

*Stanisław Hajdo\*, Jerzy Klich\*, Grzegorz Galiniak\**

## EKOLOGICZNE I TECHNOLOGICZNE OSIĄGNIĘCIA W 40-LETNIEJ HISTORII GÓRNICTWIA OTWOROWEGO SIARKI W POLSCE\*\*

---

### 1. Wstęp

W ubiegłym roku minęło 40 lat od daty powszechnie uważanej za początek górnictwa otworowego siarki w Polsce. 1 czerwca 1966 roku w miejscowości Grzybów k. Staszowa ze złoża rudy siarki rodzimej, z wykorzystaniem metody podziemnego wytapiania wydobyto pierwsze tony płynnej siarki. Ten pozytywny wynik eksperymentu adaptacji tej metody eksploatacji siarki do warunków występowania polskich złóż siarki, tzw. złóż hydraulicznie otwartych, dał impuls do dynamicznego rozwoju wydobycia siarki nową w warunkach polskich technologią (metoda Hermana Frascha opatentowana w USA w 1894 roku). Olbrzymia dynamika wzrostu wydobycia siarki tą metodą możliwa była dzięki jej zaletom, w stosunku do tradycyjnych metod odkrywkowej i podziemnej, wynikającym m.in. z krótkiego czasu udostępniania złoża za pomocą otworów wydobywczych oraz wiele niższych kosztów wydobycia. Okres dynamicznego rozwoju górnictwa otworowego siarki w latach 1966–1976 odznacza się naciskiem na wzrost wydobycia, w mniejszym stopniu zaś uwzględnieniem wymogów ochrony środowiska. Po roku 1976 byliśmy już drugim eksporterem w świecie, drugim światowym producentem siarki, a KS „Jeziórko” stała się największą kopalnią otworową siarki na świecie.

W rezultacie niekorzystnej koniunktury na światowym rynku siarki nastąpiło po roku 1990 zmniejszenie wydobycia siarki, aż wreszcie zakończenie eksploatacji w czterech kopalniach: w KS „Grzybów” (od 1966 r. do 1996 r.) — głównie wskutek wyczerpania zasobów, w KS „Jeziórko” (od 1967 r. do 2001 r.) — wskutek nierentowności eksploatacji, a ponadto w dwóch kopalniach doświadczalnych, tzn. „Machów II” (od 1985 r. do 1993 r.) i KS „Basznia” (od 1977 r. do 1993 r.). Jednocześnie w miejsce przewidzianej do likwidacji KS „Grzybów” została wybudowana na nowym złożu rudy siarki KS „Osiek” (1993 r.).

---

\* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

\*\* Artykuł powstał w ramach badań własnych nr 10.10.100.73

W okresie istnienia górnictwa otworowego siarki w Polsce wydobyto w kopalniach, które teraz znajdują się w różnych fazach likwidacji, rekultywacji i zagospodarowania, ok. 102 470 tys. Mg siarki oraz ok. 8 565,9 tys. Mg siarki (do końca 2006 r.) w jedynej czynnej w tej chwili Kopalni Siarki „Osiek”. Mimo przewartościowania w obecnym czasie znaczenia górnictwa otworowego siarki w Polsce, należy podkreślić olbrzymi wkład polskiej myśli naukowo-technicznej w rozwój tej technologii. Zadecydowało to o sukcesach w odniesieniu do ochrony środowiska i osiągnięcia rentowności eksploatacji.

## **2. Krótka charakterystyka metody podziemnego wytapiania siarki**

Dla zrozumienia sposobów oraz skutków oddziaływania kopalni otworowej siarki na środowisko na wstępie należy wyjaśnić istotę tej eksploatacji, która w sposób zasadniczy różni się od pozostałych technologii górniczych, czyli eksploatacji podziemnej i odkrywkowej. Polega ona na wtłaczaniu do złoża rudy siarki wody przegrzanej o temperaturze ok. 160°C, co odbywa się za pomocą specjalnej konstrukcji otworów wydobywczych. Woda gorąca, migrując przez porowate, przepuszczalne i izolowane od stropu warstwą nieprzepuszczalną złoża rudy siarki, powoduje wytopienie siarki, która w postaci płynnej jest wydobywana na powierzchnię za pośrednictwem tych samych otworów.

Ogólnie technologia podziemnego wytapiania siarki według założeń metody Frascha wykorzystuje niską temperaturę topnienia siarki (ok. 120°C), nierozpuszczalność siarki w wodzie, niemieszanie się z wodą, a także jej gęstość prawie dwukrotnie większą od wody [2, 5, 6].

Aby złoża siarki mogło być eksploatowane tą metodą, musi ono spełniać kilka warunków, do których można zaliczyć [13]:

- wystarczającą miąższość pokładu rudy siarki;
- obecność szczelnej warstwy nad stropem rudy siarki oraz mało przepuszczalnej warstwy pod spągiem rudy;
- znaczną miąższość nadkładu (powyżej 75 m);
- wystarczającą tzw. jednostkową zasobność siarki w złożu;
- wystarczającą wodochłonność złoża.

Otwory eksploatacyjne zazwyczaj rozmieszczone są w regularnej siatce trójkątów równobocznych 45 × 45 m lub równoramiennych 45 × 60 m, oraz połączone z siecią rurociągów technologicznych. Konstrukcja uzbrojenia otworu pozwala na wprowadzenie do otworu wody technologicznej i sprężonego powietrza oraz na transport płynnej siarki ze złoża na powierzchnię. Otwory te w różnym etapie pracy mogą być wykorzystywane jako eksploatacyjne bądź odprężające do odbioru nadmiaru wody złożowej.

Woda zatłaczana do warstwy siarkonośnej powoduje podwyższenie ciśnienia złożowego i pojawienie się tzw. stożka represji, dzięki czemu płynna siarka wtłaczana jest do otwo-

ru, nie osiągając jednak poziomu wylotu na powierzchni. Poprzez wtlaczanie sprężonego powietrza siarka pompowana jest na powierzchnię.

Należy podkreślić, że wytworzenie lokalnej represji w złożu w rejonie prowadzonego wydobywania jest koniecznością technologiczną. Jednak stożek represji niesie ze sobą również negatywne zagrożenia, jakimi mogą być erupcje (niekontrolowane wypływy wód złożowych na powierzchnię), a także przepływy do horyzontu wodonośnego czwartorzędowego oraz niekorzystne przemieszczenia się wód złożowych silnie zmineralizowanych w obrębie horyzontu wodonośnego trzeciorzędowego obejmującego pokład siarki (zagrożenia ujęć wód podziemnych w otoczeniu kopalni). Dla zapobiegania takim sytuacjom złoża jest „odprężane” poprzez odbieranie ze złoża według określonych zasad, nadmiaru wód złożowych [2, 5, 6].

