

RADOSŁAW TARKOWSKI*, SYLWESTER MAREK**, BARBARA ULIASZ-MISIAK***

Wstępna geologiczna analiza struktur do składowania CO₂ w rejonie Bełchatowa

Wprowadzenie

Prowadzenie działalności w zakresie wychwytywania i geologicznego składowania dwutlenku węgla w formacjach skalnych (CCS) wymaga rozpoznania struktur geologicznych, które będą zdolne pomieścić odpowiednią ilość gazu w sposób bezpieczny i zapewniający jego trwałe unieszkodliwienie. Istnieje potrzeba wskazania takich struktur dla krajów UE, gdyż dla 12 emitentów dwutlenku węgla, w ramach „Programu Flagowego UE”, planuje się zrealizowanie projektów demonstracyjnych obejmujących wychwytywanie i podziemne składowanie dwutlenku węgla. Jest to ważny problem również dla Polski – znaczącego emitenta dwutlenku węgla w Europie, kraju o wyjątkowo korzystnych warunkach do podziemnego składowania tego gazu. Na terenie Niżu Polskiego występuje gruby (kilka kilometrów miąższości) kompleks permio-mezozoicznych skał osadowych, w którym znajdują się struktury wyniesione, związane głównie z tektoniką salinarną (antykliny, słupy solne, poduszki solne, wały solne) o korzystnych parametrach zbiornikowych (Marek, Pajchłowa 1997; Dadlez 2001; Bojarski 1996).

W Polsce rozważa się podziemne składowanie dwutlenku węgla w głębokich solankowych poziomach, w złożach węglowodorów (ropy naftowej i gazu ziemnego) oraz w głębokich nie eksploatowanych pokładach węgla (Tarkowski 2005; Tarkowski, Uliazsz-Misiak 2005, 2006; Wójcicki 2009). Ze względu na uwarunkowania geologiczno-złożowe, parametry zbiornikowe węgla oraz eksploatację w obszarach aglomeracji miejskiej, składowanie w głębokich nieeksploatowanych pokładach węgla jest mało prawdopodobne.

* Doc. dr hab. inż., ** Prof. dr hab. inż., *** Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN od 2003 roku prowadzi badania mające na celu rozpoznanie możliwości podziemnego składowania dwutlenku węgla. Dotychczasowe wyniki badań wskazują, że największy potencjał składowania posiadają głębokie solankowe poziomy Niżu Polskiego. W publikacjach scharakteryzowano mezozoiczne (dolnokredowy, dolnojurański oraz górno- i dolnotriasowy) głębokie solankowe poziomy jako najbardziej odpowiednie do składowania CO₂, zebrano dane dla wyznaczenia obszarów perspektywicznych składowania CO₂ wraz z oceną potencjału składowania CO₂ oraz rozpoczęto typowanie struktur geologicznych dla wybranych emitentów (Tarkowski 2005, 2008; Tarkowski, Uliasz-Misiak 2005, 2006; Uliasz-Misiak 2007, 2008). Wybór odpowiedniej struktury geologicznej, w której będzie prowadzone składowanie jest istotny, gdyż decyduje o powodzeniu całego procesu.

Obecnie prace związane z geologicznym składowaniem CO₂ są wykonywane w ramach krajowego programu pt.: *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania*. Jest on realizowany przez konsorcjum instytucji naukowych, którego IGSMiE PAN jest członkiem. Koordynatorem jest Państwowy Instytut Geologiczny. W ramach prac wykonywanych w tym programie, IGSMiE PAN przeanalizował i wskazał struktury geologiczne do składowania dwutlenku węgla w głębokich solankowych poziomach mezozoiku w rejonie Bełchatowa. Prezentowany artykuł przedstawia wyniki tej wstępnej analizy. W toku dalszych prac wytypowane struktury będą uwzględnione przy wyborze struktury/struktur do szczegółowego rozpoznania pod kątem ich przydatności dla składowania CO₂ emitowanego przez elektrownię Bełchatów, największego w Europie zakładu opalanego węglem brunatnym.

