



Janusz NOWAK*, Aneta BARAŃSKA-BUSLIK**

Wstępne typowanie pokładów węgla brunatnego rejonu LGOM do zagospodarowania metodami innowacyjnymi poprzez ich podziemne zgazowanie

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest tematyce zagospodarowania węgla brunatnego rejonu legnickiego z wykorzystaniem metod innowacyjnych. Scharakteryzowano budowę geologiczną rejonu pod kątem występowania węgla, wstępnych warunków eksploatacji oraz zaprezentowano przekroje geologiczne. Zaprezentowano metody innowacyjne, tj. podziemne zgazowanie węgla brunatnego oraz biogazowanie. Podano wstępne kryteria klasyfikacyjne zastosowania metod zgazowania oraz wymagania złożowe. Rozważania zilustrowano przykładem, w którym zaprezentowano wariantowe metody zagospodarowania oraz wymagania związane z koniecznymi do wykonania rodzajami badań specjalistycznych dla ich zastosowania.

Słowa kluczowe: eksploatacja, podziemne zgazowanie, węgiel brunatny

Initial selection of lignite deposits from LGOM region for development by innovative underground gasification methods

Abstract: The article raises the issue of underground lignite gasification from Legnica region with the use of innovative methods. The geological structure in terms of lignite presence and initial mining conditions were characterized. The geological cross-sections are shown as well. Some innovative methods were characterized, i.e. underground lignite gasification and biogasification. Preliminary classification criteria for applying of the gasification methods and requirements for the lignite deposits were presented. Discussion was illustrated by the example, in which variant methods for deposit development were shown. Requirements for different tests that are necessary to apply those innovative methods were also described.

Key words: mining, underground gasification, lignite

* Dr inż., ** Mgr, KGHM CUPRUM Sp. z o.o. – Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław;
e-mail: jnowak@cuprum.wroc.pl; abaranska@cuprum.wroc.pl

Wprowadzenie

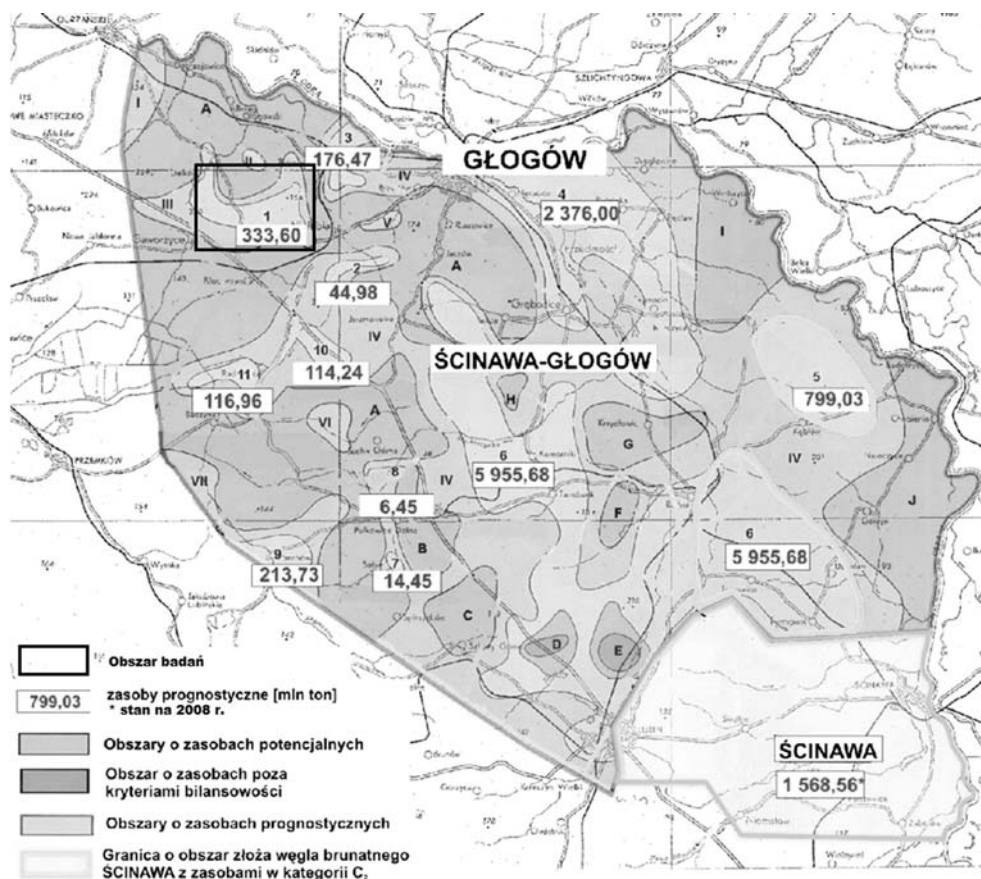
Do nowych, innowacyjnych, sposobów górniczego zagospodarowania złóż węgla brunatnego zalicza się metody otworowe, takie jak podziemne zgazowanie w wersji termicznej i biotechnologicznej (Kozłowski 2008). Należą one do grupy czystych technologii węglowych. Tak jak metoda termiczna stosowana jest od kilkudziesięciu lat, np. w Angren (Uzbekistan) i licznych obecnie instalacjach w wielu krajach, tak metoda biotechnologiczna zaczyna się dopiero rozwijać. Ich stosowanie, jak każdej innej metody górniczej, wymaga spełnienia szeregu wymagań dla uzyskania produktu – gazu syntezowego lub biogazu (głównie metanu) w sposób bezpieczny i ekonomicznie uzasadniony. Oczywiście jest konieczność spełnienia szeregu wymagań prawnych, choćby związanych z uzyskaniem koncesji na poszukiwanie i rozpoznanie złoża oraz koncesji eksploatacyjnej. Obecne rozwiązania prawne w sposób skuteczny zabezpieczają przestrzeganie przepisów zawartych w Prawie geologicznym i górnictwie, prawie ochrony środowiska i innych, jak również wymagania nadzoru górniczego. Stosowanie innowacyjnych metod górniczych wymaga jednak prowadzenia znacznie rozszerzonych badań w ramach prac geologicznych, jak i dokumentacyjnych w porównaniu z dotychczas wykonywanymi. Dodatkowe wymagania dotyczą pogłębionych badań geologicznych, hydrogeologicznych, geotechnicznych oraz środowiskowych (Kudęłko, Nowak 2010). W wielu przypadkach wymagane jest stosowanie badań szczególnych, np. związanych z wyznaczaniem parametrów reologicznych i budowy odpowiednich modeli, badaniem anizotropii niektórych parametrów, oznaczaniem w zwiększonym zakresie parametrów wytrzymałościowych i innych. Wiąże się to z przygotowaniem odpowiednich projektów technicznych w różnych fazach oraz dokumentów formalno-prawnych dla uzyskania koncesji.

