



EDYTA SERMET*, MAREK NIEĆ**, JAROSŁAW CHEĆKO***

Zasoby węgla kamiennego w Polsce dla podziemnego zgazowania – oczekiwania a rzeczywistość

Wprowadzenie

Chemiczny proces prowadzący do konwersji węgla w złożu w produkty gazowe, czyli podziemne zgazowanie węgla (PZW), ma na celu wykorzystanie zasobów węgla (również tych trudno dostępnych) w warunkach *in situ*. Z uwagi na konieczność ograniczenia negatywnych zjawisk związanych z klasycznymi metodami eksploatacji podziemnej, proces ten opisywany jest jako bardziej wydajny sposób pozyskania wysokoefektywnych paliw i energii.

W skali globalnej, rozwój idei i prac nad technologią PZW trwa już od ponad wieku (Hajdo i in. 2010). W Polsce, wstępne próby podziemnego zgazowania węgla podjęte zostały w połowie lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia, w kopalni węgla kamiennego „Mars”, wykorzystywanej wówczas przez GIG jako kopalnia doświadczalna m.in. w zakresie podziemnej gazyfikacji (Dziunikowski 1956). Działalność ta została zaniechana po 1970 roku z powodów ekonomicznych. Jednak wykazywane bardzo duże zasoby w polskich złożach węgla kamiennego wciąż budziły nadzieje na ich szerokie wykorzystanie metodą PZW (Białecka 2008; Stańczyk 2008).

* Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, WGGiOŚ, Kraków; e-mail: sermet@agh.edu.pl

** Prof. dr hab. inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;
e-mail: niecm@wp.eu

*** Dr inż., Główny Instytut Górnictwa, Katowice; e-mail: jchecko@gig.katowice.pl

W 2010 roku, w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) dotyczącego zaawansowanych technologii pozyskiwania energii, ponownie podjęto prace badawcze związane z podziemnym zgazowaniem. Jednym z podstawowych zadań było oszacowanie wielkości realnej bazy zasobowej węgla kamiennego dla PZW z uwzględnieniem uwarunkowań geologicznych i środowiskowych prowadzenia procesu.

Opierając się na przeprowadzonych analizach i badaniach w warunkach laboratoryjnych i eksperymentalnych na niewielką skalę *in situ* (EC 2012; Stańczyk 2008; Turek 2015; Dubiński i Turek 2015) ustalono, że w warunkach polskich złóż węgla kamiennego podziemne zgazowanie węgla jest możliwe. Należy się jednak spodziewać utrudnień spowodowanych przede wszystkim cechami naturalnymi występowania złóż. Istotnym ograniczeniem przy formułowaniu wniosków odnośnie efektywności i bezpieczeństwa stosowania metody jest ciągle niewystarczająca wiedza na temat przebiegu procesu w zróżnicowanych warunkach złożowych, a szczególnie w sytuacji złóż wielopokładowych.

1. Ocena bazy zasobowej polskich złóż węgla kamiennego z punktu widzenia zastosowania PZW

1.1. Założenia metodyczne oceny

Dotychczas najczęściej rozpatrywana jest możliwość przeprowadzenia procesu zgazowania węgla w generatorach podziemnych z wykorzystaniem metod:

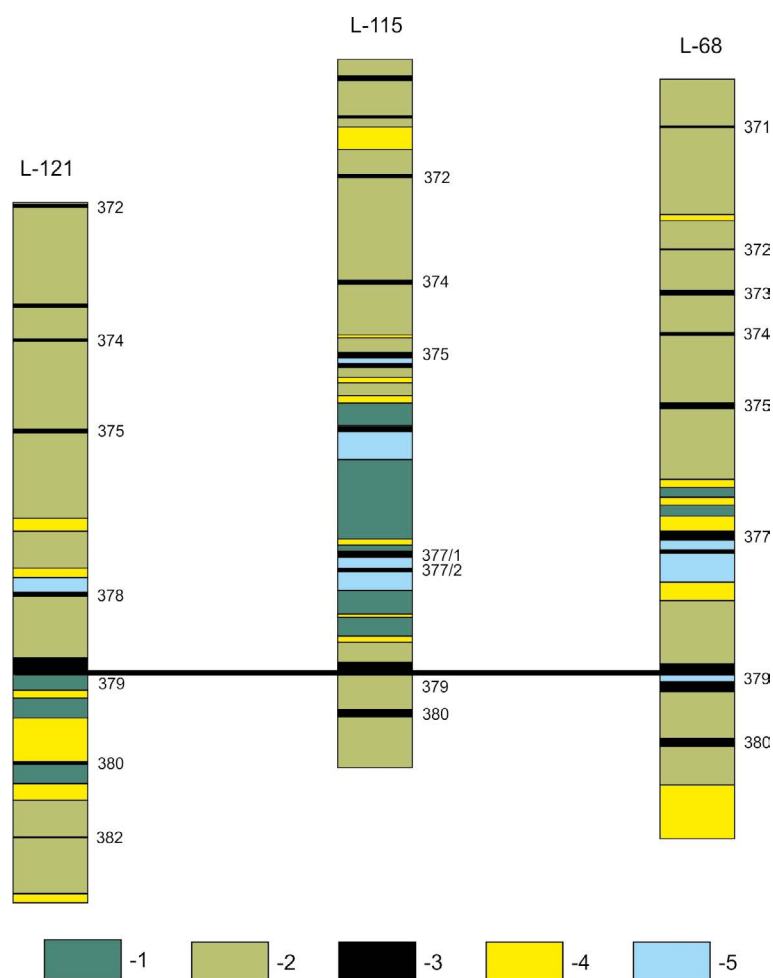
- ◆ szybowych – w złożu udostępnionym wyrobiskami górniczymi,
- ◆ bezszybowych – za pomocą otworów wierconych z powierzchni,
- ◆ hybrydowych – przy wykorzystaniu otworów wierconych z wyrobisk górniczych, poniżej najniższego poziomu eksploatacji konwencjonalnej.

W krajowych złożach węgla kamiennego istotnymi cechami złoża, w głównej mierze związanymi z warunkami geologicznymi ich powstawania, jakie muszą być brane od uwagę przy ocenie możliwości stosowania PZW są:

- ◆ wielopokładowość,
- ◆ nierównomierne rozmieszczenie pokładów w profilu pionowym serii węglonośnej i zróżnicowanie odległości między nimi,
- ◆ rodzaj utworów pomiędzy pokładami, ich zmienność litologiczna w profilu i w przestrzeni,
- ◆ miąższość pokładów i jej zróżnicowanie, budowa (obecność przerostów płonnych), rozprzestrzenienie, ciągłość, wymycia,
- ◆ rozszczepienia i łączenie się pokładów,
- ◆ zaburzenia tektoniczne ciągłe i nieciągłe,
- ◆ wielkość zasobów w wydzielonych, geologicznie jednorodnych częściach złoża,

- ◆ rodzaj, budowa i grubość nadkładu serii węglonośnej,
- ◆ warunki hydrogeologiczne złoża i jego otoczenia (ograniczona izolacja pokładów i całej serii węglonośnej).

Najbardziej charakterystyczną cechą złóż węgla kamiennego w Polsce jest ich wielopokładowość. Pokłady znajdują się w różnych odległościach od siebie, mają zróżnicowaną miąższość, zmienne poziome rozprzestrzenienie, zróżnicowane cechy budowy wewnętrznej, jakości węgla, rodzaju utworów występujących w obrębie pokładu, jego stropie lub spągu (rys. 1). W związku z tym, z punktu widzenia oceny warunków eksploatacji, zwłaszcza metodą PZW, każdy pokład powinien być rozpatrywany indywidualnie.



Rys. 1. Przykład korelacji pokładu 379 na tle zróżnicowania profilu litologicznego serii węglonośnej
 1 – mułowce, 2 – mułowce i ilowce, 3 – węgiel, 4 – piaskowce, 5 – mułowce i piaskowce

Fig. 1. Variability of the lithological profile of deposits series on the example seam 379
 1 – mudstone series, 2 – mudstone and claystone series, 3 – coal seam, 4 – sandstones,
 5 – mudstone and sandstone series

Spośród wymienionych powyżej czynników geologicznych, kluczowe znaczenie dla przebiegu, efektywności, a także bezpieczeństwa procesu i środowiska naturalnego mają miąższość i rozmieszczenie pokładów w serii węglonośnej, rodzaj i zmienność otaczających skał płonnych oraz zjawiska tektoniczne rejestrowane w obrębie serii węglonośnej.

