

Geologiczne składowanie dwutlenku węgla – narzędzie łagodzenia globalnych zmian klimatu

Streszczenie

Globalne ocieplenie wynikające z dużej emisji gazów cieplarnianych jest faktem potwierdzonym licznymi badaniami. Jednym ze sposobów ograniczenia emisji CO₂ jednego z głównych gazów cieplarnianych jest technologia wychwytu, transportu oraz geologicznego składowania CO₂. Jest to technologia umożliwiająca składowanie dużych ilości dwutlenku węgla w poziomach wodonośnych, złożach węglowodorów oraz pokładach węgla. Struktury geologiczne przeznaczone do składowania CO₂ powinny cechować się: odpowiednimi właściwościami petrofizycznymi, odpowiednią głębokością zalegania, miąższością i pojemnością formacji przeznaczonej do składowania, znaczną rozległością poziomą, a także szczelnością. Dwutlenek węgla w strukturach geologicznych jest unieruchamiany przy udziale różnych mechanizmów pułapkowania. Oceny pojemności składowania dwutlenku węgla w strukturach geologicznych na terenie Polski wykazały, że największy potencjał mają mezozoiczne poziomy wodonośne Niżu Polskiego.

Słowa kluczowe:

geologiczne składowanie CO₂, mechanizmy pułapkowania, pojemność składowania, Polska

Abstract

Global warming resulting from high greenhouse gas emissions is a fact confirmed by numerous studies. One of the ways to reduce CO₂ emissions, one of the main greenhouse gases, is the technology of capture, transport and geological storage of CO₂. This is a technology that enables the storage of large amounts of carbon dioxide in aquifers, hydrocarbon deposits and coal seams. Geological structures intended for CO₂ storage should be characterized by: appropriate petrophysical properties, appropriate depth, thickness and capacity of the formation intended for storage, significant horizontal extent, and tightness. Carbon dioxide in geological structures is immobilized using various trapping mechanisms. Assessments of the carbon dioxide storage capacity in geological structures in Poland have shown that the Mesozoic aquifers of the Polish Lowlands have the greatest potential.

Keywords:

geological CO₂ storage, trapping mechanisms, storage capacity, Poland

1. Wprowadzenie

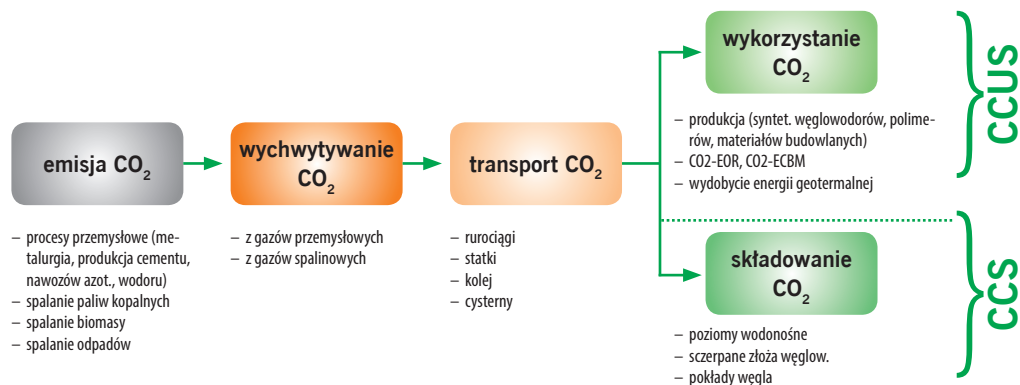
Zmiany klimatu zachodzące na całym globie są faktem, niekwestionowanym przez większość naukowców. Za ich główną przyczyną przyjmuje się antropogeniczną emisję do atmosfery gazów cieplarnianych (Myhre et al. 2014, Bindoff et al. 2014). Średnia temperatura na świecie wzrosła w latach 2011-2020 o 1,1°C powyżej poziomu temperatury sprzed epoki przemysłowej. Szacunki przedstawione w 6 Raporcie IPCC wskazują, że emisja gazów cieplarnianych może doprowadzić w najbliższej perspektywie do wzrostu temperatury o 1,5°C i nasilenia globalnego ocieplenia. Jednym ze sposobów spowolnienia globalnego ocieplenia jest redukcja emisji gazów cieplarnianych. Zmniejszenie emisji ma także spowodować zauważalne zmiany w składzie atmosfery w ciągu kilku lat (IPCC 2023).

Jednym ze sposobów łagodzenia globalnych zmian klimatu jest przejście z wykorzystania paliw kopalnych bez wychwytywania i składowania dwutlenku

węgla (CCS – Carbon, Capture, & Storage) na źródła energii o bardzo niskiej lub zerowej emisji dwutlenku węgla (odnawialne źródła energii lub paliwa kopalne z CCS) (IPCC 2023). Zgodnie z Dyrektywą UE proces CCS polega na wychwytywaniu dwutlenku węgla (CO₂) z instalacji przemysłowych, jego transporcie na składowisko i zatłoczeniu do odpowiedniej podziemnej formacji geologicznej w celu stałego składowania (Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the Geological Storage of Carbon Dioxide 2009).

