

## Odkrycie, badania, eksploatacja i przyszłość złóż siarki w Polsce

Marek Nieć<sup>1</sup>, Edyta Sermet<sup>2</sup>



M. Nieć



E. Sermet

**Discovery, geological investigation, mining and future of sulphur deposits in Poland.** Prz. Geol., 71: 631–638.

*A b s t r a c t.* Sulphur-bearing limestones encountered in the Mokrzychów borehole in 1956 sparked the beginning of their exploration, carried out up to 1971 under the guidance of prof. Stanisław Pawłowski, which allowed discovery of about 979 Mt of sulphur resources. Such success was based on combining theoretical studies of sulphur formation in limestone by hydrogen-driven gypsum replacement with geophysical detection of possible sulphur deposit sites. The mining that immediately followed reached a maximum annual production of 4–5 Mt between 1975–1990. The introduction of borehole-based Frasch-type mining provoked many questions regarding sulphur recovery management in relation to the deposit's internal structure. This in turn led to thorough geological study of how mining success depends on the various geological

deposit features. After a decline of mining at the end of the 20<sup>th</sup> century due to an increased supply of recoverable sulphur from hydrocarbon exploitation, the greater part of the minable resources remain untouched. Many of these became inaccessible for recovery due to the construction of settlements on their territory and strong local opposition to mining. The expected decline in the supply of recoverable sulphur will make those sulphur deposits still accessible for mining a valuable future source, and they merit special protection.

**Keywords:** sulphur deposits, exploration, mining, resources, sterilization, Poland

Rok 1953, gdy w Mokrzychowie koło Tarnobrzega stwierdzono występowanie wapieni siarkonośnych na głębokości 76 m p.p.t., jest uważany za początek wielkich odkryć złóż siarki w Polsce, które umożliwiły wielkoskalową eksploatację i wysunęły Polskę na czoło jej światowych producentów. Historia odkrycia i badań złóż siarki była wielokrotnie szczegółowo opisywana (Kubica, Osmólski, 1969; Pawłowski, 1969, 1983; Pawłowski i in., 1985; Kubica, 1994; Kirejczyk, 2021; Nieć, 2023). 70. rocznica tego sukcesu skłania do spojrzenia na źródła i działania, które były jego podstawą, a zarazem na historię badań i eksploatacji złóż siarki, ich załamanie w latach 90. XX w. z powodu dynamicznego rozwoju odzysku siarki ze złóż węglowodorów oraz do rozważań na temat ich wykorzystania w przyszłości.

Historia odkrycia złóż siarki i jej eksploatacji jest przykładem znaczenia badań geologicznych (podstawowych i stosowanych) dla rozwoju gospodarczego kraju i regionów występowania odkrywanych złóż kopaliny oraz śmiałości podejmowanych decyzji umożliwiających szybkie, praktyczne wykorzystanie wyników tych badań.

O występowaniu złóż siarki w obrzeżeniu zapadliska przedkarpackiego wiadomo było od dawna. Eksploatację małych złóż siarki prowadzono, z przerwami, od XV do początków XX w. w Pszowie, Swoszowicach, Posądz, Czarkowach, Czajkowie, a także na terenie dzisiejszej Ukrainy – w Lubieniu, Dźwiniaczu i Truskawcu (Osmólski, 1969). Stwierdzono ją też w wierceniu koło Solca – w ścianach studni wykonanej dla browaru w Tarnobrzegu (Szi-manski, 1886).

Obrzeżenie zapadliska przedkarpackiego uznawano za obszar perspektywiczny występowania złóż siarki (Bohdanowicz wg Krupińskiego, 1969; Bolewski, 1937), ale nie

podejmowano poszukiwań, gdyż nie oczekiwano tu dużych zasobów. Przewidywano, że rudy siarki są na tym terenie ubogie, a nie znano odpowiednich metod ich wzbogacania (Bolewski, 1937). Ponadto przed 1939 r. krajowe zapotrzebowanie na surowce siarkonośne pokrywano przez eksploatację złóż siarczków żelaza w Rudkach w Górach Świętokrzyskich (Bohdanowicz, 1939a).

### ODKRYCIE

Po II wojnie światowej podjęto szeroko zakrojony program badań geologicznych i poszukiwań złóż kopaliny powiązany z realizacją *Planu 6-cioletniego rozbudowy i uprzemysłowienia kraju*. Jednym z zadań było rozpoznanie potencjału surowcowego podłoża utworów mioceńskich zapadliska przedkarpackiego, przede wszystkim z nadzieją postulowanego jeszcze przed wojną znalezienia złóż ropy naftowej (Czarnocki, 1939; Bohdanowicz, 1939b). W tym celu od 1945 do 1950 r. kontynuowano badania geofizyczne i grawimetryczne rozpoczęte przez Stanisława Pawłowskiego już w latach 1937–1939. Ich rezultatem było wykrycie anomalii grawimetrycznych, sygnalizujących obecność wypiętrzeń starszych, przedmioceńskich utworów geologicznych. W ślad za tym – z inicjatywy dyrektora PIG Jana Czarnockiego – podjęto program wierceń badawczych w celu rozpoznania tych struktur, realizowany pod kierunkiem S. Pawłowskiego (Ryka, 1983). W ramach jego realizacji na początku 1953 r. w otworze w Luszyca na głębokości 272,9–275,6 m natrafiono na siarkę. Było to impulsem do poszukiwania złóż siarki na mniejszych głębokościach, zaleconego przez Państwową Komisję Planowania Gospodarczego. Nawiercenie wapieni siarkonośnych w rejonie tarnobrzeskim było wydarzeniem

<sup>1</sup> Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi PAN, 31-261 Kraków, ul. Wybickiego 7A; niecm@wp.pl

<sup>2</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, 30–059 Kraków, al. Mickiewicza 30; sermet@agh.edu.pl

nieoczekiwanym (Bolewski, 1996), ale błyskawiczna ocena doniosłości tego odkrycia przyczyniła się do intensyfikacji prac zmierzających do udokumentowania złóż kwalifikujących się do zagospodarowania. Zostały one po mistrzowsku zrealizowane przez zespół prof. Stanisława Pawłowskiego, w którym szczególną rolę odegrali Katarzyna Pawłowska i Bolesław Kubica, współautorzy lub autorzy wielu publikacji podsumowujących wyniki prowadzonych prac.

Nieco wcześniej, w 1950 r., w ukraińskiej części zapadliska przedkarpackiego odkryto złoża siarki w Rozdole i w 1951 r. w Żydaczowie (Strojenije..., 1979), co wskazało na dużą perspektywiczność zapadliska pod względem poszukiwań kolejnych złóż i zmotywowało do prac badawczych w Polsce.