Jak w każdym projekcie górnictwa, tak i w tym przypadku o sukcesie decydować będzie bardzo dobrze przeprowadzone rozpoznanie geologiczne i szeroki zakres oznaczeń poszczególnych parametrów niezbędnych do projektowania. Sposób analizowania warunków geologiczno-złożowych przedstawiono na wybranych grupach parametrów perspektywicznych zasobów węgla brunatnego z rejonu LGOM.

1. Obszary złożowe węgla brunatnego w rejonie LGOM

Budowa geologiczna i zasięg przestrzenny występowania węgla brunatnego w rejonie LGOM są częściowo dobrze znane, ale istnieje znaczna część obszarów niezbadanych lub oszacowana na podstawie badań geologicznych wykonanych w ramach poszukiwania i rozpoznania złóż rud miedzi. Do analizy wybrano jedynie obszary prognostyczne i perspektywiczne, rezygnując z obszarów złożowych Legnica Wschód, Legnica Zachód, Legnica Północ, Ścinawa i Ruja. W zasadzie skupiono się na obszarze zlokalizowanym między Chociemyślem, Głogowem, Smardzowem i Jerzmanową na wschodzie, Jakubowem, Kłobuczynem i Koźlicami na południu, Gaworzycami, Drogomilem i Bytomiem Odrzańskim na zachodzie oraz Bytomiem Odrzańskim i Chociemyślem na północy (rys. 1).

Na podstawie danych zawartych w Projekcie prac geologiczno-poszukiwawczych węgla brunatnego w rejonie Ścinawa – Bytom Odrzański (Derkacz, Sztromwasser 1984)



Rys. 1. Rozmieszczenie przestrzenne pól złożowych i wielkość zasobów prognostycznych w obszarze Ścinawa–Głogów (Bednarczyk 2008)

Fig. 1. Spatial distribution of lignite and quantity of expected resources in Ścinawa–Głogów region (Bednarczyk 2008)

wydzielono pola o zasobach prognostycznych (do wartości $N:W^1 = 12$), potencjalnych ($N:W > 12$ do 20) i poza kryteriami bilansowości (Piwocki 1996; Bednarczyk 2008). W północno-zachodniej części tego obszaru zasoby węgla brunatnego występują w strefie jednego pola prognostycznego (1), dwóch pól potencjalnych (II, III) i jednego pola poza kryteriami bilansowości (A). W obrębie pola 1 o powierzchni około 10 km² (rys. 1) zasoby szacuje się na ponad 330 mln Mg węgla, a w polach II i III łącznie na około 50 mln Mg, na obszarze około 2 km².

Wydziela się tutaj cztery pokłady węgla charakteryzujące się zmienną miąższością i różnym rozprzestrzenieniem. Zgodnie z dokumentacją złóż rud miedzi są to pokłady: „głogowski” (4), „ścinawski” (3), „łużycki” (2) i „Henryk” (1). Spośród nich największe

¹ $N:W$ – stosunek grubości nadkładu do miąższości pokładu węgla.

miąższości wykazuje pokład „łużycki”. Według nieformalnego podziału litostratygraficznego (Piwocki, Ziemińska-Tworzydło 1995), tj. niespełniającego formalnych kryteriów określonych w „Zasadach polskiej klasyfikacji, terminologii i nomenklatury stratygraficznej” (Birkenmajer 1975) są to, idąc od najstarszej, formacje: rawicka z IV dąbrowską grupą pokładów węgla brunatnego (ogniwo dąbrowskie), ścinawska z III ścinawską i II łużycką grupą pokładów, pawłowicka z IIA lubińską grupą pokładów, poznańska z I środkowopolską grupą pokładów. Wymienione pokłady dają się korelować na dużym obszarze w rejonie LGOM, w niektórych jednak jego częściach zostały one zastąpione przez skały silnie węgliste, a niekiedy brak ich w ogóle. Największą ciągłością charakteryzuje się pokład „łużycki”, stwierdzony we wszystkich otworach wykonanych w tym rejonie. W nielicznych przypadkach utwory węgliste zastępowały pokład „ścinawski” i „głogowski”. Natomiast pokład „Henryk” w wielu otworach archiwalnych nie został stwierdzony w ogóle, lub też zastępowały go utwory węgliste. Pokłady (ławy) węgla brunatnego są rozdzielone warstwami piasków, mułków i ilów.

W obrębie omawianego obszaru wyróżnia się dwa zasadnicze kompleksy wodonośne:

- kenozoiczny – obejmujący luźne utwory czwartorzędu i trzeciorzędu z krążeniem intergranularnym wód,
- triasowo-permski – występujący w zwiezłych, porowatych i szczelinowatych skałach wapienia muszlowego, pstrego piaskowca, cechsztynu i czerwonego spągowca z krążeniem głównie szczelinowym.

W kompleksie kenozoicznym, w obrębie piętra czwartorzędownego, wydziela się poziomy holocenu i plejstocenu, a w piętrze trzeciorzędowym poziomy: nadwęglowy (pliocenu), międzywęglowy (miocenu) oraz podwęglowy (oligocenu).

W kompleksie triasowo-permskim występują poziomy: wapienia muszlowego, górnego pstrego piaskowca (retu), środkowego i dolnego pstrego piaskowca, dolomitu głównego (Ca-2), wapieni i dolomitów (Ca-1) cechsztynu oraz piaskowców czerwonego spągowca.

Poszczególne piętra i poziomy wodonośne rozdzielone są warstwami izolującymi lub pozostają ze sobą w kontakcie hydraulicznym.

Znaczącym poziomem izolującym na rozpatrywanym obszarze jest warstwa ilów mioceńskich, która oddziela trzeciorzędowe poziomy wodonośne – nadwęglowy i międzywęglowy od podwęglowego oraz pięter triasowego i permskiego. Poziom wodonośny w podwęglowych utworach trzeciorzędu pozostaje w kontakcie hydraulicznym z triasowym piętrzem wodonośnym. Nie posiadają one jednak więzi hydraulicznej z wodami występującymi w obrębie utworów permu. Izolację stanowi tu warstwa iłupków i iłowców górnoczechoszyńskich oraz zalegająca pod nią seria anhydrytowa.

2. Aktualne dane dotyczące węgla brunatnego

Rozpoznanie pokładów węgla brunatnego w obrębie omawianego obszaru przeprowadzono na podstawie wyników z otworów miedziowych wykonanych w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku. W większości z nich badań węgla nie wykonywano. Znaczna część tych otworów w utworach neogenu i paleogenu wiercona była bezrde-

niowo, stąd interpretacja litologii kenozoiku oparta została na wynikach badań geofizyki otworowej.

Analizę pod względem głębokości zalegania i miąższości poszczególnych warstw węgla brunatnego, jak również przestrzennego ich rozmieszczenia, przeprowadzono na podstawie danych zebranych z 75 archiwalnych otworów poszukiwawczo-rozpoznawczych za złożami rud miedzi. Stwierdzono, że spośród wszystkich analizowanych otworów wiertniczych badania węgla przeprowadzono jedynie w 3 otworach (S-474, S-485, S-475) z obszaru złoża rud miedzi „Bytom Odrzański” i w 2 otworach (S-472, S-473) z obszaru złoża rud miedzi „Głogów III”. Wszystkie wymienione otwory zlokalizowane są na północ od rzeki Odry, tj. w znacznej odległości od obszaru zainteresowania (rys. 1). Szczegółową analizą objęto 18 profili wiertniczych z otworów nr: S-385, S-388, S-389, S-390, S-391, S-392, S-393, S-399, S-400, S-401, S-402, S-403, S-425, S-429, S-430, S-431, S-452, S-453. W żadnym z nich badań węgla nie wykonywano.

