

Eksploracja polskich złóż siarki metodą podziemnego wytopiania

Józef Kirejczyk¹, Justyna Burchard-Piekutowska², Karol Kopec^{2,3}

Exploitation of Polish sulphur deposits using the underground melting method. *Prz. Geol.*, 71: 645–652.

Abstract. We describe the characteristics and development of borehole exploitation of sulphur deposits using the underground melting method. The history of its development is discussed and usage of this method in individual Polish native sulphur mines was characterized. Particular attention is focused on technological problems associated with the exploitation of deposits using the Frasch method in Polish geological conditions, and to on innovations introduced to improve extraction and have a positive impact on the natural environment.

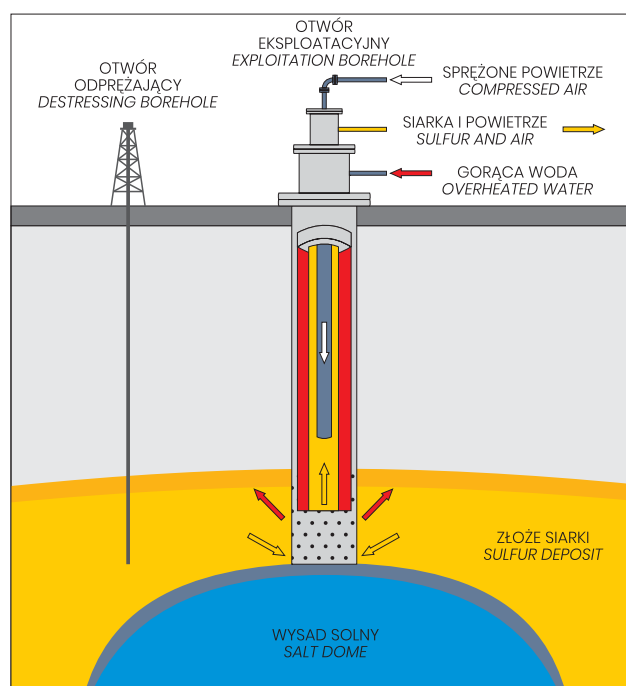
Keywords: sulphur, borehole exploitation of sulphur, sulphur mine, Frasch method, underground melting method

Otworowa metoda wydobywania siarki, mająca korzenie w amerykańskim przemyśle wydobywczym, znalazła zastosowanie w polskich kopalniach, stając się podstawową i najbardziej efektywną metodą eksploatacji złóż tego surowca. Uwarunkowania geologiczno-górnictwa polskich złóż siarki, największych na świecie, znacznie różniły się od tych, dla których ta metoda eksploatacji została opracowana. W artykule przedstawiono zarys wprowadzenia, przystosowania i rozwoju metody Frascha w warunkach polskich, a także problemy i wyzwania, przed jakimi stawali naukowcy i inżynierowie, starając się ujarzmić tę technologię. Opisano również obecny stan zagospodarowania złóż siarki rodzimej. Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie historii krajowego wykorzystania metody podziemnego wytopu siarki, dzięki której w drugiej połowie XX w. Polska stała się na długi okres wiodącym producentem siarki na świecie.

POCZĄTKI METODY FRASCHA

Odkrycie bogatych złóż siarki w Stanach Zjednoczonych, w rejonie Zatoki Meksykańskiej w stanie Luizjana w 1867 r., dały początek rozważaniom na temat najbardziej ekonomicznego sposobu ich eksploatacji.

W 1890 r. opracowano metodę eksploatacji złóż siarki za pomocą otworów wiertniczych. Jej wynalazcą był inżynier chemik Herman Frasch (1851–1914), urodzony w Niemczech, i od jego nazwiska metoda ta została nazwana metodą Frascha. Proces polegał na zatłaczaniu przegrzanej wody technologicznej do złóż za pomocą otworów wydobywczych wyposażonych w cztery współśrodkowo umieszczone kolumny rurowe. Woda technologiczna o temperaturze 160–165°C wytapiała siarkę w złożu. Stopiona, płynna siarka, jako cięższa od wody, spływała na przyspągową część złoża i dno otworu, a następnie była wynoszona na powierzchnię przez kolumnę wewnętrzną, w którą tłoczono sprężone powietrze (ryc. 1). Otwory wydobywcze lokalizowano w środkowej części złoża, które zalegało w czapach wysadów solnych, tworząc strukturę hydrogeologicznie zamkniętą, co uniemożliwiało ucieczkę gorącej wody. Na



Ryc. 1. Schemat otworowej eksploatacji złoża siarki metodą Frascha

Fig. 1. Diagram of borehole exploitation of sulphur deposit using the Frasch Method

obrzeżach złoża umieszczano otwory odprężające, którymi odbierano wykorzystaną już wodę.

Metoda Frascha, opatentowana w 1891 r., umożliwiła ekonomicznie opłacalną eksploatację złóż siarki w Luizjanie i we wschodniej części Teksasu. Wkrótce rozprzeczniła się w amerykańskim górnictwie siarkowym. Po wygaśnięciu patentu Frascha w 1914 r. inne firmy również rozpoczęły wydobywanie siarki tą samą metodą ze złóż nad Zatoką Meksykańską – w delcie rzeki Missisipi, we wschodnim Teksasie i Meksyku (Kirejczyk, 1989).

¹ Emerytowany dyrektor Przedsiębiorstwa Usługowo-Produkcyjnego SIGMA BP Sp. z o.o.; kirejczyk@pro.onet.pl

² Przedsiębiorstwo Usługowo-Produkcyjne SIGMA BP Sp. z o.o., ul. Sienkiewicza 23, 39–400 Tarnobrzeg; justyna.burchard@gmail.com; sigmabp@sigmabp.com

³ Kopalnia Siarki Osiek, Grupa Azoty Kopalnie i Zakłady Chemiczne Siarki Siarkopol S.A., Grzybów 34, 28-200 Staszów; k.kopec.sigmabp@gmail.com; sigmabp@sigmabp.com

