

## Możliwości składowania CO<sub>2</sub> w strukturach geologicznych

### Possibilities of CO<sub>2</sub> storage in geological formations

Wzrost efektywności wytwarzania energii elektrycznej, jak również obniżenie energochłonności w sferze gospodarczej, oszczędność energii czy też wykorzystanie odnawialnych źródeł energii są obecnie wiodącymi sposobami ograniczenia globalnej emisji gazów cieplarnianych, w tym przede wszystkim emisji CO<sub>2</sub>. Nie ulega wątpliwości, że efekty tych działań będą jednak widoczne dopiero w perspektywie długoterminowej.

Stąd też podejmowane są działania mające na celu osiągnięcie redukcji emisji CO<sub>2</sub> w krótszym horyzoncie czasowym, niezbędne szczególnie w okresie przejściowym, poprzedzającym powszechne uzyskanie efektów wspomnianych działań długoterminowych. W tym zakresie za wiodącą uważana jest technologia wychwytu i składowania dwutlenku węgla (ang.: carbon capture and storage, w skrócie CCS) w głębokich strukturach geologicznych. Technologia ta nie pozwala na bezpośrednie obniżenie antropogenicznej emisji CO<sub>2</sub>, uważana jest jednak za najbardziej obiecującą i dostępną w krótkim czasie technologię, która pozwalałaby na zmniejszenie ilości emitowanego do atmosfery CO<sub>2</sub>, a tym samym na łagodzenie skutków antropogenicznej emisji CO<sub>2</sub>. Dane przedstawione w Raporcie Międzypaństwowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (ang.: Intergovernmental Panel on Climate Change, w skrócie IPCC) pt. „Energy Technology Perspectives” wskazują technologię CCS jako jedną z kluczowych w obszarze aktywnego obniżania emisji CO<sub>2</sub>. Z przedstawionych w raporcie analiz wynika, iż technologia CCS może się przyczynić do ok. 20-procentowej redukcji emisji CO<sub>2</sub> przewidzianej do roku 2050 [6].

Tym niemniej dotychczasowe próby pilotowego zastosowania tej technologii, które są prowadzone w różnych regionach świata, pomimo upływu czasu, nie wskazują na jednoznacznie znaczące sukcesy, które potwierdzałyby wielki optymizm w zakresie przemysłowego wdrożenia tej technologii. Są oczywiście szczególne przypadki jej stosowania (np. w technologiach EOR i EGR). Niestety jej zastosowanie napotyka szereg barier, nie tylko technologicznych i ekonomicznych, ale także społecznych.

<sup>1)</sup> Prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, absolwent AGH w Krakowie, jest członkiem korespondentem PAN. Od 2001 r. pełni funkcję Naczelnego Dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa.

<sup>2)</sup> Dr inż. Aleksandra Koterias, absolwentka Politechniki Śląskiej w Gliwicach i Akademii Obrony Narodowej w Warszawie. Jest zatrudniona na stanowisku głównego specjalisty w Głównym Instytucie Górnictwa.

#### Charakterystyka technologii wychwytywania i geologicznego składowania dwutlenku węgla (CCS)

Wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla w strukturach geologicznych, jak wcześniej wspomniano, ma być jedynie technologią przejściową, stosowaną do chwili opracowania technologii pozwalających na produkcję energii z paliw kopalnych z jednoczesną redukcją lub eliminacją emisji CO<sub>2</sub> lub stosowania wyłącznie technologii pozwalających na pozyskiwanie energii z innych nośników energii niż paliwa kopalne.

Kluczowymi elementami technologii CCS są:

- separacja dwutlenku węgla od innych gazów spalinowych w procesach spalania paliw kopalnych oraz jego ujęcie (wychwyty),
- transport CO<sub>2</sub> do miejsca jego składowania,
- zatlóczenie do wybranej struktury geologicznej.

