

Możliwości zastosowania iniekcji wykonywanych otworami wiertniczymi głębokimi w celu ograniczenia dopływu wód do podziemnych wyrobisk górniczych

Robert Rado 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

Streszczenie: Jednym z niepożądanych zjawisk towarzyszących działalności górniczej jest powstawanie wtórnych zmian w górotworze w otoczeniu wyrobisk górniczych. Górotwór w miejscach prowadzenia eksploatacji najczęściej jest również zaburzony pierwotnymi dyslokacjami wynikającymi z procesów geologicznych zachodzących w czasie. Nałożenie się obu niepożądanych zjawisk prowadzi do różnego rodzaju komplikacji towarzyszących wydobyciu kopalni. Jednym z takich zjawisk jest dopływ wód z górotworu do górniczych wyrobisk kopalnianych. Niekontrolowany dopływ wód do kopalń jest niebezpieczny z punktu widzenia: bezpieczeństwa prowadzenia eksploatacji i ochrony środowiska naturalnego. Odwadnianie kopalń wód wymaga nakładów finansowych oraz angażuje zasoby techniczne i ludzkie. W artykule przedstawiono prace nad ograniczeniem dopływu wód do wyrobisk górniczych kopalni rud miedzi. Do ograniczenia dopływu wód do wyrobisk kopalni zastosowano metody wiertnicze przy użyciu iniekcji otworami głębokimi. Do zredukowania przepuszczalności zaburzonego pierwotnie i wtórnie górotworu zastosowano iniektory na bazie materiałów mineralnych i odpadów pochodzących z przemysłu energetycznego. Zastosowane receptury zaczynów iniekcyjnych różniły się składem oraz czasem ich wiązania dobieranym w zależności od aktualnego stanu górotworu i rozwoju dopływu do wyrobisk kopalnianych.

Słowa kluczowe: dopływ wody do kopalni, wiercenie otworu wiertniczego, otwór iniekcyjny głęboki, zaczyny cementowe, iniektory do uszczelniania górotworu, receptury iniektów

POSSIBILITIES OF USING DEEP BOREHOLES INJECTION TO REDUCE WATER INFLOW INTO UNDERGROUND MINE EXCAVATIONS

Abstract: One of the unwanted effects of mining activities is the formation of secondary changes in the rock mass in the surroundings of the mine workings. The rock mass in the areas where mining is carried out is most often also affected by primary dislocations due to geological processes occurring over time. The combination of both undesirable effects leads to various complications accompanying the mining of minerals. One such occurrence is the inflow of water from the rock mass into the underground mine. Uncontrolled water inflow into mines is dangerous from the point of view of mining safety and environmental protection. The dewatering of mines requires financial investments and engagements of technical and human resources. The article presents efforts to reduce the water inflow into the mine workings of a copper ore mine. To reduce the inflow of water into the mine sites, drilling methods were applied by using deep borehole injection. To reduce the permeability of the primary and secondary disturbed rock mass, mineral-based slurries and the waste products from the energy industry were used. The injection slurry recipes used were different in composition and their setting time selected according to the current state of the rock mass and the evolution of the inflow to the mine workings.

Keywords: mine water inflow, borehole drilling, deep injection borehole, cement slurry, injectants for rock mass formation, injection recipes

1. Zarys budowy geologicznej rejonu wzmoczonego dopływu wód do wyrobisk górniczych

Stan rozpoznania geologicznego rejonu, w którym występują wzmoczone dopływy do wyrobisk górniczych, opiera się na wynikach badań z otworów głębokich oraz otworów dołowych. Wzmoczone dopływy występują w rejonie złoża rud miedzi „Sieroszowice”.

Litostratygrafia

Litostratygraficznie rejon dopływu do wyrobisk górniczych zbudowany jest z utworów czwartorzędu wykształconego w postaci piasków średnio- i drobnoziarnistych oraz niżej położonych żwirów kwarcowych. Utwory te zalegają do głębokości około 55 m p.p.t. Czwartorzęd tworzą osady morenowe i rzeczno-łądowe. Są to utwory polodowcowe, gliny – moreny dennej i czołowej, oraz piaszczyste osady sandrów. Zazwyczaj występują grubo- i średnioziarniste piaski kwarcowe. Ponadto pojawiają się gliny, mułki, rzadziej żwiry.

