

PERSPEKTYWY GEOLOGICZNEJ SEKWESTRACJI CO₂ W POŁĄCZENIU Z ODZYSKIEM METANU Z POKŁADÓW WĘGLA W WARUNKACH GÓRNOŚLĄSKIEGO ZAGŁĘBIA WĘGLOWEGO

PERSPECTS FOR GEOLOGICAL STORAGE OF CO₂ WITH ENHANCED COAL BED METHANE RECOVERY IN THE UPPER SILESIA COAL BASIN

JANUSZ JURECZKA¹, JAROSŁAW CHEĆKO², WŁODZIMIERZ KRIEGER¹, JAN KWARCIŃSKI¹, TOMASZ URYCH²

Abstrakt. W artykule przedstawiono wstępną ocenę możliwości składowania CO₂ w zalegających głęboko, nieeksploatowanych pokładach węgla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, w połączeniu z odzyskiem metanu z tych pokładów (technologia ECBM). Punktem wyjścia było opracowanie kryteriów wyznaczania potencjalnych składowisk, uwzględniających między innymi ochronę złóż węgla kamiennego oraz dostępność pokładów do możliwej eksploatacji w przyszłości. Z przeprowadzonej analizy regionalnej, której podstawowym wskaźnikiem była metanonośność pokładów węgla, w interwale głębokości 1000–2000 m, wynika, że korzystne warunki lokalizacji składowisk występują głównie w centralno-południowej części GZW. W tej części zagłębia potencjalne pod względem składowania CO₂ są przede wszystkim pokłady węgla górnośląskiej serii piaskowcowej oraz serii mułowcowej, zalegające w obszarach oddalonych od czynnych kopalń, poniżej głębokości 1250–1300 m. Wstępne oszacowanie pojemności składowania CO₂ wykonano w rejonie badawczym Pawłowice–Mizerów, dla którego opracowano statyczny model strukturalno-parametryczny pokładów węgla górnośląskiej serii piaskowcowej. Obliczone pojemności składowania dla tych pokładów oszacowane zostały na 8,3 Mt.

Słowa kluczowe: składowanie CO₂, metan pokładów węgla, ECBM, Górnośląskie Zagłębie Węglowe.

Abstract. This paper presents a preliminary study of CO₂ storage possibility in deep, unexploited coal seams of the Upper Silesian Coal Basin along with enhanced coal bed methane recovery (ECBM). The first task was to compile a list of criteria that must be met by perspective storage locations including among others protection of coal deposits and their availability for future exploitation. Regional analysis, which focused mainly on methane content of the coal seams located at the depths between 1000–2000 m, implies that favourable conditions for location of CO₂ storage are present primarily in the central-southern part of the USCBA. In this area coal seams of the Upper Silesian Sandstone Series and Mudstone Series, which are located far from active mines at depths exceeding 1250–1300 m, hold most promise for CO₂ storage. Preliminary assessment of CO₂ storage capacity was performed in the Pawłowice-Mizerów case study area. A static structural-parametric model of the Upper Silesian Sandstone Series coal seams has been created for that area. Storage capacity for those coal seams is estimated at 8.3 Mt.

Key words: CO₂ storage, coal bed methane, ECBM, the Upper Silesian Coal Basin.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Górnośląski, ul. Królowej Jadwigi 1/10, 41-200 Sosnowiec; e-mail: janusz.jureczka@pgi.gov.pl

² Główny Instytut Górnictwa, pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice

WPROWADZENIE

W ramach projektu „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania” badane są m.in. możliwości składowania CO₂ w głęboko zalegających, nieeksploatowanych pokładach węgla w połączeniu z odzyskiem metanu z tych pokładów. W tego rodzaju technologii wspomaganie wydobycia metanu z pokładów węgla, określanej jako ECBM (*Enhanced Coal Bed Methane*), zatłaczany CO₂ zastępuje metan dzięki preferencyjnej absorpcji CO₂ przez węgiel. Przebieg tego procesu ma złożony charakter. W ogólnym ujęciu polega on na desorpcji, dyfuzji i filtracji w kierunku otworów produkcyjnych zaabsorbowanego w obrębie matrycy węglowej metanu, w czasie gdy CO₂ ulega tym samym procesom, ale w odwrotnym kierunku, tzn. filtracji, dyfuzji i adsorpcji na węglu (Sams i in., 2002). Punktem wyjścia jest obniżenie ciśnienia płynów w otworach produkcyjnych i usunięcie wody z pokładu węgla, co powoduje rozpoczęcie desorpcji metanu, którą przyspiesza zatłaczanie do tego pokładu CO₂ poprzez otwór iniekcyjny. Zjawisko wypierania metanu przez CO₂ opiera się na założeniu, że CO₂ w warunkach ciśnienia około 7,38 MPa (poniżej punktu krytycznego) ma większe powinowactwo cząsteczek względem węgla niż metan (najczęściej podawany stosunek preferencyjnej sorpcji to 2:1). Zdesorbowany metan w następnym etapie procesu ulega dyfuzji przez matrycę węglową w kierunku systemu szczelin, w których jest filtrowany według gradientu ciśnienia do otworów produkcyjnych (Brohmal i in., 2005). Trzeba przy tym zaznaczyć, że technologia ECBM nadal jest właściwie w fazie badawczej i wiele szcze-

gółowych aspektów nie do końca zostało rozpoznanych, min.: zakres preferencyjnej sorpcji CO₂ w stosunku do CH₄, przebieg procesu, gdy przekroczony zostanie punkt krytyczny, a także wpływ właściwości fizycznych węgla (m.in.: Wong i in., 2000; Stanton i in., 2001; Krooss i in., 2002; Shi i in., 2002; Ceglarska-Stefańska i in., 2007; Mazzotti i in., 2009). Niewątpliwie jednak jest to metoda atrakcyjna, łącząca składowanie CO₂ z wysokim odzyskiem metanu z pokładów węgla, sięgającym nawet 72% (Wong i in., 2000). Tego rodzaju prace od połowy lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku prowadzone są w basenie węglowym San Juan w Nowym Meksyku (USA) w jednostkach Allison i Tiffany (Reeves, 2002; Reeves, Oudinot, 2005). W obrębie tych jednostek wykonano 50 otworów produkcyjnych i 16 iniekcyjnych, do których zatłoczono 400 tysięcy ton CO₂.

W warunkach polskich zagłębi węglowych technologię ECBM można zastosować głównie dla pokładów węgla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). W Zagłębiu Lubelskim pokłady węgla cechują się niską – na ogół – metanonośnością, natomiast w niewielkim powierzchniowo Zagłębiu Dolnośląskim pokłady węgla (w dużym stopniu wyeksploatowane) zalegają stosunkowo płytko, a ich gazonośność stanowi mieszaninę CH₄ i CO₂, przy czym nierzadko CO₂ występuje w przewodzie. Warto też zaznaczyć, że w GZW kilka lat temu został wykonany jeden z pierwszych – w skali światowej – pilotażowy eksperyment w zakresie technologii ECBM – międzynarodowy projekt RECOPOL w rejonie złoża węgla kamiennego kopalni „Silesia” (Van Bergen i in., 2009a, b).

KRYTERIA WYZNACZANIA OBSZARÓW I POKŁADÓW WĘGLA DO SKŁADOWANIA CO₂ W POŁĄCZENIU Z ODZYSKIEM METANU

W stosunku do ogólnie przyjmowanych kryteriów wyboru struktur do składowania CO₂ w poziomach solankowych (Chadwick i in., 2006), kryteria takie odnośnie pokładów węgla, przy wykorzystaniu technologii ECBM, muszą mieć w znacznej części odmienny charakter, z wyjątkiem założeń o uniwersalnym charakterze, jak:

- korzystny dla składowania interwał głębokości w granicach 800–2500 m;
- głębokość minimalna około 800 m ze względu na tzw. punkt krytyczny CO₂ związany z temperaturą i ciśnieniem górotworu;
- warunki bezpieczeństwa składowania związane m.in. z występowaniem nieprzepuszczalnych skał izolujących oraz słabym zaangażowaniem tektonicznym górotworu, cechującym się brakiem uskoku.

Oprócz wymienionych założeń uniwersalnych, podstawowe znaczenie dla wyboru potencjalnych składowisk mają parametry związane w sposób bezpośredni z pokładami węgla, czyli ich metanonośność (także grubość ze względu na

potencjalne zasoby ujmowanego metanu) oraz niektóre parametry petrofizyczne węgla, w tym zwłaszcza przepuszczalność. Zasadniczą jednak sprawą, w przypadku składowania CO₂ w pokładach węgla, jest ochrona istniejących złóż węgla kamiennego oraz zapewnienie dostępności pokładów dla eksploatacji podziemnej. Pokłady węgla nasycone w wyniku sekwestracji CO₂ w zasadzie należy uznać za stracone dla eksploatacji. Dla wyboru potencjalnych lokalizacji do składowania CO₂ istotne znaczenie – znacznie większe, niż w przypadku poziomów solankowych – mają też ograniczenia środowiskowe, w tym zwłaszcza związane z zagospodarowaniem powierzchni terenu i stopniem jego urbanizacji. Wynika to z faktu, że obszary występowania pokładów węgla kamiennego są dość ograniczone powierzchniowo, co znacznie zmniejsza możliwości wyboru potencjalnych składowisk.

Mając na uwadze przedstawione wyżej podstawowe uwarunkowania składowania CO₂ w pokładach węgla w połączeniu z odzyskiwaniem metanu, dla obszaru Górnośląskiego

Zagłębia Węglowe przyjęto następujące założenia selekcji potencjalnych lokalizacji:

- obszary poza złożami węgla kamiennego kopalń czynnych, bez względu na głębokość eksploatacji i dokumentowania tych złóż;
- głębokość minimalna nie mniejsza niż 1000 m, a optymalnie co najmniej 1250–1300 m;
- metanonośność pokładów większa niż 4,5 m³ CH₄/Mg csw (czystej substancji węglowej), optymalnie większa niż 7–8 m³ CH₄/Mg csw;
- grubość pokładów co najmniej 1,0 m, optymalnie co najmniej 2–3 m;
- występowanie utworów ilasto-mułowcowych w obrębie utworów karbonu powyżej składowiska CO₂, oraz utworów izolujących w nadkładzie karbonu;
- brak w rejonie składowiska uskoku, które mogą stanowić drogę migracji dla zatłaczanego CO₂;
- niski stopień zurbanizowania terenu.