Należy podkreślić, że technologie wychwytu CO<sub>2</sub> są tym elementem technologii CCS, które jest najlepiej rozwinięte pod względem technologicznym. Wśród technologii wychwytu i usuwania CO<sub>2</sub>, w zależności od umiejscowienia technologii w procesie spalania, wyróżnia się następujące rodziny procesów [2]:

- wyłapywanie i usuwanie CO<sub>2</sub> z gazów spalinowych (post-combustion),
- separacja CO<sub>2</sub> z paliwa gazowego lub gazu syntezowego przed procesem spalania (pre-combustion),
- spalanie paliw w atmosferze tlenu z recyrkulacją CO<sub>2</sub>,
- separacja węgla z paliwa przed procesem spalania, np. proces Hydrocarb,
- wyłapywanie i usuwanie CO<sub>2</sub> w procesach wykorzystujących ogniwa paliwowe,
- chemical looping.

Wśród tych wielu możliwych metod separacji CO<sub>2</sub> do najczęściej stosowanych należą technologie z grupy post-combustion, takie jak absorpcja chemiczna i fizyczna, adsorpcja, separacja kriogeniczna czy też membranowa [2].

Proces separacji CO<sub>2</sub> jest jednym z najbardziej kosztownych elementów technologii CCS. Potrzeba zainstalowania dodatkowych urządzeń oraz konieczność poboru energii niezbędnej dla ich pracy zwiększają jednostkowe nakłady inwestycyjne na produkcję energii elektrycznej, a co za tym idzie zwiększają koszty uzyskiwanej energii. Należy jednak zauważyć, że w przypadku nowoczesnej elektrowni o wysokiej sprawności, stosującej

paliwa kopalne, będą wytwarzane mniejsze ilości CO<sub>2</sub>, co będzie prowadzić do mniejszych strat sprawności związanych z wychwytem CO<sub>2</sub> oraz niższych kosztów tej operacji [10].

Wychwycony dwutlenek węgla musi być dostarczony do miejsca jego składowania. Stąd odległość pomiędzy źródłem jego wytwarzania (np. elektrownia) a miejscem składowania nie powinna być zbyt duża (nie większa niż kilkadziesiąt kilometrów). Z uwagi na znaczące ilości CO<sub>2</sub> w przypadku przemysłowego stosowania technologii CCS, podstawowym jest transport z użyciem rurociągów.

Do potencjalnych struktur geologicznych w zakresie składowania CO<sub>2</sub> należą:

- szczerpane złoża węglowodorów (ropa naftowa i gaz ziemny),
- pokłady węgla, które nie będą w przyszłości eksploatowane,
- warstwy piaskowcowe o dużej porowatości i zwiększonym zasoleniu.

Dotychczasowe projekty składowania CO<sub>2</sub> w formacjach geologicznych jednoznacznie wskazują, że najbardziej efektywne i bezpieczne jest składowanie CO<sub>2</sub> w szczerpanych złożach ropy naftowej i gazu. Struktury te stanowią bowiem naturalną pułapkę dla zatłaczanego do nich CO<sub>2</sub>. Doświadczenia z USA pokazują, że w wielu przypadkach technologia CCS osiąga cechy użyteczne, gdyż zatłaczany CO<sub>2</sub> stymuluje i wzmacnia produkcję złóż ropy (technologia EOR) czy też gazu (EGR). Mówi się wówczas o technologii CCU (carbon capture and utilisation). Niestety w polskich uwarunkowaniach pojemność szczerpanych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego jest niezbyt duża [3].

W przypadku pokładów węgla, które nie będą eksploatowane, potencjał składowania w nich CO<sub>2</sub> zależy przede wszystkim od ich przepuszczalności. Zazwyczaj takimi pokładami mogą być pokłady zalegające głęboko, a w takiej sytuacji ich przepuszczalność jest niska. Polskie doświadczenia w tym zakresie, uzyskane w projekcie RECOPOL, jednoznacznie wskazują, że ta formacja geologiczna nie będzie perspektywiczną dla przemysłowego składowania CO<sub>2</sub>. Wprawdzie zastosowanie technologii upodabniających strukturę pokładów węgla (szczelinowanie, wiercenia poziome wraz ze szczelinowaniem, itp.) mogą poprawić sytuację w tym zakresie, ale będzie to równocześnie zwiększać koszty procesu składowania CO<sub>2</sub>.