W przypadku PZW warunki geologiczne mogą stanowić ograniczenia, a nawet barierę dla stosowania i przebiegu procesu gazyfikacji. W sytuacji prowadzenia PZW w złożu udostępnionym wyrobiskami górniczymi dodatkowe ograniczenia mogą stwarzać wymagania warunków bezpieczeństwa, wynikające z podobieństwa procesu zgazowania węgla do zjawisk, jakie zachodzą przy pożarach podziemnych.

1.2. Kryteria kwalifikacji złóż do PZW

Próby stosowania PZW podejmowano w wielu krajach (Green 2008; Bhutto i in. 2013; Dubiński i Koteras 2014), ale tylko w kilku przypadkach uzyskano produkcję na skalę przemysłową (Fiodorov i in. 1984; Dubiński i Turek 2015). Na podstawie dotychczasowych doświadczeń, teoretycznych modeli przebiegu eksploatacji metodą PZW i zakładanych warunków technicznych prowadzenia procesu, doświadczeń eksploatacji metodą otworową innych kopalin, magazynowania podziemnego substancji gazowych oraz zakładanej konieczności zapewnienia bezpieczeństwa i ochrony środowiska można określić warunki w jakich:

- ◆ istnieją realne, nie budzące wątpliwości, szanse podziemnego zgazowania węgla,
- ◆ nie jest ono możliwe z uwagi na wymagania ochrony środowiska i bezpieczeństwa publicznego,
- ◆ możliwości stosowania PZW budzą zastrzeżenia, gdyż wymienione warunki nie są dostatecznie wyjaśnione (Nieć 2012).

W konkluzji przyjęto wymagania jakie muszą być spełnione by złoża i poszczególne pokłady węgla mogły kwalifikować się do eksploatacji metodą PZW bez zastrzeżeń (tab. 1). Wymagane, najważniejsze z nich to:

- ◆ minimalna miąższość pokładu 1,5 m,
- ◆ typ węgla 31-32,
- ◆ odległość od uskoków, filarów ochronnych ponad 50 m,
- ◆ minimalne zasoby operatywne parceli nienaruszonej uskokami 3–5 mln ton.

W przypadku PZW możliwości bezpośredniego sterowania przebiegiem procesów w złożu są ograniczone, co często powoduje nieregularny rozwój i w konsekwencji nieformalny kształt przestrzeni „poeksploatacyjnej”. Istotne znaczenie mają najczęściej w tym przypadku zaburzenia tektoniczne i spękania skał tworzących złoża. Zaburzenia te naruszają ciągłość złoża, mogą albo utrudniać prowadzenie eksploatacji, albo powodować ukierunkowany przebieg procesów wydobywczych i wspomniany już wcześniej nieregularny kształt pustki powstałej po zgazowaniu (Orłow i Katajew 1988).

Tabela 1. Warunki niezbędne dla efektywnego zgazowania podziemnego węgla przy uwzględnieniu aktualnie dostępnych informacji odnośnie PZW (Nieć 2012, zmodyfikowane; Nieć i in. 2017)

Table 1. Conditions of UGC application according to the recent state of the art (Nieć 2012, modified; Nieć et al. 2017)

Cechy złóż i pokładów węgla		Wymagane	Niewyjaśniona przydatność	Nieprzydatne
Właściwości węgla	stopień uwęglenia	31–32	typ 33 i wyższe	
	zawartość popiołu w pokładzie (w węglu wraz z przerostami)	do 30%		
	wilgotność	maksimum 15–20%	ponad 20%	
	zawartość siarki	do 2%	ponad 2%	
	zawartość innych pierwiastków szkodliwych	brak	dopuszczalna zawartość Cl, metali ciężkich, np. Hg	
Cechy pokładu	miąższość	ponad 1,5 m	przydatność pokładów o miąższości 1,0–1,5 m	pokłady cienkie o miąższości do 1,0 m
	przerosty płonne	brak	dopuszczalny maksymalny udział przerostów i ich grubość	
	rodzaj skał stropowych i spągowych	nieprzepuszczalne mułowce, iłowce o miąższości ponad 20 m; odległość do sąsiednich pokładów ponad 40 m	piaskowce małoporowate, wpływ przeobrażeń termicznych skał ilastych oraz węglanowych na przebieg i efektywność procesu (straty ciepłne)	porowate piaskowce, piaskowce zawodnione
	grubość nadkładu	ponad 100 m		poniżej 100 m
	grubość nadkładu nieprzepuszczalnego dla gazów	ponad 100 m	poniżej 100 m	
	odległość stropu pokładu od warstw wodonośnych (głównych) w nadkładzie z zasobami dynamicznymi	ponad $40 + 6 M^*$ [m]	od 10 m do $40 + 6 M^*$ [m]	poniżej 10 m
	zuskokowanie	brak uskoków	minimalna odległość od uskoków „pokładowych” 50 m	obecność uskoków „pokładowych”
	metanonośność	$< 2 \text{ m}^3/t_{\text{CSW}}$	$> 2 \text{ m}^3/t_{\text{CSW}}$	
Cechy złoża wielopokładowego i serii węglonośnej	brak poziomów wodonośnych w serii węglonośnej	odległość pokładów od poziomów wodonośnych, odległość od pokładów sąsiednich		

* M – miąższość pokładu.

Nieciągłe zaburzenia tektoniczne naruszają szczelność nadkładu, co dodatkowo wpływa na przebieg poeksploatacyjnych obniżzeń powierzchni. W związku z tym, do PZW kwalifikują się partie pokładów nienaruszone uskokami i dostatecznie duże by zgazowanie węgla było opłacalne. Przyjmuje się, że zasoby operatywne takiego fragmentu pokładu powinny wynosić 3–5 mln ton (Magda 2011). Ze względu na konieczność pozostawiania wzdłuż uskoków filarów granicznych o szerokości co najmniej 50 m (Szlązak i in. 2013), zasoby bilansowe wyselekcjonowanej do PZW części pokładu powinny wynosić około 10 mln ton.

Na podstawie wartości opałowej uzyskiwanego gazu ocenia się, że wysoko wydajny przebieg procesu ma miejsce, gdy prowadzona jest gazyfikacja pokładów o miąższości co najmniej 1,5 m (Fyodorov i in. 1984). W przypadku cienkich pokładów następują znaczne straty ciepła zarówno w stropie, jak i w spągu pokładu, a opłacalność eksploatacji staje się wątpliwa (Magda 2011; Magda i in. 2012). Wpływ na przebieg procesu eksploatacji złoża i jego efekty ma także jakość kopaliny i jej zmienność, jak również budowa wewnętrzna pokładów – w szczególności ich ciągłość oraz obecność i rozmieszczenie przerostów płonnych.

Opierając się na dotychczasowych doświadczeniach w zakresie PZW można przyjąć, że węgle kwalifikujące się do zgazowania powinny mieć niski stopień uwęglenia (typu 31-32). Gazyfikacja węgli wyższych typów – charakteryzujących się w niewielką porowatością i przepuszczalnością spowodowaną ciśnieniem litostatycznym (Bukowska i in. 2012) – może prowadzić do uszczelniania gazogeneratora przez produkty pirolizy poprzedzającej samo zgazowanie. Proces ten może utrudniać prowadzenie PZW. Próby zgazowania węgla na dużej głębokości kończyły się niepowodzeniem (Shafrovich i Varma 2009).

Węgiel powinien też posiadać niską zawartość chloru i siarki. Dla zgazowania naziemnego są to odpowiednio wartości do 0,1% i do 2% (Sobolewski 2010). Przyjęcie tych wartości ogranicza możliwość wykorzystania węgla występujących na dużej głębokości, w środowisku zasolonych wód wglębnych.

Można domniemywać, że zmienność jakości węgla jest jednym z czynników zróżnicowania składu produktów gazyfikacji, jednak dotychczas brak na ten temat wystarczających danych.

Nieuniknionym efektem prowadzenia eksploatacji zarówno sposobem PZW, jak i metodą konwencjonalną, jest poeksploatacyjne naruszenie skał nadkładu i osiadanie powierzchni terenu nad wyeksploatowaną częścią złoża. Wielkość osiadania w znacznym stopniu zależy będzie od miąższości pokładu i późniejszego stopnia wypełnienia przestrzeni wyeksploatowanej. Deformacje górotworu ponad gazogeneratorem można ograniczyć przez podsadzenie pustki powstałej po zgazowaniu węgla (Palarski i Strózik 2013), ale nie można całkowicie wyeliminować poeksploatacyjnych spękań górotworu.