Profesor S. Pawłowski z wielkim rozmachem podjął prace poszukiwawcze prowadzone w ramach działalności Instytutu Geologicznego. Podstawą ich sukcesu było znakomite wykorzystanie w praktyce poszukiwawczej wyników badań geofizycznych i wiedzy teoretycznej na temat genezy złóż siarki. Za punkt wyjścia do ukierunkowania prac poszukiwawczych przyjęto koncepcję, że wapienie siarkonośne powstały w wyniku metasomatycznego przeobrażenia gipsów przez węglowodory przy udziale bakterii i dopływie tlenu z powierzchni (Pawłowski i in., 1985). W myśl tego założenia uznano, że najdogodniejszym miejscem do tworzenia się złóż siarki były strefy, w których pierwotne warstwy gipsów zostały wyniesione w stosunku do otoczenia, czyli garby antyklinalne lub struktury zrębowe. Identyfikację takich struktur umożliwiały badania geofizyczne (w szczególności grawimetryczne), których znaczenie docenił prof. S. Pawłowski, geofizyk, uznany specjalista w tej dziedzinie (Odlanicki-Poczobutt, 1978). Dalsze poszukiwania złóż siarki w obrębie takich struktur realizowano za pomocą wierceń wykonywanych wzdłuż wielu linii zorientowanych w poprzek ich rozciągłości. W przypadku natrafienia na wapienie siarkonośne wiercenia zagęszczano tak, by można było określić położenie złoża i jego zasoby.

Niezaprzeczalną zaletą prof. Pawłowskiego była umiejętność przekonującego uzasadniania doniosłości odkrycia złóż siarki ówczesnym władzom państwowym, co umożliwiło szybką decyzję o finansowaniu prac poszukiwawczych i ich realizację.

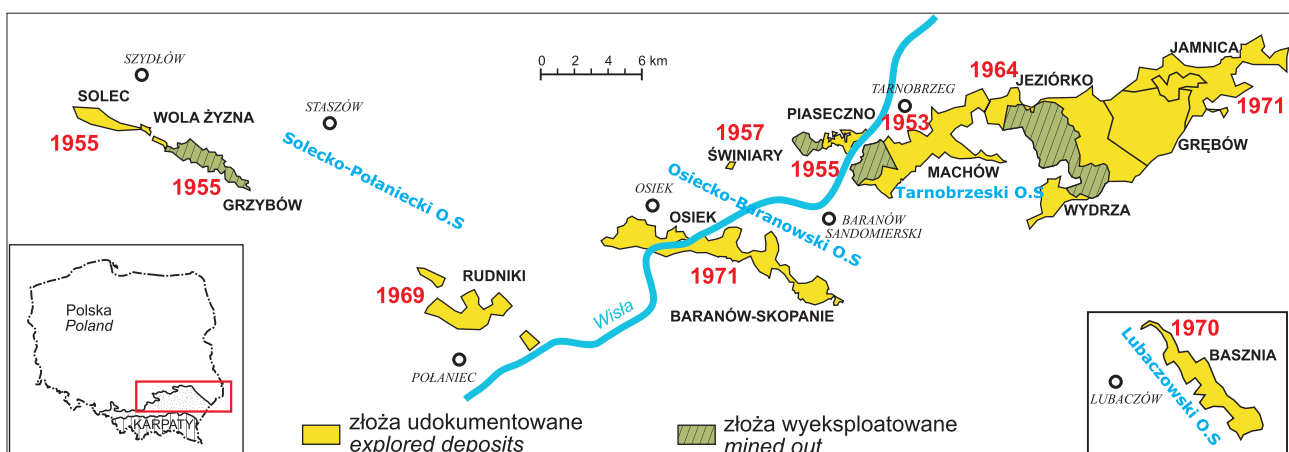
## BADANIA

Zdumiewające jest tempo, w jakim podjęto prace wiertnicze i dokumentacyjne w rejonie Tarnobrzega oraz decyzje i działania odnośnie eksploatacji. Zaledwie po 4 miesiącach od zakończenia wiercenia w Mokrzyszowie przedstawiono do oceny dokumentację złoża, którą Komisja Zasobów Kopalni zatwierdziła w ciągu dwóch dni. Po niecałym roku, jeszcze w trakcie realizacji prac rozpoznawczych oraz przed ostatecznym udokumentowaniem złoża w 1956 r., minister górnictwa powołał dyrekcję Kopalni Siarki Tarnobrzeg w budowie i rozpoczęto planowanie eksploatacji złoża oraz budowę kopalni odkrywkowej w Piasecznie.

Występowanie wapieni siarkonośnych w wielu miejscach poza rejonem Tarnobrzega stwierdzono na podstawie wyników szeroko zakrojonych prac wiertniczych. W 1955 r. odkryto i udokumentowano złoża w Solcu, a w 1957 r. wykryto obecność siarki w Grzybowie oraz w rejonie Horyńca (Trusze; Pawłowski, 1969).

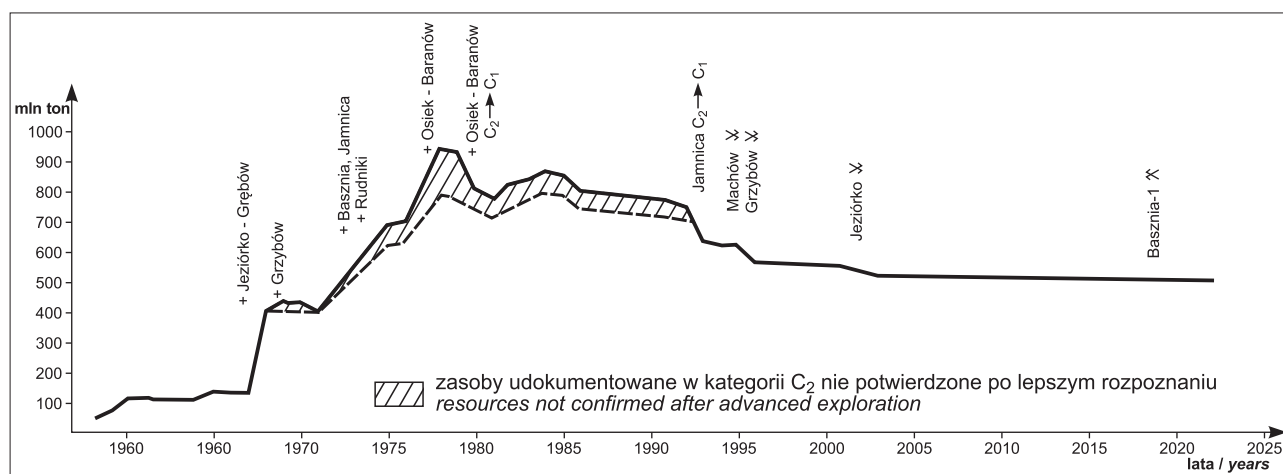
Wątpliwości odnośnie możliwości wykorzystania złóż zalegających na głębokości kilkudziesięciu metrów p.p.t. spowodowały, że realizacja prac poszukiwawczych była uzależniona od postępu wiedzy górniczej. Warunki geologiczne uniemożliwiały eksploatację podziemną, a brakowało jeszcze doświadczeń w prowadzeniu głębokiej eksploatacji odkrywkowej. Początkowo nie była też brana pod uwagę eksploatacja otworowa, gdyż uważano, że może być prowadzona tylko w złożach występujących w czapach wysadów solnych – hydrogeologicznie izolowanych (Machalski, 1957). W głębokich kopalniach odkrywkowych problemem sprawiło utrzymanie stateczności skarp w skałach ilastych. Warunkiem uruchomienia eksploatacji na prawym brzegu Wisły było też ograniczenie dopływu wody z doliny rzecznej do wyrobiska. Dopiero budowa ekranu ilowego i bariera studni odwadniających umożliwiły podjęcie eksploatacji złoża w Machowie, 15 lat po jego odkryciu.