ROZWÓJ TECHNOLOGII OTWOROWEJ EKSPLOATACJI POLSKICH ZŁÓŻ SIARKI

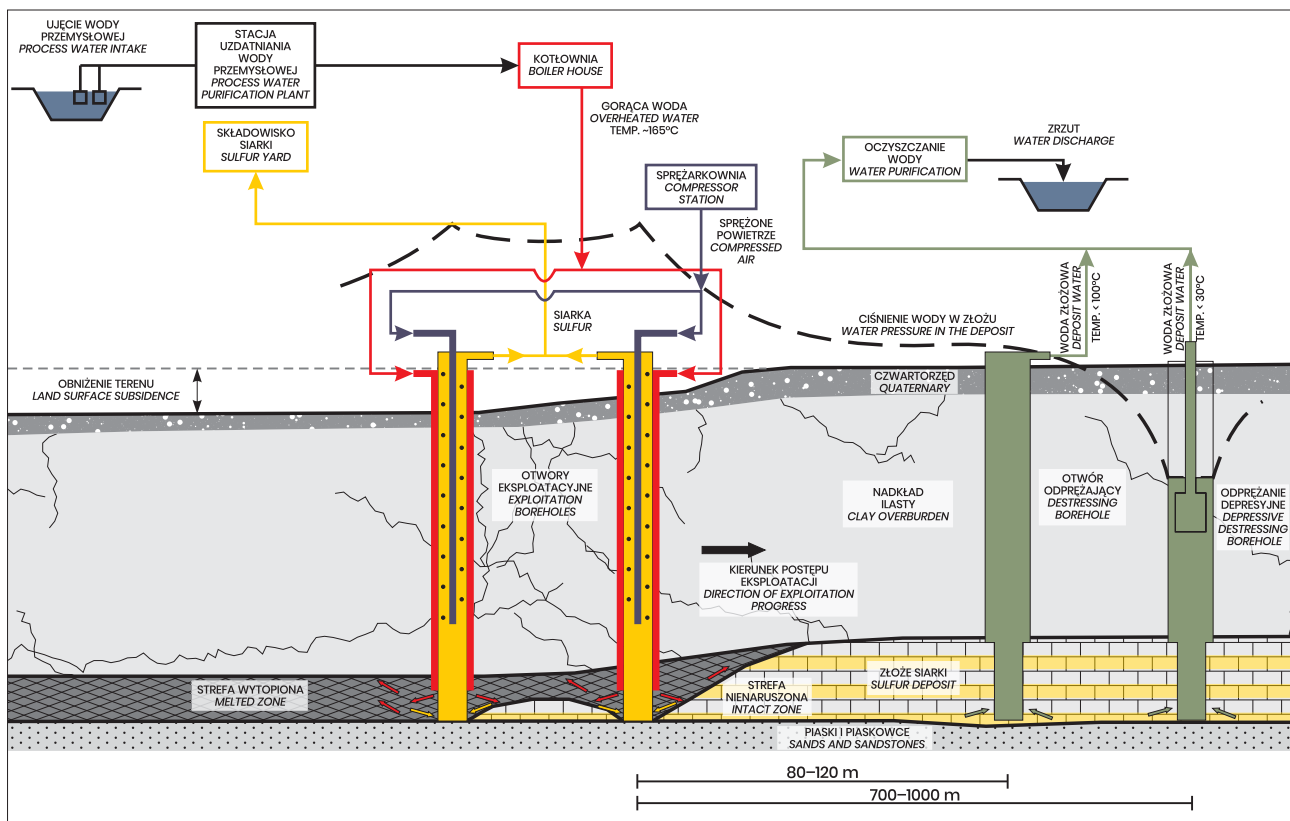
Odkrycie w 1953 r. bogatych złóż siarki w Polsce skłoniło do poszukiwań odpowiednich technologii ich eksploatacji. W tym czasie w kraju brakowało szczegółowej wiedzy na temat technicznych aspektów związanych z metodą podziemnego wytopu siarki. Pierwsze istotne informacje na temat otworowej górnictwa siarki za pomocą metody Frascha dotarły do Polski dzięki profesorowi Stanisławowi Pawłowskiemu i inż. Franciszkowi Machalskiemu, ówczesnemu dyrektorowi Kopalni Siarki *Tarnobrzeg* w budowie. Pierwsze koncepcje zrodziły się wkrótce po tym, jak w 1955 r., w ramach udziału w Kongresie Geologicznym w Meksyku, zwiedzili kopalnię *Jaltipan*, gdzie stosowano tę metodę. Inżynier Franciszek Machalski miał wtedy wątpliwości co do przydatności metody Frascha do eksploatacji tarnobrzeskich złóż siarki. Jego obawy wynikały z obecności zawodnionych piasków pod złożem oraz potencjalnego, niekontrolowanego rozprzyszczenia wód podziemnych w przepuszczalną warstwę podłoża. W owym czasie dominowała opinia, że metoda Frascha jest skuteczna tylko w przypadku złóż siarki o hydrogeologicznie zamkniętej strukturze, w formie autoklawu, tj. ze szczelnym podłożem i grubym, nieprzepuszczalnym nadkładem (Gutman, Kwiecień, 1992). Niemniej jednak Franciszek Machalski podkreślił potrzebę przeprowadzenia szczegółowych badań geologicznych oraz prób z zastosowaniem metody podziemnego wytapiania siarki ze złoża w Grzybowie. W jego przekonaniu warunki tamtejszego złoża były znacznie korzystniejsze niż innych polskich złóż. Jednym z prekursorów wprowadzenia tej technologii do eksploata-

cji polskich złóż siarki był także inżynier górniczy Włodzimierz Jan Sroka. Miał on okazję poznać jej tajniki, pracując w kopalniach w Meksyku jako stypendysta ONZ.

Kluczowym momentem w rozwoju metody Frascha w Polsce był rok 1960, kiedy to Bogdan Żakiewicz opracował podstawy teoretyczne i opatentował technologiczne rozwiązanie dostosowujące metodę Frascha do krajowych warunków eksploatacji złóż siarki (patent nr 48717). Metoda ta, nazywana przez niego hydrotermodynamiczną, pozwalała na wytapianie siarki w otwartym hydrogeologicznie złożu typu pokładowego. Bogdan Żakiewicz wprowadził również innowacyjne elementy, które umożliwiały kontrolowanie przepływu gorącej wody zatłaczanej do złoża, kształtowanie strefy wytopu siarki oraz eksploatację złóż o niewielkiej przepuszczalności. Ta metoda znalazła zastosowanie w eksploatacji złóż siarki typu pokładowego w Polsce, na Ukrainie i w Iraku.

Warto zaznaczyć, że eksploatacja polskich złóż siarki, hydrogeologicznie otwartych, typu pokładowego, wymagała innych rozwiązań w porównaniu do amerykańskich złóż, które leżały na wysadach solnych i charakteryzowały się zamkniętą strukturą.

Kluczowym elementem odróżniającym polską metodę od tradycyjnej metody Frascha była kontrola przepływu gorącej wody w złożu, osiągnięta poprzez intensywne odbieranie ze złoża zużytej, schłodzonej wody za pomocą otworów zlokalizowanych na przedpolu frontu eksploatacji (Kirejczyk i in., 1995). Tam, gdzie było potrzebne zwiększenie przepływu gorącej wody przez mniej przepuszczalne części złoża, stosowano dodatkowo różne techniki, takie jak torpedowanie zbitych warstw złoża przez odpalanie ładunków wybuchowych w nieuzbrojonych otworach wiertniczych, hydrauliczne szczelinowanie złoża



Ryc. 2. Sterowanie przepływem wody w złożu siarki – obieg otwarty
Fig. 2. Water flow control in the sulphur deposit – open circulation

poprzez wodę zatłaczaną pod wysokim ciśnieniem, a także zastosowanie roztworów kwasów lub zasad reagujących z wapniem, co jest znane jako kwasowanie lub ługowanie w celu zwiększenia porowatości złoża. To właśnie te innowacyjne podejścia i adaptacje pozwoliły na skuteczne wydobycie siarki z polskich kopalń.

Do roku 1993 wydobycie siarki za pomocą otworowej metody podziemnego wytapiania opierało się w Polsce na otwartym obiegu wody technologicznej. W tym procesie około 60% gorącej wody zatłaczanej do złoża odprowadzano na powierzchnię w procesie odprężania złoża. Następnie woda odbiorowa, po uprzednim oczyszczeniu z siarkowodoru, była zrzucana do cieków powierzchniowych (ryc. 2). Temperatura wody, która wracała ze złoża, miała średnio 30–50°C, a ciepło zawarte w tej wodzie było tracone bezpowrotnie. Takie rozwiązanie sprawiało, że technologia ta była znacznie energochłonna. Na dodatek charakteryzowała się bardzo negatywnym wpływem na środowisko naturalne, ze względu na silne zmineralizowanie wody złożowej odprowadzanej do cieków powierzchniowych (Kirejczyk, 1996).