Poniżej utworów czwartorzędowych zalegają osady neogenu i paleogenu (trzeciorzęd). Osady trzeciorzędowe zalegają niezgodnie na osadach triasu. Warstwy trzeciorzędowe obejmują pełny profil neogenu oraz górną część paleogenu.

Całkowita miąższość osadów neogenu (pliocenu i miocenu) w rejonie wzmoczonego dopływu wód do wyrobisk kopalnianych waha się od 334 m do 411 m.

Osady pliocenu charakteryzują się zmienną sedymentacją i zostały wykształcone w postaci piasków i ilów. Natomiast miocen w górnej części składa się z dwóch różnych litologicznie zespołów warstw: ilów plastycznych oraz piasków i żwirów z kilkoma przewarstwieniami węgla brunatnego. W środkowej części miocen zbudowany jest głównie z piasków kwarcowych, żwirów kwarcowo-skaleniovych z przeławieniami ilów i mułków. Wśród tych osadów występują wkładki węgla brunatnego i niekiedy łu węglatego. W dolnej części miocen tworzą głównie utwory ilaste z wkładkami mułków, piasków i żwirów. W stropowej części miocenu dolnego występuje pokład węgla brunatnego.

Paleogen jest reprezentowany przez osady oligocenu. W górnej części profilu oligocenu występuje kilka warstw węgla brunatnego, ilów węglowych i węglistych, zaś w dalszej części profilu występują ły, piaski i mułki.

Poniżej warstw oligocenu zalega trias, który reprezentowany jest przez osady pstrego piaskowca dolnego oraz środkowego. Na obszarze wzmoczonego dopływu do wyrobisk kopalnianych nie stwierdzono młodszych osadów triasu (triasu górnego). Dolny pstry piaskowiec zbudowany jest z piaskowców drobnoziarnistych, łupków ilastych i mułowców. Środkowy pstry piaskowiec to głównie drobno- i średnioziarniste piaskowce, a także mułowce i łupki ilaste. Miąższość triasu wynosi około 320 m.

Poniżej triasu zalega cechsztyń, o średniej miąższości około 250 m, reprezentowany przez cztery cyklotemy:

- Aller (PZ4) zbudowany z iłolupków z gniazdami i żyłkami gipsu i anhydrytu, anhydrytu pegmatytowego z wtrąceniami pelitu kwarcytowego i wkładek czerwonego piaskowca.
- Leine (PZ3) wykształcony w postaci anhydrytu głównego A3, iłolupka ciemnoszarego i zwięzłego dolomitu płytowego Ca3.
- Stassfurt (PZ2) zbudowany jest z anhydrytu podstawowego A2 laminowanego substancją ilastą. Poniżej zalega dolomit główny Ca2 wykształcony w postaci dolomitu mikrytowego zwięzłego. W utworach dolomitu głównego stwierdzono liczne spękania i ślady ługowania w postaci kawern. Lokalnie w dolomitach występują – w formie rozproszonej – domieszki minerałów ilastych oraz skupienia gipsu lub anhydrytu.
- Werra (PZ1), w którego stropowej części zalega anhydryt górny A1g zbudowany z mikrytowego, jasnoszarego, masywnego anhydrytu, w którym występują domieszki substancji dolomitowej, rzadziej ilastej. Poniżej anhydrytu wykształciła się sól kamienna Na1 grubokrystaliczna, barwy białej, przezroczysta, miejscami zanieczyszczona iłami i przerostami anhydrytu. Na obszarze wzmożonego dopływu wód występuje niemal na całej ich powierzchni z wyjątkiem niewielkiego fragmentu należącego do rozległej zatoki bezsolnej. Pod solą zalega anhydryt A1d (dolny) zbudowany z jasnych i ciemnoszarych anhydrytów krystalicznych. Anhydryty te zawierają domieszki substancji ilastej lub dolomitu. W najwyższych partiach anhydrytu dolnego lokalnie występuje kilkudziesięciocentymetrowa warstwa silnie zmienionych wpływami tektoniki iłów, z okruchami anhydrytu lub gipsu nosząca nazwę „iłu solnego”. W miejscach, gdzie stwierdza się brak soli, w stropie anhydrytu dolnego występuje brekcja ilasto-anhydrytowa (Markiewicz 2003, 2007). Najczęściej zbudowana jest ona z substancji ilastej, względnie ilasto-dolomitycznej, w której obrębie występują okruchy anhydrytu o średnicy od około 1 mm do kilku centymetrów. Poniżej anhydrytu dolnego A1d wykształcił się wapień cechsztyński Ca1 w postaci wapieni i dolomitów, w których profilach występują cztery zespoły warstw różniące się cechami litologicznymi. Najwyżej zalega warstwa wapienia cechsztyńskiego z domieszkami gipsu lub anhydrytu. Pod nią zalegają warstwy zawierające struktury oolitowe lub onkolitowe. W dalszej kolejności zalegają wapień i dolomity ze szwami stylolitowymi wypełnionymi ciemnymi minerałami ilastymi. Natomiast najniżej znajdują się wapień lub dolomity ilaste. W spągowej części wapienia cechsztyńskiego pojawia się okruszcowanie siarczkami miedzi. Ostatnim piętnem cyklotemu PZ1 jest łupek miedzionośny T1 reprezentowany przez łupki dolomityczne, łupki dolomityczno-ilaste oraz łupki ilasto-dolomityczne.

Tektonika

Obszar wzmożonego dopływu do wyrobisk górniczych znajduje się w strefie zaniku tektoniki nieciągłej, na południe od dużego zaburzenia tektonicznego – fleksury Jakubowa o amplitudzie szacowanej na około 50–70 m.

Najprawdopodobniej zaczątki fleksury powstały w orogenezie waryscyjskiej, a następnie uległa ona odnowieniu i rozwinięciu w młodszych osadach w orogenezie alpejskiej. W wyniku kompresji laramijskiej doszło do częściowego usunięcia soli z jej południowej części i powstania tzw. spawu tektonicznego (brekcja tektoniczna na kontakcie anhydrytów A1d i A1g), inaczej brekcji ilasto-anhydrytowej (BrA1) (Markiewicz 2007). Można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że brekcja ta jest pozostałością po wyciśniętej soli.

Występowanie strefy Jakubowa kontynuującej się w stropie powyżej poziomu wyrobisk górniczych, a także w warstwach stropowych – głównie w Ca2 odrębnych (nie stwierdzanych na poziomie wyrobisk) zaburzeń geologicznych, w tym tektoniki nieciągłej, potwierdza także najnowsza interpretacja wykonanych na obszarach złóż rud miedzi, w tym także w analizowanej części złoża badań sejsmicznych (Leszczyński 2022). Na wszystkich przekrojach sejsmicznych przecinających fleksurę Jakubowa stwierdzono jej kontynuowanie się w stropie do utworów triasu.

Fleksura Jakubowa może być główną przyczyną dopływu wody do wyrobisk kopalnianych z uwagi na towarzyszący jej system spękań i szczelin, które kontynuują się nad stropem przestrzeni wyeksploatowanej i nałożyły się na system spękań poeksploatacyjnych. Z obserwacji służby geologicznej w wyrobiskach wynika, że w obrębie dolomitów Ca1 występują nasunięcia międzylawicowe oraz uskoki przesuwcze o biegu skośnym do strefy Jakubowa. Dyslokacje te (płaszczyzny nieciągłości nieobserwowane w stropie piaskowca) często mają granicę w dolomitach smugowanych (brekcja tektoniczna) lub łupkach miedzionośnych, które prawdopodobnie stanowiły pakiet skał, po których warstwy nadległe ulegały przesunięciom. Zasięg pionowy dyslokacji na obecnym etapie jest trudny do stwierdzenia.