Wyniki badań petrograficznych i analiz palinologicznych wykazały, że węgiel brunatny w obrębie omawianego obszaru jest zbudowany z dwóch podstawowych litotypów: węgla ziemistego i węgla ksylitowo-ziemistego. Ze względu na udział w nich rozpoznawalnych szczątków roślinnych, detrytusu lub też innych akcesorycznych odmian petrograficznych, wyróżniono szereg makroskopowych odmian węgla: ziemisty, atrytowy, ziemisty z ksy-litami, ziemisty detrytyczny, ziemisty z ksy-litami i detrytusem, ziemisty z detrytusem i fuzynami, ziemisty z detrytusem, ksy-litami i fuzynami. Występują również nieliczne, cienkie warstewki czystego węgla ksylitowego. Do zgazowania nadaje się każdy z wymienionych wyżej litotypów.

Jakości węgla na tym obszarze dotychczas nie badano. W dużym przybliżeniu charakteryzują ją wyniki badań wykonanych w północnej części złoża rud miedzi „Bytom Odrzański” (Kozula, Golczak 1988) (tab. 1–4).

Tabela 5 prezentuje znaczne różnice średnich parametrów dla poszczególnych pokładów. Są to wartości orientacyjne z uwagi na różne wagi danych źródłowych oraz ich ilość. Będą one bardziej miarodajne po wykonaniu planowanych badań geologicznych. Podobne rozbieżności w poszczególnych grupach parametrów występują w każdym z pokładów (tab. 6). Uwzględniając potrzeby projektu stwierdza się, że takie zróżnicowanie danych nie pozwala na dobre zaprojektowanie instalacji o stabilnych parametrach eksploatacyjnych.

TABELA 1. Jakość węgla brunatnego w pokładzie „Henryk”

TABLE 1. Quality of lignite in the “Henryk” seam

L.p.	Numer otworu	Przelot od–do [m]	Wartość opałowa Q_{i^r} [kJ/kg]	Popiół A^r [%]	$Na_2O + K_2O$ [%]	Siarka całkowita [%]
1.	S-474	66,0–73,0	7 586	36,77	0,30	1,08
2.	S-485	67,0–73,0	7 911	24,52	0,18	0,64
3.	S-486	64,0–68,0	9 017	8,22	0,13	0,62
4.	S-487	123,0–126,0	10 415	9,98	0,18	0,73
5.	S-491	88,3–93,0	8 863	15,35	0,11	0,39

TABELA 2. Jakość węgla brunatnego w pokładzie „łużyckim”

TABLE 2. Quality of lignite in the “łużycki” seam

L.p.	Numer otworu	Przelot od–do [m]	Wartość opałowa $Q_{i,r}$ [kJ/kg]	Popiół A ^r [%]	Na ₂ O + K ₂ O [%]	Siarka całkowita [%]
1.	S-474	131,0–134,0	9 553	8,16	0,22	1,62
2.		170,0–178,5	8 918	21,07	0,26	3,04
3.	S-475	183,5–185,5	8 633	21,22	0,26	5,75
4.	S-476	138,0–140,0	10 108	11,11	0,19	0,84
5.		164,0–168,0	8 234	21,49	0,16	3,86
6.		176,0–180,0	5 572	38,37	0,18	3,04
7.	S-483	132,0–138,0	9 471	18,64	0,19	0,93
8.		159,0–165,0	6 687	20,17	0,17	2,98
9.		170,5–173,5	7 285	29,76	0,23	4,02
10.	S-484	158,5–161,0	9 112	21,61	0,17	2,61
11.		166,0–168,0	6 274	37,44	0,21	3,18
12.		173,0–175,3	8 339	24,22	0,16	6,92
13.	S-485	133,0–136,0	9 212	17,69	0,22	0,74
14.		156,0–158,0	6 278	33,42	0,19	2,58
15.		163,0–165,2	7 351	28,63	0,24	2,39
16.	S-486	152,0–157,0	8 932	20,67	0,23	7,14
17.		172,0–174,7	8 757	25,74	0,25	5,98
18.	S-487	150,5–153,5	7 629	24,85	0,22	3,70
19.		156,0–159,0	7 062	30,70	0,23	3,62
20.		161,5–163,5	6 469	34,25	0,20	4,97
21.	S-491	139,0–142,4	10 854	9,68	0,20	0,87

TABELA 3. Jakość węgla brunatnego w pokładzie „ścinańskim”

TABLE 3. Quality of lignite in the “ścinański” seam

L.p.	Numer otworu	Przelot od–do [m]	Wartość opałowa $Q_{i,r}$ [kJ/kg]	Popiół A ^r [%]	Na ₂ O + K ₂ O [%]	Siarka całkowita [%]
1.	S-485	228,0–232,0	9 520	16,13	0,27	3,16

TABELA 4. Jakość węgla brunatnego w pokładzie „głogowskim”

TABLE 4. Quality of lignite in the “głogowski” seam

L.p.	Numer otworu	Przelot od–do [m]	Wartość opałowa $Q_{i,r}$ [kJ/kg]	Popiół A ^r [%]	Na ₂ O + K ₂ O [%]	Siarka całkowita [%]
1.	S-483	231,5–233,5	9 880	9,56	0,25	6,24

TABELA 6. cd.

TABLE 6. cont.

1	2	3	4	5	6
Miąższość warstw węgla w otworze (oligocen) wraz z miąższością przerostów międzywęglowych [m]	1,8	–	3,0	6,0	1,0
	3,2		2,0		
	1,4		1,0		
			14,0		
			1,5		
Sumaryczna miąższość warstw węglowych w otworze zakwalifikowanych do podziemnego zgazowania [m]	3,0	24,5	11,8	17,2	12,0
Średnia miąższość węgla w obrębie obszaru badań [m]	13,7				
Powierzchnia obszaru badań [m ²]	8 532 000				
Kubatura węgla w obrębie obszaru badań [m ³]	116 888 400				

3,0	warstwa węgla zakwalifikowana do podziemnego zgazowania
2,0	warstwa węgla niezakwalifikowana do podziemnego zgazowania
1,3	dopuszczalna miąższość przerostów międzywęglowych
2,0	niedopuszczalna miąższość przerostów międzywęglowych