Obecnie rozwijana jest także technologia wychwytu, składowania i wykorzystania CO₂ (Carbon, Capture, Utilization & Storage – CCUS). W technologii CCUS dwutlenek węgla wychwycony w procesie produkcyjnym jest wprowadzany do nowego procesu produkcyjnego. Gaz ten może zostać przetworzony i wykorzystany na różne sposoby. CCUS umożliwia recykling CO₂ i generowanie korzyści ekonomicznych (Fu et al. 2022). Wychwycony CO₂ może być wykorzystany do produkcji (np. syntetycznych węglowodorów, polimerów), wspomaganego wydobycia ropy naftowej, metanu oraz energii geotermalnej. Technologia CCS/CCUS daje możliwość ograniczenia emisji z wielkoskalowych źródeł emisji z zakładów energetycznych opartych na paliwach kopalnych i ze źródeł przemysłowych. Wychwytywanie, częściowe wykorzystanie i składowanie dwutlenku węgla jest uważane obecnie za kluczową technologię umożliwiającą redukcję emisji CO₂ w sektorze energetycznym, a także w przemyśle cementowym, chemicznym czy hutniczym. Szacuje się, że globalny potencjał geologicznego składowania CO₂ jest rzędu 1000 Gt, czyli zgodnie z szacunkami IPCC, więcej niż zapotrzebowanie na składowanie dwutlenku węgla do 2100 r., co teoretycznie pozwoli ograniczyć globalne ocieplenie do 1,5°C. Jednak potencjał geologicznego składowania CO₂ w poszczególnych regionach jest zróżnicowany i może być czynnikiem ograniczającym wdrożenie tej technologii. Zastosowanie technologii CCS na skalę przemysłową napotyka obecnie bariery technologiczne, ekonomiczne, prawne, środowiskowe i społeczne. Obecnie tempo wdrażania wychwytu i składowania CO₂ jest znacznie niższe niż w modelach IPCC, które zakładają ograniczenie globalne-

Rys. 1. Łańcuch technologii CCS/CCUS



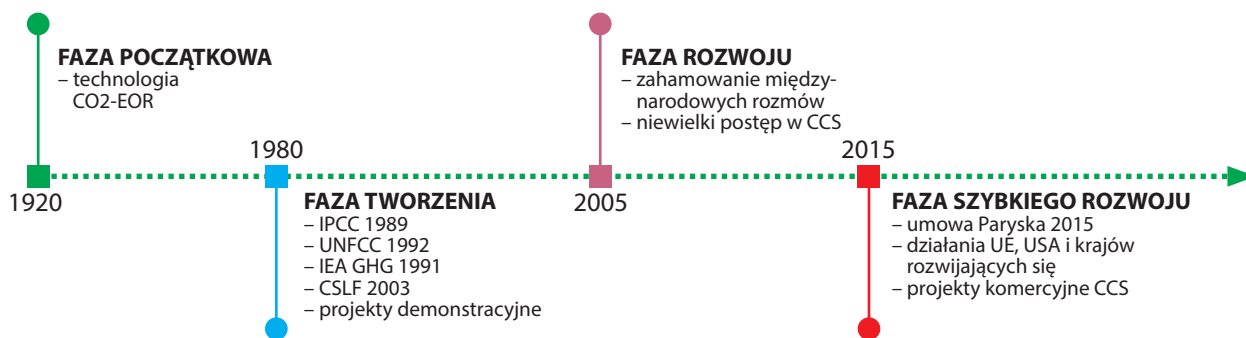
go ocieplenia do 1,5-2°C. Rozwój technologii CCS wymaga stworzenia sprzyjających warunków: odpowiednich instrumentów politycznych, większego wsparcia publicznego, innowacji technologicznych i społecznej akceptacji (IPCC 2023). Dane dotyczące wymagań podawane przez Global CCS Institute (2022) wskazują na konieczność wychwytu i składowania podziemnego 10 Gt CO₂ rocznie w roku 2050, co jest prawdopodobnie mało realistyczne (<https://www.globalccsinstitute.com/>).

2. Historia rozwoju technologii CCS/CCUS

Koncepcja wychwytywania, transportu i składowania CO₂ jako sposobu na redukcję antropogenicznej emisji CO₂ po raz pierwszy została zaproponowana przez Marchettiego (Marchetti 1977). Do początku XXI wieku technologia CCS była na wstępnym etapie rozwoju (rys. 2). W latach 90. XX wieku prowadzono prace badawcze dotyczące wychwytywania CO₂ z gazów spalinowych (Hendriks, C. 1994) i przemysłowych (Farla et al. 1995), podziemnego składowania (Koide et al. 1992, van der Meer 1992, Bachu, Stefan et al. 1994) oraz mineralnej karbonatyzacji. Wynikało to ze wzrostu zainteresowania społecznością międzynarodowej problemem globalnego ocieplenia i konieczności przeciwdziałania zmianom klimatycznym. Pod koniec lat 90. XX i na początku XXI wieku uruchomiono pierwsze komercyjne projekty składowania dwutlenku węgla, norweski projekt Sleipner (1996 r.) i kanadyjski projekt *Weyburn-Midale Carbon Dioxide Project* (2000 r.) (Ma, Jinfeng et al. 2022). Rozwój technologii CCS został zahamowany na kilkanaście lat i było to związane głównie z brakiem odpowiednich standardów technicznych oraz podziałem odpowiedzialności za redukcję emisji. Dopiero nasilenie zmian klimatycznych obserwowane w XXI wieku skłoniło społeczność międzynarodową do podjęcia bardziej aktywnych działań związanych z obniżeniem antropogenicznej emisji CO₂, w tym geologicznym składowaniem tego gazu (IPCC et al. 2014, UNFCCC 2015). Technologia CCS stała się naukowo uznaną techniką redukcji emisji. Powstały międzynarodowe organizacje CCUS, takie jak *Carbon Sequestration Leadership Forum* (2003 r.) oraz *Global CCS Institute* (2009 r.). Większego tempa nabrała także realizacja projektów CCS, w tym projektów demonstracyjnych. Obecnie na świecie działa około 40 obiektów komercyjnych CCUS w procesach przemysłowych, przetwarzaniu paliw i wytwarzania energii. Roczna zdolność wychwytywania dwutlenku węgla z komercyjnych instalacji wychwytywania przekracza 45 Mt CO₂. Od stycznia 2022 r. uruchomiono siedem nowych instalacji wychwytywania na dużą skalę (zdolność wychwytywania ponad 1 mln t CO₂/rok i ponad 1000 t CO₂/rok w przypadku zastosowań DAC) w Stanach Zjednoczonych, Belgii, Chinach (IEA 2023). Na świecie działa 9 komercyjnych instalacji zatlaczania (składowania) dwutlenku węgla. Rocznie jest w nich składowane około 10 Mt CO₂. Większość dwutlenku węgla jest zatlaczane w ramach projektów wspomagania wydobycia ropy naftowej CO₂ – 80% całkowitej ilości zatloczonego CO₂). Przewiduje się, że w 2030 roku ilość zatlaczanego dwutlenku węgla w tych instalacjach obniży się do około 10% (IEA 2024a).