Szczególnym przypadkiem zastosowania otwartego systemu eksploatacji była kopalnia *Machów II*, z której wybierano część płytko zalegającej siarki w bliskim sąsiedztwie odkrywkowej kopalni *Machów*. W kopalni *Machów II* system odprężania złoża, odprowadzający na powierzchnię ziemi wodę złożową, stanowił również system odwodnienia kopalni odkrywkowej *Machów*.

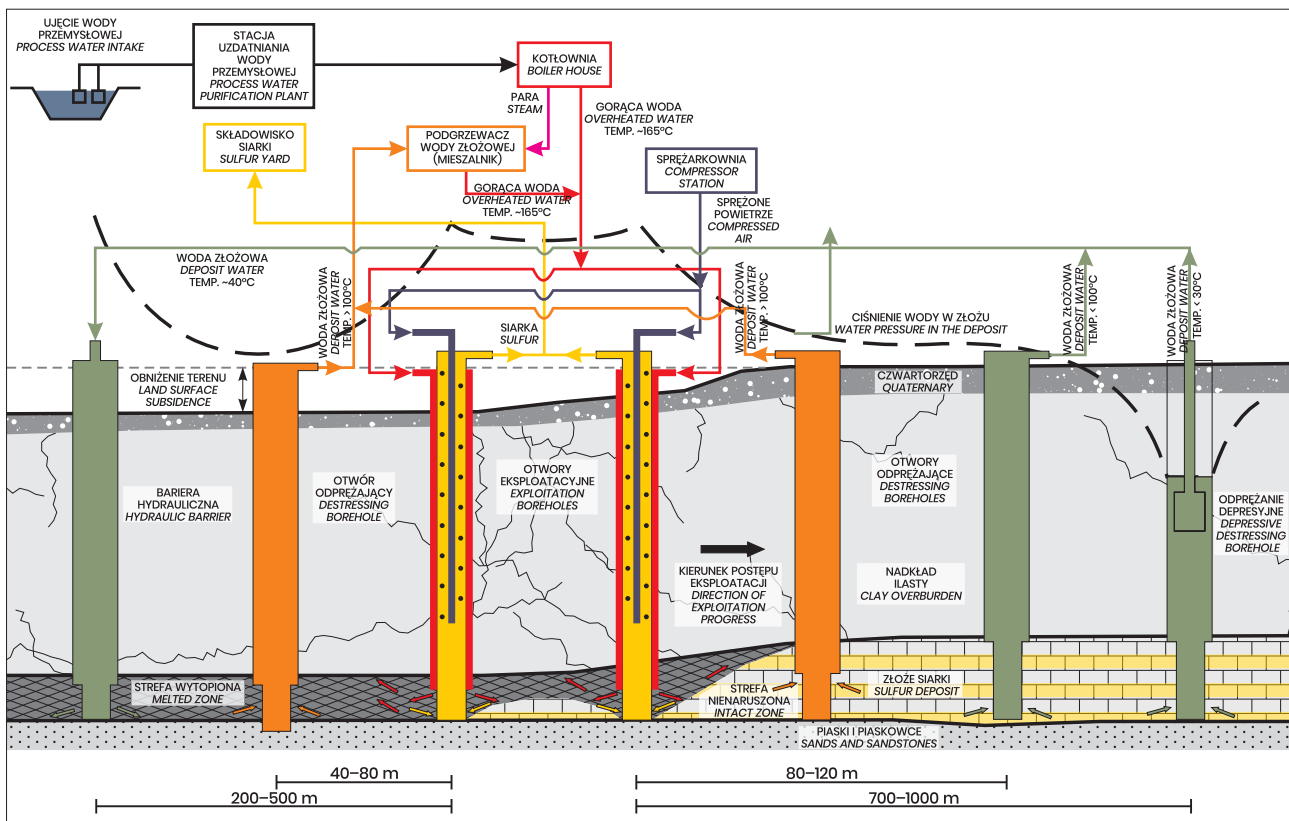
Oplaty za pobór i odprowadzanie wody oraz duże zużycie energii miały wpływ na wzrost kosztów eksploatacji, co z kolei zachęciło do opracowania i wprowadzenia tzw. zamkniętego obiegu wody technologicznej, stosowanego

także we współcześnie działających kopalniach *Osiek* i *Basznia II*.

W zamkniętym obiegu wody po odzyskaniu wody ze złoża zostaje ona podgrzana do odpowiedniej temperatury i następnie jest ponownie wykorzystywana w procesie wytapiania siarki (ryc. 3). Ten sposób eliminuje podstawowy czynnik degradacji środowiska, jakim było zrzucanie wód złożowych do cieków powierzchniowych w trakcie eksploatacji z otwartym obiegiem. Woda podgrzewana powtórnie stanowi teraz od 50% do 70% wody gorącej zatłaczanej do złoża – resztę zaś stanowi woda kotłowa. Wykorzystanie ciepła zawartego w wodzie z odprężania złoża pozwala na obniżenie energochłonności procesu wydobycia siarki o około 30% w porównaniu do eksploatacji z otwartym obiegiem, co znacząco obniża koszty eksploatacji, w których koszty energii stanowią ponad 60%.

Innym, istotnym udoskonaleniem eksploatacji siarki była hermetyzacja procesu wydobycia. Zmodernizowano konstrukcję otworów eksploatacyjnych i instalacje powierzchniowe, eliminując w ten sposób skażenie środowiska przez pyły siarki. Takie ulepszenia wprowadzono również w przypadku polowych zbiorników siarki płynnej, które wyposażono w instalacje wychwytyjące opary siarki i siarkowodoru.

Kolejnym, ważnym aspektem w ograniczaniu emisji pyłów siarki do atmosfery było wprowadzenie niepylących form magazynowania i transportu siarki. Zamiast kruszyć siarkę zestaloną w postaci bloków, zaczęto wykorzystywać siarkę w stanie płynnym, co znacząco zmniejszyło ilość pylenia podczas przeładunków. W zmniejszeniu emisji pyłów siarki pomogło dodatkowo wprowadzenie na rynek innych niepylących form siarki, takich jak granulowana i płatkowana.