3. Metody innowacyjne zagospodarowania węgla brunatnego i wstępne kryteria ich stosowania

Innowacyjne metody zagospodarowania węgla brunatnego obejmują głównie metody otworowe, takie jak podziemne zgazowanie termiczne i biologiczne (Kozłowski 2008; Kudelko, Nowak 2007; Nowak 2007) oraz zatłaczania CO₂. Wymienione sposoby zagospodarowania nie były jeszcze stosowane w kraju, a tylko w nielicznych przypadkach za granicą. Praktycznie stosowane było podziemne zgazowanie węgla brunatnego, ale w korzystniejszych warunkach geologicznych niż krajowe. Natomiast biozgazowanie nadal pozostaje w sferze badań, co związane jest z niezwykle trudnym i czasochłonnym wykorzystaniem bakterii lub innych mikroorganizmów, głównie beztlenowych (Szubert i in. 2011). Elementem niezbędnym dla realizacji przemysłowych badań nad biozgazowaniem jest izolacja, selekcja oraz przygotowanie metanogennego konsorcjum mikroorganizmów, prowadzących wieloetapowy proces rozkładu matrycy węglowej do biogazu (CH₄ + CO₂). Badania te w Polsce są w fazie początkowej. Kompleksowe badania w skali laboratoryjnej nad biozgazowaniem prowadzone były przez pojedyncze instytucje, wśród których warto wymienić amerykańską firmę Archtech Inc., będącą właścicielem kilku patentów dotyczących tej metody. Testy pilotowe w skali półprzemysłowej (jedyne znany przykład wykorzystania biochemicznej reakcji rozkładu węgla do metanu na większą skalę) przeprowadzono według schematu zaproponowanego przez firmę Luca Technologies Inc. (USA).

Polegał on na wykorzystaniu wyeksploatowanych z metanu złóż węgla (głównie subbitumicznych) poprzez wprowadzanie do pokładów węgla odpowiednio dobranej pożywki bakteryjnej, która stymulowała występujące w złożu mikroorganizmy do wytwarzania dodatkowych ilości metanu.

Zatłaczanie ditlenku węgla do pokładów węgla przewidywane było jako sposób jego składowania podziemnego w pokładach nie przewidzianych do zgazowania lub wydobywania. Jednak obecnie, z powodu problemu z zagospodarowaniem CO₂, pojawiają się nowe sposoby wykorzystania tego gazu. Stosowany jest jako składnik gazu nadmuchowego w termicznym podziemnym zgazowaniu. Może być również wcześniej zatłoczony do pokładu węglowego, przed jego zgazowaniem.

Można również zatłoczyć CO₂ do warstw przewidzianych do biozgazowania. Działa to korzystnie na konwersję węgla do metanu w przypadku niektórych kultur mikroorganizmów. Podkreślić należy, że są to początkowe fazy nielicznych jeszcze badań.

Stosowanie metod innowacyjnych wiąże się z koniecznością spełnienia szeregu wymagań dotyczących np. szczelności warstw nadkładu, odpowiedniego drenażu, wysokiej porowatości efektywnej itp. Znajdują się one w fazie badań i obecnie nie wszystkie są jednoznacznie określone (Kudęłko, Nowak 2009).

Na etapie dokumentowania zasobów w kategoriach C₂, C₁ i B, jako punkt wyjścia można przyjąć obecnie obowiązujące kryteria bilansowości dla złóż węgla brunatnego, które zostały opracowane dla eksploatacji metodą odkrywkową (Kudęłko, Nowak 2007; Nowak 2007). Jeśli jednak w wybranym obszarze badań udokumentowanie złoża nie jest możliwe według obowiązujących wytycznych, można wykonać inną dokumentację geologiczną nie kończącą się udokumentowaniem zasobów (zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 23.06.2005 r.) lub ustalić indywidualne kryteria bilansowości dla potrzeb podziemnego zgazowania węgla brunatnego i na ich podstawie opracować dokumentację geologiczną wraz z oszacowaniem zasobów bilansowych.

Przy ustalaniu brzeżnych wartości parametrów jakościowych paliwa stałego, zwłaszcza w odniesieniu do obszarów prognostycznych i perspektywicznych, jako podstawę można przyjąć graniczne wartości wybranych parametrów węgla brunatnego, czy też średnie wartości głównych parametrów chemiczno-technologicznych mioceńskich węgli brunatnych występujących w Polsce (tab. 7).

Na uwagę zasługuje także propozycja nowej klasyfikacji węgla brunatnego opracowana dla celów dokumentowania i bieżącej oceny jakości w zakładach górniczych (tab. 8). Uwzględniono w niej: parametry oceny stopnia uwęglenia według nowej klasyfikacji międzynarodowej (ECE-UN 1995), skład petrograficzny (analiza macerałów) oraz parametry jakości technologicznej węgla (wilgotność, popielność, wartość opałowa itp). Ostatecznie wyróżniono 6 typów technologicznych węgla brunatnego, w tym węgiel do zgazowania. Przyjęte nazwy i wyróżniki cyfrowe nawiązują do klasyfikacji węgla kamiennego stosowanej w Polsce.

Biorąc pod uwagę powyższe dane, jak również opublikowane wyniki światowych doświadczeń z zakresu podziemnego zgazowania (Kudęłko, Nowak 2010, 2009) przyjęto brzeżne parametry ilościowe i jakościowe paliwa stałego podane w tabeli 9.

Wartości ujęte w tabeli 9 należy traktować jako wstępne wytyczne dla wyznaczenia granic obszaru do przeprowadzenia bardziej szczegółowych prac poszukiwawczo-rozpoznawczych. Uzyskanie pozytywnych i wiarygodnych wyników badań geologicznych pozwoli na wprowadzenie korekty do powyższych parametrów brzeżnych.

TABELA 7. Główne parametry chemiczno–technologiczne mioceńskich węgli brunatnych w Polsce (Matl 1981)

TABLE 7. Main chemical and technological parameters of the Miocene lignite in Poland (Matl 1981)

Parametr	Wartości średnie		
Wartość opałowa	Q_{i^r}	[MJ/kg]	6,3–10,9
		[kcal/kg]	1505–2634
Zawartość popiołu	A^d	[%]	8,0–30,0
Zawartość siarki całkowitej	S_t^d	[%]	0,45–5,70
Zawartość siarki palnej	S_c^d	[%]	0,35–4,50
Zawartość siarki popiołowej	S_a^d	[%]	0,10–1,20
Prasmoła	T_k^d	[%]	6,0–15,0
Bituminy	B^d	[%]	2,3–5,7
Alkalia	$(Na_2O + K_2O)^d$	[%]	0,01–0,86

TABELA 8. Projekt wyróżnienia typów miękkiego (C) i twardego węgla brunatnego odmian matowych (B) na podstawie kryteriów technologicznych i petrograficznych (Kwiecińska, Wagner 1997)

TABLE 8. The project of distinguishing soft lignite (C) and hard lignite types of mat form (B) based on technological and petrographic criteria (Kwiecińska, Wagner 1997)