Ze względu na bezpieczeństwo prowadzonych robót górniczych, obszary czynnych kopalń zostały wyłączone z oceny możliwości składowania CO₂ w pokładach węgla. Poza obszarami złóż zagospodarowanych, jako minimalną głębokość zalegania pokładów przyjęto 1000 m (do niedawna for-

malna głębokość dokumentowania złóż węgla kamiennego), przy czym założono, że jest to głębokość wyjściowa do prac studialnych, a wyznaczone do zastosowania technologii ECBM pokłady powinny zalegać na głębokościach nie mniejszych niż 1250/1300 m. Jest to związane z ochroną złóż węgla kamiennego (od tego roku głębokość dokumentowania tych złóż została zwiększona do 1250 m) oraz zapewnieniem dostępności pokładów węgla dla możliwej eksploatacji w przyszłości. Głębokość 1300 m wydaje się być obecnie maksymalną dla zasięgu eksploatacji podziemnej, ze względu na temperatury przekraczające na tej głębokości 40–45°C, a czasem nawet 50°C. W podanych wyżej kryteriach nie uwzględniono parametrów petrofizycznych węgla, w tym przepuszczalności, która ma podstawowe znaczenie dla procesu ECBM. Wynika to z faktu, że znane oznaczenia przepuszczalności węgla kamiennych (stosunkowo nieliczne) na ogół pochodzą z badań laboratoryjnych, natomiast dla właściwej oceny procesu ECBM parametr ten powinien być pomierzony na podstawie testów *in situ* w otworach wiertniczych. Te różnice mogą mieć istotne znaczenie zwłaszcza w przypadku węgla kamiennych w GZW, których przepuszczalność generalnie jest bardzo niska, rzędu kilku miliardów, a nawet poniżej 1 mD.

OKREŚLENIE OBSZARÓW PREDESTYNOWANYCH DO LOKALIZACJI POTENCJALNYCH SKŁADOWISK CO₂ W POKŁADACH WĘGLA GZW

Do wstępnej oceny możliwości składowania CO₂ w pokładach węgla GZW przy zastosowaniu technologii ECBM obszar zagłębia został podzielony na 4 regiony różniące się zasadniczo budową geologiczną, stopniem zagospodarowania powierzchni terenu oraz zagospodarowaniem złóż węgla kamiennego (fig. 1):

- północny – głównie niecka bytomska, siodło główne oraz północny skłon niecki głównej (do strefy uskokuwej Bełk–Oświęcim–Nowe Dwory);
- zachodni – obszar na zachód od nasunięcia orłowskiego w strefie tektoniki fałdowej, głównie niecka jejkowiicka i chwałowicka;
- wschodni – wschodnia część niecki głównej i jej obrzeży wraz z synkliną Nieporaz–Brodła;
- centralno-południowy – centralna i południowa część niecki głównej oraz obszar położony na południe, w rejonie tzw. niecki skoczowskiej.

Wyznaczone regiony zostały ocenione na podstawie przedstawionych wyżej kryteriów, przy czym podstawowym i wyjściowym wskaźnikiem oceny była metanonośność pokładów węgla w interwale głębokości 1000–2000 m, analizowana na podstawie wyników badań z 443 otworów wiertniczych, o głębokości większej niż 1000 m. Przyjęcie takiego zakresu głębokości praktycznie ograniczyło analizę do podstawowej strefy występowania pokładów silnie metanowych, z eliminacją strefy wtórnego nasycenia metanem pokładów węgla przystropowej partii profilu karbonu w południowej

części zagłębia pod przykryciem mioceńskim (fig. 2). Graniczną głębokość 2000 m przyjęto głównie ze względu na stopień rozpoznania wiertniczego, otwory głębsze w skali zagłębia są sporadyczne.

Region północny charakteryzuje się wysokim stopniem zurbanizowania oraz zagospodarowania górniczego. Większość zlokalizowanych w tym regionie kopalń jest niemetanowa lub słabo metanowa, z wyjątkiem południowej części regionu. Średnia metanonośność pokładów węgla w przedziale głębokości 1000–2000 m na ogół jest niska i nie przekracza 4,5 m³/Mg csw (maksymalnie sięga 10 m³/Mg csw w południowej części regionu – w rejonach czynnych kopalń). Utwory karbonu produktywnego zalegają płytko i tworzą liczne wychodnie na powierzchnię terenu. Na ogół brak jest pokrywy neogeńskiej, która stanowiłaby izolację dla utworów karbońskich od powierzchni terenu.

Region wschodni charakteryzuje stosunkowo niewielki udział obszarów zurbanizowanych, znajdujących się głównie w zachodniej części regionu, i niski stopień zagospodarowania górniczego. Średnia metanonośność pokładów węgla w przedziale głębokości 1000–2000 m na ogół jest bardzo niska i nie przekracza 4,5 m³/Mg csw, oprócz zachodniej i południowo-zachodniej części regionu (zagospodarowanej górniczo), gdzie przekracza 9 m³/Mg csw. W profilu karbonu węglonośnego dominują utwory krakowskiej serii piaskowcowej, której pokłady węgla są niemetanowe lub słabo metanowe. Z kolei zalegające niżej utwory serii mułowco-

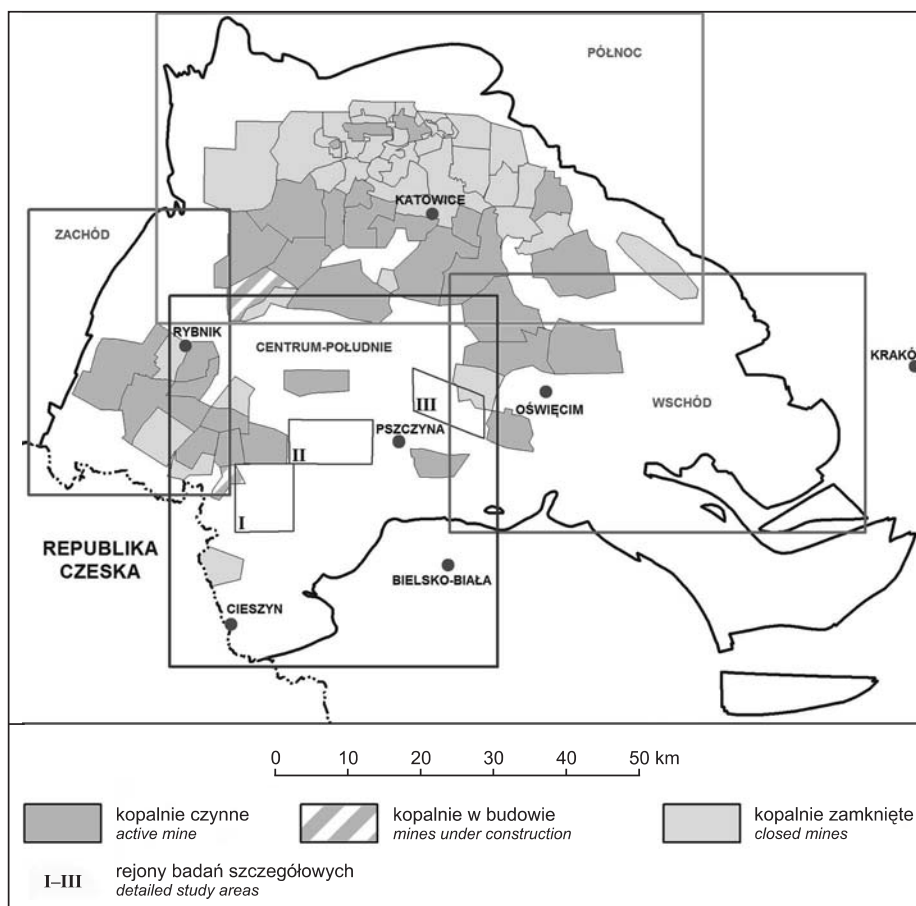


Fig. 1. Położenie regionów badawczych na obszarze GZW

Location of the research areas in the USCB

wej i górnośląskiej serii piaskowcowej w tej części zagłębia ulegają znacznej redukcji miąższości, a nawet całkowitemu wyklinowaniu. Północna część regionu jest „odkryta”, bez nieprzepuszczalnych utworów izolujących w nadkładzie karbonu.

Region zachodni cechuje się dość wysokim stopniem zagospodarowania górnictwa oraz zurbanizowania. Średnia metanonośność pokładów węgla w przedziale głębokości 1000–2000 m jest zróżnicowana, niska w północno-zachodniej części regionu (wolnej od eksploatacji) oraz znacznie wyższa, przekraczająca wartość $4,5 \text{ m}^3/\text{Mg}$ csw, w części zachodniej i południowo-zachodniej, zagospodarowanej górnictwem. Jest to obszar tektoniki fałdowej o złożonych założeniach tektonicznych, co przejawia się dużą zmiennością profilu utworów karbonu i głębokości zalegania poszczególnych jednostek stratygraficznych. Profil ten rozpoczynają utwory serii mułowcowej i górnośląskiej serii piaskowcowej, występujące na ograniczonym obszarze, głównie w rejonach kopalń węgla kamiennego. W pozostałej części utwory węglonośne buduje seria paraliczna, cechująca się niską węglozasobnością.

Region centralno-południowy charakteryzuje stosunkowo niski stopień urbanizacji i zagospodarowania górnictwa. Kopalnie węgla kamiennego znajdują się głównie w brzego-

wych częściach regionu, zwłaszcza w części zachodniej, gdzie są to kopalnie metanowe. Średnia metanonośność pokładów węgla w przedziale głębokości 1000–2000 m jest zróżnicowana, ale na znacznych obszarach, w tym także nie objętych eksploatacją, przekracza wartość $4,5 \text{ m}^3/\text{Mg}$ csw (maksymalnie ok. $11 \text{ m}^3/\text{Mg}$ csw). Niższe wartości notowane są głównie w południowej części regionu, w rejonie niecki skoczowskiej. Korzystna jest również budowa geologiczna nadkładu karbonu ze względu na przykrycie praktycznie całego regionu izolującymi utworami ilastymi miocenu.