Pracujące na polach górniczych otwory eksploatacyjne, po wyczerpaniu się złoża z ich sąsiedztwa, są wyłączane i równocześnie na ich miejscu na przedpolu frontu wydobywczego włącza się nowe otwory. Otrzymuje się w ten sposób przemieszczanie się pól górniczych zgodnie z planowanym postępowaniem frontów eksploatacyjnych.

### **3. Elementy negatywnego wpływu eksploatacji otworowej siarki na środowisko**

Negatywne oddziaływanie kopalń otworowych siarki na środowisko jest wielokierunkowe i bardzo trudne do prognozowania, a także charakterystyczne dla każdej z kopalń. Zminimalizowanie tego wpływu jest jednak możliwe i konieczne, czego odzwierciedleniem są przedstawione poniżej przykłady z polskiego przemysłu siarkowego.

Do najbardziej specyficznych negatywnych oddziaływań otworowej eksploatacji siarki na środowisko naturalne zalicza się:

- zaburzenie pierwotnych stosunków wodnych w horyzoncie zarówno czwartorzędowym, jak i trzeciorzędowym pod względem ciśnienia, temperatury, kierunków przepływu i chemizmu wód;
- przekształcenie powierzchni wskutek tworzenia się niecki osiadania nad rejonami wyeksploatowanej siarki ze złoża rudy;
- skażenie powierzchni ziemi (gleby), wynikające ze specyfiki procesu na danym etapie jego rozwoju i ze zjawisk niekorzystnych towarzyszących eksploatacji;
- zubożenie zasobów wody przez pobór wody do procesu i zrzut zanieczyszczonej wody złożowej do cieków powierzchniowych;
- skażenie powietrza przez emisję siarkowodoru i pyłów siarki.

Zaburzenie pierwotnych stosunków wodnych w horyzoncie trzeciorzędowym wynika z istoty metody podziemnego wytapiania. Wprowadzenie w czasie eksploatacji gorącej wody technologicznej do złoża powoduje zaburzenia w środowisku wodnym zarówno po-

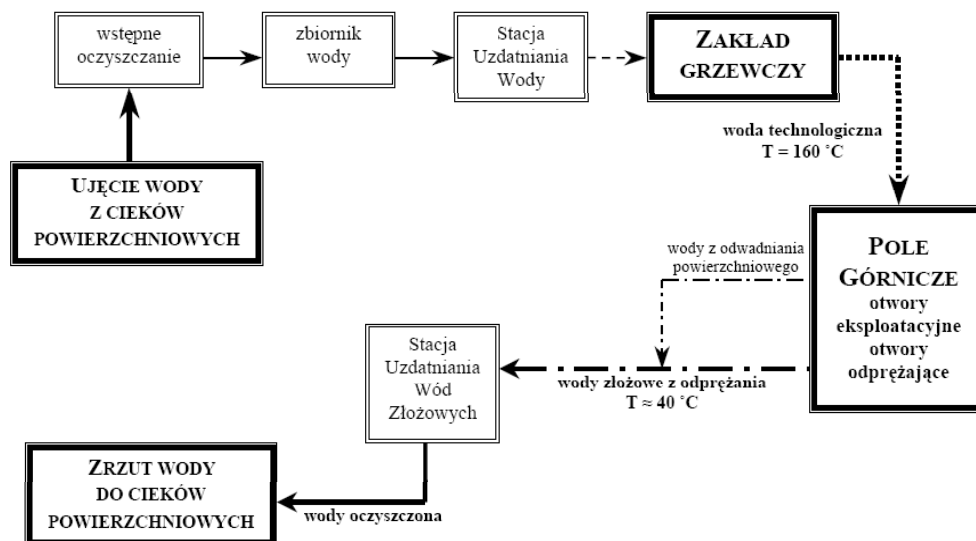
wierzchniowym, jak i podziemnym. Jest to związane głównie z warunkami geologicznymi i hydrogeologicznymi w rejonie złoża oraz poziomem opanowania stosowanej technologii. Przyczyną zaburzenia środowiska wodnego jest wzrost mineralizacji czwartorzędowych wód podziemnych, spowodowany represją ciśnienia złożowego i kontaktem tej warstwy wodonośnej z silnie zmineralizowanymi wodami trzeciorzędowymi oraz z miejscowymi zanieczyszczeniami siarką i pyłami siarki warstw przypowierzchniowych na polach górniczych i w rejonie składowisk (KS „Grzybów”, KS „Jeziórko”). Zanieczyszczenie horyzontu czwartorzędowego wodami warstwy trzeciorzędowej zachodzi głównie w czasie erupcji i samowypływów [11, 12].

Za główną przyczynę erupcji uznano niszczenie konstrukcji otworów przez naprężenia w górotworze, towarzyszące tworzeniu się niecki osiadania. Pozostała nad uszkodzeniem otworu zmniejszona grubość nadkładu, poddana kontaktowi z wodą złożową o wysokim ciśnieniu, zostaje rozszczelniona, doprowadzając do niekontrolowanego wypływu wód na powierzchnię. Inną przyczyną erupcji może być niewystarczające uszczelnienie rur okładzinowych na kontakcie z górotworem. Niezależnie od tego procesy tworzenia się niecki osiadania same w sobie powodują destrukcję szczelności nadkładu, powodując zagrożenie erupcyjne [2, 5].

Dodatkowo osiadanie terenu może być przyczyną niszczenia infrastruktury technicznej pól górniczych. Przy prognozowaniu wielkości i kształtu niecki osiadania brany był pod uwagę współczynnik wykorzystania zasobów ( $\eta = 0,6$ ) oraz współczynnik osiadania  $a$ , którego wartość dla polskich złóż siarki wynosi około 0,9 [1, 5].

W całym okresie eksploatacji w KS „Grzybów” wystąpiło 66 zjawisk erupcyjnych [2], natomiast w KS „Jeziórko” liczba powstałych erupcji przekraczała w pewnych okresach 20% liczby otworów włączonych do eksploatacji [1].

