



**Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy**
państwowa służba geologiczna

RAPORT CZĄSTKOWY Z REALIZACJI PRZEDSIĘWZIĘCIA Z ZAKRESU PAŃSTWOWEJ SŁUŻBY GEOLOGICZNEJ

**„Zadanie Krajowego Administratora Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla (KAPS CO₂):
Monitorowanie podziemnych składowisk CO₂”**

w ramach umowy dotacji nr 122/2024/Wn-07/FG-GO-DN/D z dnia 29.05.2024 r.

REKOMENDACJE DLA STOSOWANIA MONITORINGU SKŁADOWISK CO₂ W POLSCE (stan na X 2024 r.)

Nadzorujący:

Minister Klimatu i Środowiska
ul. Wawelska 52/54, 00–922 Warszawa

Dotujący:

Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej
ul. Konstruktorska 3A, 02–673 Warszawa



**NARODOWY FUNDUSZ
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ**

Wykonawca:

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Rakowiecka 4, 00–975 Warszawa



Osoba sporządzająca raport:

dr inż. Adam Wójcicki
dr Monika Konieczńska (współautor)

Kierownik komórki organizacyjnej:

Marcin Szufflicki

Dyrektor/Dyrektor pionu:

Prof. dr hab. Krzysztof Szamalek
Dyrektor
Państwowy Instytut Geologiczny
– Państwowy Instytut Badawczy
/-podpisany cyfrowo/

Warszawa, 2024 r.

Spis treści

Wstęp	3
1. Regulacje krajowe a przepisy unijne i w innych krajach	5
1.1 Ustawa Pgg i krajowe przepisy wykonawcze a Dyrektywa 2009/31/WE	5
1.2 Przeglądy Dyrektywy 2009/31/WE i sprawozdania krajów UE i EOG z jej wdrażania.....	7
1.3 Zalecenia (Guidance Documents) a krajowe przepisy wykonawcze	8
2. Rekomendowany zakres i sposób prowadzenia monitoringu składowisk CO ₂	11
2.1 Składowanie na lądzie w poziomach solankowych	17
2.2 Składowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu gazu ziemnego.....	19
2.3 Składowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu ropy naftowej.....	21
2.4 Składowanie na morzu w szcerpanym złożu ropy naftowej	23
2.5 Składowanie na morzu w poziomach solankowych	24
3. Rekomendacje zmian krajowych przepisów wykonawczych.....	29
Podsumowanie	30
Literatura.....	31

Wstęp

W ramach przedsięwzięcia „Zadanie Krajowego Administratora Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla (KAPS CO₂): Monitorowanie podziemnych składowisk CO₂”, realizowanego na podstawie umowy nr 122/2024/Wn-07/FG-GO-DN/D z dnia 29.05.2024 r. za środki Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, przewidziano wykonanie raportu częściowego poświęconego przedstawieniu rekomendacji dla stosowania monitoringu składowisk CO₂ w Polsce.

Przewidziano wykorzystanie na potrzeby sporządzenia niniejszego raportu informacji w przedmiotowym zakresie zgromadzonych w ramach wszystkich dotychczas realizowanych etapów przedsięwzięcia „Zadanie KAPS CO₂: Monitorowanie statusu projektów CCS” (lata 2015-2022; Wójcicki i in., 2017, 2021, 2022) oraz niniejszego przedsięwzięcia (informacje zebrane i opracowane w roku 2024, w tym w szczególności w poprzednim sprawozdaniu częściowym – raporcie „Analiza technik i zasad monitoringu składowisk CO₂”; Wójcicki, 2024), a także informacji zawartych w dostępnej literaturze przedmiotu. Obejmowało to informacje dotyczące stosowanych/przewidywanych do zastosowania na świecie technik i zasad monitoringu składowiska w całym okresie życia projektów CCS/CCUS i zagadnień akceptacji składu strumienia dwutlenku węgla zatłaczanego do składowiska, a w szczególności związanych z tym regulacji i przepisów wykonawczych obowiązujących w Polsce, na szczeblu unijnym, w poszczególnych krajach Unii Europejskiej i Europejskiego Obszaru Gospodarczego oraz innych krajach (w tym w USA, Kanadzie, Australii i Wielkiej Brytanii).

Wiązało się to z analizą zapisów aktualnie obowiązującej ustawy Prawo geologiczne i górnicze (tzn. jej najnowszej wersji z sierpnia 2024 r. – Dz.U. z 2024 r. poz. 1290) oraz aktualnie obowiązujących krajowych przepisów wykonawczych w zakresie monitoringu podziemnych składowisk dwutlenku węgla (podziemne składowanie dwutlenku węgla oraz podziemne składowanie dwutlenku węgla połączone z eksploatacją złóż węglowodorów) w całym okresie życia projektów CCS/CCUS, nawiązujących do odnośnych zapisów Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla. Przewidziano analizę wyników przeglądów Dyrektywy i sprawozdania krajów UE i EOG z jej wdrażania w przedmiotowym zakresie oraz obowiązujących i dotychczasowych Zaleceń (Guidance Documents) do Dyrektywy, gdzie omawiane są zagadnienia szczegółowe/techniczne, dotyczące szczegółowego rozpoznania podziemnych składowisk dwutlenku węgla (odnoszące się też do monitoringu stanu początkowego), składu strumienia dwutlenku węgla, monitoringu w całym okresie życia projektów CCS/CCUS i działań naprawczych. Obejmowało to także analizę wyników opracowania psg (Majer i Sokołowska, 2023) „Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania (z wyłączeniem składowania odpadów promieniotwórczych)”, gdzie omówiono m.in. obowiązujące dotychczas krajowe przepisy wykonawcze w przedmiotowym zakresie oraz porównanie tych ostatnich z ww. Zaleceniami i przepisami wykonawczymi/wytycznymi w krajach UE i EOG, a także innych krajach (w tym w USA, Kanadzie, Australii, Wielkiej Brytanii).

Przewidziano przedstawienie, w oparciu o informacje opracowane w ramach raportu „Analiza technik i zasad monitoringu składowisk CO₂” (Wójcicki, 2024), rekomendowanego zakresu i sposobu prowadzenia monitoringu składowisk CO₂ dla 5 typowych projektów CCS/CCUS jakie mogłyby być

realizowane w warunkach polskich. Obejmowało to następujące projekty: 1-składowanie na lądzie w poziomach solankowych; 2-składowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu gazu ziemnego; 3-składowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu ropy naftowej; 4-składowanie na morzu w szcerpanym złożu ropy naftowej oraz 5-składowanie na morzu w poziomach solankowych (w tym scenariusze 1-4 rozpatrywane były w poprzednich etapach przedsięwzięcia KAPS CO₂). Dla każdego scenariusza (projektu) przewidziano propozycje metod monitoringu składowisk CO₂ (geofizyczne, geochemiczne, etc.), zakresu (liczba punktów pomiarowych/kilometraż, lokalizacja, przedział głębokości, etc.) i ram czasowych (harmonogram) monitoringu w całym okresie życia rozpatrywanych projektów CCS/CCUS.

Na podstawie wyżej omówionych informacji, analiz, opracowań i dokumentów oraz praktycznych doświadczeń i wytycznych z krajów UE, EOG oraz USA, Kanady, Australii i Wielkiej Brytanii (w miarę dostępności informacji), jak również obowiązujących norm międzynarodowych, przewidziano przedstawienie rekomendacji zmian krajowych przepisów wykonawczych dotyczących monitoringu podziemnych składowisk dwutlenku węgla oraz kryteriów akceptacji składu strumienia dwutlenku węgla dopuszczalnego do składowania. Dotyczyło to zagadnień monitoringu składowisk CO₂ na wszystkich etapach życia projektów CCS/CCUS, obejmujących podziemne składowanie dwutlenku węgla oraz podziemne składowanie dwutlenku węgla połączone z eksploatacją złóż węglowodorów, na lądzie i pod dnem morza oraz kryteriów akceptacji składu strumienia dwutlenku węgla dopuszczalnego do składowania w zależności od stosowanej technologii wychwytu.

Rozdział 2 opracowania sporządzili Adam Wójcicki i Monika Koniecznyńska, pozostałą część raportu opracował Adam Wójcicki.

1. Regulacje krajowe a przepisy unijne i w innych krajach

1.1 Ustawa Pgg i krajowe przepisy wykonawcze a Dyrektywa 2009/31/WE

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. ustanowiła ramy prawne bezpiecznego dla środowiska geologicznego składowania dwutlenku węgla, obejmując całokształt zagadnień z tym związanych, m.in. zasady i wytyczne dla monitoringu podziemnych składowisk przed rozpoczęciem zatłaczania CO₂ (monitoring bazowy/stanu początkowego), w trakcie funkcjonowania składowiska, na etapie jego zamknięcia oraz po jego zamknięciu i przekazaniu odpowiedzialności przez operatora właściwemu organowi. W tekście samej Dyrektywy zostały zawarte ogólne zasady monitoringu (Art. 13) i zagadnień powiązanych (Art. 14-18; raportowanie, kontrole, działania naprawcze, zamknięcie składowiska i zwiąże z tym obowiązki operatora, a także przekazanie odpowiedzialności za składowisko właściwemu organowi), zaś Załącznik II do Dyrektywy zawiera wytyczne dla opracowania i aktualizacji planu monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla oraz monitorowania po zamknięciu składowiska.

Kraje członkowskie Unii Europejskiej (w tym w Wielka Brytania, będąca do roku 2020 członkiem UE) i Europejskiego Obszaru Gospodarczego/Europejskiego Stowarzyszenia Wolnego Handlu (Norwegia, Islandia, Lichtenstein) były obowiązane do zaimplementowania do prawa krajowego zapisów Dyrektywy, co też uczyniły w ciągu kilku lat od jej ogłoszenia w formie ustaw i przepisów wykonawczych (Shogenova i in., 2014).

W Polsce zostało to zaimplementowane w ustawie z dnia 27 września 2013 r. o zmianie ustawy – Prawo geologiczne i górnicze oraz niektórych innych ustaw (Dz. U. z 2013 r. poz. 1238), a także w opracowanych lub znowelizowanych w kolejnych latach krajowych przepisach wykonawczych (rozporządzeniach). W świetle tej ustawy dopuszczalne było (permanentne) geologiczne składowanie dwutlenku węgla wyłącznie w ramach projektów demonstracyjnych, ponadto nie regulowała ona zatłaczania CO₂ do złoża węglowodorów w trakcie jego eksploatacji. Analogicznie jak w przypadku Dyrektywy, w ustawie zawarto ogólne zasady dla monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla (np. w Art. 27a, jeśli chodzi o kwestie techniczne, a w Art. 28a, c, e – finansowe, ponadto monitoring jest wspomniany w Art. 32, 39c, 127d, f-k, m i 163a).

Jeśli chodzi o wytyczne dla monitoringu to są one zawarte w następujących przepisach wykonawczych rozporządzeniach Ministra Środowiska:

- z dnia 8 maja 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinien odpowiadać plan zagospodarowania podziemnego składowiska (pzs) dwutlenku węgla (Dz.U. z 2014 r. poz. 591), co obejmuje też plan monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla
- z dnia 30 października 2015 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących eksploatacji podziemnego składowiska dwutlenku węgla, zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla oraz prowadzenia monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla (Dz.U. z 2015 r. poz. 1840).

Ponadto Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 roku w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Dz.U. z 2016 r. poz. 2033) odnosi się do

zagadnień monitoringu podziemnego składowiska dwutlenku węgla (par. 14 i 25). Wynika z faktu, że prace i roboty geologiczne, wykonane w ramach prac dokumentacyjnych (zgodnie z tym rozporządzeniem) na potrzeby niezbędnego do ubiegania się o koncesję na składowanie szczegółowego rozpoznania potencjalnego składowiska mogą być jednocześnie podstawą dla monitoringu stanu początkowego kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, tzn. przed rozpoczęciem zatłaczania CO₂. Natomiast Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2015 roku w sprawie zabezpieczenia finansowego i zabezpieczenia środków związanych z podziemnym składowaniem dwutlenku węgla (Dz.U. z 2015 r. poz. 2144) podejmuje m.in. kwestie zabezpieczenia finansowego tytułem kosztów monitoringu na etapie eksploatacji składowiska i po jego zamknięciu oraz zabezpieczenia środków po przekazaniu odpowiedzialności za składowisko Krajowemu Administratorowi Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla.