Typ węgla		Parametry chemiczne					Parametry petrograficzne		
Nazwa	Wyróżnik	Q_{i^r}	S_t^d	A^d	B^d	T^d	I	II	III
		MJ/kg	%	%	%	%			
Węgiel energetyczny	21.1	< 6,7	–	≤ 40	–	–	–	–	–
	21.2	≥ 6,7	–	≤ 40	–	–	–	–	–
Węgiel brykietowy	22	≥ 8,4	–	≤ 15	–	–	< 20	< 20	< 20
Węgiel wylewny	23	–	–	≤ 20	–	≥ 12	–	–	–
Węgiel ekstrakcyjny	24	–	–	–	≥ 8	–	–	–	–
Węgiel do zgazowania	25	≥ 8,4	≤ 1,5	≤ 9,0	–	–	< 20	< 20	< 20
Węgiel do uwodorniania (upłynniania)	26	–	–	≤ 6,0	–	–	–	–	–

Q_{i^r} – wartość opałowa w stanie wilgoci złożowej, S_t^d – zawartość siarki całkowitej w stanie suchym, A^d – popielność w stanie suchym, B^d – wydajność bituminów w ekstrakcji nietypowej w stanie suchym, T^d – wydajność prasmoły wylewnej w stanie suchym, I – suma macerałów niekorzystnych w procesie bezlepiszczowego brykietowania (humokolinit, eulminit, inertynit, minerały), II – suma macerałów obojętnych (tekstoulminit, densynit), III – suma macerałów pożądaných (tekstynit, atrynit, liptynit).

TABELA 9. Brzeźne parametry ilościowe i jakościowe węgla brunatnego w kontekście podziemnego zgazowania (opracowanie własne)

TABLE 9. Quantitative and qualitative cut off parameters of lignite regarding underground gasification (own study)

Parametry	Wartość brzeźna	Uzasadnienie
1	2	3
ILOŚCIOWE		
Miażdżość węgla brunatnego	3–4 m	pokłady o miąższości mniejszej niż 0,5 m uznaje się za nie nadające się do efektywnego podziemnego zgazowania. Gaz o wartości użytecznej uzyskuje się z pokładów o grubości, co najmniej 1 m. W przypadku grubszych pokładów proces gazyfikacji trwa dłużej, co stwarza warunki do wzbogacania gazu w składniki palne pochodzące z odgazowania węgla i przyczynia się do uzyskania wyższej wartości opałowej
Minimalne zasoby węgla brunatnego	80–450 tys. Mg	wielkość zasobów powinna być dobierana w zależności od przewidywanego czasu funkcjonowania projektu i założeń technologicznych. Tak przyjęty poziom zasobów dla pilotowej instalacji badawczej pozwoli na produkcję 216,81 mln m³/rocznie, tj. około 0,594 tys. m³/dobę gazu o wartości opałowej 7,5 MJ/m³ lub większej w zależności od przebiegu procesu zgazowania. Roczne zużycie węgla szacuje się na 79,42 tys. Mg/r. Doświadczenia światowe wskazują, że ekonomika procesu zgazowania wzrasta z wielkością złoża, stąd przy komercjalizacji instalacji przyjmuje się zasoby na poziomie minimum 3,5 mln Mg
JAKOŚCIOWE		
Typ węgla	węgiel niskouwęglony, tj. ksylitowy (lignitowy), ksylitowo-ziemisty, ziemisty, bitumiczny	do zgazowania nadaje się w zasadzie każdy typ węgla, jednakże węgle niskouwęglone charakteryzują się większą porowatością, która przekłada się na dużą przepuszczalność dla gazu, a tym samym na korzystne warunki dla tworzenia podziemnego gazogeneratora. Podczas zgazowania tego typu węgla powstaje mniej substancji smolistych, a więcej produktów gazowych
Wartość opałowa węgla	powyżej 4,0 MJ/kg	w przypadku wyrobisk odkrywkowych przyjmuje się minimalną wartość opałową na poziomie 6,5 MJ/kg. W przypadku podziemnego zgazowania nie ma ustalonej wartości granicznej. Zatem intuicyjnie przyjmuje się, że wartość opałowa poniżej 4,0 MJ/kg nie gwarantuje uzyskania gazu syntezowego o zakładanej kaloryczności, co przełoży się na opłacalność inwestycji
Zawartość węgla	powyżej 40%	węgle brunatne niskouwęglone – miękkie zawierają zazwyczaj od 65 do 67 C ^{daf} (stan suchy bezpopiołowy), natomiast węgle brunatne wysokouwęglone twarde od 71 do 73 C ^{daf}
Wilgotność naturalna	do 20%	znaczna zawartość wilgoci sprawia, że jej odparowanie w trakcie procesu zgazowania pochłania dużo energii
Zawartość substancji lotnych	20–70%	duża zawartość części lotnych wraz z niskim stopniem uwęglenia zwiększa reaktywność węgla

TABELA 9. cd.

TABLE 9. cont.

1	2	3
Zawartość popiołu w węglu	5–30%	zwiększona zawartość popiołu powoduje zmniejszenie ilości substancji węglowej, a tym samym powstaje mniej ciepła. Dotychczasowe badania wykazały, że zawartość popiołu powyżej 50% obniża wartość opałową otrzymywanego gazu i utrudnia prowadzenie procesu zgazowania. Przy umiarkowanej ilości popiołu w węglu tlenki niektórych metali zawarte w popiele przyspieszają przebieg reakcji, co prowadzi do zwiększenia wartości opałowej wytwarzanego gazu
Zawartość siarki całkowitej	poniżej 5%	zawartość siarki całkowitej nie jest zależna od typu węgla, lecz od warunków w jakich się tworzył. Obecność siarki w węglu wpływa ujemnie na większość procesów jego przetwarzania. W szczególności dotyczy to procesu spalania, w trakcie którego większość siarki zawartej w węglu (70–95%) przechodzi do gazów spalinowych w postaci tlenków siarki, głównie dwutlenku siarki SO_2 . Tlenek siarki (IV) łączy się z wodą tworząc kwas siarkowy (IV) $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$ Pozostała część siarki występuje w postaci siarczanów w popiele. Są to siarczany pochodzące z pierwotnej substancji mineralnej oraz nowo utworzone podczas spalania węgla siarczany (IV) i (VI) powstałe w reakcji tlenków siarki z alkalicznymi składnikami substancji mineralnej węgla. W przypadku podziemnego zgazowania szkodliwość tlenków siarki jest mniejsza, jednakże brak szczelności gazogeneratora może prowadzić do zanieczyszczenia gruntu i wód podziemnych
Zawartość alkaliów ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)	poniżej 6%	wiązanie siarki następuje poprzez tworzenie się stałych siarczanów, np. K_2SO_4 i Na_2SO_4 , zatem duża zawartość tlenków metali alkalicznych K_2O i Na_2O sprzyja redukcji stężenia SO_2 . Tlenki metali alkalicznych w reakcji z wodą tworzą zasady: $\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH}$ – powstaje wodorotlenek sodu $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ – powstaje wodorotlenek wapnia

Przedstawione kryteria oraz podane wartości brzeżne określają sposób oceny i typowania pokładów węgla brunatnego do zagospodarowania. Występują w tym przypadku dwa sposoby postępowania, zależne od rozpoznania i udokumentowania złoża.