Na łańcuchach technologii CCS/CCUS składają się następujące elementy (rys. 1): wychwyt, transport, składowanie lub wykorzystanie dwutlenku węgla. Dwutlenek węgla może być wychwytywany z instalacji energetyki zawodowej oraz ze źródeł przemysłowych (w tym hut, cementowni, rafinerii, zakładów chemicznych oraz innych punktowych przemysłowych źródeł emisji CO₂ do atmosfery). Aktualnie zakłada się, że CO₂ można także wychwytywać ze źródeł wykorzystujących bioenergię w procesach energetycznych i przemysłowych (BECCUS – *Bio-Energy CCUS*) lub bezpośrednio usuwać z atmosfery (DAC – *Direct Air Capture*), a także w ramach integracji procesowej (np. ze źródłami przemysłowej energii odpadowej) (Gładysz et al. 2021). Zawartość dwutlenku węgla w gazach emitowanych z różnych procesów jest zróżnicowana od kilku do kilkudziesięciu procent. Obecnie istnieją technologie pozwalające na otrzymanie skoncentrowanego strumienia dwutlenku węgla (90% CO₂): wychwytywanie przed spalaniem, wychwytywanie po spalaniu i tlenowe spalanie węgla. Oddzielenie dwutlenku węgla od gazów spalinowych/przemysłowych jest możliwe na drodze: absorpcji chemicznej i fizycznej, adsorpcji fizycznej, frakcjonowania kriogenicznego i separacji membranowej (Fu et al. 2022). Jednym z najbardziej perspektywicznych rozwiązań jest wdrożenie technologii cyklu Allama-Fetvedta (AFC) (NET Power 2023). Wspomniany cykl AFC wychwytuje ponad 97% CO₂, który może być następnie wykorzystany (w procesach CCUS) lub sekwestrowany geologicznie (CCS), przekształcając paliwo gazowe (kopalny gaz ziemny) w czystą energię elektryczną. W warunkach przemysłowych firma „NET Power” potwierdziła sprawność powyżej 50% w instalacji 50 MW, natomiast w instalacji 300 MW nowa wersja cyklu AFC ma osiągnąć sprawność na poziomie 60%.

Transport dwutlenku węgla od miejsc wychwytu do miejsc składowania/wykorzystania będzie odbywał się, w zależności od ilości przesyłanego gazu i odległości, rurociągami, tankowcami i cysternami. Obecnie przewiduje się budowę hubów transportowych CO₂ integrujących różne opcje w jeden system do przesyłu dwutlenku węgla do miejsc składowania lub wykorzystania (Gładysz et al. 2021). Dwutlenek węgla może być także unieszkodliwiany w ekosystemie ziemskim, oceanach oraz w głębokich strukturach geologicznych. Spośród wymienionych opcji, podziemne (geologiczne) składowanie dwutlenku węgla jest uważane za technologię umożliwiającą trwałe odizolowanie dużych ilości dwutlenku węgla. Podziemne składowanie polega na zatlaczaniu CO₂ do głębokich struktur geologicznych: poziomów wodonośnych, złóż węglowodórów, nieeksploatowanych pokładów węgla (Metz et al. 2005). Drugim rozważanym sposobem jest sekwestracja mineralna (karbonatyzacja). Polegająca na reakcji CO₂ z minerałami lub odpadami mineralnymi, w wyniku której powstają trwałe związki węglanowe. Wiązanie dwutlenku węgla w skałach i surowcach mineralnych (np. talk czy serpentyn) jest zjawiskiem występującym w przyrodzie. Dwutlenek węgla może być także wiązany w odpadach mineralnych (np. odpady betonowe, popioły lot-



Rys. 2. Fazy rozwoju technologii CCS/CCSU [na podst. (Jiutian et al. 2022)]

ne, odpady azbestowe i żużle hutnicze). Pomimo ograniczonych ilości gazu, jakie można unieszkodliwić tą drogą, sekwestracja mineralna ma liczne zalety, w tym stabilność warunków składowania przez długi czas (trwałe związanie CO₂) oraz neutralność dla środowiska węglanów powstających w procesie karbonatyzacji (Uliasz-Bocheńczyk and Mokrzycki 2013, Uliasz-Bocheńczyk 2009).

