

DOKUMENTOWANIE GŁĘBOKICH ZŁÓŻ MIEDZI I SREBRA – KRYTERIA INWESTORSKIE

DOCUMENTING DEEP COPPER AND SILVER DEPOSITS – INVESTOR'S CRITERIA

Stanisław Speczik, Tomasz Bieńko, Alicja Pietrzela - Uniwersytet Warszawski, Mozów Copper Sp. z o.o., Warszawa
Krzysztof Zieliński - Mozów Copper Sp. z o.o., Warszawa

W artykule przedstawiono doświadczenia w dokumentowaniu głębokich złóż rud Cu-Ag na monoklinie przedsudeckiej, pozyskane w ramach projektu poszukiwań realizowanego przez spółki Miedzi Copper Corp. Program badań archiwalnych materiałów geologicznych, a następnie wierceń poszukiwawczo-rozpoznawczych (od 2013 r.) pozwolił na odkrycie trzech nowych złóż miedzi i srebra: Nowa Sól, Sulmierzyce Północ i Mozów. Dwa z nich zostały już udokumentowane: Nowa Sól w kategorii C_2 oraz Sulmierzyce Północ w kategorii C_2+D , z czego ta pierwsza dokumentacja została już zatwierdzona przez organ administracji geologicznej.

Na koncesjach wchodzących w skład złoża Nowa Sól trwają dalsze prace wiertnicze mające na celu udokumentowanie tego złoża w kategorii C_1 , umożliwiającą starania o pozyskanie koncesji wydobywczej.

Podstawowym problemem przy dokumentowaniu tych złóż było opracowanie własnych inwestorskich granicznych wartości parametrów definiujących złoża i jego granice, w związku z zaleganiem udokumentowanych złóż na głębokościach przekraczających 1500 m oraz rosnącą temperaturą i ciśnieniem górotworu. Parametry te zaproponowano na podstawie wykonanych przed rozpoczęciem prac wiertniczych opracowań typu „pre-feasibility study”, które wielokrotnie uaktualniano w związku ze zmieniającymi się warunkami ekonomicznymi oraz doświadczeniami z istniejących głębokich kopalń na świecie. W efekcie, wstępne założenia były wielokrotnie zmieniane, zaś wpływ nowych technologii na parametry graniczne okazał się istotniejszy od wcześniej przyjmowanych czynników, takich jak wyższa zasobność złoża, miąższość i zawartość procentowa składnika użytecznego.

Ponadto, dla oceny realnego wpływu parametrów takich jak siatka kilometrowa i ilość wykonanych otworów na dokładność liczenia zasobów i ich wielkość, wykonano analizę dotychczas udokumentowanych złóż Cu-Ag w obszarze przedsudeckim.

Słowa kluczowe: złoża rud miedzi i srebra, graniczne wartości parametrów złoża, szacowanie zasobów, mineralizacja, cechsztyń

The paper presents experience in documenting deep copper and silver deposits of the Fore-Sudetic Monocline, gained during the implementation of a prospecting program conducted by companies from the Miedzi Copper Corp. group. Analyses of historical geological materials followed by a drilling program for prospecting and exploration (since 2013) led to the discovery of three new copper and silver deposits: Nowa Sól, Sulmierzyce North and Mozów. Two of them have already been documented: the Nowa Sól deposit in the C_2 category and the Sulmierzyce North deposit in the C_2+D categories, with the Nowa Sól documentation already approved by the geological administration authority.

Concessions included in the Nowa Sól deposit are objects of continuing drilling operations. Their aim is to document this deposit in the C_1 category, which would allow an application for a mining concession.

The basic problem with documenting these deposits includes the development of investor's own threshold values of parameters that define a mineral deposit and its boundaries, due to the position of both documented deposits at depths exceeding 1500 m, as well as the increasing temperature and pressure of rock mass. These parameters were proposed on the basis of pre-feasibility studies prepared before the implementation of the drilling program, which had been updated several times in accordance with changing economic conditions and experiences earned from existing deep mines all around the world. As a result, the preliminary assumptions were modified multiple times, and the influence of new technologies on the threshold values of parameters turned out to be more important than previously considered factors, such as higher productivity of the deposit, thickness and percentage of a useful element.

Furthermore, an analysis of Cu-Ag deposits documented so far in the fore-Sudetic area was performed in order to assess the factual impact of parameters like the kilometre grid and the number of drilled boreholes on the accuracy and amount of calculated resources.

Keywords: copper and silver deposits, parameters defining a mineral deposit, estimation of resources, mineralisation, Zechstein

Historia dokumentowania złóż Cu-Ag na monoklinie przedsudeckiej

Historia dokumentowania złóż Cu-Ag w Nowym Zagłębiu Miedziowym miała niespotykaną dynamikę. Od odkrycia złoża Sieroszowice-Lubin zapoczątkowanego wierceniem S1 w 1957 r. upłynęły zaledwie dwa lata do momentu, kiedy Jan Wyżykowski 4 kwietnia 1959 r. przedłożył jego dokumentację w ówczesnej kategorii C_2 . Na olbrzymim obszarze obejmującym blisko 170 km² wykonano zaledwie 23 otwory, z których 6 było negatywnych. Siatka wierceń była bardzo nieregularna i w większości przekraczała 3 x 3 km, zaś zasoby określono na 16,492 mln ton Cu i 36 tys. ton Ag (tab. 1). Trzeba przyznać, że decydenci wykazali się niezwykłą odwagą, a Minister Gospodarki zaledwie 6 miesięcy później podjął decyzję o budowie kopalni miedzi w Lubinie. Bazą tych odważnych decyzji były doświadczenia wynikające ze znajomości niemieckich złóż typu Kupferschiefer w Nieckach Mansfeldzkiej i Sangerhausen oraz polskie doświadczenia ze Starego Zagłębia Miedziowego.

Odwaga opłaciła się, gdyż w latach 1959, 1961 i 1962 wykonano 3 dokumentacje złóż Lubin, Polkowice i Sieroszowice o kategorii rozpoznania podniesionej do C_1+C_2 (lub tylko C_1 w przypadku Sieroszowice), dla obszaru zasadniczo pokrywającego się z udokumentowanym wcześniej w kategorii C_2 złożem Sieroszowice-Lubin. Nowe dokumentacje wykonane dla tego samego obszaru miały łączne zasoby tylko w kategorii C_1 na poziomie 16,08 mln t Cu, a łącznie z kategorią C_2 aż 18,807 mln t Cu. Oznacza to, że były wyższe, niż określono wcześniej w kategorii C_2 .

Dla dokumentowania złóż Cu-Ag typu stratoidalnego kluczowe jest poznanie głównych cech formy, budowy i tektoniki złoża oraz jakości kopaliny, a także wstępne określenie warunków geologiczno-górnich eksploatacji. Ponieważ stopień poznania tych parametrów często ma charakter subiektywny, dla zobiektywizowania oceny poznania złoża zastosowano kryterium, jakim jest błąd oszacowania średnich wartości parametrów złoża i zasobów, określony na podstawie badań statystycznych.

Uważna lektura informacji zawartych w tabeli 1 wskazuje, że dodatkowe wiercenia i zagęszczanie siatki otworów zazwyczaj podnoszą wielkość udokumentowanych zasobów, natomiast nigdy nie kończą się ich zmniejszeniem. Sześćdziesiąt lat skutecznej eksploracji prowadzonej na monoklinie przedsudeckiej potwierdza, że siatka 3 x 3 km jest w pełni wystarczająca dla udokumentowania zasobów w tym obszarze. Potwierdza się, że złoża te wykazują się niespotykaną regularnością i powtarzalnością wyników wierceń w makroskali, pomimo niekiedy znacznej zmienności w mikroskali, za czym przemawiają także obserwacje w istniejących zakładach górniczych.

Analizując stosunek liczby otworów negatywnych do pozytywnych można łatwo poczynić dwie obserwacje. Po pierwsze, większa ilość otworów negatywnych zdarza się jedynie na wstępnych etapach rozpoznania złoża, kiedy nie są jeszcze określone jego granice z utlenioną facją Rote Fäule i wyniesieniami podłoża (blok przedsudecki, wyniesienie wolsztyńskie), np. w obszarze Głogów I (42 otwory wiertnicze w tym 13 negatywnych). Drugim przypadkiem są obszary na samym kontakcie z facją Rote Fäule (Gaworzyce – 29 otworów wiertniczych w tym 16 negatywnych; Radwanice – 23 otwory wiertnicze w tym 9 negatywnych; Żukowice-Jaczów – 49 otworów wiertniczych w tym 14 negatywnych) lub takie, gdzie facja utleniona położona jest bardzo wysoko w profilu horyzontu zmineralizowanego (nowe złożo Sulmierzyce Północ), gdzie nie występuje mineralizacja w obrębie białego spągowca.