W wymiarze światowym, a najprawdopodobniej także w przypadku Polski, największy potencjał dla przemysłowego składowania CO<sub>2</sub> posiadają zawodnione formacje piaskowcowe o wysokiej porowatości i przepuszczalności, zawierające wody o podwyższonym zasoleniu. Tym niemniej struktury, w których te formacje występują muszą spełniać określone kryteria.

## Kryteria przydatności formacji geologicznych dla składowania CO<sub>2</sub>

Struktury przeznaczone do geologicznego składowania CO<sub>2</sub> muszą spełniać wiele kryteriów decydujących o ich przydatności do tego celu. W przypadku głębokich poziomów wodonośnych powinny to być formacje solankowe. Zgodnie ze stosowaną w Polsce hydrogeologiczną klasyfikacją wód mineralnych, wody solankowe są to wody o mineralizacji przekraczającej 35 g/dm<sup>3</sup> (wg [9] i [14]), których głównymi składnikami rozpuszczonymi są jony: chlorkowy Cl<sup>-</sup>, sodowy Na<sup>+</sup> i wapniowy Ca<sup>2+</sup>. Ponadto, niektórzy autorzy wyróżniają grupę silnych solanek o mineralizacji powyżej 150 g/dm<sup>3</sup> [12].

Podstawowe kryteria wyboru struktury geologicznej przeznaczonej do składowania CO<sub>2</sub> przedstawione zostały w tabeli 1 [7, 4].

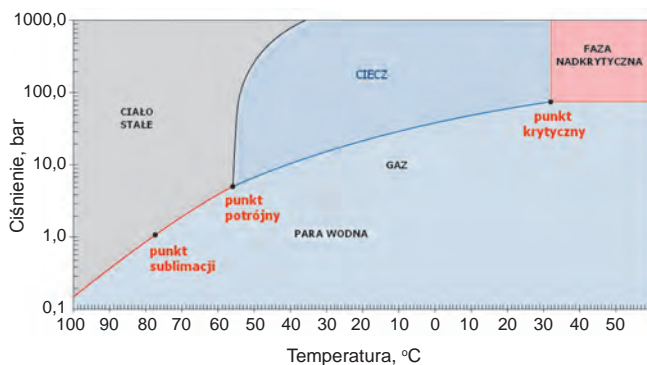
Tabela 1

Kluczowe kryteria geologiczne dla właściwego wyboru miejsca składowania

	Wskaźniki pozytywne	Wskaźniki negatywne
<b>POJEMNOŚĆ SKŁADOWANIA</b>		
Całkowita pojemność składowania	Całkowita pojemność zbiornika powinna być większa niż całkowita przewidywana produkcja CO <sub>2</sub> przez emitenta przewidziana do składowania	Całkowita pojemność zbiornika jest taka sama lub niższa niż całkowita przewidywana produkcja CO <sub>2</sub> przez emitenta przewidziana do składowania
<b>WŁAŚCIWOŚCI ZBIORNIKA</b>		
Głębokość	> 1000 m; < 2500 m	< 800 m; > 2500 m
Miąższość	> 50 m	< 20 m
Porowatość	>20%	<10%
Przepuszczalność	> 300 mD	100 – 10 mD
Zasolenie	>100g/dm <sup>3</sup>	<30 g/dm <sup>3</sup>
<b>WŁAŚCIWOŚCI WARSTW IZOLUJĄCYCH</b>		
Uskoki	brak	strefy uskokowe,
Miąższość nadkładu	>100 m	<20 m

## Uwarunkowania fizyczne dla składowania CO<sub>2</sub> w strukturach geologicznych

Niezależnie od wybranej do składowania struktury geologicznej, proces składowania CO<sub>2</sub> polega na wtłaczaniu sprężonego gazu do wybranej formacji geologicznej. Kluczowym elementem technologii jest wykorzystanie określonych własności fizycznych dwutlenku węgla, które zmieniają się w zależności od ciśnienia i temperatury. Punkt krytyczny przejścia do fazy nadkrytycznej osiągnięty jest przy temperaturze 31,1°C i ciśnieniu 73,9 bar. Powyżej tego punktu dwutlenek węgla ma gęstość cieczy, zaś jego lepkość i ścisłość są charakterystyczne jak dla gazu, co jest bardzo ważnym czynnikiem w aspekcie jego geologicznego składowania [7]. Przyjmuje się, że głębokością krytyczną, czyli taką, poniżej której dwutlenek węgla przechodzi przez punkt krytyczny do fazy nadkrytycznej, jest głębokość ok. 800 m. Tak więc głębokość ta wyznacza minimalną głębokością zalegania stropu warstw przeznaczonych do geologicznego składowania dwutlenku węgla (rys. 1).