Analiza doświadczeń amerykańskich w eksploatacji otworowej metodą podziemnego wytapiania (Frascha) i zdobytą w Meksyku praktyczną umiejętność jej stosowania przez inż. W.J. Srokę, a także modyfikacja klasycznej wersji tej metody oraz jej dostosowanie do warunków złóż polskich przez B. Żakiewicza pozwoliły na podjęcie prac



Ryc. 1. Historia dokumentowania złóż siarki (Nieć, 2023)

Fig. 1. History of exploration of the sulphur deposits (Nieć, 2023)



Ryc. 2. Historia zmian zasobów złóż siarki (Nieć i in., 2007, uzupełniona)

Fig. 2. History of demonstrated variations in the sulphur resources (Nieć et al., 2007, completed)

eksperymentalnych w Grzybowie już w 1958 r. W 1964 r. utworzono tam Doświadczalną Kopalnię Siarki. Dwa lata później podjęto wydobywanie na skalę przemysłową w kopalni *Grzybów* i w 1967 r. w kopalni *Jeziórko* (Żakiewicz, 1965, 1975; Żakiewicz i in., 1967; Gutman, Kwiecień, 1992). Rozwiązanie problemów eksploatacji złóż metodą podziemnego wytapiania umożliwiło, po krótkiej przerwie, podjęcie poszukiwania i rozpoznawanie złóż zalegających głębiej niż dotychczas zbadane.

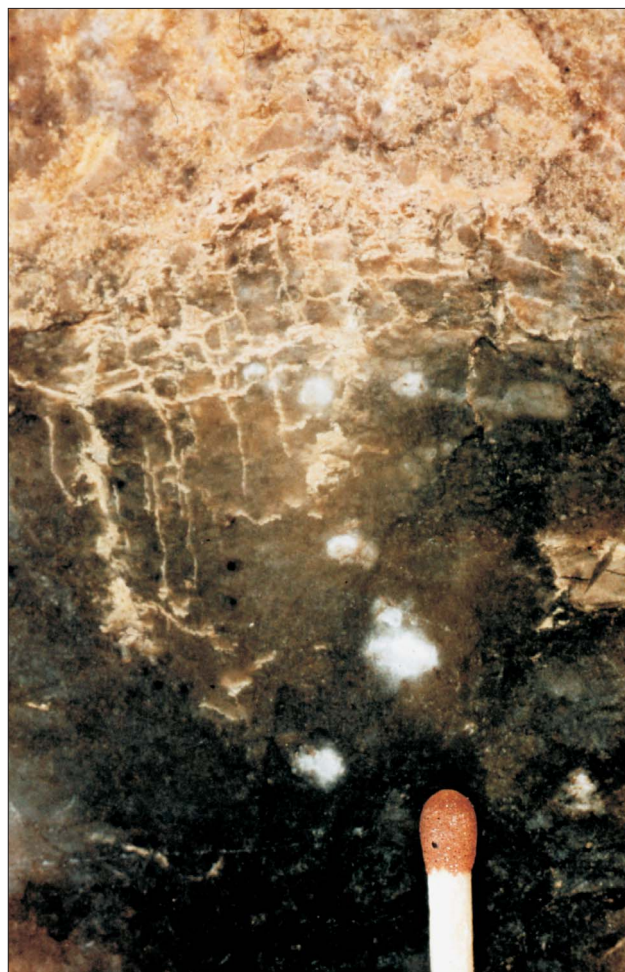
Zwieńczeniem prac zespołu prof. S. Pawłowskiego było udokumentowanie bardzo dużych złóż siarki w 4 obszarach: tarnobrzeskim, solecko-połanieckim, osiecko-baranowskim i lubaczowskim (ryc. 1). Łącznie w ramach poszukiwań wykonano 590 otworów, o metrażu 120,8 tys. mb. (Kubica, Pawłowska, 1984). Udokumentowano w sumie 1051,9 mln ton zasobów siarki, które po dodatkowym rozpoznaniu uzupełniającym oszacowano na 979,1 mln ton (ryc. 2).

Nie wszystkie prace poszukiwawcze kończyły się sukcesem. Znajdowano też małe nagromadzenia siarki, niekwalifikujące się do wykorzystania (Świniary), lub jej rozproszone wystąpienia (Niekraśów). Do roku 1980 rejestrowano stały przyrost udokumentowanych zasobów siarki, mimo że nie potwierdzano wszystkich części zasobów wykazywanych po wstępnych etapach badań (w kategorii C2), i dopiero w latach 90. XX w. zaczął postępować stopniowy ich ubytek w wyniku szczypania złóż.

Intensywny rozwój eksploatacji złóż siarki metodą podziemnego wytapiania skłaniał do prowadzenia dalszych poszukiwań według opracowanej i sprawdzonej już metodyki. W latach 1984–1987 odkryto wapienie siarkonośne w rejonie Alfredówki, Cieszanowa oraz Senisławic (Kubica, Pawłowska, 1984) – prognostyczne zasoby tych złóż są szacowane na 82 mln ton, a hipotetyczne zasoby w kilku innych rejonach na ok. 231 mln ton (Gąsiewicz, 2020).

Liczne otwory wiertnicze, a następnie odsłonięcia wykonywane w skarpach kopalń odkrywkowych umożliwiły szczegółowe badania budowy geologicznej złóż i ich genezy. Pogląd o metasomatycznym przeobrażeniu gipsów w wapienie siarkonośne przy udziale węglowodorów i bakterii, który był podstawą koncepcji poszukiwań złóż siarki w Polsce, opierał się przede wszystkim na podobieństwie tekstur rudy siarki i gipsów oraz obecności w wapieniach siarkonośnych nieregularnych gniazd gipsów, które nie uległy

przemianie (Kwiatkowski, 1962; Pawłowski i in., 1979, 1985; Pawlikowski, 1982; Nieć, 1992; Kubica, 1994a, 1997). Przemawiają za tym także wnioski z obserwacji kontaktów gipsu z wapieniami siarkonośnymi (ryc. 3) oraz zmienność składu izotopowego węgla  $\delta^{13}\text{C}$  (Pawlikowski, Przybyłowicz, 1980).



Ryc. 3. Kontakt wapieni siarkonośnych z gipsem – otw. Basznia Z1, głęb. 281,0 m. Fot. M. Nieć

Fig. 3. Gypsum-sulphur-bearing limestone boundary – Basznia borehole Z1, depth 281,0 m. Photo by M. Nieć