Tabela 1 pokazuje również dobitnie, że udokumentowanie nowego złoża (np. złożo Sieroszowice-Lubin) jest możliwe na podstawie znacznie mniejszej liczby otworów wiertniczych niż w sąsiedztwie już stwierdzonych złóż (pozostałe dokumentacje w sąsiedztwie złoża Sieroszowice-Lubin). Przykładem może być dokumentacja geologiczna złoża Żukowice-Jaczów w kategorii C_1 , w której do wyznaczenia granic złoża i oszacowania jego zasobów wykorzystano w sumie 49 wierceń, z czego 18 było archiwalnych, a 30 nowych. Z kolei do udokumentowania złoża rud miedzi Głogów I w kategorii C_2 użyto danych geologicznych pochodzących w sumie z 42 wierceń, z czego 20 z nich wykonano wcześniej w ramach prac rozpoznawczych na złożach Rudna i Sieroszowice II.

Nie jest możliwe prowadzenie rozpoznania złóż na znacznych głębokościach bez analizy ekonomicznej programu wierceń. Koszt przeciętnego wiercenia do głębokości około 2000 m, to w przybliżeniu 7 milionów złotych. W przypadku wykonywania dodatkowych badań hydrogeologicznych, geofizycznych i gazowych koszty wiercenia dochodzą do 9-10 milionów złotych. Od tej kwestii nie sposób się odwrócić, gdyż we współczesnej eksploracji, prowadzonej przez inwestorów, a nie państwo, jak miało to miejsce w przeszłości, konieczne jest limitowanie ilości otworów z powodów budżetowych, zwłaszcza przy rosnących głębokościach wierceń. Biorąc pod uwagę aspekt ekonomiczny, możliwe jest znacznie tańsze uszczegółowienie wiedzy o złożu dzięki wierceniom podziemnym wykonywanym w jego horyzoncie na etapie eksploatacji. Otwory takie są nie tylko źródłem informacji złożowych, ale i obserwacji istotnych z uwagi na zagrożenia wodne i gazowe.

Tab. 1. Lista wybranych archiwalnych dokumentacji geologicznych stratoidalnych złóż rud miedzi i srebra na terenie monokliny przedsudeckiej w Polsce (w nawiasach kolorem czerwonym przedstawiono liczbę otworów negatywnych)
 Tab. 1. List of selected historical geological documentations of stratiform copper and silver ore deposits of the Fore-Sudetic Monocline in Poland (red colour in brackets indicates the number of negative boreholes)

Rok	Tytuł dokumentacji; autor	Kategoria	Liczba otworów wiertniczych	Zasoby (według pierwszej dokumentacji)	Powierzchnia udokumentowanego złoża	Siatka wiertnicza
1959	Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi Sieroszowice-Lubin w rejonie Głogowa i Legnicy; Wyżykowski	C ₂	23 (6)	16,492 Mt Cu, 36 kt Ag	około 170 km ²	Nierównoległa siatka wierceń; większość 3x3 km, 4 otwory w siatce 1,1 km
1959	Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi rejon Lubin; Hammer i Tomaszewski	C ₁ + C ₂	30 (11 z C ₂)	5,155 Mt Cu (C ₁) 1,522 Mt Cu (C ₂) 40 kt Ag (C ₁) 14 kt Ag (C ₂)	55,9 km ² C ₁	1,10 km - 3,00 km
1961	Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi rejon Polkowice; Hammer i Tomaszewski	C ₁ + C ₂	36 (4 z C ₂)	7,107 Mt Cu C ₁ ; 1,205 Mt Cu C ₂ ; 17,5 kt Ag C ₁ +C ₂	58,8 km ² C ₁ + C ₂ w tym: 50,6 km ² C ₁	1,10 km - 1,50 km
1962	Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi rejon Sieroszowice; Tomaszewski i Priedl	C ₁	41 (6 z C ₂)	3,818 Mt Cu	53,9 km ²	1,10 km - 1,50 km
1973	Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi monokliny przedsudeckiej, obszar po upadzie; Priedl, Kasiarz, Grzechnik, Dobrzyński	C ₁ + C ₂	41 (2)	7,700 Mt Cu 17 kt Ag	60 km ² C ₁ + C ₂ w tym: 55,9 km ² C ₁	1,30 km - 1,70 km
1975	Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi północno-zachodniej części kopalni Sieroszowice oraz pola f-1 kopalni Sieroszowice II; Priedl, Kasiarz, Krzanowski	C ₁ + C ₂	57 (2)	7,037 Mt Cu S-I (C ₁) 16,6 kt Ag 1,767 Mt Cu S-II (C ₁ + C ₂) 6,9 kt Ag	59,867 km ² S-I (C ₁) 13,825 km ² S-II (C ₁ + C ₂)	0,76 km - 2,86 km
1976	Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi „Głogów I”; Priedl i Mikula	C ₂	42 (13)	9,649 Mt Cu 38 kt Ag	93,5 km ²	2,38 km - 3,80 km
1978	Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi „Głogów II”; Drozdowski i Falecki	C ₂	16 (3)	3,736 Mt Cu 15 kt Ag	39,43 km ²	2,64 km - 3,35 km
1979	Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi „Żukowice-Jaczków”; Priedl	C ₁	49 (14)	4,498 Mt Cu 14 kt Ag	36,786 km ²	0,90 km - 1,91 km

Rok	Tytuł dokumentacji; autor	Kategoria	Liczba otworów wiertniczych	Zasoby (według pierwszej dokumentacji)	Powierzchnia udokumentowanego złoża	Siatka wiertnicza
1984	Dokumentacja geologiczna złożeń rud miedzi obszaru „Malomice”; Kisielewski, Mirocka, Madej, Kawalec, Orłowski, Boratyn	C ₁	45 (11)	1 Mt Cu 12 kt Ag	34,2 km ²	1,10 km - 2,20 km
1985	Dokumentacja geologiczna złożeń rud miedzi obszaru „Gaworzyce”; Kisielewski, Kawalec, Bąkowska, Boratyn	C	29 (16)	1,467 Mt Cu 1,155 kt Ag	48,2 km ²	b.d.
1985	Dokumentacja geologiczna złożeń rud miedzi obszaru „Radwanice”; Kisielewski	C ₁	23 (9)	0,798 Mt Cu	12,8 km ²	Gęsta siatka otworów wiertniczych na niewielkiej powierzchni; odległości od 1300 do 700 metrów
1986	Dokumentacja geologiczna złożeń rud miedzi „Głogów III”; Wirth	C ₂	31 (9)	6,407 Mt Cu 19 kt Ag	77,9 km ²	Dominuje siatka wierzeń 3x3 km; południowa część złożeń udokumentowana siatką wierzeń 1,5x1,5 km
1995	Dokumentacja geologiczna w kategorii C ₁ + C ₂ + D ₁ złożeń rud miedzi „Retków-Ścinawa”; Neumann	C ₁ + C ₂ + D	86 (16)	5,894 Mt Cu, 18,94 kt Ag (Retków) 2,883 Mt Cu, 14,97 kt Ag (Ścinawa)	Retków: 18,08 km ² C ₂ 47,44 km ² C ₂ Ścinawa: 58,98 km ² C ₂ 10,33 km ² D	Retków: 1,5x1,5 km Retków-Ścinawa: 1,5x1,5 km oraz 3x3 km Ścinawa: od 3x3 km nawet do 5x5 km
1998	Dokumentacja geologiczna złożeń rud miedziowo-srebrnych „Głogów Głęboki”; Przeniosło	C ₁	97	14,925 Mt Cu 53,45 kt Ag	109,79 km ²	Większość złożeń udokumentowana w siatce wierzeń 1,5x1,5 km

Ustanowienie kryteriów inwestorskich

Przy sporządzaniu dokumentacji geologicznej złoża należy kierować się parametrami definiującymi złożę kopaliny i jego granice, określonymi w *Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2015 r. w sprawie dokumentacji geologicznej złoża kopaliny, z wyłączeniem złoża węglowodorów* (Dz. U. z 15 lipca 2015, poz. 987). W praktyce oznaczają one warunki, których spełnienie powoduje, że można oczekiwać, iż dane złożę kopaliny może być eksploatowane w sposób przynoszący korzyść gospodarczą. Parametry ustanowione dla stratoidalnych złóż rud miedzi przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Graniczne wartości parametrów definiujących złożę i jego granice dla pokładowych stratoidalnych złóż rud miedzi według Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2015 r.