Rys. 1. Obszary termodynamiczne dla dwutlenku węgla [7, 11]

Wyróżnia się cztery podstawowe mechanizmy, które zapewniają izolację CO<sub>2</sub> w głębokich formacjach geologicznych [1]:

- izolacja strukturalna, czyli obecność nieprzepuszczalnego nadkładu skalnego, który uniemożliwia ucieczkę CO<sub>2</sub>,
- izolacja resztkowego CO<sub>2</sub>, polegająca na izolowaniu CO<sub>2</sub> przez siły kapilarnie w szczelinach formacji skalnej,
- izolacja rozтворowa, polegająca na tym, że CO<sub>2</sub> rozpuszcza się w wodzie znajdującej się w formacji geologicznej i opada na dno,
- izolacja mineralna, polegająca na tym, że rozpuszczone CO<sub>2</sub> chemicznie reaguje z formacją skalną, co powoduje tworzenie nowych związków mineralnych.

Mechanizm geologicznego składowania CO<sub>2</sub> jest procesem kilkufazowym. W początkowej fazie jest to izolacja strukturalna, która polega na „uwięzieniu” gazu strukturze geologicznej wyróżniającej się szczelnością nadkładu, a tym samym uniemożliwiającej ucieczkę CO<sub>2</sub>. Poddany izolacji strukturalnej dwutlenek węgla podlega działaniu sił kapilarnych, w wyniku których zostaje uwięziony w szczelinach formacji skalnej. Proces ten, nazywany izolacją resztkowego CO<sub>2</sub>, rozwija się przez ok. 10 lat po zatłoczeniu CO<sub>2</sub>. W kolejnym etapie, przez okres ok. 100 lat od rozpoczęcia magazynowania, dwutlenek węgla rozpuszcza się w wodzie, wskutek czego opada na dno, co spowodowane jest większym ciężarem dwutlenku węgla od zwykłej wody. W okresie od setek do tysięcy lat od momentu zatłoczenia CO<sub>2</sub> do formacji solankowej zaczyna on wchodzić w reakcje chemiczne z otaczającymi skałami, co w rezultacie prowadzi do powstawania nowych związków mineralnych. Proces ten nazywany jest izolacją mineralną.

## Możliwości wykorzystania technologii CCS w skali globalnej

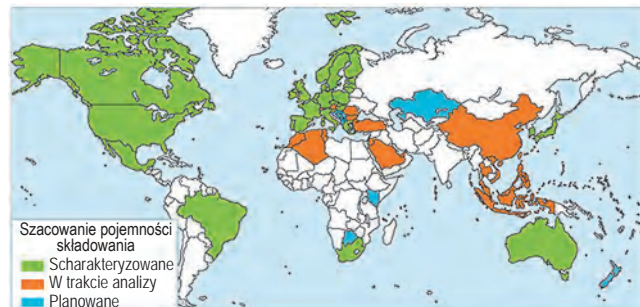
Wybór i charakterystyka potencjalnego miejsca składowania CO<sub>2</sub> to jedno z najważniejszych kwestii w zapewnieniu bezpieczeństwa i integralności wybranej do składowania struktury geologicznej, a tym samego bezpieczeństwa podziemnego składowania CO<sub>2</sub> w okresie długoterminowym. Od wielu już lat szereg krajów na świecie podejmuje badania mające na celu identyfikację i weryfikację formacji geologicznych jako potencjalnych miejsc dla podziemnego składowania CO<sub>2</sub>. Zgodnie z opublikowanymi przez Globalny Instytut CCS (Global CCS Institute, GCCSI) danymi, na całym świecie przeprowadzone zostały bądź w dalszym ciągu prowadzone są badania mające na celu określenie potencjału (pojemności) formacji geologicznych możliwych do wykorzystania w celu składowania CO<sub>2</sub> (rys. 2). Jednak należy zauważyć, że w dalszym ciągu nie została wypracowana jednolita i spójna metodologia dla szacowania pojemności struktur geologicznych w tym zakresie [5].