Z mapy zalegania spągu dolomitu głównego Ca2 w rejonie, w którym rejestruje się największe dopływy do wyrobisk górniczych (Andrusikiewicz 2022), wynika duże zróżnicowanie rzędnych zalegania spągu Ca2 nawet na stosunkowo krótkich odcinkach, co sugeruje występowanie szeregu uskoków w poziomie Ca2 o amplitudach rzędu 10–40 m. Uskoki te mogły powstać na skutek nacisków tektonicznych w obrębie strefy Jakubowa, powodujących zjawisko halokinezy zachodzącej zachodzących pod wpływem ruchów mas solnych wywołanych ciśnieniem skał nadkładu w strefie Jakubowa – deformującej wyżej zalegające sztywne warstwy anhydrytów A1g i dolomitu głównego Ca2. Występowanie uskoków w poziomie Ca2 może mieć duże znaczenie w powstawaniu przebieg hydraulicznych z tego poziomu do wyrobisk.

Wieloletnie badania strukturalne w poziomie złoża rud miedzi sprawiły, że punktem odniesienia dla tektoniki pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) stał się model

tektoniki blokowo-uskokowej jej podłoża. W trakcie wielokrotnej przebudowy tektonicznej omawianego obszaru horyzont solny sprzyjał wygaszaniu uskoków w swoim bezpośrednim podłożu oraz prawdopodobnie generowaniu odrębnego układu strukturalnego górnego permu i mezozoiku w nadkładzie. Uskoki stanowiące kontynuację zuskokowania otoczenia pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) nie są obserwowane w jej obrębie. Wynika to z właściwości geomechanicznych soli. Ulega ona w takich warunkach deformacjom plastycznym, a jednocześnie amortyzuje zewnętrzne naprężenia tektoniczne (tensyjne i kompresyjne).

Warunki hydrogeologiczne w rejonie wzmożonego dopływu

Na obszarze złoża rud miedzi „Sieroszowice”, gdzie rejestruje się największe dopływy do wyrobisk górniczych, wyróżnia się dwa kompleksy hydrogeologiczne:

- kenozoiczny, obejmujący luźne utwory czwartorzędu i trzeciorzędu o miąższości do około 400–510 m o charakterze porowym,
- triasowo-permski, występujący w zwięzłych skałach pstrego piaskowca, cechsztynu i czerwonego spągowca o charakterze głównie szczelinowym i szczelinowo-krasowym.

Kenozoiczny kompleks wodonośny w rejonie analizowanych pól eksploatacyjnych stanowi rozległy zbiornik wód podziemnych o znaczeniu regionalnym i o dużej zmienności litologicznej. W kompleksie tym występują dwa piętra wodonośne: czwartorzędu Q i trzeciorzędu Tr, rozdzielone ciągłą serią ilów poznańskich o miąższości od 20 m do ponad 100 m. Iły te lokalnie mogą być rozcięte głębokimi rynnami erozyjnymi.

Wodonośny kompleks triasowo-permski obejmuje monoklinalnie zapadające oraz zaburzone tektonicznie serie skalne. Zawodnienie występuje w utworach węglanowych i klastycznych niekiedy o dużej porowatości, szczelinowatości i kawernistości, szczególnie w strefach dyslokacji. W kompleksie tym występują dwa piętra wodonośne triasu T i permu P. W utworach triasowych wyróżnia się poziom wapienia muszlowego oraz poziom pstrego piaskowca Tp, który dzieli się na trzy warstwy wodonośne Tp1, Tp2 i Tp3 o charakterze porowym i szczelinowo-porowym).

Triasowe piętro wodonośne reprezentowane jest w analizowanym rejonie przez dwie warstwy wodonośne poziomu wodonośnego pstrego piaskowca: warstwę środkowego (Tp2) i dolnego pstrego piaskowca (Tp1). Reprezentowane są przez drobno- i średnioziarniste piaskowce kwarcowe.

