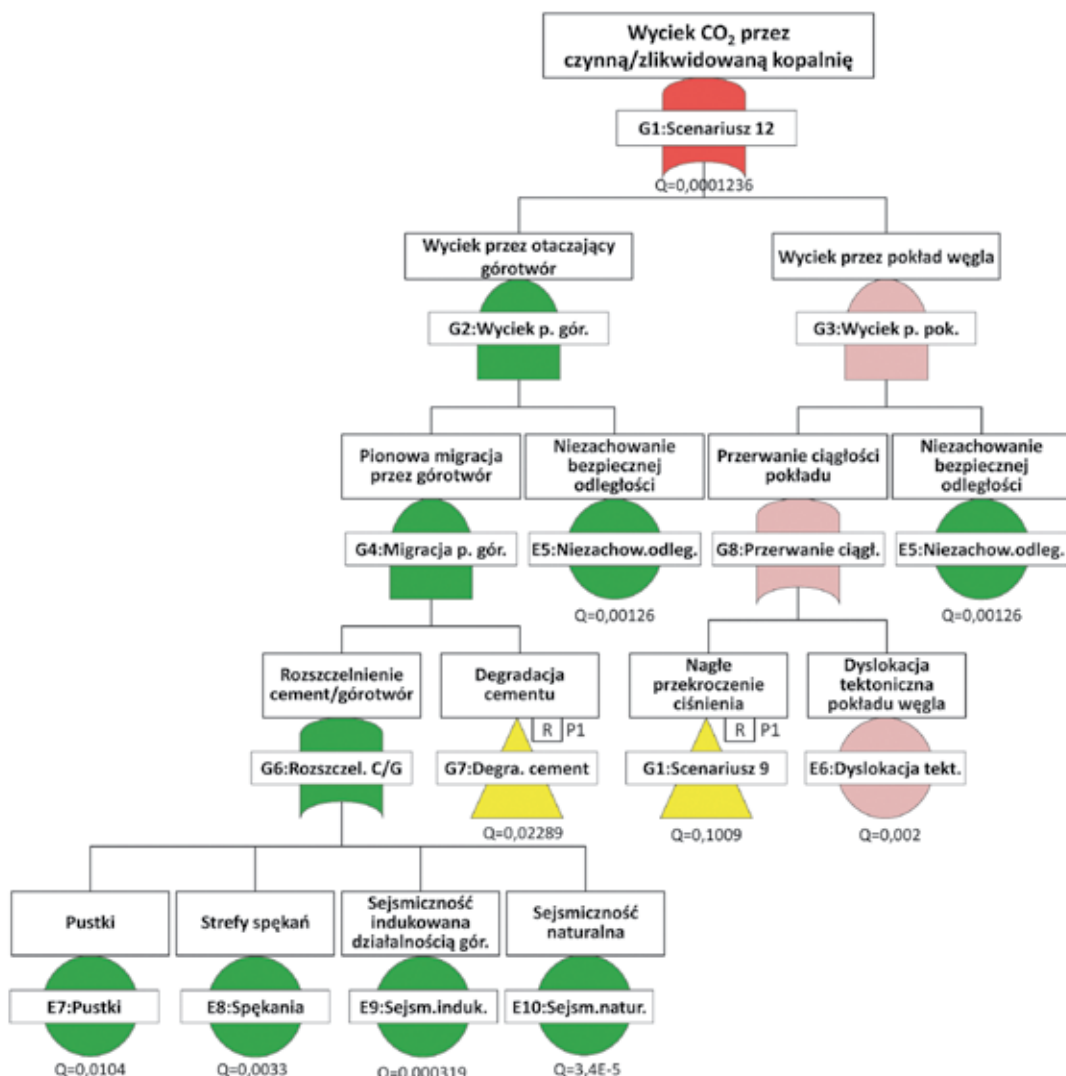
Analiza ryzyka została oparta na metodzie eksperckiej. Do tego celu przygotowano specjalne kwestionariusze ankietowe, dla każdego scenariusza osobno. Eksperti z takich instytucji, jak AITEMIN, BRGM, GIG, HUNOSA, INERIS, TOTAL oraz Uniwersytet Alberta z Kanady, Instytut Nafty i Gazu, a także Politechnika Śląska zostali zaproszeni do wypełnienia ankiet poprzez udzielenie odpowiedniej odpowiedzi na każde z zadanych pytań odpowiadających poszczególnym zdarzeniom w drzewie błędów. W ten sposób otrzymano oceny prawdopodobieństwa zaistnienia każdego ze zdarzeń, będące opiniami ekspertów, opartymi na ich wiedzy i doświadczeniu.

