



Wojciech NAWORYTA*, Monika WASILEWSKA-BŁASZCZAK*

Analiza parametrów złoża węgla brunatnego dla potrzeb projektowania elektrowni

STRESZCZENIE. Elektrownie produkujące energię opierające się na węglu brunatnym są ściśle związane z miejscem pozyskania surowca, czyli ze złożem. W przeciwieństwie do węgla kamiennego, węgiel brunatny w stanie surowym, ze względu na swoje właściwości, nie nadaje się do transportu na większe odległości. Budowane przy złożach elektrownie bazujące na tym surowcu muszą być dostosowane do właściwości dostępnej w pobliżu kopaliny.

W artykule przedstawiono analizę jednego ze złóż węgla brunatnego pod kątem parametrów technologicznych projektowanej elektrowni. Do analiz wytypowano trzy parametry węgla: popielność A^d [%], wartość opałową Q_{ir} [kJ/kg] oraz zawartość siarki całkowitej w węglu S_t^d [%].

Na podstawie informacji z dokumentacji geologicznej oraz projektu zagospodarowania złoża określono statystykę parametrów jakościowych węgla w złożu w funkcji postępu projektowanej eksploatacji. Oprócz wartości średnich przedstawiono wielkości możliwych błędów oszacowań wynikających ze zmienności złoża ale również z niedoskonałej informacji o złożu.

SŁOWA KLUCZOWE: analiza złoża, węgiel brunatny, parametry węgla brunatnego, elektrownia

1. Istota problemu

W ciągu najbliższych kilkunastu lat planuje się budowę nowej elektrowni na bazie węgla brunatnego ze złoża Gubin w województwie lubuskim. Ze względu na właściwości tej kopaliny

* Dr inż. – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

budowę elektrowni projektuje się w taki sposób, aby moc wytwórcza i technologia dopasowane były do ilości węgla w złożu oraz parametrów jakościowych charakteryzujących węgiel. Optymalny dobór technologii wymaga dobrej znajomości parametrów węgla, nie tylko wartości średnich, ale przede wszystkim zmienności parametrów w pełnym okresie eksploatacji, który w przypadku analizowanego złoża wyniesie prawie połowę wieku (Chmielniak 2011; Zaporowski 2011).

Celem niniejszej publikacji jest ocena długookresowej zmienności kluczowych parametrów węgla ze złoża Gubin w funkcji postępów projektowanej eksploatacji. Ze względu na wstępny stopień rozpoznania złoża w kategorii C_1 i C_2 , obliczono średnie wartości i odchylenia standardowe parametrów jakościowych w pięcioletnich obszarach eksploatacji. Określenie wartości średnich w krótszych postęпах (np. jednorocznych) nie jest zasadne na obecnym etapie rozpoznania złoża. Istotnym zagadnieniem poruszonym w niniejszej pracy jest wpływ równoległej eksploatacji dwóch pokładów węgla na jakość wypadkowej strugi urobku dostarczanej do elektrowni.

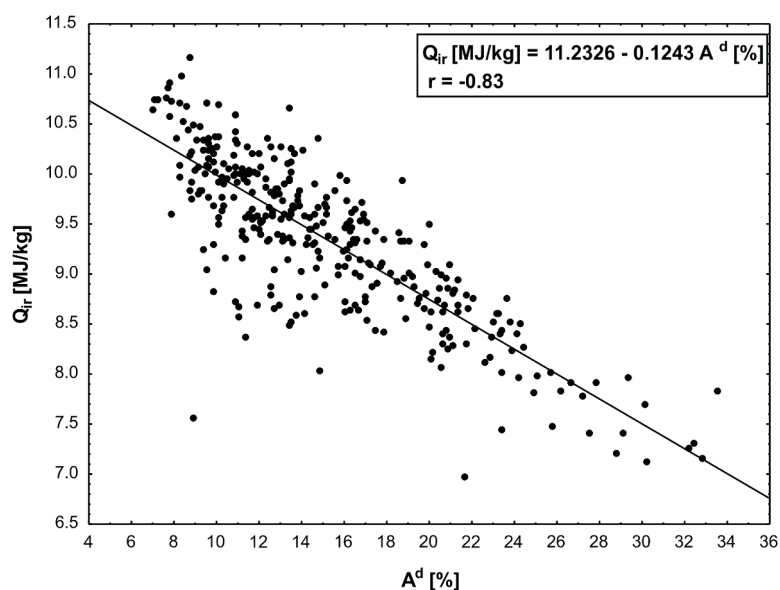
2. Znaczenie znajomości zmienności parametrów węgla dla projektowania elektrowni