Tab. 2. The threshold values of parameters defining an ore deposit and its boundaries for bed-hosted stratiform copper ore deposits according to the Regulation of Minister of Environment dated 1 July 2015

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartość brzeżna
1	Maksymalna głębokość spągu złoża	m	1500
2	Minimalna zawartość miedzi (Cu) w próbce konturującej złożę	%	0,5
3	Minimalna średnia ważona zawartość ekwiwalentna miedzi (Cu) z uwzględnieniem zawartości srebra (Ag) w profilu złoża wraz z przerostami $Cu_e = (\%Cu) + 0,01 (g/t Ag)$	%	0,5
4	Minimalna zasobność złoża (Cu_e)	kg/m ²	35

Paragraf 5 punkt 4 ww. Rozporządzenia podaje, iż zastosowanie innych wartości parametrów definiujących złożę kopaliny i jego granice „jest możliwe w przypadkach wystąpienia szczególnych warunków geologicznych i wymaga uzasadnienia w części tekstowej sporządzanej dokumentacji geologicznej złoża kopaliny”. Sformułowanie to nie jest do końca precyzyjne, gdyż w większym stopniu od warunków geologicznych wpływ na możliwość opłacalnej eksploatacji ma dysponowanie odpowiednią technologią, umożliwiającą ekonomicznie opłacalne wydobywanie. Tym samym powinno się w tym miejscu wymienić raczej warunki techniczno-ekonomiczne, a nie geologiczne (Szamałek i Zglinicki 2018, Zieliński 2019). Tym niemniej, kierując się obecnymi przepisami, należy bezsprzecznie uznać, że złoża dokumentowane przez Miedzi Copper Corp. charakteryzują się „szczególnymi warunkami geologicznymi” ze względu na ich głębokość spągu, w każdym wypadku przekraczające wskazaną w tabeli 1 wartość 1500 m. Powstała sytuacja narzuciła konieczność opracowania własnych parametrów, w dalszej części tekstu nazywanych „kryteriami inwestorskimi” lub „parametrami inwestorskimi”.

Podstawowym zadaniem kryteriów inwestorskich jest umożliwienie ekonomicznie opłacalnego wydobywania kopaliny i jej przeróbki. Dlatego też przy ich doborze kierowano się wynikami opracowań typu „pre-feasibility study” sporządzonych

specjalnie w tym celu przez firmę RungePincockMinarco, światowego eksperta w dziedzinie projektowania głębokich kopalń (Goodell i in. 2017, Bohnet i in. 2017). Wzięto w nich pod uwagę fakt, że dla przyszłej eksploatacji omawianych złóż planuje się wdrożenie najnowszych technologii górniczych, umożliwiających dostęp do złóż głębokich. Należą do nich podziemna przeróbka kopaliny i wyносzenie na powierzchnię koncentratu, stosowanie technologii pasty do podszadania wyrobisk poeksploatacyjnych, zdalnie sterowane maszyny elektryczne i nowoczesne metody klimatyzacji z użyciem lodu (tzw. ice slurry). Technologie te opisano bardziej szczegółowo poniżej.

W najważniejszym spośród tych opracowań (Goodell i in. 2017) rozważono różne warianty głębokości położenia poszczególnych złóż. Ustalono, iż w przypadku eksploatacji na głębokości ok. 1900 m koszty wydobywania wyniosą 39,51 USD na tonę rudy przy jej podziemnej przeróbce. Z kolei dla złoża położonego do głębokości 2400 m będą one wynosić 39,92 USD, co stanowi wzrost kosztów zaledwie o 1%. Koszty przeróbki podziemnej i transportu na powierzchnię koncentratu wyniosą odpowiednio 8,85 i 8,95 USD za tonę przerobionej rudy dla głębokości 1900 i 2400 m, natomiast łączne koszty operacyjne dla tych dwóch głębokości wyniosą odpowiednio 2670 i 2703 USD/t miedzi. Wszystkie kwoty oszacowano zakładając niezmiennie w okresie 10 lat ceny miedzi równe 3 USD/funt (6614 USD/t) i ceny srebra równe 20 USD/uncję (643 USD/kg). W opracowaniach tych wykonano także symulacje kosztów dla przeróbki na powierzchni, które ku zaskoczeniu inwestora okazały się być wyższe w stosunku do przeróbki podziemnej.

W oparciu o powyższe wyliczenia Miedzi Copper Corp. przygotowała własne parametry inwestorskie, umożliwiające ekonomicznie racjonalną eksploatację złóż głębokich wyznaczonych za ich pomocą. Kryteria te przedstawiono w tabeli 3.

Najważniejsze zmiany dotyczyły zwiększenia maksymalnej głębokości spągu złoża do 2600 m oraz zwiększenia minimalnej zasobności złoża, która uzależniona jest od głębokości. Takie zróżnicowanie wartości granicznej zasobności wynika z kosztów klimatyzacji i innych dodatkowych wydatków rosnących wraz z głębokością wydobywania w górnictwie podziemnym. Jej podniesienie w stosunku do wartości podanej w Rozporządzeniu jest spowodowane koniecznością koncentrowania się na rudzie o wyższej jakości niż przy złożach płytszych. Głębokość 2400 m przyjęta w omawianym opracowaniu (Goodell i in. 2017) do dalszych badań jest wartością przybliżoną, ponieważ oczywiste jest, że żadne złożę nie występuje na stałym poziomie, toteż w praktyce mogą występować głębokości przekraczające tę wartość. Zaproponowana w parametrach inwestorskich głębokość maksymalna równa 2600 m dotyczy złoża Mozów, dokumentowanego obecnie przez MCC. Pozostałe dwa złoża udokumentowane przez inwestora (Sulmierzyce Północ i Nowa Sól) położone są płycej niż 2400 m. W związku z tym, dla szczególnego przypadku, jaki stanowi złożę Mozów, dla głębokości 2400-2600 m konieczne było wprowadzenie najbardziej zaostrzonego wymogu minimalnej zasobności. Wynosi ona 100 kg/m², a więc około 286% wartości podanej w Rozporządzeniu. Powinno to zagwarantować możliwość opłacalnej ekonomicznie przyszłej eksploatacji tych części złoża Mozów, które położone są głębiej niż 2400 m.

Tab. 3. Inwestorskie graniczne wartości parametrów definiujących złożę i jego granice dla głębokich pokładowych stratoidalnych złóż rud miedzi (zasoby bilansowe)

Tab. 3. Investor's threshold values of parameters defining an ore deposit and its boundaries for bed-hosted stratiform copper ore deposits (economic resources)

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartość brzeżna
1	Maksymalna głębokość spągu złoża	m	2600
2	Minimalna zawartość miedzi (Cu) w próbce konturującej złożę	%	0,3
3	Minimalna średnia ważona zawartość ekwiwalentna miedzi (Cu) z uwzględnieniem zawartości srebra (Ag) w profilu złoża wraz z przerostami $Cu_e = (\%Cu) + 0,01 (g/t Ag)$	%	0,5
4	Minimalna zasobność złoża (Cu_e) dla głębokości spągu interwału rudnego ≤ 1900 m	kg/m ²	50
5	Minimalna zasobność złoża (Cu_e) dla głębokości spągu interwału rudnego 1900-2400 m	kg/m ²	60
6	Minimalna zasobność złoża (Cu_e) dla głębokości spągu interwału rudnego 2400-2600 m	kg/m ²	100

Takie zaostrożenie kryteriów wynika bezpośrednio z analiz i symulacji przeprowadzonych w ramach w/w opracowań techniczno-ekonomicznych. Zmniejszenie minimalnej zawartości miedzi w próbce konturującej złożę nie ma większego wpływu na opłacalność wydobywania, gdyż wartość ta jest drugorzędna w stosunku do zasobności. Przyjęta wartość 0,3% pozwoli na włączenie do złoża spągowych i/lub stropowych partii, które zazwyczaj i tak są wybierane ze względu na budowę i wymiary urzędzeń górniczych, jednocześnie likwidując problem ich nieuwzględnienia w ogólnej wielkości zasobów. Należy też zwrócić uwagę, że minimalna średnia ważona zawartość ekwiwalentna miedzi z uwzględnieniem zawartości srebra w profilu złoża wraz z przerostami pozostała niezmienną w stosunku do parametrów określonych w omawianym Rozporządzeniu.

Rozporządzenie Ministra Środowiska dopuszcza także opcjonalne udokumentowanie zasobów pozabilansowych, które w odróżnieniu od bilansowych nie spełniają granicznych wartości parametrów definiujących złożę. O ile górne kryterium wyznaczania takich zasobów jest tu zrozumiałe, o tyle rozporządzenie nie określa kryterium dolnego, tj. granicy między zasobami pozabilansowymi a skałą płoną. Z tego powodu ustalono także parametry inwestorskie dla zasobów pozabilansowych. Zostały one przedstawione w tabeli 4.