Oceny ekspertów wyrażono w postaci liczbowej poprzez nadanie im wartości prawdopodobieństwa częstościowego (możliwość wystąpienia zdarzenia w czasie), a następnie wartości te wykorzystano jako wkład do analizy prawdopodobieństwa przy użyciu oprogramowania iQRAS (ilościowa ocena ryzyka). W ten sposób wyznaczono prawdopodobieństwa zajścia zdarzeń szczytowych w każdym drzewie błędów (*Fault Tree Analysis* – FTA) osobno. Taką samą metodologię zastosowano do oceny skutków zdarzeń niebezpiecznych (*Event Tree Analysis* – ETA).

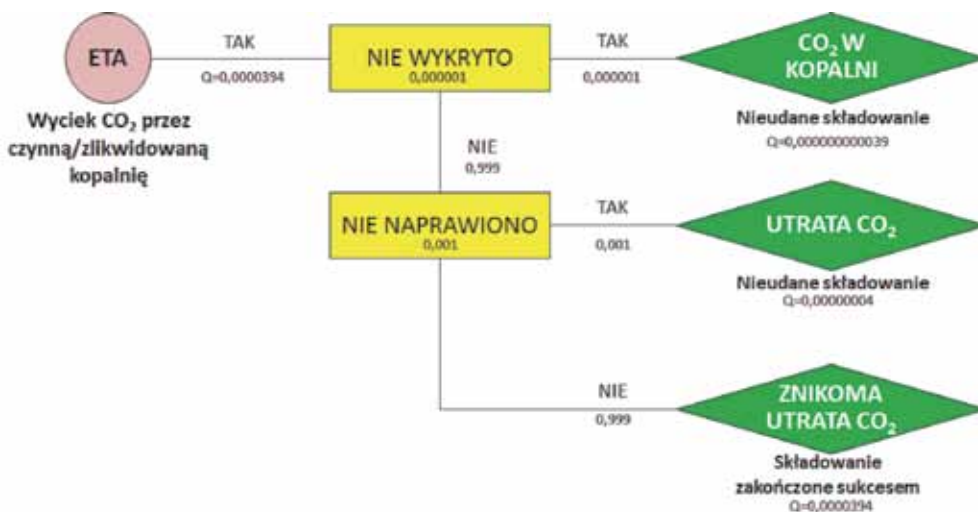
Oprogramowanie iQRAS, wykorzystane w projekcie CARBOLAB, pozwala na ocenę poziomu ryzyka dla każdego scenariusza zdarzeń niebezpiecznych indywidualnie, a także na przeprowadzenie analizy wrażliwości całego systemu (procesu CO<sub>2</sub>-ECBM). Analiza drzewa błędów prowadzona jest z wykorzystaniem silnika obliczeniowego opartego o Binarne Diagramy Decyzyjne (BDD) pozwalające na wyznaczanie poziomu ryzyka bez przybliżeń stosowanych w konwencjonalnych metodach obliczeniowych. Zastosowanie metodologii drzew błędów dla oceny niepewności zdarzeń jest przydatne szczególnie wtedy, gdy posiadamy ograniczone informacje na temat prawdopodobieństwa oraz awaryjności na poziomie zdarzeń podstawowych [14]. Dane dotyczących awaryjności niektórych elementów stosowanych w procesie można uzyskać z informacji katalogowych produktów, ale stosowanie takich wartości należy uznać za wątpliwe, często ze względu na różnice w aplikacji i warunkami założonymi przez producenta, a rzeczywistymi. Dane te można również uzyskać na drodze testów, niemniej jednak jest to czasochłonne i kosztowne. Problem ten zostaje rozwiązany poprzez zastosowanie metodologii drzew błędów dla oceny niepewności zdarzeń (oprogramowanie iQRAS) pozwalającej na używanie danych w postaci rozkładu prawdopodobieństwa.