W dniu 27 września 2023 r. została opublikowana ustawa o zmianie ustawy – Prawo geologiczne i górnicze oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. z 2023 r. poz. 2029), gdzie przewidziano m.in. szerokie wdrożenie w Polsce, w ramach projektów CCS/CCUS w skali przemysłowej, podziemnego składowania dwutlenku węgla oraz podziemnego składowania dwutlenku węgla połączonego z eksploatacją złóż węglowodorów, natomiast w dniu 10 lipca 2024 r. został opublikowany jednolity tekst ustawy Prawo geologiczne i górnicze, zawierający m.in. wspomniane zapisy (Dz.U. z 2024 r. poz. 1290). Zasadniczo zapisy dotyczące monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla i zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla nie uległy zmianie w nowej ustawie (wyjątkiem są tu Art. 27a – opiniowanie pzs przez KOBIZE, oraz Art. 49t i 93 – rozszerzenie dotychczasowych przepisów na przypadki podziemnego składowania dwutlenku węgla połączonego z eksploatacją złóż węglowodorów), nie zostały też jeszcze ogłoszone znowelizowane rozporządzenia odnoszące się do zagadnień monitoringu ani innych zagadnień dotyczących podziemnego składowania dwutlenku węgla.

W związku z tym odpowiednikiem dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej podziemnego składowania dwutlenku węgla połączonego z eksploatacją złóż węglowodorów będzie dodatek do dokumentacji geologiczno-inwestycyjnej złoża węglowodorów (właściwym przepisem wykonawczym jest tu rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2015 r., w sprawie dokumentacji geologiczno-inwestycyjnej złoża węglowodorów, Dz.U. z 2015 r. poz. 968, przy czym rozporządzenie nie zawiera zapisów dotyczących *explicite* zatłaczania dwutlenku węgla, ale prawdopodobnie nie jest konieczna ich nowelizacja pod tym kątem).

Ponadto należy wymienić rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 2019 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dz.U. z 2019 r. poz. 1839) gdzie wspomina się, że rozpoznawanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla obejmujące wiercenie otworów o głębokości 100 m (a więc także w celu monitoringu stanu początkowego i następnie dalszego) oraz prace na obszarach morskich Polski należą do przedsięwzięć mogących potencjalnie znacząco oddziaływać na środowisko, natomiast składowanie dwutlenku węgla należy do przedsięwzięć mogących zawsze znacząco oddziaływać na środowisko. Wiążą się z tym określone procedury uzyskiwania pozwoleń i decyzji środowiskowych.

Należy także nadmienić rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 grudnia 2017 r. w sprawie planów ruchu zakładów górniczych (Dz.U., z 2017 r., poz. 2293), które wymaga sporządzania (ew. aktualizacji) planów ruchów dla otworów rozpoznawczych i podziemnego składowania CO₂.

1.2 Przeglądy Dyrektywy 2009/31/WE i sprawozdania krajów UE i EOG z jej wdrażania

Jedyny całościowy przegląd zapisów Dyrektywy 2009/31/WE został wykonany na zlecenie Komisji Europejskiej po jej wdrożeniu przez wszystkie kraje UE i EOG (Trinomics, 2015) w oparciu o sprawozdania poszczególnych krajów z wdrażania Dyrektywy w latach 2011-2013, scharakteryzowane w sposób syntetyczny w sprawozdaniu KE (Komisja Europejska, 2014). Nie rekomendowano wtedy zmian zapisów Dyrektywy, z uwagi na niedostateczne doświadczenia w zakresie wdrażania technologii CCS w Europie. Rekomendowano jedynie zmiany bądź uzupełnienia w zakresie Zaleceń (Guidance Documents), oraz stworzenie bądź modyfikację dokumentów unijnych i krajowych dotyczących rozmaitych aspektów rozwoju technologii CCS w Europie (np. mapy drogowe, finansowanie projektów CCS, złoża węglowodorów a CCS). Wskazano w dalszej perspektywie (m.in.) na potrzebę ewentualnego dopracowania kryteriów akceptacji strumienia dwutlenku węgla, zakresu monitoringu składowisk, dostępu do infrastruktury transportu i składowania oraz definicji projektów badawczych.

Natomiast w Decyzji Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/853 z dnia 30 maja 2018 roku doprecyzowano kwestię sprawozdawczości Państw Członkowskich w zakresie wdrażania Dyrektywy oraz udzielono Komisji uprawnień do ewentualnego doprecyzowania zapisów Załącznika I i II do Dyrektywy w celu dostosowania ich do postępu naukowo-technicznego.

Jako kolejne przeglądy Dyrektywy (jej implementacji, a nie zapisów) można uznać sprawozdania KE z jej wdrażania (Komisja Europejska, 2017, 2019, 2023). Generalnie sprawozdania te nie odnosiły się bezpośrednio do zagadnień monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla i składu strumienia. Natomiast w ostatnim sprawozdaniu (Komisja Europejska, 2023; Strona Country reports on the implementation of the CCS - sprawozdania państw członkowskich) wspomniano o tej problematyce pośrednio, przy okazji omawiania procedur wymaganych przy uzyskiwaniu koncesji na składowanie (np. Dania, Niderlandy), projektów badawczych (np. Dania, Niemcy, Francja, Niderlandy, Polska, Rumunia, Szwecja) oraz podmiotów odpowiedzialnych za składowiska CO₂ i ich monitoring (np. Grecja). Te ostatnie zagadnienia były też przedmiotem analiz dla wybranych krajów UE w poprzednim sprawozdaniu cząstkowym z niniejszego przedsięwzięcia – raporcie „Analiza technik i zasad monitoringu składowisk CO₂” (Wójcicki, 2024).

1.3 Zalecenia (Guidance Documents) a krajowe przepisy wykonawcze

Guidance Documents to dokumenty pomocnicze, które Komisja Europejska (Dyrekcja Generalna ds. Działań w Dziedzinie Klimatu) przygotowała i opublikowała w 2011 roku (strony www - Guidance Documents (stara wersja, 2011): [GD1](#), [GD2](#), [GD3](#), [GD4](#)), aby wspomóc wdrożenie Dyrektywy 2009/31/WE w zakresie zagadnień szczegółowych dotyczących pełnego łańcucha CCS w poszczególnych krajach zobowiązanych do jej wdrożenia. Dokumenty te były w ciągu ostatnich dwóch lat przedmiotem aktualizacji i ich znowelizowane wersje, uwzględniające doświadczenia ostatnich lat w zakresie realizacji projektów CCS/CCUS zostały ukończone w lipcu 2024 roku.

Z punktu widzenia niniejszego raportu najbardziej interesujący jest dokument [GD2](#), dotyczący szczegółowego rozpoznania geologicznego składowiska, składu transportowanego i zatłaczanego strumienia CO₂ oraz monitoringu i działań naprawczych. Dokument ten zawiera m.in. przegląd metod monitoringu oraz założeń dla przygotowania, akceptacji i wdrożenia planów monitoringu, a także wymogów dotyczących raportowania prowadzonego monitoringu. Omawia się tam w szczególności zalecany zakres i formę planów monitoringu składowisk CO₂ na wszystkich etapach życia projektów CCS/CCUS: przed rozpoczęciem zatłaczania CO₂ (monitoring bazowy/stanu początkowego), w trakcie funkcjonowania składowiska, na etapie jego zamknięcia oraz po jego zamknięciu i przekazaniu odpowiedzialności przez operatora właściwemu organowi, a także ich realizację oraz zasady nadzoru i kontroli przez właściwy organ, gdy odpowiedzialność za składowisko pozostaje w gestii operatora.

Najistotniejsze informacje na temat legislacji w przedmiotowym zakresie i jej egzekwowania w wybranych krajach UE i EOG oraz Wielkiej Brytanii przedstawiono w poprzednim sprawozdaniu częściowym z niniejszego przedsięwzięcia – raporcie „Analiza technik i zasad monitoringu składowisk CO₂” (Wójcicki, 2024). Należy przy tym zauważyć, że Wielkiej Brytanii, która była członkiem UE do 2020 roku, wdrożyła w swoim czasie zapisy Dyrektywy i dopuszcza jedynie składowanie na morzu w przypadku projektów w skali przemysłowej, zostały ostatnio wydane zalecenia dotyczą ogólnych zasad monitoringu w otworach na morzu (North Sea Transition Authority, 2024).

Obowiązujące krajowe przepisy wykonawcze dotyczące geologicznego składowania dwutlenku węgla i monitoringu, które również nawiązują do zapisów Dyrektywy oraz Zaleceń, scharakteryzowane są w opracowaniu będącym wynikiem zadania psg (Majer i Sokołowska, 2023) „Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania (z wyłączeniem składowania odpadów promieniotwórczych)”. To opracowanie, realizowane w okresie marzec 2020 – marzec 2023, przedstawia stan na początek 2023 roku, który nie uległ zmianie do chwili obecnej, gdyż nie zostały dotąd opublikowane nowelizacje rozporządzeń w przedmiotowym zakresie wymienionych w poprzednim rozdziale. W opracowaniu skupiono się zasadniczo na etapach procesu inwestycyjnego (**Fig. 1**) poprzedzających ubieganie się o koncesję (etap koncepcji i projektowania) na bezzbiornikowe magazynowanie lub składowanie substancji, w tym w przypadku dwutlenku węgla.

Przepisy dotyczące monitoringu omówione są tam w sposób syntetyczny, w oparciu o rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 roku w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Dz.U. z 2016 r. poz. 2033), z dnia 8 maja 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinien odpowiadać plan zagospodarowania podziemnego składowiska (pzs) dwutlenku węgla (Dz.U. z 2014 r. poz. 591) oraz z dnia 30 października 2015 r. w

sprawie szczegółowych wymagań dotyczących eksploatacji podziemnego składowiska dwutlenku węgla, zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla oraz prowadzenia monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla (Dz.U. z 2015 r. poz. 1840). Dokumentacja hydrogeologiczna i dokumentacja geologiczno-inżynierska (pierwsze rozporządzenie) obejmuje szczegółowe rozpoznanie i scharakteryzowanie stanu początkowego potencjalnego składowiska w oparciu o dostępne dane i wyniki nowych badań realizowanych w ramach właściwego projektu robót geologicznych (na **Fig. 2** przedstawiono schemat ideowy badań geologiczno-inżynierskich). Plan zagospodarowania składowiska (drugie rozporządzenie) obejmuje plan monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, gdzie podaje się m.in. jakie monitorowane parametry będą przedmiotem badań i kontroli, zaś w trzecim rozporządzeniu podaje się m.in. sposób, częstotliwość i warunki prowadzenia monitoringu (badań i kontroli) oraz kryteria akceptacji zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla.

W opracowaniu (Majer i Sokołowska, 2023) są omówione są dość szczegółowo techniki badań (geofizyczne, geochemiczne, geomechaniczne, etc., wraz z mierzonymi parametrami i opracowaniem wyników) jakie można stosować m.in. przy rozpoznawaniu i monitoringu struktur geologicznych, w tym potencjalnych składowisk dwutlenku węgla. Natomiast aktualne Zalecenia do Dyrektywy (Guidance Document [GD2](#) z roku 2024) przedstawiają techniki monitoringu składowisk CO₂, pod kątem mierzonych parametrów i zjawisk zachodzących w górotworze podczas składowania dwutlenku węgla, w tym rejestracji zdarzeń niepożądanych.

Warty przy tym wzmianki jest fakt, że w Stanach Zjednoczonych US EPA (federalna Agencja Ochrony Środowiska) opracowała i wydała w 2013 roku ramach Programu Kontroli Podziemnego Zatłaczania (UIC) dla otworów klasy VI (geologiczna sekwestracja CO₂; składowanie w formacjach solankowych i szcerpanych złożach węglowodorów) zalecenia (US EPA, 2013) monitoringu składowisk CO₂ na wszystkich etapach życia projektów CCS/CCUS. Obejmują one w szczególności rekomendowane techniki/metody monitoringu w otworach – szczelności, ciśnienia, temperatury, składu i ilości zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla, korozji, a także monitoringu wód użytkowych oraz powietrza glebowego i atmosferycznego, jak również monitoringu „chmury” CO₂ i związanego z nią frontu ciśnienia. Są generalnie analogiczne do omawianych wyżej unijnych, jeśli chodzi o stosowanie technik/metod monitoringu, poza ewentualnie większym naciskiem na badanie zjawisk zachodzących w otworze zatłaczającym i jego bezpośrednim sąsiedztwie, w szczególności pod kątem możliwych zagrożeń dla wód użytkowych. Ich uzupełnieniem był szereg raportów National Energy Technology Laboratory (NETL) prezentujących szczegółowo zalecane najlepsze praktyki w zakresie całokształtu problematyki monitoringu składowisk dwutlenku węgla – najnowszy z 2017 roku (NETL, 2017). Wykorzystano w nich doświadczenia z realizacji projektów CCS/CCUS badawczych i w skali przemysłowej, w szczególności tych realizowanych w Stanach Zjednoczonych.