Technologia wychwytywania i zatłaczania CO₂ jest wykorzystywana w przemyśle naftowym od dawna. Już w latach dwudziestych XX wieku zaczęto wychwytywać CO₂ z gazu wydobywanego ze złóż gazu ziemnego. Rozwój wychwytywania CO₂ nastąpił w latach 70. XX wieku w związku z rozwojem technologii zaawansowanego wydobycia ropy naftowej (CO₂ Enhanced Oil Recovery – CO₂-EOR). W celu uzyskania większego stopnia szczypania zasobów do złóż ropy naftowej zaczęto zatłaczać CO₂ (Fu et al. 2022). Gaz zatłaczany do złóż ropy naftowej początkowo był pochodzenia naturalnego lub był pozyskiwany w procesach oczyszczania gazu ziemnego. Obecnie działają instalacje bazujące na dwutlenku węgla wychwyconym w procesach przemysłowych. Jest to technologia uważana za prototyp całego łańcucha CCUS. Według danych IEA w 2017 roku na świecie działało 166 instalacji CO₂-EOR (IEA 2024b).

3. Miejsca podziemnego składowania CO₂

Dwutlenek węgla w warunkach normalnych jest gazem o gęstości około 1,95 kg/m³. W strukturach geologicznych zalegających na większych głębokościach (wyższe ciśnienie i temperatura) jego właściwości ulegają zmianom. Składowanie CO₂ powinno być prowadzone w fazie gazowej¹ (temperatura >31,1°C i ciśnienie > 7,38 MPa). Ze względu na mniejszą mobilność niż w obszarze dwufazowym czy fazie gazowej (Metz et al. 2005). Zależnie od temperatury i ciśnienia złożowego, jakie panują w danym regionie geologicznym, przyjmuje się, że minimalna głębokość zalegania struktury geologicznej odpowiedniej do składowania CO₂, wynosi 800-1000 m p.p.t. Na tych głębokościach gęstość zatłoczonego w fazie ciekłej (lub gazowej) dwutlenku węgla pozostaje powyżej ciśnienia krytycznego 7,4 MPa w fazie ciekłej (stan „okołokrytyczny” („near critical”, „dense phase”) (tj. 25-30°C) lub w stanie nadkrytycznym (powyżej 31°C) w fazie gazowej. Maksymalne głębokości składowania CO₂ (głębokość do 3000-3400 m

p.p.t.) są związane z właściwościami zbiornikowymi składowiska (pogorszenie właściwości zbiornikowych) oraz dużymi kosztami zatłaczania.

Struktury geologiczne przeznaczone na miejsca podziemnego składowania dwutlenku węgla muszą się charakteryzować: odpowiednim układem formacji skalnych (skała zbiornikowa przykryta skałą uszczelniającą); odpowiednią głębokością zalegania, miąższością i pojemnością formacji przeznaczonej do składowania; szczelnością obiektu; brakiem niekorzystnego wpływu występujących w górotworze zjawisk naturalnych (Tarkowski, R. et al. 2021, Schultz et al. 2023). Skała, która ma być miejscem składowania CO₂, musi się charakteryzować jednocześnie wysoką porowatością oraz przepuszczalnością. Porowatość określa ilość wolnej przestrzeni w skale, możliwej do wykorzystania np. dla magazynowania gazów lub energii. Przepuszczalność zaś wskazuje na możliwość przepływu gazu przez formację skalną, determinuje także szybkość jego zatłaczania. Istotnym czynnikiem warunkującym możliwość składowania CO₂ jest izolacja warstwy chłonnej praktycznie nieprzepuszczalnym stropem o miąższości kilkunastu i więcej metrów, który będzie ograniczał migrację poza formację zbiornikową (Chen et al. 2014, Shukla et al. 2010). Skałami o najlepszych właściwościach uszczelniających są: sole, anhydryty i skały ilaste. Formacja skalna przeznaczona do składowania CO₂ nie powinna być zaangażowana tektonicznie (brak uskoku), ponieważ występowanie przerwania ciągłości warstw skalnych może stanowić drogi ucieczki gazu ku powierzchni.

Miejscami podziemnego składowania dwutlenku są: solankowe poziomy wodonośne, złoża węglowodorów, nieeksploatowane pokłady węgla. Solankowe głęboko zalegające poziomy wodonośne (głębokość > 800 – 1000 m), gdzie skałami zbiornikowymi są przeważnie piaskowce. Charakteryzują się one dużym rozprzestrzenieniem (występują powszechnie w basenach sedymentacyjnych) oraz dużym potencjałem składowania dwutlenku węgla. Struktury w poziomach wodonośnych mogą „pomieścić” wieloletnią emisję dużych zakładów przemysłowych (setki milionów ton dla pojedynczej struktury). Niestety, w większości ich budowa geologiczna jest słabo rozpoznana, co powoduje, że przed przystąpieniem do zatłaczania CO₂ muszą być szczegółowo przebadane. Kosztowne badania są konieczne do potwierdzenia nie tylko możliwości