### 4.4. Omówienie wyników

**Proces Zatłaczania.** Podczas analizowania pierwszego etapu procesu (iniekcji CO<sub>2</sub>) wzięto pod uwagę dwa możliwe stany końcowe systemu tj. skuteczne zatłaczanie i nieudane zatłaczanie. Najbardziej newralgicznym elementem systemem podczas procesu zatłaczania jest otwór służący do iniekcji, jako że prawie 21 % awarii systemu powodowanych jest wyciekiem przez otwór produkcyjny. Przeprowadzona analiza pokazała, że proces zatłaczania może zostać zatrzymany z powodu zmian ciśnienia w pokładzie węgla (w warunkach projektu CARBOLAB prawdopodobieństwo zatrzymania zatłaczania było stosunkowo wysokie), nagromadzenia się



Rys. 1. Przykład drzewa błędów (FTA) dla możliwych przyczyn dla scenariusza 12: Wyciek CO<sub>2</sub> do czynnej/zlikwidowanej kopalni węgla  
 Fig. 1. Example of a fault tree (FTA – Fault Tree Analysis) for possible causes in scenario 12: Escape of CO<sub>2</sub> into an active/closed coal mine



Rys. 2. Przykład drzewa zdarzeń (ETA) dla możliwych skutków w scenariuszu 12: Wyciek CO<sub>2</sub> do czynnej/zlikwidowanej kopalni węgla  
 Fig. 2. Example of an event tree (ETA – Event Tree Analysis) for possible effects in scenario 12: Escape of CO<sub>2</sub> into an active/closed coal mine

CO<sub>2</sub> w innym ośrodku lub wycieku poprzez nadkład/strefę uskokową (w przypadku niepoprawnego przeanalizowania i zdefiniowania ośrodka). Przeprowadzona analiza ryzyka wskazała otwór iniekcyjny jako najsłabszy element spośród wszystkich mogących spowodować niepowodzenie zatłaczania. Należy jednak pamiętać, że technologia zastosowana w projekcie CARBOLAB w niektórych aspektach nie może być wdrożona na skalę przemysłową (np. użycie pakera).

**Produkcja CH<sub>4</sub>.** Jedyny możliwy scenariusz wzięty pod uwagę to brak lub małe nasycenie pokładu węgla metanem, możliwy przy błędnym scharakteryzowaniu pokładu węgla, który może zawierać niewystarczającą ilość metanu. Oczywiście należy również zauważyć, że proces produkcji metanu nie dojdzie do skutku, jeżeli proces zatłaczania zostałby zbyt wcześnie zatrzymany.

**Faza Składowania.** Do najbardziej prawdopodobnych dróg wycieku CO<sub>2</sub> z miejsca składowania należą wycieki przez otwór produkcyjny lub zlikwidowany zacementowany otwór. Wycieki za pośrednictwem otworu produkcyjnego, po jego likwidacji, związane są z niewłaściwym doбором materiałów do uzbrojenia otworu i ich możliwą degradacją w miarę upływu czasu. Można założyć, że w większości przypadków prawdopodobieństwo wycieku CO<sub>2</sub> przez zlikwidowany otwór, nie związany technologicznie z procesem, jest większe niż w przypadku zlikwidowanego otworu poprodukcyjnego. W pierwszym przypadku niejednokrotnie nie będziemy znali dokładnych danych na temat likwidacji otworu, natomiast w drugim przypadku operator procesu CO<sub>2</sub>-ECBM jest zobowiązany do zastosowania odpowiedniej technologii likwidacji otworu.

Inna możliwa droga ucieczki CO<sub>2</sub> to poprzez nadkład/strefę uskokową (jak wspomniano wcześniej w przypadku niepoprawnego przeanalizowania i zdefiniowania ośrodka). Scenariusz ten jest w wysokim stopniu zależny od czasu, a jego analiza powinna być zawsze oparta na właściwej charakterystyce miejsca zatłaczania i wynikach długoterminowego modelowania.