Jeśli chodzi o Kanadę to szczególnie warte uwagi są wytyczne i zalecenia w przedmiotowym zakresie wydane przez rząd prowincji Alberta (Alberta Government, 2013). Obejmują one krótką charakterystykę technologii CCS i znaczenia jej wdrożenia dla gospodarki prowincji Alberta, cyklu życia projektów CCS, zalecenia odnośnie wyboru składowisk, ubiegania się o koncesje na rozpoznanie i składowanie, zagospodarowania składowiska i monitoringu stanu początkowego, zatłaczania CO₂ i monitoringu w trakcie zatłaczania, zabezpieczenia finansowego na potrzeby monitoringu po zakończeniu zatłaczania i nieprzewidzianych zdarzeń, zamknięcia składowiska i działań prowadzonych

po zamknięciu. Jako przykłady najlepszych praktyk można podać plan monitoringu projektu Quest (Shell, 2023; Alberta) i raport projektu Aquistore (PTRC, 2015; Saskatchewan).

Niedawno ukazały się wytyczne dla składowania CO₂ i monitoringu na obszarach morskich Australii (Australian Government, 2023), a wcześniejsze zalecenia dla monitoringu składowisk dwutlenku węgla na lądzie i morzu zawarte są w opracowaniu (Parsons Brinckerhoff, 2012).

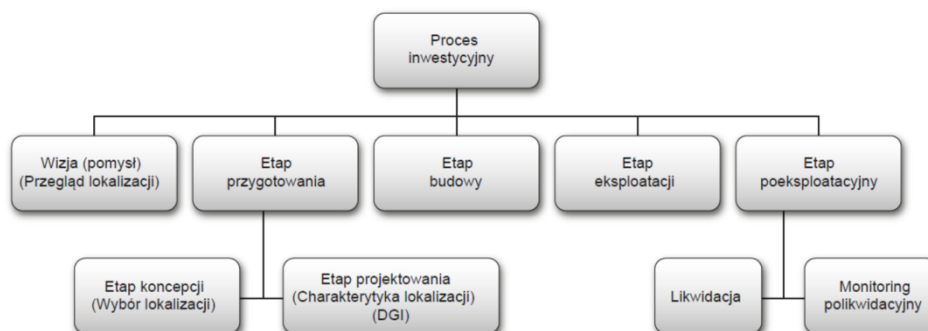


Fig. 1 Etapy procesu inwestycyjnego dla podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania, w tym składowania dwutlenku węgla (za Majer i Sokołowska, 2023)

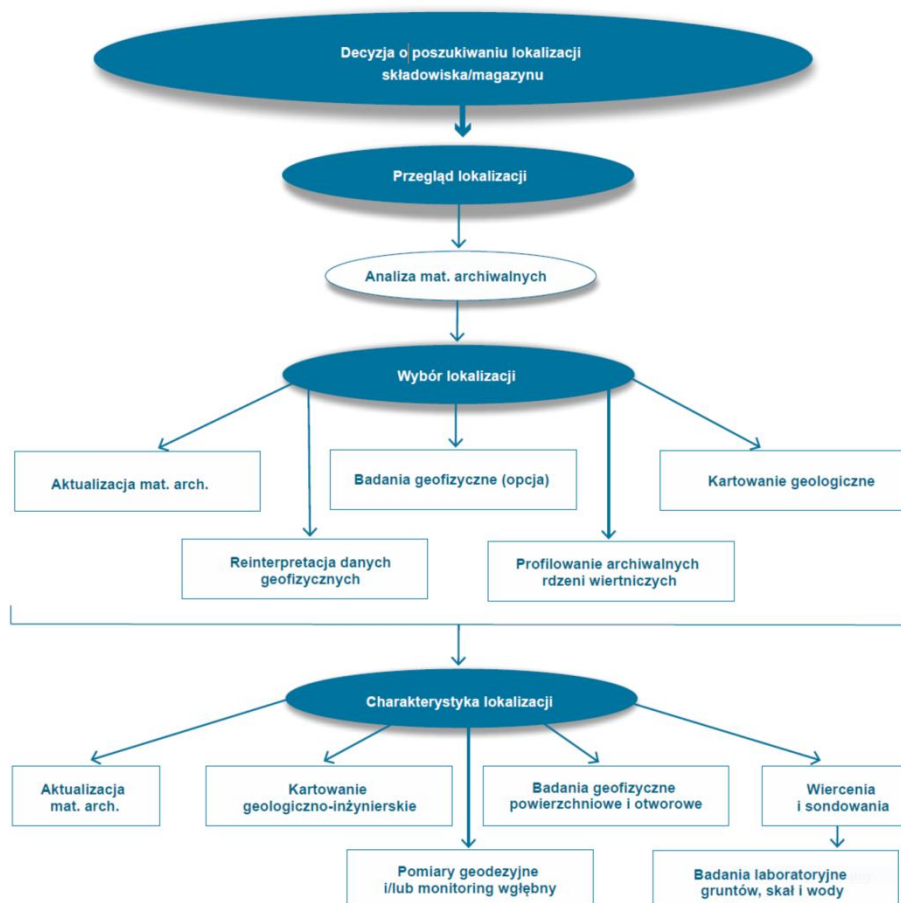


Fig. 2 Zakres badań geologiczno-inżynierskich na poszczególnych etapach rozpoznania geologicznego lokalizacji obiektu podziemnego, w tym podziemnego składowiska dwutlenku węgla (za Majer i Sokołowska, 2023)

2. Rekomendowany zakres i sposób prowadzenia monitoringu składowisk CO₂

W oparciu o informacje opracowane w ramach poprzedniego sprawozdania cząstkowego niniejszego przedsięwzięcia – raportu „Analiza technik i zasad monitoringu składowisk CO₂” oraz niniejszego opracowania i wcześniejsze raporty przedsięwzięcia KAPS CO₂ (Wójcicki i in., 2017, 2021, 2022) przedstawiono poniżej rekomendowany zakres i sposób prowadzenia monitoringu składowisk CO₂ dla 5 typowych, przykładowych projektów CCS/CCUS jakie mogłyby być realizowane w warunkach polskich. Wykorzystano też publikacje i raporty przytoczone w ww. opracowaniach. Należy, przy tym wspomnieć, że dotychczas w pracach w zakresie wspomagania wydobycia węglowodorów przez zatłaczanie dwutlenku węgla do złóż ropy naftowej i gazu ziemnego (EHR, CO₂-EOR, CO₂-EGR) w Polsce zasadniczo nie była poruszana problematyka całościowego monitoringu, jedynie scenariusze produkcyjne (np. Lubaś i in., 2015; Szott i in., 2012), stąd wykorzystano w tym przypadku do niniejszego sprawozdania ogólne założenia definiujące rozpatrywane typowe projekty.

Należy przy tym nadmienić, że aktualnie obowiązujące rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 3 września 2014 r. w sprawie obszarów, na których dopuszcza się lokalizowanie kompleksu podziemnego składowania (Dz.U. z 2014 r., poz. 1272) dopuszcza składowanie (a właściwie rozpoznawanie potencjalnych składowisk) jedynie na obszarze morskim, w NE części polskiej strefy ekonomicznej Bałtyku, lecz trwają prace nad jego nowelizacją dopuszczającą taką działalność również na obszarach lądowych Polski, zarówno w zakresie podziemnego składowania dwutlenku węgla jak i podziemnego składowania dwutlenku węgla połączonego z produkcją węglowodorów. Natomiast Art. 11 Konwencji Helsińskiej o ochronie Morza Bałtyckiego, według najczęściej przyjmowanej interpretacji nie dopuszcza składowania dwutlenku węgla pod dnem Morza Bałtyckiego, co powinno być wyjaśnione i ewentualnie skorygowane na szczeblu państw regionu Morza Bałtyckiego (Wammer Østgaard, 2024).

Niniejszy rozdział obejmuje przedstawienie rekomendowanego zakresu i sposobu prowadzenia monitoringu składowisk CO₂ dla czterech przykładowych scenariuszy (projektów), jakie były wcześniej rozpatrywane w ramach przedsięwzięcia: „Zadanie KAPS CO₂: Monitorowanie statusu projektów CCS” (lata 2015-2022; Wójcicki i in., 2017, 2021, 2022; gdzie w szczególności analizowano nakłady inwestycyjne i koszty operacyjne związane z rozpoznaniem i zagospodarowaniem składowiska i koszty operacyjne związane z monitoringiem składowiska na wszystkich etapach życia projektu) i piątego, dodatkowego, tzn.:

- 1-składowanie na lądzie w poziomach solankowych (struktura o powierzchni ok. 250 km²; składowanie średnio 5 mln ton CO₂/rok przez 30 lat, czyli w sumie 150 mln ton);
- 2-składowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu gazu ziemnego (struktura o powierzchni ok. 25 km²; składowanie średnio 2,5 mln ton CO₂/rok przez 30 lat, czyli w sumie 75 mln ton);
- 3-składowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu ropy naftowej (struktura o powierzchni ok. 30 km²; składowanie średnio 1 mln ton CO₂/rok przez 30 lat, czyli w sumie 30 mln ton);
- 4-składowanie na morzu w szcerpanym złożu ropy naftowej (struktura o powierzchni ok. 30 km²; składowanie średnio 0,5 mln ton CO₂/rok przez 20 lat, czyli w sumie 10 mln ton);
- 5-składowanie na morzu w poziomach solankowych (na obszarze o powierzchni około 250 km²; składowanie średnio 2 mln ton CO₂/rok przez 30 lat, czyli w sumie 60 mln ton).

Dla każdego scenariusza zaproponowano metody monitoringu składowisk CO₂ (geofizyczne, geochemiczne, etc.), zakres (liczba punktów pomiarowych/kilometraż, lokalizacja, przedział głębokości, etc.) i ramy czasowe (szczegółowy harmonogram) monitoringu w całym okresie życia rozpatrywanych projektów CCS/CCUS.

We wszystkich pięciu projektach przewidziano wykorzystanie szerokiego zakresu monitoringu, przed zatłaczaniem dwutlenku węgla do składowiska, w okresie zatłaczania – funkcjonowania składowiska (30 lat, za wyjątkiem scenariusza 4 gdzie przyjęto 20 lat), zamknięcia składowiska (20 lat; likwidacja zakładu górniczego, przygotowanie do przekazania składowiska właściwemu organowi) oraz po zamknięciu i przekazaniu odpowiedzialności za składowisko właściwemu organowi (kolejne 30 lat), celem zapewnienia bezpiecznego składowania.

Orientacyjny zakres i harmonogram monitoringu składowisk dwutlenku węgla dla ww. 5 typowych, przykładowych projektów CCS/CCUS jakie mogłyby być realizowane w warunkach polskich przedstawiono w sposób syntetyczny w Tabeli 1.

Poniżej omówiono ponadto zagadnienia wspólne dla wszystkich projektów, charakterystykę zagadnień monitoringu środowiskowego wspólnych dla wszystkich projektów na lądzie oraz podstawowe założenia dla monitoringu składowisk dwutlenku węgla dla poszczególnych projektów w całym okresie ich życia (podrozdziały 2.1– 2.5).

Należy przy tym nadmienić, że szczególnie rozbudowany zakres monitoringu ma zastosowanie w przypadku projektów CCS/CCUS realizowanych na lądzie. Prowadzi się w tym przypadku powierzchniowe badania geofizyczne kompleksu składowania (w szczególności stosowana jest sejsmika 3D/4D; celem detekcji „chmury” CO₂), monitoring szczelności odwiertów oraz ciśnienia i temperatury w otworach zatłaczających (oraz ciśnienia i przepływu na głowicy otworu), a także substancji znacznikowych. Wykorzystuje się ponadto otwory monitoringowe nawiercające kompleks składowania oraz jego nadkład, umożliwiające badania geofizyczne ośrodka geologicznego w otworach i międzyotworowe (np. VSP, tomografia międzyotworowa – sejsmiczna, elektrooporowa) oraz pobór próbek wód złożowych i użytkowych. W odróżnieniu od składowania pod dnem morza prowadzi się kompleksowe monitorowanie nadkładu składowiska, w szczególności ośrodka gruntowo-wodnego, gdzie występują wody użytkowe narażone na zanieczyszczenie płynami złożowymi w przypadku nieszczelności składowiska lub odwiertów, a także powierzchni terenu. Obejmuje to pobór próbek wód gruntowych i głębiej występujących użytkowych wód podziemnych (czasami też monitoring ciśnienia w obrębie wód użytkowych ponad składowiskiem), a także monitoring gleby (w tym powietrza glebowego) i powietrza atmosferycznego oraz szaty roślinnej, składu wód powierzchniowych i deformacji gruntu w miejscu zatłaczania, jak również wspomniane wyżej badania geofizyczne wykorzystujące otwory monitoringowe (i zatłaczające).

Natomiast składowiska pod dnem morza monitorowane są głównie metodami geofizycznymi ukierunkowanymi na badanie kompleksu składowania, w szczególności detekcję „chmury” CO₂ (sejsmika i inne powierzchniowe metody geofizyczne). Prowadzi się w tym przypadku również monitoring szczelności odwiertów oraz ciśnienia i temperatury w otworach zatłaczających (oraz ciśnienia i przepływu na głowicy otworu), substancji znacznikowych dodawanych do zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla, a także pomiary sonarowe dna morskiego oraz pobór próbek z dna morskiego i wody morskiej, a nawet badanie habitatów/ekosystemów dennych. Generalnie nie są wykorzystywane w tym przypadku otwory monitoringowe nawiercające kompleks składowania.