Podziemne zgazowanie nie jest procesem obojętnym dla środowiska naturalnego. W trakcie gazyfikacji powstają lotne i ciekłe produkty toksyczne. Wytwarzany gaz zawiera szkodliwy tlenek węgla, a także może zawierać H₂S, NH₃, HCN, Hg (Liu i in. 2006; Creedy i in. 2001; Stuermer i in. 1982; Verma i in. 2014; Imran i in. 2014). Poeksploata-

cyjne spękania górotworu mogą ułatwiać daleką migrację substancji szkodliwych poza obręb gazogeneratora.

Ponadto substancje ciekłe powstające w wyniku pirolizy węgla, np. fenole czy benzeny, stwarzają zagrożenie zanieczyszczenia wód podziemnych (Wong i Mead 1983).

Wysokość strefy poeksploatacyjnych spękań połączonych (spękań ciągłych), w której zachodzić może swobodny przepływ płynów szacuje się na 19–41 m (Palarski in. 2013). W związku z tym wskazane jest, by gazogenerator był izolowany od wyżej leżących pokładów lub warstw zawodnionych przez utwory nieprzepuszczalne o grubości około 40 m, a od powierzchni i głównych poziomów wodonośnych o co najmniej 100 m (Nieć i in. 2014).

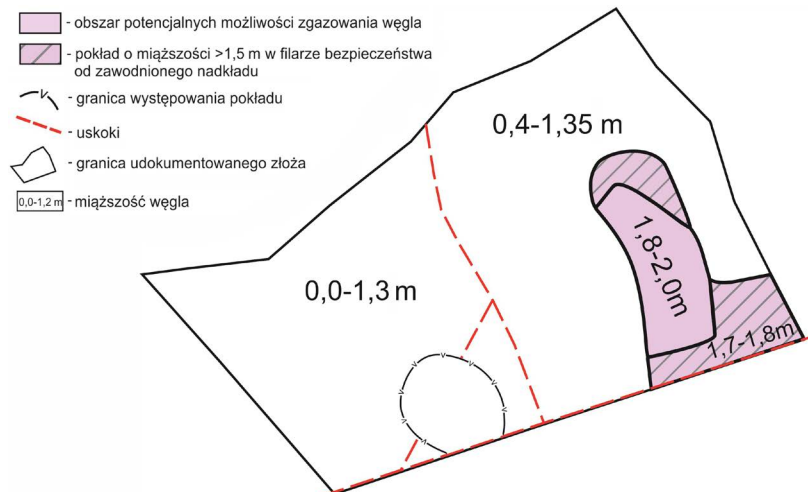
Podstawową cechą złoża, decydującą o możliwości stosowania metody otworowej PZW, jest zatem izolacja pokładu od powierzchni i utworów wodonośnych. Istotne znaczenie ma więc grubość nadkładu dla separacji przestrzeni roboczej w złożu od powierzchni i wód podziemnych, zwłaszcza tych wykorzystywanych jako pitne. Nie ma dotychczas dostatecznych danych odnośnie warunków jakie powinny być spełnione, by szczelność gazogeneratora była zapewniona, zwłaszcza że migracja produktów zgazowania w otoczenie jest powolna, przez co jej skutki mogą się ujawniać długo po zakończeniu procesu zgazowania (Chećko 2007).

2. Metodyka oceny bazy zasobowej do PZW

Ocena przydatności zasobów węgla do podziemnego zgazowania przeprowadzona została w trzech etapach, które obejmowały:

- ◆ Etap I: typowanie pokładów i ich części ocenianych wstępnie jako przydatnych do PZW, spełniających podstawowe warunki (rys. 2):
 - ◆ typ węgla 31-33,
 - ◆ miąższość pokładu większa lub równa 1,5 m,
 - ◆ odległość od uskoków ponad 50 m,
 - ◆ powierzchnia parceli (bloku złoża) spełniającego powyższe warunki co najmniej 1,5 km²,
 - ◆ położenie poza filarami ochronnymi (100 m pod zawodnionym nadkładem).
- ◆ Etap II: selekcja parcel wytypowanych w I etapie, spełniających dodatkowe wymagania zasobów przemysłowych, kwalifikowanych do stosowania PZW, czyli wybranie takich, które:
 - ◆ mają zasoby ponad 10 mln ton,
 - ◆ spełniają wymagania stosowania PZW z punktu widzenia budowy pokładów, wzajemnego ich położenia i izolacji (oddzielone od sąsiednich warstw zawodnionych lub pokładów utworami nieprzepuszczalnymi o miąższości 20–40 m).

Selekcja ta oparta była na analizie budowy geologicznej pokładów i serii węglonośnej w ich stropie i spągu na podstawie profili otworów wiertniczych znajdujących się w obrębie i otoczeniu typowanych fragmentów złoża.



Rys. 2. Przykład wytypowanej parceli przydatnej do PZW, w pokładzie 375, złożu K-4-5

Fig. 2. Potentially useful areas for UCG, for the example of the K-4-5 deposit, seam 375

- ◆ Etap III: ocena perspektyw stosowania PZW w złożach wielopokładowych z zachowaniem wymagań racjonalnego wykorzystania zasobów i ochrony środowiska, typowanie obszarów możliwego zastosowania podziemnego zgazowania węgla kamiennego w sposób niekolidujący z szansami wykorzystania pozostałych zasobów w sposób tradycyjny.

3. Wyniki oceny bazy zasobowej do PZW w złożach węgla kamiennych do głębokości 1000 m

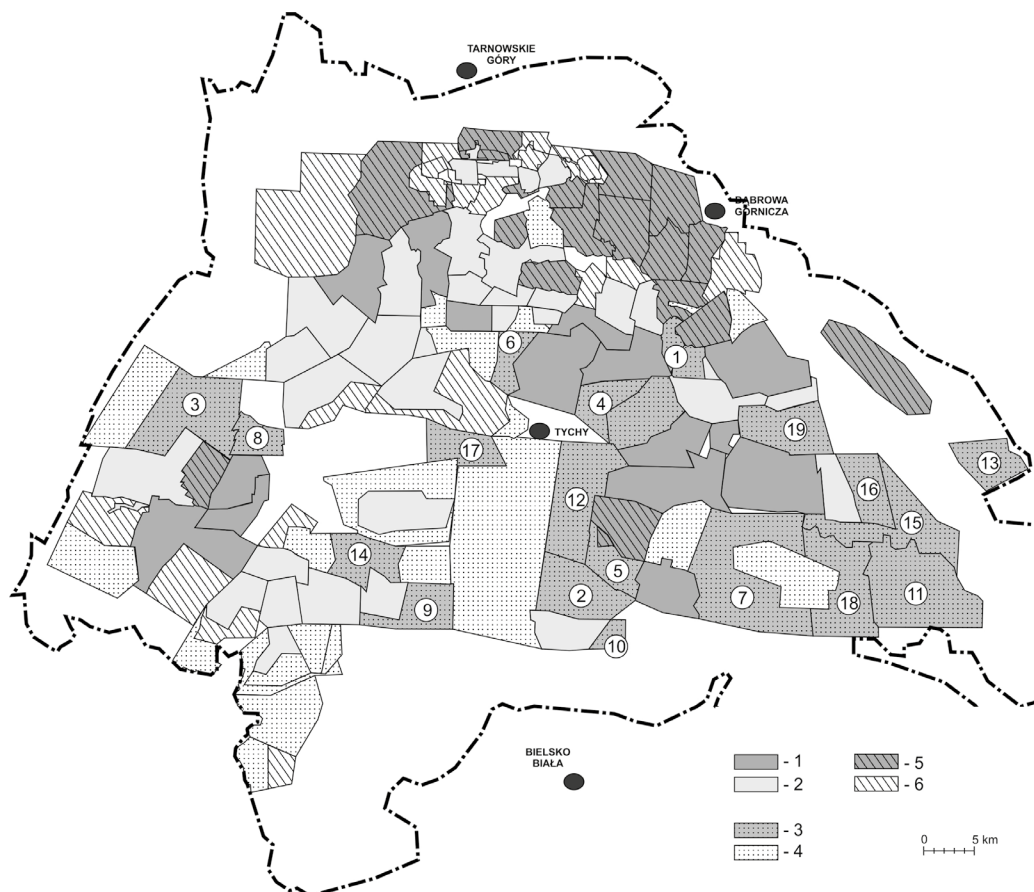
Zagłębie Górnosląskie

Ocena możliwości stosowania PZW jest uwarunkowana stanem rozpoznania i zagospodarowania złóż (rys. 3). Z tego punktu widzenia wyróżnione zostały cztery ich rodzaje:

- ◆ zagospodarowane, eksploatowane przez istniejące zakłady górnicze,
- ◆ w obszarach kopalń zlikwidowanych,
- ◆ niezagospodarowane, dostatecznie zbadane dla oceny możliwości stosowania PZW,
- ◆ niezagospodarowane, zbadane w stopniu niewystarczającym dla oceny możliwości stosowania PZW.