Na świecie realizowane są również projekty obejmujące pełny łańcuch CCS, czyli wychwyt, transport i składowanie. Zgodnie z danymi z przytoczonego już wcześniej raportu GCCSI, w skali globalnej na koniec stycznia 2013 r. realizowano 72 zintegrowane projekty dużej skali (ang. large-scale integrated CCS projects, LSIPs), czyli o 3 mniej z 75 opisanych w raporcie wg stanu na październik 2012 r. (rys. 3).

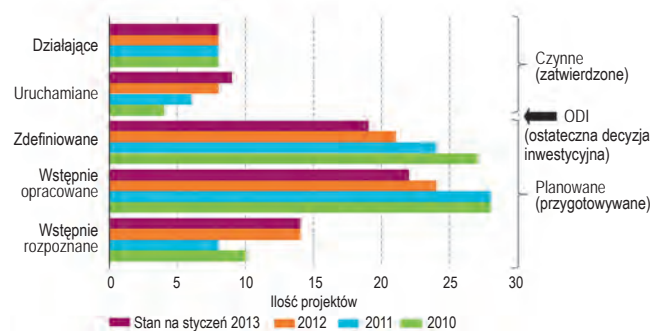
LSIPs to projekty obejmujące wszystkie fazy technologii CCS, tj. wychwytywania, transportu i składowania dwutlenku węgla w skali [5]:

- co najmniej 800 tys. ton CO<sub>2</sub> rocznie dla elektrowni opartej na węglu lub
- co najmniej 400 tys. ton CO<sub>2</sub> rocznie dla innych dużych emitentów przemysłowych (w tym wytwórcy energii elektrycznej na bazie gazu ziemnego).

Progi te korespondują z ilością emitowanego CO<sub>2</sub> przez typową elektrownię węglową bądź też innych emitentów przemysłowych.

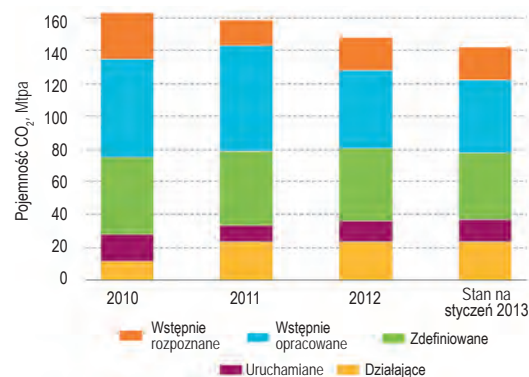


Rys. 2. Mapa regionów, w których podejmowane są inicjatywy oceny pojemności składowisk dla CO<sub>2</sub> [5]



Rys. 3. Przegląd projektów typu LSIPs wg cyklu życia [5]

Z przedstawionych powyżej danych wynika, że obecnie na świecie działa lub jest w trakcie budowy 17 projektów, których potencjał wychwyty CO<sub>2</sub> wynosi ponad 37 mln Mg CO<sub>2</sub> rocznie (rys. 4) [5].



Rys. 4. Możliwości wychwyty CO<sub>2</sub> we wszystkich projektach LSIPs od roku 2010 [5]



## Uwarunkowania dla składowania CO<sub>2</sub> w formacjach geologicznych na terenie Polski

Problematyka wykorzystania technologii CCS w Polsce do tej pory rozpatrywana była jedynie w skali badawczej i realizowana w ramach projektów naukowo-badawczych i pilotażowych. Źródłem ich finansowania były głównie unijne programy ramowe oraz budżetowe środki krajowe MNiSW, NCBiR i NFOŚiGW.