¹ W niektórych publikacjach pojawia się nazwa fazy jako „nadkrytyczna”, czy „superkrytyczna”. W rzeczywistości „faza nadkrytyczna” nie jest fazą w sensie termodynamicznym, termin ten odnosi się do stanu PVT termodynamicznego fazy gazowej powyżej temperatury krytycznej. Transport i zatłaczanie CO₂ mogą być realizowane w fazie ciekłej lub gazowej. Niekiedy przywołuje się termin „dense phase” jako tzw. „fazy gęstej” odnoszący się do fazy ciekłej powyżej ciśnienia krytycznego 7,4 MPa. Pojęcie „dense phase” jest niepoprawne w sensie termodynamicznym. Powyżej ciśnienia krytycznego zmiana temperatury nie powoduje skokowych zmian gęstości wywołanych zmianą faz termodynamicznych

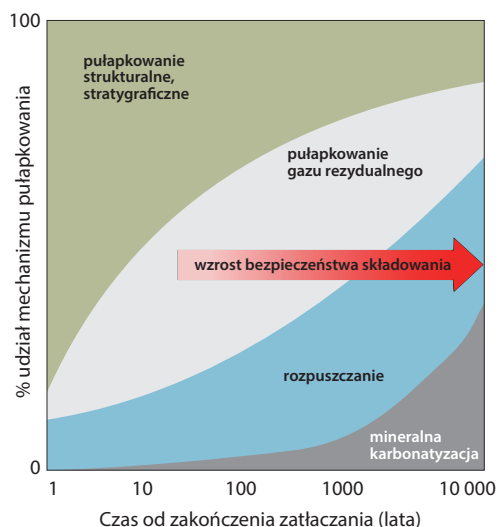
zatlaczania, ale także szczelności tych struktur. Złoża ropy naftowej i gazu ziemnego w różnym stopniu szcerpane są dobrze rozpoznane. Są to struktury (zwłaszcza złoża gazu) uważane za bezpieczne miejsca składowania dwutlenku węgla. Złoża ropy naftowej i gazu ziemnego są mniej rozprzestrzenione niż struktury w poziomach wodonośnych. Cechują się one w większości mniejszym potencjałem składowania CO₂. Węglowodory były w nich zakumulowane przez długi czas, setki tysięcy, a nawet miliony lat. Jako miejsca składowania CO₂ rozważane są także głębokie, nieeksploatowane pokłady węgla. W przypadku pokładów węgla zawierających metan, CO₂ będzie wypierał CH₄ zaadsorbowany na matrycy węglowej. W rezultacie z pokładu węgla będzie uwalniany gaz wysokometanowy.

W czasie składowania dwutlenku węgla działają różne mechanizmy pułapkowania CO₂ (Bachu, S. and Adams 2003, Potdar and Vishal 2016, Zhang, D. and Song 2015). Dwutlenek węgla zatlaczany do formacji wodonośnej migruje w górę pod wpływem sił wyporu i w przypadku występowania uszczelniającego nadkładu jest pułapkowany w strukturze geologicznej (Metz et al. 2005). Rozpuszczanie dwutlenku węgla jest wskazywane jako jeden z kluczowych mechanizmów pułapkowania (Ang et al. 2022, Iglauer 2011, Szulczewski et al. 2013). Pułapkowanie gazu rezydualnego występuje wtedy, gdy CO₂ migrując przez skały zbiornika jest trwale wiązany w wyniku działania sił napięcia powierzchniowego. Rozpuszczanie występuje wtedy, gdy CO₂ rozpuszcza się w wodzie lub w ropie naftowej wypełniających pustki w skale (Metz et al. 2005). Okresy oddziaływania poszczególnych mechanizmów pułapkowania w procesie podziemnego składowania CO₂ (rys. 3) są różne. Kilka z nich działa natychmiast, w czasie i po zatlaczaniu: fizyczne pułapkowanie, gaz rezydualny, hydrodynamiczne i adsorpcyjne pułapkowanie. Mechanizmy chemicznego pułapkowania, takie jak rozpuszczanie i wytrącanie minerałów, działają w dużo dłuższym okresie, rzędu setek tysięcy lat. W zależności od rodzaju struktury, jaka będzie wykorzystana do składowania CO₂ może być on unieszkodliwiany poprzez kombinację różnych mechanizmów.

Wymienione procesy zachodzące w miejscu składowania CO₂, łącznie z odpowiednim uszczelnieniem, prawidłowo prowadzonym zatlaczaniem i monitoringiem składowiska CO₂ w czasie i po zakończeniu zatlaczania, gwarantują bezpieczeństwo tego procesu (brak wycieku gazu poza miejsce składowania i brak emisji do atmosfery) zgodnie z zapisami Dyrektywy CCS (Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the Geological Storage of Carbon Dioxide 2009).

4. Potencjał składowania CO₂ w głębokich poziomach wodonośnych na terenie Polski

Prace związane z rozpoznaniem potencjału geologicznego składowania dwutlenku węgla w Polsce prowadzone są od 2003 roku. Wyniki projektów krajowych i zagranicznych wskazują, że istnieją możliwości składowania CO₂ w głębokich poziomach wodonośnych (solankowych), szcerpanych złożach węglowodorów (ropy naftowej i gazu ziemnego) oraz głębokich nieeksploatowanych pokładach węgla [Tarkowski, R. and Uliasz-Misiak, B.



Rys. 3. Oddziaływanie różnych mechanizmów pułapkowania CO₂ w zależności od czasu [(Metz et al. 2005) ze zmianami]

2006, Tarkowski, R. et al. 2009, Uliasz-Misiak, B. 2008, Wójcicki (koordynator) 2013].