Kontakty hydrauliczne pomiędzy poszczególnymi piętrami wodonośnymi w obrębie złoża „Sieroszowice” w warunkach pierwotnych, tj. przed rozpoczęciem eksploatacji górniczej rud miedzi przez KGHM, występowały w obrębie tzw. okien hydrogeologicznych oraz przez większe naturalne strefy uskokowe. Strefy naturalnych kontaktów hydraulicznych znajdują się generalnie poza obszarem złoża „Sieroszowice”, głównie w rejonie podkenozoicznych wychodni, przy regionalnej strefie uskokowej środkowej

Odry. W obrębie analizowanej części złoża, gdzie występują dopływy, charakterystyczne jest rozdzielenie pięter i części poziomów wodonośnych seriami (warstwami) skalnymi o cechach izolacyjnych. Wszystko wskazuje na to, że lokalnie strefa izolacyjna jest zakłócona czynnikami naturalnymi (np. występowanie fleksury Jakubowa, uskoki) lub antropogenicznymi (wpływy eksploatacji górniczej) (Chrzanowska 2022).

Prowadzona działalność górnicza związana z eksploatacją złoża rudy miedzi spowodowała powstanie nowych, rozległych kontaktów hydraulicznych na skutek wpływów robót górniczych, przede wszystkim eksploatacyjnych.

W obrębie wszystkich złóż rud miedzi KGHM występuje lej depresji, który obejmuje większość pięter wodonośnych. Drenażem górniczym nie zostały objęte tylko najwyższe piętra wodonośne: czwartorzędowe oraz nadwęglowy poziom wodonośny trzeciorzędu.

Dla bezpiecznego prowadzenia robót górniczych duże znaczenie ma kontakt hydrauliczny pomiędzy poziomami przyłożowymi: wapienia podstawowego Ca1 i piaskowców czerwonego spągowca z wyżej zalegającym poziomem dolomitu głównego Ca2. W normalnych warunkach górotworu nienaruszonego wpływami eksploatacji górniczej kontakt ten nie występuje. Wymienione powyżej poziomy wodonośne rozdzielają warstwy ewaporatów: głównie anhydrytów A1d i A1g oraz soli najstarszej Na1 o dostatecznej dużej miąższości.

Prowadzone rozpoznanie rejonu, w którym obserwuje się wzmożone dopływy otworami powierzchniowymi i dołowymi, potwierdza możliwość występowania kontaktów hydraulicznych pomiędzy poszczególnymi piętrami i poziomami wodonośnymi. Podczas wierceń otworów powierzchniowych zaobserwowano silne ucieczki płuczki na skutek spękań wywołanych wpływami eksploatacji w anhydrycie A3, kilkanaście metrów poniżej spągu triasu i kilkadziesiąt metrów powyżej stropu Ca2. Ucieczki te nasilają się w miarę zbliżania się do stropu Ca2. Pobrane do badań rdzenie wiertnicze wykazują intensywne spękanie. Podczas wierceń ujawniły się wpływy tektoniki nadsolnej, szczególnie w odcinku łożysk cyklotemu PZ4, gdzie stwierdzono przesunięcia warstw, a także występowanie brekcji. Potencjalnymi strefami podwyższonej chłonności mogą być uskoki stwierdzane w triasie oraz na pograniczu dolomitu Ca3 i anhydrytu A2.