W projektach obejmujących składowanie CO₂ w złożach węglowodorów głównym ryzykiem mogą być nieszczelne otwory, zarówno zlikwidowane wcześniej jak i zbędne na etapie zatłaczania lub po jego zaprzestaniu. W obrębie złoża węglowodorów, zależnie od jego wielkości, może być odwiercone, kilka, kilkanaście lub nawet kilkadziesiąt otworów eksploatacyjnych, rozpoznawczych i innych (np. odwadniających czy zatłaczających wody złożowe). W trakcie eksploatacji złoża, która może trwać dziesiątki lat, niektóre otwory są likwidowane. Przy likwidacji otworów niezbędne jest stosowanie cementów odpornych na korozję CO₂, stare otwory najprawdopodobniej powinny być ponownie zacementowane.

Prowadzenie monitoringu w okresie eksploatacji składowiska i likwidacji zakładu górniczego powiązane jest z wniesieniem (w formie i terminach podanych w umowie koncesyjnej) zabezpieczenia finansowego, w szczególności dotyczącego pokrycia ponoszonych przez operatora kosztów monitoringu i ewentualnych działań naprawczych oraz rozliczania emisji CO₂ ze składowiska na tych etapach.

Realizacja monitoringu po zamknięciu i przekazaniu odpowiedzialności za składowisko właściwemu organowi wiąże się z wniesieniem wcześniej przez operatora zabezpieczenia środków na potrzeby działań państwa po zamknięciu składowiska (w tym monitoringu) lub wystąpienia nieprzewidzianych zdarzeń w trakcie jego eksploatacji (kiedy właściwy organ przejmuje z tego powodu od operatora odpowiedzialność za składowisko, zaś operator tym samym traci koncesję na składowanie bądź składowanie połączone z produkcją węglowodorów).

Monitoring środowiskowy (w tym środowiska gruntowo-wodnego, hydrogeologiczny i powierzchni terenu – zalecenia wspólne dla wszystkich projektów na lądzie, tzn. scenariuszy 1, 2 i 3 – na wszystkich etapach życia projektów)

Monitoring stanu początkowego środowiska

W każdej z rozpatrywanych lokalizacji należy przeprowadzić badania stanu środowiska przed rozpoczęciem inwestycji (tzw. stan początkowy lub zerowy). Wyniki tych badań są potrzebne dla opracowania Raportu oddziaływania planowanego przedsięwzięcia na środowisko w procedurze Oceny oddziaływania na środowisko dla uzyskania decyzji środowiskowej, a także muszą znaleźć się w części opisowej części ogólnej Planu zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla w ramach opisu stanu środowiska w obrębie terenu górniczego, w tym kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, przed rozpoczęciem monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla (§ 2 ust. 2 pkt 15 Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 8 maja 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinien odpowiadać plan zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla, Dz.U. z 2014 r. poz. 591). Jednak najważniejsza rola tego typu rozpoznania to ustalenie warunków odniesienia dla późniejszych możliwych zmian stanu środowiska rejestrowanych podczas obserwacji monitoringowych.

Przed badaniami stanu początkowego należy wykonać następujące działania:

- Identyfikację wszystkich otworów wiertniczych istniejących i zlikwidowanych (tu potrzebna jest dokładna lokalizacja) w obrębie planowanego składowiska.
- Identyfikację wszystkich istniejących studni ujmujących poziomy wodonośne położone powyżej kompleksu składowania oraz wybór punktów reprezentatywnych do badań stanu zerowego i przyszłego monitoringu. Otwory wytypowane do badań i dalszych obserwacji powinny być w miarę możliwości studniami czynnymi, w których nie następuje stagnacja wody i jest minimalne niebezpieczeństwo rozwoju życia biologicznego. W przypadku braku odpowiednich otworów, należy zaprojektować i wykonać dodatkowe punkty obserwacyjne, które zostaną włączone do późniejszej sieci monitoringowej.
- Dla obserwacji ewentualnych pionowych ruchów masowych związanych ze wzrostem ciśnienia w górotworze zaleca się również założenie sieci obserwacyjnej pomiarów wysokości terenu metodą interferometrii satelitarnej.

Badania stanu początkowego składowiska powinny obejmować:

- Badania składu powietrza glebowego i atmosferycznego wokół otworów istniejących oraz ponad zlikwidowanymi z zastosowaniem pomiarów terenowych pod kątem zawartości CO₂, a w przypadku szcerpanych złóż węglowodorów również metanu i etanu, ew. propanu i n-butanu oraz i-butanu. Badania powinny objąć pomiary terenowe (screening) z zastosowaniem spektrometru masowego (CO₂, CH₄, C₂H₆) oraz badania laboratoryjne w pobranych w terenie próbkach powietrza glebowego. Badania powinny być wykonane w różnych okresach wegetacyjnych w ciągu co najmniej jednego roku.
- Wokół zlikwidowanych głębokich otworów, zwłaszcza w przypadku składowisk w poziomach solankowych, należy rozważyć badanie powietrza glebowego pod kątem obecności helu jako wskaźnika migracji z głębokich warstw skorupy ziemskiej. W razie stwierdzenia nieszczelności

wzdłuż kolumn takich otworów należy podjąć działania w celu likwidacji takiego zagrożenia, co wiązać się może z koniecznością rekonstrukcji (ponownego zacementowania) otworu.

- Badania chemizmu wód podziemnych ze wszystkich poziomów wodonośnych w profilu powyżej uszczelnienia kompleksu magazynowego z uwzględnieniem zmienności sezonowej (kilka serii pomiarowych) obejmujące również badania zawartości rozpuszczonych gazów: CO₂, w przypadku szcerpanych złóż węglowodorów – CH₄ i C₂H₆.
- W przypadku stwierdzenia znacznych ilości CO₂, (nawet okresowo) należy wykonać identyfikację charakterystyki izotopowej gazu. Dotyczy to zarówno badań wód podziemnych jak i powietrza gruntowego.
- Jeżeli przy zatłaczaniu dwutlenku węgla ma być stosowana substancja znacznikowa (znacznik), należy określić naturalny poziom danego znacznika w powietrzu glebowym oraz w wodach podziemnych.
- Wykonanie pomiarów referencyjnych wysokości terenu metodą interferometrii satelitarnej przed rozpoczęciem zatłaczania. Wyniki pomiarów będą stanowiły poziom odniesienia dla obserwacji ewentualnych pionowych ruchów masowych związanych ze wzrostem ciśnienia w górotworze w wyniku zatłaczania dwutlenku węgla w fazie operacyjnej.

Monitoring środowiskowy podczas fazy operacyjnej składowiska, obejmującej zatłaczanie dwutlenku węgla (przez 30 lat dla każdego z projektów)

Dla każdej z rozpatrywanych lokalizacji, ze względu na bezpieczeństwo ludzi, środowiska i obiektów infrastruktury zaleca się wykonanie badań analogicznych do ww. *badan stanu początkowego składowiska*, a w szczególności prowadzenie obserwacji strumienia CO₂ wokół wszystkich otworów zatłaczających.

Obserwacje strumienia CO₂ wokół wszystkich otworów zatłaczających prowadzić można z wykorzystaniem metody tzw. kowariancji wirów i pomiarów absorpcji w podczerwieni. Metoda ta zlicza strumień CO₂ w powietrzu atmosferycznym ponad terenem o określonej powierzchni. W przypadku wystąpienia niekontrolowanego wypływu CO₂ ze zbiorników, linii przesyłowych czy bezpośrednio z otworu zatłaczającego, powinno to być widoczne w odczytach pomiarowych, a zsynchronizowane odczyty z anemometru mogą pomóc w zlokalizowaniu źródła wypływu.

Monitoring środowiskowy podczas fazy pooperacyjnej (zamknięcia) składowiska (przez 20 lat dla każdego z projektów):

Dla każdej z rozpatrywanych lokalizacji, po zakończeniu zatłaczania CO₂ do składowiska należy wdrożyć obserwacje powietrza glebowego i atmosferycznego wokół otworów zatłaczających w takim samym zakresie i takimi samymi metodami jak w fazie operacyjnej, jak również wokół otworów monitoringowych, oraz wcześniej zlikwidowanych głębokich otworów, nawiercających kompleks składowania.

Zakres i częstotliwość obserwacji monitoringowych w zakresie badań wód podziemnych i powietrza glebowego w rejonie potencjalnych dróg migracji powinny być analogiczne jak w fazie operacyjnej. Istotne jest też kontrolowanie ewentualnych wycieków produktów ropopochodnych w przypadku składowisk w szcerpanych złożach ropy naftowej i gazu ziemnego.

Jeśli chodzi o obserwacje ruchów pionowych z zastosowaniem interferometrii satelitarnej – ze względu na zakończenie działań w górotworze pomiary kontrolne mogą być wykonywane rzadziej, początkowo raz na miesiąc, w kolejnych latach – raz na kwartał, z zachowaniem tych samych terminów pomiarów.

Monitoring po przekazaniu odpowiedzialności Krajowemu Administratorowi Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla (przez 30 lat dla każdego z projektów)

W przypadku wszystkich trzech lokalizacji, jeżeli w fazie pooperacyjnej (zamknięcia składowiska) do momentu przejęcia odpowiedzialności przez KAPS nie zanotowano żadnych negatywnych oddziaływań zamkniętego składowiska na wody podziemne i strefę przypowierzchniową, można ograniczyć wykonywanie badań składu powietrza glebowego do obserwacji terenowych wykonywanych raz w roku, przed okresem wegetacyjnym, czyli wczesną wiosną. Pomiary fizykochemiczne w wodach podziemnych należy prowadzić dalej na każdym składowisku w takim samym zakresie jak w poprzednich etapach, z tym, że obserwacje terenowe parametrów fizykochemicznych oraz dodatkowe analizy laboratoryjne TOC i TPH (tylko w przypadku sczerpanego złoża ropy naftowej) można ograniczyć do dwóch serii w roku.

Kontrola pełnej fizykochemii wód podziemnych powinna być nadal prowadzona raz w roku. Pionowe ruchy masowe (obserwacje z zastosowaniem interferometrii satelitarnej) mogą być kontrolowane raz w roku.

Jeżeli we wcześniejszych etapach doszło do obserwacji niepożądanych zjawisk wpływu na środowisko (emisji, wycieków, wstrząsów, itp.), zakres działań monitoringowych w tym etapie powinien być odpowiednio dostosowany do potrzeb wynikających z tamtych incydentów i działań podjętych w związku z nimi.

2.1 Składowanie na lądzie w poziomach solankowych

Projekt (scenariusz) nr 1 obejmuje składowanie średnio 5 mln ton CO₂/rok (przez 30 lat, czyli w sumie 150 mln ton), na lądzie w strukturze o powierzchni ok. 250 km², obejmującej formacje solankowe o dużej pojemności, wyraźnie większej od wymaganej. Kompleks składowania występuje w przedziale głębokości ok. 1,0-1,5 km p.p.t. (zbiorniki i uszczelnienia).

Niezbędne jest w takim przypadku dokładne i szczegółowe rozpoznanie struktury, m.in. celem określenia przestrzennego rozkładu parametrów uszczelnienia (miąższość, integralność, skład, ciśnienie przebicia) jak również oceny możliwości ucieczki CO₂ poza kompleks składowania. Obejme to wstępne rozpoznanie składowiska (geofizyka, w tym sejsmika 2D) oraz szczegółowe rozpoznanie składowiska (w tym sejsmika 3D/3C, 4 otwory badawcze – 3 o głębokości ok. 1,6 km, 1 – ok. 1 km). Zagospodarowanie składowiska wymagałoby wykonania (względnie adaptacji) znacznej liczby odwiertów (6 otworów zatłaczających – poziomych i/lub pionowych o głębokości ok. 1,6 km, otwory badawcze zaadoptowane do monitoringu) oraz budowy infrastruktury naziemnej. Rozpoznanie struktury należy rozpocząć od wykonania sejsmiki wysokorozdzielczej obejmującej kilka profili o łącznej długości rzędu 200-400 km (zależnie od stopnia rozpoznania i jakości archiwalnych danych sejsmicznych). Będzie to podstawą do wstępnego oszacowania długoterminowego ryzyka geologicznego składowania, w oparciu o dostępne dane geologiczno-geofizyczne i hydrogeologiczne oraz opracowane na podstawie tych danych modele kompleksu składowania. Analizy takie, aktualizowane na kolejnych etapach monitoringu, powinny pozwolić na ocenę szczelności składowiska w aspekcie długoterminowym i możliwych ryzyk środowiskowych. Jednocześnie pozwoli to na zaprojektowanie lokalizacji i parametrów sejsmiki trójwymiarowej (3D i 3C – odbiorniki trójkomponentowe), a także wstępnych lokalizacji otworów badawczych.