W pracy przeanalizowano trzy podstawowe parametry węgla w złożu: wartość opałową Q_{ir} [kJ/kg], popielność węgla A^d [%] oraz zawartość siarki S_t^d [%]. Kluczowym parametrem informującym o ilości energii zawartej w paliwie jest wartość opałowa. W trakcie eksploatacji powinna ona mieścić się w wąskim zakresie wahań. Szczęśliwie parametr ten cechuje się najniższą zmiennością wśród innych ważnych parametrów węgla. W przypadku analizowanego złoża współczynnik zmienności wartości opałowej, wyrażony stosunkiem odchylenia standardowego do wartości średniej, wynosi zaledwie 9%.

Popielność węgla spalanego w elektrowni determinuje rozmiary urządzeń odpylających (np. elektrofiltrów), jak również wielkość projektowanego miejsca składowania popiołów i wymiary urządzeń do transportu popiołu na składowisko. Najczęściej popielność jest mocno skorelowana z wartością opałową węgla, przy czym zmienność tego parametru w złożu Gubin jest znacznie wyższa (współczynnik zmienności rzędu 37%) niż zmienność wartości opałowej. Na rysunku 1 pokazano tę zależność.

Ze zmienności zawartości siarki w węglu można wnioskować o rozmiarach projektowanej instalacji odsiarczania spalin (IOS), zapotrzebowania na sorbent wapienny oraz ilości odpadowych produktów odsiarczania (np. REA-gipsu). Na podstawie tej wiedzy będzie można projektować fabrykę do przerabiania gipsu odpadowego albo składowisko do jego magazynowania (Naworyta 2013).

Przy projektowaniu elektrowni przydatne byłyby również inne parametry węgla np. zawartość piasku, który wpływa niekorzystnie na trwałość urządzeń kotła, jednak w trakcie dokumentowania złoża nie wszystkie parametry były przedmiotem analiz.



Rys. 1. Wykres zależności empirycznych i modelu liniowego wartości opałowej (Q_{ir}) i popielności węgla (A^d) (r – współczynnik korelacji liniowej)

Fig. 1. Relationship between the calorific value (Q_{ir}) and the ash content in the lignite deposit (A^d) (r – the linear correlation coefficient)

3. Zmiany jakości węgla oraz możliwości i ograniczenia sterowania jakością strugi urobku

Parametry węgla w złożu nie są stałe. Na etapie projektowania elektrowni ich zmienność powinna być analizowana nie tylko globalnie na tle całego złoża, ale przede wszystkim w korelacji z postępem projektowanej eksploatacji.

W celu wyeliminowania dużych wahań parametrów węgla podawanego do elektrowni w kopalniach stosuje się cały zestaw metod zmierzających do uśrednienia jakości urobku (Kunde i Trummer 2009; Naworyta i in. 2013). Służy temu przede wszystkim dokładne rozpoznanie parametrów oraz projektowanie eksploatacji w taki sposób, aby węgiel podawany do elektrowni był relatywnie jednolity. Stosuje się planowanie długo-, średnio- i krótkoterminowe (operacyjne). Na podstawie rozpoznania złoża przez odpowiednie manewrowanie urobkiem z kilku koparek możliwe jest, w ograniczonym zakresie, eliminowanie dużych wahań parametrów strugi urobku. Niestety w kopalniach węgla brunatnego nie da się w sposób dowolny zmieniać położenia frontów eksploatacyjnych, podobnie jak nie można dowolnie żonglować dużymi koparkami wzdłuż eksploatowanego frontu. Pomocnym albo raczej niezbędnym elementem procesu sterowania jest funkcjonowanie przy elektrowni placu składowo-homogenizacyjnego. W kilku sektorach takiego magazynu można składować węgiel o różnych

właściwościach. Przez dobieranie odpowiedniej ilości węgla z poszczególnych sektorów możliwe jest dostarczanie strugi wyjściowej o odpowiednich parametrach. Plac składowo-homogenizacyjny pełni również rolę składowiska buforowego na czas występowania poważnej awarii w kopalni. Ograniczeniem placu jest jego pojemność. Zwykle składa się na nim węgiel w ilości nie większej niż wystarczająca na kilka dni pracy elektrowni. Jakość węgla na placu zależy również od tego, w którym miejscu na złożu znajdują się aktualnie koparki węglowe, i jaki węgiel jest aktualnie dostępny.