Ryc. 3. Schemat otworowej eksploatacji siarki z zamkniętym obiegiem wody technologicznej

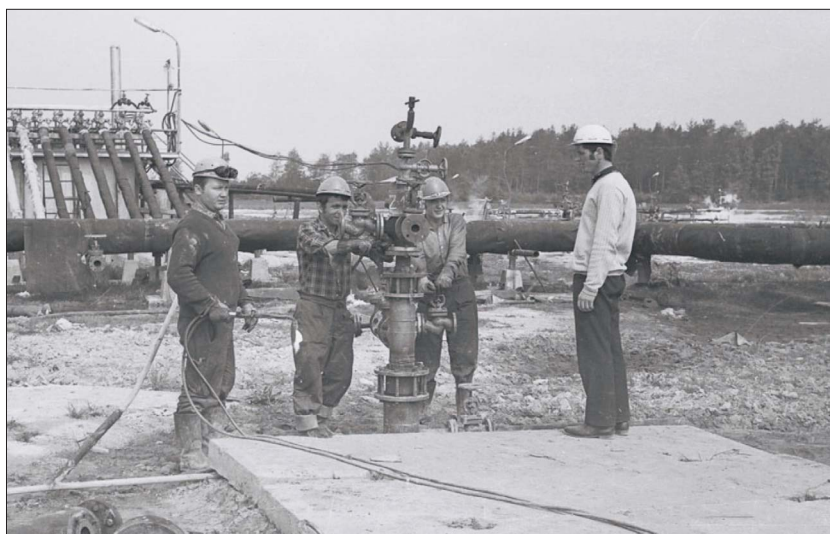
Fig. 3. Diagram of a closed water circuit used in borehole sulphur exploitation

Tab. 1. Wydobywanie siarki metodą otworową w Polsce (wg Wójcika-Łużyckiego, 2021)**Table 1.** Sulphur mining using the borehole method in Poland (after Wójcik-Łużycki, 2021)

Nazwa kopalni <i>Name of the mine</i>	Lata eksploatacji <i>Years of exploitation</i>	Wydobywanie siarki [mln ton] <i>Sulphur production volume</i> [million tons]
Grzybów	1966–1996	26,376
Jeziórko	1967–2001	74,090
Basznia	1977–1993	0,495
	2019–2022	0,053
Machów II	1985–1993	0,785
Osiek	1993–2022	17,791
Razem / Total	1996–2022	119,590

Zatłaczanie dużej ilości wody technologicznej wiązało się ze wzrostem ciśnienia w złożu, co często skutkowało gwałtownymi, niekontrolowanymi wypływami wód złożowych i płynnej siarki na powierzchnię, podczas procesu wiercenia otworu i później, w czasie eksploatacji. Takie zjawiska, zwane erupcjami, powodowały zanieczyszczenie gleby, wód i powietrza związkami siarki. Stanowiły również poważne zagrożenie dla załogi, ze względu na wysoką temperaturę wody oraz znaczne stężenie siarkowodoru (Zardzewiały, 2006). W latach 90. wprowadzono zasady profilaktyki, które pozwoliły znacząco ograniczyć liczbę erupcji, głównie poprzez unikanie deformacji wewnętrznych nadkładu i wprowadzenie systemów odwadniania obszarów górniczych.

W Polsce metodę otworowej eksploatacji złóż siarki systematycznie rozwijano, aby dostosować ją do specyficznych warunków geologicznych i górniczych. Po uzyskaniu pozytywnych wyników w kopalni *Grzybów* w 1966 r., otwierano kolejne kopalnie, takie jak *Jeziórko* w 1967 r., *Basznia* w 1977 r., *Machów II* w 1985 r. i *Osiek* w 1993 r. Do końca 2022 r. wydobyto z tych kopalń łącznie 119,59 mln ton siarki (tab. 1).

**Ryc. 4.** Montaż głowicy otworu eksploatacyjnego. Na drugim planie sterownia eksploatacyjna. Fot. z Arch. Kopalni Siarki *Grzybów***Fig. 4.** Assembly works on the head of an exploitation borehole. The control station is in the background. Photo from *Grzybów Sulphur Mine* Archive

KOPALNIA SIARKI GRZYBÓW

Historia Kopalni Siarki *Grzybów* rozpoczęła się w 1958 r., kiedy to opracowano dokumentację geologiczną złoża siarki w okolicach Grzybowa. To właśnie wtedy narodziło się zainteresowanie możliwością zastosowania metody Frascha i pod nadzorem dr. inż. Bogdana Żakiewicza przeprowadzono program badań mających na celu dokładne poznanie warunków geologiczno-górniczych złoża siarki w Grzybowie pod kątem możliwości zastosowania tej metody eksploatacji. Efektem tych starań było powołanie Doświadczalnej Kopalni Siarki w Grzybowie w lipcu 1964 r. Inżynier Jan Staszkiwicz został pierwszym zawiadowcą kopalni, a po jego odejściu w październiku 1964 r. stanowisko objął inż. Stanisław Ptaszkiewicz.

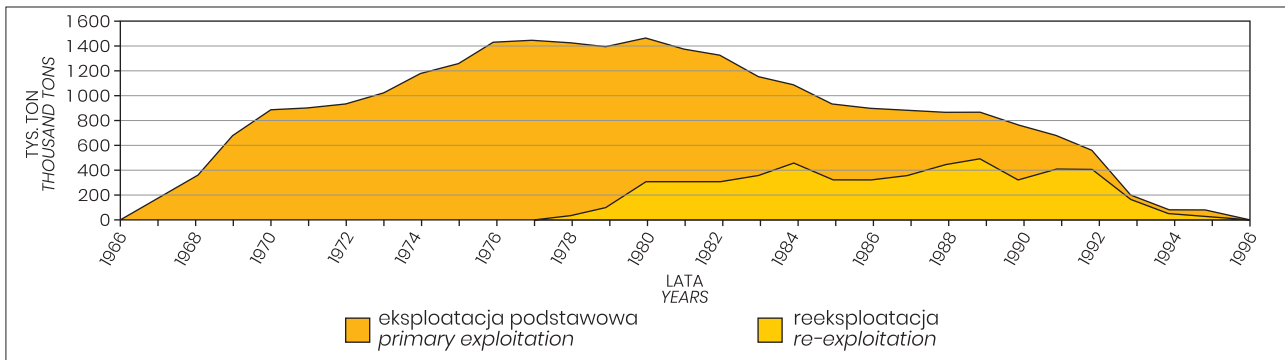
W dniu 27.05.1966 r. przeprowadzono rozruch urządzeń kopalni, a 1.06.1966 r., po dwudniowym wygrzewaniu złoża, wydobyto pierwszą tonę siarki z otworu D-2. Ten przełomowy moment stanowił początek dynamicznego rozwoju górnictwa siarki w Polsce. Do końca roku 1966 udało się wyprodukować tą metodą 15 350 ton siarki.

Samodzielne przedsiębiorstwo pod nazwą Doświadczalna Kopalnia Siarki *Grzybów* utworzono 1.01.1967 r. Dyrektorem tej kopalni został inż. Franciszek Nadrowski. Zgodnie z uchwałą Komitetu Ekonomicznego Rady Ministrów (KERM) nr 157/67 postanowiono rozbudować kopalnię do zdolności produkcyjnej 800 tys. ton siarki rocznie. Cel ten osiągnięto w lipcu 1969 r.

Pierwszy okres eksploatacji toczył się pod znakiem eksperymentów z nową technologią, która była wówczas jeszcze mało znana w Polsce. W tworzeniu podstaw tej nowej metody eksploatacji w polskich warunkach brali udział naukowcy z różnych instytucji, takich jak Instytut Geologiczny w Warszawie, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie oraz Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej.

Kopalnia została przekształcona w samodzielne przedsiębiorstwo państwowe 1.01.1968 r. Dzięki intensywnej rozbudowie kopalni wydobywanie siarki zwiększało się w szybkim tempie – w 1968 r. pozyskano 365 395 ton, w 1969 r. – już 670 861, a w 1970 r. – 878 920 ton.