Z przeprowadzonej analizy regionalnej wynika, że najbardziej korzystny do składowania CO_2 w połączeniu z technologią ECBM jest region centralno-południowy ze względu na powszechne występowanie poniżej głębokości 1000 m metanowych pokładów węgla, obecność w nadkładzie karbonu nieprzepuszczalnych utworów miocenu, istnienie dużych powierzchniowo obszarów odległych od czynnych kopalń węgla kamiennego oraz niski stopień zurbanizowania. Ponadto, region ten jest dość dobrze rozpoznany wierceniami o głębokości większej niż 1000 m, a nierzadko przekraczających 1500 m. Pewnym ograniczeniem jest występowanie w niektórych częściach regionu obszarów chronionych Natura 2000 i rezerwatów ścisłych.

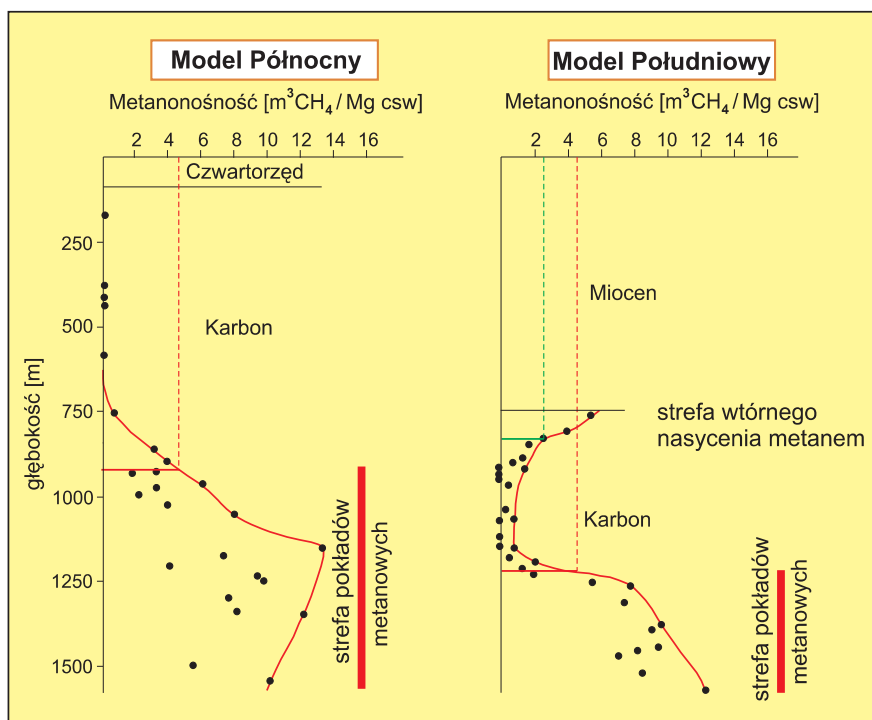


Fig. 2. Modele pionowej zmienności metanonośności pokładów węgla na obszarze GZW (Kotas i in., 1994)

Distribution of methane content with increasing depth in the USCB; model cases (Kotas *et al.*, 1994)

CENTRALNO-POŁUDNIOWA CZĘŚĆ GZW

W obrębie regionu centralno-południowego potencjalne pod względem składowania CO₂ są przede wszystkim pokłady węgla dwóch karbońskich jednostek litostratygraficznych – górnośląskiej serii piaskowcowej i wyżej leżącej serii mułowcowej, które są głównymi elementami profilu utworów węglonośnych do głębokości 2000 m i występują w granicach niemal całego regionu, z wyjątkiem skrajnie południowej części. Utwory tych dwóch serii występują od stropu karbonu, bądź też we wschodniej i północno-wschodniej części regionu są przykryte krakowską serią piaskowcową. Spąg górnośląskiej serii piaskowcowej został przyjęty jako dolny poziom badawczy dla wyznaczenia potencjalnych składowisk CO₂ (fig. 3). Występujące poniżej utwory serii paralicznej cechują się niską węglizacją (pokłady o grubości większej niż 1,5–2,0 m występują sporadycznie) i na ogół zalegają na głębokościach przekraczających 2000 m, co z kolei jest przyczyną ich bardzo słabego rozpoznania, zawężonego tylko do stropowej części. Płycej utwory serii paralicznej zalegają w południowo-wschodniej części regionu (słabo rozpoznanej) oraz w części południowo-zachodniej, w rejonie czynnych kopalń.

W regionie centralno-południowym wyznaczono trzy rejonu badawcze (fig. 1, 3), o zbliżonych powierzchniach w granicach 55–75 km², które zostały przeanalizowane do

głębokości 2000 m w zakresie węglizacji i metanonośności pokładów węgla:

- rejon I Bzie–Drogomyśl w południowo-zachodniej części głównej – w skrzydle zrzuconym strefy uskoku Bzie–Czechowice, bezpośrednio na południe od kopalni „Pniówek”;
- rejon II Pawłowice–Mizerów na południowym skłonie głównej, pomiędzy strefami uskoku Bzie–Czechowice i Żory–Jawiszowice, bezpośrednio na wschód od kopalni „Pniówek”;
- rejon III Studzienice–Międzyrzecze w centralnej części głównej – w skrzydle wiszącym strefy uskoku Żory–Jawiszowice, bezpośrednio na zachód od kopalni „Brzeszcze” i zamkniętej kopalni „Czczott”.

Rejony badawcze wyznaczono na podstawie:

- danych geologicznych z wierceń (w tym zalegania metanonośnych pokładów węgla na głębokości poniżej 1000 m) – figura 4;
- map geologiczno-strukturalnych karbonu (Jureczka i in., 2005), z uwzględnieniem głównych regionalnych dyslokacji tektonicznych i głębokości zalegania spagu górnośląskiej serii piaskowcowej (fig. 3);
- położenia w stosunku do obszarów czynnych kopalń węgla kamiennego (fig. 4).

Celem analizy w wyznaczonych rejonach badawczych było scharakteryzowanie głównych bloków tektonicznych tej części zagłębia, w zakresie regionalnego rozkładu metanoności pokładów węgla, oraz wytypowanie jednego rejonu do szczegółowych badań i modelowań, w zakresie oceny możliwości składowania CO₂ w połączeniu z technologią ECBM. Rejony badawcze zostały wyznaczone w bezpośrednim sąsiedztwie kopalń ze względu na dostępność danych z otworów wiertniczych o głębokości przekraczających 1000 m, w tym badań metanoności pokładów węgla (fig. 4; tab. 1, 2).

Z przeprowadzonej analizy metanoności pokładów węgla w interwale głębokości 1000–2000 m wynika, że badane rejony cechują się niewielkim zróżnicowaniem względem siebie, szczególnie w zakresie głębokości 1250–1750 m, które wydają się być najbardziej opcjonalne do składowania CO₂. Średnia metanoność pokładów węgla poszczególnych rejonów badawczych, w interwale głębokości 1250–1500 m (bez serii paralicznej), kształtuje się w granicach 5,1–7,9 m³/Mg csw, a w interwale 1500–1750 m – 5,3–8,6 m³/Mg csw (tab. 2). Można z tego wysnuć wniosek, że zmienność lateralna rozkładu metanoności pokładów węgla w określonych inter-

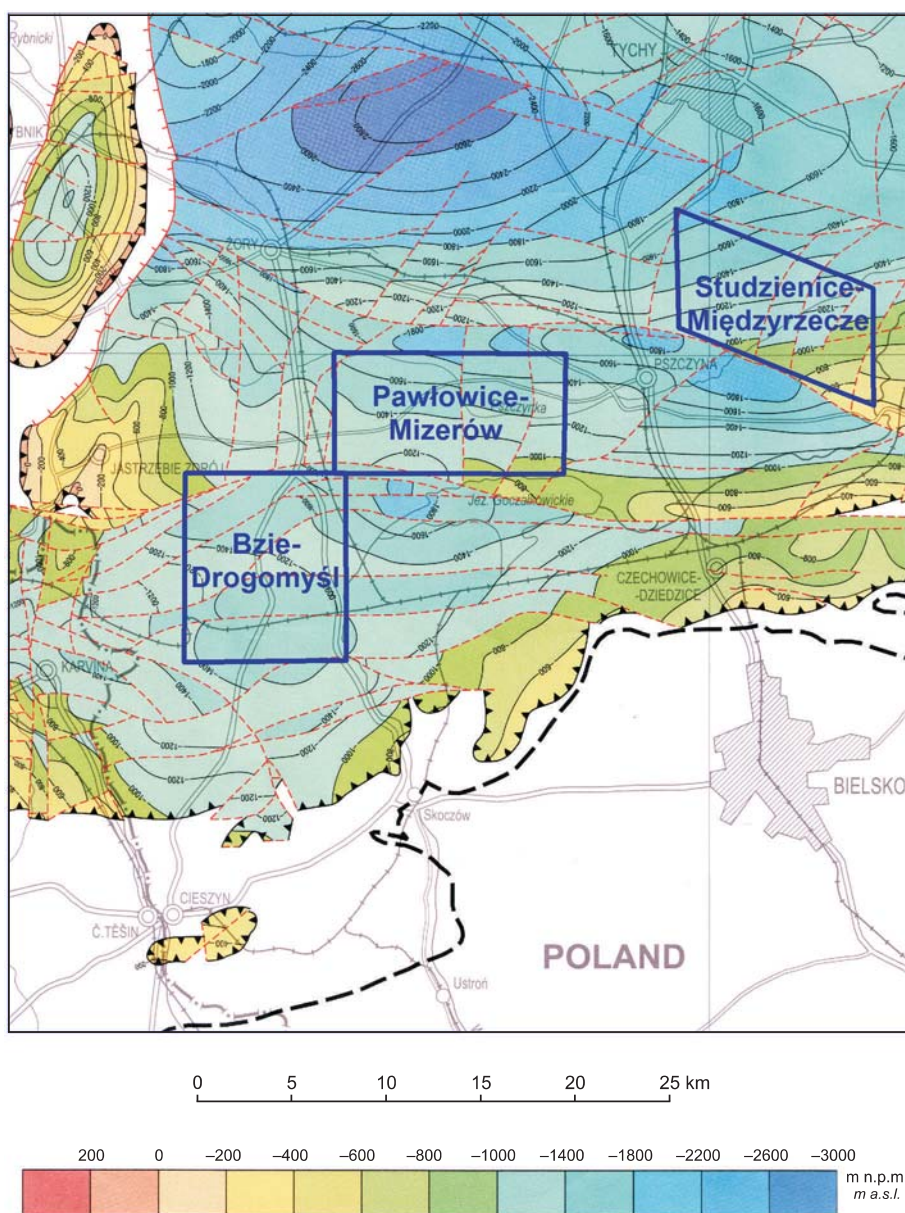


Fig. 3. Położenie regionu centralno-południowego na tle mapy strukturalnej spągu górnośląskiej serii piaskowcowej (Jureczka i in., 2005)