Sejsmika 3D/3C powinna zostać zaprojektowana w strefie wybranej do zatłaczania na obszarze struktury - będzie to najprawdopodobniej ok. 100 km². Posłuży to do opracowania szczegółowego modelu struktury, a równocześnie monitoringu stanu początkowego. Pomiaru te powinny być w fazie operacyjnej składowiska powtarzane co 3-5 lat w oparciu o stałą sieć monitoringu sejsmicznego (sejsmika 4D), zintegrowaną z pomiarami VSP w otworach (ze źródłem na powierzchni) i co 5 lat w fazie zamknięcia oraz po przekazaniu odpowiedzialności właściwemu organowi. Rekomendowany jest ciągły monitoring mikrosejsmiczny, co najmniej w 1 otworze obserwacyjnym (głęb. ok. 1 km).

W otworach zatłaczających, przed rozpoczęciem zatłaczania należy przeprowadzić badania szczelności, w oparciu o pomiary geofizyki wiertniczej w otworze zarurowanym, testy ciśnienia, pobieranie próbek cementu i testy minifrac. Natomiast w fazie operacyjnej składowiska należy prowadzić badanie szczelności instalacji w otworze pomiędzy rurami eksploatacyjnymi a okładzinowymi.

W obrębie kompleksu składowania należy prowadzić w otworach monitoring ciśnienia i temperatury (kilka razy do roku), substancji znacznikowych dodawanych do zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla, jak również nasycenia przestrzeni porowych nadkrytycznym/ciekłym CO₂, a także opróbowanie horyzontów złożowych. Należy też rozważyć wykonanie międzyotworowej tomografii sejsmicznej i tomografii elektrooporowej. Ponadto w fazie operacyjnej składowiska na głowicy każdego otworu zatłaczającego powinien być prowadzony monitoring ciśnienia, temperatury i przepływu zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla.

Monitoring środowiskowy

Terenowe pomiary powietrza glebowego i atmosferycznego należy wykonywać, w ciągu całego cyklu życia projektu, co najmniej 2 razy w roku w okresie przed i po wegetacyjnym (wiosna/jesień) wokół otworów zatłaczających, monitoringowych i wszystkich innych otworów w obrębie składowiska, istniejących i zlikwidowanych, pod kątem zawartości CO₂, metodą spektrometrii mas oraz znacznika, jeśli jest wykorzystywany (metoda pomiarowa w zależności od znacznika). W miarę rozbudowy składowiska należy włączać kolejne otwory.

Obserwacje należy prowadzić w siatce promienistej, której centrum jest badany otwór (co najmniej 3 promienie pod kątem 120° lub 4 promienie co 90°). Ilość punktów pomiarowych na danym kierunku (promieniu) zależy od głębokości otworu, ale co najmniej 5 próbek na promieniu (np. nad otworem i w odległości 0,5 m, 1 m, 5 m, 10 m). Z punktów o wskazaniach przewyższających tło należy pobrać próbki do badań laboratoryjnych, które dla uściślenia wyników powinny być rozszerzone o analizy stężenia propanu, n-butanu i i-butanu oraz w razie dalszych niejasności – o analizy izotopowe do porównania z charakterystyką zatłaczanego strumienia CO₂. Nawet jeśli nie stwierdza się niepokojących wyników, z 5-10% punktów należy pobrać próbki kontrolne do weryfikacji w laboratorium. Jeżeli w profilu geologicznym w obrębie składowiska stwierdzono inne niż kolumny otworów wiertniczych potencjalne drogi migracji substancji (np. nieszczelne uskoki, wyrobiska podziemne, pionowe i kierunkowe), należy zaprojektować punkty pomiarowe zawartości CO₂ (i znacznika, jeśli jest używany) w miejscach, gdzie jest największe prawdopodobieństwo ujścia tych dróg na powierzchnię, o ile da się to określić. W przypadku wyrobisk, jeśli są dostępne, pomiary prowadzone mogą być pod ziemią (w systemie ciągłym, lub tak, jak badania powierzchniowe).

Monitoring wód podziemnych (użytkowych) powinien być prowadzony we wszystkich wytypowanych otworach obserwacyjnych i wszystkich poziomach wodonośnych ponad składowiskiem oraz w ustalonym buforze na kierunku odpływu z obszaru. W miarę wypełniania składowiska, powinny być włączane kolejne otwory obserwacyjne. Pomiary właściwości fizykochemicznych wody (pH, Eh, przewodność elektryczna) powinny być wykonywane co najmniej 4 razy w roku, jeśli to możliwe, bezpośrednio w otworze w strefie filtra lub na powierzchni w komorach przepływowych bez dostępu powietrza atmosferycznego. W razie radykalnych zmian tych parametrów, zwłaszcza spadku pH, należy pobrać próbki do badań laboratoryjnych, w tym zwłaszcza rozpuszczonego CO₂ oraz obecności znacznika (jeśli jest stosowany). Szczegółowy zakres badań zależy od warunków hydrogeologicznych badanego poziomu wodonośnego. Co najmniej raz w roku należy kontrolować skład fizykochemiczny wody w celu śledzenia zmian w stosunku do stanu początkowego wywołanych innymi czynnikami niż wpływ składowiska.

Obserwacje ruchów pionowych z użyciem interferometrii satelitarnej prowadzi się w sposób ciągły. W przypadku zanotowania ruchów pionowych w obrębie składowiska, i ewentualnie incydentów w obserwacjach mikrosejsmicznych, mogących wywołać rozszczelnienie zidentyfikowanych potencjalnych dróg migracji, należy wykonać dodatkową serię badań wód podziemnych oraz powietrza glebowego i atmosferycznego w rejonie, który oceniono jako zagrożony wpływem zdarzenia sejsmicznego i w czasie odpowiednim do wystąpienia jego następstw w wodach podziemnych i w strefie przypowierzchniowej – zależy to głównie od głębokości i charakteru zdarzenia. Podobnie należy postąpić w przypadku zanotowania masowych ruchów pionowych.

2.2 Składowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu gazu ziemnego

Projekt (scenariusz) nr 2 obejmuje składowanie średnio 2,5 mln ton CO₂/rok (przez 30 lat, czyli w sumie 75 mln ton), na lądzie w stosunkowo dużym (jak na warunki polskie) szcerpanym złożu gazu o powierzchni ok. 25 km², o pojemności zbliżonej do wymaganej (pierwotne zasoby wydobywalne rzędu 20-25 mld m³ gazu ziemnego). Jest to struktura naftowa stosunkowo dobrze rozpoznana, produkująca gaz przez dziesiątki lat, którego eksploatacja została właśnie zakończona lub znajduje się na końcowym etapie (wtedy mamy scenariusz składowania dwutlenku węgla połączonego z produkcją węglowodorów, tzn. gazu ziemnego – CO₂-EGR). Kompleks składowania występuje w przedziale głębokości ok. 1,1-1,5 km p.p.t. (zbiornik i kompleks uszczelniający).

Przewidziane jest szczegółowe rozpoznanie struktury (w tym sejsmika 3D/3C, 3 otwory badawcze – 2 o głębokości ok. 1,6 km, 1 – ok. 1 km) na potrzeby jej wykorzystania, jako składowiska dwutlenku węgla oraz monitoringu stanu początkowego. Zagospodarowanie struktury na składowisko wymagałoby wykonania (względnie adaptacji) kilku odwiertów (4 otwory zatłaczające – poziome i/lub pionowe o głębokości ok. 1,6 km, otwory badawcze zaadoptowane do monitoringu) oraz budowy infrastruktury naziemnej, w tym do oczyszczania gazu, jeśli dotyczy.

Monitoring, stanu początkowego powinien być poprzedzony oszacowaniem długoterminowego ryzyka geologicznego składowania, w oparciu o dostępne dane geologiczno-geofizyczne i hydrogeologiczne oraz modele kompleksu składowania. Analizy takie, aktualizowane na kolejnych etapach monitoringu, powinny pozwolić na ocenę szczelności składowiska w aspekcie długoterminowym i możliwych ryzyk środowiskowych.

Na potrzeby opracowania szczegółowego modelu struktury, a równocześnie monitoringu stanu początkowego, należy wykonać sejsmikę 3D (i 3C – odbiorniki trójkomponentowe) na obszarze struktury (25 km²). Pomiary te powinny być w fazie operacyjnej składowiska powtarzane co 5 lat w oparciu o stałą sieć monitoringu sejsmicznego (sejsmika 4D), zintegrowaną z pomiarami VSP w otworach (ze źródłem na powierzchni) i z taką samą częstotliwością w fazie zamknięcia oraz po przekazaniu odpowiedzialności właściwemu organowi. Rekomendowany jest ponadto ciągły monitoring mikrosejsmiczny, co najmniej w 1 otworze obserwacyjnym o głębokości ok. 1 km.

W otworach zatłaczających, przed rozpoczęciem zatłaczania należy przeprowadzić badania szczelności, w oparciu o pomiary geofizyki wiertniczej w otworze zarurowanym, testy ciśnienia, pobieranie próbek cementu i testy minifrac. Natomiast w fazie operacyjnej składowiska należy prowadzić badanie szczelności instalacji w otworze pomiędzy rurami eksploatacyjnymi a okładzinowymi.

W obrębie kompleksu składowania należy prowadzić w otworach monitoring ciśnienia i temperatury (kilka razy do roku), substancji znacznikowych dodawanych do zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla, jak również nasycenia przestrzeni porowych nadkrytycznym/ciekłym CO₂, a także opróbowanie horyzontów złożowych. Ponadto w fazie operacyjnej składowiska na głowicy każdego otworu zatłaczającego powinien być prowadzony monitoring ciśnienia, temperatury i przepływu zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla.

Monitoring środowiskowy

Terenowe pomiary powietrza glebowego i atmosferycznego należy wykonywać, w ciągu całego cyklu życia projektu, co najmniej 2 razy w roku w okresie przed i po wegetacyjnym (wiosna/jesień) wokół otworów zatłaczających, monitoringowych i wszystkich innych otworów w obrębie składowiska, istniejących i zlikwidowanych, pod kątem zawartości CO₂, metanu i etanu metodą spektrometrii mas oraz znacznika, jeśli jest wykorzystywany (metoda pomiarowa w zależności od znacznika). Zakłada się, że w tak małym obszarze i specyfice złoża węglowodorów, które musiało być właściwie uszczelnione, nie zachodzi konieczność identyfikacji innych niż kolumny otworów dróg migracji do czasu wystąpienia ewentualnych zdarzeń sejsmicznych wywołanych eksploatacją składowiska.

Obserwacje należy prowadzić w siatce promienistej, której centrum jest badany otwór (co najmniej 3 promienie pod kątem 120° lub 4 promienie co 90°). Ilość punktów pomiarowych na danym kierunku (promieniu) zależy od głębokości otworu, ale co najmniej 5 próbek na promieniu (np. nad otworem i w odległości 0,5 m, 1 m, 5 m, 10 m). Z punktów o wskazaniach przewyższających tło należy pobrać próbki do badań laboratoryjnych, które dla uściślenia wyników powinny być rozszerzone o analizy stężenia propanu, n-butanu i i-butanu oraz w razie dalszych niejasności – o analizy izotopowe do porównania z charakterystyką zatłaczanego strumienia CO₂. Nawet jeśli nie stwierdza się niepokojących wyników, z 5-10% punktów należy pobrać próbki kontrolne do weryfikacji w laboratorium. Jeżeli oprócz otworów zatłaczających i monitoringowych na terenie składowiska zachowały się inne jeszcze niezlikwidowane otwory wiertnicze (np. poeksploatacyjne), należy obserwować w nich ewentualny wzrost stężenia metanu oraz kontrolować ciśnienie w kolumnach otworów, aby nie dopuścić do ewentualnej erupcji ze złoża gazu.

Monitoring wód podziemnych (użytkowych) powinien być prowadzony we wszystkich wytypowanych otworach obserwacyjnych i wszystkich poziomach wodonośnych ponad składowiskiem oraz w ustalonym buforze na kierunku odpływu z jego obszaru. W miarę wypełniania składowiska, powinny być włączane kolejne otwory obserwacyjne. Pomiary właściwości fizykochemicznych wody (pH, Eh, przewodność elektryczna) powinny być wykonywane co najmniej 4 razy w roku, jeśli to możliwe, bezpośrednio w otworze w strefie filtra lub na powierzchni w komorach przepływowych bez dostępu powietrza atmosferycznego. W razie radykalnych zmian tych parametrów, zwłaszcza spadku pH, należy pobrać próbki do badań laboratoryjnych, w tym zwłaszcza rozpuszczonego CO₂ i węglowodorów z grupy alkanów oraz obecności znacznika (jeśli jest stosowany). Szczegółowy zakres badań zależy od warunków hydrogeologicznych badanego poziomu wodonośnego. Co najmniej raz w roku należy kontrolować skład fizykochemiczny wody w celu śledzenia zmian w stosunku do stanu początkowego wywołanych innymi czynnikami niż wpływ składowiska.