2. Mechanizm dopływu wód do wyrobisk kopalnianych

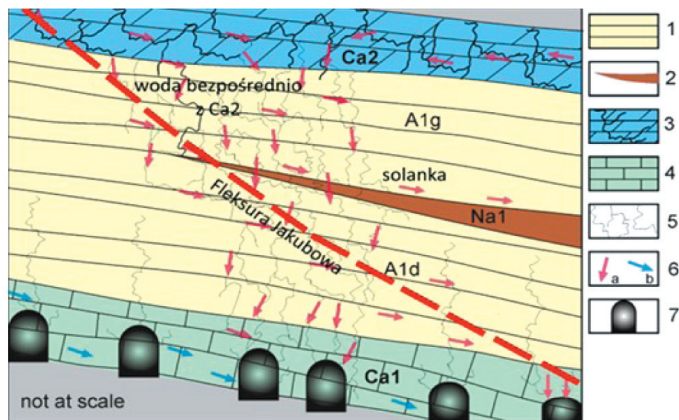
Dopływy wód do wyrobisk kopalnianych analizowanego rejonu występują od ponad dwudziestu lat. W latach 2002–2019 notowano niewielkie (do $1,5 \text{ m}^3/\text{min}$) dopływy pełno nasyconej solanki. W roku 2019 nastąpiły pierwsze dopływy o zwiększonym strumieniu objętości około $13 \text{ m}^3/\text{min}$, który następnie zmniejszył się do $5 \text{ m}^3/\text{min}$ i utrzymywał się w tym zakresie od maja 2020 r. do sierpnia 2021 r. W trzecim kwartale 2021 r. nastąpił ponowny gwałtowny wzrost dopływu do około $11 \text{ m}^3/\text{min}$, który stale rósł, by osiągnąć około $35 \text{ m}^3/\text{min}$ na koniec czerwca 2023 r., a następnie $43 \text{ m}^3/\text{min}$ na początku 2024 r.

Najbardziej prawdopodobnymi źródłami dopływu solanki jest jej nagromadzenie w połączonych hydraulicznie poziomach Ca2 oraz anhydrytach A1g. Przebicie hydrauliczne i wzmożony dopływ do wyrobisk nastąpił na skutek równoczesnego wystąpienia kilku niekorzystnych czynników:

- silnego zawodnienia warstwy Ca2 oraz wysokiego współczynnika filtracji tej warstwy,
- występowania lokalnego braku soli kamiennej jako warstwy izolującej,
- występowania strefy tektonicznej Jakubowa przecinającej górotwór od utworów triasu do poziomu wyrobisk górniczych, która zwiększa kontakty hydrauliczne triasu i dolomitu głównego Ca2 z wyrobiskami górniczymi,
- występowania drobnych uskoków powyżej pokładu soli,
- naruszonych prowadzoną eksploatacją warstw dolomitu Ca2 oraz anhydrytu A1g,
- powstania poziomych naprężeń rozciągających w górotworze na granicy pól, w których zakończono eksploatację.

Wzrost dopływu wód z górotworu do wyrobisk jest najprawdopodobniej również spowodowany bezpośrednio dopływającymi wodami z Ca2 (niewykluczone, że także z triasu) przez kontakty hydrauliczne uaktywniane niskoenergetycznymi wstrząsami górotworu.

Na rysunku koncepcyjnym (Kotarba 2018–2022) przedstawiono mechanizm zasilania wyrobisk górniczych wodami z górotworu (rys. 1). Widoczny jest na nim rejon wyklinowania soli związany w analizowanym rejonie dopływu wraz z przebiegiem strefy tektonicznej Jakubowa oraz powstałymi szczelinami i spękaniem poeksploatacyjnymi sięgającymi do Ca2 i wyżej do triasu. Zaprezentowany układ jest najprawdopodobniejszą przyczyną przebicia hydraulicznego i zasilania wyrobisk górniczych.



Rys. 1. Model koncepcyjny przebicia hydraulicznego w rejonie zaniku soli
 1 – anhydryt, 2 – sól kamienna, 3 – dolomit główny Ca2, 4 – wapień cechsztyński Ca1,
 5 – spękania i szczeliny poprzeczne wywołane działalnością górniczą,
 6 – kierunek przepływu wody w poziomie Ca2 i poprzez anhydryty A1g, A1d i soli Na1 (a)
 i w poziomie Ca1 (b), 7 – wyrobisko górnicze

Źródło: Kotarba (2018–2022)

