

*Marek Pozzi\**, *Tadeusz Mzyk\**

## OCENA WPŁYWU NA ŚRODOWISKO ODPADÓW ULOLOWANYCH W WYROBISKACH PODZIEMNYCH KOPALŃ W ŚWIETLE MODELOWANIA HYDROGEOCHEMICZNEGO

---

### 1. Wprowadzenie

Ochrona użytkowych wód podziemnych i gospodarka odpadami, zwłaszcza w silnie zurbanizowanych rejonach, jest jednym z najważniejszych zadań w ochronie środowiska (Program Ochrony Środowiska Woj. Śląskiego).

W działalności górniczej odpady najczęściej wykorzystywane są na powierzchni w procesach rekultywacji terenu lub składowane w pustkach poeksploatacyjnych kopalń w ramach przemysłowego ich wykorzystania [1]. Poddane w taki sposób wyrobiska górnicze można traktować jako podziemne składowiska odpadów, zwłaszcza w przypadku gdy z ulokowanych odpadów mogą uwalniać się zanieczyszczenia [10]. Składowisko podziemne ma szereg zalet w porównaniu ze składowiskiem na powierzchni ziemi (trwałe odizolowanie odpadów, ograniczenie szkodliwego oddziaływania odpadów itp.). Tematyka lokowania odpadów w wyrobiskach podziemnych jest szczególnie aktualna w warunkach restrukturyzacji górnictwa (likwidacja kopalń, rejonów, pól eksploatacyjnych), które daje nowe możliwości zagospodarowania znacznych ilości odpadów do wypełniania pustek poeksploatacyjnych czy likwidacji wyrobisk [14]. Lokowanie popiołów lotnych w ramach różnych technologii górniczych (poddzka samozestalająca, doszczelnianie zrobów zawałowych, pasy podszkowe, likwidacja zbędnych wyrobisk) jest powszechnie praktykowane w górnictwie węglowym (około 3,2 mln m<sup>3</sup> według danych UTEX).

Pamiętać jednak należy o wadach takiej działalności, do których należą [12]:

- nieodwracalność procesu lokowania odpadów pod ziemią;
- brak możliwości kontroli procesów zachodzących w składowisku;
- możliwość zanieczyszczenia wód podziemnych.

---

\* Instytut Geologii Stosowanej, Politechnika Śląska, Gliwice

Wymienione wyżej wady składowisk wymagają przeprowadzenia analizy i identyfikacji zjawisk zachodzących w składowisku zarówno w momencie składowania, jak i wiele lat po jego zakończeniu. W pierwszej kolejności należy przeanalizować warunki przepływu wód w rejonie składowiska, a następnie procesy wpływające na możliwość migracji zanieczyszczeń [9]. Analiza taka jest niezbędna do prawidłowej oceny zagrożeń ze strony składowanych odpadów.

## **2. Możliwości modelowania migracji zanieczyszczeń ze zdeponowanych popiołów**

Ocena wpływu lokowanych popiołów na środowisko gruntowo-wodne powinna uwzględniać właściwości fizykochemiczne popiołów oraz warunki geologiczno-górnictwa rejonu lokowania [9].

### **2.1. Rodzaje oraz właściwości popiołów lotnych zdeponowanych w wyrobiskach**

Popioły lotne wykorzystywane w technologiach górniczych to głównie odpady pochodzące z procesów spalania węgla kamiennego i brunatnego. Na ich właściwości fizykochemiczne zasadniczy wpływ ma rodzaj paliwa, technologia spalania węgla oraz obecność lub brak produktów odsiarczania spalin [1, 6].

Istotnym parametrem charakteryzującym popioły, poza zawartością  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , jest zawartość w nich tlenków aktywnych, tzw. wolnego wapna (wolnych alkaliów wyrażanych jako „wolne  $\text{CaO}$ ”), decydująca o ich alkaliczności (zdolności popiołów do neutralizacji kwasów) [6].

Popioły zawierające produkty odsiarczania spalin metodą suchą charakteryzują się względnie dużą zawartością całkowitego  $\text{CaO}$  (a w tym również wolnego  $\text{CaO}$ ) w porównaniu do popiołów, które zawierają produkty odsiarczania spalin metodą półsuchą i z kotłów fluidalnych. Równocześnie ze względu na niższą sprawność odsiarczania spalin metodą suchą odpady te zawierają odpowiednio mniejszą ilość siarki związanej (w przeliczeniu na  $\text{SO}_3$ ) [6].

Popioły zawierające produkty odsiarczania spalin metodą półsuchą i z kotłów fluidalnych przy porównywalnych średnich zawartościach całkowitego  $\text{CaO}$  różnią się nieco koncentracją „wolnego  $\text{CaO}$ ” oraz ilością związanej jako  $\text{SO}_3$  siarki, której zdecydowanie więcej jest w popiołach z kotła fluidalnego [6].

Najbardziej, zarówno podstawowym składem chemicznym, jak i zawartością pierwiastków śladowych, odbiegają od dotąd opisanych popioły niezawierające produktów odsiarczania spalin. Wyróżniają się one wielokrotnie mniejszą zawartością siarki (jako  $\text{SO}_3$ ), znacznie mniejszą zawartością całkowitego  $\text{CaO}$  (poniżej 10%) i niską zawartością „wolnego  $\text{CaO}$ ”. Jednocześnie w popiołach tych widoczna jest zdecydowanie wyższa koncentracja pierwiastków śladowych [6].

Ocena toksyczności odpadów wykonywana jest na podstawie testu wymywalności. Odcieki z popiołów zawierających produkty odsiarczania spalin z reguły przekraczają dopuszczalne  $500 \text{ mg SO}_4^{-2}/\text{dm}^3$  (dla ścieków wprowadzanych do wód i do ziemi według rozporządzenia Ministra Środowiska z 2002 r.). Charakterystyczny dla roztworów filtrujących przez odpady jest niekorzystnie wysoki odczyn pH, co ma jednak pozytywny wpływ na ograniczenie do minimum mobilności pierwiastków śladowych (w tym metali ciężkich), które w tym zakresie pH roztworów są trudno rozpuszczalne. Poziom ich stężeń z reguły jest znacznie poniżej granicy oznaczalności stosowanych metod analitycznych (ASA, ICP) [9, 11, 12].