Location of the central-southern region against structural map of the base of the Upper Silesian Sandstone Series (Jureczka et al., 2005)

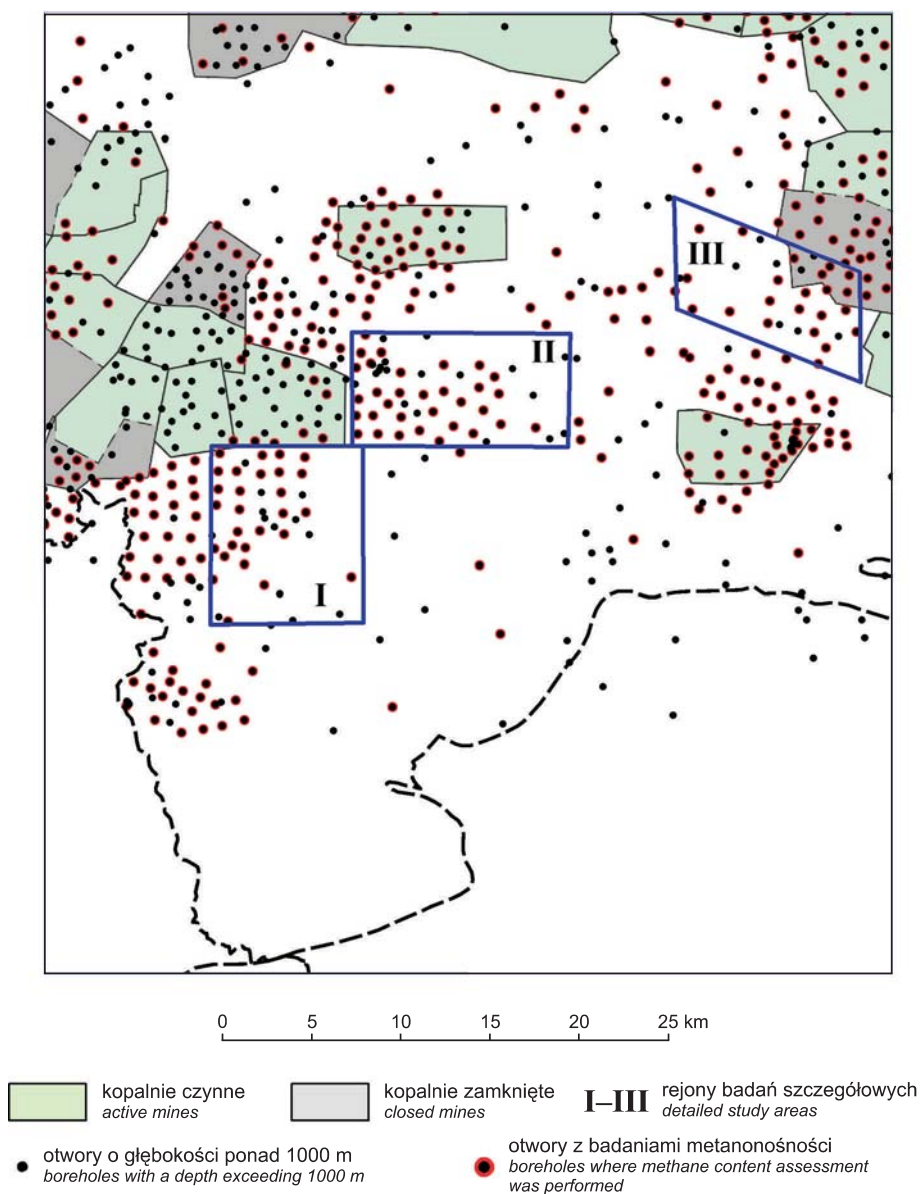


Fig. 4. Rozpoznanie metanonośności pokładów węgla w otworach wiertniczych centralno-południowego regionu GZW

Coal seams methane content assessment in the boreholes located in the central-south of the USCAB

Tabela 1

Rozpoznanie otworami wiertniczymi rejonów badawczych w centralno-południowym regionie GZW
Borehole research of the study areas in the central-south of the USCAB

Rejon	Powierzchnia [km ²]	Rozpoznanie otworami wiertniczymi o głębokości >1000 m			Średnia metanonośność w otworach wiertniczych [m ³ /Mg csw]	
		Liczba otworów ogółem	Otwory z badaniami metanowymi		min.	max.
			Liczba otworów	Głębokość maksymalna		
Bzie–Drogomyśl	74,4	40	26	1982,00	2,21	8,85
Pawłowice–Mizerów	67,9	51	34	1896,00	2,49	9,99
Studzienice–Międzyrzecz	56,3	31	22	1789,20	1,54	8,85

Tabela 2

Średnia metanoność pokładów węgla w strefie pokładów silnie metanowych w rejonach badawczych
Average methane content of coal seams located in the gassy coal zone of the research areas

Interwał głębokości [m]		Średnia metanoność pokładów węgla [m ³ /Mg csw]					
strop	spąg	seria mułowcowa		górnosłaska seria piaskowcowa		seria paraliczna	
		wartość	ilość pomiarów	wartość	ilość pomiarów	wartość	ilość pomiarów
Rejon I Bzie–Drogomyśl							
750	1000	–	–	5,595	11	–	–
1000	1250	5,589	40	5,513	25	4,563	1
1250	1500	5,686	63	6,211	68	4,883	2
1500	1750	7,7074	15	5,526	27	4,887	4
1750	2000	–	–	5,870	9	3,961	3
Rejon II Pawłowice–Mizerów							
500	750	4,792	15	–	–	–	–
750	1000	6,065	49	–	–	–	–
1000	1250	6,989	116	5,228	10	–	–
1250	1500	5,521	39	5,125	38	7,001	2
1500	1750	8,600	3	5,996	16	7,213	4
1750	2000	–	–	5,483	1	–	–
Rejon III Studzienice–Miedzyrzecze							
250	500	3,631	2	–	–	–	–
500	750	6,912	22	–	–	–	–
750	1000	6,826	54	11,029	10	15,053	2
1000	1250	7,261	24	–	–	–	–
1250	1500	7,951	11	6,279	5	–	–
1500	1750	5,317	2	5,810	9	7,862	1
1750	2000	–	–	–	–	8,741	2

wałach głębokości jest stosunkowo nieznaczna, biorąc pod uwagę fakt, że rozmieszczenie rejonów badawczych jest w miarę reprezentatywne dla całego regionu, w tym dla głównych bloków tektonicznych. Jest to o tyle korzystne zjawisko, że proces wyznaczania potencjalnych składowisk CO₂ nie musi być ograniczany tylko do obszarów dobrze rozpoznanych (z reguły leżących bliżej kopalń czynnych), ale umożliwi lokalizację tych składowisk w dalszej odległości od kopalń. Oczywiście na obecnym etapie badań do szczegółowych analiz i modeli autorzy musieli „trzymać się” obszaru dobrze rozpoznanego. Z tego powodu

z prezentowanych rejonów badawczych do szczegółowej analizy został wybrany rejon II Pawłowice–Mizerów, charakteryzujący się w miarę równomiernym rozmieszczeniem otworów wiertniczych z badaniami metanoności poniżej 1000 m, w tym także poniżej 1500 m. W rejonie I otwory z badaniami metanoności pokładów węgla zgrupowane są głównie w jego północno-zachodniej części w sąsiedztwie czynnych kopalń (fig. 4) i budowanej kopalni na polu Bzie–Dębina 1 – Zachód (fig. 1). Z kolei rejon III jest stosunkowo słabo rozpoznany poniżej głębokości 1500 m.

REJON BADAWCZY PAWŁOWICE–MIZERÓW

Rejon Pawłowice–Mizerów cechuje się bardzo niskim stopniem urbanizacji, dużym udziałem terenów rolniczych oraz brakiem obszarów chronionych, z wyjątkiem skrajnie południowo-wschodniej części, przylegającej do Jeziora Goczałkowickiego, objętej obszarem chronionym Natura 2000. Rejon jest rozpoznany przez 51 otworów wiertniczych, o głębokości przekraczającej 1000 m, z których w 34 (wszystkie o głęb. co najmniej 1200 m) wykonano badania metanoności pokładów węgla. W trzech otworach wiert-

niczych firm Amoco i Texaco, odwierconych 15–17 lat temu w celu zbadania możliwości eksploatacji metanu, badania gazowe wykonano amerykańską metodą USBM. Od zachodu rejon sąsiaduje z czynną kopalnią „Pniówek”.

Miąższość nadkładu karbonu (czwartorzęd i miocen) jest zróżnicowana w granicach 185–840 m, na ogół jednak nie przekracza 500–600 m. Utwory miocenu (iłowce margliste formacji skawińskiej) tworzą ciągłą pokrywę osadową, leżącą na silnie morfologicznie zróżnicowanej powierzchni karboń-

skiej. W profilu utworów węglonośnych karbonu, do głębokości 2000 m dominują utwory serii mułowcowej i górnośląskiej serii piaskowcowej, występujące na całym obszarze rejonu badawczego (fig. 5).