Kolejny czynnik negatywnego oddziaływania otworowych kopalń siarki, jakim jest skażenie gleb, ma związek z operacjami technologicznymi (np. odprężanie otworów, wtórne kruszenie zestalonej na składowiskach siarki) bądź z awariami i zakłóceniami w procesie eksploatacji (np. erupcje, przelanie zbiorników siarki, awarie rurociągów wody złożowej, siarki). Jeśli chodzi o rejon otworów eksploatacyjnych, rurociągów siarkowych czy zbiornikach płynnej siarki na polach górniczych, to skażenie, jeśli wystąpiło, natychmiast było likwidowane przez odpowiednie służby techniczne kopalń. Większe i bardziej znaczące skażenie gleby występowało na terenach stałych składowisk siarki (KS „Grzybów”, KS „Jeziórko”) oraz w rejonie wystąpienia erupcji. Znaczna obecność siarki w glebach powoduje intensywny wzrost ich zakwaszenia, a co za tym idzie, spadek pH nawet do wartości 1,2÷2,5 i całkowity zanik aktywności biologicznej gleby oraz mineralizacji związków próchnicznych [2, 3, 5, 6]. Przykładem bardzo niebezpiecznego wpływu składowiska siarki na środowisko glebowe było składowisko KS „Grzybów”. Koncentracja siarki w glebie w promieniu 2 km od składowiska była tak duża, że pH wynosiło tutaj mniej niż 4, natomiast na terenie samego składowiska około 1,3. Spowodowało to daleko idące zmiany własności fizykochemicznych i biologicznych z całkowitym lub częściowym unicestwieniem życia roślin wyższych, a także większości drobnoustrojów [2, 6].



Rys. 1. Ideowy schemat otwartego obiegu wód w kopalni siarki

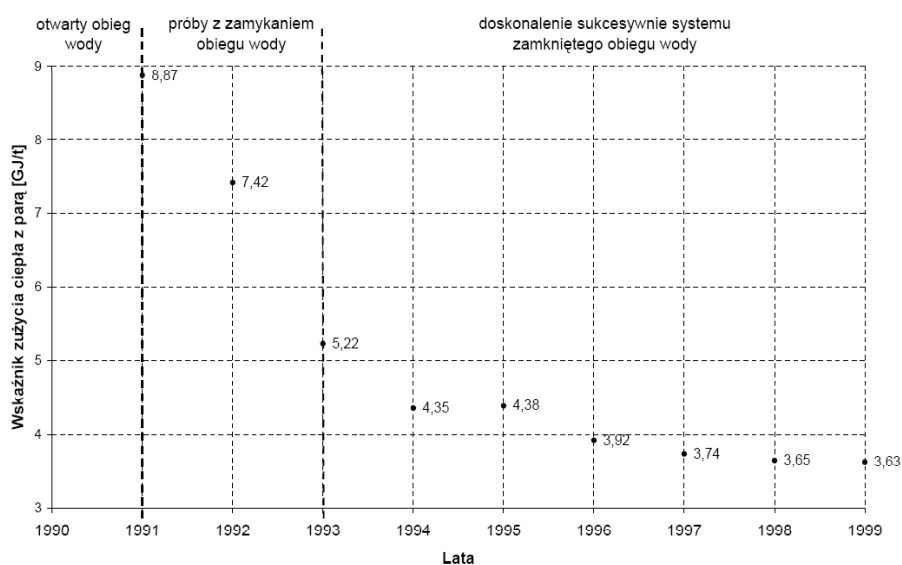
Źródło: opracowanie własne na podstawie [5]

Wielkość obciążenia środowiska związana z poborem wody przemysłowej do procesu i zrzutem wód złożowych i ścieków uzależniona jest w głównej mierze od rodzaju stosowanego systemu obiegu wody technologicznej i złożowej. W Kopalniach „Grzybów”, „Jeziorko”, „Basznia” i „Machów II” stosowany był otwarty obieg wód technologicznych i złożowych. Ogólna idea obiegu otwartego przedstawiona jest na rysunku 1.

System otwartego obiegu wody technologicznej polegał ogólnie na poborze wody z ujęcia powierzchniowego. Następnie woda była uzdatniana i podgrzewana. Tak powstała woda technologiczna zatłaczana była do złoża w celu wytopu siarki. Z otworów odprężających uzyskiwano wodę złożową, którą wstępnie oczyszczano z siarkowodoru i zawiesiny, a następnie zrzucano bezpośrednio do pobliskich cieków powierzchniowych. Wadą tej metody było to, że odbierając wodę złożową silnie zmineralizowaną o temperaturze około 40°C tracono bezpowrotnie znaczne ilości ciepła, zaburzając równowagę termiczną i chemiczną wód przy jej zrzucie do środowiska. Dodatkowo metoda charakteryzowała się bardzo dużym poborem „czystej” wody. Dla przykładu pod koniec lat 80. XX w. przy wydobywaniu około 4 mln Mg S/rok pobrano ze środowiska ponad 40 mln m<sup>3</sup>/rok „czystej” wody i odprowadzono do środowiska ponad 30 mln m<sup>3</sup>/rok wód złożowych silnie zmineralizowanych, które zaburzyły warunki naturalne [5].

Otwarty obieg wód oraz wymogi ograniczenia temperatury odbieranych wód złożowych były czynnikiem kształtującym technologię systemu odprężania, co miało bezpośrednie przełożenie na wzrost energochłonności procesu, konsekwencją czego jest zwiększony pobór wody przemysłowej i zwiększony zrzut zanieczyszczonych wód złożowych.

Mając na uwadze względy ekonomiczne i ekologiczne, zaczęto szukać rozwiązania, które pozwalałoby zmniejszyć negatywny wpływ na środowisko, a także zatrzymać tracone ciepło. Dlatego też w kopalni Jeziórko po roku 1990 wprowadzono zamknięty obieg wód technologicznych i złożowych, którego ideą było uzyskanie parametrów wody technologicznej otrzymywanej przez mieszanie uzdatnionych wód złożowych i przemysłowych z wodą z zakładów grzewczych. Efekty zastosowania zamkniętego obiegu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wskaźnik zużycia ciepła w latach 1991–1999 (KS „Jeziórko”)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

Ostatnim omawianym tutaj, lecz istotnym elementem wpływu eksploatacji otworowych kopalń siarki, jest oddziaływanie na atmosferę poprzez emisję siarkowodoru z procesu wydobywczego siarki [2, 5, 6]. Oddziaływanie związane z emisją siarkowodoru w odbiorze społecznym jest istotne nie tyle ze względu na jego trujące działanie na organizmy żywe, ile ze względu na jego uciążliwość zapachową przy małych stężeniach.

Głównym źródłem emisji siarkowodoru do powietrza atmosferycznego były [2, 5, 6]:

- wyloty z otworów eksploatacyjnych przy zbiornikach siarki w rejonie sterowni (separacja zanieczyszczonego powietrza z mieszaniny w procesie air liftu siarki),
- zbiorniki magazynujące płyną siarkę,
- czynne erupcje,
- zbiorniki wód złożowych na polach górniczych,
- miejsca wycieków wód trzeciorzędowych.

Występujące stężenie siarkowodoru w powietrzu w otoczeniu terenu górniczego kopalń wielokrotnie przekraczały dopuszczalne normy stężeń średniorocznych, średniodobowych i chwilowych [2, 4, 6, 7].