Proces sterowania jakością strugi węgla ma ograniczenia wynikające z budowy złoża. W praktyce możliwość sterowania ogranicza się do okresu krótkoterminowego. W dłuższej perspektywie elektrownia musi spalać taki węgiel, jaki jest aktualnie odkryty i przygotowany do eksploatacji. Jakość węgla zmienia się z roku na rok. Właśnie ta zmienność długookresowa jest przedmiotem niniejszej pracy.

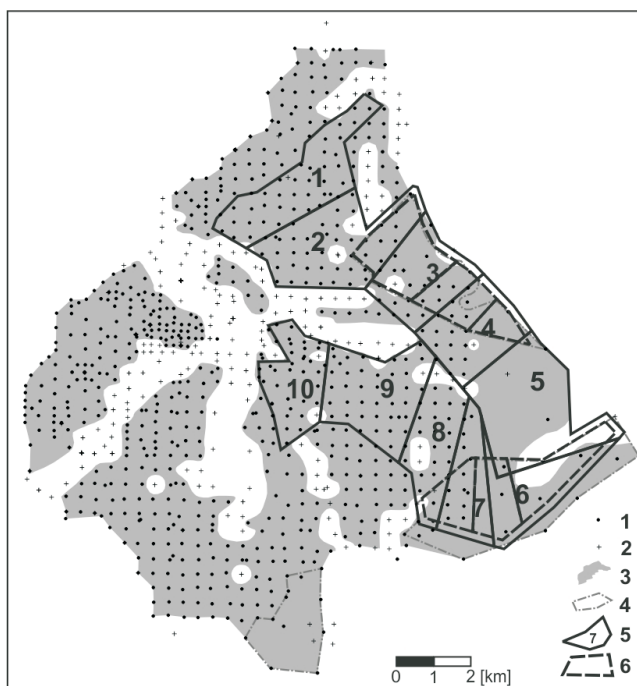
4. Materiał podstawowy

Analizy wykonano na przykładzie złoża węgla brunatnego Gubin, którego zasoby bilansowe oszacowano na poziomie około 1,6 mld ton. Złoże zostało udokumentowane w latach sześćdziesiątych i od ponad połowy wieku jest przedmiotem prac studialnych i koncepcyjnych dotyczących jego zagospodarowania. W zamiarach inwestora, którym jest PGE Polska Grupa Energetyczna S.A., od roku 2030 kopalnia ma stanowić źródło surowca do produkcji energii elektrycznej w specjalnie dla tego celu projektowanej elektrowni o mocy około 2700 MW.

Materiał podstawowy do badań stanowiły informacje z około 380 otworów wiertniczych zlokalizowanych w granicach projektowanej eksploatacji oraz w jej najbliższym otoczeniu, zawarte w *Dodatku nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża „Gubin”* (Bogacz i in. 2009). Należy zaznaczyć, że dokument ten wykonano opierając się na wynikach prac geologicznych wykonywanych na przestrzeni prawie półwiecza (w latach: 1961, 1969, 1992, 2008). Skutkiem tego obserwowane różnice parametrów w poszczególnych otworach wiertniczych mogą mieć swoje źródło nie tylko w naturalnej zmienności parametrów złożowych, ale w ograniczonej wiarygodności materiałów podstawowych, na które składają się m.in. błędy opróbowania związane przykładowo ze stosowanymi metodami pobierania próbek (Mucha i in. 2008; Mucha i Wasilewska-Błaszczak 2013). W przypadku niektórych parametrów węgla np. wartości opałowej lub popielności różnice wynikające ze stosowanych metod opróbowania mogą przekraczać nawet 10% (Mazurek 2003). Należy to wziąć pod uwagę przy ocenie zmienności parametrów złożowych.