Obserwacje ruchów pionowych z użyciem interferometrii satelitarnej prowadzi się w sposób ciągły. W przypadku zanotowania ruchów pionowych w obrębie składowiska, i ewentualnie incydentów w obserwacjach mikro-sejsmicznych, mogących wywołać rozszczelnienie izolacji pierwotnego złoża, należy dokładnie przeanalizować wyniki obserwacji w celu identyfikacji możliwych rozszczelnień górotworu i powstania dróg migracji substancji ze złoża/składowiska. Po takim incydencie należy też wykonać dodatkowe serie pomiarowe w wodach wszystkich poziomów wodonośnych oraz w strefie przypowierzchniowej w rejonie obserwowanych otworów monitoringowych i ewentualnych zlikwidowanych, gdyż incydent mógł naruszyć ich integralność.

2.3 Składowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu ropy naftowej

Projekt (scenariusz) nr 3 obejmuje składowanie średnio 1 mln ton CO₂/rok (przez 30 lat, czyli w sumie 30 mln ton), na lądzie w (znacznym stopniu) szcerpanym i stosunkowo dużym złożu ropy o powierzchni ok. 30 km², o pojemności zbliżonej do wymaganej (pierwotne zasoby wydobywalne rzędu 10 mln ton ropy naftowej). Jest to struktura naftowa stosunkowo dobrze rozpoznana, produkująca węglowodory przez wiele lat, zaś scenariusz dotyczy składowania dwutlenku węgla połączonego z produkcją węglowodorów (CO₂-EOR). Kompleks składowania występuje w przedziale głębokości ok. 2,8-3,2 km p.p.t. (zbiornik i kompleks uszczelniający).

Przewidziane jest szczegółowe rozpoznanie struktury (w tym sejsmika 3D/3C, 3 otwory badawcze – 2 o głębokości ok. 3,3 km, 1 – ok. 2 km) na potrzeby jej wykorzystania jako składowiska dwutlenku węgla oraz monitoringu stanu początkowego. Zagospodarowanie struktury na składowisko wymagałoby wykonania (względnie adaptacji) kilku odwiertów (3 otwory zatłaczające – poziome i/lub pionowe o głębokości ok. 3,3 km, otwory badawcze zaadoptowane na monitoringowe/obserwacyjne), oraz budowy infrastruktury naziemnej, w tym do oczyszczania węglowodorów.

Monitoring, stanu początkowego powinien być poprzedzony oszacowaniem długoterminowego ryzyka geologicznego składowania, w oparciu o dostępne dane geologiczno-geofizyczne i hydrogeologiczne oraz modele kompleksu składowania. Analizy takie, aktualizowane na kolejnych etapach monitoringu, powinny pozwolić na ocenę szczelności składowiska w aspekcie długoterminowym i możliwych ryzyk środowiskowych.

Na potrzeby opracowania szczegółowego modelu struktury, a równocześnie monitoringu stanu początkowego, należy wykonać sejsmikę 3D (i 3C – odbiorniki trójkomponentowe) na obszarze struktury (30 km²). Pomiary te powinny być w fazie operacyjnej składowiska powtarzane co 5 lat w oparciu o stałą sieć monitoringu sejsmicznego (sejsmika 4D) i z taką samą częstością w fazie zamknięcia oraz po przekazaniu odpowiedzialności właściwemu organowi. Rekomendowany jest ciągły monitoring mikrosejsmiczny, co najmniej w 1 otworze obserwacyjnym o głębokości ok. 2 km.

W otworach zatłaczających, przed rozpoczęciem zatłaczania należy przeprowadzić badania szczelności, w oparciu o pomiary geofizyki wiertniczej w otworze zarurowanym, testy ciśnienia, pobieranie próbek cementu i testy minifrac. Natomiast w fazie operacyjnej składowiska należy prowadzić badanie szczelności instalacji w otworze pomiędzy rurami eksploatacyjnymi a okładzinowymi.

W obrębie kompleksu składowania należy prowadzić w otworach monitoring ciśnienia i temperatury (kilka razy do roku), substancji znacznikowych dodawanych do zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla, jak również nasycenia przestrzeni porowych nadkrytycznym/ciekłym CO₂, a także opróbowanie horyzontów złożowych. Ponadto w fazie operacyjnej składowiska na głowicy każdego otworu zatłaczającego powinien być prowadzony monitoring ciśnienia, temperatury i przepływu zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla.

Przydatne też może być prowadzenie przed i w trakcie zatłaczania CO₂ ciągłego monitoringu geochemicznego i izotopowego płynów złożowych pobieranych z otworów produkcyjnych na złożu.

Monitoring środowiskowy takiego składowiska, powinien być prowadzony w sposób analogiczny jak w przypadku sczerpanego złoża gazu (projekt/scenariusz nr 2; podrozdział. 2.3; w tym monitoring powietrza glebowego i atmosferycznego w sąsiedztwie każdego otworu na złożu oraz monitoring wód podziemnych).

Ponadto istotne jest obserwowanie wzrostu ciśnienia w złożu, bo występuje możliwość samowypływów ropy, zwłaszcza jeżeli pozostały jeszcze niezlikwidowane albo/i zlikwidowane otwory eksploatacyjne. Migracja ropy wzdłuż rozszczelnionych kolumn otworów jest trudniejsza niż w przypadku gazu, ale w sumie też możliwa.

Jeśli chodzi o monitoring środowiskowy to można też rozszerzyć zakres badań prowadzonych w wodach podziemnych o analizy TOC (zawartości materii organicznej) i TPH (zawartości substancji ropopochodnych), wykonywane co najmniej 2 razy w roku. Ze względu na rodzaj skały zbiornikowej składowiska proponuje się też włączyć obserwacje twardości węglanowej wód podziemnych.

2.4 Składowanie na morzu w szcerpanym złożu ropy naftowej

Projekt (scenariusz) nr 4 obejmuje składowanie średnio 0,5 mln ton CO₂/rok (przez 20 lat, czyli w sumie 10 mln ton), pod dnem morza w (znacznym stopniu) szcerpanym złożu ropy o powierzchni ok. 30 km², o pojemności zbliżonej do wymaganej (pierwotne zasoby wydobywalne rzędu 5 mln ton ropy naftowej). Jest to struktura naftowa stosunkowo dobrze rozpoznana, produkująca węglowodory przez wiele lat, zaś scenariusz dotyczy składowania dwutlenku węgla połączonego z produkcją węglowodorów (CO₂-EOR). Kompleks składowania występuje w przedziale głębokości ok. 1,3-1,6 km p.p.m. (zbiornik i kompleks uszczelniający), zaś głębokość morza w tym rejonie jest rzędu 100 m.

Zagospodarowanie struktury na składowisko wymagałoby wykonania (ewentualnie adaptacji) 2 otworów zatłaczających (najprawdopodobniej krzywionych), o głębokości ok. 1,7 km, położonych na obszarze struktury w odległości ok. 2 km od siebie (przykładowo). Potrzebna będzie też dedykowana infrastruktura na platformach wiertniczych, w tym do oczyszczania węglowodorów.

W otworach zatłaczających powinien być prowadzony monitoring szczelności odwiertów. Przed rozpoczęciem zatłaczania należy wykonać badania geofizyczne oceniające jakość wykonanego zabiegu cementowania. Natomiast w trakcie zatłaczania należy prowadzić badanie szczelności instalacji w otworze pomiędzy rurami eksploatacyjnymi a okładzinowymi. W obrębie kompleksu składowania należy prowadzić monitoring ciśnienia i temperatury (kilka razy w roku), a także substancji znacznikowych dodawanych do zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla. Ponadto w fazie operacyjnej składowiska na głowicy każdego otworu powinien być prowadzony ciągły monitoring ciśnienia, temperatury i przepływu zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla.

W promieniu ok. 10 m wokół każdego otworu zatłaczającego na dnie morza, a także innych otworów na obszarze struktury, powinny być wykonywane, na wszystkich etapach życia projektu, co najmniej 2 razy w roku, pomiary sonarowe głębokości dna morskiego, pobór próbek osadów dennych i wody morskiej ponad dnem morza celem wykonania badań geochemicznych (w tym także TOC i TPH) i izotopowych, a także badanie habitatów/ekosystemów dennych. Obejmuje to określenie stanu początkowego środowiska, monitoring w trakcie zatłaczania, a także na etapie zamknięcia oraz na etapie po przekazaniu odpowiedzialności za składowisko właściwemu organowi. Lokalizacja odwiertu na dnie morza powinna być okresowo filmowana ze zdalnie kierowanego pojazdu podwodnego, który może być też wykorzystywany do poboru próbek osadów wody morskiej ponad dnem.

Celem opracowania szczegółowego modelu struktury, co także będzie stanowić poziom odniesienia na potrzeby monitoringu zatłaczania dwutlenku węgla, należy wykonać sejsmikę 3D na obszarze struktury (30 km²). W trakcie zatłaczania sejsmika 3D powinna być powtarzana (monitoring sejsmiczny 4-D) celem śledzenia „chmury” CO₂ w obrębie zbiornika/kompleksu składowania – co 3-5 lat. Na etapie zamknięcia oraz na etapie po przekazaniu odpowiedzialności za składowisko właściwemu organowi sejsmika 3D na obszarze struktury powinna być powtarzana co 5 lat.

Można ponadto wykonać w sąsiedztwie każdego otworu zatłaczającego, co 3-5 lat w fazie operacyjnej, pomiary grawimetryczne na dnie morza na profilu przechodzącym przez obydwa otwory, o długości 10 km, z krokiem 250 m. Pozwoli to pośrednio, w powiązaniu z danymi z otworów na temat rozkładu temperatury w kompleksie składowania (oraz wielkości zatłoczonego dwutlenku węgla), na określenie gęstości zatłoczonego dwutlenku węgla w zbiorniku, gdzie jest składowany.

2.5 Składowanie na morzu w poziomach solankowych

Projekt (scenariusz) nr 5 obejmuje składowanie średnio 2 mln ton CO₂/rok (przez 30 lat, czyli w sumie 60 mln ton), po dnie morza w formacji solankowej otaczającej złożę ropy ze scenariusza 4. Nie jest to struktura typu pułapki, lecz obszar gdzie zatłoczony dwutlenek węgla mógłby się rozprzestrzeniać, w większym stopniu w jednym kierunku (niż w prostym) z uwagi na układ warstw geologicznych. Orientacyjnie założono obszar do zatłaczania i monitoringu o powierzchni 250 km², przy czym sam zbiornik ma znacznie szerszy zasięg. Podobnie jak scenariuszu 4 kompleks składowania występuje w przedziale głębokości ok. 1,3-1,6 km p.p.m. (zbiornik i kompleks uszczelniający), zaś głębokość morza w tym rejonie jest rzędu 100 m.

Zagospodarowanie omawianego miejsca składowania wymagałoby wykonania (ewentualnie adaptacji) 6 otworów zatłaczających (najprawdopodobniej krzywionych), o głębokości ok. 1,7 km, położonych na rozpatrywanym obszarze w odległości ok. 2 km od siebie (przykładowo) czyli na obszarze rzędu 10 km². Potrzebne będą też platformy wiertnicze wraz z dedykowaną infrastrukturą zatłaczania.

W otworach zatłaczających powinien być prowadzony monitoring szczelności odwiertów. Przed rozpoczęciem zatłaczania należy wykonać badania geofizyczne oceniające jakość wykonanego zabiegu cementowania. Natomiast w trakcie zatłaczania należy prowadzić badanie szczelności instalacji w otworze pomiędzy rurami eksploatacyjnymi a okładzinowymi. W obrębie kompleksu składowania należy prowadzić monitoring ciśnienia i temperatury (kilka razy w roku), a także substancji znacznikowych dodawanych do zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla. Ponadto w fazie operacyjnej składowiska na głowicy każdego otworu powinien być prowadzony ciągły monitoring ciśnienia, temperatury i przepływu zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla.

W promieniu ok. 10 m wokół każdego otworu zatłaczającego na dnie morza, a także innych w ich sąsiedztwie w strefie zatłaczania (istniejących i zlikwidowanych), powinny być wykonywane, na wszystkich etapach życia projektu, co najmniej 2 razy w roku, pomiary sonarowe głębokości dna morskiego, pobór próbek osadów dennych i wody morskiej ponad dnem morza celem wykonania badań geochemicznych i izotopowych, a także badanie habitatów/ekosystemów dennych. Obejmuje to określenie stanu początkowego środowiska, monitoring w trakcie zatłaczania, a także na etapie zamknięcia oraz na etapie po przekazaniu odpowiedzialności za składowisko właściwemu organowi. Lokalizacja odwiertu na dnie morza powinna być okresowo filmowana ze zdalnie kierowanego pojazdu podwodnego, który może być też wykorzystywany do poboru osadów dennych i wody morskiej ponad dnem.