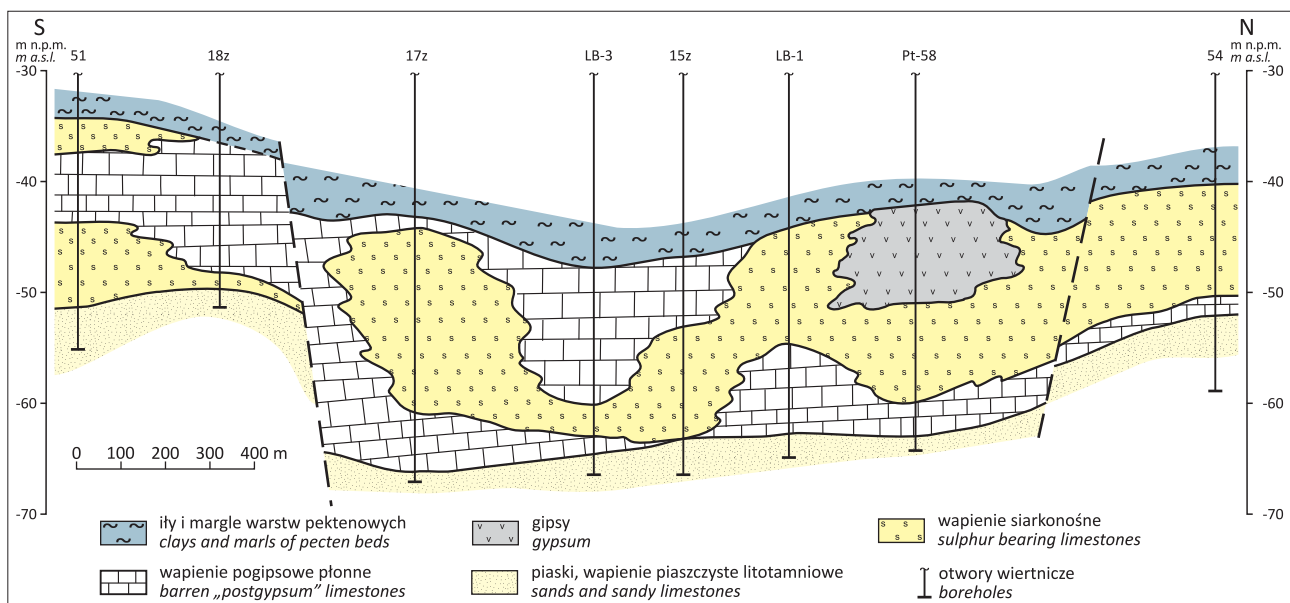
Warunki formowania się złóż siarki były przedmiotem dyskusji. Istniał np. pogląd, że tworzyły się one w specyficznych warunkach w zbiornikach wodnych, w których osadzały się także gipsy. Wiele wątpliwości, jakie budzi hipoteza epigenetyczna, przedstawił Gąsiewicz (2000) na podstawie wyników szczegółowych badań petrograficznych, chemicznych i izotopowych oraz ich interpretacji sedimentologicznej. Pogląd o osadowym pochodzeniu złóż siarki poparł Olchowy (Olchowy, 2015; Gąsiewicz, Olchowy, 2022) i był on wykorzystany do wskazania obszarów perspektywicznych ich występowania (Gąsiewicz, 2020). Szczegółowe obserwacje wewnętrznej budowy złóż przemawiają jednak na korzyść genezy metasomatycznej i późniejszych procesów transformacji, sygnalizowanych już przez zespół prof. S. Pawłowskiego (Pawłowski i in., 1985; Nieć, 1986; Nieć, Sermet, 2023). Złożoność tych procesów spowodowała strefowe zróżnicowanie budowy geologicznej złóż w zależności od głębokości ich zalegania p.p.t. (ryc. 4). Dyskusyjny i niejasny jest czas przebiegu tych procesów. Mogły one być zapoczątkowane jeszcze w czasie sedimentacji gipsów

(Krajewski, 1962). Ważną rolę w formowaniu obecnego wyglądu złóż odegrały procesy krasowe (Piątkowski, 1974; Osmólski, 1976; Nieć, 1977).

## EKSPLOATACJA

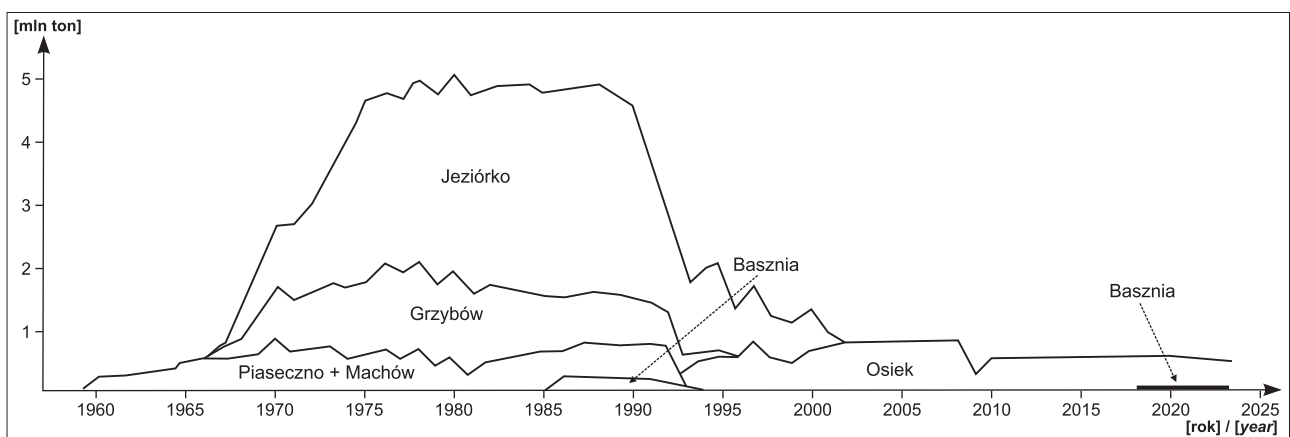
W ślad za odkrywaniem złóż siarki szybko postępowały ich zagospodarowanie i eksploatacja (ryc. 5). W latach 1975–1990 wydobywano 4–5 mln ton siarki rocznie i przeważnie przeznaczano ją na eksport, wnoszący znaczne wpływy do budżetu państwa (Gutman, Kwiecień, 1992). Wahania cen siarki i duże koszty odkrywkowej eksploatacji i przeróbki rudy spowodowały w 1992 r. wstrzymanie wydobywania jej tą metodą. Załamanie cen siarki w latach 90. XX w., wskutek masowej jej podaży z odsiarczania węglowodorów, spowodowało ogólnoświatowy kryzys górnictwa siarkowego i likwidację kopalni siarki. W Polsce zbiegło się to z okresem transformacji ustrojowo-gospodarczej.

Po zakończeniu eksploatacji złoża w Grzybowie i likwidacji kopalni w Jeziórku złoża Osiek pozostało jedynym



Ryc. 4. Przekrój przez złożo siarki Jeziórko ukazujący jego złożoną budowę geologiczną

Fig. 4. A cross-section through the Jeziórko sulphur deposit showing its complex geological structure



Ryc. 5. Wydobywanie siarki w Polsce (Nieć i in., 2007, uzupełnione)

Fig. 5. Sulphur mining in Poland (Nieć i in., 2007, completed)

złożem eksploatowanym metodą otworową podziemnego wytopienia (tab. 1). W 2019 r. ponownie podjęto eksploatację złoża Basznia, mimo trudnych warunków, spowodowanych małą przepuszczalnością skał serii złożowej (Bokwa, Kasztelewicz, 2019).

Tereny poeksploatacyjne są obecnie rekultywowane. W miejscu wyrobiska odkrywkowej Kopalni Siarki *Machów*

utworzono zbiornik wodny o nazwie Jezioro Tarnobrzegie (ryc. 6). Zalew ten został przeznaczony na cele rekreacyjne i stanowi nowy, wartościowy element krajobrazu i środowiska (Sermet, Górecki, 2020).