Wśród projektów tych należy wymienić wspomniany już projekt **RECOPOL** – „Redukcja emisji CO<sub>2</sub> przy pomocy magazynowania CO<sub>2</sub> w pokładach węgla”. Projekt ten realizowany był w latach 2001-2005 ze środków V Programu Ramowego Unii Europejskiej, składał się z dwóch części: badań naukowych i pokazowego eksperymentu polowego. Głównym celem projektu były badania nad możliwością bezpiecznego stosowania metody składowania CO<sub>2</sub> w pozabilansowych pokładach węgla.

Do innych znaczących projektów należą projekt **MO-VECBM** – „Monitoring i weryfikacja składowania CO<sub>2</sub> wraz z pozyskiwaniem metanu z pokładów węgla w Polsce”, projekt **CO<sub>2</sub> REMOVE** – „Geologiczne magazynowanie CO<sub>2</sub>; monitoring i weryfikacja technologii” czy też projekt **CASTOR** – „Od wychwytywania do składowania CO<sub>2</sub>”, którego głównym celem był rozwój i legislacja innowacyjnych technologii wychwytywania i składowania CO<sub>2</sub>.

Niezwykle istotne dla technologii CCS rozpoznanie struktur geologicznych dla podziemnego składowania dwutlenku węgla na terenie Polski realizowane było i jest nadal w ramach wielu projektów, badań i analiz. Wśród nich wymienić należy, jako najważniejszy, Krajowy Program „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania”. W ramach projektu na terenie całego kraju wytypowane zostały struktury geologiczne do składowania CO<sub>2</sub>. Prace dotyczyły całego obszaru Polski wraz ze strefą Bałtyku i obejmowały właściwie dziesięć podprojektów w ramach badań regionalnych i pięć w ramach badań szczegółowych [8].

Do analizy wybrano osiem rejonów kraju, gdzie rozpoznanie dotyczyło wodonośnych poziomów solankowych jak również przeanalizowano opcje składowania CO<sub>2</sub> w odniesieniu do szcerpanych złóż ropy i gazu oraz do pokładów węgla. Oszacowana w ramach prac powyższej pracy pojemność tych struktur dla geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wyniosła 10-15 mld ton CO<sub>2</sub>, z czego (PIG):

- 90-93% to struktury solankowe,
- 7-10% złoża węglowodorów,
- <<1% pokłady węgla,

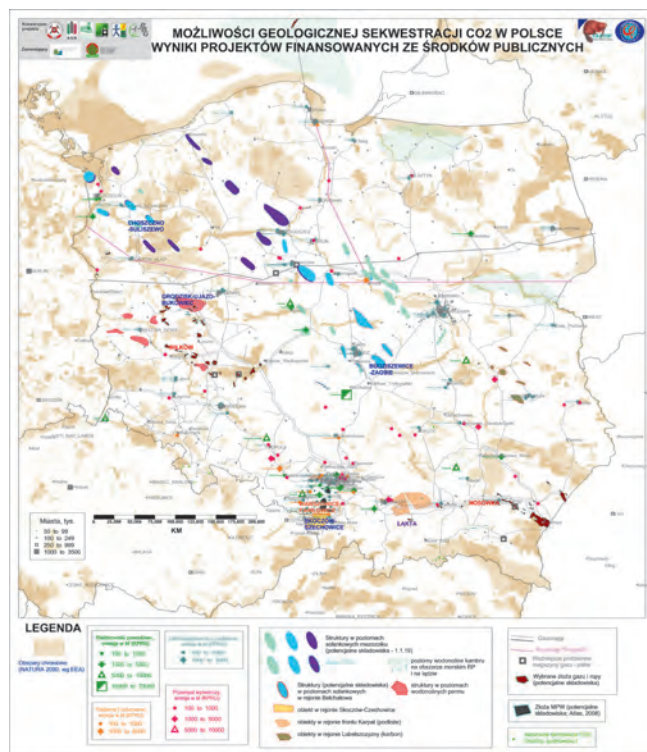
Ponad 90% tych struktur położonych jest na lądzie.