Wymienione wcześniej oddziaływania eksploatacji otworowej prowadziły do niekorzystnych zmian w środowisku, z których jako najistotniejsze należy wymienić:

- zmiany geomechaniczne związane z powstaniem licznych niecek osiadania terenu, deformowaniem powierzchni terenu przez ciężki sprzęt budowlany (koparki, spycharki, wiertnice) oraz powstaniem spękań w rejonach erupcji trzyotworowych;
- zmiany hydrologiczne, które polegają głównie na wypełnianiu wodą niecek osiadania i powstawaniu rozlewisk;
- zmiany chemiczne, czyli zanieczyszczenia gleb siarką i jej związkami, zmiana chemizmu wód złożowych, podziemnych i powierzchniowych;
- zmiany hydrobiologiczne, wzrost aktywności biologicznej w rejonach wysładzania zmineralizowanych wód złożowych;
- zmiany reżimu termicznego zarówno w złożu siarkonośnym, jak i otaczającym go masywie skalnym.

#### **4. Ekologiczne i technologiczne osiągnięcia w dotychczasowej historii górnictwa otworowego siarki w Polsce**

Powstanie górnictwa otworowego siarki w Polsce możliwe było dzięki niepodważalnemu sukcesowi — wspomnianego we wstępie pierwszego zastosowania doświadczalnej instalacji do eksploatacji metodą podziemnego wytapiania na złożu w Grzybowie. Sukces jest tym większy, że trzykrotne ekspertyzy specjalistów zagranicznych były negatywne odnośnie do możliwości zastosowania metody Frascha w warunkach występowania polskich złóż siarki, głównie ze względu na małą przepuszczalność warstwy złożowej oraz obecność zawodnionych i przepuszczalnych utworów podłożowych. Osobami, które były prekursorami i orędownikami zastosowania metody podziemnego wytapiania w Polsce, poprzez jej przybliżenie na gruncie polskim, rozpoznanie na kongresach i stażach przemysłowych, wykonanie dokumentacji geologicznej, projektowanie instalacji doświadczalnej i wykonanie badań polowych, byli między innymi: prof. S. Pawłowski i mgr inż. F. Machalski (Kongres Geologiczny w Meksyku), prof. M. Śmiałowski (kierownik Zespołu Specjalistów PRG), mgr inż. W.J. Sroka (staż przemysłowy w kopalniach otworowych Meksyku), dr inż. B. Żakiewicz (projektant pierwszej instalacji doświadczalnej), inż. J. Staszkiwicz i inż. S. Ptaszkiewicz (pierwsi Zawiadownicy Kopalni Doświadczalnej w Grzybowie).

Po 1 czerwca 1966 roku nastąpił szybki rozwój górnictwa otworowego i wzrost wydobywania siarki, co było wynikiem rządowych decyzji gospodarczych i wykorzystania zalet oraz możliwości technologii otworowej.

Pierwsze piętnaście lat stosowania metody w Polsce charakteryzuje się sukcesami głównie w obszarze technologiczno-organizacyjnym takimi jak:

- uruchomienie w ciągu roku produkcji w dwóch kopalniach,
- osiągnięcie olbrzymiej dynamiki wzrostu wydobycia siarki (drugi producent światowy),
- wybudowanie największej na świecie kopalni otworowej o zdolności wydobywczej ok. 3,2 mln Mg siarki/rok (KS „Jeziórko” przy ok. 300 otworach jednocześnie zaangażowanych w wydobycie),
- osiągnięcie pozycji drugiego eksportera światowego tego surowca.

Poniżej przedstawione są główne kierunki i osiągnięcia doskonalenia technologii otworowej w zakresie ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko, obniżenia energochłonności, a także doświadczenia i osiągnięcia zdobyte w etapie likwidacji i rekultywacji kopalń otworowych siarki.

#### **4.1. Kierunki i osiągnięcia w zakresie ograniczenia negatywnego wpływu technologii otworowej na środowisko**

Zaostrzające się rygory prawne dotyczące warunków korzystania ze środowiska, transformacja ustrojowo-gospodarcza w Polsce, a także zachwianie koniunktury cen na światowym rynku siarki pod koniec lat 90. XX w. powodują zmniejszenie wydobycia siarki oraz konieczność poszukiwania rozwiązań w kierunku obniżenia kosztów wydobycia (głównie związanych z energochłonnością podziemnego wytopu) i zmniejszenia negatywnego wpływu na środowisko.

Poszukiwania poszły w kierunku eliminacji najbardziej negatywnego wpływu na środowisko naturalne, omówione krótko wcześniej, a szczególnie:

- ograniczenia czy wręcz eliminacji zrzutu zanieczyszczonych wód złożowych do cieków powierzchniowych;
- ograniczenia emisji siarkowodoru i pyłów siarki do powietrza atmosferycznego;
- eliminacji zjawisk erupcyjnych.

W tym celu w ciągu technologicznym dokonuje się następujących zmian i usprawnień:

- wprowadza się instalacje pilotujące zawrotu wód złożowych do procesu przygotowania wody technologicznej (KS „Grzybów”), czyli zamykania obiegów;
- wdraża się system zamkniętego obiegu wód technologicznych i złożowych (KS „Jeziórko”) oparty na zwracaniu wody złożowej i jej mieszaniu z wodą sieciową;
- wyeliminowany zostaje proces rafinacji siarki, którego ubocznym efektem było wytwarzanie keku jako odpadu;
- zmniejsza się udział ilości siarki do wtórnego zestalania na składowiskach otwartych, a zatem wtórnego urabiania mechanicznego, kosztem wzrostu ekspedycji siarki w postaci płynnej, co spowodowało radykalne zmniejszenie emisji pyłów siarki do powietrza;



- następuje hermetyzacja procesu przez odprowadzenie wód złożowych rurociągami, a nie rowami otwartymi (KS „Grzybów”);
- dąży się do ograniczenia liczby erupcji, czyli niekontrolowanych wypływów wód złożowych na powierzchnię, przez opracowanie i wdrożenie zasad profilaktyki przeciw-erupcyjnej (w efekcie do zmniejszenia emisji siarkowodoru do powietrza i zmniejszenia zanieczyszczenia powierzchni wodami złożowymi);
- opracowano i wdrożono technologię granulacji siarki i jej ekspedycji w takiej postaci, co również w sposób istotny zmniejszyło emisję pyłów siarki w drodze dystrybucji do odbiorców (KS „Jeziórko”);
- podjęto opracowanie i wdrożono początkowo w niewielkim zakresie instalacje przemysłowe chemisorpcji siarkowodoru z powietrza separowanego z mieszaniny powietrzno-siarkowej, wypływającej z otworów eksploatacyjnych przy zbiornikach płynnej siarki (sterowniach) na polach górniczych.