Obserwowany dopływ wody do wyrobisk górniczych pochodzi przede wszystkim z rozległego systemu zeszcelinowanego dyslokacjami i spękanego pod wpływem eksploatacji górotworu, w którym powstał „zbiornik” o bardzo dużej pojemności z nieograniczoną swobodą przemieszczania się zakumulowanej wody. Zbiornik ten jest w sposób ciągły zasilany bocznie dopływem dynamicznym z poziomu dolomitu głównego Ca₂ i przypuszczalnie także z piętra triasowego szczególnie w strefie zaburzenia tektonicznego – fleksury Jakubowa. Nagromadzona w „zbiorniku” solanka przelewa się do wyrobisk przez spękania i dyslokacje, rozmywając krawędź pokładu soli od strony luki bezsolnej. Przepływająca woda powoduje ługowanie pokładu soli, co wywołuje wstrząsy i udrażnianie nowych kontaktów hydraulicznych.

3. Możliwość ograniczenia dopływu wód do wyrobisk kopalnianych z użyciem otworów wiertniczych iniekcyjnych wierconych z powierzchni

Ograniczenie dopływu wód do wyrobisk kopalnianych jest zagadnieniem złożonym i technicznie trudnym do wykonania. Pełne uszczelnienie i wypełnienie iniektami górotworu na całym obszarze, gdzie prowadzono eksploatację, jest praktycznie niemożliwe, a środki i czas poświęcony na takie przedsięwzięcie bardzo trudne do oszacowania. Dlatego też jednym z rozwiązań akceptowalnych czasowo i finansowo jest zbudowanie bariery przeciwfiltracyjnej. Jej zadaniem jest zmniejszenie objętości szczelin w górotworze i zablokowanie przepływu solanki przez krawędź soli na granicy luki bezsolnej, a następnie migracji solanki do wyrobisk górniczych. Zapobiegnie to również dalszemu rozmywaniu i ługowaniu pokładu soli kamiennej. Stworzenie bariery przeciwfiltracyjnej dla ograniczenia przepływu wody polega na „postawieniu” jej na warstwie soli, która jest nieprzepuszczalna.

Idea utworzenia bariery przeciwfiltracyjnej opiera się na założeniu, że woda z połączonych hydraulicznie poziomów dolomitu Ca₂ i anhydrytu A1g przepływa ponad stropem soli, powodując jej ługowanie, a następnie wpływa spękaniami w rejonie pozbawionym soli, systemem spękań poeksploatacyjnych do anhydrytów dolnych A1d (podsolnych), ługując pokład soli także od strony jego spągu. Następnie woda płynie grawitacyjnie rozwarstwieniami w anhydrytach dolnych A1d i zasila wyrobiska górnicze znajdujące się pod tymi anhydrytami.

Bariera przeciwfiltracyjna będzie utworzona przez sieć wiertniczych otworów głębokich wierconych z powierzchni, przez które do górotworu będzie zatłaczany uszczelniający czynnik iniekcyjny. Utworzona bariera z zacyznu uszczelniającego w pionie obejmie swoim zasięgiem zeszcelinowany górotwór poniżej spągu triasu i powyżej

stropu soli kamiennej Na1. Bariera będzie się opierała na stropie nieprzepuszczalnego dla wody pokładu soli Na1, uniemożliwiając przepływ wód w kierunku obszaru bez soli i dalej do wyrobisk górniczych. Dlatego zaprojektowane otwory iniekcyjne w pierwszej kolejności zostaną rozmieszczone wzdłuż krawędzi występowania pokładu soli.