1. Typowanie struktur w poziomach wodonośnych odpowiednich dla składowania CO₂

Typowanie struktur geologicznych odpowiednich do składowania dwutlenku węgla przeprowadza się na podstawie kryteriów geologicznych i złożowych, uwzględniając specyficzne właściwości dwutlenku węgla. Podstawowe kryteria to: głębokość zalegania utworów przeznaczonych do składowania CO₂, ich miąższość, porowatość i przepuszczalność, mineralizacja wód, odpowiednio gruby nakład skał o słabej przepuszczalności. Służą one do wstępnej selekcji struktur charakteryzujących się nie tylko odpowiednią pojemnością, ale i możliwością bezpiecznego przeprowadzenia procesu składowania dwutlenku węgla.

Zatłaczany pod ziemię dwutlenek węgla powinien znajdować się w fazie superkrytycznej. Przyjmując średni stopień geotermiczny i ciśnienie hydrostatyczne, składowanie powinno być prowadzone w utworach zalegających na głębokości poniżej 800 m. Ze względu na wzrost kosztów składowania CO₂ wraz z głębokością zakłada się, że nie będzie ono prowadzone na głębokościach poniżej 3000–3500 m. Duża miąższość i wysoka porowatość skał poziomu zbiornikowego gwarantują odpowiednią pojemność składowania

dwutlenku węgla, natomiast odpowiedniej grubości nadkład skał o niskiej przepuszczalności zapewnia bezpieczeństwo tego procesu.

Nie opracowano do tej pory jednolitych kryteriów wstępnego typowania miejsc składowania dwutlenku węgla. W tabeli 1 przedstawiono kluczowe kryteria geologiczne wyboru miejsc z podziałem na wskaźniki pozytywne, ostrzegawcze i negatywne. Zostały one przyjęte za *Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers. Observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects* (2006) z modyfikacjami autorów artykułu. Kryteria opracowane w ramach projektu CO2STORE uwzględniały dwa rodzaje wskaźników: pozytywne (*positive indicators*) i ostrzegawcze (*cautionary indicators*). W niniejszej pracy zaproponowano wprowadzenie dodatkowo wskaźników negatywnych. Wskaźniki ostrzegawcze odpowiadają w tym przypadku wartościom pośrednim między pozytywnymi i negatywnymi. Należy podkreślić, że waga poszczególnych kryteriów wykorzystywanych w wyborze struktur zależy od analizującego. Kryteria te uwzględniają uwarunkowania geologiczno-żłozowe, nie uwzględniają ekonomicznych, środowiskowych czy prawnych, jak również lokalizacji struktury w stosunku do źródła emisji. Autorzy zgodnie z przyjętym w *Programie krajowym* założeniem przyjęli, że przedmiotem analizy będą struktury (jako punkt odniesienia przyjęto otwór w stropie struktury) położone w odległości nie przekraczającej 80 km od emitenta CO₂ – elektrowni w Bełchatowie.

TABELA 1

Kryteria geologiczne wyboru miejsc składowania (Best practise..., 2006 z modyfikacjami autorów)

TABLE 1

Storage site selection geological criteria (Best practice..., 2006 with authors' modifications)

	Wskaźniki pozytywne	Wskaźniki ostrzegawcze	Wskaźniki negatywne
Głębokość	>800 m, <2500 m	2500–3500 m	<800 m, >3500 m
Miąższość efektywna poziomu zbiornikowego	>50 m	20–50 m	<20 m
Porowatość	>20%	10–20%	<10%
Przepuszczalność	>300 mD	300–100 mD	100–10 mD
Mineralizacja	>100 g/dm ³	100–30 g/dm ³	<30 g/dm ³
Uskoki	brak uskoków	uskoki wygasające w formacji do składowania	uskoki przechodzące w skały nadkładu
Miąższość nadkładu	>100 m	20–100 m	<20 m
Pojemność składowania	>60 Mt	30–60 Mt	<30 Mt