Wydobywanie siarki z Kopalni Siarki *Grzybów* rosło z każdym rokiem. Kluczowym momentem było zastąpienie paliwa węglowego gazem ziemnym, co pozwoliło na znaczące zwiększenie produkcji gorącej wody. W 1972 r. kopalnia osiągnęła zdolność wydobywczą 1 mln ton siarki. Działania techniczne, technologiczne i organizacyjne, kontynuowane w kolejnych latach, umożliwiły dalszy wzrost wydobywania. Największą produkcję osiągnięto w 1980 r. – 1,472 mln ton siarki. Dostosowując konstrukcję otworów wydobywczych (ryc. 4) do warunków geologiczno-górniczych skupiano się na wyborze odpowiednich średnic kolumn rurowych oraz długości i rozmieszczeniu filtrów wodnych i siarkowych (Małek i in., 1986). Zmodernizowano również konstrukcję rurociągów technologicznych, które służyły do transportu mediów energetycznych, takich jak gorąca woda i sprężone powietrze, a także stopiona siarka.



Ryc. 5. Wielkość i struktura wydobywania w Kopalni Siarki *Grzybów* w latach 1966–1996 (wg Wójcika-Łużyckiego, 2021)
Fig. 5. Sulphur production and extraction structure in the *Grzybów* Sulphur Mine in the years 1966–1996 (after Wójcik-Łużycki, 2021)

Przekształcono transport siarki z otworów do zakładu przemysłowego, zastępując rurociągi stalowe, ogrzewane parą, rurociągami ogrzewanymi stykowo przez rurę transportującą gorącą wodę do kopalni (ciepło oddawane przez rurę z gorącą wodą nie dopuszcza do zestalenia siarki transportowanej do zakładu przerobczego). Siarkę formowano w bloki układane na utwardzonych placach składowych. Bloki te miały wysokość ok. 8 m i powstawały w miarę zestalenia się siarki. Przed załadunkiem siarki do wagonów i transportem trzeba było kruszyć jej bloki, co powodowało emisję pyłów do atmosfery oraz ryzyko zapłonu podczas urabiania. W związku z tym siarka kruszona stopniowo była wypierana przez siarkę płynną i granulowaną.

Zdobyto także umiejętność podgrzewu wód złożowych, co umożliwiło zamknięcie obiegu wód technologicznych i wyeliminowanie zrzutów skażonych wód do cieków powierzchniowych. Ważnym osiągnięciem było też bezpieczne wiercenie otworów wydobywczych w warunkach podwyższonego ciśnienia złożowego oraz eksploatacja zasobów w filarze drogi Staszów–Busko (Kirejczyk i in., 1986).

Opanowanie technik reeksploracji niedostatecznie szczerpanego złoża umożliwiło lepsze wykorzystanie zasobów. Reeksplorację rozpoczęto w 1978 r. i systematycznie zwiększono jej udział w wydobywaniu, co przedłużyło żywotność kopalni o ponad 5 lat (ryc. 5).

Niestety, w maju 1996 r. w warunkach trudnej sytuacji na rynkach siarki, zdecydowano o zakończeniu działalności kopalni *Grzybów*, z której w ciągu 30 lat wydobyto 26,376 mln siarki. Najwyższy poziom wydobywania, około 1,4 mln ton rocznie, osiągnięto w latach 1976–1981 – był to znaczący wkład w krajową produkcję siarki.

Decyzją ministra przemysłu i handlu (Decyzja, 1992) Kopalnię Siarki *Grzybów* postawiono w stan likwidacji. Obszary, które wcześniej wykorzystywano do działalności górniczej, poddano rekultywacji. Łącznie decyzjami o rekultywacji objęto obszar o powierzchni 548,84 ha i dodatkowo, 10,06 ha wokół składowiska siarki i składowiska odpadów pogórnictwa *Jarosławice*. Zdefiniowano kierunki zagospodarowania terenów: 502,30 ha miało być przywróconych do stanu leśnego, a 56,60 ha wykorzystanych w rolnictwie. Obszar o powierzchni 47,09 ha, po odpowiednim uporządkowaniu, przeznaczono do przyszłego wykorzystania przez inne podmioty gospodarcze. Działania te miały na celu przywrócenie naturalnego stanu terenu i zapewnienie zrównoważonego wykorzystania gruntów po zakończeniu działalności górniczej.

KOPALNIA SIARKI JEZIÓRKO

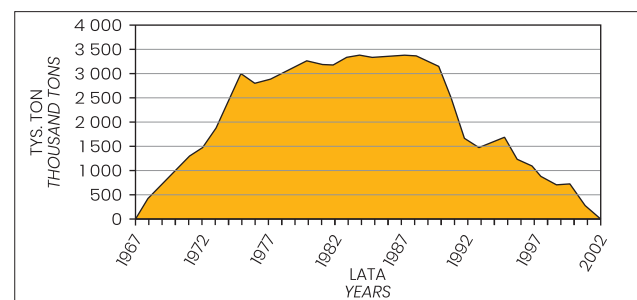
Kopalnia *Jeziórko* rozpoczęła działalność w 1967 r. jako druga w Polsce otworowa kopalnia siarki. Na czele zespołu inwestycyjnego, powołanego w październiku 1966 r. przez dyrektora Kopalni i Zakładów Przetwórczych Siarki *Siarkopol* w Tarnobrzegu, aby zainicjować budowę kopalni *Jeziórko*, stanął inż. Tadeusz Gałuszka. Tempo prac było imponujące – pierwsze trzy otwory eksploatacyjne odwiercono do końca czerwca 1967 r., a równolegle budowano kotłownię. Pierwszą siarkę wydobyto 16.07.1967 r.

W ciągu pierwszych 5 lat działalności kopalnia osiągnęła zdolność wydobywania 1,5 mln ton siarki/rok. Kolejne lata przyniosły dalszy wzrost wydobywania. W 1975 r. zdolność produkcyjna kopalni zwiększyła się do ok. 3,0 mln ton rocznie. W latach 1980–1990 wydobywanie siarki utrzymywało się na poziomie 3,2–3,4 mln ton rocznie, co czyniło kopalnię *Jeziórko* największą kopalnią siarki na świecie. W ciągu 34 lat wydobyto z niej ponad 74 mln ton siarki (ryc. 6).

Wodę technologiczną pozyskiwano z różnych źródeł, w tym z kotłowni gazowych oraz elektrociepłowni w Machowie, a od 1978 r. również z Elektrociepłowni Stalowa Wola. W latach 80. specjalnie dla potrzeb kopalni, zbudowano Kotłownię Olendry opalaną miałem węglowym.

Pierwotnie siarkę zestalano w blokach, a później przechowywano ją w ogrzewanych zbiornikach w stanie płynnym i w tej postaci dostarczano do odbiorców za pomocą ogrzewanych cystern kolejowych.

Pracą otworów wydobywczych sterowano za pomocą centralnych węzłów wydobywczych na polu górnictwa, tzw. sterowni, które obsługiwały jednocześnie od 12 do 18 otworów. W późniejszych latach sterownie wyposażono w instalację wychwytyjącą siarkowodór i opary siarki z zbiorników.