Uruchomienie eksploatacji otworowej metodą podziemnego wytopienia było ważnym osiągnięciem w zagospodarowaniu złóż siarki. Cechą istotną eksploatacji tą

**Tab. 1.** Kalendarium odkryć złóż siarki w Polsce i ich eksploatacji (Nieć, 2023)

**Table 1.** Timeline of discoveries of sulphur deposits in Poland and their exploitation (Nieć, 2023)

Złoża siarki <i>Sulphur deposits</i>	Rok <i>Year</i>		Zasoby bilansowe siarki [mln ton] <i>Sulphur resources [Mt]</i>				Eksploatacja <i>Exploitation period</i>	Uwagi <i>Remarks</i>
	odkrycia <i>discovery</i>	udokumentowania <sup>A</sup> <i>exploration<sup>A</sup></i>	wstępnie wykazane <i>pre-demonstrated</i>	potwierdzone po lepszym rozpoznaniu <i>confirmed after detailed exploration</i>	aktualnie wykazywane <i>recently presented</i>	możliwe do wykorzystania <i>recoverable</i>		
Mokrzyszów (Tarnobrzeg)	1953	1954	8,08					
Tarnobrzeg (Tarnobrzeg–Machów)	1954	1955	73,55	109,2	37,31	1967–1992 odkrywkowa <i>open cast</i> 1985–1993 otworowa <i>borehole</i>	1964 r. – początek budowy kopalni <i>Machów</i> 1964 – <i>Machów mine</i> <i>beginning of construction</i>	
Piaseczno	1955	1957	8,21	9,87	2,01 <sup>B</sup>	1958–1971 odkrywkowa <i>open cast</i>	1956/1957 – eksploatacja próbna 1956/1957 – <i>pilot plant</i>	
Świniary	1957	1958	0,08		0,08			
Solec (Solec–Wola Żyzna –Gacki)	1955	1957	5,57		5,58			
Grzybów <sup>C</sup>		1958	14,58		1,26			
Poręba Wierzbicka –Dobrów–Grzybów	1955	1968	51,62	51,5	1,34	1967–1995 otworowa <i>borehole</i>	od 1958 r. prace eksperymentalne i kopalnia doświadczalna <i>from 1958 experimental works</i> <i>and pilot plant</i>	
Jeziórko	1964	1966	278,15	270,3	87,14	1968–2001 otworowa <i>borehole</i>	kop. <i>Jeziórko</i> <i>Jeziórko mine</i>	
Jeziórko–Grębów		1967		90,3	58,37	26,8		
Jamnica		1971	137,77	51,73	42,23	22,6		
Rudniki	1969	1974	49,95		49,95	34,0		
Osiek–Baranów	1971	1976	300,70	61,60	13,22 <sup>D</sup>	eksploatowane <i>active mining</i>	od 1993 r. otworowa <i>from 1993 borehole</i>	1987 – początek budowy kopalni <i>Osiek</i> 1987 – <i>beginning of construction</i> <i>Osiek mine</i>
				169,5	99,23 <sup>D</sup>			29,0
Basznia	1970	1976	149,9	109,5	102,00	eksploatowane <i>active mining</i>	1982–1993 i od 2019 otworowa <i>1982–1993</i> <i>and from 2019</i> <i>borehole</i>	1976–1982 – eksploatacja doświadczalna 1976–1982 – <i>experimental mining</i>

**Objaśnienia / Explanations:** **A** – rok zatwierdzenia dokumentacji / *year of documentation approval*; **B** – zasoby uznane za pozabilansowe / *resources considered off-balance sheet*; **C** – ze złoża Grzybów wydzielono złożo Wola Żyzna / *the Wola Żyzna deposit was separated from the Grzybów deposit*; **D** – bez zasobów w filarach ochronnych / *without resources in the safety pillars*

metodą jest brak możliwości bezpośredniej obserwacji jej przebiegu w złożu. Wnioskuje się o niej na podstawie analizy jej wyników na tle budowy geologicznej złoża, interpretowanej na podstawie wykonanych wierceń.

Polskie złoża siarki rodzimej cechują się złożoną budową geologiczną, będącą wynikiem wielu procesów, które prowadziły do ich utworzenia i ostatecznego uformowania (Pawłowski i in., 1979, 1983; Nieć, 1992). Identyfikacja i zrozumienie procesów formowania złóż i wynikających z nich podstawowych cech i prawidłowości ich budowy ma istotne znaczenie praktyczne dla sterowania eksploatacją otworową, o której efektywności decyduje ilość wydobytej siarki i zużycie gorącej wody (Nieć i in., 1972; Krajewski, 1973; Kubica, 1978; Sermet i in., 2021).

Trudności związane z prowadzeniem otworowej eksploatacji złóż siarki sprawiły, że w 1967 r. zespół naukowców powołany przez Wyższy Urząd Górniczy podjął w tej dziedzinie szeroko zakrojone prace badawcze (Wytyczne WUG, 1967). Badania te prowadzono w Przedsiębiorstwie Specjalistycznym Górnictwa Surowców Chemicznych *Hydropkop* (Nielubowicz, 1972) oraz w kilku innych ośrodkach naukowych, przede wszystkim w Akademii Górniczo-Hutniczej i Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Przemysłu Siarkowego *Siarkopol* (OBRPS *Siarkopol*). Równoległe zdobywano doświadczenie praktyczne w prowadzeniu eksploatacji. Praktykowana była stała wymiana tych doświadczeń i rezultatów badań na często organizowanych seminariach. Wygłaszane na nich referaty były publikowane przez Branżowy Ośrodek Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej OBRPS *Siarkopol* (BOINTiE OBRPS). Wykorzystywano także rosyjskie wyniki badań dotyczące technologii eksploatacji metodą podziemnego wytapiania i obserwacje jej efektów, prowadzone na Ukrainie i w Uzbekistanie (Arens, Gajdin, 1978), gdzie występują złoża siarki podobne do polskich.

Wyniki badań geologicznych prowadzonych w Polsce były obejmowane klauzulą tajności lub poufności (Pawłowski, 1957, 1962), w szczególności te dotyczące eksploatacji otworowej w ujęciu syntetycznym (Dunikowski i in., 1978). Powodowało to, że w ograniczonym zakresie były przedstawiane w ogólnie dostępnych publikacjach.

W procesie eksploatacji tarnobrzeskich złóż siarki metodą otworowego, podziemnego wytapiania w nawiązaniu do cech ich budowy geologicznej i zmiennych parametrów pojawiały się cztery zagadnienia, które były przedmiotem badań i poszukiwania odpowiedzi:

- ❑ przebieg wytapiania siarki ze skały siarkonośnej (rudę siarki);
- ❑ kształt strefy wytopu w otoczeniu otworu eksploatacyjnego;
- ❑ postęp eksploatacji;
- ❑ poeksploatacyjne zmiany morfologii terenu i zagrożenia erupcjami gorącej wody.