Analiza przydatności solankowych poziomów wodonośnych była także analizowana szczegółowo w ramach programu „Inicjatywa technologiczna I”, gdzie zostało wykonane „Studium bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub> na przykładzie aglomeracji śląskiej”. W ramach tego projektu wybrano i scharakteryzowano wybraną strukturę geologiczną oraz określono założenia transportu i składowania CO<sub>2</sub> dla określonego emitenta przemysłowego (GIG, 2012).

Istotnym elementem warunkującym przemysłowe stosowanie technologii CCS jest stosowne prawodawstwo w tym zakresie. Należy zaznaczyć, że polskie ustawodawstwo jest w trakcie implementacji przepisów Unii Europejskiej w sprawie

geologicznego składowania CO<sub>2</sub>. Dotyczy to konieczności implementacji do polskiego porządku prawnego dyrektywy 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz pozostałych dyrektyw i rozporządzeń zmieniających dyrektywę Rady dotyczącą oceny skutków wywieranych przez niektóre przedsięwzięcia publiczne i prywatne na środowisko naturalne (85/337/EWG). Celem jest więc ustanowienie ram prawnych prowadzenia działalności w zakresie bezpiecznego podziemnego składowania dwutlenku węgla w celu realizacji projektów demonstracyjnych.

Rządowy projekt ustawy o zmianie ustawy – *Prawo geologiczne i górnicze* oraz niektórych innych ustaw przewiduje, że technologia CCS będzie na razie stosowana jedynie w przedsięwzięciach demonstracyjnych, które spełniają kryteria określone w decyzji Komisji nr 2010/670/UE z 3 listopada 2010 r. Zgodnie z tym projektem podziemne składowanie dwutlenku węgla, a także poszukiwanie lub rozpoznawanie struktur geologicznych dla podziemnego składowania dwutlenku węgla będzie wymagało uzyskania pozwolenia (koncesji) udzielanej przez Ministra Środowiska. Koncesja będzie udzielana wyłącznie na potrzeby realizacji projektu demonstracyjnego. Koncesja na podziemne składowanie dwutlenku węgla będzie obejmować działalność związaną z eksploatacją podziemnego składowiska, a także okres po jego zamknięciu, to jest po zakończeniu zatłaczania dwutlenku węgla, związany z likwidacją instalacji oraz monitoringiem kompleksu podziemnego składowiska przez okres nie krótszy niż 20 lat od jego zamknięcia (sejm.gov.pl).



Rys. 5. Wybrane struktury/obiekty – potencjalne składowiska analizowane w ramach Segmentu II (Budziszewice-Zaosie, Skoczów-Czechowice, Grodzisk-Ujazd-Bukowiec, Choszczno-Suliszewo, Nosówka, Wilków, Warszowice-Pawłowice i Łąka), na tle emitentów, obszarów chronionych, gazociągów i pozostałych struktur analizowanych w ramach Segmentu I [8]