#### **4.2. Uwarunkowania i efekty w zakresie sposobów i kierunków likwidacji, rekultywacji oraz zagospodarowania kopalń otworowych siarki**

Z oczywistych względów istotne znaczenie przekształceń w środowisku naturalnym przez górnictwo otworowe siarki odnosi się do wymienionych dwóch największych kopalń. Należy podkreślić, że wyłączenie KS „Grzybów” z produkcji nastąpiło planowo, natomiast decyzja dotycząca zakończenia eksploatacji w KS „Jeziórko” nastąpiła w sposób niejako nagły, czego nie przewidywały wcześniejsze plany i programy opracowane dla tej kopalni. Dlatego też w KS „Grzybów” najwcześniej zaczęto zdobywać doświadczenie nie tylko pod kątem budowy nowej kopalni, ale także wdrożenia sposobu likwidacji, rekultywacji i zagospodarowania terenów pogórnich i poprzemysłowych.

Do głównych czynników determinujących sposób rekultywacji, jej zakres i kierunek zaliczyć należy:

- wielkość powstałej niecki osiadania;
- położenie powierzchni terenu obszaru górniczego w stosunku rzędnych zwierciadła wód gruntowych;
- położenie tego obszaru górniczego względem terenu otaczającego i głównych cieków drenujących ten teren;
- stopień degradacji warstwy powierzchniowej gleby.

Dla KS „Grzybów” został ustalony leśny kierunek rekultywacji, dlatego że rzędne powierzchni obszaru górniczego są wyższe od kilku do kilkudziesięciu metrów od rzędnych terenu otaczającego z takimi odbiornikami, jak rzeka Wschodnia i Czarna Staszowska (rys. 3). Dlatego możliwe jest odwodnienie grawitacyjne nawet odosobnionych niecek o maksymalnych wartościach osiadania przez wykonanie głębokich rowów odwadniających, dostosowanych do docelowego naturalnego odwadniania, po zakończeniu likwidacji kopalni, co nie wyłącza tych terenów z ich leśnego zagospodarowania.



**Rys. 3.** Schemat sieci hydrologicznej w rejonie terenu górniczego KS „Grzybów” wraz z lokalizacją punktów pomiarowych [12]

Na rekultywację składają się trzy fazy:

1. techniczna,
2. biologiczna,
3. zagospodarowania.

W fazie technicznej wykonuje się likwidację otworów eksploatacyjnych, odprężających, rurociągów urządzeń infrastruktury, obiektów budowlanych, usunięcie zanieczyszczeń siarką z powierzchni oraz reniwelację terenu.

W fazie biologicznej wykonuje się neutralizację wierzchniej warstwy gleby, prace agrotechniczne, nawożenie i wysiew roślinności testowej.

W fazie zagospodarowania wykonuje się nasadzenia wybranych gatunków drzew oraz prace pielęgnacyjne i uzupełnianie wypadów.

Łączny czas trwania całego cyklu rekultywacji według realizowanych programów wynosi 5 lat, a łączny obszar objęty rekultywacją ma powierzchnię 559 ha. Na polach górniczych w miejscach najbardziej zdegradowanych, gdzie zawartość siarki w glebie sięga do 5%, zrezygnowano z oczyszczenia powierzchni i usunięcia tej warstwy oraz neutralizacji, gdyż wiązałoby się to z dużymi kosztami robót ziemnych i większym zużyciem wapna do neutralizacji siarki. Dlatego te miejsca przeznaczono do deponowania zanieczyszczeń usu-

niętych z terenu rekultywowanych obszarów (tworzenie mogiłników), które następnie izolowane są od powierzchni warstwą ilową (dla ograniczenia wnikania wód opadowych), a następnie przykrywane warstwą humusu, na której wykonuje się nasadzenia gatunkami drzew i krzewów płytkokorzeniowych [2].

Pozostałą część takich zdegradowanych powierzchni w obrębie niecki osiadania przewidziano do lokalizacji międzygminnego zakładu utylizacji i składowania odpadów komunalnych.

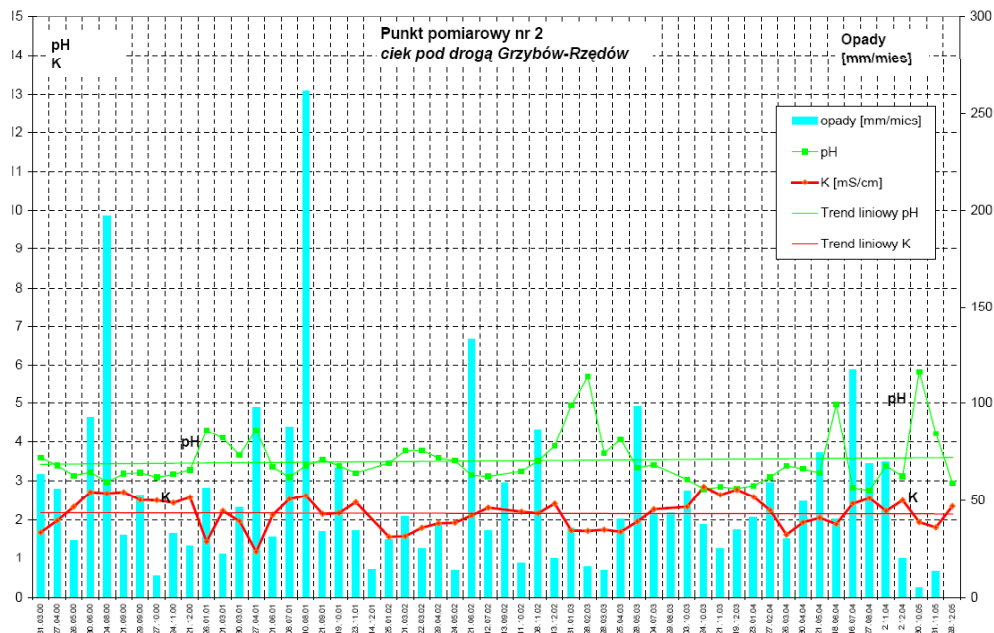
Innym przykładem kompromisu pomiędzy wymogami ochrony środowiska a uzasadnionymi nadkładami finansowymi jest sposób likwidacji najbardziej zdegradowanych powierzchni terenu po głównym składowisku siarki w KS „Grzybów”. Zrezygnowano w nim z kosztownej wymiany przypowierzchniowej warstwy ziemnego podłoża, skażonej do głębokości 4,5 m, na rzecz wykonania asfaltobetonowego ekranu na powierzchni ok. 4,95 ha. W wyniku tego ograniczony zostaje dopływ wód deszczowych do tego podłoża, przez co strumień zanieczyszczeń infiltrujący z wodą i wynoszony poza obszar składowiska ulega redukcji, czyniąc jego szkodliwość na wody gruntowe mało istotną.