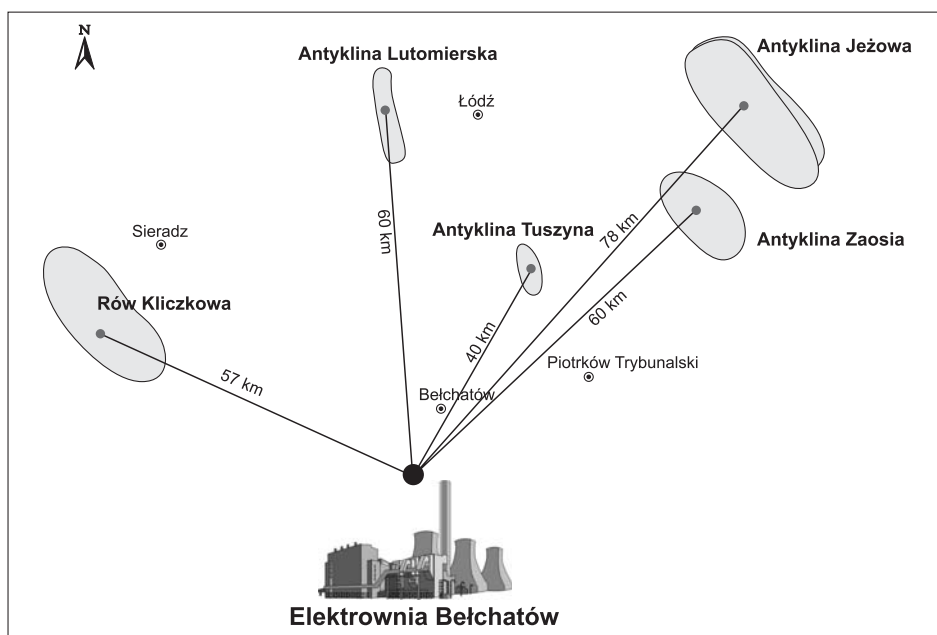
Analizowane były: pojemność struktury, właściwości poziomu do składowania (głębokość zalegania stropu, miąższość efektywna, porowatość, przepuszczalność, mineralizacja wód) oraz właściwości skał nadkładu (obecność uskoków i ich zasięg; miąższość).

Minimalną ilość składowanego CO₂ przyjęto na poziomie 60 Mt, co odpowiada 30-letniej emisji zakładu emitującego 2 Mt CO₂ rocznie. Głębokość zalegania stropu formacji

zbiornikowej określono na podstawie dostępnych danych otworowych, opierając się na opracowaniach archiwalnych. Miąższość poziomu zbiornikowego została uśredniona, często wyinterpretowana, lepiej rozpoznana w przypadku rozpoznania struktury kilkoma otworami oraz badaniami geofizycznymi. Wartości porowatości, przepuszczalności i mineralizacji pochodzą z dokumentacji otworowych, a w przypadku ich braku z opracowań regionalnych.

Stopień zaangażowania tektonicznego rozważanych struktur jest rozpoznany w różnym stopniu, często niedostatecznym, natomiast miąższość skał nadkładu jest elementem dobrze rozpoznany jak również rodzaj skał, który go buduje.

Dla rejonu Bełchatowa wskazano 5 lokalizacji struktur do podziemnego składowania dwutlenku węgla (rys. 1). Antyklina Jeżowa-J i Jeżowa-T mają tę samą lokalizację; pozostałe to: rów Kliczkowa, antyklina Lutomińska, antyklina Tuszyna i antyklina Zaosia (tab. 2). Spośród wybranych struktur jedna zlokalizowana jest w utworach kredy dolnej (antyklina Tuszyna), jedna w utworach triasu górnego (rów Kliczkowa), po dwie w utworach jury dolnej (antyklina Jeżowa-J, antyklina Lutomińska) i triasu dolnego (antyklina Jeżowa-T, antyklina Zaosia).



Rys. 1. Lokalizacja struktur do składowania CO₂ w rejonie Bełchatowa

Fig. 1. Location of structures suitable for CO₂ storage in Bełchatów area

Struktury te w różnym zakresie spełniają podstawowe kryteria dla miejsc składowania dwutlenku węgla. Warunek odpowiedniej pojemności składowania CO₂ spełniają wszystkie struktury. Poziom przeznaczony do składowania CO₂ w czterech strukturach zalega poniżej -800 m, w dwóch nieco powyżej -800 m (Jeżów-J i Tuszyn). W przypadku struktur

TABELA 2

Typowanie struktur tektonicznych w poziomach wodonośnych w rejonie Bełchatowa odpowiednich dla geologicznego składowania CO₂; przyjęte kryteria patrz tab. 1

TABLE 2

Definition of tectonic structures in aquifers in Bełchatów area suitable for geological CO₂ storage; vide tab. 1 – accepted criteria