W latach 2005-2013 dokonano wstępnej oceny pojemności składowania CO₂ w poziomach wodonośnych solankowych w ośmiu rejonach kraju (formacje permsko-mezozoiczne w czterech rejonach Polski: Bełchatowa, Warszawy, Wielkopolski-Kujaw i NW Polski; formacje paleozoiczne: górnośląskiego zagłębia węglowego (GZW) i jego otoczenia, Lubelszczyzny, wyniesienia Łęby wraz z sąsiednim obszarem polskiej strefy ekonomicznej Bałtyku; formacje mezozoiku i paleozoiku podłoża brzeżnej strefy Karpat i zapadliska przedkarpackiego) oraz dwóch pozostałych opcji geologicznego składowania CO₂ (szcerpane i nieekonomiczne złoża węglowodorów, głównie w zachodniej i SE Polsce; głębokie nieeksploatowane pokłady węgla, głównie w GZW) [Wójcicki (koordynator) 2013].

Jako najbardziej perspektywiczne do geologicznego składowania dwutlenku węgla wskazano mezozoiczne poziomy wodonośne Niżu Polskiego (w centralnej i północnej Polsce) (rys. 4). W poziomach wodonośnych wstępnie wytypowano od kilkunastu kilkadziesiąt struktur antyklinalnych (w zależności od opracowania od 18 do 48) (Tarkowski, Radosław et al. 2010).

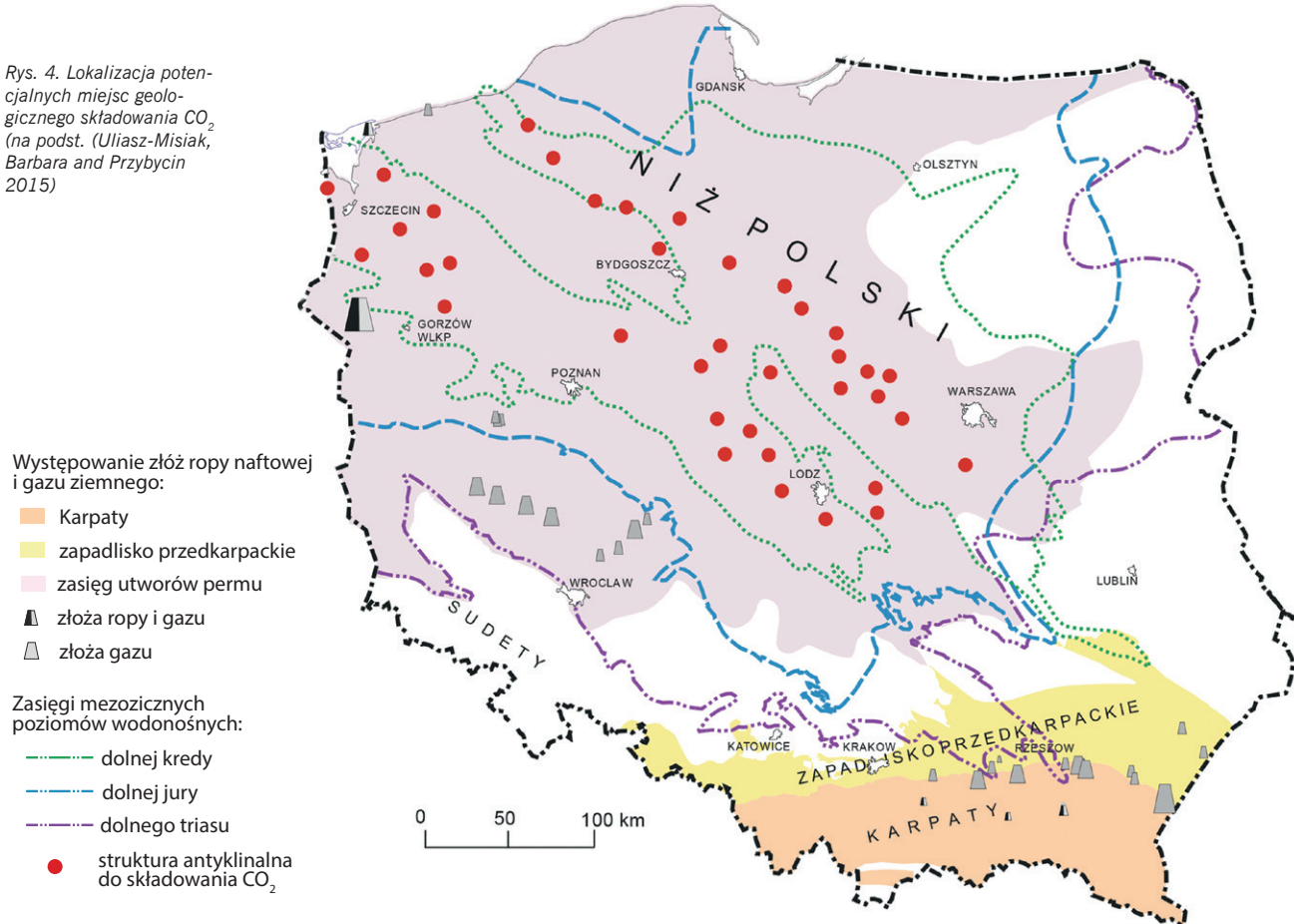
W ramach projektu pt. „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania” oszacowano pojemności składowania struktur antyklinalnych w poziomach wodonośnych na terenie Polski (tab. 1). Całkowita pojemność badanych struktur ma ok. 14,5 Gt [14 (Wójcicki (koordynator) 2013)].