W Zagłębiu Górnosląskim możliwości podziemnego zgazowania węgla są ograniczone przede wszystkim przez specyficzne warunki geologiczne, a w szczególności:

- ◆ występowanie pokładów węgla w otoczeniu bardzo silnie zawodnionych i mocno przepuszczalnych piaskowców w krakowskiej serii piaskowcowej,



Rys. 3. Złóża węgla kamiennego w GZW analizowane z punktu widzenia przydatności do PZW Nieć i in. 2017)
 1, 2 – złoża zagospodarowane: 1 – analizowane, 2 – nieuwzględniane dla możliwości stosowania PZW;
 3, 4 – złoża niezagospodarowane: 3 – analizowane, 4 – nieuwzględniane dla możliwości stosowania PZW;
 5, 6 – złoża zlikwidowane: 5 – analizowane, 6 – nie uwzględniane dla możliwości stosowania PZW

Fig. 3. Development of USCAB coal deposits

1, 2 – mined coal deposits: 1 – analyzed for UCG application possibilities, 2 – excluded for UCG (Nieć et al. 2017) (predominantly coking coal); 3, 4 – areas of explored coal resources: 3 – analyzed for UCG application possibilities, 4 – insufficiently explored for UCG evaluation possibilities; 5, 6 – abandoned mining fields: 5 – analyzed for UCG application possibilities, 6 – not included for UCG application possibilities

- ◆ gęstą sieć uskoków,
- ◆ liczne cienkie pokłady o miąższości poniżej 1,5 m,
- ◆ znaczny udział zasobów węgla koksowych (typu 34-35 i wyższych).

W złożach zagospodarowanych górnośląskiego zagłębia węglowego, teoretycznie możliwe jest stosowanie PZW metodą szybową, w szczególnych warunkach geologicznych, technicznych i organizacyjnych zakładu górniczego, przy spełnieniu określonych rygorów systemu wentylacji (z uwagi na daleką propagację wytwarzanych gazów toksycznych,

zwłaszcza CO). W złożu udostępnionym wyrobiskami górniczymi podziemne zgazowanie węgla może znacznie utrudnić wykorzystanie zasobów nieprzydatnych do PZW, z powodu konieczności pozostawiania filarów ochronnych w otoczeniu partii złoża eksploatowanych metodą ogniową (Szlązak i in. 2013). Praktycznie, zastosowanie podziemnego zgazowania węgla do eksploatacji pokładów może być zatem rozpatrywane dopiero w ramach projektu zagospodarowania złoża oraz planów ruchu zakładu górniczego i może dotyczyć parcel, w których nie stworzy ono zagrożenia dla eksploatacji konwencjonalnej pozostałych zasobów. Obszary takie wytypowano wstępnie w 11 czynnych kopalniach (rys. 3). Do głębokości 1000 m, bez pokładów w krakowskiej serii piaskowcowej wynoszą one 637 mln ton, co stanowi 7% całkowitych ich zasobów (Chećko i in. 2014). W pozostałych czynnych kopalniach GZW dominują węgle typów 33-34 i wyższe, co powoduje, że możliwość stosowania w nich procesu podziemnego zgazowania jest wątpliwa.

W przypadku kopalń zlikwidowanych, w 38 złożach znajduje się około 3,6 mld ton węgla. Są tzw. „zasoby resztkowe”, znajdujące się w niewybranych partiach pokładów. Najczęściej stanowią one małe fragmenty, często pocięte uskokami lub silnie zaangażowane tektoniczne czy izolowane przez stare zroby. Wstępnie wskazano parcele potencjalnie przydatne do zgazowania o łącznych zasobach tylko 85 mln ton (około 3% pozostawionych zasobów resztkowych), jednakże ze względu na występowanie w górotworze naruszonym przez wcześniejszą eksploatację (Palarski i in. 2013) i możliwość dalekiej migracji toksycznych gazów procesowych nie zakwalifikowano ich do PZW.

Znaczną ilość zasobów węgla typów 31-33 udokumentowano w obrębie GZW w 44 złożach niezagospodarowanych, jednak tylko 19 spośród nich zostało dostatecznie rozpoznanych dla przeprowadzenia oceny ich przydatności do PZW (rys. 3, tab. 2).

Z analizy wykluczone zostały pokłady w krakowskiej serii piaskowcowej – ze względu na brak ich izolacji od silnie zawodnionych piaskowców – oraz pokłady węgla koksowych (typu 34 i wyższych). Na podstawie wstępnej kwalifikacji przydatności do PZW w 17 złożach (tab. 2) wytypowano obszary spełniające stawiane kryteria. Po uwzględnieniu dodatkowych wymagań i dokonaniu powtórnej analizy wyselekcjonowano te obszary, w których zasoby wynoszą ponad 10 mln ton (zasoby operatywne 5 mln ton) oraz spełniają dodatkowe wymagania PZW w złożu wielopokładowym. W szczególności dotyczy to lokalizacji pokładu w stosunku do warstw wodonośnych i pokładów sąsiednich (odległość od zbiorników wód podziemnych lub zawodnionego nadkładu ponad 100 m) oraz warunków jego izolacji (odległość od pokładów sąsiednich i warstw wodonośnych niedostatecznie izolowanych przez utwory ilasto-mułowcowe nie powinna być mniejsza niż 20–40 m).

Opierając się na powyższych kryteriach wskazano sześć złóż, w obrębie których można zlokalizować parcele spełniające podane warunki (tab. 2).

W złożach tych wytypowano od 1 do 3 pokładów, w których parcele osiągają zasoby, co najmniej 10 mln ton. Wyselekcjonowane części pokładów są rozproszone w granicach złoża, występują na różnych głębokościach w interwale od kilkuset do 1000 m, charakteryzują się dość dużym zróżnicowaniem litologicznym utworów występujących ponad ich stropem i w każdym przypadku wymagają bardziej szczegółowego rozpoznania.

Tabela 2. Udział zasobów kwalifikowanych do PZW w zasobach niezagospodarowanych złóż węgla kamiennego w GZW

Table 2. Upper Silesia Coal Basin. Coal resources in undeveloped deposits suitable for UCG

Złoże*		Zasoby [tys. ton]		
		udokumentowane	wstępnie typowane do PZW o miąższości >1,5 m	kwalifikowane do PZW
1.	Brzezinka	556 102	217 820	115 431
2.	Ćwiklice	499 332	8 739	
3.	Jejkowice	272 442	16 985	
4.	Lędziny	140 586	31 988	
5.	Międzyrzecze	403 864	124 656	18 510
6.	Mikołów	294 070	18 834	
7.	Oświęcim-Polanka	1 863 474	233 097	162 964
8.	Paruszowiec	666 332	276 634	176 785
9.	Pawłowice	168 820	42 222	
10.	Silesia-Dankowice-Jawiszowice	115 684	15 974	
11.	Spytkowice	1 270 511	82 680	
12.	Studzienice	1 055 993	81 729	27 333
13.	Tenczynek	181 922	9 200	
14.	Warszowice-Pawłowice	220 632	11 558	11 559
15.	Wisła Północ	1 317 847	26 264	
16.	Wisła I – II	1 141 740	66 830	
17.	Za Rowem Bełckim	268 444	29 178	
18.	Zator	729 811	–	
19.	Libiąż Dąb	11 371	–	
	Razem	11 178 977	1 294 388	512 582

* Lokalizacja złóż na rysunku 3.

Lubelskie Zagłębie Węglowe

W Zagłębiu Lubelskim nie przewiduje się stosowania podziemnego zgazowania w zagospodarowanym złożu kopalni Bogdanka.

W niezagospodarowanych złożach Lubelskiego Zagłębia Węglowego dominują pokłady o małej miąższości. Charakteryzują się one złożoną budową, wyrażającą się występowaniem

niem nawet do kilku przerostów o grubości od kilku do 30 cm oraz rozszczepień, rozmyć czy zaników pokładów (Sermet i Górecki 2014).

Zasoby węgla energetycznych w częściach pokładu o miąższości powyżej 1,5 m, w rejonach o niskim stopniu zaangażowania tektonicznego, położone w bezpiecznej odległości od spągu zawadzonego nadkładu, wynoszącej 100 m, potencjalnie przydatne do podziemnego zgazowania są niewielkie, rozproszone w profilu warstw lubelskich oraz w granicach poszczególnych pokładów. Stanowią one 846 mln ton, to jest około 10% całości udokumentowanych zasobów bilansowych (tab. 3).