Minimalną zasobność złoża dla zasobów pozabilansowych przyjęto na poziomie 35 kg/m², co odpowiada minimalnej zasobności dla zasobów bilansowych, ale położonych płycej (< 1500 m) według Rozporządzenia Ministra Środowiska (patrz tabela 2). Zasobność maksymalna odpowiada zasobno-

Tab. 4. Inwestorskie graniczne wartości parametrów definiujących złożę i jego granice dla głębokich pokładowych stratoidalnych złóż rud miedzi (zasoby pozabilansowe)

Tab. 4. Investor's threshold values of parameters defining an ore deposit and its boundaries for bed-hosted stratiform copper ore deposits (sub-economic resources)

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartość brzeżna
1	Maksymalna głębokość spągu złoża	m	2600
2	Minimalna zawartość miedzi (Cu) w próbce konturującej złożę	%	0,3
3	Minimalna średnia ważona zawartość ekwiwalentna miedzi (Cu) z uwzględnieniem zawartości srebra (Ag) w profilu złoża wraz z przerostami $Cu_e = (\%Cu) + 0,01 (g/t Ag)$	%	0,5
4	Minimalna zasobność złoża (Cu_e) dla głębokości spągu interwału rudnego 1500 - 2600 m	kg/m ²	35
5	Maksymalna zasobność złoża (Cu_e) dla głębokości spągu interwału rudnego 1500 - 1900 m	kg/m ²	50
6	Maksymalna zasobność złoża (Cu_e) dla głębokości spągu interwału rudnego 1900 - 2400 m	kg/m ²	60
7	Maksymalna zasobność złoża (Cu_e) dla głębokości spągu interwału rudnego 2400 - 2600 m	kg/m ²	100

ści minimalnej dla złoża bilansowego (patrz tabela 3).

Kopalnie oparte na głębokich złożach miedzi funkcjonują z powodzeniem w różnych miejscach świata. Należy do nich kopalnia Kidd Creek w Kanadzie eksploatująca złożę na głębokości 3100 m, co czyni ją najgłębszą kopalnią rud miedzi na świecie.

Współczesną tendencją górnictwa rud miedzi jest wydobywanie głębiej położonych bardziej zasobnych rud, niż leżących płycej, ale o niższej zawartości procentowej Cu. Rentowność tego typu kopalń uzależniona jest od zastosowania nowoczesnych systemów głębienia szybów, wentylacji i klimatyzacji oraz odzysku ciepła. Do innowacyjnych rozwiązań umożliwiających głębokie górnictwo rud Cu-Ag należą umieszczenie zakładu przeróbki rud pod ziemią oraz tzw. technologia pasty (wykorzystanie odpadów poflotacyjnych do podsadzania wyrobisk) (Speczik 2015, Zieliński i Speczik 2017). Rozwiązanie to pozwala na pozostawienie większości odpadów górniczych i procesowych w wyrobiskach podziemnych, przy wynoszeniu na powierzchnię gotowych koncentratów. Dzięki temu unika się tworzenia rozległych zbiorników odpadów poflotacyjnych na powierzchni ziemi, takich jak Żelazny Most w Polsce. Technologię pasty wykorzystują już liczne kopalnie rud miedzi na świecie, należące do spółek takich jak: ValeInco's Garson (Kanada), Wu Shan (Chiny),

MAK Mining (Mongolia), Andina (Chile), Esperanza (Chile), Coemin (Chile), Caserones (Chile), Rosemont (USA), Lisheen (Irlandia), Boulby (Wielka Brytania).

Eksploatacja złóż głębokich związana jest także z koniecznością klimatyzacji i skutecznej wentylacji podziemnych wyrobisk górniczych. Na podstawie pomiarów wykonanych w otworach wiertniczych Miedzi Copper Corp. ustalono, że średnia temperatura górotworu to 60°C, a w głębszych partiach złóż sięga ona 70°C. Takie warunki termiczne powodują, że bez odpowiedniego obniżenia temperatury w wyrobiskach za pomocą specjalnych instalacji chłodzących nie byłoby możliwe prowadzenie prac wydobywczych przez ludzi. Do osiągnięcia tego celu używa się różnych technik, m.in. zimnej wody, jednak najefektywniejszym i stosowanym z sukcesami w różnych miejscach na świecie rozwiązaniem jest chłodzenie kopalń za pomocą zatłaczanego granulatu lodowego (Zieliński i Speczik 2017). Na całym świecie stosowanie lodu jako czynnika chłodzącego w górnictwie umożliwia osiąganie coraz większych głębokości wydobywania przy jednoczesnym obniżeniu kosztów pompowania i zmniejszeniu rozmiarów stosowanego do tych celów sprzętu (Bellas, Tassou 2005).

Z prowadzeniem prac wydobywczych na tak dużych głębokościach wiąże się także konieczność zastosowania na szeroką skalę automatyzacji i zdalnego sterowania maszyn górniczych. Zmniejszenie liczby osób pracujących pod ziemią w niesprzyjających warunkach będzie tu jednak rekompensowane większą liczbą pracowników nadzorujących system informatyczny (Speczik 2015). Dla przyszłej eksploatacji omawianych poniżej złóż „Nowa Sól” i „Sulmierzyce Północ”, w przygotowanych opracowaniach typu *pre-feasibility study* (Goodell i in. 2017, Bohnet i in. 2017) przewidziano stosowanie maszyn o napędzie elektrycznym. Zredukuje to wymaganą ilość powietrza dostarczanego do kopalni i obniży koszty klimatyzacji w porównaniu z użyciem tradycyjnych maszyn wyposażonych w silniki spalinowe.

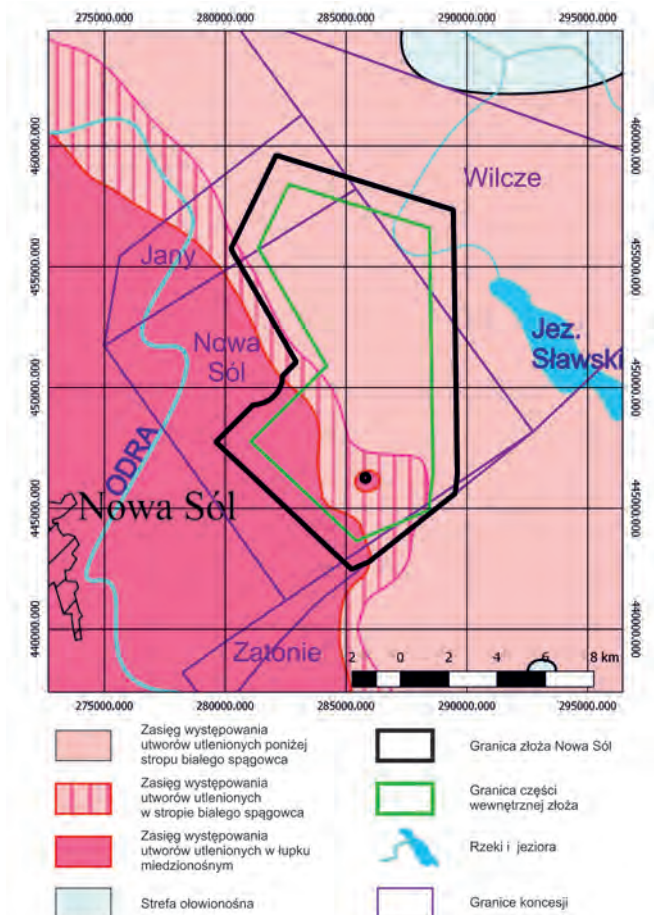
Dzięki uwzględnieniu obecnego stopnia zaawansowania technologicznego i dostępnych innowacji w górnictwie możliwe było wyznaczenie inwestorskich parametrów konturowania złóż głębokich, które racjonalnie uzasadniają możliwość ich ekonomicznie opłacalnego zagospodarowania. Należy zwrócić uwagę, że zaproponowane kryteria inwestorskie spotkały się z pozytywnym odbiorem organu administracji geologicznej (Minister Klimatu), który decyzją z dnia 12 lutego 2020 r. zatwierdził dokumentację geologiczną złoża Nowa Sól, w której zastosowano przedstawione parametry dla zasobów bilansowych.

W dalszej części artykułu przedstawiono wykorzystanie w praktyce parametrów inwestorskich przy dokumentowaniu przez Miedzi Copper Corp. (MCC) dwóch złóż – Nowa Sól i Sulmierzyce Północ. Prace nad przygotowaniem dokumentacji trzeciego złoża (Mozów) są w toku, w związku z czym nie jest ono uwzględnione w niniejszej publikacji; planowane jest poświęcenie mu odrębnego materiału w przyszłości.

Złoże „Nowa Sól”

Złoże „Nowa Sól” znajduje się na obszarze czterech koncesji poszukiwawczych i poszukiwawczo-rozpoznawczych: Nowa Sól, Jany, Zatonie oraz Wilcze (rys. 1). W ramach realizacji projektów robót geologicznych, zmierzających do jego udokumentowania, na terenie wymienionych koncesji

wykonano łącznie 20 otworów wiertniczych (14 na koncesji Nowa Sól, 3 na koncesji Jany, 2 na koncesji Zatonie oraz 1 na koncesji Wilcze). W wyniku późniejszych zmian koncesji Jany oraz Zatonie dwa otwory znalazły się poza ich granicami, w związku z czym na obszarze prac dokumentacyjnych zlokalizowanych jest 18 otworów wykonanych przez spółki z grupy MCC. Spośród nich 16 otworów dało pozytywny wynik i znajdują się one w granicach złoża „Nowa Sól”. Do obliczenia zasobów wykorzystany został także otwór archiwalny Bojadła 1 (znajdujący się w granicach koncesji Jany), co daje łącznie 17 otworów na obszarze złoża.