W artykule wykorzystano opublikowane informacje odnoszące się do zagospodarowania złoża, w szczególności miejsce udostępnienia oraz postępy frontów eksploatacyjnych dostosowane do zapotrzebowania projektowanej elektrowni na surowiec (Naworyta i Sypniowski 2012). W projekcie zagospodarowania złoża planuje się eksploatację dwóch pokładów o znaczeniu przemysłowym – pokładu II położonego pod warstwą około 70 m nadkładu oraz pokładu IV, zalegającego około 40 m poniżej pokładu II.

Lokalizację otworów wiertniczych na tle granic II i IV pokładu oraz projektowanych granic zagospodarowania złoża przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Lokalizacja otworów rozpoznawczych na tle złoża węgla brunatnego Gubin wraz z granicami postępów eksploatacji w pokładach II i IV

Objaśnienia: 1 – otwory wiertnicze pozytywne dla pokładu II, 2 – otwory wiertnicze negatywne dla pokładu II (w obszarze rynien erozyjnych), 3 – obszar występowania pokładu II, 4 – obszar występowania pokładu IV, 5 – granice 5-letnich obszarów eksploatacji w pokładzie II, 6 – granice 5-letnich obszarów eksploatacji w pokładzie IV

Fig. 2. The boreholes on the background of lignite deposit Gubin, with the limits of planned exploitation of seams II and IV

Explanations: 1 – boreholes positive for the seam II, 2 – boreholes negative for the seam II (in the erosion areas), 3 – the area of the seam II, 4 – the area of the seam IV, 5 – the limits of the 5-year operating areas in the seam II, 6 – the limits of the 5-year operating areas in the seam IV

5. Metodyka pracy

Do oszacowania średnich wartości parametrów i prognozy błędów tych oszacowań w zdefiniowanych blokach eksploatacyjnych wykorzystano geostatystyczną metodę krigingu poligonowego. Pozwala ona oszacować średnią wartość parametru w granicach poligonu o dowolnym kształcie (wieloboku) na podstawie geostatystycznego modelu semiwariogramu oraz wartości parametru w punktach opróbowań znajdujących się w jego wnętrzu lub w granicach obszaru wyszukiwania danych przylegającego do poligonu. Szacowana średnia wartość pa-

rametru ustalana jest jako suma iloczynów wartości parametru w punktach opróbowań oraz współczynników wagowych krigingu. Specyfiką metody jest sposób ustalania współczynników wagowych, których wielkość zależy w szczególności od wielkości i kształtu obszaru, w którym dokonuje się oszacowania średniej wartości parametru, od rozmieszczenia punktów rozpoznawczych oraz od struktury zmienności parametru opisanej za pomocą modelu teoretycznego dopasowanego do semiwariogramu. Dodatkową informacją, jaką zapewniają metody geostatystyczne, jest prognozowany błąd oszacowania średniej (błąd krigingu σ_K) (Nieć i in. 2012). O możliwym zakresie wahań nieznannej rzeczywistej wartości średniej parametru z wystarczającą w praktyce dokładnością (dla prawdopodobieństwa $P = 95\%$) informuje utworzony wokół niej przedział ufności stanowiący podwojone wartości błędu standardowego krigingu $[-2\sigma_K, +2\sigma_K]$.

6. Wyniki

Wyniki obliczenia średnich wartości parametrów jakościowych w funkcji projektowanych pięcioletnich postępów eksploatacji wraz z wielkościami prognozowanych błędów (błędów krigingu) przedstawiono na rysunku 3 oraz zestawiono w tabeli 1. W tabeli przedstawiono wartości średnie, błąd oszacowania wartości średnich oraz błąd względny odniesiony do wartości średniej w każdym z projektowanych bloków eksploatacyjnych. W ostatnim wierszu, dla każdego z trzech analizowanych parametrów, podano ich wartość średnią ważoną dla pokładów II+IV. Wagę stanowi udział zasobów węgla z pokładów II i IV w każdej z analizowanych pięcioletek.

Na rysunkach zestawiono zmiany średnich wartości parametrów jakościowych Q_{ir} , A^d i S_t^d w okresie eksploatacji złoża. Wykresy są ilustracją wyników przedstawionych w tabeli 1.