## 2.2. Ocena warunków geologiczno-górnich

Budowa modelu hydrogeologicznego tak dużego obszaru jak OG kopalni poprzedzona musi być przestudiowaniem materiałów źródłowych (dokumentacji mierniczo-geologicznej, PZZ itp.), gdyż od ilości informacji zebranych na tym etapie budowy modelu zależy wiarygodność modelu. Konieczne jest również przeanalizowanie wszelkich prawdopodobnych dróg filtracji i ocena, jak duży wpływ na warunki przepływu mają ewentualne pustki poeksploatacyjne lub/i czy zostały one w wystarczającym stopniu doszczelnione [3]. Wyniki tych analiz warunkują możliwość przyjęcia filtracyjnego modelu przepływu lub wykazują konieczność analizy przepływów burzliwych. Kolejnym krokiem w ocenie możliwości wykorzystania modelowania jest przeprowadzenie generalizacji budowy geologicznej oraz przyjęcie warunków brzegowych i podział analizowanego obszaru na elementarne bloki obliczeniowe (dyskretyzacja modelu). W oparciu o zgromadzone dane możliwa jest budowa modelu matematycznego i przeprowadzenie kalibracji, czyli porównanie otrzymywanych wyników z danymi uzyskanymi z dokumentacji mierniczo-geologicznej [13]. Wartości początkowe (np. współczynniki filtracji) przyjęte w modelu koryguje się do czasu, kiedy wyniki modelowania w jak największym stopniu odpowiadają rzeczywistym wartościom uzyskiwanym w kopalni (np. wielkości dopływów na poziom eksploatacyjny). Na skalibrowanym modelu hydrogeologicznym można następnie modelować przepływ migrujących zanieczyszczeń.

Na wiarygodność modelu zasadniczo wpływa liczba danych, na podstawie których przeprowadzona została schematyzacja i wykonany model [5]. Modelowanie hydrogeologiczne górotworu naruszonego działalnością górnictwem, w którym zasadnicze znaczenie dla warunków przepływu wód mogą mieć uprzywilejowane drogi filtracji, takie jak wyrobiska korytarzowe, niedoszczelnione zroby poeksploatacyjne itp., stanowi szczególnie trudne zadanie [7].

Możliwość wykorzystania takiego narzędzia, jakim jest program komputerowy, warunkowana jest oceną, czy istniejące pustki będą znacząco wpływały na warunki przepływu wód, czy w ogólnym wyniku modelowania istniejące lokalnie uprzywilejowane drogi przepływu nie wpłyną znacząco na wyniki i możliwe będzie przyjęcie ustalonego modelu przepływu wód w górotworze [13–15].

### 3. Przykład wykorzystania technik modelowania hydrogeochemicznego

Możliwość wykorzystania technik modelowania hydrogeochemicznego przeanalizowano na przykładzie składowisk popiołów lotnych deponowanych w wyrobiskach podziemnych kopalni „Katowice-Kleofas” Ruch I. Popioły lotne składowano w wyrobiskach kopalni w ramach ich przemysłowego wykorzystania w profilaktyce przeciwpożarowej. Rejonem lokowania popiołów była zdrenowana część górotworu, przez co nie istniało zagrożenie ze strony odcieków z popiołów dla jakości wód podziemnych. Możliwość zanieczyszczenia wód podziemnych zaistnieje w przypadku zatopienia górotworu w rejonie składowiska, czyli zaprzestania odwadniania i zatopienia kopalni w trakcie likwidacji [9]. Analizę możliwości wykorzystania technik modelowania hydrogeochemicznego przeprowadzono dwuetapowo, dla przypadku częściowego i całkowitego zatopienia rejonu lokowania popiołów lotnych, uwzględniając konieczność prowadzenia bezpiecznej eksploatacji w sąsiednich zakładach górniczych [12].

#### 3.1. Warunki geologiczne

Obszar złoża węgla kamiennego KWK „Katowice-Kleofas” Ruch I zlokalizowany jest w obrębie Płaskowyżu Bytomsko-Katowickiego, składającego się z szeregu garbów o spłaszczonych wierzchołkach. Powierzchnia terenu jest urozmaicona, łagodnie opadająca z północy i południa w kierunku rzeki Rawy.

Pod względem stratygraficznym profil złoża do głębokości około 1000 m budują utwory czwartorzędu (holocen i plejstocen) oraz karbonu:

- Seria Mułowcowa (westfal A + B):
  - warstwy orzeskie i załęskie,
- Górnosląska Seria Piaskowcowa:
  - (namur C) warstwy rudzkie,
  - (namur B) warstwy siodłowe,
- Seria Paraliczna (namur A):
  - warstwy porębskie, jakłowieckie, gruszowskie.