## Wnioski

1. Polska gospodarka oraz energetyka korzystają przede wszystkim z paliw kopalnych, z których dominującymi są węgiel kamienny i brunatny (blisko 90%) i dlatego unijna polityka energetyczno-klimatyczna zmierzająca do zdecydowanego ograniczenia antropogenicznej emisji CO<sub>2</sub> stanowi istotne zagrożenie dla konkurencyjności polskiego sektora wytwarzania energii elektrycznej, a także dla istnienia polskich kopalń węgla.
2. Składowanie CO<sub>2</sub> będąc finalnym etapem technologii CCS uważanej za najbardziej perspektywiczną w zakresie ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> poprzez magazynowanie jego ogromnych ilości w podziemnych strukturach geologicznych, jest kluczowym elementem tej technologii ze względu na bezpieczeństwo i trwałość tego procesu.
3. Należy mieć świadomość, że technologia CCS zwiększa koszty wytwarzania energii elektrycznej i obniża sprawność procesu wytwarzania, a tym samym wpływa na konkurencyjność tego ważnego sektora gospodarki; ponadto pośrednio stanowi pewne zagrożenie dla stosowania paliw kopalnych, szczególnie węgla.
4. Zastosowanie technologii CCS wymaga bardzo dobrego rozpoznania budowy geologicznej struktury wytypowanej, jako miejsce składowania CO<sub>2</sub>, która będzie spełniać kryteria wymagane w tym zakresie, a każda lokalizacja składowiska wymaga przeprowadzenia rzetelnej oceny ryzyka związanego ze składowaniem CO<sub>2</sub>.
5. Polski potencjał składowania CO<sub>2</sub> został oszacowany na poziomie 10-15 mld ton CO<sub>2</sub>, z czego około 90% stanowią warstwy piaskowców zawierające wody zasolone; znacznie mniejszy jest potencjał składowania związany z szcherpanymi złożami ropy naftowej i gazu ziemnego czy też pokładami węgla, w których nie przewiduje się eksploatacji.
6. W celu potwierdzenia przemysłowej przydatności technologii CCS połączonej z geologicznym składowaniem wychwyconego CO<sub>2</sub> niezbędna jest realizacja wielu projektów, które prowadzone są w różnych krajach na świecie.
7. W Polsce zostało zrealizowanych kilka różnych projektów związanych z geologicznym składowaniem CO<sub>2</sub>, mających charakter projektów demonstracyjnych bądź studialnych. Brak jest jednak projektów o większej skali, które pozwoliłyby lepiej poznać praktyczne aspekty stosowania samej technologii oraz dokonać analizy jej rzeczywistych możliwości w zakresie bezpiecznego i trwałego składowania CO<sub>2</sub>.

## PIŚMIENICTWO

- [1] Chadwick A., Arts R., Bernstone Ch., May F., Thibeau S., Zweigel P. (2008), Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers - observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects. Nottingham, UK, British Geological Survey, 267 pp. (British Geological Survey Occasional Publication, 14).

- [2] Chmielniak T., Łukowicz H. (2012), Wysokosprawne „zeroemisyjne” bloki węglowe zintegrowane z wychwytem CO<sub>2</sub> ze spalin. *Polityka energetyczna*, t. 15, z. 3, s. 91-106.
- [3] Dubiński J. (2009), Geological and geophysical aspects of the underground CO<sub>2</sub> storage. The 6<sup>th</sup> International Conference on Mining Science & Technology, Xuzhou, China.
- [4] Dubiński J., Solik-Heliasz E. (2007), Uwarunkowania geologiczne dla składowania dwutlenku węgla [w:] Uwarunkowania wdrożenia zeroemisyjnych technologii węglowych w energetyce. Praca zbiorowa pod red. M. Ściążko. Wyd. IChPW, Zabrze.
- [5] Global CCS Institute (2012), The Global Status of CCS: 2012, Canberra, Australia.
- [6] IPCC (2008), Report „Energy Technology Perspectives. Scenarios & Strategies to 2050”, ODCE
- [7] IPCC (2005), Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press.
- [8] Państwowy Instytut Geologiczny (2012), Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania - raport końcowy. <https://skladowanie.pgi.gov.pl/>
- [9] Pazdro Z., Kozerski B. (1990), Hydrogeologia ogólna. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.
- [10] Polska Konfederacja Pracodawców Prywatnych Lewiatan (2010), Technologia wychwytywania i geologicznego składowania dwutlenku węgla (CCS) sposobem na złagodzenie zmian klimatu. Raport na zlecenie Polskiej Konfederacji Pracodawców Prywatnych Lewiatan przy wsparciu funduszu brytyjskiego Ministerstwa Spraw Zagranicznych, Warszawa.
- [11] Rybicki C., Łaciak M. (2008), Transport rurociągowy CO<sub>2</sub>, *Rurociągi* nr 4(54).
- [12] Słownik Hydrogeologiczny (2002), Praca zbiorowa pod red. J. Dowgiałto i inni. PiG, Warszawa.
- [13] Studium bezpiecznego składowania dwutlenku węgla na przykładzie Aglomeracji śląskiej (2010). Praca zbiorowa pod redakcją J. Wachowicza, Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- [14] Witczak S., Adamczyk A.F. (1994), Katalog wybranych fizycznych i chemicznych wskaźników zanieczyszczeń wód podziemnych i metod ich oznaczania. Tom I, II. Biblioteka Monitoringu Środowiska PIOŚ, Warszawa.