Pierwszy przypadek związany jest z analizą złoża udokumentowanego, choćby w kat. C₂. Dane geologiczne pozwalają wówczas na opracowanie dość dokładnych przekrojów geologicznych oraz:

- wyszczególnienie warstw stanowiących warstwy szczelne;

TABELA 10. Wymagania geologiczno-złożowe oraz kryteria kwalifikacyjne dla podziemnego zgazowania węgla brunatnego

TABLE 10. Geological and deposit requirements and qualifying criteria for underground lignite gasification

L.p.	Parametry	Według zaleceń co do możliwości prowadzenia procesu – wymagania minimalne (wg Kozłowski 2008)	Z uwzględnieniem opłacalności procesu (opracowanie własne)
1.	Klasa węgla	węgiel musi być bitumiczny lub niższej klasy	ksylitowy (lignitowy), ksylitowo-ziemisty, ziemisty, bitumiczny
2.	Miaższość pokładu węgla	> 0,5 m grubości – najlepsze wyniki dla grubości powyżej 1,5 m	preferowana krotność wartości 4 m
3.	Głębokość pokładu	12 m – preferowane głębiej niż 150 m	150 m
4.	Warunki hydrogeologiczne	pokład węgla musi być poniżej poziomu wód gruntowych. Poziom wodonośny nie powinien być źródłem lokalnych zasobów wody pitnej	preferowane pokłady zlokalizowane poniżej użytkowych poziomów wodonośnych (przyjmuje się minimalną odległość 40 m), brak głównych zbiorników wód podziemnych w sąsiedztwie potencjalnej inwestycji
5.	Skład wody	najlepiej jeśli nie jest to woda pitna, TDS > 1,000 ppm	bez zmian
6.	Litologia skał nadkładu	–	preferowane utwory słabo przepuszczalne (iły, mułki, gliny) – warstwy szczelne na poziomie o niskich wpływach oddziaływania termicznego reaktora
7.	Właściwości fizykochemiczne węgla istotne dla procesu zgazowania	–	preferowany węgiel o zawartości popiołu poniżej 20%, niskiej zawartości siarki
8.	Tektonika górotworu i najbliższego otoczenia	–	preferowany brak szczelin i znaczących zaburzeń tektonicznych (uskoków)
9.	Wstępne warunki bezpieczeństwa	–	preferowany brak w sąsiedztwie zabudowy powierzchniowej, rzek, jezior, obszarów chronionych

TABELA 11. Wstępne wymagania geologiczno-złożowe dla podziemnego biozgazowania węgla brunatnego (opracowanie własne)

TABLE 11. Initial geological and deposit conditions for underground lignite biogasification (own study)

L.p.	Parametry	Według zaleceń dla możliwości prowadzenia procesu – wymagania minimalne
1.	Klasa węgla	ksylitowy (lignitowy), ksylitowo-ziemisty, ziemisty, bitumiczny
2.	Grubość pokładu węgla	1 m
3.	Głębokość pokładu	uwarunkowana względami ekonomicznymi
4.	Warunki hydrogeologiczne	brak znaczących dopływów
5.	Skład wody	czysta, zbliżona do pitnej
6.	Litologia skał nadkładu	warstwy nieprzepuszczalne najlepiej nad węglem
7.	Właściwości fizykochemiczne węgla istotne dla procesu biozgazowania	zawartość siarki <1%
8.	Tektonika górotworu i najbliższego otoczenia	zapewniająca zachowanie szczelności górotworu
9.	Wstępne warunki bezpieczeństwa	bezpieczna odległość od miejsc zamieszkania ludzi oraz zwierząt

- ustalenie nieciągłości tektonicznych i przebiegu warstw geologicznych, w tym węgla;
- zaplanowanie badań uzupełniających dla potrzeb uzyskania danych do opracowania dokumentacji geologicznej wyższej kategorii oraz do projektu instalacji podziemnego zgazowania.

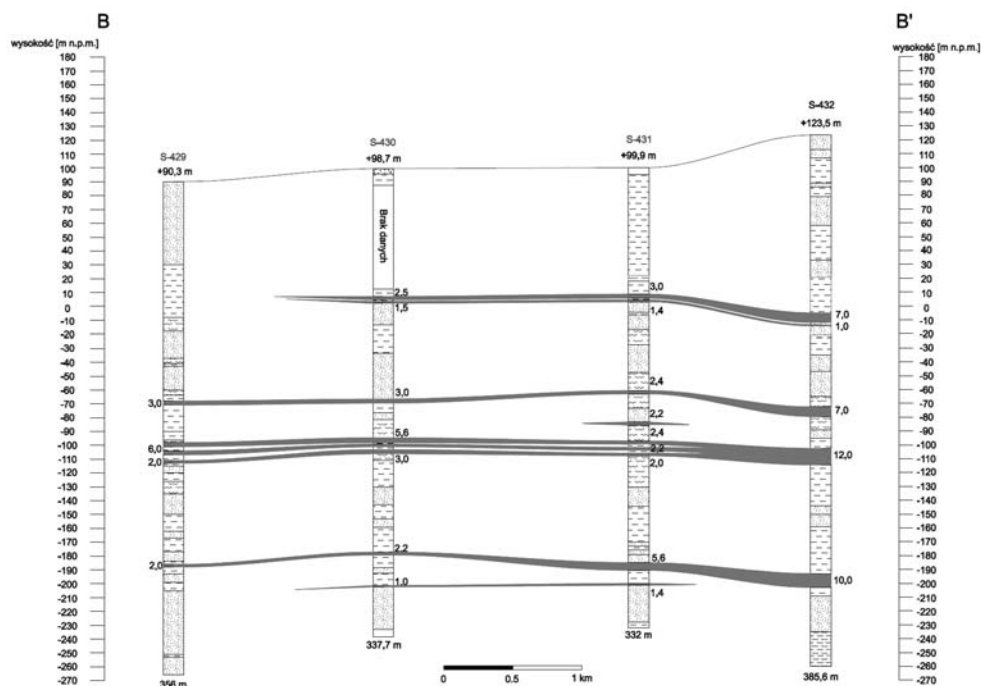
Drugi przypadek dotyczy zasobów węgla brunatnego nierozpoznanych, analogicznie jak analizowanego obszaru LGOM, gdzie jednakże istnieje część danych geologicznych pochodzących z otworów poszukiwawczych za rudą miedzi, wystarczających do wstępnego wytypowania pokładów do ich zagospodarowania metodami otworowymi. W tym przypadku niezbędne są jakiejkolwiek informacje geologiczne umożliwiające opracowanie przekrojów geologicznych. Zatem bez przeprowadzenia rozpoznania geologicznego nie można rozpocząć analiz. Po uzyskaniu danych z wierceń i badań laboratoryjnych dalszy sposób postępowania jest podobny, jak w przypadku pierwszym.