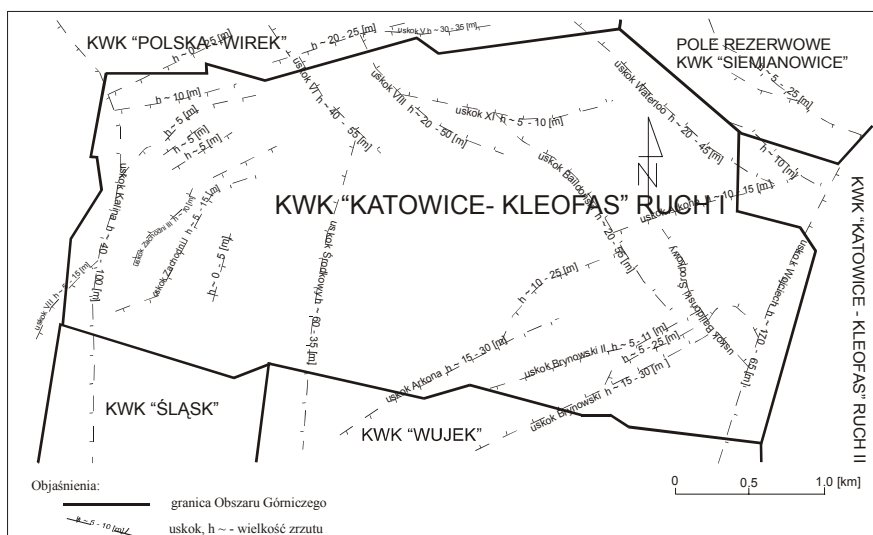
Złoże leży w głównej części na południowym skrzydle siodła głównego, natomiast północno-zachodnia część złoża znajduje się w obrębie struktury tektonicznej, zwanej kopułą Chorzowa.

Rozciągłość warstw karbońskich zbliżona jest do kierunku osi siodła głównego, a ich upad jest zmienny i wynosi  $4\div 5^\circ$  w częściach południowej i centralnej, rośnie w kierunku północnym, osiągając miejscami ok.  $25^\circ$ .

Złoże pocięte jest kilkoma uskokami dzielącymi je na odrębne bloki tektoniczne (rys. 1), poprzesuwane w stosunku do siebie o kilkadziesiąt metrów w pionie.

Dominują dwa zasadnicze kierunki uskoków:

- 1) południkowy,
- 2) równoleżnikowy.



Rys. 1. Warunki tektoniczne w rejonie KWK „Katowice-Kleofas” Ruch I

### 3.2. Analiza warunków górniczych

Obszar górniczy KWK „Katowice-Kleofas” Ruch I położony jest w południowo-zachodniej części Katowic i południowo-wschodniej części Chorzowa. Graniczy on z następującymi kopalniami (rys. 1):

- od zachodu — KWK „Polska-Wirek”, rejon Wirek;
- od północy — KWK „Polska-Wirek”, rejon Polska;
- od południa — KWK „Śląsk” i „Wujek”;
- od wschodu — KWK „Katowice-Kleofas” Ruch II oraz z polem rezerwowym byłej Kopalni „Siemianowice”.

W ostatnim okresie złożę było udostępnione na następujących poziomach:

- poziom 444 m udostępniał pokłady 402, 403/2, 501 (w części południowo-wschodniej OG) oraz pokład 620 (w części północno-zachodniej);
- poziom 504 m udostępniał pokłady 501 i 504 w części południowej obszaru, pokład 510 w części wschodniej i 620 w części środkowej;
- poziom 570 m udostępniał w kierunku zachodnim pokłady 501, 504 oraz w kierunku wschodnim pokład 501 (przekopem wznoszącym H);
- poziom 700 m udostępniał pokłady z grupy 500 i 600 zalegające poniżej poziomu 570 m.

### 3.2.1. Lokowanie popiołów w zrobach Kopalni „Katowice-Kleofas”

Lokowanie odpadów w KWK „Katowice-Kleofas” Ruch I polegało przede wszystkim na doszczelnianiu zrobów zawałowych i odbywało się zgodnie z zasadami określonymi w planie ruchu zakładu. Odpady lokowane były w wyrobiskach suchych lub o niewielkich dopływach, co ograniczało lub całkowicie eliminowało zagrożenie ługowania z nich substancji rozpuszczalnych [9, 12].

W kopalni „Katowice-Kleofas” Ruch I lokowane były popioły i żużle z następujących zakładów: EC Tychy, EC Łódź, EC Będzin, El. Chorzów, El. Siersza, El. Łągisza, El. Opole, El. Jaworzno III. Jako datę początkową stosowania w podziemiach kopalni odpadów pochodzących z elektrowni i elektrociepłowni przyjmuje się rok 1993, kiedy to rozpoczęto doszczelnienie zrobów zwałowych w pokładzie 510. W ramach przemysłowego wykorzystania odpadów w KWK „Katowice-Kleofas” Ruch I, popioły lotne i żużle były lokowane w zrobach w pokładach 501, 510 i 620 [9, 12].

Ogółem w latach 1993 do 2004 w Kopalni „Katowice-Kleofas” Ruch I zdeponowano łącznie 463 209,3 m<sup>3</sup> popiołów lotnych i żużli, głównie niezawierających produktów odsiarczania spalin, z czego [9, 12]:

- 93 057,26 m<sup>3</sup> w pokładzie 501;
- 185 339,3 m<sup>3</sup> w pokładzie 510;
- 184 812,7 m<sup>3</sup> w pokładzie 620.