## 5. Wnioski

Celem projektu CARBOLAB było przeprowadzenie testów *in situ* podziemnego zatłaczania CO<sub>2</sub> do pokładów węgla przy jednoczesnej produkcji CH<sub>4</sub>. Jednym z ważniejszych zadań postawionych przed zespołem realizującym projekt była analiza i ocena ryzyka długoterminowego składowania CO<sub>2</sub>. W przypadku przedsięwzięć, takich jak CO<sub>2</sub>-ECBM poziom ryzyka musi być oceniany i stale kontrolowany na wszystkich etapach realizacji projektu, tj. w fazie planowania przedsięwzięcia, podczas fazy operacyjnej, a także po zakończeniu zatłaczania, gdy odpowiedzialność operatora zostaje przekazana na inny podmiot gospodarczy.

Projekt CARBOLAB pozwolił na opracowanie metodologii oceny ryzyka dla technologii CO<sub>2</sub>-ECBM. Zostały zidentyfikowane i ocenione wszystkie zagrożenia powstające podczas prowadzenia fazy zatłaczania CO<sub>2</sub>, produkcji CH<sub>4</sub>, a także podziemnego składowania CO<sub>2</sub>. Zaproponowana metodologia oparta została na wytycznych pochodzących z Dyrektywy CCS oraz na zapisach innych dwóch europejskich dyrektyw dotyczących zarządzania ryzykiem.

Przeprowadzone analizy wskazują, że niektóre aspekty bezpieczeństwa są silnie zależne od geologicznych uwarunkowań miejsca składowania. W tym przypadku trudno jest stworzyć uniwersalne wytyczne dotyczące ich wpływu na końcowy rezultat projektu. Niemniej jednak badania objęte projektem CARBOLAB potwierdziły, że bezpieczeństwo technologii CO<sub>2</sub>-ECBM zależy od właściwego przygotowania

infrastruktury, a także wyboru lokalizacji miejsca składowania. Istotne są także: poprawne zamodelowanie przebiegu procesów, wybór właściwych materiałów, realizacja prac przez zespoły o odpowiednim doświadczeniu i kwalifikacjach, a także identyfikacja możliwych ścieżek wycieku gazu z kompleksu składowania, gdyż większość z nich może być usunięta lub naprawiona podczas fazy zatłaczania.

Artykuł powstał w oparciu o dane uzyskane w trakcie realizacji projektu CARBOLAB, RFCR-CT-2009-00001, pt.: „Powszechnienie wiedzy na temat składowania dwutlenku węgla i produkcji metanu z pokładów węgla poprzez podziemne testy »in situ«, finansowanego ze środków Funduszu Badawczego Węgla i Stali w latach 2009–2013. Kierownikiem projektu CARBOLAB po stronie polskiej by Pan mgr inż. Jacek Skiba.

## Podziękowania

*Autorzy artykułu dziękują Panu Bartłomiejowi Jura z Zakładu Zwalczania Zagrożeń Gazowych KD „Barbara” Głównego Instytutu Górnictwa za udostępnienie danych niezbędnych do realizacji badań oraz pomoc merytoryczną i współpracę podczas realizacji projektu oraz niniejszego artykułu.*