Rys. 1. Granice koncesji należących do spółek z grupy Miedzi Copper Corp. wraz z wyznaczonymi granicami złoża „Nowa Sól” na tle strefowości otworów utlenionych

Fig. 1. Boundaries of concessions belonging to the companies of Miedzi Copper Corp. along with the demarcated boundaries of the „Nowa Sól” deposit against the zonation of oxidised sediments

Na przełomie lat 50-tych i 60-tych XX w. Państwowy Instytut Geologiczny (PIG) wykonał szereg wierceń w południowo-zachodniej części monokliny przedsudeckiej, głównie w rejonie Kożuchowa, jednak w otworach tych stwierdzono utwory utlenione bez mineralizacji kruszcowej. Tylko w jednym z tych otworów – Kożuchów IG-1 – wykazano wysokie koncentracje miedzi. W końcu lat 70-tych XX w. PIG zrealizował kolejny projekt poszukiwań rud miedzi w rejonie Kożuchowa, wykonując 9 odwiertów wokół wcześniej wykonanego pozytywnego otworu Kożuchów IG 1, lecz żaden z nich nie ujawnił obecności mineralizacji kruszcowej, gdyż w otworach tych spągowe utwory cechsztynu wykształcone są w facji utlenionej (Oszczepalski i in. 1982). W wyniku tych prac wytyczono rozległą strefę Rote Fäule, tzw. zielonogórskie pole utlenione.

Mimo istnienia przesłanek świadczących o możliwości

występowania mineralizacji miedziowo-srebrzej w granicach dzisiejszego obszaru koncesyjnego Nowa Sól, wynikających z rozmieszczenia pól utlenionych facji Rote Fäule, nie znajdował się tam żaden otwór archiwalny, w którym możliwe byłoby zbadanie jego potencjału złożowego. Obszar ten nie był wskazywany także w żadnym z opracowań przedstawiających prognozy występowania mineralizacji Cu-Ag (np. Wołkowicz i in. 2011). Tym samym złożo „Nowa Sól” jest niepodważalnym odkryciem typu *greenfield* dokonany przez MCC, której prace doprowadziły do udokumentowania pierwszego głębokiego złoża rud miedzi i srebra na monoklinie przedsudeckiej (Speczik 2019).

Pierwszy etap robót wiertniczych prowadzono od 2014 r. do maja 2019 r. Zostały one poprzedzone wnikliwą analizą dostępnych materiałów geofizycznych. Wykonano reprocessing archiwalnych danych grawimetrycznych oraz sejsmicznych. Dane sejsmiczne zostały przekształcone z użyciem metody efektywnych współczynników odbicia (EWO) (Speczik i in. 2012).

Biorąc pod uwagę wielkość zielonogórskiego pola utlenionego, wykonanie pierwszego otworu na koncesji Nowa Sól w pierwszej połowie 2014 r. obarczone było dużym ryzykiem, tym bardziej, że był on poprzedzony wywierceniem negatywnego otworu na obszarze przylegającej od północy koncesji Jany. Z tego powodu otwór Nowa Sól C1 wykonano przezornie w znacznej odległości od zachodniej granicy koncesji. Decyzja ta okazała się słuszna, gdyż trafił on na bogatą mineralizację występującą w obrębie spągowej części wapienia cechsztyńskiego oraz w łupku miedzionośnym (interwał o miąższości 4,55 m, zasobność Cu_e 281 kg/m²). Skład i charakter napotkanej bardzo bogatej mineralizacji miedziowo-srebrzej sugerował bezpośrednie sąsiedztwo facji Rote Fäule, co potwierdzają także liczne przykłady z eksploatowanych złóż Nowego Zagłębia Miedziowego. Tym samym, wywiercenie otworu zlokalizowanego dalej na zachód z dużym prawdopodobieństwem mogłoby skończyć się wynikiem negatywnym, a w efekcie oznaczać nawet niepowodzenie całego projektu poszukiwawczego.

Kolejne wykonane otwory (NS C3 i C4 – na północno-zachód i na północ od pierwszego otworu) potwierdziły, iż rozpoznawana strefa znajduje się w pobliżu granicy obszaru utlenionego. W otworze NS C3 mineralizacja przesuwana wyżej w profilu i występuje w środkowej części wapienia cechsztyńskiego, natomiast w otworze NS C4 obejmuje ona cały wapień oraz łupek miedzionośny. W związku z uzyskanymi wynikami siatka wierceń została przeprojektowana tak, aby rozpoznać złożo przede wszystkim w kierunku północnym oraz północno-wschodnim, nie ryzykując natrafienia na zielonogórskie pole utlenione.

Dalsze prace wiertnicze (otwory C16, C12, C22, C13 i C2) potwierdziły prawidłowość, iż obszar złożowy rozciąga się w pasie o przebiegu NW-SE, wzdłuż granicy zielonogórskiego pola utlenionego. Otwór NS C13, leżący na przedłużeniu linii wyznaczonej przez otwory NS C1 i NS C3, podobnie jak one zawiera mineralizację występującą w obrębie całości wapienia cechsztyńskiego oraz stropowej części łupka miedzionośnego. W otworach C16, C12, C22 i C2 mineralizacja przesuwana niżej w profilu, co świadczy o oddalaniu się od obszaru utlenionej facji Rote Fäule. Interwał zmineralizowany obejmuje w wymienionych otworach przede wszystkim piaskowiec (biały spągowiec) i łupek, a w mniejszym stopniu spągową część wapienia cechsztyńskiego.

Najdalej wysuniętym na północny wschód otworem jest otwór Wilcze W1. Natrafił on na bogatą mineralizację miedziowo-cynkowo-olowiową występującą niemal wyłącznie w białym spągowcu. W związku z zanikaniem mineralizacji miedziowej w tym kierunku, uznano, iż otwór Wilcze W1 wyznacza granicę złoża od strony NE.

Celem kolejnych otworów było rozpoznanie złoża w kierunku północnym (NS C11, Jany C2 oraz Jany C3) oraz południowym (Zatonie C1). Jak wykazały dalsze prace, wiercenie w pobliżu granicy pola utlenionego jest ryzykowne – co pokazał negatywny otwór NS C17B, który nawiercił jedynie utwory utlenione. Otwór NS C11 trafił na centralną część pasa, w którym rozciąga się obszar złożowy „Nowa Sól”, gdzie mineralizacja występuje w trzech typach rud: węglanowej, łupkowej, oraz piaskowcowej. Położone dalej na północ otwory Jany C2 i Jany C3 wskazują ponownie na oddalanie się od obszaru utlenionego (w otworze Jany C2 mineralizacja występuje w większości w piaskowcu i jedynie w niewielkim stopniu w łupku i wapieniu, natomiast w otworze Jany C3 obejmuje ona jedynie krótki interwał w piaskowcu i łupku).

Najnowsze otwory (C14B, C33, C25, C30) miały na celu zagęszczenie siatki wierceń w obrębie najbardziej perspektywicznej części rozpoznawanego złoża. Z czterech wykonanych otworów trzy okazały się pozytywne (otwór NS C33 został wyłączony z obszaru udokumentowanego złoża). Każdy z trzech pozytywnych otworów zawiera wszystkie trzy typy rudy.

W wyniku przeprowadzonych robót geologicznych powstała siatka wierceń, w której średnia odległość między otworami wynosi 2,09 km (gdzie minimalna odległość między dwoma otworami wynosi 1034 m, zaś maksymalna 5094 m). W praktyce dokumentowania w Polsce stratoidalnych złóż rud miedzi, w kategorii rozpoznania C₂ stosuje się zazwyczaj siatkę wierceń o wymiarach 3 km x 3 km, zaś dla kategorii C₁ siatkę 1,5 km x 1,5 km. Wedle tego podejścia, południowo-wschodnia część złoża „Nowa Sól”, w obrębie której siatka otworów wiertniczych zbliżona jest do 1,5 km x 1,5 km, mogłaby być zaliczona do kategorii rozpoznania C₁. Natomiast w północno-zachodniej części złoża rozmieszczenie otworów wiertniczych w siatce zbliżonej do 3 km x 3 km wskazywałoby na przynależność tego obszaru do kategorii rozpoznania C₂.

Jednakże, zgodnie z wymaganiami zawartymi w *Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2015 r. w sprawie dokumentacji geologicznej złoża kopaliny, z wyłączeniem złoża węglowodorów* (Dz. U. z 15 lipca 2015, poz. 987), jednym z warunków zakwalifikowania zasobów do określonej kategorii rozpoznania jest błąd oszacowania średnich wartości parametrów złoża i zasobów. Jak określa wyżej wymienione Rozporządzenie, dla kategorii rozpoznania C₂ błąd ten nie może przekraczać 40%, zaś dla kategorii C₁ – 30%.