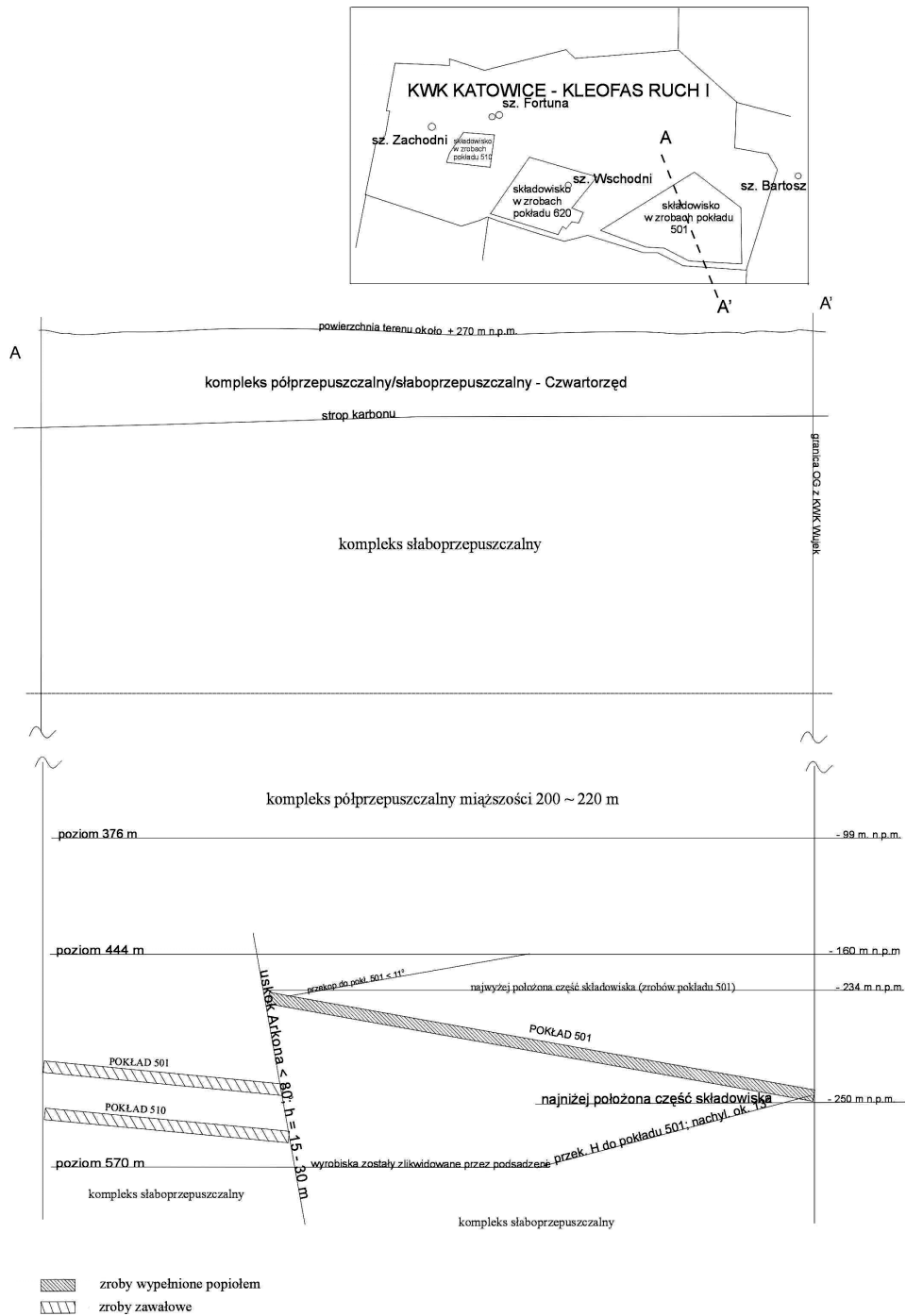
### 3.2.2. Eksploatacja złoże w rejonie składowiska w zrobach pokładu 501

Omawiany rejon położony jest między uskokami: Wojciech na południowym wschodzie, Baildoński Środkowy na północnym wschodzie, Arkona na północnym zachodzie oraz granicą obszaru górniczego z KWK „Wujek” na południu OG (rys. 2).

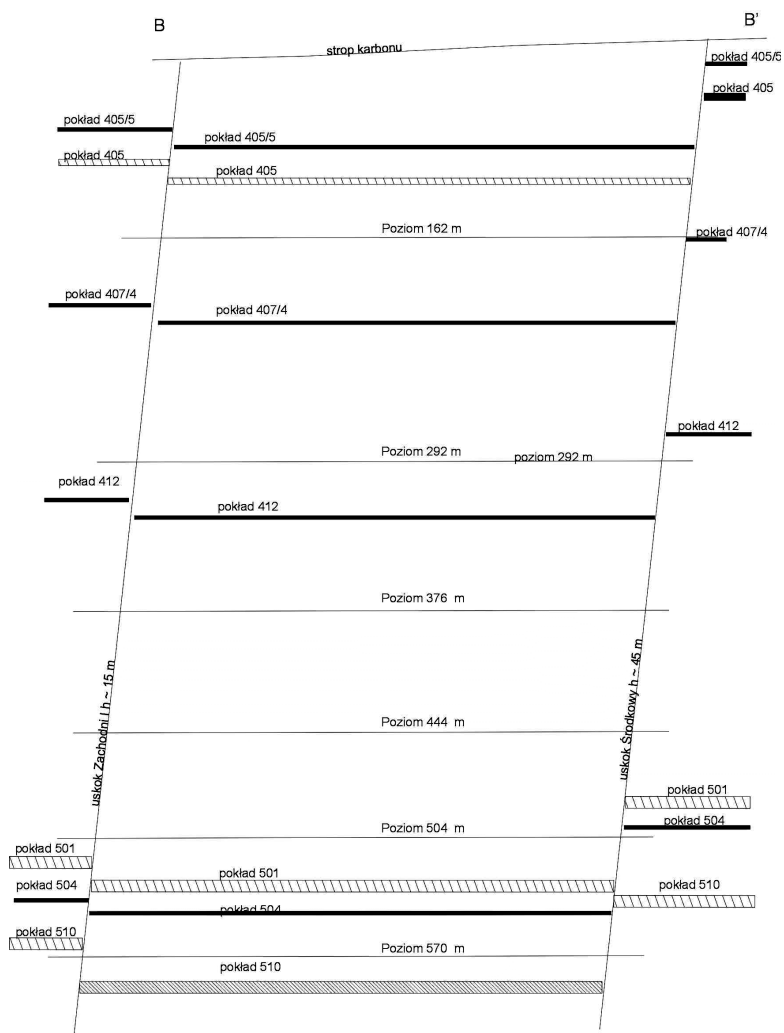
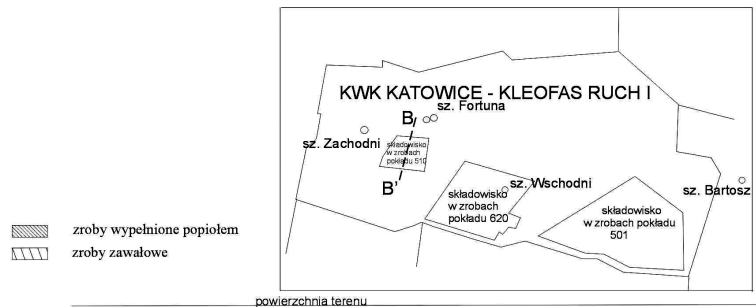
W omawianym rejonie pokład 501 zalegał na głębokości od około 530 metrów w części północnej do około 580 metrów poniżej powierzchni terenu w części południowej rejonu. Nad rejonem zrobów pokładu 501 nie prowadzono eksploatacji górniczej, wykonano jedynie kilka wyrobisk: przekop 216 z pokładu 501 do pokładu 416, przekop wznoszący z poziomu 570 do pokładu 501 (przekop H), przekop „wschodni” na poziomie 444 m (rys. 2). Pod rejonem eksploatacyjnym w pokładzie 501 nie prowadzono eksploatacji. Według informacji z działu mierniczo-geologicznego wyrobiska korytarzowe: przekop H, przekop 216 oraz przekop „wschodni” w rejonie składowiska oraz zroby w pokładzie 501 kopalni, zostały zlikwidowane poprzez doszczelnienie podsadzką hydrauliczną i szlamami w trakcie eksploatacji [12].