Ryc. 6. Wydobywanie siarki z kopalni *Jeziórko* w latach 1967–2001 (wg Wójcika-Łużyckiego, 2021)

Fig. 6. Sulphur production volumes in the *Jeziórko* Sulphur Mine (after Wójcik-Łużycki, 2021) in the years 1967–2001

Technologia wydobycia nie różniła się znacząco od stosowanej w kopalni *Grzybów*. Doświadczenia zdobyte w poprzednich kopalniach pozwoliły na wprowadzenie nowych rozwiązań w procesie eksploatacji. Do kluczowych osiągnięć można zaliczyć zastosowanie ogrzewania rurociągów stykowo, wprowadzenie form magazynowania i transportu siarki niepowodujących pylenia (siarka płynna, granulowana), a także opracowanie technik wiercenia otworów w warunkach podwyższonego ciśnienia złożowego.

Po zakończeniu pozyskiwania siarki podjęto prace likwidacyjne infrastruktury technicznej i rekultywację terenów poeksploatacyjnych. Duży nacisk położono na usunięcie zanieczyszczeń pozostałych po eksploatacji oraz przywrócenie naturalnego porządku na tych terenach. Dzięki zastosowaniu wapna poflotacyjnego, stanowiącego odpad z przeróbki rudy siarkowej odkrywkowej Kopalni Siarki *Machów*, udało się przeprowadzić skuteczną rekultywację terenów poeksploatacyjnych. Rekultywacji w kierunku wodno-rolno-leśnym poddano teren o powierzchni 2098 ha. Powstałe zbiorniki wodne, rowy odwadniające i kanały odprowadzające wodę do rzeki Żupawki zajmują powierzchnię ok. 250 ha, a pozostałych 1850 ha stanowią tereny leśno-łąkowe (Andrychowicz i in., 2003).

KOPALNIA SIARKI OSIEK

Korzystne prognozy dotyczące rynku siarki w latach 1978–1979 sprawiły, że w październiku 1984 r. rząd podjął decyzję o budowie Kopalni Siarki *Osiek*. Początkowo zdolność produkcyjna kopalni wynosiła ok. 330 tys. ton siarki rocznie, a w drugim etapie miała osiągnąć 1,3 mln ton siarki/rok. Jednocześnie planowano rozbudowę Elektrowni Połaniec o dwa bloki energetyczne po 200 MW, dostosowując je do dostaw ciepła dla tej kopalni w celu zasilania zamkniętego obiegu wody technologicznej (Wójcik-Łużycki, 2021). Współpraca z oddaloną o ok. 10 km elektrownią w Połaniu okazała się korzystna dla kopalni, biorąc pod uwagę wyniki analizy kosztów, które wskazywały, że zakup ciepła z elektrowni był tańszy niż budowa własnej ciepłowni. To partnerstwo opłacało się również

Elektrowni Połaniec, ponieważ poprawiało jej wskaźniki energetyczne i redukowało zrzut wód pochłodniczych do Wisły.

Pierwotnie zakładano, że rurociągami łączącymi elektrownię z kopalnią będzie przesyłanych ok. 350 m³/h wody o temperaturze około 190°C. Węzeł mieszania pozwalał dostosować parametry wody do wymagań kopalni – temperatura wody miała wynosić 162°C, a ciśnienie ok. 8 atmosfer. Jednak w miarę postępu eksploatacji coraz intensywniej wykorzystywano ciepło zawarte w wodzie odbieranej ze złoża, którą przetwarzano w Stacji Uzdatniania Wody Złożowej. Tam podlegała ona procesom obróbki chemicznej, polegającej na usuwaniu twardości metodą wapno–soda z jednoczesnym wiązaniem siarki z siarkowodoru. Oczyszczona woda była podgrzewana do temperatury ok. 152°C przy użyciu wody sieciowej o temperaturze około 187°C, która po oddaniu ciepła wracała do Elektrowni Połaniec. Wykorzystanie zamkniętego obiegu wody technologicznej pozwoliło zaoszczędzić około 30% energii cieplnej oraz wyeliminować zrzut wód złożowych do środowiska naturalnego.

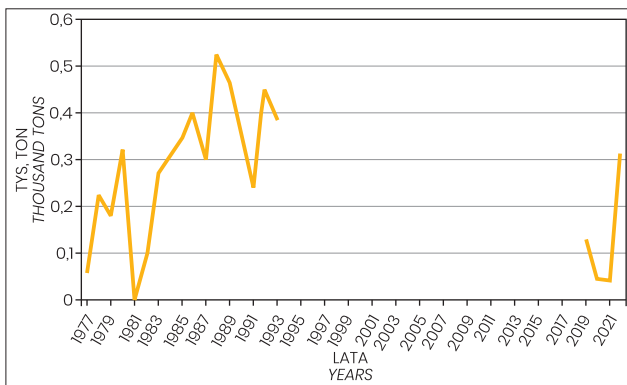
Pierwszym dyrektorem Kopalni Siarki *Osiek* został dr Eugeniusz Gutman, który w dniu 1.12.1986 r. powołał służbę górniczą. Kopalnia *Osiek* rozpoczęła działalność wydobywczą w kwietniu 1993 r. i nadal prowadzi eksploatację. Jest to jedna z dwóch kopalni na świecie, w których wydobycie siarki jest prowadzone metodą Frascha – drugą jest kopalnia *Basznia II*.

Pole górnicze kopalni jest podzielone na bloki eksploatacyjne. Otwory wydobywcze (ryc. 7) w obrębie tych bloków są połączone rurociągami ze wspólną sterownią. Do przesyłania gorącej wody, sprężonego powietrza oraz transportu płynnej siarki z otworów do zbiornika siarkowego przy sterowni służy system trójdrożnych rurociągów. Sterownie, które są węzłami wydobywczymi na polu górniczym, wyposażono w aparaturę kontrolno-pomiarową oraz zbiornik siarkowy z instalacją utylizującą siarkowódór i opary siarki. Płynna siarka jest przesyłana z tego zbiornika do dwóch zbiorników magazynowych. Każdy z nich ma pojemność 2300 m³. Ze zbiorników tych siarka służy grawitacyjnie do stanowisk napełniania cystern



Ryc. 7. Wiercenie otworu eksploatacyjnego. Po lewej czynny otwór eksploatacyjny. W tle Elektrownia Połaniec. Fot. z Arch. Kopalni Siarki *Osiek*

Fig. 7. Drilling of an exploitation borehole. On the left, a sulphur-exploitation borehole. The Połaniec Power Plant is in the background. Photo from the *Osiek* Sulphur Mine Archive



Ryc. 8. Wydobywanie siarki w kopalni *Basznia* (wg Wójcika-Łużyckiego, 2021)

Fig. 8. Sulphur production volumes in the *Basznia* Sulphur Mine (after Wójcik-Łużycki, 2021)

kolejowych, za pomocą których jest transportowana do odbiorców. Część płynnej siarki jest przerabiana na granulaty, który jest przechowywany na placu magazynowym lub bezpośrednio ładowany do transportu. Granulowana siarka w pełni zastąpiła siarkę kruszoną, ze względu na mniejszą emisję pyłów i łatwiejsze zastosowanie w procesach przemysłowych.