Tabela 3. Udział zasobów kwalifikowanych do PZW w zasobach niezagospodarowanych złóż węgla kamiennego w LZW

Table 3. Lublin Coal Basin. Coal resources in undeveloped deposits suitable for UCG

Złoże	Zasoby							Uwagi
	całkowite bilansowe* [mln ton]	wstępnie typowane do PZW		kwalifikowane do PZW		kwalifikowane do PZW bez ograniczeń środowiskowych		
		mln ton	%	mln ton	%	mln ton	%	
Lublin K 4-5	453,0	31,0	6,8	11,0	2,4	11,0	2,4	1 pokład
Lublin K 6-7	656,0	115,0	17,5	–	–	–	–	
Lublin K 8	250,3	16,0	12,4	–	–	–	–	
Lublin K 9	237,6	22,5	9,5	13,0	5,5	13,0	5,5	1 pokład
Kolechowice	2 257,4	147,5	6,5	97,0	4,3	97,0**	4,3	5 pokładów
Orzechów	1 827,9	83,5	4,6	78,0	4,3	–	–	2 pokłady
Ostrów	853,5	332,0	38,9	311,0	36,4	70,0	8,2	6 pokładów
Sawin	1 083,7	98,5	9,1	69,0	6,4	69,0	6,4	2 pokłady
Razem	7 619,4	846,0	11,0	579,0	6,6	260	3,4	

* Według Bilansu zasobów złóż kopalni w Polsce według stanu na 31.XII.2014r.

** Częściowo ograniczone przez wymagania ochrony środowiska

W II i III etapie badań – po uwzględnieniu dodatkowych kryteriów przydatności do PZW, wynikających z wymagań racjonalnej gospodarki złożem (tj. rozmieszczenia i lokalizacji w profilu pionowym, wzajemnego położenia pokładów oraz ich relacji względem warstw wodonośnych w serii węglonośnej) – ostatecznie, jako kwalifikujące się do PZW, wytypowano fragmenty pokładów w granicach sześciu złóż (tab. 3). Łączne ich zasoby oszacowano na 579 mln ton. Wyselekcjonowane parcele zlokalizowane są w 19 rozproszo-

nych obszarach. W niektórych spośród wskazanych rejonów istnieją znaczące ograniczenia środowiskowe z punktu widzenia możliwości stosowania PZW otworami wierconymi z powierzchni. Niekorzystne uwarunkowania środowiskowe, uniemożliwiające lub istotnie utrudniające gazyfikację, występują na obszarze złóż Orzechów i Ostrów (Sermet 2013). W przypadku złoża Orzechów, nakładające się na siebie różne wielkoobszarowe formy ochrony przyrody (Poleski Park Narodowy, Park Krajobrazowy Pojezierze Łęczyńskie, Poleski Park Krajobrazowy, obszary NATURA 2000, Poleski Obszar Chronionego Krajobrazu) powodują, że powinno ono być wyłączone z rozważań o możliwości stosowania PZW.

Wobec powyższych uwarunkowań zasoby, które należałoby brać pod uwagę jako najbardziej przydatne do PZW wynoszą łącznie tylko około 260 mln ton (tab. 3). Równocześnie należy podkreślić fakt, że omawiane niezagospodarowane złoża LZW udokumentowano w przeważającej części w kategorii C₂, co oznacza, że błąd oszacowania tych zasobów może osiągać nawet do 40%. Skutkuje to koniecznością lepszego ich rozpoznania (Nieć i in. 2015).

Dolnośląskie Zagłębie Węglowe

W DZW rozpoznane zasoby węgla kamiennego znajdują się w obszarze 7 złóż, w których eksploatacja została zaniechana. W ich granicach pozostało łącznie 423 mln ton węgla (stan rozpoznania na 31.12. 2014 r., Bilans zasobów 2015).

Wszystkie złoża cechuje skomplikowana budowa geologiczna. Odznaczają się występowaniem węgla koksowych i specjalnych typów 34-38 oraz antracytu (typ 41 i 42). Pokłady węgla mają zmienną, przeważnie niewielką miąższość, są silnie zaburzone tektonicznie, ponadto występują w nich zagrożenia wyrzutami węgla i skał. Powyższe uwarunkowania geologiczno-złożowe oraz naruszenie górotworu przez wcześniejszą, trwającą już od XIV w. eksploatację, a także nieznaczne zasoby węgla energetycznych typu 32 występujące w niewielkich, odosobnionych parcelach nie stwarzają możliwości stosowania PZW. W przypadku Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego, wobec dotychczasowego stanu wiedzy o procesie podziemnego zgazowania węgla, podstawowe kryteria przydatności do PZW nie są spełnione, przez co nie można rozpatrywać złóż tego zagłębia jako potencjalnie przydatnych do zgazowania *in situ* (Sermet i Górecki 2013).

4. Możliwości PZW na głębokości poniżej 1000 m i stosowania metody hybrydowej

W granicach GZW udokumentowano znaczne zasoby węgla, w pokładach o miąższościach przekraczających 1,5 m (głównie w pokładach 405 i 510). Występują one na głębokości ponad 1000 m, w warstwach załęskich, rudzkich i siodłowych. Stwarza to szanse stosowania hybrydowej metody PZW (Czaja i in. 2013, 2014; Nieć 2016).

Ocena rzeczywistych możliwości eksploatacji głęboko położonych pokładów węgla metodą podziemnego zgazowania, otworami wierconymi z wyrobisk górniczych wymaga jednak:

- ◆ wyjaśnienia możliwości zgazowania *in situ* węgla koksowych (typu 34, 35), które przeważają na takiej głębokości,
- ◆ odmetanowania pokładów (udokumentowana wielkość przekracza $15 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{CSW}}$),
- ◆ wykonania z wyrobisk górniczych otworów wiertniczych o dużej głębokości (około 600 m),
- ◆ lepszego rozpoznania złóż na głębokości przekraczającej 1000 m, szczególnie w partiach o większym zaangażowaniu tektonicznym,
- ◆ określenia zasięgu migracji toksycznych produktów gazowych (szczególnie w obszarach o prawdopodobnym, poeksploatacyjnym udrożnieniu skał),
- ◆ utrzymania wyżej położonych wyrobisk udostępniających i odwadniania górotworu (Nieć 2016).

5. Ocena możliwości stosowania PZW w warunkach polskich złóż węgla kamiennego. Podsumowanie

Wykształcenie i warunki geologiczne polskich złóż węgla kamiennego (tab. 4) stwarzają istotne ograniczenia i utrudnienia dla prowadzenia podziemnej gazyfikacji (tab. 5). Najistotniejszymi czynnikami ograniczającymi możliwości stosowania tego procesu są:

- ◆ obecność warstw wodonośnych piaskowców w serii węglonośnej,
- ◆ zaburzenia tektoniczne naruszające ciągłość pokładu,
- ◆ występowanie wielu pokładów w serii węglonośnej, których eksploatacja będzie oddziaływać na siebie,
- ◆ duży udział pokładów o miąższości poniżej 1,5 m.

W granicach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego zasadnicze ograniczenia dla stosowania PZW (przy obecnym stanie wiedzy na temat tej metody) stwierdzono w przypadku pokładów węgla w krakowskiej serii piaskowcowej (z warstw libiąskich grupy 100 i łazickich grupy 200) z powodu ich występowania wśród mało zwięzłych, wodonośnych piaskowców, stanowiących zasobny zbiornik wód podziemnych. Ponadto na znacznym obszarze GZW stosowanie podziemnego zgazowania pokładów węgla może utrudnić lub wręcz uniemożliwić silne zaangażowanie tektoniczne – zuskokowanie złóż.

W Lubelskim Zagłębiu Węglowym przeważają pokłady o stosunkowo niewielkich miąższościach, co powoduje, że w granicach poszczególnych złóż i pokładów występują tylko pojedyncze, odosobnione parcele o miąższościach przekraczających 1,5 m, które mogą być brane pod uwagę jako obiekty gazyfikacji. Wytypowane części pokładów przydatnych do PZW, „rozrzucone” są w pionie i poziomie, nie tworząc zwartych kompleksów (rys. 4). Dodatkowymi barierami są wielkoobszarowe formy ochrony przyrody.