### 3.2.3. Eksploatacja złoże w rejonie składowiska w zrobach pokładu 510

Rejon, gdzie lokowano popioły lotne w zrobach pokładu 510, położony jest między uskokiem Zachodnim I (rys. 1), chodnikiem głównym „Zachód” w pokładzie 510, przekopem „C” i przekopem „B” na poziomie 570 m (rys. 3). Pokład w omawianym rejonie zalegał na głębokości od około 580 m w części północnej do około 650 metrów w części południowej rejonu (rys. 3).



Rys. 2. Schemat warunków górnictwo-geologicznych w rejonie składowiska w zrobach pokładu 501 [9]



Rys. 3. Schemat warunków górnictwo-geologicznych w rejonie składowiska w zrobach pokładu 510 [9]



Nad rejonem zrobów pokładu 510 prowadzono eksploatację górnictw w pokładach:

- 504 o grubości średniej 2,5 m w okresie 1953–1956 systemem z zawałem stropu oraz w okresie 1967–1973 systemem na podsadzkę hydrauliczną,
- 501 o grubości średniej 7,5 m w okresie 1942–1951 systemem z zawałem stropu oraz w okresie 1964–1967 systemem na podsadzkę hydrauliczną,
- 412 o grubości średniej 1,7 m w okresie 1957–1960 systemem z zawałem stropu,
- 407/4 o grubości średniej 1,8 m w okresie 1951–1957 systemem z zawałem stropu częściowo z podsadzką suchą,
- 405 o grubości średniej 3,2 m w okresie 1890–1930 systemem z zawałem stropu,
- 405/5 o grubości średniej 1,6 m w okresie 1906–1924 systemem z zawałem stropu.

Poniżej występują pokłady grupy 600, w których nie prowadzono eksploatacji.

Wyrobiska korytarzowe w zrobach i wokół zrobów pokładu 510, w których lokowano popioły lotne, zostały zlikwidowane poprzez podsadzenie (wszystkie wyrobiska wykonane w pokładzie oraz przekop „C” i przekop „L” na poziomie 570 m). Pozostałe wyrobiska zostały otamowane (według mapy pokładowej pokładu 510), drożność tych wyrobisk nie jest znana, należy jednak przypuszczać, że z uwagi na występowanie zarówno w stropie, jak i w spagu iłowców i mułowców oraz w świetle obserwacji dołowych nastąpiło (lub nastąpi do czasu zatopienia kopalni) ich zaciśnięcie [12].