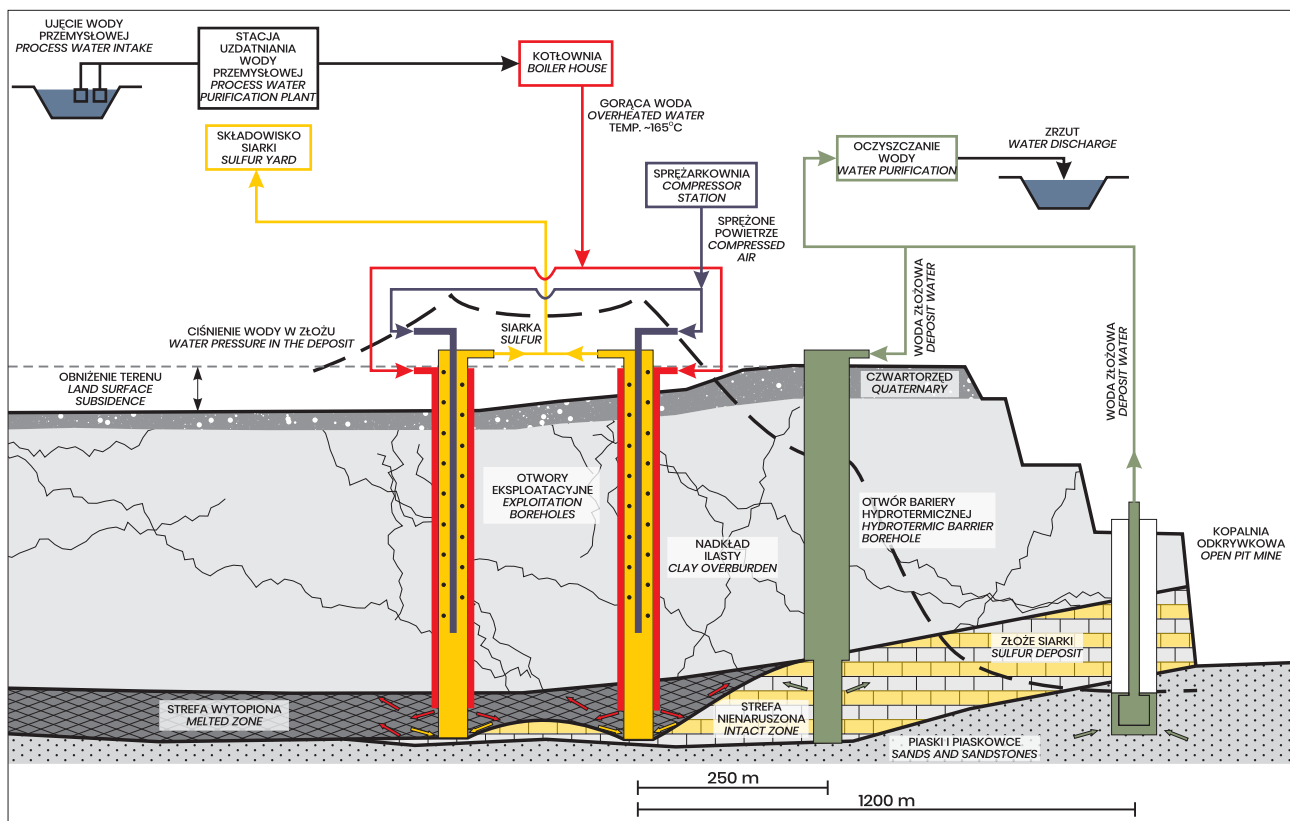
Do końca 2022 r. z kopalni *Osiek* wydobyto łącznie 17,792 mln ton siarki. Najwyższy poziom wydobywania – ponad 0,8 mln ton/rok – osiągnięto w latach 2004–2007 (ryc. 8). Obecnie rocznie jest wydobywanych ok. 0,45 mln ton siarki (2022 r.). Oprócz siarki płynnej, granulowanej oraz pastylkowanej Kopalnia Siarki *Osiek* produkuje również nawozy na bazie siarki. Zasoby złóż w dużej mierze

już szcerpano, w związku z tym władze kopalni starają się o koncesję na nowe złoża, takie jak Rudniki i Baranów Sandomierski-Skopanie.

KOPALNIA SIARKI *BASZNIA*

Kopalnia Siarki *Basznia* rozpoczęła działalność w październiku 1977 r. jako kopalnia doświadczalna. Głównym celem tego zakładu było przetestowanie otworowego wydobycia siarki ze zbitych i małowadnorodnych wapieni osiarkowanych, cechujących się małą wodochłonnością. Kontrolę nad eksploatacją złoża prowadził Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Przemysłu Siarkowego *Siarkopol*. Planowano przeprowadzenie próbnej eksploatacji w trzech różnych strefach wodochłonności. Projektując i budując kopalnię szczególną uwagę zwracano na ochronę środowiska, do czego wykorzystano wcześniejsze doświadczenia związane z zamkniętym obiegiem wody w Kopalni Siarki *Grzybów* (Kirejczyk i in., 1998).

Od roku 1981 kopalnia rozpoczęła pełną eksploatację górnictwa, którego łączne zasoby bilansowe wynosiły ok. 109,6 mln ton, a w 1990 r. została przejęta przez spółkę *Sulphurquest of Poland Ltd*. Spółka ta kierowała kopalnią do lipca 1993 r., kiedy to nie uzyskała przedłużenia koncesji na kontynuację wydobycia siarki (Bokwa, Kasztelewicz, 2018). W lipcu 2000 r. Kopalnia Siarki *Basznia* została przejęta przez Kopalnię Siarki *Machów*, która została zobowiązana do likwidacji zakładu górniczego i reкультacji obszaru przemysłowego. Ze względu na ograniczone środki finansowe zadania te tylko częściowo zostały zrealizowane. W 2011 r. nieruchomości należące do byłej kopalni zostały kupione przez firmę *Polska Siarka Sp. z o.o.* w organizacji z siedzibą w Sandomierzu.



Ryc. 9. Schemat otworowej eksploatacji siarki skojarzonej z eksploatacją odkrywkową

Fig. 9. Diagram of borehole exploitation of sulphur combined with open-pit mining

W roku 2019 nowy inwestor – spółka *Polska Siarka*, która należy do kapitałowej Grupy PBI *Sandomierz*, wznowiła wydobycie siarki na tym terenie, otwierając nowoczesny Zakład Górniczy *Basznia II*. Wprowadzono innowacyjne rozwiązania w zakresie sterowania i automatyki, zaawansowany system uzdatniania wód złożowych, dostarczony przez *Veolia Water Technologies*, oraz nowoczesną, w pełni zautomatyzowaną stację kotłów gazowych firmy *Viessmann*, która zwiększyła efektywność energetyczną kopalni. Proces wydobycia jest prowadzony z wykorzystaniem zamkniętego obiegu wód technologicznych. Kopalnia działa w systemie ciągłym. Cała odzyskana ze złoża woda jest uzdatniana i podgrzewana, a ewentualne straty są uzupełniane z ujęcia rzecznoego. Wydobyta siarka jest dostarczana klientom w postaci ciekłej lub granulowanej. Przedsiębiorstwo prowadzi również produkcję i sprzedaż nawozów. Od czasu wznowienia działalności do końca 2022 r. z kopalni wydobyto 53,1 tys. ton siarki. Planuje się rozbudowę kopalni, aby osiągnąć zdolność produkcyjną 2 mln ton siarki rocznie.

KOPALNIA SIARKI *MACHÓW II*

Kopalnia Siarki *Machów II*, która była kopalnią doświadczalną, rozpoczęła działalność w sierpniu 1985 r. Głównym celem tego przedsięwzięcia było przetestowanie otworowej metody eksploatacji w złożu znajdującym się w bliskim sąsiedztwie czynnej kopalni odkrywkowej *Machów* (Ney, 2000).