Seria mułowcowa o miąższości od 370 do 1300 m (na ogół 800–1200 m) zalega do głębokości od 850 m w części południowo-wschodniej do 1850 m w części północnej. Wykształcona jest monotonnie z charakterystyczną cyklicznością osadów; dominują osady drobnoklastyczne (mułowce i ilowce), udział piaskowców wynosi 16–23% miąższości serii. Węglonośność jest dość wysoka i sięga 6–7% profilu serii. Pokłady węgla cechują się dużą zmiennością i częstymi przerozami skały płonnej. Ich miąższość rzadko przekracza 1,5 m, z wyjątkiem spągowej partii serii, gdzie osiągają większą grubość (m.in. pokład 405 o grubości 3–5 m). Górnośląska seria piaskowcowa o miąższości w granicach 200–420 m zalega do głębokości od około 1100–1200 m w części południowo-wschodniej do około 2200 m w części północnej. Dolną granicę serii wyznacza pokład 510, cechujący się dużą stałością

i grubością. Litologicznie seria składa się z piaskowców (50–60% profilu, niekiedy więcej) oraz osadów drobnoklastycznych i fitogenicznych. Węglonośność serii jest wysoka i wynosi około 9–11%. Występuje tu kilkanaście pokładów węgla, w tym 5–6 pokładów o większej grubości w granicach 2–5 m, oraz spągowy pokład 510 o grubości 5–8 m. Zalegająca poniżej seria paraliczna jest bardzo słabo rozpoznana, tylko w kilku otworach wiertniczych nawiercono jej stropowe odcinki profilu, i dla omawianych celów nie ma większego znaczenia.

Rejon Pawłowice–Mizerów położony jest na południowo-zachodnim skłonie niecki głównej pomiędzy dwoma równoleżnikowymi, regionalnymi strefami uskoku – Bzie–Czechowice, do której przylega od południa, oraz Żory–Jawiszowice, przebiegającej około 2 km poza północną granicą rejonu. Zrzuty obu stref (w kierunku południowym) w tej części zagłębia mają zróżnicowaną amplitudę w granicach 400–600 m. Pomiędzy obu strefami występuje szereg mniejszych uskokuw o przebiegu południkowym (lub zbliżonym) i zrzutach od kilkudziesięciu do 250 metrów, tworzących charakterystyczny

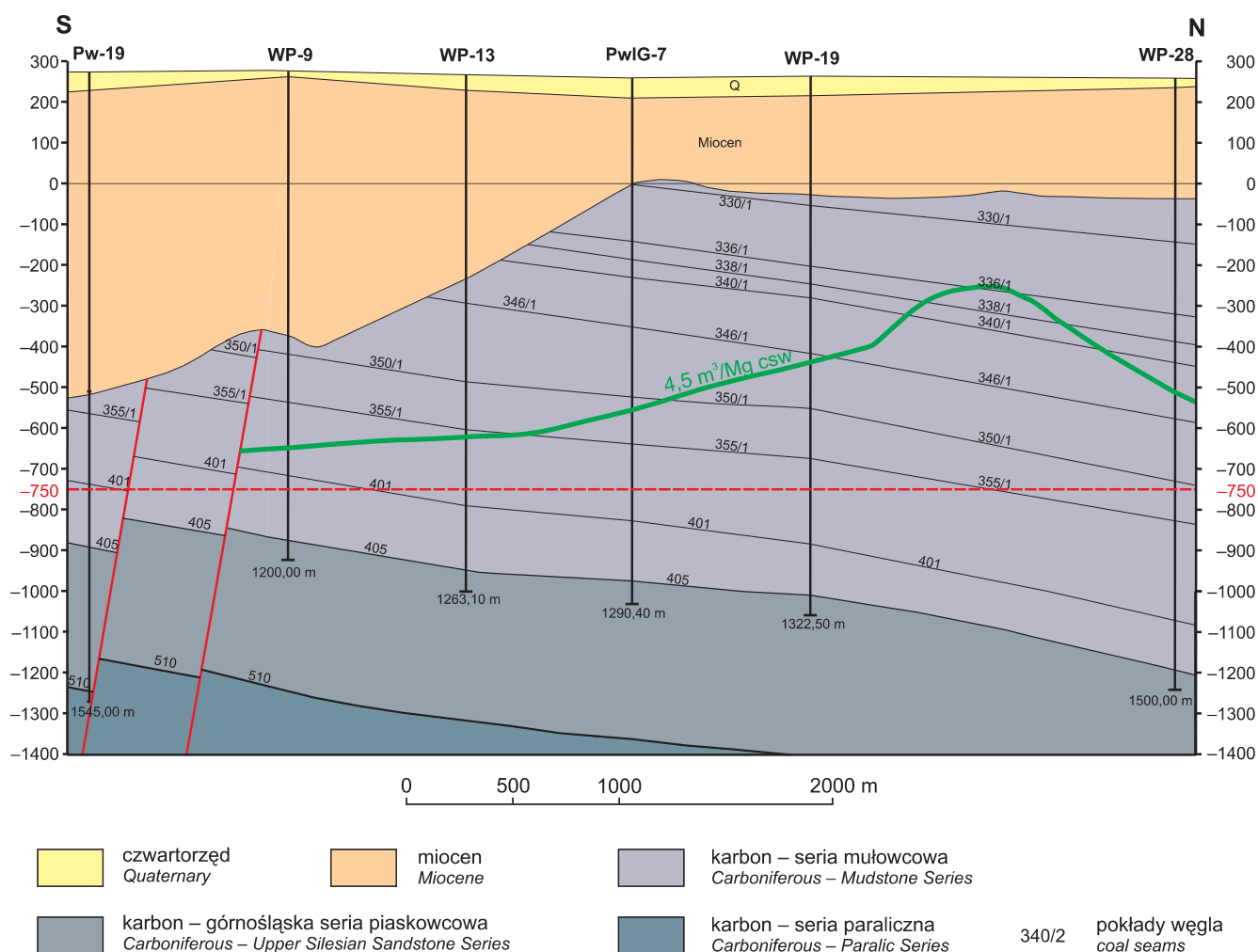


Fig. 5. Przekrój geologiczny rejonu Pawłowice–Mizerów

Geological cross-section of the Pawłowice–Mizerów area

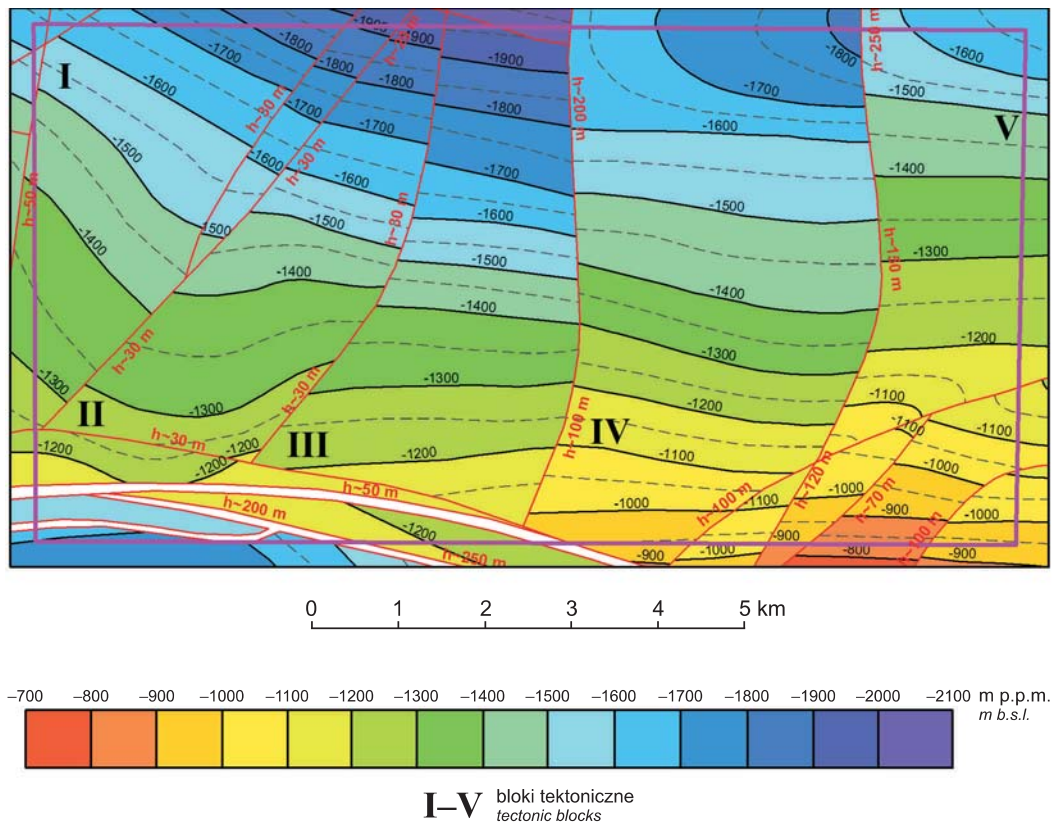


Fig. 6. Mapa strukturalna spągu górnośląskiej serii piaskowcowej rejonu Pawłowice–Mizerów

Structural map of the base of the Upper Silesian Sandstone Series of the Pawłowice–Mizerów area