Celem opracowania szczegółowego modelu rozpatrywanego obszaru, co także będzie stanowić poziom odniesienia na potrzeby monitoringu zatłaczania dwutlenku węgla, należy wykonać sejsmikę 3D na obszarze 250 km². W trakcie zatłaczania sejsmika 3D powinna być powtarzana (monitoring sejsmiczny 4-D) celem śledzenia „chmury” CO₂ w obrębie zbiornika/kompleksu składowania – co 3-5 lat. Na etapie zamknięcia oraz na etapie po przekazaniu odpowiedzialności za składowisko właściwemu organowi sejsmika 3D na obszarze struktury powinna być powtarzana co 5 lat.

Można ponadto wykonać w sąsiedztwie każdego otworu zatłaczającego, co 3-5 lat w fazie operacyjnej, pomiary grawimetryczne na dnie morza na 6 profilach przechodzących w różnych

konfiguracjach przez otwory zatłaczające, o długości 10 km każdy, z krokiem 250 m. Pozwoli to pośrednio, w powiązaniu z danymi z otworów na temat rozkładu temperatury w kompleksie składowania (oraz wielkości zatłoczonego dwutlenku węgla), na określenie gęstości zatłoczonego dwutlenku węgla w zbiorniku, gdzie jest składowany.

Tabela 1 Orientacyjny zakres i harmonogram monitoringu składowisk dwutlenku węgla dla 5 typowych, przykładowych projektów CCS/CCUS jakie mogłyby być realizowane w warunkach polskich

PROJEKT TECHNIKA	1-skladowanie na lądzie w poziomach solankowych	2-skladowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu gazu ziemnego	3-skladowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu ropy naftowej	4-skladowanie na morzu w szcerpanym złożu ropy naftowej	5-skladowanie na morzu w poziomach solankowych
Monitoring stanu początkowego czy wykonywane/dotyczy					
Sejsmika 3D – kompleks składowania	tak	tak	tak	tak	tak
VSP – kompleks składowania	tak	tak	nie	nie	nie
Badanie szczelności otworów	tak	tak	tak	tak	tak
Badania w otworach – parametry kompleksu składowania	tak	tak	tak	tak	tak
Opróbowanie horyzontów złożowych	tak	tak	tak	nie	nie
Badania mikrosejsmiczne w otworze	nie	nie	nie	nie	nie
Badania powietrza glebowego i atmosferycznego wokół otworów	tak	tak	tak	n.d.	n.d.
Badania wód podziemnych	tak	tak	Tak	n.d.	n.d.
Badania ruchów pionowych powierzchni (InSAR)	tak	tak	tak	nie	nie
Badania dna morskiego (sonar, opróbowanie, habitaty)	n.d.	n.d.	n.d.	tak	tak
Badania grawimetryczne na dnie morza	n.d.	n.d.	n.d.	tak	tak
Monitoring w fazie operacyjnej (zatłaczania) częstość					
Sejsmika 3D – kompleks składowania	co 3-5 lat	co 5 lat	co 5 lat	co 3-5 lat	co 3-5 lat
VSP – kompleks składowania	co 3-5 lat	co 5 lat	co 5 lat	co 3-5 lat	co 3-5 lat
Pomiary strumienia CO ₂ na głowicy otworu zatłaczającego	ciągłe	ciągłe	ciągłe	ciągłe	ciągłe

Badanie szczelności otworów	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	tak	tak
Badania w otworach – parametry kompleksu składowania	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	tak	tak
Opróbowanie horyzontów złożowych	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	nie	nie
Badania mikrosejsmiczne w otworze	ciągłe	ciągłe	ciągłe	nie	nie
Badania powietrza glebowego i atmosferycznego wokół otworów	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	n.d.	n.d.
Badania wód podziemnych	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	n.d.	n.d.
Badania ruchów pionowych powierzchni (InSAR)	ciągłe	ciągłe	ciągłe	ciągłe	ciągłe
Badania dna morskiego (sonar, opróbowanie, habitaty)	n.d.	n.d.	n.d.	tak	tak
Badania grawimetryczne na dnie morza	n.d.	n.d.	n.d.	co 3-5 lat	co 3-5 lat
Monitoring w fazie zamknięcia składowiska (likwidacji zakładu górniczego, do przekazania odpowiedzialności za składowisko właściwemu organowi) częstość					
Sejsmika 3D – kompleks składowania	co 5 lat	co 5 lat	co 5 lat	co 5 lat	co 5 lat
Badania powietrza glebowego i atmosferycznego wokół otworów	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	n.d.	n.d.
Badania wód podziemnych	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	co 3-6 miesięcy	n.d.	n.d.
Badania ruchów pionowych powierzchni (InSAR)	co 1-3 miesiące	co 1-3 miesiące	co 1-3 miesiące	nie	nie
Badania dna morskiego (sonar, opróbowanie, habitaty)	n.d.	n.d.	n.d.	co 6 miesięcy	co 6 miesięcy
Monitoring po przejęciu odpowiedzialności przez właściwy organ częstość					
Sejsmika 3D – kompleks składowania	co 5 lat	co 5 lat	co 5 lat	co 5 lat	co 5 lat
Badania powietrza glebowego i	co rok	co rok	co rok	n.d.	n.d.

atmosferycznego wokół otworów					
Badania wód podziemnych	co rok	co rok	co rok	n.d.	n.d.
Badania ruchów pionowych powierzchni (InSAR)	co rok	co rok	co rok	nie	nie
Badania dna morskiego (sonar, opróbowanie, habitaty)	n.d.	n.d.	n.d.	co 6 miesięcy	co 6 miesięcy

3. Rekomendacje zmian krajowych przepisów wykonawczych

Na podstawie wyżej omówionych informacji, analiz, opracowań i dokumentów oraz praktycznych doświadczeń i wytycznych z krajów UE, EOG, USA, Kanady, Australii, Wielkiej Brytanii (w miarę dostępności informacji), jak również obowiązujących norm międzynarodowych, przedstawiono wstępne rekomendacje zmian krajowych przepisów wykonawczych dotyczących monitoringu podziemnych składowisk dwutlenku węgla oraz kryteriów akceptacji składu strumienia dwutlenku węgla dopuszczalnego do składowania. Rekomendacje te dotyczą zagadnień monitoringu składowisk CO₂ na wszystkich etapach życia projektów CCS/CCUS, obejmujących podziemne składowanie dwutlenku węgla oraz podziemne składowanie dwutlenku węgla połączone z eksploatacją złóż węglowodorów, na lądzie i pod dnem morza oraz kryteriów akceptacji składu strumienia dwutlenku węgla dopuszczalnego do składowania w zależności od stosowanej technologii wychwytu.

W rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 30 października 2015 roku w sprawie zabezpieczenia finansowego i zabezpieczenia środków związanych z podziemnym składowaniem dwutlenku węgla (Dz.U. 2015 poz. 2144) ujęto trzykrotnie działania naprawcze i rozliczanie emisji w przypadku wycieku, zakładając, że na każdym z trzech etapów – eksploatacji, zamknięcia i po przekazaniu odpowiedzialności KAPS może dojść do wycieku 2% składowanego dwutlenku węgla. W praktyce oznacza to, że operator jest obciążony przed rozpoczęciem działalności polegającej na podziemnym składowaniu dwutlenku węgla, gwarancjami odpowiadającym cenie 12% przewidzianego do składowania dwutlenku węgla. Jest to założenie wysoce przesadzone i nierealistyczne, gdyż oparte na modelowaniach procesu zatłaczania szacunki z literatury przedmiotu dotyczące składowania dwutlenku węgla w formacjach solankowych (np. Chadwick, 2008) mówią, że realistyczne i akceptowalne wartości ucieczki CO₂ poza kompleks składowania są rzędu 0,01%/rok, co daje najwyżej 0,8% składowanego CO₂ w ciągu całego cyklu tkowych CCS, trwającego maksymalnie 80 lat. Inne wyniki symulacji zatłaczania, tym razem w przypadku złoża ropy naftowej (złoża Weyburn w Kanadzie; Wilson i Monea, 2004) wskazują z 95 % prawdopodobieństwem, że 98,7-99,5% początkowego CO₂ pozostanie składowane w ośrodku geologicznym przez 5000 lat, co daje w sumie 0,5-1,3% wartości ucieczki CO₂ poza kompleks składowania w tym okresie, zaś w okresie 80 lat to byłby zapewne ułamek promila. Stąd proponuje się zmianę wskaźnika b w załączniku nr 1 do rozporządzenia z wielkości 2% na wielkość 0,3%.

W rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 30 października 2015 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących eksploatacji podziemnego składowiska dwutlenku węgla, zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla oraz prowadzenia monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla (Dz.U. z 2015 r. poz. 1840) proponuje się dokonanie korekt w tabeli – załączniku do rozporządzenia, w oparciu o międzynarodowe standardy i specyfikacje strumienia dwutlenku węgla poszczególnych projektów CCS/CCUS, omówione w rozdziale 2.3 poprzedniego sprawozdania cząstkowego z niniejszego przedsięwzięcia – raportu „Analiza technik i zasad monitoringu składowisk CO₂” (Wójcicki, 2024). W szczególności proponuje się zmianę zawartości H₂O z wielkości 0,0001% (czyli 1 p.p.m.) na wielkość 30 p.p.m. dla wszystkich typów technologii wychwytu. Należałoby się przy tym zastanowić czy wydzielanie w tabeli trzech różnych technologii wychwytu jest słuszne, czy może poprzestać na jednej kolumnie z wartościami parametrów, czy może dodać więcej kolumn odnoszących się do różnych procesów przemysłowych (tzn. za Porter i in., 2015).

Podsumowanie

W ramach sprawozdania cząstkowego "Rekomendacje dla stosowania monitoringu składowisk CO₂ w Polsce", przeanalizowano zapisy aktualnie obowiązującej ustawy Prawo geologiczne i górnicze oraz krajowych przepisów wykonawczych w zakresie monitoringu podziemnych składowisk dwutlenku węgla w całym okresie życia projektów CCS/CCUS, nawiązujące do odnośnych zapisów Dyrektywy 2009/31/WE w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla. Przeanalizowano także wyniki przeglądów Dyrektywy i sprawozdania krajów UE i EOG z jej wdrażania (ostatnie z roku 2023) w przedmiotowym zakresie.

Przeanalizowano najnowsze obowiązujące i dotychczasowe Zalecenia (Guidance Documents) do Dyrektywy gdzie omawiane są zagadnienia szczegółowe/techniczne, tzn. dokumenty GD2 z lipca 2024 roku i 2011 roku, obejmujące zagadnienia szczegółowego rozpoznania podziemnych składowisk dwutlenku węgla (odnoszące się też do monitoringu stanu początkowego), składu strumienia dwutlenku węgla, monitoringu i działań naprawczych. Porównano je z krajowymi przepisami wykonawczymi.

Wykorzystano przy tym analizę przepisów wykonawczych/wytycznych w krajach UE i EOG, a także innych krajach (USA, Kanada, Australia, Wielka Brytania) wykonaną w ramach poprzedniego sprawozdania cząstkowego "Analiza technik i zasad monitoringu składowisk CO₂" z niniejszego zadania.

W oparciu o informacje zgromadzone i opracowane ramach poprzedniego sprawozdania cząstkowego "Analiza technik i zasad monitoringu składowisk CO₂" oraz niniejszego opracowania i wcześniejsze raporty przedsięwzięcia KAPS CO₂ przedstawiono rekomendowany zakres i sposób prowadzenia monitoringu składowisk CO₂ dla 5 typowych projektów CCS/CCUS jakie mogłyby być realizowane w warunkach polskich. Były to następujące projekty: 1-skladowanie na lądzie w poziomach solankowych; 2-skladowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu gazu ziemnego; 3-skladowanie na lądzie w dużym szcerpanym złożu ropy naftowej; 4-skladowanie na morzu w szcerpanym złożu ropy naftowej oraz 5-skladowanie na morzu w poziomach solankowych. Dla każdego scenariusza (projektu) zaproponowano metody monitoringu składowisk CO₂ (geofizyczne, geochemiczne, etc.), zakres (liczba punktów pomiarowych/kilometraż, lokalizacja, przedział głębokości, etc.) i ramy czasowe (harmonogram) monitoringu w całym okresie życia rozpatrywanych projektów CCS/CCUS.