W Dolnośląskim Zagłębiu Węglowym przeszkodę dla stosowania podziemnego zgazowania stanowią intensywne zaburzenia tektoniczne, dominujący udział węgla koksowych (od typu 34 aż do antracytu) oraz duży udział CO_2 w gazach złożowych, powodujący

Tabela 4. Podstawowe cechy geologiczno-strukturalne polskich złóż węgla kamiennego

Table 4. Basic geological and structural features of Polish hard coal deposits

Zagłębie	Jednostka litostratygiczna	Podstawowe cechy geologiczno-strukturalne	Możliwości stosowania PZW
Dolnośląskie	warstwy wałbrzyskie i zaclerskie	cienkie pokłady, liczne zaburzenia tektoniczne, ciągłe i nieciągłe (uskoki), intruzje skał magmowych, wysoka zawartość CO ₂ , bardzo duże zagrożenia gazodynamiczne, praktycznie brak izolacji od powierzchni, prawie wyłącznie węgle koksowe i antracyt	praktycznie niemożliwe ze względu na bardzo silne naruszenie górotworu przez liczne uskoki
Lubelskie	warstwy lubelskie	cienkie pokłady węgla, dominujące mułowce w serii złożowej, rzadka sieć dużych uskoków, liczne synsedymencyjne nieregularne zaburzenia pokładów (przerosty, drobne uskoki), bardzo zawodniony nadkład serii złożowej, dominujące węgle typu 31-32	bardzo ograniczone do fragmentów niektórych pokładów, z dala od zawodnionego nadkładu, wątpliwa efektywność ze względu na niejednorodność budowy pokładów,
Górnośląskie	krakowska seria piaskowcowa	pokłady węgla o zróżnicowanej miąższości, kilka grubych, dominujące słabo zwięzłe, porowate piaskowce w serii złożowej, liczne uskoki, na znacznym obszarze brak izolacji od powierzchni, dominują węgle typu 31-33	praktycznie niemożliwe ze względu na dużą przepuszczalność skał płonnych w serii złożowej (brak izolacji pokładów)
	seria mułowcowa	liczne cienkie pokłady, zaburzenia synsedymencyjne ich budowy (przerosty, wyklinowania, rozszczepienia), dominujące mułowce i iłowce w serii złożowej, liczne uskoki, metanonośność w dolnej części serii, typ węgla zróżnicowany od 32-35	ograniczone do fragmentów niektórych pokładów niezaburzonych uskokami
	górnosłaska seria piaskowcowa	grube pokłady węgla częściowo blisko siebie położone, liczne uskoki, metanonośność, typ węgla zróżnicowany od 32-35	ograniczone do fragmentów niektórych pokładów niezaburzonych uskokami pod nieprzepuszczalnym nadkładem
	seria paraliczna (mułowcowo-piaskowcowa)	pokłady o niewielkiej miąższości, liczne uskoki, zróżnicowana litologia skał płonnych w serii złożowej, metanonośność, typ węgla zróżnicowany od 32-37	ograniczone do fragmentów niektórych pokładów niezaburzonych uskokami

zagrożenia wyrzutami węgla i skał. Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania geologiczne wnioskuje się, że w DZW brak jest zasobów spełniających kryteria dla stosowania PZW.

Rozproszenie w pionie i poziomie części pokładów przydatnych do PZW spowoduje, że w przypadku stosowania metody podziemnego zgazowania za pomocą otworów wierconych z powierzchni, znaczna część pozostałych w pokładach zasobów nie zostanie racjonalnie wykorzystana metodami konwencjonalnymi. Powodem tego będzie konieczność

Tabela 5. Podstawowe problemy oceny bazy zasobowej węgla do zgazowania podziemnego (wg Nieć 2012)

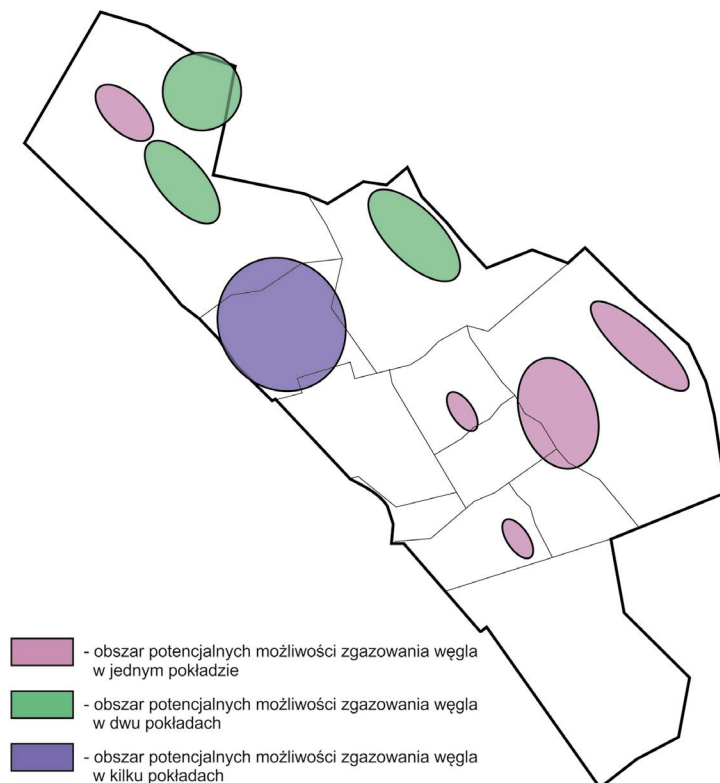
Table 5. Basic problems of assessment of the coal resources for underground coal gasification (after Nieć 2012)

Cechy pokładu	Wymagania	Stan wiedzy
Mięszkość pokładu	przynajmniej 1,5 m	niewyjaśniona możliwość eksploatacji pokładów cienkich, duże straty ciepła w przypadku eksploatacji pokładów o miąższości poniżej 1,5–2 m
Przerosty	zakładany brak przerostów	rola nieokreślona, prawdopodobne ograniczenie zgazowania poszczególnych ław węglowych
Izolacja pokładu	odpowiednia miąższość skał izolujących, nieprzepuszczalnych dla gazów, zabezpieczająca przed możliwością ich migracji	nieokreślona miąższość skał izolujących, nieprzepuszczalnych dla gazów w warunkach osiadania poeksploatacyjnego; możliwość dalekiej migracji gazów w spękanym nadkładzie
Wpływ rodzaju skał stropowych na przebieg procesu	nieokreślony	duże straty ciepła w piaskowcach zawodnionych, w ilowcach (odwodnienie, przemiany fazowe, metamorfizm termiczny do 80 m ponad stropem pokładu, wzrost porowatości), w piaskowcach o lepiszczu węglanowym (rozkład); prawdopodobnie najlepsze warunki jeśli w stropie pokładu będą występowały mułowce lub piaskowce, zbite, nieporowate, niespękane o lepiszczu krzemionkowym
Eksploatacja złoża wielopokładowego	praktycznie brak danych eksperymentalnych	naruszenie górotworu, duże zagrożenie emisją produktów gazyfikacji (w szczególności toksycznych gazów) przez górotwór spękany w wyniku eksploatacji

pozostawiania filarów ochronnych w otoczeniu partii złoża wyeksploatowanych metodą PZW. W efekcie będzie to prowadziło do niewielkiego wykorzystania całości zasobów złoża wielopokładowego.

W złożach kopalń zlikwidowanych czynnikami ograniczającymi stosowanie PZW są zaburzenia tektoniczne oraz występowanie węgla przydatnych do zgazowania pozostawionych w niewielkich, odosobnionych parcelach o zasobach zwykle do około 1,5 mln ton (Cebula i in. 2012; Turek i Lubosik 2008). Zagrożenia spowodowane migracją gazów w górotworze naruszonym przez wcześniejszą działalność górniczą w zasadzie wykluczają możliwość ich eksploatacji metodą PZW.

Czynniki ograniczające lub wykluczające możliwości stosowania podziemnego zgazowania na dużą skalę i pozyskiwanie w ten sposób wysoko efektywnej energii, zestawiono w tabeli 6.