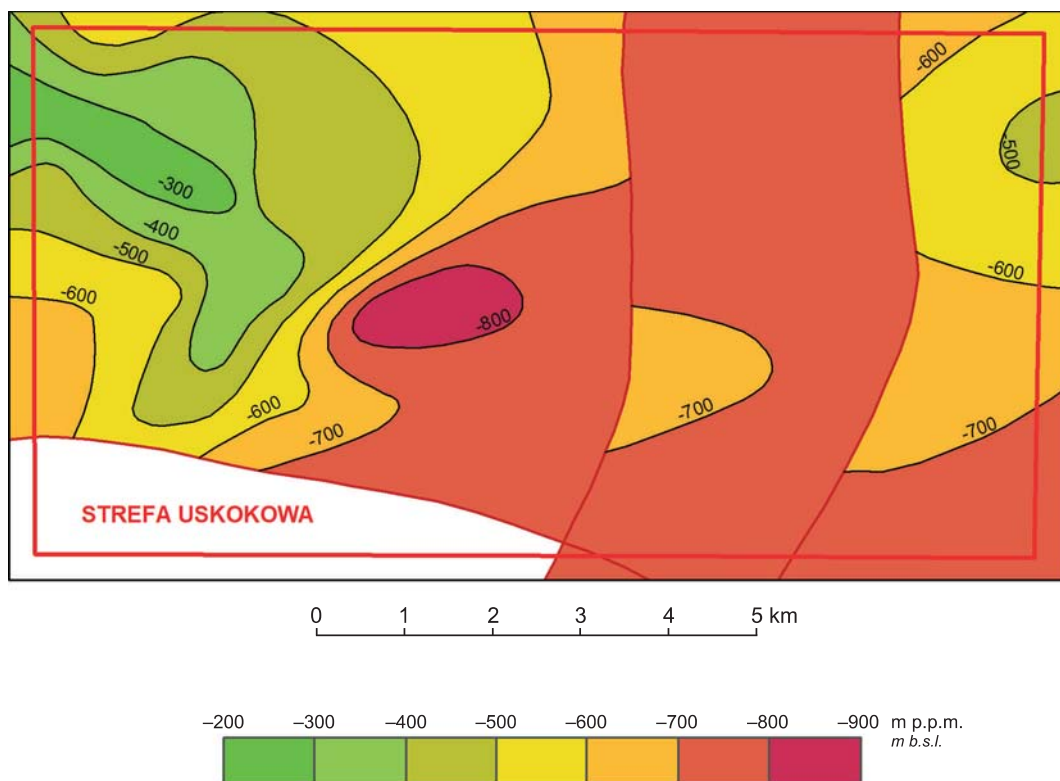


Fig. 7. Mapa głębokości zalegania stropu strefy pokładów metanowych ($\text{CH}_4 > 4,5 \text{ m}^3/\text{Mg}$ csw) w rejonie Pawłowice–Mizerów

Structural map of the top surface of CBM zone ($\text{CH}_4 > 4,5 \text{ m}^3/\text{Mg}$ coal^{daf}) in the Pawłowice–Mizerów area

blokowy układ strukturalny, cechujący się obecnością zrębów i rowów tektonicznych. Tego typu uskoki dzielą rejon Pawłowice–Mizerów na 5 głównych bloków tektonicznych (fig. 6).

Węglizasobność profilu karbonu w interwale głębokości 1000–2000 m (liczona dla pokładów o grubości co najmniej 1,0 m) jest zróżnicowana w granicach 4–7%. Większa węglizasobność jest notowana w interwale 1000–1500 m, w którym sumaryczna miąższość bilansowych pokładów węgla na ogół wynosi około 25–30 m, a maksymalnie sięga 40–50 m, natomiast w interwale 1500–2000 m jest zróżnicowana od około 10–15 m w części południowej do około 20–30 m w części północnej.

Strop strefy pokładów silnie metanowych, definiowany zawartością metanu większą niż 4,5 m³/Mg csw, zalega na głębokościach rzędu 600–1100 m, przy czym można zaobserwować jego stopniowe pograżanie się do centralnej części badanego rejonu, a także w kierunku obu głównych stref uskokowych (fig. 5, 7). Pod względem stratygraficznym strop ten przebiega w obrębie serii mułowcowej, miejscami zbliżając się do jej spągowej granicy. Pokłady węgla górnośląskiej serii piaskowcowej praktycznie znajdują się poniżej stropu strefy pokładów silnie metanowych. Trzeba przy tym mieć na uwadze fakt, że metanonośność pokładów węgla nie

wzrasta wraz z głębokością w sposób ciągły i na większych głębokościach może ona być mniejsza, niż w pokładach wyżej zalegających (fig. 2). W rejonie Pawłowice–Mizerów metanonośność pokładu 405 w spągu serii mułowcowej wyraźnie maleje wraz ze wzrostem głębokości jego zalegania w kierunku północnym (fig. 8). Z kolei metanonośność zalegającego 200–400 m głębiej pokładu 510 (w spągu górnośląskiej serii piaskowcowej) jest generalnie niższa niż pokładu 405 (fig. 9). Średnie metanonośności pokładów węgla w profilu pionowym dla strefy pokładów silnie metanowych w odniesieniu do stratygrafii i interwałów głębokości przedstawiono w tabeli 2.

Wykorzystując oprogramowanie *Petrel* firmy *Schlumberger* dla pokładów węgla górnośląskiej serii piaskowcowej (wraz z pokładem 405 ze spągu serii mułowcowej), wykonano statyczny model strukturalno-parametryczny, będący podstawą do konstrukcji szczegółowego dynamicznego modelu procesu zatłaczania CO₂ do potencjalnego składowiska. W modelu tym uwzględniono budowę strukturalną utworów karbonu i pokładów węgla (głębokości i miąższości) oraz rozkład parametrów dotyczących jakości i metanonośności pokładów węgla (tab. 3). Przykładowy model rozkładu litologicznego profilu górnośląskiej serii

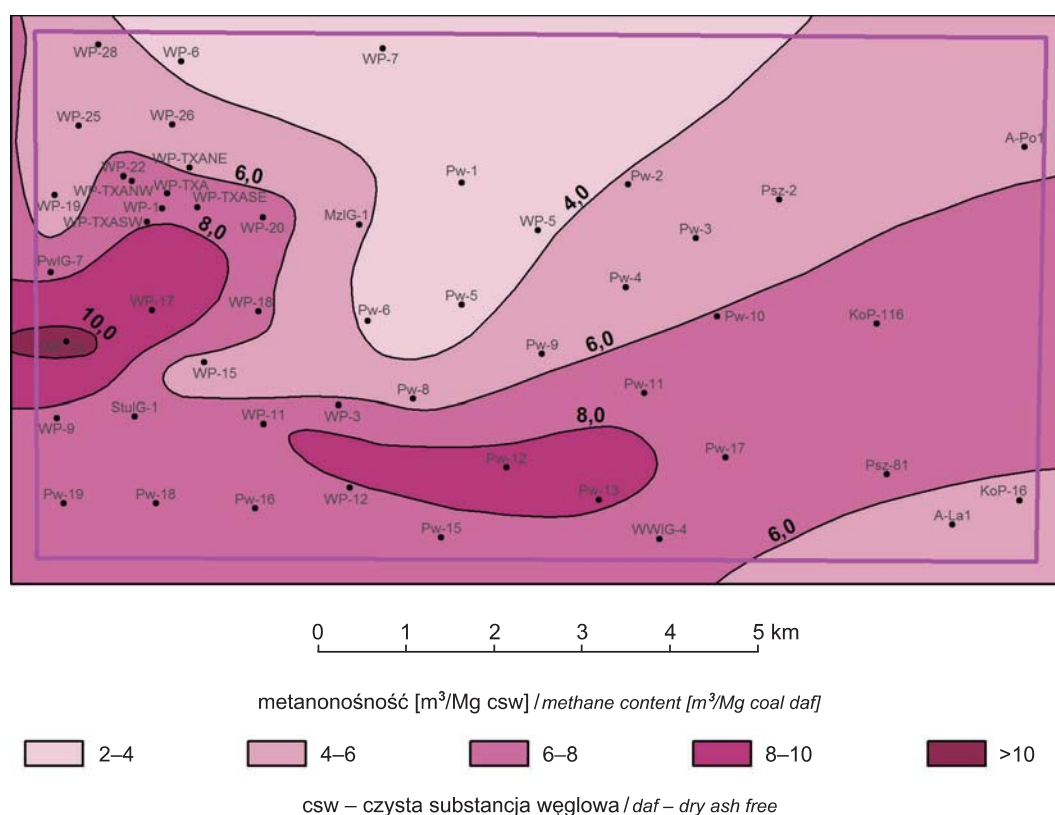


Fig. 8. Mapa metanonośności pokładu 405 w rejonie Pawłowice–Mizerów

Map of the methane content of the 405 seam in Pawłowice–Mizerów area

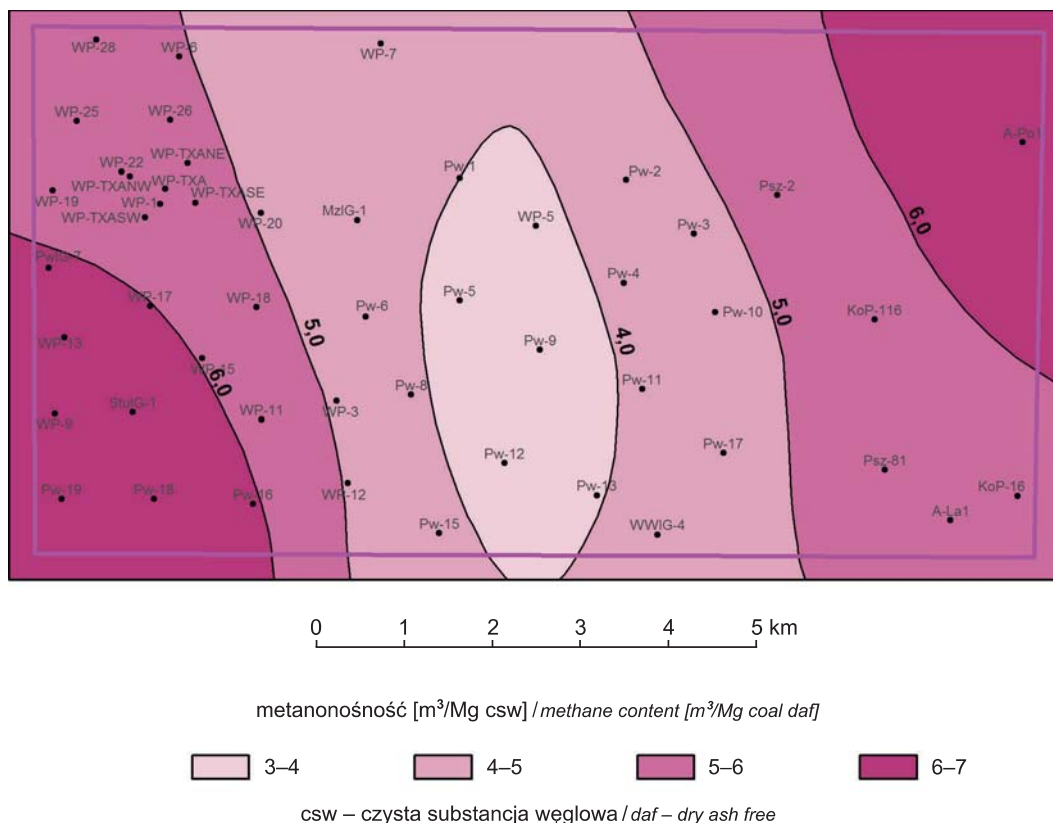


Fig. 9. Mapa metanoności pokładu 510 w rejonie Pawłowice–Mizerów

Map of the methane content of the 510 seam in Pawłowice–Mizerów area

Tabela 3

Szacunkowe obliczenia pojemności masowej składowanego CO_2 w pokładach węgla górnośląskiej serii piaskowcowej rejonu Pawłowice–Mizerów