Skuteczność prowadzonej neutralizacji skażeń siarką gleby przypowierzchniowej w etapie rekultywacji zależy w dużym stopniu od wielkości tych skażeń, które jednak nie są do końca identyfikowalne. Weryfikacją skuteczności wykonanej rekultywacji może być badanie chemizmu wód spływających z terenu górniczego KS „Grzybów”, które prowadzone jest przez KGO AGH [12]. Zaprezentowane wyniki (rys. 4) z wybranego punktu pomiarowego (rys. 3) wskazują, poprzez bardzo niskie pH i wysoką mineralizację, na związek ze skażeniem warstwy powierzchniowej siarką, a wieloletni trend zmian w kierunku poprawy jakości wody jest bardzo słaby.

Dla likwidowanej KS „Jeziórko” przyjęto oryginalny leśno-ekologiczny kierunek rekultywacji i zagospodarowania, który obejmuje powierzchnię ok. 22,1 km<sup>2</sup>. Ten kierunek wynika z tego, że rzędne powierzchni terenu górniczego na przeważającym obszarze są tylko do kilku metrów wyższe od rzędnych zwierciadła wód gruntowych. Natomiast w wielu obszarach dokonanej eksploatacji powstałe niecki osiadania mają rzędne poniżej zwierciadła wód gruntowych, przez co powstają obszary zalewowe (płytkie zbiorniki wodne). Odwadnianie grawitacyjne tych obszarów nie jest do końca możliwe, gdyż drenująca sieć hydrograficzna w otoczeniu terenu górniczego ma rzędne zwierciadła powyżej rzędnych terenu w odosobnionych nieckach osiadania i nie gwarantuje to wystarczającego spadku hydraulicznego między tymi miejscami.

Dla tego typu zagospodarowania w procesie rekultywacji i zagospodarowania bardzo ważne znaczenie ma:

- likwidacja otworów eksploatacyjnych i z tym związanych połączeń hydraulicznych między horyzontami wodonośnymi trzeciorzędowym i czwartorzędowym,
- deniwelacja terenu zmierzająca do pogłębienia wykonywanych oczek wodnych i zarazem zmniejszania ich powierzchni,
- neutralizacja skażeń powierzchni terenu i gleby siarką i jej związkami, co będzie miało wpływ na kształtujący się chemizm wód.



**Rys. 4.** Zmiany wartości parametrów pH, przewodności elektrolitycznej  $K$  (mS/cm) oraz średnich opadów miesięcznych wody spływającej rowem odwadniającym 2 do Cieku od Nizin — punkt pomiarowy 2 [12]

Ogólna powierzchnia powstałych zbiorników wodnych będzie wynosić ok. 180 ha, o łącznej pojemności ponad 4 mln  $m^3$ . Oceniono, że rzędne linii brzegowej tych akwenów ulegać będą wahaniu w zależności od wielkości opadów, przez co okresowe podtopienia mogą dotyczyć powierzchni nawet do 450 ha. Na podkreślenie zasługuje wykorzystanie w KS „Jeziórko” odpadów (wapna poflotacyjnego) do hydromechanicznej renielacji i neutralizacji skażeń powierzchni gleby na polach górniczych II i IV (pola północne). Pozwoliło to na likwidację osadnika wapna poflotacyjnego w miejscowości Cygany i jego rekultywację.

Zastosowany w KS „Jeziórko” leśno-ekologiczny kierunek rekultywacji ze zróżnicowanym składem gatunkowym zalesień wprowadza nowe elementy architektury krajobrazu na tym terenie, który może się stać siedliskiem wielu gatunków ptactwa wodnego i innej drobnej zwierzyny.

Prowadzona likwidacja dużej części polskiego potencjału wydobywczego siarki potwierdziła zalety technologii otworowej w zakresie znacznie niższych kosztów rekultywacji i zagospodarowania terenów pogórnich w stosunku do technologii eksploatacji odkrywkowej. Na podstawie bilansu nakładów określono między innymi wskaźnik obciążenia jednostki wydobycia kosztami likwidacji i zagospodarowania kopalń otworowych na poziomie od 4,52 zł/Mg siarki (KS „Grzybów”) do 5,12 zł/Mg siarki (KS „Jeziórko”) [10]. W analizie uwzględniono nakłady, które zostały poniesione na rekultywację w całym okresie pro-

wadzonych do 2004 r. prac oraz przewidywane do poniesienia do końca realizacji planów likwidacji bez uwzględnienia inflacji.

Wskaźnik ten dla likwidacji wyrobisk odkrywkowych Piaseczno i Machów okazał się ponaddwunastokrotnie większy.

## **5. KS „Osiek” — sukces technologiczny i ekologiczny w polskim górnictwie otworowym siarki**

Projektanci KS „Osiek” mieli pełną świadomość, że w nowej kopalni nie może być zastosowana technologia o tym poziomie degradacji środowiska naturalnego, jaki występował w KS „Grzybów”, ograniczającej wydobycie i zbliżającej się w tamtym czasie do zakończenia eksploatacji, czy też w KS „Jeziórko”. Nie zdawali sobie jednak sprawy, że nastąpi niespotykany dotąd trwały spadek cen na światowym rynku siarki, stawiający pod znakiem zapytania racjonalność ekonomiczną dalszego funkcjonowania górnictwa otworowego wydobywającego siarkę rodzimą.

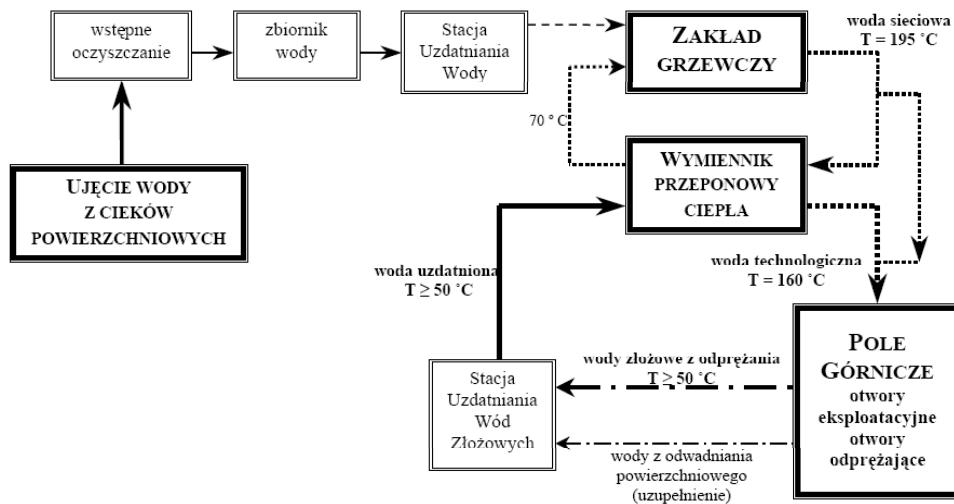
Podstawowym wymaganiem w nowej kopalni w zakresie technologii i ochrony środowiska było zatem:

- zastosowanie zamkniętego obiegu wód technologicznych i złożowych (rys. 5);
- wyeliminowanie zjawisk erupcyjnych, które dotychczas były najbardziej niepożądanym zjawiskiem towarzyszącym eksploatacji ze względu na degradację środowiska, zwiększenie kosztów wydobycia i zagrożenie bezpieczeństwa załogi;
- wyeliminowanie składowisk siarki wtórnie zestalonej i ekspedycji w postaci siarki kruszonej;
- zastosowanie instalacji chemisorpcji siarkowodoru na każdej sterowni.

System energetyczny produkcji wody technologicznej dla potrzeb eksploatacji został skojarzony z systemem energetycznym pobliskiej Elektrowni Połaniec przez wykorzystanie wody sieciowej, dostarczanej z elektrowni do podgrzewania wody technologicznej w wymiennikach przeponowych. Część ciepła w wodzie sieciowej stanowi ciepło odpadowe elektrowni. Takie skojarzenie systemów energetycznych jest najtańszym kierunkiem pozyskiwania ciepła przez kopalnię. Ogólna idea zamkniętego obiegu wód zastosowanego w KS „Osiek” pokazana jest na rysunku 5.

Zastosowanie zamkniętego obiegu wód technologicznych i złożowych pozwoliło uzyskać następujące średnie wskaźniki eksploatacji:

- jednostkowe zużycie wody technologicznej: 6 m<sup>3</sup>/Mg siarki, w tym ok. 4 m<sup>3</sup>/Mg siarki jako wody złożowej z odprężania w wyniku zamkniętego obiegu;
- jednostkowe zużycie ciepła: poniżej 4 GJ/Mg siarki, w tym do ok. 1 GJ/Mg jako ciepła z zawrotu wody.



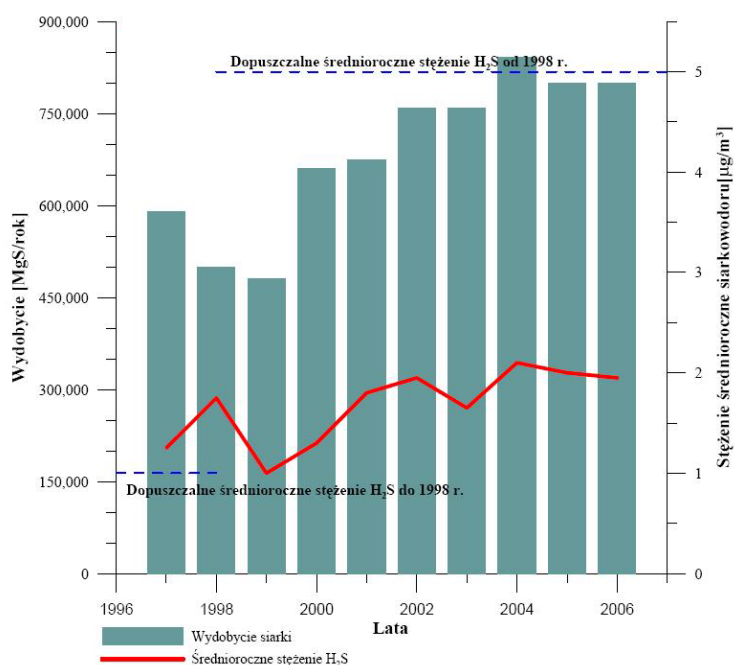
Rys. 5. Ideowy schemat zamkniętego obiegu wód w kopalni siarki

Źródło: opracowanie własne na podstawie [5]

Zatem w stosunku do obiegu otwartego nastąpiło prawie dwukrotne zmniejszenie jednostkowego zużycia wody technologicznej, ponadpięciokrotne zmniejszenie jednostkowego poboru wody ze środowiska, dwukrotne zmniejszenie jednostkowego zużycia ciepła, blisko 2,7-krotne zmniejszenie jednostkowego zużycia ciepła jako ciepła dodanego (zmniejszenie o ponad 5 GJ/Mg siarki) oraz całkowite wyeliminowanie zrzutu zanieczyszczonych wód złożowych na zewnątrz kopalni do cieków powierzchniowych.

Zmniejszenie energochłonności procesu wytopu siarki z poziomu ok. 8 GJ/Mg siarki w obiegu otwartym do poziomu poniżej 4 GJ/Mg siarki w obiegu zamkniętym było efektem możliwości realizacji w tych warunkach innych zasad technologii odprężania złoża. Wynikały one z ograniczenia temperatury wody odbieranej przez systemy odprężania tylko temperaturą topnienia siarki ( $< 120^{\circ}\text{C}$ ), a nie temperaturą  $< 40^{\circ}\text{C}$ , jak to miało miejsce przy obiegu otwartym. Pozwoliło to na zbliżenie odprężania do strefy wytopu, co wyeliminowało straty energetyczne związane z nieracjonalnym podgrzewaniem zbyt dużych objętości górotworu. Tym sposobem, mimo że ilość ciepła pochodząca z zawrotu wody złożowej wynosiła tylko 1 GJ/Mg siarki, możliwe było tak duże zmniejszenie jednostkowej energochłonności. Dużą uwagę poświęca się w kopalni wyeliminowaniu erupcji, stosując wypracowane wcześniej zasady profilaktyki przeciwerupcyjnej, wspomagane dodatkowo przez systematyczne kontrole szczelności orurowania otworu, które przy stwierdzeniu jej braku ulegają likwidacji. Do innych działań wspomagających tę problematykę zaliczyć należy także włączenie metod geofizyki sejsmicznej do identyfikacji zasięgu stref złoża objętych wytopem oraz stref zmian w warstwach nadkładu [3]. Efektem tych wszystkich działań jest fakt, że w czternastoletnim okresie eksploatacji siarki zanotowano zaledwie kilka wypływów erupcyjnych wód złożowych na powierzchnię.