Oszacowanie zasobów rudy i metali dla złoża „Nowa Sól” poprzedzono analizą statystyczną. Została ona wykonana pomimo ograniczonej liczby danych (otworów), ponieważ przedstawienie wykonanych badań statystycznych i ich wyników w dokumentacji geologicznej złoża jest jednym z wymogów narzuconych wspomnianym Rozporządzeniem. Charakterystykę zasobności rudy, miąższości złoża bilansowego oraz zasobności i zawartości metali w złożu bilansowym i seriach litologicznych wykonano dla danych z opróbowań rdzeni wiertniczych, uśrednionych odpowiednio w granicach serii litologicznych i złoża bilansowego. Ustalono, że współczynnik zmienności złoża wynosi 55,5% w przypadku zasobności rudy

oraz 55,8% w przypadku miąższości. Tym samym, analizowane złoża należy do grupy II z uwagi na stopień skomplikowania budowy i zmienność parametrów (wg Nieć 2012 – współczynnik zmienności dla tej grupy złóż mieści się w przedziale 30–60%).

Granice złoża „Nowa Sól” poprowadzono w odległości 1 km na zewnątrz linii łączących skrajne otwory pozytywne, co odpowiada w przybliżeniu połowie średniej odległości między otworami (rys. 1). Oddzielne obliczenia statystyczne wykonano dla części ekstrapolowanej (położonej między granicą złoża a linią konturującą otwory pozytywne – tzw. konturem wewnętrznym) i dla części wewnętrznej złoża (położonej w granicach konturu wewnętrznego). Obszar złoża został pomniejszony o fragmenty znajdujące się poza granicami koncesji i strefy niespełniające parametrów inwestorskich. Rozmieszczenie punktów rozpoznania (otworów) jest nieregularne, ale w miarę jednolicie pokrywa obszar szacowania zasobów. Ponadto, jak wynika z analizy statystycznej, nieregularność ta nie wpływa na jakość rozpoznania złoża.

Na podstawie przeprowadzonego testu normalności Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha=0,05$ ustalono, że w przypadku zasobności rudy nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu tego parametru. Tym samym dokładność oszacowania zasobów rudy oceniono z klasycznej formuły statystycznej:

$$\varepsilon_w = t_{\alpha} \frac{v_q}{\sqrt{n}} [\%]$$

gdzie: v_q [%] – współczynnik zmienności, n – liczba danych (otworów), t_{α} – wartość zmiennej losowej rozkładu t-Studenta zależna od przyjętego poziomu prawdopodobieństwa $P=1-\alpha$ i liczby stopni swobody $df=n-1$; przykładowo dla $n=17$ punktów rozpoznania (otworów) wartość t wynosi: $t(\alpha=0,05, df=16) = 2,12$.

Błąd względny oszacowania średniej zasobności rudy i jednocześnie zasobów rudy w granicach konturu wewnętrznego dla poziomu prawdopodobieństwa $P=0,95$ obliczony tą metodą jest równy 28,5%. Wyznaczony błąd mieści się w przedziale 20-30% i zgodnie z wymaganiami zawartymi w ww. Rozporządzeniu, z punktu widzenia dokładności oszacowania zasobów rudy teoretycznie mógłby dać podstawę do zakwalifikowania części złoża w granicach konturu łączącego skrajne otwory pozytywne do kategorii C_1 . Należy zwrócić uwagę na niską wartość tego błędu pomimo faktu, iż wewnątrz tego konturu znajduje się zarówno SE część złoża o gęstej siatce wierceń, jak i NW część złoża, gdzie zagęszczenie otworów jest mniejsze. Wskazuje to na fakt, iż wspomniana wcześniej praktyka wiercenia otworów w siatkach 1,5 na 1,5 km oraz 3 km na 3 km nie ma charakteru uniwersalnego.

W przypadku zasobności Cu test normalności wykazał poważne odstępstwa rozkładu empirycznego od teoretycznego rozkładu normalnego. W takim przypadku celowe jest odwołanie się do przybliżonej, ale w praktyce w pełni uzasadnionej metody określanej w literaturze anglojęzycznej jako *bootstrapping*. W tym wypadku został on zastosowany do zbioru danych o małej liczebności, co jednak zostało narzucone z jednej strony wymogami Rozporządzenia Ministra Środowiska, narzucającego obowiązek analizy statystycznej, zaś z drugiej strony współczesnymi realiami prowadzenia prac poszukiwawczo-rozpoznawczych. Należy tu ponownie podkreślić, że ze względu na nakłady finansowe związane z wier-

ceniami inwestorzy dążą do osiągnięcia możliwie najlepszych wyników eksploracji przy jednoczesnym ograniczeniu liczby otworów do niezbędnego minimum. Wierceń poszukiwawczo-rozpoznawczych nie należy traktować jako podstawy do prac statystycznych, których celem byłoby pozyskanie możliwie jak największej ilości danych źródłowych. Przeciwnie, siatkę otworów należy zaplanować i na bieżąco modyfikować, tak by unikać wykonywania wierceń wykraczających poza niezbędny zakres prac, lub takich, co do których istnieje uzasadnione przypuszczenie wyniku negatywnego.

Obliczony metodą *bootstrapping* błąd względny oszacowania zasobów Cu dla poziomu prawdopodobieństwa $P=0,95$ wynosi 27,5%. Wyznaczony błąd również mieści się w przedziale 20-30% i ponownie z punktu widzenia dokładności oszacowania zasobów Cu mógłby teoretycznie stanowić podstawę do zakwalifikowania tej części złoża do kategorii C_1 .

Oddzielne analizy statystyczne wykonano dla części złoża położonej w pasie o szerokości 1 km na zewnątrz od konturu wyznaczonego skrajnymi otworami pozytywnymi. Wyznaczenie błędu oszacowania zasobów Cu ma tu charakter przybliżony z uwagi na konieczność ekstrapolacji wyników opróbowań. Błąd względny oszacowania zasobów obliczony z klasycznej formuły wynosi 31,6%. Według ww. Rozporządzenia Ministra Środowiska, uzyskany wynik z błędem z przedziału 30-40% pozwoliłby zakwalifikować zasoby Cu w pasie przyległym do konturu wewnętrznego do kategorii C_2 .

Jak widać z powyższego, zagęszczenie siatki otworów rozpoznawczych nie wpływa znacząco na zwiększenie dokładności oszacowania zasobów. Zarówno zasoby części złoża, na której otwory rozmieszczone są w siatce 1,5 km x 1,5, jak i tej, gdzie odległości między nimi są większe i odpowiadają siatce 3 km x 3 km, ze statystycznego punktu widzenia spełniają wymogi stawiane kategorii rozpoznania C_1 w granicach konturu wewnętrznego oraz C_2 na zewnątrz od niego.

Mimo to, przy sporządzaniu dokumentacji geologicznej złoża „Nowa Sól” zdecydowano, że na obecnym etapie jego rozpoznania całość zasobów zostanie udokumentowana w kategorii C_2 . Według wspomnianego Rozporządzenia, warunkiem uznania kategorii C_1 jest rozpoznanie złoża w stopniu umożliwiającym jego zagospodarowanie. Wymóg ten w chwili obecnej nie został jeszcze spełniony dla całości obszaru położonego w granicach konturu wewnętrznego, m.in. z powodu braku pewności co do interpretacji jego tektoniki. Tym samym, spełnienie wymogów dla tej kategorii z punktu widzenia uzyskanych wyników błędu względnego wskazuje na niedoskonałość metod statystycznych.

Należy jednakże zwrócić uwagę, że ilość przeprowadzonych dotychczas wierceń nie odbiega od zakresu prac, jakimi udokumentowano pierwotnie złożo Sieroszowice-Lubin, gdzie wykonano 17 otworów pozytywnych (tab. 1). Obecnie realizowane są dalsze otwory wiertnicze, które zagęszczają siatkę punktów rozpoznania na większym obszarze złoża, co pozwoli na podniesienie jego kategorii do C_1 .

Złożo „Sulmierzyce Północ”

Prace poszukiwawcze w tej części monokliny przedsięwzięte rozpoczęto w roku 2011 od reprocessingu profili sejsmicznych (metoda EWO) i punktów grawimetrycznych, oraz reinterpretacji danych z otworów archiwalnych wykonanych

na obszarze koncesji Sulmierzyce. W celu dokładniejszego rozpoznania potencjalnych miejsc występowania bogatej mineralizacji miedzionośnej w utworach cechsztynu dolnego, przed rozpoczęciem wierceń dodatkowo w terenie przeprowadzono eksperymentalne profilowanie magnetotelluryczne. Jego zadaniem było określenie zróżnicowania litologicznego kompleksów podcechsztyńskich oraz rozpoznanie głównych stref uskokowych w obrębie permo-mezozoicznego piętra strukturalnego w rejonie Sulmierzyc. Wyniki badania magnetotellurycznego były jednak niejednoznaczne.