## Literatura

1. Baran P., Zarebska K., Krzystolik P., Hadro J., Nunn A. (2014). CO<sub>2</sub>-ECBM and CO<sub>2</sub> Sequestration in Polish Coal Seam – Experimental Study. *Journal of Sustainable Mining*, 13(2), 22–29. doi:10.7424/jsm140204
2. Bouc O., Audigane P., Bellenfant G., Fabriol H., Gastine M., Rohmer J., Seyedi D. (2009): Determining safety criteria for CO<sub>2</sub> geological storage. *GHGT9, Energy Procedia* 1, 2439–2446.
3. Condon, J., Unatrakarn, D., Wilson, M., & Asghari, K. (2011). A comparative analysis of risk assessment methodologies for the geologic storage of carbon dioxide. *Energy Procedia* 4, 4036–4043
4. Dyrektywa CCS (2009): Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz zmieniająca dyrektywę Rady 85/337/EWG Eurotom, dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/60/WE, 2001/80/WE, 2004/35/WE, 2006/12/WE, 2008/1/WE i rozporządzenie (WE) nr 1013/2006.
5. EN 31010 (2010): STANDARD. Risk management – Risk assessment techniques. Geneva: ISO/IEC. (Wprowadzona do polskiego ustawodawstwa przez PN-EN 31010:2010. Zarządzanie ryzykiem – Techniki oceny ryzyka).
6. Farret R. (2011): Towards an integrated method for risk analysis of the CCS chain. *International Seminar Evaluation and risk management for CCS*. Le Havre, 07-08 April.
7. Farret R., Gombert P., Lahaie F., Cherkaoui A., Lafortune S., Roux P. (2011a): Design of fault trees as a practical method for risk analysis of CCS: application to the different life stages of deep aquifer storage, combining long-term and short-term issues. *Energy Procedia* 4.
8. Gerstenberger, M. C., Christophersen, A., Buxton, R., Allinson, G., Hou, W., Leamon, G., & Nicol, A. (2013). Integrated Risk Assessment for CCS. *Energy Procedia*, 37(0), 2775–2782. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.162
9. Ide S.T., Friedmann S.J., Herzog H.J. (2006): CO<sub>2</sub> Leakage Through Existing Wells: Current Technology and Regulatory Basis. *Poster session II*. In *Proceedings of the 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. June 19–22, Trondheim, Norway.
10. IEA GHG (2009): IEA Greenhouse Gas R&D Programme. *Long Term Integrity of CO<sub>2</sub> Storage – Well Abandonment*, 2009/08.
11. IPCC (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel



- on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
12. ISO 31000 (2009): STANDARD. Risk management – Principles and guidelines. Geneva: ISO/IEC (Wprowadzona do polskiego ustawodawstwa przez PN-ISO 31000:2012. Zarządzanie ryzykiem – Zasady i wytyczne)
  13. Kling, G. W., Clark, M. A., Wagner, G. N., Compton, H. R., Humphrey, A. M., Devine, J. D., Evans, W.C., Lockwood, J.P., Tuttle, M.L., Koenigsberg, E. J. (1987). The 1986 Lake Nyos gas disaster in Cameroon, West Africa. *Science*, 236(4798), 169÷175
  14. Kumamoto H. (1996): Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists, IEEE Press
  15. Le Guenan T., Manceau J. Ch., Bouc O., Rohmer J., Ledoux A. (2011): GERICO: A database for CO2 geological storage risk management. *Energy Procedia* 4. 4124÷4131.
  16. Macdonald D. (2004): Practical hazops, trips and alarms: Newnes. New York Times, “Trying to Tame the Roar of Deadly Lakes”, February 27, 2001
  18. Pan Z., Connell L.D. (2007): A theoretical model for gas adsorption-induced coal swelling. *International Journal of Coal Geology* 69, 243÷252
  19. Shi, J., & Durucan, S. (2005). CO2 storage in deep unminable coal seams. *Oil & gas science and technology*, 60(3), 547÷558.
  20. Stanton, R., Flores, R., Warwick, P.D., Gluskoter, H. and G.D., S. (2001) Coalbed Sequestration of Carbon Dioxide, *1st National Conference on Carbon Sequestration*, Washington, USA.
  21. World Resources Institute (WRI) (2008): CCS Guidelines: Guidelines for Carbon Dioxide Capture, Transport, and Storage. Washington, DC: WRI.
  22. Yielding G., Freeman B., Needham D.T. (1997): Quantitative Fault Seal Prediction. *AAPG Bulletin* 81:897÷917

---

***Szanowni Czytelnicy!***  
***Przypominamy o wzowieniu***  
***prenumeraty „Przeglądu Górniczego”***

Informujemy też, że od 2009 roku w grudniowym zeszycie P.G. zamieszczamy listę naszych prenumeratorów.