Nazwa	Antyklina Jeżowa-J	Antyklina Jeżowa-T	Rów Kliczkowa	Antyklina Lutomierska	Antyklina Tuszyna	Antyklina Zaosia
Pojemność składowania	+	+	+	+	+	+
Głębokość	-	+/-	+	+	+/-	+/-
Miąższość	+	+	+/-	+	+	+
Porowatość	+/-	+/-	+/-	+/-	+	+/-
Przepuszczalność	+	+/-	+/-	+	+	+/-
Mineralizacja	-	+	+	+	-	+
Uskoki	+	+/-	-	+/-	+/-	-
Miąższość nadkładu	+	+	+	+/-	+	+

Jeżowa-T i Zaosia strop zalega na głębokości większej niż -2500 m (około 2900–3000 m). Miąższość poziomu zbiornikowego w pięciu strukturach jest większa niż 50 m, jedynie w przypadku rowu Kliczkowa jest ona mniejsza (36 m). Porowatość 20% i wyższa jest w przypadku dwóch struktur, w pozostałych (czterech) porowatość jest poniżej 20%, ale nie niższa niż 10%. Kryterium przepuszczalności powyżej 300 mD spełnione jest dla trzech struktur, w pozostałych przepuszczalność jest rzędu 100–300 mD. Mineralizacja powyżej 100 g/dm³ jest w czterech strukturach, w dwóch jest w zakresie kryterium negatywnego (Jeżów-J i Tuszyn). W dwóch strukturach uskoki występują w poziomie zbiornikowym i przechodzą do wyżejleżących warstw (Kliczków i Zaosie), w dwóch uskoki wygasają w poziomie przeznaczonym do składowania (Lutomiersk i Tuszyn). W przypadku antyklin Jeżowa-J i Jeżowa-T uskoki wygasają poniżej poziomu do składowania. W większości przypadków (czterech) nadkład uszczelniający ma odpowiednią miąższość, jedynie w jednej strukturze jest poniżej 100 m, nigdzie nie przekracza zaś kryterium ostrzegawczego.

Należy podkreślić, że przedstawione typowanie struktur (tab. 2) obarczone jest niepewnościami związanymi z brakiem dostatecznej ilości danych geologiczno-złożowych, wynikającym ze słabego rozpoznania otworami wiertniczymi i badaniami sejsmicznymi. Z tego powodu część wykorzystanych informacji pochodzi z danych regionalnych.

Przedstawiona lista struktur do podziemnego składowania CO₂ w utworach mezozoiku rejonu Bełchatowa nie jest ostateczna. W toku dalszych prac może być uzupełniona o nowe struktury i dane geologiczno-złożowe. Niektóre z wymienionych lokalizacji przy szczegółowym rozpoznaniu mogą okazać się nieprzydatne do podziemnego składowania dwutlenku węgla. Wytypowane i wstępnie scharakteryzowane struktury mogą stanowić podstawę wyboru najlepszych i najodpowiedniejszych z nich w celu szczegółowego rozpoznania możliwości podziemnego składowania dwutlenku węgla dla zakładu w Bełchatowie.

2. Pojemność składowania CO₂ wytypowanych struktur dla rejonu Bełchatowa

Pojemność podziemnego składowania dwutlenku węgla jest jednym z kluczowych czynników decydujących o przydatności struktury geologicznej do składowania. Pod pojęciem pojemności składowania CO₂ (*storage capacity CO₂*) rozumie się ilość dwutlenku węgla, jaka może być zatłoczona do danej struktury, bezpiecznie i bez skutków ubocznych dla środowiska (Tarkowski 2005; Uliasz-Misiak 2008).

W głębokich solankowych poziomach dwutlenek węgla będzie wiązany przy wykorzystaniu trzech mechanizmów: poprzez rozpuszczanie w wodzie złożowej, mineralne wiązanie poprzez geochemiczne reakcje z płynami złożowymi i skałami zbiornikowymi oraz hydrodynamiczne pułapkowanie CO₂ (Bachu, Adams 2003). Pojemność składowania we wszystkich rodzajach struktur geologicznych jest determinowana głównie przez jej wielkość, porowatość oraz założone właściwości PVT.