Po realizacji pierwszej fazy prac poszukiwawczych zdecydowano się na lokalizację siatki wierceń w otoczeniu głębokiego otworu Sulmierzyce 1, zrealizowanego na zlecenie PIG w 1965 roku. Dzięki analizom materiałów archiwalnych ustalono, że w otworze tym występuje bardzo bogata mineralizacja miedziowa w interwale ponad 4 m. Program wiertniczy MCC prowadzono w latach 2013-2018. Wykonano w sumie pięć otworów wiertniczych o łącznym metrażu 9535,18 mb. Okruszcowanie dolnocechsztyńskiej serii miedzionośnej spełniło inwestorskie parametry definiujące złożo i jego granice w czterech wykonanych wierceniach. Do wyznaczenia granic złoża „Sulmierzyce Północ” oraz oszacowania jego zasobów wykorzystano także cztery otwory archiwalne, z których trzy również spełniły parametry inwestorskie dla zasobów bilansowych przedstawione w tabeli 3, a jednym wyznaczono zasoby pozabilansowe według parametrów określonych w tabeli 4. Dokumentację tego złoża przedłożono organowi administracji geologicznej w marcu 2020 r. i obecnie oczekuje ona na zatwierdzenie (Speczik 2020) (rys. 2).

Złożo „Sulmierzyce Północ” charakteryzuje się znaczną



Rys. 2. Lokalizacja złoża rud miedzi i srebra „Sulmierzyce Północ” na tle strefowości otworów utlenionych

Fig. 2. Location of the „Sulmierzyce North” copper and silver ore deposit against the zonality of oxidised sediments

zmiennością parametrów złożowych, wynikającą z położenia blisko nieregularnej granicy utworów Rote Fäule (chwaliszewskie pole utlenione na północy i ostrzeszowskie pole utlenione na południu). Wiercenia potwierdziły, że w obrębie całego złoża na niewielkiej powierzchni zazębiają się twory intensywnie zmineralizowane (np. pole wokół otworów Sulmierzyce 1 i Sulmierzyce C20) oraz twory płonne facji utlenionej (np. pole wokół otworu Sulmierzyce C19). Złożo „Sulmierzyce Północ” ze względu na swoje położenie przy granicy dwóch pól utlenionych cechuje się strefowością geochemiczną podobną do złoża Radwanice-Gaworzyce (Kisielewski 1985), gdzie strefa miedziowa może być lokalnie wzbogacona w cynk oraz ołów. Co więcej, w obszarze złoża seria miedzionośna zazębia się ze strefą cynkowo-ołowiową, a nie ze strefą ołowiową, jak ma to miejsce w złożach regionu Sieroszowice-Lubin (Piestrzyński 2007), czy ze strefą ołowiowo-srebrową, stwierdzoną w złożu Nowa Sól (Speczik 2019).

Omawiane złożo wyróżnia się spośród udokumentowanych na monoklinie przedsudeckiej stratyfikowanych złóż rud miedzi i srebra znaczną miąższością łupka miedzionośnego. Średnia miąższość rudy łupkowej w obrębie złoża wynosi 1,02 m, maksymalnie osiągając 1,50 m. W serii miedzionośnej dominuje bogato okruszczony łupek ze znaczną domieszką materiału węglanowego. Ze względu na skład chemiczny i cechy litologiczne wykazuje on znaczne podobieństwo do margla miedzionośnego Starego Zagłębia Miedziowego (Oszczepalski i Chmielewski, 2019). Łupek węglisty zawierający mineralizację na poziomie bilansowym został stwierdzony jedynie w spągowej części serii złożowej, a jego miąższość w porównaniu z łupkiem z wkładkami węglanowymi jest nieznaczna.

Udział poszczególnych typów rudy w złożu Sulmierzyce Północ przedstawiony został w tabeli 5. Zdecydowana większość zasobów miedzi i srebra znajduje się w rudzie łupkowej. Ruda węglanowa jest zazwyczaj zmineralizowana jedynie w swojej spągowej części i tylko w jednym otworze (Sulmierzyce 1) jej miąższość przekracza 3 metry. Ruda piaskowcowa została stwierdzona wyłącznie w stropowej partii białego spągowca o miąższości 6 cm w otworze archiwalnym Odolanów 1, położonym w południowo-wschodniej części złoża. Udział rudy piaskowcowej w zasobach kopaliny jest na tyle mały, że nie będzie ona uwzględniana przy planowaniu technicznych aspektów wydobywania. Warto zaznaczyć, że łupek miedzionośny ze znaczną domieszką materiału węglanowego, miejscami opisywany jako margiel, ma właściwości fizyczne zbliżone do wapienia cechsztyńskiego budującego rudę węglanową w złożu „Sulmierzyce Północ”. Oznacza to, że proces przeróbki najbardziej zasobnej w miedzi i srebro rudy łupkowej nie będzie znacznie różnił się od przeróbki rudy węglanowej o podobnej charakterystyce mineralogicznej i geochemicznej. Pozycja facji Rote Fäule umiejscowiona wysoko w profilu dolnocechsztyńskiej serii miedzionośnej powoduje, że 99,77% zasobów miedzi i 100% zasobów srebra zlokalizowanych jest w dwóch typach rudy o zbliżonej podatności na procesy przeróbki. Eliminuje to potrzebę przeróbki rudy piaskowcowej o odmiennych od rudy łupkowej i węglanowej właściwościach fizycznych i chemicznych (Spalińska i in. 2007).

Złożo „Sulmierzyce Północ” udokumentowano w kategorii $C_2 + D$. Dla części złoża udokumentowanej w kategorii C_2 odległości między otworami wiertniczymi mieszczą się w przedziale od 1318 m do 2818 m. Z kolei w przypadku części złoża udokumentowanej w kategorii D odległości te

Tab. 5. Udział poszczególnych typów rud w zasobach kopaliny głównej w złożu „Sulmierzyce Północ”

Tab. 5. Percentage of the individual types of ore in the resources of the primary mineral in the “Sulmierzyce North” deposit

Rodzaj rudy	Udział rudy w złożu	Udział rudy w zasobach miedzi	Udział rudy w zasobach srebra
Ruda węglanowa	52,60%	18,59%	6,89%
Ruda łupkowa	47,04%	81,18%	93,11%
Ruda piaskowcowa	0,36%	0,23%	0,00%

wynoszą od 3081 m do 4909 m. Średnia odległość między otworami dla kategorii C₂ wynosi 2393 m, natomiast dla kategorii D równa się 3287 m. Przedstawiony zakres odległości między punktami rozpoznania złoża jest zgodny z praktyką dokumentowania stratoidalnych złóż rud miedzi i srebra na monoklinie przedsudeckiej. Na podstawie analiz statystycznych określono, że współczynnik zmienności złoża wynosi 58% w przypadku zasobności rudy oraz 57% w przypadku miąższości. Tym samym, analizowane złoże należy również zakwalifikować do grupy II z uwagi na stopień skomplikowania budowy i zmienność parametrów (wg Nieć 2012).

Z testu normalności Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha=0,05$ przeprowadzonego dla całości złoża bez podziału na kategorie wynika, że należy odrzucić hipotezę o normalności rozkładu empirycznego dla podstawowych parametrów złoża (w tym zasobności rudy i miąższości). Z tego powodu ponownie skorzystano z metody *bootstrapping*. W tym wypadku ilość danych źródłowych (liczba otworów) była jeszcze mniejsza, niż dla złoża „Nowa Sól”, co może stawiać pod znakiem zapytania zasadność prowadzenia badań statystycznych. Ich wykonanie było jednak wymogiem narzuconym przez cytowane wcześniej Rozporządzenie Ministra Środowiska.

Obliczony błąd względny oszacowania średniej zasobności rudy w całym złożu (kategoria C₂ + D) dla poziomu prawdopodobieństwa P=0,95 wynosi 44%. Wartość ta nie ulega zmianie przy wyeliminowaniu z procesu szacowania rudy piaskowcowej, której udział w zasobach kopaliny głównej jest znikomy (tab. 5).

Biorąc pod uwagę znaczny udział rudy łupkowej w zasobach miedzi i srebra, wynoszący odpowiednio 81,18% i 93,11% (tab. 5), wykonano także test normalności Shapiro-Wilka na poziomie istotności $\alpha=0,05$ jedynie dla części złoża w kategorii C₂, zarówno dla całości rudy jak i rudy łupkowej. Jest to spowodowane faktem, iż wg *Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 15 lipca 2015 r w sprawie dokumentacji geologicznej złoża kopaliny, z wyłączeniem złoża węglowodorów* błąd oszacowania średnich wartości parametrów i zasobów złoża nie może przekraczać 40% w kategorii C₂. W przypadku kategorii D nie wyznaczono maksymalnego błędu oszacowania średnich wartości parametrów złoża i jego zasobów. W wyniku testu normalności dla kategorii rozpoznania C₂ nie stwierdzono podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu dla zasobności całości rudy i rudy łupkowej. Pozwoliło to na obliczenie dokładności oszacowania zasobów rudy na podstawie klasycznej formuły statystycznej dla części złoża udokumen-

owanej w tej kategorii, uzyskując wartość błędu względnego równą 37%. Tym samym jest to błąd względny spełniający wymogi kategorii C₂ według wspomnianego Rozporządzenia Ministra Środowiska.