Estimated CO_2 storage capacity in coal seams of the Upper Silesian Sandstone Series in the Pawłowice–Mizerów area

Blok / liczba otworów	Sumaryczna miąższość węgla [m]	Średnia ważona parametrów węgla				Powierzchnia [km^2]	Zasoby metanu [tys. m^3]	Współczynnik			Gęstość CO_2 [Mg/m^3]	Pojemność masowa CO_2 [Mg]
		metano- ność [$\text{m}^3/\text{t csw}$]	gęstość [Mg/m^3]	popiół [-]	wilgoć [-]			w	k	z		
I / 9	21,70	7,291	1,35	0,100	0,009	10,740	2 051 575	0,5	0,4	2	0,0019	1 559 197
II / 6	19,90	6,197	1,39	0,126	0,008	8,631	1 285 593	0,5	0,4	2	0,0019	977 051
III / 6	27,71	5,548	1,43	0,099	0,008	12,300	2 412 237	0,5	0,4	2	0,0019	1 833 300
IV / 7	32,47	4,856	1,41	0,128	0,008	19,520	3 753 994	0,5	0,4	2	0,0019	2 853 036
V / 2	28,26	5,748	1,26	0,078	0,007	7,888	1 477 544	0,5	0,4	2	0,0019	1 122 933
Suma pojemności masowej [Mg]												8 345 517

Współczynniki: w – wydobywania, k – kompletności, z – zastępowania metanu przez CO_2
Coefficients: w – recovery factor, k – completion factor, z – CH_4 – CO_2 replacement factor

piaskowcowej przedstawia figura 10, a rozkładu metanoności pokładów 405 i 510 (definiujących strop i spąg badanego odcinka profilu karbonu) – figura 11. Model budowy strukturalnej oparty został na siatkach interpolacyjnych stro-

pów i spągów jednostek litostratygraficznych karbonu. Ze względu na złożoną budowę geologiczną modelowanego obszaru dla każdej jednostki litostratygraficznej sporządzono osobny grid 3D.

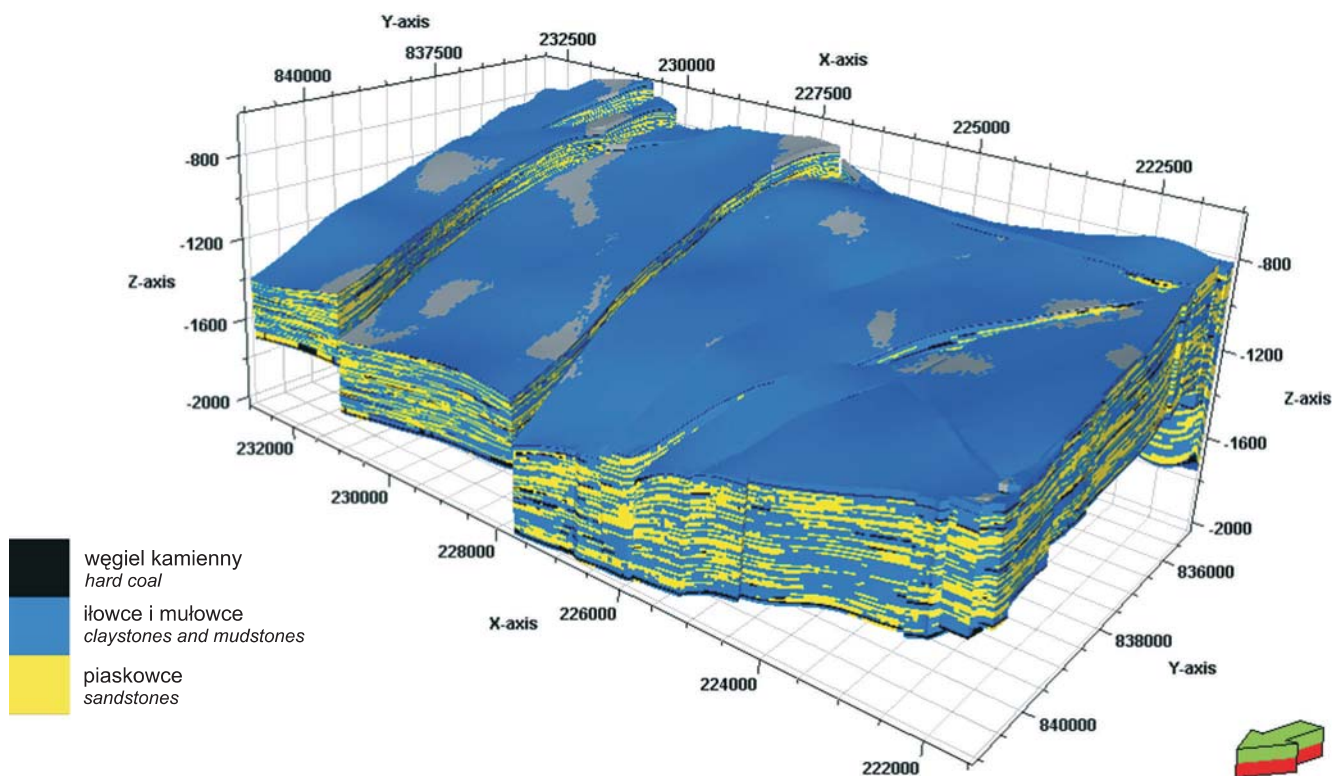


Fig. 10. Model litologii górnośląskiej serii piaskowcowej w rejonie Pawłowice–Mizerów

3D model of lithology of the Upper Silesian Sandstone Series in the Pawłowice–Mizerów area

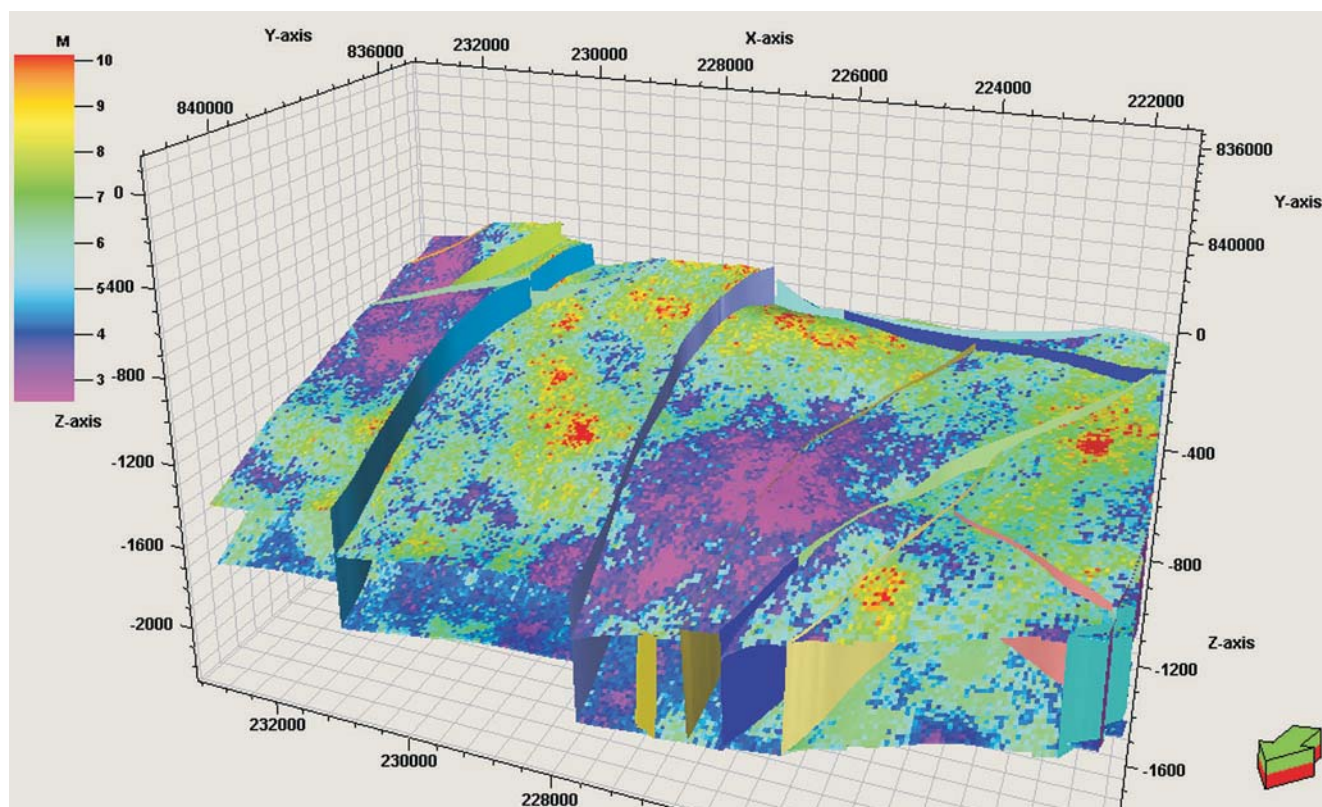


Fig. 11. Model metanonośności pokładów 405 i 510 w rejonie Pawłowice–Mizerów

3D model of methane content of coal seams 405 and 510 in the Pawłowice–Mizerów area