#### **3.2.4. Eksploatacja złoża w rejonie składowiska w zrobach pokładu 620**

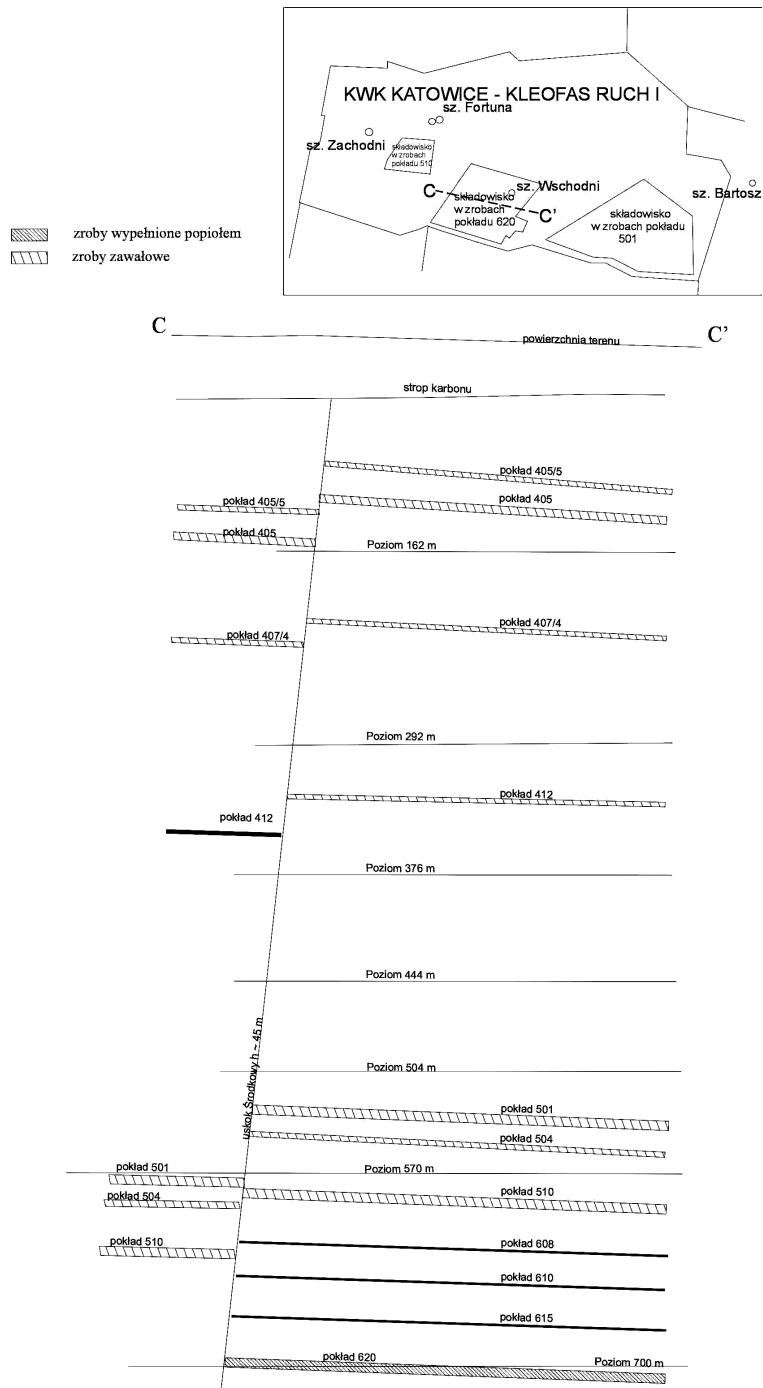
Omawiany rejon położony jest między uskokiem Środkowym od zachodu (rys. 1), chodnikiem odstawczo-zbiorczym od północy, upadową 8 od wschodu i granicą OG z KWK „Wujek” (rys. 4).

W omawianym rejonie pokład 620 zalegał na głębokości od około 610 metrów w części północnej do około 730 metrów w części południowej rejonu (rys. 4). Nad rejonem zrobów pokładu 620 prowadzono eksploatację górnictw w pokładach grup 500 i 400.

Wyrobiska korytarzowe (chodniki nadścianowe i podścianowe) prowadzone w pokładzie węgla 620 zostały zlikwidowane poprzez doszczelnienie podsadzką hydrauliczną i szlamami w trakcie eksploatacji. Wyrobiska korytarzowe na poz. 570 i 700 metrów, udostępniające pokład 620, są drożne ze względu na prowadzoną do końca okresu funkcjonowania kopalni eksploatację [12].

#### **3.3. Schematyzacja warunków geologiczno-górnictw**

Budowa geologiczna rzadko pozwala na dokładne odwzorowanie warunków hydrogeologicznych w przyjętym modelu złoża czy jego rejonu ze względu na niejednorodność wydzielen litologicznych, ich rozprzestrzenienie, zaangażowanie tektoniczne lub rozmiar modelowanego obszaru [2, 5]. Z tego powodu przy budowie modelu hydrogeologicznego przeprowadzono schematyzację warunków hydrogeologicznych modelowanego rejonu.



Rys. 4. Schemat warunków górnictwo-geologicznych w rejonie składowiska w zrobach pokładu 620 [9]

W konstrukcji modelu złoża konieczne było zgeneralizowanie wydzielen litologicznych oraz przyjmowanie zwartych grubych pakietów warstw przepuszczalnych lub słabo przepuszczalnych w całym wyróżnionym kompleksie skalnym. Przyjęto za utwory przepuszczalne kompleksy, w których dominują piaskowce od drobno- do gruboziarnistych oraz zlepieńce, natomiast utwory ilasto-mułowcowe występujące pomiędzy piaskowcami są niewielkiej miąższości, a ich występowanie w sąsiedztwie wyeksploatowanych pokładów węgla pozwala sądzić, że nie stanowią one wystarczającej izolacji dla infiltracji wód. Jako utwory półprzepuszczalne wydzielano warstwy, w których w przeważającej ilości występowały ilowce i mułowce, piaskowce w wydzielanym kompleksie występują w formie cienkich, niewielkiej miąższości (do kilku metrów) ławic lub w postaci soczew. Generalizacji wydzielen litologicznych dokonano na podstawie przekrojów geologicznych przez złożo KWK „Katowice-Kleofas” Ruch I oraz profili szybów i otworów wiertniczych (tab. 1) [9, 12].

TABELA 1

Schemat ideowy modelu hydrogeologicznego rejonu KWK „Katowice-Kleofas” Ruch I

| Stratygrafia  |               | Litologia   | Opis   |   |
|---|---------------|---|--|---|
| Czwartorzęd   |               | <p>piaski<br/> <math>k = 3,26 \times 10^{-4}</math> m/s</p> <p>gliny<br/> <math>k = 1 \times 10^{-8}</math> m/s</p> | <p>I warstwa modelu</p> <p>Na podstawie informacji z wykonanych w obszarze OG studni wykonano mapę nadkładu z wydzieleniem utworów przepuszczalnych nieprzepuszczalnych</p> <p>W utworach czwartorzędu przyjęto zakończenie II etapu modelowania</p> |   |
| K<br>a<br>r<br>b<br>o<br>n<br><br>g<br>ó<br>r<br>n<br>y | Westwał A + B | warstwy orzeskie i załęskie   | kompleks słabo przepuszczalny<br>$k = 1 \times 10^{-8}$ m/s  | II warstwa modelu   |
|   | Namur C       | warstwy rudzkie   | kompleks przepuszczalny<br>$k = 6,5 \times 10^{-7}$ m/s  | <p>III warstwa modelu</p> <p>Poziom eksploatacyjny 444, z dopływami na poziomie 2,464 m<sup>3</sup>/min</p> <p>Ze względów bezpieczeństwa eksploatacji w kopalniach sąsiednich do tego poziomu przyjęto spiętrzenie wody w I etapie modelowania</p> |
|   | Namur B       | warstwy siodłowe  | kompleks słabo przepuszczalny<br>$k = 1 \times 10^{-8}$ m/s  | <p>IV warstwa modelu</p> <p>Poziom eksploatacyjny 504, z dopływami na poziomie 0,694 m<sup>3</sup>/min</p> <p>Poziom eksploatacyjny 570, z dopływami na poziomie 0,8 m<sup>3</sup>/min</p>  |
|   | Namur A       | warstwy porębskie   | kompleks przepuszczalny<br>$k = 2,1 \times 10^{-7}$ m/s  | <p>V warstwa modelu</p> <p>Poziom eksploatacyjny 700, z dopływami na poziomie 0,134 m<sup>3</sup>/min</p>   |