Dla struktur zlokalizowanych w rejonie Bełchatowa oszacowano pojemność składowania w przestrzeni porowej (tab. 3). Obliczono ją wykorzystując metodykę zaproponowaną w projekcie EU GeoCapacity. Wyraża się ona następującym wzorem:

$$M_{CO_2s} = A \cdot h \cdot \varphi \cdot \rho_{CO_2} \cdot C_{efs}$$

gdzie:

- M_{CO_2s} – pojemność składowania CO₂ w strukturze geologicznej,
- A – powierzchnia,
- h – efektywna miąższość,
- φ – porowatość,
- ρ_{CO_2} – gęstość CO₂ w warunkach złożowych,
- C_{efs} – współczynnik efektywności składowania CO₂.

TABELA 3

Szacunkowa pojemność składowania CO₂ w strukturach tektonicznych w rejonie Bełchatowa

TABLE 3

CO₂ storage capacity in tectonic structures of Bełchatów area

Nazwa	Pojemność składowania Mt
Antyklina Jeżowa-J	1 801
Antyklina Jeżowa-T	1 911
Rów Kliczkowa	88
Antyklina Lutomierska	112
Antyklina Tuszyna	67
Antyklina Zaosia	769

Obliczenia wykonano na podstawie dostępnych danych dla wybranych struktur: powierzchni, efektywnej miąższości, porowatości. Gęstość CO₂ w warunkach złożowych oszacowano na podstawie tabel (Span, Wagner 1996). Efektywność składowania jest ułamkiem objętości przestrzeni porowej zbiornika jaki może być wypełniony przez CO₂ (w fazie wolnej lub rozpuszczony) (Uliasz-Misiak 2008). Współczynnik pojemności efektywnej jest specyficzny dla każdego miejsca składowania i powinien być określony poprzez symulację komputerową i/lub doświadczalne prace terenowe. Opierając się na danych literaturowych współczynnik efektywności składowania CO₂ przyjęto na poziomie 20% (Best practise.... 2006).

Podsumowanie

Biorąc pod uwagę kryteria typowania miejsc do geologicznego składowania CO₂ przedstawione w *Best practise...* z modyfikacjami autorów, wskazano i wstępnie przeanalizowano dla rejonu Bełchatowa pięć struktur antyklinalnych: Jeżowa-J, Jeżowa-T, Lutomińska, Tuszyńska, Zaosia oraz rów Kliczkowa. Poziomy zbiornikowe rozważanych struktur występują w utworach dolnej kredy, dolnej jury, górnego i dolnego triasu. Wytypowane struktury spełniają w różnym stopniu kryteria miejsc składowania dwutlenku węgla, a przedstawiona lista nie jest ostateczna. Mogą one stanowić podstawę wyboru najlepszych i najodpowiedniejszych z nich w celu szczegółowego rozpoznania możliwości podziemnego składowania dwutlenku węgla dla elektrociepłowni Bełchatów.

Artykuł opracowano w ramach krajowego programu „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania” realizowanego na zlecenie Ministerstwa Środowiska, finansowanego ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Autorzy składają podziękowania dr L. Dziewińskiej za pomoc w zebraniu materiałów, które zostały wykorzystane w niniejszej publikacji.

LITERATURA

- Bach S., Adams J.J., 2003 – Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: Capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution. *Energy Conversion and Management*, 44 (20), s. 3151–3175.
- Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers. Observations and guidelines from the SACS and CO2STORE projects. Red. Chadwick A., Arts R., Bernstone C., May F., Thibeau S., Zweigel P., 2006. http://www.ngu.no/FileArchive/91/CO2STORE_BPM_final_small.pdf (wrzesień 2006), 289 s.
- Bojarski L. (red.), 1996 – Atlas geochemiczny i hydrochemiczny paleozoiku i mezozoiku oraz ascensyjnego zasolenia wód podziemnych na Niżu Polskim, 1:1 000 000. Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa.
- Dadlez R., 2001 – Przekroje geologiczne przez bruzdę śródpolską. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.