Kolejnym krokiem jest analiza danych geologicznych w kontekście warunków geologiczno-złożowych zawartych w tabelach 9, 10, 11 oraz porównanie ich z wytycznymi zawartymi w tabelach 7 i 8. Pozwoli to na bardziej precyzyjne określenie wymagań dla stosowania metod innowacyjnych. Poruszamy się cały czas w obszarze badań, które się rozwijają i wymagają ciągłej weryfikacji, jak też uwzględnienia charakterystyki konkretnego pokładu węgla brunatnego (złoża).

4. Wstępna ocena możliwości wykorzystania innowacyjnych metod górniczych w badanym obszarze

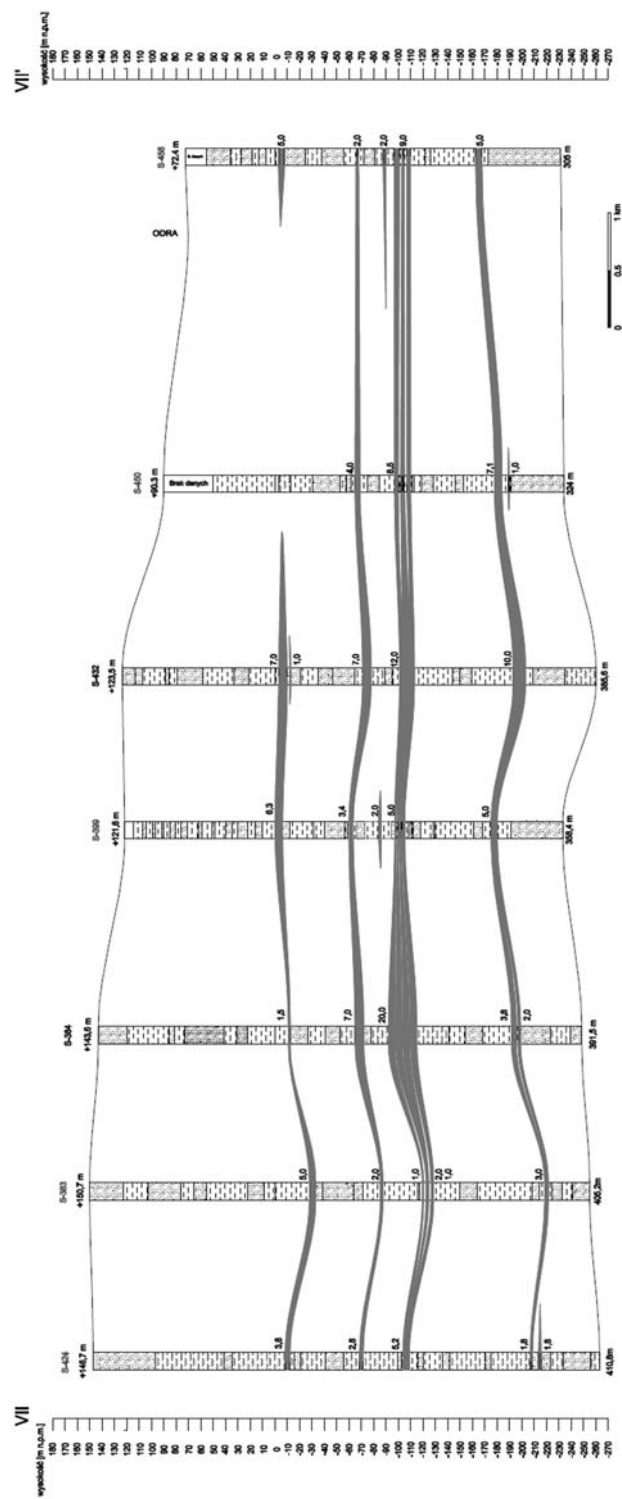
Na podstawie danych geologicznych opracowano przekroje (rys. 2, 3) i przeprowadzono analizy, których wyniki zamieszczono w tabeli 6. Na przekrojach widać, że węgiel brunatny w tym obszarze występuje nie tylko w formie pokładów, ale również ław i soczew. Różnorodność ta jest pewnym utrudnieniem dla zagospodarowania węgla. Trudno tu wykorzystać metodę odkrywkową, uwzględniając wyłącznie warunki złożowe. Dużo łatwiej zastosować metody otworowe, zwłaszcza jeśli celem badań jest budowa instalacji pilotowo-badawczej lub działalność komercyjna w skali lokalnej, np. wykorzystanie gazu syntezowego w elektrociepłowniach o małej i średniej mocy.

Na analizowanych przekrojach występują na znacznym obszarze warstwy skał spoiстых, które mogą pełnić rolę warstw szczelnych. Z uwagi na niską wodoprzepuszczalność węgla brunatnego, jego warstwy lub pozostawione filary mogą również pełnić taką rolę. Istotne jest, aby warstwa taka nie podlegała destrukcyjnym oddziaływaniom termicznym w przypadku podziemnego zgazowania wysokotemperaturowego, gdyż jej funkcja wówczas zaniknie. Dlatego też konieczne jest przeprowadzenie w każdym przypadku badania odporności termicznej, co można wykonać z zastosowaniem metod termokonsolidacji lub całkowych, które są łatwiejsze w stosowaniu. Są one opracowane, wymagają natomiast wykorzystania odpowiednich danych z badań laboratoryjnych, które zaplanowano do wykonania.



Rys. 2. Uproszczony przekrój geologiczny B-B' przez analizowany obszar złożowy węgla brunatnego w rejonie LGOM (opracowanie własne)

Fig. 2. Simplified geological cross-section B-B' through analyzed lignite deposit in LGOM area (own study)



Rys. 3. Uproszczony przekrój geologiczny VII-VII' przez analizowany obszar złożowy węgla brunatnego w rejonie LGOM (opracowanie własne)

Fig. 3. Simplified geological cross-section VII-VII' through analyzed lignite deposit in LGOM area (own study)

Na podstawie przedstawionych przekrojów można uznać, że część ław (pokładów, soczew) można zagospodarować metodą termicznego zgazowania, a część poprzez biozgazowanie. Wynika to z zastosowania do analizy przekroju kryteriów zawartych w tabelach 9–11. Do części zasobów węgla, głównie tych w soczewach lub zalegających na dużych głębokościach lub o małej miąższości, można zatłoczyć CO₂ na stałe (wykorzystując jego właściwości retencyjne) i ewentualnie poddać biozgazowaniu.

5. Zakres badań niezbędnych do zastosowania metod innowacyjnych

Zakres badań dla potrzeb stosowania metod otworowych musi być rozszerzony w stosunku do wymaganego dla stosowania metody odkrywkowej. Dotyczy to w szczególności: parametrów termicznych, właściwości anizotropowych, chemicznych, geotechnicznych (w tym reologicznych).

W szerszym zakresie badaniom poddane muszą być próbki: węgla, popiołu, nadkładu, wód i przesączy, oraz utworów zawęglonych. Bardzo ważne jest oznaczenie zawartości węgla pierwiastkowego.