Złoża węglowodorów w Polsce są zlokalizowane w dwóch obszarach Karpat i zapadliska przedkarpackiego (część SE Polski) oraz w zachodniej

Formacja	Pojemność składowania [mln t CO ₂]
miocen	69
kreda	2486
jura	6452
trias	1460
perm	1014
karbon górny-dewon górny	369
kambr	2645

Tab. 1. Szacunkowa pojemność wybranych struktur aquiferowych w zależności od wybranych formacji wodonośnych (Wójcicki et al., 2013)

Rys. 4. Lokalizacja potencjalnych miejsc geologicznego składowania CO₂ (na podst. (Uliasz-Misiak, Barbara and Przybycin 2015)



i północno-zachodniej części kraju. Pojemności składowania CO₂ w poszczególnych złożach węglowodorowych wynoszą od kilku do kilkudziesięciu mln ton gazu. Sumaryczny potencjał składowania dwutlenku węgla oszacowano na około 1 mld ton CO₂ (pojemność efektywna), z tego rzędu 5% dla złóż ropy. Potencjał składowania w złożach węglowodorów jest kilka rzędów mniejszy niż w strukturach w mezozoicznych poziomach wodonośnych [Uliasz-Misiak, B. 2008, Wójcicki (koordynator) 2013].

Polska posiada duży potencjał możliwości składowania CO₂ w strukturach lądowych i podmorskich przewyższających potrzeby przemysłu na składowanie CO₂ w następnych latach – do końca XXI wieku. Kwestie dalszego rozpoznania i przygotowania inwestycji związanych z projektowaniem procesu zatłaczania CO₂ do głębokich struktur określa Dyrektywa CCS i znowelizowana ustawa Prawo geologiczne i górnicze (Prawo geologiczne i górnicze 2011).

prof. dr hab. inż. Barbara Uliasz-Misiak
Akademia Górniczo-Hutnicza Kraków

Literatura:

1. Ang, L., Yongming, L., Xi, C., Zhongyi, Z., and Yu, P. (2022) „Review of CO₂ Sequestration Mechanism in Saline Aquifers”. *Natural Gas Industry B* 9 (4), 383-393
2. Bachu, S. and 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), 3151-3175
3. Bachu, Stefan, Gunter, W.D., and Perkins, E.H. (1994) „Aquifer Disposal of CO₂: Hydrodynamic and Mineral Trapping”. *Energy Conversion and Management* 35 (4), 269-279
4. Bindoff, N.L., Stott, P.A., AchutaRao, K.M., Allen, M.R., Gillett, N., Gutzler, D., Hansingo, K., Hegerl, G., Hu, Y., Jain, S., Mokhov, I.I., Overland, J., Perlwitz, J., Sebbari, R., and Zhang, X. (2014) „Detection and Attribution of Climate Change: From Global to Regional”. in *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. ed. by Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P.M. Cambridge: Cambridge University Press, 867-952
5. Chen, Z., Zhou, F., and Rahman, S.S. (2014) „Effect of Cap Rock Thickness and Permeability on Geological Storage of CO₂: Laboratory Test and Numerical Simulation”. *Energy Exploration & Exploitation* 32 (6), 943-964
6. Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the Geological Storage of Carbon Dioxide (2009) *Official Journal of the European Union* L140
7. Farla, J.C.M., Hendriks, C.A., and Blok, K. (1995) „Carbon Dioxide Recovery from Industrial Processes”. *Climatic Change* 29 (4), 439-461
8. Fu, L., Ren, Z., Si, W., Ma, Q., Huang, W., Liao, K., Huang, Z., Wang, Y., Li, J., and Xu, P. (2022) „Research Progress on CO₂ Capture and Utilization Technology”. *Journal of CO₂ Utilization* 66, 102260
9. Gładysz, P., Nowak, W., Bukowski, M., Śniegocki, A., and Bączyk, A. (2021) „Rola technologii wychwytu, transportu, utylizacji i składowania CO₂ w drodze do osiągnięcia neutralności klimatycznej”. *Nowa Energia* nr 3
10. Hendriks, C. (1994) *Carbon Dioxide Removal from Coal-Fired Power Plants*. 1
11. IEA (2023) *Tracking Clean Energy Progress 2023*, IEA Paris [online] available from <<https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>> [8 January 2024]
12. IEA (2024a) *Carbon Capture, Utilisation and Sto-*