Rys. 4. Obszary przydatne do podziemnego zgazowania węgla w LZW
 1 – w jednym pokładzie, 2 – w dwóch pokładach, 3 – w kilku pokładach

Fig. 4. Areas useful for underground coal gasification in LCB
 1 – in one seam, 2 – in two seams, 3 – in several seams

Z punktu widzenia racjonalnego wykorzystania zasobów wielopokładowych złóż węgla kamiennego, które można eksploatować w sposób tradycyjny, stosowanie metody podziemnego zgazowania nie jest wskazane głównie ze względu na ograniczone szanse wykorzystania zasobów oraz stwarzane zagrożenia na skutek migracji toksycznych produktów zgazowania w górotwór. Wbrew wcześniejszym oczekiwaniom, przy obecnym stanie wiedzy, zasoby kwalifikujące się bez zastrzeżeń do podziemnego zgazowania są niewielkie (tab. 8). Nie wyklucza to jednak możliwości lokalnego zastosowania PZW na małą skalę, w dogodnych uwarunkowaniach geologiczno-złożowych. Na podstawie szczegółowej analizy danych geologicznych oraz warunków występowania partii pokładów kwalifikujących się do gazyfikacji wytypowano cztery obszary, w których możliwe jest miejscowe zastosowanie metody podziemnego zgazowania węgla kamiennego i jej podjęcie bez zagrożenia dla racjonalnego wykorzystania pozostałej części złoża (tab. 7). Są to fragmenty pokładów:

- ◆ w GZW 330/1 w złożu Warszowice-Pawłowice Północ,
- ◆ w LZW 375, 377/1, 379 odpowiednio w złożach Lublin K-4-5, Sawin, Lublin K-9.

Tabela 6. Czynniki ograniczające lub wykluczające możliwość stosowania PZW w polskich złożach węgla kamiennego (wg Nieć i in 2014)

Table 6. Factors limiting UGC application for Polish bituminous coal deposits (after Nieć et al. 2014)

Zagłębie	Czynniki ograniczające	Czynniki wykluczające
DZW	niewielki udział węgla typu 32-33, zaburzenia tektoniczne	niewyjaśniony wpływ CO ₂ w gazach złożowych i zagrożenia wyrzutami węgla i skał
LZW	niewielkie fragmenty odosobnionych pokładów o miąższości ponad 1,5 m, liczne przerosty płonne w pokładach	pokłady położone blisko stropu serii węglonośnej pod nadkładem zawodnionych utworów jurajskich i kredowych
	częściowo pokłady typu 33 i wyższych	
GZW	pokłady o miąższości ponad 1,5 m w serii mułowcowej (warstwy załęskie i brzeskie) blisko położone w stosunku do siebie i innych o mniejszej miąższości. Blisko siebie położone pokłady w warstwach siodłowych (w górnośląskiej serii piaskowcowej) bez dostatecznej wzajemnej izolacji	pokłady w krakowskiej serii piaskowcowej (grupy 100 i 200) ze względu na wysoką przepuszczalność piaskowców i występowanie w ich obrębie użytkowych poziomów wodonośnych)
	metanonośność pokładów ponad 2 m ³ /t _{CSW} , zwykle poniżej pokładu 328 oraz pod nadkładem mioceńskim	
	częste, bardzo silne zuskokowanie	
	znaczący udział węgla koksowych (typ 34-35)	

Tabela 7. Obszary typowane do podziemnego zgazowania węgla i wykonania instalacji demonstracyjnej

Table 7. Areas selected to for underground coal gasification and application of demonstration installation

Basen węglowy	Obszar	Numer pokładu	Głębokość [m]	Miąższość węgla [m]	Zasoby [mln t]	Warunki szczelności
GZW	W-P	330/1	380–600	1,55–2,10	11,56	otaczające mułowce, około 260 m nieprzepuszczalnego nadkładu
LZW	K-9	379	770	1,5–2,5	13,0	105–120 m poniżej zawodnionego nadkładu
	Sawin	377/1	740	1,90–2,14	13,5	–
	K-4-5	375	800	1,5–2,0	11,0	ponad 100 m poniżej zawodnionego nadkładu

Tabela 8. Zasoby węgla kamiennego w Polsce możliwe dla podziemnej gazyfikacji (wg Nieć i in. 2014, 2017)
 Table 8. Bituminous coal resources in Poland suitable for underground gasification (after Nieć et al. 2014, 2017)

Basen węglowy	Lokalizacja zasobów		Całkowite zasoby bilansowe [mln ton]	Potencjalnie przydatne do PZW, pokłady > 1,5 m [mln ton]	Kwalifikowane do PZW [mln ton]	Udział w zasobach całkowitych potencjalnie przydatnych/kwalifikowanych do PZW %
GZW	kopalnie czynne możliwości stosowania PZW nieanalizowana	analizowana możliwość stosowania PZW	9,243	0,637	zależnie od PZZ	6,9/b.d.
		9,451	nie oceniane; dominujące węgle koksowe			
	kopalnie zlikwidowane		3,624	0,085	brak	2,8/0
złoża niezagospodarowane	wystarczająco rozpoznane	11,179	1,294	0,513	11,5/6,7	
	niewystarczająco rozpoznane	7,967	nie oceniane			
LZW	kopalnie czynne		0,79	nie przewidywane	0	0
	złoża niezagospodarowane		8,799	0,878	0,579	10,6/6,6
DZW	kopalnie zlikwidowane		0,423	0	0	0

Duże nadzieje wiązane są z wykorzystaniem metodą zgazowania zasobów pokładów głęboko położonych, których możliwość tradycyjnej eksploatacji jest wątpliwa. Wyjaśnienia wymaga jednak szereg wyżej przedstawionych zagadnień. Konieczne jest w tym celu podjęcie odpowiednich badań przede wszystkim nad przebiegiem procesu zgazowania w naturalnych warunkach złożowych. Dobrym poligonem dla takich badań mogą być w szczególności wyselekcjonowane w granicach GZW i LZW obszary (tab. 7) – zwłaszcza obszar Warszowice–Pawłowice w GZW. Podjęcie takich badań jest nieodzowne dla poznania przebiegu procesu zgazowania węgla i jego prowadzenia w warunkach naturalnych oraz opracowania szczegółowych zasad zgazowania w pokładach na dużej głębokości.

Praca wykonana w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych NCB.R „Opracowania technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” Zadania Badawczego nr 1.3 sfinansowanego na podstawie Umowy nr SP/E/3/7708/10 i częściowo w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.140.320.

Autorzy dziękują uczestnikom realizacji programu i recenzentom za dyskusje i cenne uwagi.

LITERATURA

- Bhutto i in. 2013 – Bhutto, A.W., Bazmi, A.A. i Zahedi, G. 2013. Underground gasification: from fundamentals to applications. *Energy and Combustion Science* 39, s. 189–214.
- Białecka, B. 2008. Estimation of coal resources for UCG in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. *Nat. Resources Research* t. 17, nr 1, s. 21–28.
- Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2014 r., 2015, PSG, PIG-PIB, Warszawa.
- Bukowska i in. 2012 – Bukowska, M., Sanetra, U. i Wadas, M. 2012. Chronostratigraphic and depth variability of porosity and strength of hard coals in the Upper Silesian Basin. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 28, z. 4, s. 151–166.
- Cebula i in. 2012 – Cebula, C., Słota, M. i Wrana, A. 2012. Inwentaryzacja resztek pokładów węgla oraz analiza mechanizmów ich powstawania na przykładzie kopalni „Piekary”. *Wiadomości Górnicze* nr 2, s. 74–79.
- Chečko, J. 2007. *Geologiczne aspekty migracji gazów kopalnianych na powierzchnię w przypadku likwidacji kopalni węgla kamiennego*. Praca doktorska GIG, Arch. Katowice.
- Chečko i in. 2014 – Chečko, J., Głogowska, M., Warzecha, R. i Urych, T. 2014. Ocena zasobów węgla kamiennego dla celu podziemnego zgazowania węgla metodą szybową w złożach czynnych kopalń Kompanii Węglowej S.A. *Przegląd Górniczy* nr 20, s. 20–27.
- Creedy i in. 2001 – Creedy, D.P., Garner, K., Holloway, S., Jones, N. i Ren, T.X. 2001. Review of underground coal gasification technological advancements. Report No. COAL 2001; R211. DTI/Pub URN 01/1041.
- Czaja i in. 2013 – Czaja, P., Klich, J. i Tajduś, A. 2013. Metoda pozyskiwania pierwotnych nośników energii ze złóż węgla kamiennego na drodze odmetanowania i zgazowania in situ. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3, s. 83–98.
- Czaja i in. 2014 – Czaja, P., Kamiński, P., Klich, J. i Tajduś, A. 2014. Hybrid technology of hard coal mining from seams located at great depth. *Archives of Mining Science* v. 59, 3, s. 575–590.
- Dubiński, J. i Koterás, A. 2014. Obecny stan i kierunki rozwoju technologii podziemnego zgazowania węgla w świecie. *Przegląd Górniczy* 70, 11, s. 5–12.
- Dubiński, J. i Turek, M. 2015. Basic aspects of productivity of underground coal gasification process. *Arc. Min. Sci.* Vol. 60, No. 2, s. 443–453.
- Dziunikowski, K. 1956. Doświadczenia nad podziemnym zgazowaniem węgla w laboratoryjnym gazogeneratorze. Komunikat GIG nr 182.