W Kopalni „Osiek” szczególne znaczenie przywiązuje się do zmniejszenia emisji siarkowodoru do atmosfery i z tym związanej uciążliwości zapachowej dla mieszkańców pobliskich miejscowości. Powszechne zastosowanie instalacji chemisorpcji siarkowodoru w głównych źródłach jego emisji (zbiorniki siarki na polach górniczych) oraz możliwa hermetyzacja procesu technologicznego na każdym jego etapie sprawiły, że w ostatnich latach emisja (stężenie) siarkowodoru na granicach strefy ochronnej kopalni nie przekracza wielkości dopuszczalnych. Kształtowanie jednego z parametrów emisji — stężenia średniorocznego — pokazane w projekcji ostatnich 10 lat (rys. 6) jest potwierdzeniem utrzymywania hermetyzacji procesu w omawianym zakresie na dobrym poziomie.



Rys. 6. Średnioroczne stężenie siarkowodoru na tle wydobycia siarki w latach 1997–2006 (KS „Osiek”)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4, 8]

## 6. Wnioski końcowe

- 1) Udane wdrożenie 41 lat temu zmodyfikowanej do warunków polskich złóż rudy siarki metody eksploatacji otworowej opartej na założeniach Frasca spowodowało w krótkim czasie, że Polska stała się znaczącym światowym producentem i eksporterem siarki rodzimej.

- 2) Duża dynamika wzrostu i koncentracji wydobycia w dwóch polskich kopalniach ujawniła niepodważalny degradacyjny wpływ tej technologii wydobycia na środowisko naturalne.
- 3) Główne kierunki doskonalenia technologii otworowej miały za cel ograniczenie energochłonności procesu oraz obciążeń związanych ze zrzutem zanieczyszczonych wód złożowych do środowiska i emisją pyłów siarki oraz siarkowodoru do atmosfery.
- 4) Mimo niepodważalnych osiągnięć i wkładu polskiej myśli naukowo-technicznej w tej dziedzinie światowy kryzys na rynku siarki oraz twarde wymogi gospodarki rynkowej spowodowały, że obecnie większa część potencjału wydobywczego siarki rodzimej znajduje się w likwidacji, a tereny pogórnice podlegają rekultywacji i zagospodarowaniu.
- 5) Zakończony okres planowej likwidacji, rekultywacji i zagospodarowania w KS „Grzybów” i sześćoletni okres wymuszonej likwidacji KS „Jeziórko” dostarcza przykłady polskich osiągnięć w sposobach i kierunkach rekultywacji, także godzenia interesów ekologii i ekonomii.
- 6) Za największy sukces w dziedzinie doskonalenia technologii otworowej eksploatacji siarki należy uznać opracowanie i zastosowanie w najmłodszej naszej kopalni Siarki „Osiek” zamkniętego obiegu wód technologicznych i złożowych, co przyczyniło się do znaczącego zmniejszenia kosztów wydobycia i zmniejszenia obciążeń środowiska prowadzoną eksploatacją, będący głównym czynnikiem decydującym o przetrwaniu tej kopalni w twardych warunkach rynkowych (jako jedynej na świecie).
- 7) Zastosowanie zamkniętego obiegu wód w technologii otworowej eksploatacji siarki jest rzadkim przykładem skumulowania pozytywnych efektów ekologicznych i ekonomicznych, które ustawiły tę technologię na znacznie wyższym poziomie rozwoju, o wiele bardziej przyjaznym dla środowiska, niż miało to miejsce kiedykolwiek wcześniej.

#### LITERATURA

- [1] *Flisiak J., Mazurek J., Tajduś A.*: Warunki stosowania wielofazowej eksploatacji złóż siarki. Górnictwo, AGH, Kraków, 1993
- [2] *Hajdo S. i zespół*: Ocena oddziaływania na środowisko Kopalni Siarki „Grzybów”. Kraków, FNiTG 2000 (praca niepublikowana)
- [3] *Hajdo S. i zespół*: Prowadzenie nadzoru naukowego nad przebiegiem eksploatacji w Kopalni Siarki „Osiek” ze względu na efektywność wydobycia i oddziaływania na środowisko naturalne. Kraków, AGH 1995 (praca niepublikowana)
- [4] *Hajdo S., Klich J.*: Skażenie powietrza siarkowodorem w eksploatacji otworowej siarki w świetle dopuszczalnych norm. Symposium „Siarka rodzima — geologia, górnictwo, ekonomia i ochrona środowiska”, Kraków, 16–17 czerwca 1994, Kraków, AGH, 1994
- [5] *Klich J. i zespół*: Ocena oddziaływania Kopalni Siarki „Osiek” na środowisko naturalne. Kraków, AGH 1995 (praca niepublikowana)
- [6] *Klich J. i zespół*: Ocena oddziaływania na środowisko Kopalni Siarki „Grzybów”. Kraków, AGH 1995 (praca niepublikowana)
- [7] *Klich J. i zespół*: Opracowanie programu zagospodarowania złoża obszaru górniczego „Jeziórko IV” w zakresie oceny wpływu eksploatacji na środowisko. Kraków, AGH 1993 (praca niepublikowana)
- [8] *Hajdo S. i zespół*: Opracowanie statystyczne wyników pomiarów zanieczyszczenia powietrza siarkowodorem w KS „Osiek”. Kraków, FNiTG 1997–2006 (praca niepublikowana)



- [9] *Klich J. i zespół*: Raport oddziaływania na środowisko urządzeń i budowli oczyszczających i odprowadzających ścieki przepompowni „Dobrow” do Cieku od Nizin. Kraków, FNITG 2002 (praca niepublikowana)
- [10] *Klich J. i zespół*: Ocena stanu zaawansowania prac likwidacyjnych i rekultywacyjnych na terenach zdegradowanych wydobywaniem i przetwórstwem rudy siarkowej w rejonach: tarnobrzeskim, staszowskim i lubaczowskim prowadzonych przez PRTG „Jeziórko”, Kopalnię Siarki „Machów”, KiZPS „Siarkopol”, Kopalnię Siarki „Grzybów”, „Sulphur” Sp. z o.o. w likwidacji. Kraków, FNITG 2004 (na zamówienie Ministerstwa Środowiska) (praca niepublikowana)
- [11] *Klich J., Galiniak G.*: Skutki likwidacji kopalń siarki w rejonie tarnobrzeskim wynikające z oceny odbudowy stosunków wodnych. II konferencja z cyklu Instrumenty Zarządzania Ochroną Środowiska na temat Oceny oddziaływania na środowisko na szczeblu krajowym i regionalnym, Kraków 20–22 października 2005, Kraków, AGH, 2005
- [12] *Klich J. i zespół*: Wpływ zaprzestania eksploatacji i rekultywacji na odbudowę stosunków wodnych w obszarze wyrobisk poeksploatacyjnych. Badania własne nr 10.10.100.73, Kraków, AGH 2005 (praca niepublikowana)
- [13] *Ney R. (red)*: Surowce mineralne Polski. Surowce chemiczne. Siarka. Kraków, Wyd. IGSMiE PAN 2000