Nadzór nad eksploatacją siarki w kopalni *Machów* sprawował Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Przemysłu Siarkowego *Siarkopol* z siedzibą w Tarnobrzegu. Nietypowe warunki eksploatacji złoża w tej kopalni otworowej wynikały z oddziaływania czynnej kopalni odkrywkowej na poziom wód w złożu. Aby ograniczyć wpływ gorących wód, które były pompowane do otworów eksploatacyjnych w odkrywce, zimną wodę zatłaczano do otworów bariery schładzającej, usytuowanej między gniazdem eksploatacji i studniami odwadniającymi odkrywkę (ryc. 9). Mimo tych działań eksploatacja siarki metodą otworową była prowadzona w warunkach, gdzie poziom wód złożowych był obniżony o 20–40 m. Kopalnia korzystała z gorącej wody dostarczanej przez elektrociepłownię w Machowie.

W celu ograniczenia oddziaływania kopalni na środowisko wdrożono nowoczesne technologie. Zastosowano m.in. zmodernizowane otwory wydobywcze z teleskopowymi filtrami, segmentowe rurociągi technologiczne z ogrzewaniem stykowym rury siarkowej i powietrznej oraz systemy do wyłapywania oparów siarki i siarkowodoru nad zbiornikami z płynną siarką.

Eksploatację kopalni zakończono w październiku 1993 r. ze względów ekonomicznych. Największą roczną produkcję (139,2 tys. ton) osiągnięto w 1987 r. Łączne wydobycie siarki wyniosło 784,9 tys. ton (Wójcik-Łużycki, 2021).

Obszar kopalni *Machów II* zrehabilitowano. Dziś są tam tereny zielone wokół zbiornika wodnego o nazwie Jezioro Tarnobrzesckie, utworzonego w zlikwidowanym wyrobisku odkrywkowej kopalni *Machów*.

PODSUMOWANIE

Metoda eksploatacji złóż siarki za pomocą otworów wiertniczych, zwana również metodą Frascha lub metodą podziemnego wytapiania została opracowana pod koniec XIX w. w Stanach Zjednoczonych. Istotą tej technologii

jest ciśnieniowe zatłaczanie przegrzanej wody przez odpowiednio skonstruowane otwory wiertnicze do złoża, wytopienie siarki, a następnie wyniesienie jej na powierzchnię za pomocą sprężonego powietrza. Pierwotnie wykorzystywano ją do eksploatacji specyficznych złóż siarki w czapach gipsowych diapirów solnych w rejonie Zatoki Meksykańskiej. Później polscy naukowcy i inżynierowie zastosowali ją i zmodyfikowali w celu wydobywania surowca ze złóż pokładowych zlokalizowanych w rejonie tarnobrzesckim i staszowskim, a później i w innych częściach świata. Hydrotermodynamiczna metoda podziemnego wytopu sprawdziła się jako najbardziej ekonomiczna i wydajna metoda wydobycia siarki w polskich warunkach. Mimo początkowych problemów natury technologicznej, spowodowanych specyficznymi warunkami geologiczno-górnictwymi, z biegiem czasu udało się opracować i udoskonalić bardzo wydajny i efektywny sposób wydobywania siarki. Wieloletnie doświadczenia z kilku kopalń pozwoliły na zbudowanie dużej bazy wiedzy na temat otworowej eksploatacji złóż siarki rodzimej, która jest prowadzona do chwili obecnej, choć w dużo mniejszej skali.

Dziękujemy Recenzentom – prof. zw. dr. hab. inż. Maciejowi Mazurkiewiczowi i dr. hab. inż. Krzysztofowi Bukowskiemu – za cenne uwagi, zaangażowanie i poświęcony czas włożony w sporządzenie recenzji. Panów głębokie zrozumienie tematu oraz profesjonalna ocena przyczyniły się do poprawy jakości naszej pracy za co jesteśmy szczerze wdzięczni.

LITERATURA

- ANDRYCHOWICZ F., BUCZEK Z., GOŁDA T., PANTULA Z. 2003 – Rekultywacja i zagospodarowanie terenów pogórnictw Kopalni Siarki „Jeziórko”, Mat. IV Stowarzysz. Forum Dysk. „Była siarka i co dalej?”, Tarnobrzeg, 11–12.09.2003 r., 8: 39–46.
- BOKWA P., KASZTELEWICZ Z. 2019 – Technologia wydobycia siarki metodą otworową na złożu „Basznia II”. *Gór. Odkr.*, 59 (6): 51–59.
- BURCHARD T., KIREJCZYK J., PANTULA Z. 2007 – Rekultywacja i zagospodarowanie terenów po eksploatacji złóż siarki. [W:] *Polski Kongres Górniczy*, 19–21 września 2007, Kraków.
- DECYZJA Ministra Przemysłu i Handlu nr 129/org/92 z dnia 31 lipca 1992 r.
- GUTMAN E., KWIECIEN K. 1992 – *Polska siarka*. Wyd. A. Konieczny, Warszawa.
- KIREJCZYK J. 1989 – Kopalnie siarki w Louisianie (USA) i Mishraqu (Irak). Seminarium „Aktualne problemy górnictwa otworowego złóż siarki”. OBR PS „Siarkopol”, Tarnobrzeg, 14–15.09.1989 r.
- KIREJCZYK J. 1996 – Systemy otworowej eksploatacji złóż siarki. *Gosp. Sur. Miner.*, 12 (2): 263–277.
- KIREJCZYK J., BURCHARD T., TABOR M., FRANKIEWICZ A., PANTULA Z., CIEŚLA A., KUTYNA T. 1995 — Opracowanie metodyki doboru systemów otworowej eksploatacji siarki metody podziemnego wytapiania w zróżnicowanych warunkach geologiczno-górnictw. OBR PS „Siarkopol”, Tarnobrzeg.
- KIREJCZYK J., BURCHARD T., TABOR M., PANTULA Z., PRUSZYŃSKA H. 1998 – Ekspertyza dla Kopalni Siarki „Basznia”. *Arch. Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Przemysłu Siarkowego „Siarkopol”*, Tarnobrzeg.
- MAŁEK B., MATLIŃSKI T., PITEK S. – Rozwój i doskonalenie eksploatacji otworowej na przykładzie Doświadczalnej Kopalni Siarki w Grzybowie. Materiały na sympozjum z okazji XX-lecia eksploatacji siarki metodą otworową w PRL 1966-1986: Gospodarcze i naukowe efekty dwudziestoletniej działalności Kopalni i Zakładów Chemicznych Siarki „Siarkopol” w Grzybowie, Grzybów, 5–6 czerwca 1986 r.
- NEY R. (red.) 2000 – *Surowce mineralne Polski*. Surowce chemiczne. Siarka. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- WÓJCIK-ŁUŻYCKI A. (red.) 2021 – *Dzieje górnictwa siarkowego w Polsce od XV do XXI wieku*. Muzeum Historyczne Miasta Tarnobrzega.
- ZARDZEWAŁY M. 2006 – Likwidacja zagrożeń ekologicznych w Kopalni Siarki „Grzybów”. Konferencja „Ochrona środowiska na terenach górniczych” – Szczyrk, 31 maja – 2 czerwca 2006 r.

Praca wpłynęła do redakcji 30.10.2023 r.
Akceptowano do druku 23.11.2023 r.