- Marek S., Pajchłowa M. (red.), 1997 – Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. Prace Państwowego Instytutu Geologicznego 153, s. 452.
- Span P., Wagner W., 1996 – A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa. *Journal of Chemical Reference Data*, 25 (6), s. 1509–1596.
- Tarkowski R., 2005 – Geologiczna sekwestracja CO₂. *Studia, Rozprawy, Monografie*, 132. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 106 s.
- Tarkowski R., 2008 – CO₂ storage capacity of geological structures located within Polish Lowland's Mesozoic formations. *Gosp. Sur. Min. t. 24, z. 4/1*, s. 101–111.
- Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., 2005 – Struktury geologiczne (poziomy wodonośne i złoża węglowodorów) dla podziemnego składowania CO₂ w Polsce. [W:] *Podziemne składowanie CO₂ w Polsce w głębokich strukturach geologicznych (ropo-, gazo- i wodonośnych)*. R. Tarkowski (red.), Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków, s. 69–111.
- Tarkowski R., Uliasz-Misiak B., 2006 – Possibilities of CO₂ sequestration by storage in geological media of major deep aquifers in Poland. *Chemical Engineering Research and Design* vol. 84, Issue: A9 Carbon Capture and Storage, s. 776–780.
- Uliasz-Misiak B., 2007 – Polish hydrocarbon deposits usable for underground CO₂ storage. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 23 (4), s. 111–120.
- Uliasz-Misiak B., 2008 – Pojemność podziemnego składowania CO₂ dla wybranych mezozoicznych poziomów wodonośnych oraz złóż węglowodorów w Polsce. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
- Wójcicki A., 2009 – Potencjał geologicznego składowania CO₂ w głębokich, nieeksploatowanych pokładach węgla Górnosląskiego Zagłębia Węglowego. *Przegląd Geologiczny* 57/2, s. 138–143.

WSTĘPNA GEOLOGICZNA ANALIZA STRUKTUR DO SKŁADOWANIA CO₂ W REJONIE BĘLCHATOWA

Słowa kluczowe

Składowanie CO₂, struktury geologiczne, poziomy wodonośne, Polska

Streszczenie

Przedstawiono wyniki wstępnej analizy geologicznej struktur w mezozoicznych solankowych poziomach (dolnej kredy, dolnej jury oraz dolnego i górnego triasu) Niżu Polskiego do składowania CO₂ w rejonie Bełchatowa. Na podstawie kryteriów przedstawionych w *Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers* z modyfikacjami autorów wskazano 6 struktur w 5 lokalizacjach (antyklina Jeżowa, rów Kliczkowa, antyklina Lutomińska, antyklina Tuszyńska i antyklina Zaosia). Przedmiotem analizy była: pojemność składowania CO₂, głębokość poziomu zbiornikowego, jego miąższość efektywna, porowatość, przepuszczalność, mineralizacja, obecność uskoków oraz miąższość skał nadkładu. Przejęto, że odległość struktury geologicznej od elektrowni w Bełchatowie nie przekroczy 80 km, a minimalną pojemność struktury założono na poziomie 60 Mt. Obliczeń pojemności wolumetrycznej struktur dokonano w ujednoczonej metodyce przyjętej w projekcie EU GeoCapacity. Wytypowane i wstępnie scharakteryzowane struktury spełniają w różnym stopniu kryteria miejsc składowania dwutlenku węgla. Mogą one stanowić podstawę wyboru najlepszych i najodpowiedniejszych z nich dla szczegółowego rozpoznania możliwości geologicznego składowania dwutlenku węgla dla elektrowni Bełchatów.

PRELIMINARY GEOLOGICAL ANALYSIS OF STRUCTURES TO STORE CO₂ WITHIN THE BELCHATÓW AREA

Key words

CO₂ storage, geological structure, aquifer, Poland

Abstract

Results of a preliminary geological analysis on CO₂ storage suitability of geological structures of Mesozoic brine aquifers [Lower Cretaceous, Lower Jurassic, Lower and Upper Triassic] of the Polish Lowlands at the Belchatów area were presented.

According to criteria given in the “*Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers*”, with some authors’ alterations, six structures in five locations were defined [the Jeżów anticline, the Kliczków trough, the Lutomska anticline, the Tuszyn anticline, the Zaosie anticline]. Analysis covered: CO₂ storage capacity, reservoir depth, its effective thickness, porosity, permeability, mineralization, fault occurrence, overburden thickness.

It was assumed that the distance between geological structure and the Belchatów Power Plant is less or equal to 80 km, while the minimum structure’s capacity was assumed at 60 Mt. Calculations of volumetric capacity of structures were performed according to the unified methodology accepted at the GeoCapacity EU Project.

Selected and preliminarily defined structures meet to a certain degree criteria of carbon dioxide storage locations. They might form base to select the best and the most suitable of them to recognize in detail geological carbon dioxide storage possibilities for the Belchatów power plant.