Poszukiwanie metod sterowania eksploatacją, prognozowania jej przebiegu i efektów oraz oceny rezultatów prowadzono trzema metodami:



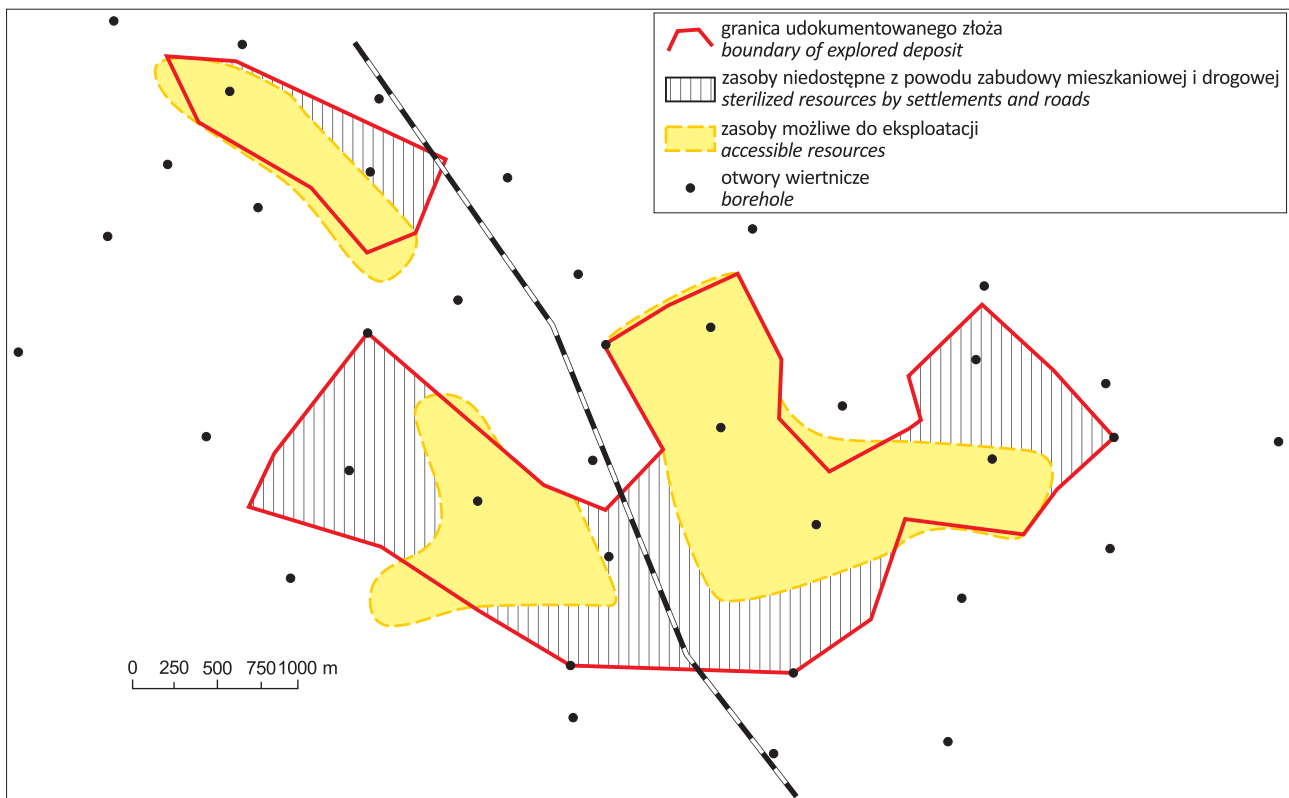
Ryc. 6. Kopalnia Siarki Machów i utworzone w jej miejscu Jezioro Tarnobrzegskie. Fot. M. Nieć

Fig. 6. The Machów Sulphur Mine and the Tarnobrzeg Lake created in its place. Photo by M. Nieć

- ❑ badań laboratoryjnych i modelowania matematycznego procesu wytapiania siarki;
- ❑ modelowania fizycznego;
- ❑ analiz i opisu rzeczywistego przebiegu eksploatacji i jej efektów.

Doświadczenia z eksploatacji, gromadzone równoległe z realizowanymi badaniami i wdrażaniem ich wyników, umożliwiały formułowanie zasad bezpiecznego a zarazem efektywnego prowadzenia wydobycia siarki (Kirejczyk, Krańców, 1987; Kirejczyk, 1996; Hajdo i in., 2007). Jednak nie rozwiązano problemu sterowania eksploatacją w sposób zapewniający pełne, ekonomicznie efektywne wykorzystanie zasobów złoża w warunkach utrudnionej eksploatacji, spowodowanych bardzo zmienną i często małą przepuszczalnością utworów geologicznych.

Zasoby siarki udokumentowane początkowo w złożach rejonów: staszowskiego, tarnobrzeskiego i lubaczowskiego, po uszczegóławiającym rozpoznaniu wynosiły łącznie około 922 mln ton. W wyniku wieloletniej eksploatacji i likwidacji kopalń wg stanu na 31.12.2022 r. pozostało jeszcze 500,13 mln ton zasobów bilansowych i 35,8 mln ton zasobów uznanych za pozabilansowe (na podstawie kryteriów stosowanych w XX w.). Do 2022 r. wydobyto łącznie 139,5 mln ton siarki, a około 111 mln ton uznano za zasoby niewydobywalne i 141 mln ton za niedostępne z przyczyn organizacyjno-technicznych, w tym niemal 49 mln ton w związku z likwidacją kopalń (Sermet, Nieć 2021).



**Ryc. 7.** Złoże siarki Rudniki – przykład ograniczenia możliwości wykorzystania złoże (Sermet, Nieć, 2021)  
**Fig. 7.** The Rudniki sulphur deposit – an example of limiting the possibility of using the deposit (Sermet, Nieć, 2021)

Zasoby przemysłowe zakwalifikowane obecnie do wydobycia wynoszą 15,03 mln ton w złożach Osiek i Basznia, z których siarka jest wydobywana metodą podziemnego wytapiania. Wydobywalność zasobów jest zróżnicowana w zależności od lokalnych warunków hydrogeologicznych, wykształcenia rudy (wytapialności siarki) oraz technologii wydobycia – przeważnie wynosi 50–60% (Ślizowski i in., 2000).

## PRZYSZŁOŚĆ

Znaczna część udokumentowanych zasobów złóż siarki jest obecnie niedostępna dla eksploatacji, ponieważ ich teren został zabudowany infrastrukturą osiedlową i drogową (ryc. 7), a planowane wykorzystanie terenu jest inne niż górnicze (Nieć i in., 2007). W ten sposób wyłączono z możliwości wykorzystania ok. 293 mln ton niewyeksplorowanych jeszcze zasobów, to jest około 47% (Sermet, Nieć, 2021). Jest to zjawisko groźne z punktu widzenia bezpieczeństwa surowcowego kraju. Brak należytej polityki surowcowej i bez troska w gospodarowaniu przestrzenią na terenie występowania udokumentowanych złóż spowodowały, że ogromny potencjał surowcowy złóż siarki nie będzie wykorzystany.

Podstawowym kierunkiem wykorzystania siarki jest produkcja kwasu siarkowego i jego zastosowanie do wytwarzania nawozów fosforowych. Siarka rodzima uzyskiwana ze złóż tarnobrzeskich odznacza się wysoką czystością, wyższą niż ta pochodząca z odsiarczania paliw kopalnych – w związku z tym jest cenionym surowcem do innych zastosowań w przemyśle chemicznym. Ważnym kierunkiem jej bezpośredniego użycia jest produkcja nawozów siarkowych. Siarka jest zatem surowcem strate-

gicznym, niezbędnym dla wielu gałęzi przemysłu chemicznego, produkcji nawozów, a także przemysłu obronnego. Wykorzystanie złóż siarki jest ważnym przykładem godzenia potrzeb i oczekiwań społeczności lokalnych z potrzebami ogólnokrajowymi.