Wnioski

W wyniku prac realizowanych przez spółki z grupy MCC wykonano dwie dokumentacje geologiczne dla nowych złóż rud miedzi i srebra na monoklinie przedsudeckiej – „Nowa Sól” i „Sulmierzyce Północ”. Ponieważ są to złoże głębokie, jakich jeszcze w Polsce nie dokumentowano, ustalono wartości inwestorskich parametrów granicznych definiujących złoże i jego granice, na co pozwala stosowne Rozporządzenie Ministra Środowiska. Parametry te zaproponowano w oparciu o opracowania techniczno-ekonomiczne przygotowane na zlecenie MCC, w których szacowano koszty operacyjne przyszłych zakładów górniczych działających na dużych głębokościach. Założono w nich zastosowanie najnowocześniejszych technologii, umożliwiających ekonomicznie uzasadnioną eksploatację. Należy zwrócić uwagę, że kryteria inwestorskie zostały zaakceptowane przez organ administracji geologicznej, który zatwierdził opartą o te parametry dokumentację złoża „Nowa Sól”.

W ramach prac dokumentacyjnych przeprowadzono także szereg analiz statystycznych. Wynika z nich, że odległości między otworami wiertniczymi sugerowane różnymi metodami, bądź wynikające z praktyki są cenną wskazówką dla dokumentatorów, lecz, jak wskazuje analiza dokumentacji złóż Nowego Zagłębia Miedziowego oraz własne doświadczenie MCC, nie stanowią decydującego kryterium w przypadku złóż typu Kupferschiefer. Według Rozporządzenia Ministra Środowiska, względny błąd oszacowania średnich wartości parametrów złoża i zasobów jest istotnym warunkiem przy określaniu kategorii rozpoznania złoża. Jest on powiązany z siatką wierceń, lecz zależy także od szeregu innych czynników, w tym od stopnia zmienności parametrów jakościowych i miąższości złoża. Analiza materiałów archiwalnych wykazała także, że zagęszczenie siatki otworów wiertniczych powoduje zazwyczaj niewielki wzrost udokumentowanych zasobów (przy czym nigdy nie odnotowano ich spadku), oraz że siatka 3 x 3 km w ocenie autorów niniejszego artykułu jest wystarczająca do obliczenia zasobów złoża w kategorii rozpoznania C₂, a nawet C₁, o ile precyzyjnie ustalony jest kontakt złoża z facją Rote Fäule.

Literatura

- [1] Bellas I. i Tassou S.A. (2005). *Present and future applications of ice slurries*. Int. J. Refrigeration, 28: 115–121
- [2] Bohnet E., Goodell T. i Jorgensen M. (2017). *Technical Report on Miedzi Copper's Sulmierzyce Project, Poland*. RungePincockMinarco (materiał niepublikowany)

- [3] Drozdowski S. i Falecki W. (1978). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi „Głogów II” w kat. C2*. Kombinat Geologiczny Zachód, Wrocław
- [4] Goodell T., Jorgensen M. i Bohnet E. (2017). *Technical Report of the Miedzi Copper Project, Poland*. RungePincock-Minarco (materiał niepublikowany)
- [5] Hammer J. i Tomaszewski J. (1959). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi rejon Lubin*. Przedsiębiorstwo Geologiczne, Kraków
- [6] Hammer J. i Tomaszewski J. (1961). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi rejon Polkowice*. Przedsiębiorstwo Geologiczne, Kraków
- [7] Kisielewski B., Mirocka H., Madej J., Kawalec T., Orłowski J., Boratyn J. (1984). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi obszaru „Malomice” w kat. C1*. Przedsiębiorstwo Geologiczne, Kraków
- [8] Kisielewski B., Kawalec T., Bąkowska J. i Boratyn J. (1985). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi obszaru „Gaworzyce” w kategorii C1*. Przedsiębiorstwo Geologiczne, Kraków
- [9] Kisielewski B. (1985). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi obszaru „Radwanice” w kat. C1*. Przedsiębiorstwo Geologiczne, Kraków
- [10] Neumann U. (1995). *Dokumentacja geologiczna w kategorii C₁ + C₂ + D₁ złoża rud miedzi „Retków-Ścinawa”*. Przedsiębiorstwo Geologiczne, Wrocław; PROXIMA S.A., Wrocław
- [11] Nieć M. (2012). *Metodyka dokumentowania złóż kopalin stałych*. IGSMiE PAN na zlecenie Ministerstwa Środowiska, Kraków
- [12] Oszczepalski S., Rydzewski A. i Ważny H. (1982). *Wyniki poszukiwań cechsztyńskich rud miedzi w rejonie Kozuchowa*. Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa
- [13] Oszczepalski S., Chmielewski A. (2019). *Mineralizacja Cu-Ag w utworach cechsztynu – zarys historii poszukiwań i badań prowadzonych przez PIG*. Przegląd Geologiczny 67: 587-593
- [14] Piestrzyński A., Banaszak A. i Zaleska-Kuczmiarczyk M. (red.) (2007). *Monografia KGHM Polska Miedź SA*, wydanie II. Allexim Sp.z o.o., Wrocław
- [15] Priedl M. (1973). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi monokliny przedsudeckiej, obszar po upadzie. Kategoria C1 i C2*. Przedsiębiorstwo Geologiczne S.A., Kraków
- [16] Priedl M., Kosiarz Z. i Krzanowski A. (1975). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi północno-zachodniej części kopalni Sieroszowice oraz pola f-1 kopalni Sieroszowice II kat. C1 + C2*. Przedsiębiorstwo Geologiczne S.A., Kraków
- [17] Priedl M. i Mikula S. (1976). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi „Głogów I” w kategorii C2*. Zakład Badań Geologicznych, Kraków
- [18] Priedl M. (1979). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi „Żukowice-Jaczów” w kat. C1*. Przedsiębiorstwo Geologiczne, Kraków
- [19] Przeniosło S. (1998). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedziowo-srebrowych „Głogów Głęboki” w kat. C1*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa
- [20] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 lipca 2015 r. w sprawie dokumentacji geologicznej złoża kopaliny, z wyłączeniem złoża węglowodorów (Dz. U. z 15 lipca 2015, poz. 987)
- [21] Spalińska B., Stec R. i Sztaba K. (2007). *Miejsce i rola przeróbki rudy w kompleksie technologicznym KGHM Polska Miedź SA, W: Monografia KGHM Polska Miedź SA*, wydanie II (red. A. Piestrzyński, A. Banaszak, M. Zaleska-Kuczmiarczyk), 637-648. Allexim Sp. z o.o., Wrocław
- [22] Speczik S. (2015). *Szansa czy iluzja? – Głębokie kopalnie miedzi i srebra w Polsce*. Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN, 91: 179-192
- [23] Speczik S. (2019). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi i srebra Nowa Sól*. Zielona Góra Copper Sp. z o.o., Warszawa
- [24] Speczik S. (2020). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi i srebra Sulmierzyce Północ*. Ostrzeszów Copper Sp. z o.o., Warszawa.
- [25] Speczik S., Dziewińska L., Pepel A. i Józwiak W. (2012). *Analiza i przetwarzanie danych geofizycznych, jako instrument poszukiwań złóż z Cu-Ag na monoklinie przedsudeckiej*. Biul. Państw. Inst. Geol., 452: 257-286
- [26] Szamałek K. i Zglinicki K. (2018). *Analiza krytyczna Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie dokumentowania złoża kopaliny*. Górnictwo Odkrywkowe, 3: 5-9
- [27] Tomaszewski J. i Priedl M. (1962). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi rejon Sieroszowice*. Przedsiębiorstwo Geologiczne, Kraków
- [28] Wirth H. (1986). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi „Głogów III” w kat. C2*. Przedsiębiorstwo Geologiczne, Wrocław
- [29] Wołkowicz S., Smakowski T. i Speczik S. (red.) (2011). *Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski wg stanu na 31 XII 2009 r.* Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa.
- [30] Wyżykowski J. (1959). *Dokumentacja geologiczna złoża rud miedzi Sieroszowice-Lubin w rejonie Głogowa i Legnicy*. Instytut Geologiczny, Warszawa
- [31] Zieliński K. (2019). *Dokumentowanie stratoidalnych złóż rud miedzi i srebra – krytyczna analiza przepisów prawnych*. W: Aktualia i perspektywy gospodarki surowcami mineralnymi (red. E. Lewicka). Wydawnictwo IGSMiE PAN: 9-21
- [32] Zieliński K. i Speczik S. (2017). *Głębokie złoża miedzi i srebra szansą dla górnictwa metali w Polsce*. Biul. Państw. Inst. Geol., 468: 153-164