- rage – Energy System – IEA [online] available from <<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>> [8 January 2024]
13. IEA (2024b) Number of EOR Projects [online] available from <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/number-of-eor-projects-in-operation-globally-1971-2017>> [23 January 2024]
 14. Iglaue, S. (2011) *Dissolution Trapping of Carbon Dioxide in Reservoir Formation Brine – A Carbon Storage Mechanism*. ed. by Nakajima, H. IntechOpen
 15. IPCC (2023) *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. ed. by Lee, H. and Romero, J. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change
 16. IPCC, Pachauri, R.K., and Meyer, L.A. (eds. (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. ed. by Pachauri, R.K. and Meyer, L.A. Geneva: IPCC
 17. Jiutian, Z., Zhiyong, W., Jia-Ning, K., Xiangjing, S., and Dong, X. (2022) „Several Key Issues for CCUS Development in China Targeting Carbon Neutrality”. *Carbon Neutrality* 1 (1), 1–20
 18. Koide, H., Tazaki, Y., Noguchi, Y., Nakayama, S., Iijima, M., Ito, K., and Shindo, Y. (1992) „Subterranean Containment and Long-Term Storage of Carbon Dioxide in Unused Aquifers and in Depleted Natural Gas Reservoirs”. *Energy Conversion and Management* 33 (5-8), 619-626
 19. Ma, Jinfeng, Li, L., Wang, H., Du, Y., Ma, Junjie, Zhang, Xiaoli, and Wang, Z. (2022) „Carbon Capture and Storage: History and the Road Ahead”. *Engineering* 14, 33-43
 20. Marchetti, C. (1977) „On Geoengineering and the CO₂ Problem”. *Climatic Change* 1 (1), 59-68
 21. van der Meer, L.G.H. (1992) „Investigations Regarding the Storage of Carbon Dioxide in Aquifers in the Netherlands”. *Energy Conversion and Management* 33 (5-8), 611-618
 22. Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H.C., Loos, M., and Meyer, L. (2005) *IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York
 23. Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., and Zhang, H. (2014) „Anthropogenic and Natural Radiative Forcing”. in *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. ed. by Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P.M. Cambridge: Cambridge University Press, 659-740
 24. NET Power (2023) *NET Power Consolidates Business to Gear Up for Allam Cycle Power Plant Deployment* [online] available from <<https://www.powermag.com/net-power-consolidates-business-to-gear-up-for-allam-cycle-power-plant-deployment/>> [18 January 2024]
 25. Potdar, R.S. and Vishal, V. (2016) „Trapping Mechanism of CO₂ Storage in Deep Saline Aquifers: Brief Review”. *Geologic Carbon Sequestration: Understanding Reservoir Behavior* 47-58
 26. Prawo Geologiczne i Górnicze (2011)
 27. Schultz, R.A., Heinemann, N., Horváth, B., Wickens, J., Miodic, J.M., Babarinde, O.O., Cao, W., Capuano, P., Dewers, T.A., Dusseault, M., Edlmann, K., Goswick, R.A., Hassanpouryouzband, A., Husain, T., Jin, W., Meng, J., Kim, S., Molaei, F., Odunlami, T., Prasad, U., Lei, Q., Schwartz, B.A., Segura, J.M., Soroush, H., Voegeli, S., Williams-Stroud, S., Yu, H., and Zhao, Q. (2023) „An Overview of Underground Energy-Related Product Storage and Sequestration”. *Geological Society, London, Special Publications* 528 (1), 15-35
 28. Shukla, R., Ranjith, P., Haque, A., and Choi, X. (2010) „A Review of Studies on CO₂ Sequestration and Caprock Integrity”. *Fuel* 89 (10), 2651-2664
 29. Szulczewski, M.L., Hesse, M.A., and Juanes, R. (2013) „Carbon Dioxide Dissolution in Structural and Stratigraphic Traps”. *Journal of Fluid Mechanics* 736, 287-315
 30. Tarkowski, R. and Uliasz-Misiak, B. (2006) „Possibilities of CO₂ Sequestration by Storage in Geological Media of Major Deep Aquifers in Poland”. *Chemical Engineering Research and Design* 84 (9 A)
 31. Tarkowski, R., Uliasz-Misiak, B., and Tarkowski, P. (2021) „Storage of Hydrogen, Natural Gas, and Carbon Dioxide – Geological and Legal Conditions”. *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (38), 20010-20022
 32. Tarkowski, R., Uliasz-Misiak, B., and Wójcicki, A. (2009) „Projekt EU GeoCapacity – założenia oraz główne wyniki projektu”. in *Mat. II Konferencji „Geologia, Hydrogeologia i Geofizyka w Rozwiązywaniu problemów górnictwa i energetyki”*. held September 2009 at Katowice – Kroczyce – Podlesice. Główny Instytut Górnictwa, 239-247
 33. Tarkowski, Radosław, Dziwińska, L., Marek, S., and Uliasz-Misiak, Barbara (2010) „Potencjalne struktury geologiczne do składowania CO₂ w utworach mezozoiku Niżu Polskiego: (Charakterystyka Oraz Ranking)”. *Studia Rozprawy Monografie* 138, 1-138
 34. Uliasz-Bocheńczyk, A. (2009) *Mineralna Sekwestracja CO₂ w Wybranych Odpadach*. 1st edn. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN
 35. Uliasz-Bocheńczyk, A. and Mokrzycki, E. (2013) „Mineralna sekwestracja CO₂ przy zastosowaniu odpadów energetycznych – próba oszacowania potencjału w Polsce”. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 29 (3), 179-189
 36. Uliasz-Misiak, B. (2008) „Pojemność podziemnego składowania CO₂ dla wybranych mezozoicznych poziomów wodonośnych oraz złóż węglowodorów w Polsce” | Request PDF. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN
 37. Uliasz-Misiak, Barbara and Przybycin, A. (2015) „The Perspectives and Barriers for the Implementation of CCS in Poland”. *Greenhouse Gases: Science and Technology* [online] 6 (1), 7-18. available from <<http://doi.wiley.com/10.1002/ghg.1536>> [5 April 2020]
 38. UNFCCC (2015) *Adoption of the Paris Agreement: Draft Decision*. Geneva: UNFCCC. Conference of the Parties (COP), 1–32. available from <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement/key-aspects-of-the-paris-agreement>> [10 May 2022]
 39. Wójcicki (koordynator), A. (2013) „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania – raport końcowy – segment I (regionalny) [online] Warszawa. available from <skladowanie.pig.gov.pl> [27 September 2023]
 40. Zhang, D. and Song, J. (2015) „Mechanisms for Geological Carbon Sequestration”. *Procedia IUTAM* 10, 319-327