Szacunkowa pojemność masowa składowanego CO₂ w pokładach węgla została obliczona dla poszczególnych bloków tektonicznych utworów karbonu (fig. 6). Punktem wyjścia do obliczeń była objętość metanu zawartego w suchej i bezpopiołowej masie węgla. Zawartość gazu w ustalonej temperaturze zależy od ciśnienia, to znaczy zdolność adsorpcji zwiększa się ze wzrostem ciśnienia do określonej wartości V_g , wyznaczonej z krzywej Langmuira (Bachu, 2007), przy czym zdolność niektórych węgli do adsorpcji CO₂ może być kilkakrotnie większa, niż w przypadku CH₄. Generalnie do oszacowania pojemności masowej składowania przyjmuje się, że wskaźnik b jest równy 2 (White i in., 2005). Uwzględniając powyższe uwagi, można oszacować pojemność masową składowania Q_{CO_2} według poniższego wzoru:

$$Q_{CO_2} = V \cdot \gamma_{CO_2} \cdot b \cdot x_1 \cdot x_2$$

gdzie:

V – zawartość metanu w węglu, m³;

γ_{CO_2} – gęstość objętościowa CO₂, Mg/m³;

b – współczynnik zastępowania metanu dwutlenkiem węgla;

x_1 – współczynnik wydobywania;

x_2 – współczynnik kompletności;

W ten sposób liczona łączna dla całego rejonu szacunkowa pojemność masowa składowanego CO₂ w pokładach węgla wynosi 8,3 Mt CO₂ (tab. 3). Nie jest to ilość, która mogłaby być przedmiotem zainteresowania czołowych krajowych emitentów CO₂, ale w przypadku połączenia z eksploatacją metanu, tej wielkości pojemność może być wykorzystana przez lokalne mniejsze zakłady przemysłowe.

PODSUMOWANIE

Badania związane ze składowaniem CO₂ w głęboko zalegających, nieeksploatowanych pokładach węgla w połączeniu z odzyskiem metanu z tych pokładów (technologia ECBM) na obecnym etapie są nadal w fazie rozpoznawczej, nie tylko w skali Polski, ale i świata. Selekcja potencjalnych składowisk, oprócz założeń o charakterze geologicznym, związanych m.in. z głębokością zalegania i metanonośnością pokładów węgla, powinna przede wszystkim uwzględniać ochronę istniejących złóż węgla kamiennego oraz dostępność pokładów dla możliwej eksploatacji w przyszłości. W GZW, ze względu na bezpieczeństwo prowadzonych robót górniczych, obszary czynnych kopalń zostały wyłączone z oceny możliwości składowania CO₂ w pokładach węgla. Poza obszarami złóż zagospodarowanych, jako minimalną głębokość zalegania pokładów przyjęto 1000 m, przy czym założono, że optymalnie głębokość ta powinna być nie mniejsza niż 1250–1300 m.

Z przeprowadzonej analizy regionalnej, której podstawowym wskaźnikiem była metanonośność pokładów węgla w interwale głębokości 1000–2000 m, wynika, że korzystne warunki dla lokalizacji składowisk występują głównie w centralno-południowej części GZW, ze względu na powszechne

występowanie, poniżej głębokości 1000 m, pokładów węgla o metanonośności większej niż 4,5 m³ CH₄/Mg csw, obecność nieprzepuszczalnych utworów miocenu, istnienie dużych powierzchniowo obszarów odległych od czynnych kopalń węgla kamiennego oraz niski stopień zurbanizowania. W tej części zagłębia potencjalne pod względem składowania CO₂ są przede wszystkim pokłady węgla górnosląskiej serii piaskowcowej oraz serii mułowcowej. Wstępne oszacowanie pojemności składowania CO₂ wykonano w rejonie badawczym Pawłowice–Mizerów, dla którego opracowano statyczny model strukturalno-parametryczny pokładów węgla górnosląskiej serii piaskowcowej. Obliczone pojemności składowania dla tych pokładów oszacowane zostały na 8,3 Mt. Tego rzędu pojemność składowania, w przypadku połączenia z eksploatacją metanu, może być wykorzystana przez lokalne mniejsze zakłady przemysłowe.

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.

LITERATURA

- BROMHAL G.S., SAMS W.N., JIKICH S., ERTEKIN T., SMITH D.H., 2005 — Simulation of CO₂ sequestration in coal beds: The effects of sorption isotherms. *Chemic. Geol.*, **217**: 201–211.
- BACHU S., 2007 — Carbon dioxide storage capacity in uneconomic coal beds in Alberta, Canada: Methodology, potential and site identification. *Intern. J. Greenhouse gas control*, **1**: 374–385.
- CEGLARSKA-STEFANŃSKA G., NODZEŃSKI A., HOŁDA S., 2007 — Badania układu węgiel-gaz w aspekcie pozyskiwania metanu i sekwestracji CO₂. *Gosp. Sur. Min.*, **23**, zesz. spec. 3: 51–59.
- CHADWICK A., ARTS R., BERNSTONE C., MAY F., THIBEAU S., ZWIGEL R. (red.), 2006 — Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers, observations and guidelines CO2STORE, dostępny na stronie: www.co2store.org.
- JURECZKA J., DOPITA M., GAŁKA M., KRIEGER W., KWARCINIŃSKI J., MARTINEC P., 2005 — Atlas geologiczno-złożowy polskiej i czeskiej części Górnosląskiego Zagłębia Węglowego. Państw. Inst. Geol., Min. Środow., Warszawa.
- KOTAS A., KWARCINIŃSKI J., JURECZKA J., 1994 — Distribution and resources of coal-bed methane. *W: Coal-Bed Methane poten-*

- tial of the Upper Silesian Coal Basin, Poland (red. A. Kotas). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 142: 38–51.
- KROOSS B. M., VAN BERGEN F., GENSTERBLUM Y., SIEMONS N., PAGNIER H.J.M., DAVID P., 2002 — High-pressure methane and carbon dioxide adsorption on dry and moisture equilibrated Pennsylvanian coals. *Intern. J. Coal Geol.*, 51: 69–92.
- MAZZOTTI M., PINI R., STORTI G., 2009 — Enhanced coalbed methane recovery. *J. Supercritical Fluids*, 47: 619–627.
- REEVES S.R., 2002 — Coal-Seq Project Update: Field studies of ECBM recovery/CO₂ sequestration in coal seams. Proceedings of the International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6). Kyoto, October 1–4, 2002.
- REEVES S.R., OUDINOT, A., 2005 — The Tiffany Unit N2-ECBM Pilot – A reservoir and economic analysis. International Coalbed Methane Symposium, Paper 0523, Tuscaloosa, Alabama, May 16–20, 2005.
- SAMS W.N., BROMHAL G., JIKICH S.A., ODUSOTE O., ERTEKIN T., SMITH D.H., 2002 — Simulating carbon dioxide sequestration/ECBM production in coal seams: effects of coal properties and operational parameters, paper SPE 78691. Proceedings SPE Eastern Regional Meeting, Lexington, KY, October 23–26.
- SHI J. Q., DURUCAN S., SINKA I. C., 2002 — Key parameters controlling coalbed methane cavity well performance. *Intern. J. Coal Geol.*, 49: 19–31.
- STANTON R., FLORES R., WARWICK P.D., GLUSKOTER H., G.D. S., 2001 — Coalbed Sequestration of Carbon Dioxide, 1st National Conference on Carbon Sequestration, Washington, USA.
- WHITE C., SMITH D., JONES K., GOODMAN A., JIKICH S., LACOUNT R., DuBOSE S., OZDEMIR E., MORSI B., SCHROEDER K., 2005 — Sequestration of carbon dioxide in coal with enhanced coalbed methane recovery a review. *Energy Fuels*, 19, 3: 659–724.
- WONG S., GUNTER W.D., MAVOR M.J., 2000 — Economics of CO₂ sequestration in coalbed methane reservoirs: 631–638. Proceedings of SPE/CERI Gas Technology Symposium 2000, SPE 59785. April 3–5, Calgary, Alberta.
- VAN BERGEN F., KRZYSTOLIK P., VAN WAGENINGEN N., PAGNIER H., JURA B., SKIBA J., WINTHAEGEN P., KOBIELA Z., 2009a — Production of gas from coal seams in the Upper Silesian Coal Basin in Poland in the post injection period of an ECBM pilot site. *Intern. J. Coal Geol.*, 77, 1/2: 175–187.
- VAN BERGEN F., WINTHAEGEN P., PAGNIER H., KRZYSTOLIK P., JURA B., SKIBA J., VAN WAGENINGEN N., 2009b — Assessment to CO₂ storage performance of the Enhanced Coalbed Methane pilot site in Kaniów. *Energy Procedia*, 1, 1: 3407–3414.

SUMMARY

This text presents a preliminary study of CO₂ storage possibility in deep, unexploited coal seams of the Upper Silesian Coal Basin (USCB) along with enhanced coal bed methane recovery (ECBM). This kind of research is still in its infancy both in Poland and worldwide. Factors to be considered when choosing potential storage locations should include geological characteristics such as depth and methane content of coal seam in question but the primary focus should be protection of hard coal deposits and their availability for future exploitation. In the USCB due to concerns for mining operations areas exploited by active coal mines have been excluded from research of potential CO₂ storage in coal seams. Outside of exploited deposits the minimal depth of formation has been established at 1000 m while the depth of at least 1250–1300 m is considered to be optimal. Regional analysis, which focused mainly on methane content of the coal seams located at the depths between 1000–2000 m, implies that favorable

conditions for localization of CO₂ storage are present primarily in central-south part of the USCB due to commonly occurring coal seams with methane content of 4,5 m³ CH₄/Mg coal^{daf} at the depth greater than 1000 m, existence of impermeable the Miocene strata, area of considerable size located at adequate distance from active coal mines and low urbanization level. In this area of the USCB coal seams of the Upper Silesian Sandstone Series and Mudstone Series, which are located far from active mines and at depth exceeding 1250–1300 m, hold most promise for perspective CO₂ storage. Preliminary assessment of CO₂ storage capacity has been performed in the Pawłowice–Mizerów case study area. A static structural-parametric model of the Upper Silesian Sandstone Series coal seams has been created for that area. Storage capacity for those coal seams has been estimated at 8.3 Mt. This storage capacity along with methane extraction can be exploited by the local industry.