Na podstawie materiałów archiwalnych, wykonanych wierceń, profilowania geofizycznego powierzchniowego i otworowego, badań laboratoryjnych oraz kartowania geologicznego planuje się w najbliższym czasie określenie następujących parametrów:

- budowa geologiczna terenu badań: układ warstw, ich miąższości, geneza, stratygrafia i litologia gruntów występujących w podłożu,
- warunki hydrogeologiczne w podłożu gruntowym, zasięg występowania warstw wodonośnych i głębokość zalegania zwierciadła wód podziemnych,
- właściwości fizykomechaniczne gruntów tworzących grupy litologiczno-genetyczne,
- warunki geologiczno-inżynierskie na terenie badań,
- dane niezbędne do oszacowania wielkości osiadania powierzchni terenu po zgazowaniu pokładów węgla brunatnego,
- parametry termiczne gruntów nadkładowych (przewodność cieplna, ciepło właściwe),
- parametry fizykochemiczne, wytrzymałościowe, geotechniczne z uwzględnieniem właściwości anizotropowych węgla oraz anizotropowości współczynników filtracji węgla oraz warstw nadkładowych, granice termiczne zmian postaciowych,
- parametry fizykochemiczne popiołów z węgla, ich parametry cieplne oraz granice termiczne,
- właściwości reologiczne nadkładowych warstw gruntowych.

Podsumowanie i wnioski

Wdrażanie metod innowacyjnych w górnictwie węgla brunatnego jest zadaniem trudnym i obciążonym ryzykiem, co wynika w dużej mierze z faktu, że szereg metod rozwijanych w innych krajach odnosi się do odmiennych od polskich warunków geologicznych. Dodatkowo, wyniki badań i zastosowania przemysłowe są zwykle ujawniane tylko częściowo.

Dlatego zastosowanie tych metod na gruncie krajowym wymaga całego szeregu prac badawczych, analitycznych, które trwają latami i wymagają znacznych nakładów finansowych.

W artykule przedstawiono fragment prac przygotowawczych, zmierzających do zastosowania podziemnego zgazowania węgla brunatnego w rejonie LGOM. Chociaż dotyczą one zgazowania termicznego, będą stanowić również szansę na prowadzenie badań w szerszym zakresie, z uwzględnieniem metod otworowych. W szczególności pokazano złożoność zagadnień geologiczno-złożowych oraz badawczych dla zastosowania przemysłowego tych metod.

Metody otworowe zgazowania i biogazowania są szczególnie przydatne w przypadku złóż pozabilansowych, małych, bądź zalegających na dużych głębokościach, których eksploatację metodami tradycyjnymi uznaje się obecnie za nieopłacalną. Technologie podziemnego zgazowania węgla (PZW) mogą zatem stanowić metody komplementarne do metod tradycyjnych, dla usprawnienia gospodarki zasobami kopalin. Sposób pozyskania energii poprzez dotarcie do złoża otworami wiertniczymi i podziemne zgazowanie ogranicza koszty wydobywania, a przede wszystkim minimalizuje wpływ inwestycji na środowisko naturalne.

Z przedstawionego materiału analitycznego nad metodami innowacyjnymi wdrażanymi w górnictwie węgla brunatnego wynika, że:

1. Prace badawcze nad stosowaniem metod innowacyjnych wymagają jeszcze dużo czasu i wielokrotnych weryfikacji wyników doświadczeń, jak również obliczeń modelowych.
2. Trudności w zastosowaniu nowych metod górniczych i biotechnologicznych wynikają ze skomplikowanej budowy geologicznej Polski oraz skąpych informacji na temat wdrożeń w innych krajach lub też niskiego stopnia ich zaawansowania w innych krajach.
3. Korzyści możliwe do osiągnięcia przy zastosowaniu nowych metod są znaczące w warunkach rozbudowanej infrastruktury, co powoduje, że w dalszym ciągu należy prowadzić prace badawcze nad ich zastosowaniem.

Literatura

- Bednarczyk J., (red.), 2008 – Scenariusze technologii udostępnienia złóż i przetwórstwa węgla brunatnego w rejonie Legnicy. Poltegor-Institut Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław.
- Birkenmajer K., (red.), 1975 – Zasady polskiej klasyfikacji, terminologii i nomenklatury stratygraficznej. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Derkacz J., Sztromwasser E., 1984 – Projekt prac geologiczno-poszukiwawczych węgla brunatnego w rejonie Ścinawa – Bytom Odrzański. CAG PIG-PIB Warszawa.
- Klasyfikacja międzynarodowa UN–ECE (Economic Commission for Europe United Nations) z roku 1995.
- Kozłowski Z., (red.), 2008 – Techniczno-ekonomiczny ranking zagospodarowania złóż węgla brunatnego w aspekcie założeń polityki energetycznej Polski. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- Kozula R., Golczak I., 1988 – Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi „Bytom Odrzański” w kat. C-1 + C-2. CAG PIG-PIB OD Wrocław.
- Kudelko J., Nowak J., 2010 – Conditions for safe underground gasification of lignite in Poland. School of Underground Mining 2010, Dnipropetrovsk/Yalta, Ukraine 2010, New Techniques and Technologies in Mining, Taylor&Francis Group, 97–101.
- Kudelko J., Nowak J., 2009 – Wielokryterialna ocena możliwości zagospodarowania złóż węgla brunatnego regionu Dolny Śląsk przez ich podziemne zgazowanie. XIX Konf. Aktualia i perspektywy gospodarki surowcami mineralnymi, Ryto, 4–6 listopada 2009, IGSMiE PAN, Kraków.

- Kudelko J., Nowak J., 2007 – Geosozologiczne uwarunkowania dla strategii i wyboru technologii zagospodarowania złóż węgla brunatnego rejonu legnickiego. CUPRUM nr 1/2007, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud, Wrocław.
- Kwiecińska B., Wagner M., 1997 – Typizacja cech jakościowych węgla brunatnego z krajowych złóż według kryteriów petrograficznych i chemiczno-technologicznych dla celów dokumentacji geologicznej złóż oraz obsługi kopalń. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- Matl K., 1981 – Złóża. [W:] Surowce mineralne świata, Węgiel Brunatny. Wyd. Geolog Warszawa, 23–99.
- Nowak J., 2007 r. – Legnica lignite deposit management strategy including underground coal gasification. Wyd. Narodowego Uniwersytetu Górniczego, Dniepropietrowsk. 225–231.
- Piwocki M., Ziemińska-Tworzydło M., 1995 – Litostratygrafia i poziomy sporowo-pyłkowe neogenu na Niżu Polskim. Przegl. Geol. vol. 43, nr 11.
- Piwocki M., 1996 – Ocena możliwości zagospodarowania złóż węgla brunatnego Legnica-Ścinawa, Zadanie 5: Obliczenie zasobów zgodnie z aktualnie obowiązującymi kryteriami. CAG PIG, Warszawa.
- Szubert A., Nowak J., Grotowski A., 2011 – Possibilities of methane recovery from non-industrial lignite seams using biogasification method. 15th Conference on Environment and Mineral Processing 8–10.06.2011, Ostrava, 235–242.