W związku z polityką klimatyczną i ograniczaniem wykorzystywania paliw kopalnych w perspektywie wieloletniej należy oczekiwać drastycznego zmniejszenia podaży siarki odzyskiwanej z paliw i można się spodziewać, że złoża siarki rodzimej ponownie staną się ważnym jej źródłem. Te, których wykorzystanie jest jeszcze możliwe, powinny być objęte szczególną ochroną.

Autorzy dziękują Recenzentom i Redakcji za cenne uwagi.

## LITERATURA

- ARENS W.Ż., GAJDIN A.M. 1978 – Geologo-gidrogeologiczeskije osnovy geotechnologiczeskich metodow dobyczy poleznych iskopajemych. Nedra, Moskwa.  
 BOHDANOWICZ K. 1939a – Działalność PIG w 1938 roku. Biul. Państw. Inst. Geol., 18.  
 BOHDANOWICZ K. 1939b – Problemy ropy Wójczy i poszukiwań ropy w miocenie. Biul. Państw. Inst. Geol., 18: 109–114.  
 BOKWA P., KASZTELEWICZ Z. 2019 – Technologia wydobycia siarki metodą otworową na złożu „Basznia 1”. Gór. Odkr., 59 (6): 51–59.  
 BOLEWSKI A. 1937 – Siarka rodzima w Polsce. Prz. Chem., 2: 21–25.  
 BOLEWSKI A. 1996 – Moje życie – moja praca. AGH, MOŚZNiL, CPP GSMiE PAN.  
 CZARNOCKI J. 1939 – Poszukiwania ropy naftowej w okolicach Wójczy i na obszarach sąsiednich po obu stronach Wisły w r. 1929–31. Biul. Państw. Inst. Geol., 18.  
 DUNIKOWSKI A., KĘSKA J., OCIEPA T. 1978 – Otworowa eksploatacja surowców stałych. Wyd. AGH, Kraków.  
 GĄSIEWICZ A. 2000 – Sedymentologia i diageniza wapieni poselenitowych a model genetyczny polskich złóż siarki rodzimej. Pr. Państw. Inst. Geol., 172.