Wnioski

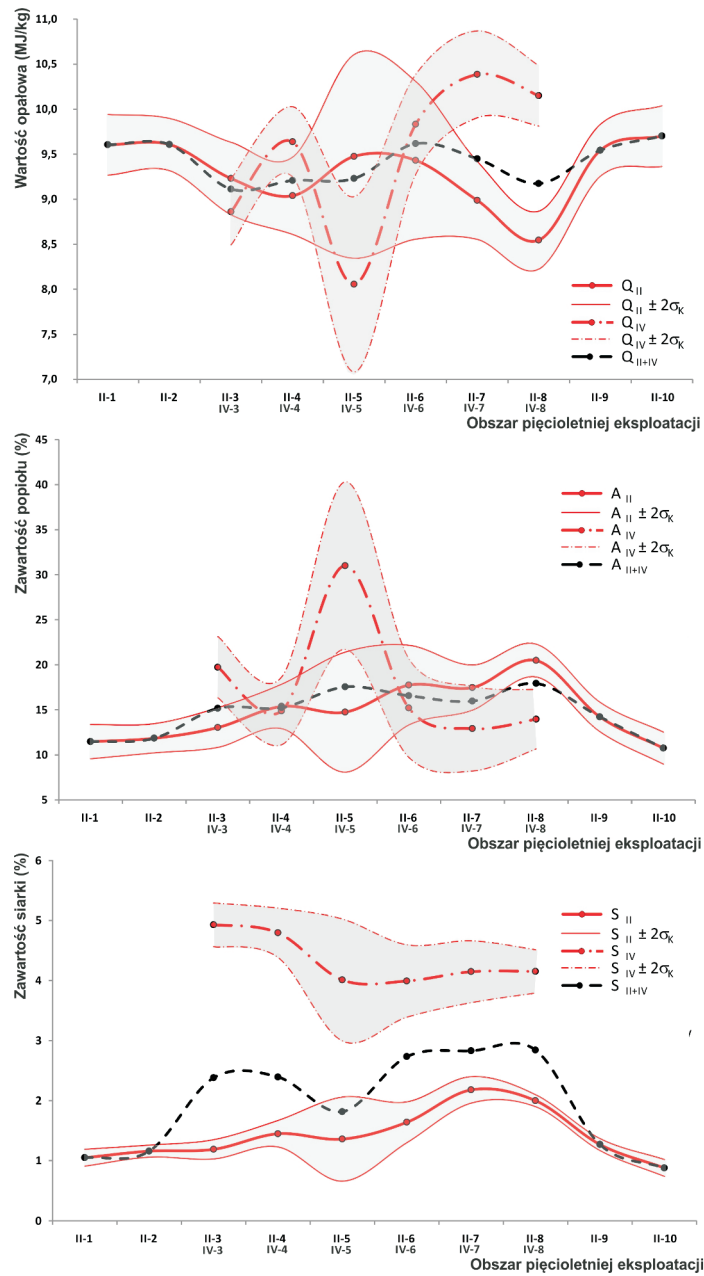
Na podstawie wyników przedstawionych analiz można wyprowadzić następujące wnioski:

- ✧ Ze względu na zaobserwowaną naturalną zmienność parametrów w złożu elektrownia powinna zostać zaprojektowana na wartości średnie parametrów, ale również uwzględnić maksymalne wahania, które w perspektywie długookresowej eksploatacji zostały zdiagnozowane i których dostępnymi metodami sterowania jakością urobku nie będzie można uniknąć.
- ✧ W przypadku wartości opałowej Q_{ir} i popielności węgla A^d jednoczesna eksploatacja pokładów II i IV powoduje kompensację wahań ich średnich wartości obserwowanych w poszczególnych pokładach. Dzięki naturalnej zmienności oraz zaprojektowanej rów-

TABELA 1. Oszacowane średnie wartości opalowej węgla (Q_{ir}), popielności (A^d) oraz zawartości siarki (S_f^d) w projektowanych granicach pięcioletnich postępów eksploatacyjnych oraz prognozowane błędy krigingu (bezwzględne i względne) dla prawdopodobieństwa $P = 95\%$

TABLE 1. Estimated mean calorific value of the lignite (Q_{ir}), ash (A^d), and sulfur content (S_f^d) in the designed limits of five-year operational progress and forecast kriging errors (absolute and relative) for the probability of $P = 95\%$