### 3.4. Model hydrogeochemiczny migracji zanieczyszczeń

W oparciu o analizę warunków geologiczno-górnictwowych przyjęto za zasadne założenie filtracyjnego modelu przepływu wód w górotworze w rejonach lokowania popiołów. W pierwszej kolejności stworzono model koncepcyjny, a następnie przetransponowano go do programu Visual ModFlow Pro.

Parametrami „wejściowymi” do modelowania były wartości parametrów migracji zanieczyszczeń (przenoszenia konwekcyjnego, dyfuzji i dyspersji hydrodynamicznej, sorpcji, wylugowania) określone dla składowiska popiołów lotnych oraz dla ośrodka skalnego [9]. Wartości parametrów przyjętych dla składowiska przyporządkowano dla bloków obliczeniowych znajdujących się w rejonie, gdzie lokowane były popioły. Dla pozostałej części modelowanego obszaru przyporządkowano wartości parametrów przyjętych dla górotworu.

Modelowanie hydrogeochemiczne przeprowadzono w dwóch etapach [9, 12]:

1. Zatopienie górotworu pomiędzy rzędnymi: –330 i –220 m n.p.m. przy założeniu czasu zatapiania wynikającego z oszacowanej pojemności wodnej i wielkości dopływu naturalnego do kopalni wynoszącego ok. 6 lat, po którym zostanie ustabilizowane i utrzymywane zwierciadło wody w górotworze na rzędnej –220 m n.p.m. Po ustabilizowaniu się zwierciadła w górotworze modelowano i obserwowano w dalszym ciągu migrację zanieczyszczeń, przyjmując, że zasadniczy wpływ na kierunek rozprzestrzeniania się ich w górotworze będzie miała praca szybu drenującego, utrzymującego zwierciadło wody na rzędnej –220 m n.p.m. W tym etapie, od momentu ustalenia się zwierciadła wody w górotworze, modelowano rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń po 1, 5, 10 i 20 latach. Zakończenie modelowania dla I etapu po 20 latach było podyktowane założeniem, że po takim czasie od zatopienia kopalni do poziomu –220 m n.p.m. może nastąpić wyczerpanie zasobów w kopalniach sąsiednich (szacowane na około 20–30 lat przy obecnym poziomie wydobycia) i nie będzie zachodzić konieczność dalszej ich ochrony.
2. Modelowanie dalszego rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w czasie całkowitego zatapiania górotworu do rzędnych ustalonego poziomu wód. Sytuację wyjściową do tego etapu stanowiły warunki przepływu i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń wynikające z I etapu modelowania.

### 3.5. Wyniki modelowania

Całkowita pojemność wodna górotworu w OG „Katowice-Kleofas” Ruch I powoduje, że czas jego zatapiania w interwale od –330 do +280 m n.p.m. w wyniku jedynie dopływu naturalnego wynosi około 26 lat. Utrzymanie poziomu wód w górotworze na określonej rzędnej, wynikającej z konieczności uwzględnienia obecności połączeń hydraulicznych z kopalniami sąsiednimi, wydłuży całkowity czas zatapiania, ale nie wpłynie na możliwość modelowania tego procesu, przy przyjęciu uproszczenia polegającego na założeniu równoczesnego zatapiania górotworu w kopalniach sąsiadujących. Uproszczenie takie jest o tyle uzasadnione, że niedopuszczenie do przepływów pomiędzy kopalniami jest podyktowane względami bezpieczeństwa, związanymi z zachowaniem stateczności filarów granicznych [12].

Ze składowiska popiołów energetycznych, w wyniku przepływu przez nie wody w trakcie zatapiania kopalni, mogą być ługowane głównie jony chlorkowe (pochodzące głównie z wody użytej do sporządzania mieszaniny popiołowo-wodnej) i siarczany, a także jony wapnia i chromu ( $\text{Cr}^{6+}$ ). Ich migracja w górotworze zachodzi głównie na drodze przenoszenia konwekcyjnego i dyspersji, i jest wymuszona istniejącymi spadkami hydraulicznymi na etapie utrzymywania zwierciadła wód na określonej rzędnej dla ochrony połączeń hydraulicznych. Po ustaleniu się zwierciadła wody w górotworze na poziomie quasi-pierwotnym istotne znaczenie mają procesy dyfuzji molekularnej [12].

Określony w wyniku modelowania hydrogeochemicznego zasięg migracji zanieczyszczeń w górotworze w OG „Katowice-Kleofas” jest niewielki. Przy założeniu konieczności utrzymywania poziomu wód w górotworze na rzędnej  $-220$  m n.p.m. (dla ochrony połączenia hydraulicznego z Kopalnią „Polska-Wirek”), jony chlorkowe, uwalniające się najszybciej ze zdeponowanych w zrobach pokładu 501 popiołów lotnych, dotrą do drenującego szybu „Wschodni”, tj. na odległość około  $1000$  m od rejonu ulokowania popiołów, dopiero po 26 latach od momentu rozpoczęcia zatapiania (po 20 latach drenażu szybem „Wschodni”). Po całkowitym zatopieniu górotworu i dalszej migracji przez rozpatrywany w modelu okres 110 lat aureola zanieczyszczeń osiągnie wysokość ponad  $230$  metrów nad miejscem zdeponowania popiołów lotnych w pokładzie 501, nie osiągając słabo przepuszczalnego kompleksu warstw orzeskich i rudzkich [12].