- GAŚIEWICZ A. 2020 – Siarka. Siarka rodzima. Bilans zasobów perspektywicznych kopalni Polski wg stanu na 31.12.2018 r. Państw. Inst. Geol.-PIB: 213.
- GAŚIEWICZ A., OLCHOWY P. 2022 – Lithological zoning and stable isotopes distribution in carbonates in the polish native sulfur deposits. Implications for origin of the ores. *Ore Geol.*, 148, 105037.
- GUTMAN E., KWIECIEŃ K. 1992 – Polska siarka. Wyd. A. Konieczny, Warszawa.
- HAJDO S., KLICH J., GALINIĄK G. 2007 – Ekologiczne i technologiczne osiągnięcia w 40-letniej historii górnictwa otworowego siarki w Polsce. *Gór. Geoinż.*, 31 (3/1): 199–215.
- KIREJCZYK J. 1996 – Systemy otworowej eksploatacji złóż siarki. *Gosp. Sur. Miner.*, 12 (2): 263–277.
- KIREJCZYK J. 2021 – Historia odkryć złóż siarki rodzimej w Polsce. Rejony jej występowania, zasoby i parametry. [W:] Wójcik-Łużycki A. (red.), *Dzieje górnictwa siarkowego w Polsce od XV do XXI wieku. Muzeum Historyczne Miasta Tarnobrzega*: 63–69.
- KIREJCZYK J., KRANÇOW M. 1987 – Rozwój techniki i technologii otworowej eksploatacji siarki w Polsce. *Prz. Gór.*, 43 (4): 15–21.
- KRAJEWSKI R. 1962 – O budowie i powstaniu złoża siarki w Piaseczynie. *Wszechświat*, 4: 85–91.
- KRAJEWSKI R. 1973a – Problemy geologiczne w górnictwie otworowym siarki. *Problemy eksploatacji otworowej surowców stałych. Wyd. Śląsk, Katowice*: 22–37.
- KRUPIŃSKI B. 1969 – Karol Bohdanowicz, pedagog i człowiek. Materiały uroczystej sesji poświęconej 100. rocznicy urodzin K. Bohdanowicza. *Bull. Inst. Geol.*, 232: 15–19.
- KUBICA B. 1978 – O możliwości prognozowania istotnych dla podziemnego wytopienia siarki parametrów geologicznych na przedpolu eksploatacji. *Biul. Inst. Geol.*, 309, Z badań geologicznych regionu świętokrzyskiego, 13: 147–174.
- KUBICA B. 1994a – Metasomatism of Badenian sulphates of the Carpathian Foredeep and its palaeogeographic conditions. *Geol. Quart.*, 38 (3): 395–414.
- KUBICA B. 1994b – The discovery of new sulphur deposits between the Vistula and San rivers (the Carpathian Foredeep, southern Poland) – a historical review. *Geol. Quart.*, 38 (3): 341–3520.
- KUBICA B. 1997 – Relation of sulfur-forming processes to lithofacial and structural features of Badenian chemical sediments in the Carpathian Foredeep (Poland). *Slovak Geol. Mag.*, 3 (1): 121–130.
- KUBICA B., OSMÓLSKI T. 1965 – Notatki z historii kopalnictwa siarkowego w Polsce. *Prz. Geol.*, 13 (6): 260–262.
- KUBICA B., PAWŁOWSKA K. 1984 – Złóża siarki rodzimej oraz perspektywy ich poszukiwań w miocenie zapadliska przedkarpackiego. *Górnictwo Surowców Chemicznych. Mat. Symp., Kraków*: 582–596.
- KWIATKOWSKI S. 1962 – W sprawie genezy wapieni osiarkowanych rejonu Grzybowa. *Rocznik PTG*, 32 (2): 339–358.
- MACHAŁSKI S. 1957 – Kopalnia siarki w Jaltipan (Meksyk). *Prz. Gór.*, 1: 17–20.
- NIEĆ M. 1977 – Kras a geneza złóż siarki w Polsce. *Dyskusja. Kwart. Geol.*, 21 (4): 855–864.
- NIEĆ M. 1986 – Procesy transformujące złoża siarki. *Prz. Geol.*, 34 (7): 366–374.
- NIEĆ M. 1992 – Native sulfur deposits in Poland. [W:] Kimberly B.H. i Wessel G.R. (red.), *Native sulfur. Developments in geology and exploration. Society for Mining Metallurgy, Littleton, Colorado*: 23–50.
- NIEĆ M. 2023 – Historia odkryć złóż siarki przez zespół Profesora Pawłowskiego. Tarnobrzęskie Zagłębie Siarkowe – Od odkrycia złóż siarki do cudu ekologii. 70. rocznica odkrycia złóż siarki. Konferencja historyczno-ekologiczna; 28–29 września 2023 r., Tarnobrzeg. Wyd. Muzeum Zamek Tarnowskich w Tarnobrzegu.
- NIEĆ M., SERMET E. 2023 – Lithological zoning and stable isotopes distribution in carbonates in the Polish native sulfur deposits. Implications for origin of the ores. *Discussion, comment. Ore Geol. Rev.*, 159: 105556.
- NIEĆ M., MICHAŁSKI A., GÓRECKI J., RYBICKI S. 1972 – Zagadnienie optymalizacji eksploatacji siarki metodą otworową na podstawie danych geologicznych i modelowych. *Prz. Geol.*, 20 (7): 322–329.
- NIEĆ M., ŚLIZOWSKI K., KAWULAK M., LANKOF L., SALAMON E. 2007 – Kryteria ochrony złóż pozostawianych przez likwidowane kopalnie w warunkach zrównoważonego rozwoju na przykładzie modelowym złóż siarki rodzimej. *IGSMiE PAN, Kraków*.
- NIELUBOWICZ B. 1972 – Zakres rozwoju prac badawczych nad technologią górnictwa eksploatacji otworowej siarki. *Odwadnianie Kopalń i Geotechnika*, 4: 7–21.
- ODLANICKI-POCZOBUTT M. 1978 – Osiągnięcia i zasługi profesora Stanisława Pawłowskiego w działalności naukowej, zawodowej i organizacyjno-społecznej. *Biul. Inst. Geol.*, 309, Z badań geologicznych regionu świętokrzyskiego, 13: 11–28.
- OLCHOWY P. 2015 – Środowiska sedimentacji i charakterystyka izotopów trwałych węgla i tlenu w utworach siarkonośnych rejonu złoża siarki rodzimej Osiek–Baranów Sandomierski, zapadlisko przedkarpackie. *Rozprawa doktorska, Bibl. Główna AGH, Kraków*.
- OSMÓLSKI T. 1969 – Siarka w zapadlisku przedkarpackim w latach 1415–1921. *Kwart. Geol.*, 13 (3): 233–252.
- OSMÓLSKI T. 1976 – Kras a geneza złóż siarki w Polsce. *Kwart. Geol.*, 20 (3): 559–574.
- PAWLIKOWSKI M. 1982 – Studium mineralogiczno-petrograficzne produktów przeobrażeń gipsów mioceńskich w złożu siarki Wydrza. *PAN Oddział w Krakowie. Pr. Miner.*, 72: 7–60.
- PAWLIKOWSKI M., PRZYBYŁOWICZ W. 1980 – Isotope mapping of the gypsum and sulfur-bearing limestone contact zone in the Machów sulfur deposit. *Mineral. Pol.*, 11 (1): 111–122.
- PAWŁOWSKI S. 1957 – Mapa geologiczna okolic Tarnobrzega, 1:50000. *Inst. Geol.*
- PAWŁOWSKI S. 1961 – O polskiej siarce i jej znaczeniu. *Prz. Geol.*, 9 (1): 1–5.
- PAWŁOWSKI S. 1962 – Mapa geologiczna okolic Solca–Dąbrowa–Grzybowa, 1: 20 000. *Inst. Geol.*
- PAWŁOWSKI S. 1969 – Dotychczasowe wyniki i perspektywy dalszych poszukiwań złóż siarki rodzimej. *CAG Inst. Geol., Warszawa*.
- PAWŁOWSKI S. 1983a – Historia badań i odkrycia złóż siarki w rejonie Tarnobrzega. [W:] Rola nauki w odkrywaniu i dokumentowaniu złóż siarki oraz wkład kadry badawczo-inżyniersko-technicznej w ich zagospodarowaniu na przestrzeni lat 1953–1983. *XXX rocznica odkrycia złóż siarki w PRL. Mat. Symp., Tarnobrzeg*: 12–35.
- PAWŁOWSKI S. 1983b – O historii odkrycia złóż siarki rodzimej w Polsce (1952–1982). *Kwart. Hist. Nauki i Techniki*, 28 (2): 405–424.
- PAWŁOWSKI S., PAWŁOWSKA K., KUBICA B. 1979 – Geology and Genesis of the Polish sulfur deposits. *Econ. Geol.*, 74: 475–483.
- PAWŁOWSKI S., PAWŁOWSKA K., KUBICA B. 1983 – Miocenie złoża siarki rodzimej. [W:] Rola nauki w odkrywaniu i dokumentowaniu złóż siarki oraz wkład kadry badawczo-inżyniersko-technicznej w ich zagospodarowaniu na przestrzeni lat 1953–1983. *XXX rocznica odkrycia złóż siarki w PRL. Mat. Symp., Tarnobrzeg*: 36–95.
- PAWŁOWSKI S., PAWŁOWSKA K., KUBICA B. 1985 – Budowa geologiczna tarnobrzęskiego złoża siarki rodzimej. *Pr. Inst. Geol.*, 114.
- PIĄTKOWSKI T. 1974 – Kras w osadach tertonu okolic Piaseczna koło Tarnobrzega. *Kwart. Geol.*, 18 (4): 770–788.
- RYKA W. 1983 – Profesor Stanisław Pawłowski, czyli trzydzieści lat życia dla siarki. [W:] Rola nauki w odkrywaniu i dokumentowaniu złóż siarki oraz wkład kadry badawczo-inżyniersko-technicznej w ich zagospodarowaniu na przestrzeni lat 1953–1983. *XXX rocznica odkrycia złóż siarki w PRL. Mat. symp., Tarnobrzeg*: 5–11.
- SERMET E., GÓRECKI J. 2020 – Od „Dołka Machowskiego” do Jeziora Tarnobrzęskiego, czyli zagospodarowanie terenu pogórniczego Kopalni Siarki w Machowie. *Hereditas Minarium*, 6: 51–55.
- SERMET E., NIEĆ M. 2021 – Not Mining Sterilization of Explored Mineral Resources. The Example of Native Sulfur Deposits in Poland. *Case History. Resources*, 10, 30, doi.org/10.3390/resources10040030
- SERMET E., NIEĆ M., BOKWA P. 2021 – Geological conditions of borehole sulfur mining by underground smelting method. *Gosp. Sur. Min.*, 37 (4): 55–78.
- STROJENIJE i zakonomiernosti razmieszczenija siernych miestorożdienij SSSR. *Naukowa Dumka, Kijew* 1979.
- SZIMANSKI P. 1886 – Po woprosu o ńiefti w Carstwie Polskom. *Gornyj Żurnał*, 1: 382.
- ŚLIZOWSKI K., NIEĆ M., LANKOF L. 2000 – Siarka. Surowce mineralne Polski. Surowce chemiczne. *Wyd. IGSMiE PAN, Kraków*.
- WYTYCZNE dla opracowania profili wiertniczych w celu oceny parametrów hydrogeologicznych siarkonośnej serii złożowej w rejonie Grzybowa. *WUG, Katowice*, 1967.
- ŻAKIEWICZ B. 1965 – Perspektywy podziemnej otworowej eksploatacji siarki w Polsce. *Zesz. Nauk. AGH, nr 78, 10. Sesja Naukowa*.
- ŻAKIEWICZ B. 1967 – Sprawozdanie polskiego przemysłu siarkowego z podróży służbowej do Stanów Zjednoczonych na podstawie sprawozdań członków delegacji (Z. Lewandowskiego, J. Gadomskiego, H. Leszczyńskiego, S. Ptaszkiewicza, Z. Paterka). *Mat. Arch. HYDROKOP, Kraków*.
- ŻAKIEWICZ B. 1975 – Exploitation of bedded sulphur deposits by hydrodynamic method. *Sulphur*, 120: 35–43.

Praca wpłynęła do redakcji 6.11.2023 r.  
Akceptowano do druku 7.11.2023 r.