Na podstawie wyżej omówionych informacji, analiz, opracowań i dokumentów oraz praktycznych doświadczeń i wytycznych z krajów UE, EOG, USA, Kanady, Australii, Wielkiej Brytanii (w miarę dostępności informacji), jak również obowiązujących norm międzynarodowych, przedstawiono wstępne rekomendacje na temat zmian krajowych przepisów wykonawczych dotyczących monitoringu podziemnych składowisk dwutlenku węgla oraz kryteriów akceptacji składu strumienia dwutlenku węgla dopuszczalnego do składowania. Rekomendacje te dotyczą zagadnień monitoringu składowisk CO₂ na wszystkich etapach życia projektów CCS/CCUS, obejmujących podziemne składowanie dwutlenku węgla oraz podziemne składowanie dwutlenku węgla połączone z eksploatacją złóż węglowodorów, na lądzie i pod dnem morza oraz kryteriów akceptacji składu strumienia dwutlenku węgla dopuszczalnego do składowania w zależności od stosowanej technologii wychwytu.

Literatura

- Alberta Government, 2013. Carbon Capture and Storage, Summary Report of the Regulatory Framework Assessment. Crown in the Right of the Province of Alberta, as represented by the Minister of Energy, Edmonton, Alberta, Canada (raport dostępny na stronie alberta.ca; [6259895-2013-carbon-capture-storage-summary-report.pdf](https://www.alberta.ca/6259895-2013-carbon-capture-storage-summary-report.pdf)).
- Australian Government, 2023. Offshore Carbon Capture and Storage Regulatory Approvals. [https://www.nopta.gov.au/documents/fact-sheets/Offshore-Carbon-Capture-and-Storage-Regulatory-Approvals-2023.pdf#:~:text=There%20are%20four%20regulatory%20bodies%20that%20are,%E2%80%A2%20Nature%20Positive%20Regulation%20Division%20\(within%20DCCEEW\).](https://www.nopta.gov.au/documents/fact-sheets/Offshore-Carbon-Capture-and-Storage-Regulatory-Approvals-2023.pdf#:~:text=There%20are%20four%20regulatory%20bodies%20that%20are,%E2%80%A2%20Nature%20Positive%20Regulation%20Division%20(within%20DCCEEW).)
- Decyzja Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/853 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 1257/2013 oraz dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 94/63/WE i 2009/31/WE, jak również dyrektywy Rady 86/278/EWG i 87/217/EWG, w odniesieniu do przepisów proceduralnych w zakresie sprawozdawczości w dziedzinie środowiska oraz uchylająca dyrektywę Rady 91/692/. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2018/853/oj/pol>
- 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, Euratom, 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. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0031>
- Komisja Europejska, 2014. Sprawozdanie Komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie wdrażania dyrektywy 2009/31/WE w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (COM/2014/099 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX:52014DC0099>
- Komisja Europejska, 2017. Sprawozdanie Komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady dotyczące wdrożenia dyrektywy 2009/31/WE w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (COM/2017/37 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52017DC0037>
- Komisja Europejska, 2019. Sprawozdanie Komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady dotyczące wdrożenia dyrektywy 2009/31/WE w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (COM/2019/566 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX:52019DC0566>
- Komisja Europejska, 2023. Sprawozdanie Komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady dotyczące wdrożenia dyrektywy 2009/31/WE w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (COM/2023/657 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023DC0657>

- Lubaś J., Szott W., Wójcicki A. 2015. Wspomaganie wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego z polskich złóż z wykorzystaniem CO₂ i jego równoczesną sekwestracją. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 465, 45–56. <https://geojournals.pgi.gov.pl/bp/article/view/32249>
- Majer E., Sokołowska, M. (red.), 2023. Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania. PIG-PIB, ISBN 978-83-67567-41-1. https://geoportal.pgi.gov.pl/css/atlas_y_gi/images/publikacje/zasady-dokumentowania-podziemne-bezzbiornikowe-magazynowanie-skladowanie.pdf
- NETL, 2017. Best Practices: Monitoring, Verification, and Accounting (MVA) for Geologic Storage Projects. DOE/NETL-2017/1847 (dostępne na stronie netl.doe.gov).
- North Sea Transition Authority, 2024. Guidance for Measurement of Carbon Dioxide for Carbon Storage Permit Applications. <https://www.nstauthority.co.uk/media/fsvaljz2/guidance-for-measurement-of-carbon-dioxide-for-carbon-storage-permit-applications.pdf>
- Parsons Brinckerhoff, 2012. Development of a Measurement, Monitoring and Verification Technical Framework for Geological Storage of CO₂ in Australia: Feedback Report. GCCSI Ltd., Canberra, Australia (raport dostępny na stronie GCCSI; <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/75386/development-measurement-monitoring-verification-technical-framework.pdf>).
- Porter, R.T.J., Fairweather, M., Pourkashanian, M. et al., 2015. The range and level of impurities in CO₂ streams from different carbon capture sources. International Journal of Greenhouse Gas Control, 36. 161-174. ISSN 1750-5836 <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.02.016>
- PTRC, 2015. Aquistore, CO₂ Storage At The World's First Integrated CCS Project. GCCSI Ltd., 2015 (raport dostępny na stronie GCCSI; <https://globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/192038/aquistore-co2-storage-worlds-first-integrated-ccs-project.pdf>).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 maja 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań, jakim powinien odpowiadać plan zagospodarowania podziemnego składowiska dwutlenku węgla, Dziennik Ustaw z 2014 roku, poz 591.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 3 września 2014 r. w sprawie obszarów, na których dopuszcza się lokalizowanie kompleksu podziemnego składowania (Dziennik Ustaw z 2014 roku, poz. 1272).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2015 r. w sprawie dokumentacji geologiczno-inwestycyjnej złóż węglowodorów, Dziennik Ustaw z 2015 roku, poz. 968.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2015 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących eksploatacji podziemnego składowiska dwutlenku węgla, zatłaczanego strumienia dwutlenku węgla oraz prowadzenia monitoringu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, Dziennik Ustaw z 2015 roku, poz. 1840.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2015 roku w sprawie zabezpieczenia finansowego i zabezpieczenia środków związanych z podziemnym składowaniem dwutlenku węgla, Dziennik Ustaw z 2015 roku, poz. 2144).

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 roku w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, Dziennik Ustaw z 2016 roku, poz. 2033.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 grudnia 2017 r. w sprawie planów ruchu zakładów górniczych (Dziennik Ustaw z 2017 roku, poz. 2293).

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 2019 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko (Dziennik Ustaw z 2019 roku, poz. 1839).

Shell, 2023. Quest Carbon Capture and Storage Project – Measurement, Monitoring and Verification Plan, October 2023 update. Shell Canada Limited, Calgary, Alberta. Dostępny na stronie AER: <https://static.aer.ca/prd/documents/by-topic/ccus/2023-ShellQuest-MMV-Plan.pdf>

Shogenova, A., Piessens, K., Holloway, S., Bentham, M., Martínez, R., Flornes, K.M., Poulsen, N.E., Wójcicki, A., Sliupa, S., Kucharič, L., Dudu, A., Persoglia, S., Hladik, V., Saftic, B., Kvassnes, A., Shogenov, K., Ivask, J., Suárez, I., Sava, C., Sorin, A., Chikkatur, A., 2014. Implementation of the EU CCS Directive in Europe: results and development in 2013. Energy Procedia. Elsevier, 6662–6670. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.700>

Szott, W., Łętkowski, P., Gołębek, A., Miłek, K., 2012. Ocena efektów wspomaganego wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego z wybranych złóż krajowych z zastosowaniem zatłaczania CO₂. Prace naukowe Instytutu Nafty i Gazu nr 184, Kraków, ISSN 0209-0724.

US EPA, 2013. Geologic Sequestration of Carbon Dioxide Underground Injection Control (UIC) Program Class VI Well Testing and Monitoring Guidance. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/epa816r13001.pdf>

Ustawa z dnia 27 września 2013 o zmianie ustawy – Prawo geologiczne i górnicze oraz niektórych innych ustaw, 2013. Dz. U. z 2013 roku, poz. 1238, z dnia 24 października 2013 r.

Ustawa z dnia 16 czerwca 2023 r. o zmianie ustawy - Prawo geologiczne i górnicze oraz niektórych innych ustaw, Dziennik Ustaw z 2023 roku, poz. 2029.

Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze, 2024, Dziennik Ustaw z 2024 roku, poz. 1290.

Wammer Østgaard, L., 2024. CCS under the London Protocol and the Helsinki Convention: status, Baltic Carbon Forum 2024, 3-4 October 2024. <https://baltic-carbon-forum.com/2024/wp-content/uploads/2024/10/00.01-2.pdf>

Wilson, M., Monea, M., (ed.), 2004. IEA GHG Weyburn CO₂ Monitoring & Storage Project, summary Report 2000-2004, PTRC. https://ptrc.ca/pub/projects/past/weyburn-midale/Summary_Report_2000_2004.pdf

Wójcicki A., Adamczak-Biały T., Duczmańska-Kłonowska J., Feldman-Olszewska A., Kłonowski M., Słodkowski M., 2017. Opracowanie końcowe z Etapu I: "Zadanie KAPS CO₂: Monitorowanie statusu projektów CCS (2015-2017 r.)". Inw. 5706/2018 Arch. CAG PIG, Warszawa (sprawozdanie z I etapu przedsięwzięcia).

Wójcicki A., Duczmańska-Kłonowska J., Kłonowski M., Feldman-Olszewska A., Pieńkowski G., Waksmundzka M., Wierzbowski H., Jarosiński M., Adamczak-Biały T., Roman M., Słodkowski M., Sobień K., 2021. Zadanie KAPS CO₂: monitorowanie statusu projektów CCS [Zadanie Krajowego Administratora Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla]. Inw. 828/2022 Arch. CAG PIG, Warszawa (sprawozdanie z I i II etapu przedsięwzięcia, prace za lata 2015-2020).

Wójcicki A., Sobień K., Słodkowski M., Pieńkowski G., Zacharski J., Adamczak-Biały T., Duczmańska-Kłonowska J., Kłonowski M., Wierzbowski H., Feldman-Olszewska A., Jarosiński M., Roman M., Waksmundzka M., 2022. Zadanie KAPS CO₂: monitorowanie statusu projektów CCS (Etap III). PIG-PIB Kompleksowy raport z prac objętych wszystkimi etapami zadania (lata 2015-2022), na stronie KAPSCO2. <https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/pub/KAPS/WebHome/komplraport.pdf>

Wójcicki, 2024. Analiza technik i zasad monitoringu składowisk CO₂. Sprawozdanie cząstkowe z przedsięwzięcia „Zadanie Krajowego Administratora Podziemnych Składowisk Dwutlenku Węgla (KAPS CO₂): Monitorowanie podziemnych składowisk CO₂”. PIG-PIB.

Trinomics (ed.), 2015. Support to the review of Directive 2009/31/EC on the geological storage of carbon dioxide (CCS Directive) Final deliverable under Contract No 340201/2014/679421/SER/CLIMA.C1, January 2015. <https://trinomics.eu/wp-content/uploads/2015/05/CCS-Directive-evaluation-final-report.pdf>

Strony www:

European CCS Demonstration Project Network: <https://www.ccusnetwork.eu/ccus-europe/european-ccs-demonstration-project-network-2009-%E2%80%93-2018>

Global CCS Institute: <http://www.globalccsinstitute.com/>

Global Status of CCS, 2023: Global CCS Institute – raport roczny, za rok 2023 –: <https://status23.globalccsinstitute.com/>

Country reports on the implementation of the CCS Directive https://climate.ec.europa.eu/eu-action/industrial-carbon-management/deploying-industrial-carbon-management-europe/country-reports-implementation-ccs-directive_en

Guidance Documents – Implementation of directive 2009/31/EC on the geological storage of carbon dioxide (stara wersja, 2011):

GD1: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1c2eee9f-83fb-4d3a-9dfe-43f85defd39f/language-en>

GD2: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/47fb8148-d436-4ba3-88fb-ceb774b88933>

GD3: <https://op.europa.eu/pl/publication-detail/-/publication/bdb84106-a565-490a-8a34-cbfeaa53e609/language-pl/format-PDF/source-search>

GD4: <https://publications.europa.eu/pl/publication-detail/-/publication/35133f89-3c84-4d6e-b87b-8dfde0e0dec5>

Guidance Documents (uaktualnienie, 2024):

GD1: https://climate.ec.europa.eu/document/download/951d14ea-ce0f-4753-92dd-35ba88920888_en?filename=ccs-implementation_gd1_en_0.pdf

GD2: https://climate.ec.europa.eu/document/download/6f19cb98-b791-466d-8f3c-32c5bb12be2d_en?filename=ccs-implementation_gd2_en.pdf

GD3: https://climate.ec.europa.eu/document/download/f647725c-e86f-4bea-b698-48c6b0390ad3_en?filename=ccs-implementation_gd3_en.pdf

GD4: https://climate.ec.europa.eu/document/download/9a6b221d-642e-499e-a5a0-298ce1068b21_en?filename=ccs-implementation_gd4_en.pdf

KAPSCO2 <http://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/bin/view/KAPS/WebHome>