Parametr złożowy	Pokład	Parametr	Granica obszaru pięcioletniej eksploatacji									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Wartość opalowa	II	Średnia [MJ/kg]	9,6	9,6	9,2	9,0	9,5	9,4	9,0	8,5	9,5	9,7
		Błąd krigingu [MJ/kg]	0,33	0,28	0,39	0,42	1,11	0,86	0,42	0,31	0,28	0,33
		Względny błąd krigingu [%]	3,4	3,0	4,3	4,6	11,7	9,1	4,7	3,7	3,0	3,4
Wartość opalowa	IV	Średnia [MJ/kg]			8,9	9,6	8,1	9,8	10,4	10,1		
		Błąd krigingu [MJ/kg]			0,36	0,38	0,95	0,54	0,47	0,33		
		Względny błąd krigingu [%]			4,1	4,0	11,8	5,5	4,5	3,2		
Wartość opalowa	II+IV	Średnia ważona [MJ/kg]	9,6	9,6	9,1	9,2	9,2	9,6	9,4	9,2	9,5	9,7
		Średnia [%]	11,46	11,84	13,03	15,37	14,74	17,74	17,47	20,47	14,22	10,74
		Błąd krigingu [%]	1,86	1,59	2,16	2,41	6,53	4,33	2,45	1,78	1,61	1,74
Zawartość popiołu	II	Względny błąd krigingu [%]	16,2	13,4	16,5	15,7	44,3	24,4	14,0	8,7	11,3	16,2
		Średnia [%]			19,72	14,87	31	15,20	12,90	13,96		
		Błąd krigingu [%]			3,3	3,7	9,1	5,4	4,6	3,2		
Zawartość popiołu	IV	Względny błąd krigingu [%]			16,8	24,7	29,4	35,3	35,7	23,1		
		Średnia ważona [%]	11,46	11,84	15,16	15,23	17,55	16,56	15,96	17,92	14,22	10,74
		Średnia [%]	2,06	2,27	2,33	2,84	2,67	3,21	4,27	3,92	2,49	1,72
Zawartość popiołu	II	Błąd krigingu [%]	0,14	0,10	0,16	0,22	0,69	0,33	0,22	0,10	0,10	0,14
		Względny błąd krigingu [%]	13,1	8,4	13,2	14,9	50,4	20,3	9,9	4,9	7,7	15,6
		Średnia [%]			4,93	4,80	4,01	3,99	4,15	4,15		
Zawartość siarki	IV	Błąd krigingu [%]			0,4	0,4	1,0	0,6	0,5	0,4		
		Względny błąd krigingu [%]			7,2	8,4	24,8	14,8	12,2	8,5		
		Średnia ważona [%]	1,05	1,16	2,38	2,39	1,82	2,73	2,83	2,84	1,27	0,88



Rys. 3. Średnie wartości opałowe węgla (Q_{ip}), zawartości siarki (S_r^d) i popiołu (A^d) w węglu w granicach pięcioletnich postępów eksploatacji w pokładach II i IV oraz łącznie dla obydwu pokładów wraz zakresem prognozowanego błęd krigingu $2\sigma_K$ (dla prawdopodobieństwa $P = 95\%$)

Fig. 3. Estimated mean calorific value of the lignite (Q_{ip}), ash (A^d), and sulfur content (S_r^d) in the designed limits of five-year operational progress and forecast kriging errors (absolute and relative) for the probability of $P = 95\%$

noległej eksploatacji dwóch pokładów w łącznej strudze urobku wystąpi naturalny efekt homogenizacji węgla.

- ✧ W przypadku zawartości siarki w strudze urobku obserwuje się negatywny wpływ eksploatacji pokładu IV. W okresach, kiedy ten pokład będzie eksploatowany wraz z pokładem II, wystąpi znaczny wzrost zawartości siarki w węglu. Będzie to miało wpływ na zwiększone zapotrzebowanie na sorbent do odsiarczania oraz powstawanie zwiększonej ilości gipsów odpadowych i konieczność ich zagospodarowania bądź składowania.
- ✧ Wartości błędów oszacowania wartości średnich parametrów w poszczególnych pięcioletkach bardzo się różnią (od 3 do 50%). Wyjątkowo wysokie wartości błędów obserwuje się dla piątej pięcioletki, w szczególności dla parametrów pokładu IV. W tym obszarze złoża wykazuje znaczne deficyty rozpoznania, stąd duża niepewność oszacowanych wartości średnich.
- ✧ Korzystny efekt kompensacji wahań wartości średnich parametrów jakościowych, przy jednoczesnej eksploatacji dwóch pokładów o zróżnicowanej charakterystyce jakościowej, obserwuje się w pięcioletnych okresach eksploatacji. Nie jest jednak pewne, czy analogiczny efekt będzie występował w krótszych okresach eksploatacji, np. jednorocznych. To zagadnienie będzie można rozwiązać dopiero po dokładniejszym rozpoznaniu złoża.