- Fyodorov i in. 1984 – Fyodorov, N.A., Kreinin, E.V., Zvygiantsev, K.N. 1984. Underground coal gasification and its application in world practice. In; Energy resources of the world. 27th nt. Geol. Congress. Coll 02 Reports vol. 2, s.121–133. Moskwa: P.O.Nauka.
- Green, M. 2008. Underground coal gasification, state of the art. Clean Coal Conf. Bedewo, Poland.
- Hajdo i in. 2010 – Hajdo, S., Klich, J. i Ptak, K. 2010. Uwarunkowania podziemnego zgazowania węgla – 100 lat rozwoju metody. *Górn. i Geoinż.* R. 34, z. 4, s. 225–235.
- EC 2012. Hydrogen-oriented underground coal gasification for Europe (HUGE). European Commission (EC) Final Report 2012; EUR 25044.
- Imran i in. 2014 – Imran, M., Kumar, D., Kumar, N., Qayyum, A., Saeed, A. i Shamim Bati, M. 2014. Environmental concerns of underground coal gasification. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 31, s. 600–610.
- Liu i in. 2006 – Liu, S., Wang, Y. i Oakey, J. 2006. Volatilization of mercury, arsenic and selenium during underground coal gasification. *Fuel* 85, s. 1550–1558.
- Magda, R. 2011. Ekonomiczne aspekty podziemnego zgazowania węgla – na przykładzie Karbon Energy. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 11, z. 2, s. 261–272.
- Magda i in. 2012 – Magda, R., Franik, T., Woźny, T. i Załucki, J. 2012. Attempt of estimating the costs of underground bituminous coal gasification. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 2, s. 71–85.
- Nieć, M. 2012. Geologiczne bariery i ograniczenia dla podziemnego zgazowania węgla. *Biul. PIG* 448, s.183–194.
- Nieć, M. 2016. Możliwości i problemy zgazowania węgla na dużej głębokości metodą szybko-otworową (hybrydową). *Przegląd Górniczy* t. 72, nr 5, s. 97–101.
- Nieć i in. 2014 – Nieć, M., Chećko, J., Górecki, J. i Sermet, E., 2014. Stan bazy zasobowej węgla w Polsce i jej problemy złożowo-środowiskowe w odniesieniu do eksploatacji metodą podziemnego zgazowania. *Przegląd Górniczy* nr 11, s. 28–37.
- Nieć i in. 2015 – Nieć, M., Górecki, J. i Sermet, E. 2015. Dokumentowanie złóż węgla kamiennego na potrzeby podziemnego zgazowania. *Górnictwo Odkrywkowe* nr 2, s. 47–52.
- Nieć i in. 2017 – Nieć, M., Sermet, E., Chećko, J. i Górecki, J. 2017. Evaluation of coal resources for underground gasification in Poland. Selection of possible UCG sites. *Fuel* Vol. 208, s. 193–202.
- Palarski, J. i Strózik, G. 2013. Możliwości redukcji negatywnych oddziaływań podziemnego zgazowania węgla na środowisko przez podsadzanie pustek podziemnych. *Przegląd Górniczy* t. 69, nr 1, s. 156–162.
- Palarski i in. 2013 – Palarski, J., Strózik, G. i Jędrus, R. 2013. Wpływ deformacji górotworu na warunki ochrony powierzchni oraz zasobów użytkowych wód podziemnych przy podziemnym zgazowaniu węgla. *Przegląd Górniczy* t. 69, nr 8, s. 149–155.
- Sermet, E. 2013. Obszary chronione w granicach lubelskiego zagłębia węglowego – potencjalna bariera zagospodarowania złóż. *Górnictwo Odkrywkowe* nr 2, s. 122–127.
- Sermet, E. i Górecki, J. 2013. Resztkowe zasoby dolnośląskiego zagłębia węglowego – bez szans na podziemne zgazowanie? *Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN* nr 85, s. 287–294.
- Sermet, E. i Górecki, J. 2014. Ocena potencjału zasobowego złóż Lubelskiego Zagłębia Węglowego do podziemnego zgazowania węgla. *Górnictwo Odkrywkowe* nr 2–3, s. 80–85.
- Shafrovich, E. i Varma, A. 2009. Underground coal gasification: a brief review of current status. *Industrial Engineering Chemistry Research* 48, s. 7865–7875.
- Stańczyk, K. 2008. *Czyste technologie użytkowania węgla*. Katowice: GIG.
- Stuermer i in. 1982 – Stuermer, D.H., Ng D.J. i Morris, C.J. 1982. Organic contaminants in roundwater near an underground coal gasification site in northeastern Wyoming. *Environ. Sci. Technol.* 16(9), s. 582–587.
- Szlązak i in. 2013 – Szlązak, N., Obracaj, D., Borowski, M., Swolkień, J., Korzec, M., 2013. The impact of underground coal gasification on ventilation network safety in an active mine. *Przegląd Górniczy* t. 2, s. 55–63.
- Turek, M. 2015. Techniczno-organizacyjne aspekty zgazowywania węgla w podziemiach czynnej kopalni, na przykładzie eksperymentu przeprowadzonego w kopalni Wieczorek. *Przegląd Chemiczny* nr 94/6, s. 1000–1005.
- Turek, M. i Lubosik, Z. 2008. Identyfikacja resztkowych parcel pokładów węgla kamiennego. *Wiad. Górnicze* nr 3, s. 182–189.
- Verma i in. 2014 – Verma, R.P., Mandal, R., Chaulya, S.K., Singh, P.K. i Prasad, G.M. 2014. Contamination of groundwater due to underground coal gasification. *Int. Journal of Water Res. And Envir. Engin.* 6(12), s. 303–311.
- Wong, F.T. i Mead, S.W. 1983. Water quality monitoring at the Hoe Creek test site: review and preliminary conclusions. Underground gasification: the state of the art. *AIChE Symp. Ser. V.* 79, nr 226, s. 154–173.

**ZASOBY WĘGLA KAMIENNEGO W POLSCE
DLA PODZIEMNEGO ZGAZOWANIA – OCZEKIWANIA A RZECZYWISTOŚĆ**

Słowa kluczowe

podziemne zgazowanie, zasoby, węgiel kamienny

Streszczenie

Proces podziemnego zgazowania węgla często wskazywany jest jako alternatywny dla klasycznej eksploatacji, umożliwiający wykorzystanie zasobów węgla, także tych, które są niedostępne lub trudne do wydobycia dla konwencjonalnych metod górniczych. Na podstawie analizy osiągalnych danych odnośnie procesu PZW oraz cech budowy geologicznej polskich zagłębi węgla kamiennego stwierdzono, że możliwości stosowania metody podziemnego zgazowania na skalę przemysłową są ograniczone. Najważniejszymi utrudnieniami dla PZW są: wielopokładowość złóż, przewaga pokładów cienkich (o miąższości <1,5 m) oraz warunki hydrogeologiczne (silne zawodnienie nadkładu) i tektoniczne (zuskokowanie pokładów), powodujące ograniczenie racjonalnego wykorzystania złóż. Na podstawie szczegółowej oceny warunków występowania i wielkości zasobów złóż węgla kamiennego stwierdzono, że tylko niespełna 10% z całości udokumentowanych zasobów może być gazyfikowane pod ziemią do głębokości 1000 m.

Przy aktualnym stanie wiedzy na temat PZW, możliwości jego stosowania w polskich złożach węgla kamiennego przy uwzględnieniu racjonalnej gospodarki złożem są istotnie ograniczone.

HARD (BITUMINOUS) COAL RESOURCES IN POLAND – EXPECTATIONS AND REALITY

Key words

underground coal gasification, resources, hard coal deposits

Abstract

There are numerous enthusiastic opinions on UCG possibilities. UCG is presented often as suitable for the utilization of coal resources which are inaccessible or difficult for conventional mining. Application of UCG coal basins in Poland is limited by their specific geological features. The most important are: hydrogeological and tectonic restraints, the occurrence of numerous coal seams with which gasification will interact, and the predominance of thin coal seams, less than 1.5 m thick. The detailed evaluation of hard (bituminous) coal resources in Poland explored up to 1.000 m depth, and careful selection of possible UCG sites has demonstrated that only about 10% of it may be gasified underground.

Reasonable resource utilization is a serious problem in the multi-seam coal deposits. Coal resources are a nonrenewable part of the environment. Therefore, reasonable resources utilization is defined as their best possible recovery (considering acceptable costs). At the recent state of knowledge on UCG, its application in Poland, contrary to the former expectations, is seriously restrained.