#### 4 Wnioski

W skonstruowanym modelu hydrogeologicznym przyjęto pewne uproszczenie zakładające, że mimo prawdopodobieństwa wystąpienia na pewnych niewielkich odcinkach przepływu turbulentnego (w wyrobiskach niepodszczepionych), możliwe jest stworzenie dla całego OG kopalni modelu filtracyjnego przepływu [4, 7, 8, 16]. Opierało się ono na stwierdzeniu, że w trakcie zatapiania kopalni izolacja wyrobisk poziomych ogranicza przepływ turbulentny tylko do pewnych niewielkich odcinków wyrobisk, nie wpływając znacząco na warunki przepływu i zasięg migracji zanieczyszczeń na całym OG „Katowice-Kleofas”.

Na tej podstawie dla modelowanego obszaru w wyniku przeprowadzonej symulacji możliwe jest wyciągnięcie następujących wniosków [9, 12]:

- 1) W świetle uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że zdeponowane w wyrobiskach podziemnych KWK „Katowice-Kleofas” odpady energetyczne nie stanowią i nie będą stanowić, nawet po zatopieniu górotworu, zagrożenia dla użytkowych, czwartorzędowych poziomów wód.
- 2) Można zatem założyć, że składowiska odpadów energetycznych zlokalizowane w wyrobiskach górniczych kopalń GZW na dużych głębokościach (ponad  $400$ – $500$  m), w otwartych i półotwartych układach hydraulicznych, należy uznać za bezpieczne dla środowiska (przedostanie się z nich zanieczyszczeń do użytkowych ujęć wód podziemnych jest praktycznie niemożliwe).

- 3) W przypadku układów hydraulicznych izolowanych możliwości zanieczyszczenia użytkowych poziomów wód podziemnych na skutek migracji zanieczyszczeń ługowanych z odpadów energetycznych ulokowanych w górotworze w trakcie zatapiania kopalni ograniczone mogą być jedynie do fazy częściowego zatapiania górotworu i wymuszonych spadków hydraulicznych w rejonach ulokowanych popiołów.

#### LITERATURA

- [1] *Dulewski J.*: Podziemne składowanie odpadów w nowym Prawie geologicznym i górnictwym. Karbo, 11, 2002, 338–341
- [2] *Foos A.*: Geochemical modeling of coal mine drainage. Summit County, Ohio, Springer-Verlag, Environmental Geology, 31, 3/4, 1997, 205–210
- [3] *Frolik A.*: Ocena szczelności przeciwwodnych filarów bezpieczeństwa. Katowice, Prace Naukowe GIG, seria: Konferencje, 24, 1998, 231–240
- [4] *Haladus A., Adamczyk A.F., Szczepański A.*: Wpływ likwidacji kopalni Bolesław na zmiany pola hydrodynamicznego w triasowym piętrze wodonośnym w warunkach planowanego rozwoju kopalni „Olkusz”. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 9, 2, 1993
- [5] *Kowalski W.C.*: Umowne prawdopodobieństwo zgodności modeli geologicznych z rzeczywistością geologiczną. Przegląd Geologiczny, 46, 1, 1998, 95–98
- [6] *Kucowski I., Landyn D., Przekwas M.*: Energetyka a ochrona środowiska. Warszawa, WNT 1993
- [7] *Marcak H., Siemek J.*: Przepływy w ośrodkach spękanych. Archiwum Górnictwa, 43, 1998, 457–469
- [8] *Motyka J., Zuber A.*: Przepływ znaczników i polutantów przez węglanowe skały szczelinowe: 1-porowatość matrycy jako najważniejszy parametr, [w:] Problemy hydrogeologiczne południowo-zachodniej Polski, Wrocław 1993, 111–118
- [9] *Mzyk T.*: Model migracji zanieczyszczeń wód podziemnych z odpadów zdeponowanych w wyrobiskach górniczych na przykładzie KWK „Katowice-Kleofas” Ruch I. Praca doktorska, Gliwice, Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej 2004
- [10] *Palarski J.*: Możliwości wykorzystania podziemnych wyrobiskach górniczych do składowania odpadów. Wiadomości Górnicze, 10, 1995
- [11] *Palarski J., Plewa F., Babczyński W.*: Modelowanie migracji zanieczyszczeń z podziemnych składowisk odpadów. Monografia. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2002
- [12] *Pozzi M., Mzyk T.*: Metodyka oceny zagrożeń jakości wód podziemnych w wyniku migracji zanieczyszczeń z odpadów lokowanych w wyrobiskach podziemnych na przykładzie KWK „Katowice-Kleofas” Ruch I. Monografia. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2007
- [13] *Rogoż M.*: Wpływ likwidacji kopalni na środowisko wód podziemnych i powierzchniowych. Archiwum Górnictwa, 41, 1996
- [14] *Szczepański A.*: Hydrogeologiczne uwarunkowania likwidacji zakładów górniczych. Przegląd Górnictwa, 7–8, 1999, 25–28
- [15] *Szczepański A., Haladus A., Jastrzębski J., Kulma R.*: Badanie modelowe warunków przepływu wód podziemnych w strefach kontaktów hydraulicznych. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 12, 2, 1996
- [16] *Wagner J.*: Wybrane parametry hydrogeologiczne poziomów wodonośnych karbonu górnego niecki głównej w GZW. Współczesne Problemy Hydrogeologii, VIII, 1997, 397–400