Literatura

- [1] BOGACZ i in. 2009 – BOGACZ, A., SAWICKA, K., SOKOŁOWSKI, M., i KWAŚNIEWSKA, S. 2009. Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża węgla brunatnego Gubin w kategorii B+C₁+C₂. Przedsiębiorstwo Geologiczne w Krakowie, *CAG PIG* nr 3090/2009, Warszawa.
- [2] CHMIELNIAK, T. 2011. Szanse i bariery w rozwoju technologii energetycznych paliw kopalnych. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 14, z. 2, s. 23–34.
- [3] KUNDE, L. i TRUMMER, D. 2009. Kohlenqualitätsmanagement, Braunkohlentagebau, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s. 409–426.
- [4] MAZUREK, S. 2003. Zależność wyników analiz zapozielenia węgla brunatnego od systemu wiercenia i opróbowania, a możliwości prognozowania parametrów dostaw – na przykładzie złóż konińskich. *Węgiel Brunatny* nr 2 (43).
- [5] MUCHA i in. 2008 – MUCHA, J., NIEĆ, M., SAŁUGA, P., SOBCZYK, E.J. i WASILEWSKA, M. 2008. Ryzyko inwestycji w górnictwie węgla kamiennego jako funkcja dokładności oszacowań parametrów złożowych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 24, z. 2/4, s. 161–173.
- [6] MUCHA, J. i WASILEWSKA-BŁASZCZYK, M. 2013. Opróbowanie złóż do badań chemicznych i jego dokumentowanie – oczekiwania i rzeczywistość. *Górnictwo Odkrywkowe* R.54, nr 2, s. 52–57.
- [7] NAWORYTA, W. 2013. Analysis of the sulfur content in the Gubin lignite deposit for assessing the need for sorbent and the quantity of REA gypsum produced. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 29, z. 4, s. 47–58.
- [8] NAWORYTA, W. i SYPNIEWSKI, Sz. 2012. Zagospodarowanie złoża węgla brunatnego Gubin – wybrane problemy projektowania kopalni. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 3.

- [9] NAWORYTA i in. 2013 – NAWORYTA, W., SYPNIEWSKI, SZ. i BENNDORF, J. 2013. Analiza możliwości sterowania jakością strugi urobku na etapie planowania operacyjnego na przykładzie jednego ze złóż węgla brunatnego. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 4, s. 233–245.
- [10] NIEĆ i in. 2012 – NIEĆ, M., MUCHA, J., SOB CZYK, E.J. i WASILEWSKA-BŁASZCZYK, M. 2012. *Metodyka dokumentowania złóż kopalin stałych. Część IV: Szacowanie zasobów*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków, s. 241.
- [11] ZAPOROWSKI, B. 2011. Efektywność energetyczna i ekonomiczna elektrowni i elektrociepłowni dużej i średniej mocy. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 14, z 2, s. 455–468.

Wojciech NAWORYTA, Monika WASILEWSKA-BŁASZCZAK

Analysis of lignite deposit parameters for the purpose of a planned power plant

Abstract

Power plants producing energy from lignite are tied to the locations of lignite extraction – to lignite deposits. Unlike hard coal, raw lignite, because of its properties and water content, cannot be transported over long distances. Therefore, power plants built in the neighborhood of a deposit have to be adjusted to the properties of the lignite in the deposit.

This article analyzes the parameters of a lignite deposit for the purpose of considering a new power plant. Three lignite parameters were selected – ash content A^d [%], calorific value Q_{ir} [kJ/kg], and sulfur content S_t^d [%]. Based on the information from geological documentation and the lignite deposit development project, the analysis calculates relevant statistics of these lignite deposit parameters, taking into account the progress of the planned exploitation. The mean values as well as the standard deviation of the mean values are presented.

KEY WORDS: deposit analysis, lignite, deposit parameters, power plant