4. Dobór zaczynów uszczelniających do prac iniekcyjnych oraz technika iniekcji otworowej w strefie dopływu wód do wyrobisk kopalnianych

Prace wiertniczo-iniekcyjne pozwalające na osiągnięcie założonego celu w postaci stworzenia bariery przeciwfiltracyjnej realizowane będą metodami iniekcji otworowych z zastosowaniem odpowiednio dobranych zaczynów na bazie składników mineralnych i niemineralnych. Projektowanie prac iniekcyjnych przy użyciu otworów wiertniczych głębokich nastęrcza problemów geotechnicznych związanych z jakością uszczelnienia górotworu, ciśnieniami w nim panującymi oraz ciśnieniem w otworze iniekcyjnym w trakcie prowadzenia iniekcji. Prowadzenie iniekcji z powierzchni jest również związane z możliwością pojawienia się komplikacji wiertniczych. W przypadku zatłaczania dużych objętości iniektów wyzwaniem jest także przygotowanie techniczne i logistyczne iniekcji, co przekłada się na koszty prowadzenia iniekcji.

Dla zapewnienia wysokiej skuteczności prac iniekcyjnych stosowane do iniekcji zaczyny uszczelniające muszą spełniać równocześnie kilka kryteriów.

Pierwszym z nich jest warunek zgodności pod względem fizykochemicznym z uszczelnianym górotworem. Drugi warunek wynika z kryterium czasu przetłaczania zaczynu, który pozwoli na jego skuteczne przemieszczenie w układzie wytwarzania iniektu, a następnie w górotworze. Trzecim wymogiem jest potrzeba zapewnienia odpowiednich parametrów wytrzymałościowych oraz odporności korozyjnej (trwałości) stwardniałych zaczynów uszczelniających. Receptury zaczynów powinny być tak dobrane, by stwardniały zaczyn miał parametry geomechaniczne takie same lub porównywalne z właściwościami uszczelnianego górotworu, zapewniając jego stabilność i konsolidację. Czwarty warunek powinien uwzględniać czynnik ekonomiczno-ekologiczny (Stryczek 2009).

Z uwagi na czynniki ekonomiczno-technologiczne zastosowanie do utworzenia bariery przeciwfiltracyjnej zaczynów iniekcyjnych sporządzanych wyłącznie na osnowie cementów portlandzkich nie jest korzystne, ponieważ wykazują one wady, np. w zakresie ich reologii, czasów wiązania czy odporności na korozję, a także są kosztowne. Niekorzystne właściwości użytkowe zaczynów uszczelniających sporządzanych na osnowie cementów powszechnego użytku można poprawić, wprowadzając do składu receptur odpowiednio dobrane dodatki mineralne oraz domieszki.

Wykorzystanie różnego rodzaju dodatków do sporządzania zaczynów uszczelniających wpływa na:

- polepszanie ich parametrów technologicznych,
- zmniejszanie kosztów zaczynu iniekującego,
- utylizację materiałów odpadowych, a w konsekwencji na zmniejszenie degradacji środowiska naturalnego.

Na potrzeby stworzenia bariery przeciwfiltracyjnej z użyciem powierzchniowych otworów iniekujących i zmniejszenia dopływu wód do wyrobisk górniczych opracowano i przebadano receptury zaczynów uszczelniających o zwiększonej trwałości na podstawie geopolimerów. Receptury oparto na składnikach pochodzenia nieorganicznego, a dokładnie pucolanowego materiału powstałego:

- ze spalania węgla brunatnego w palenisku pyłowym,
- ze spalania węgla brunatnego w palenisku fluidalnym,
- z mielonego granulowanego żużla pomiedziowego,
- z odpadu poflotacyjnego z procesu wzbogacania rud miedzi.

Popiół lotny zaliczany jest do dodatków o właściwościach pucolanowych, natomiast mielony granulowany żużel pomiedziowy oraz odpad poflotacyjny charakteryzuje się aktywnością pucolanowo-hydrauliczną.

Badania laboratoryjne związane z doбором receptur oraz parametrów technologicznych zaczynów do prac iniekcyjnych w otworach głębokich w strefie dopływu wód do wyrobisk podziemnych przeprowadzono na podstawie norm dotyczących składu i wymagań dla cementów, metod badań cementów, a w szczególności czasu wiązania i ich reologii.

Przeprowadzone badania miały na celu określenie przydatności różnego rodzaju dodatków pochodzenia nieorganicznego do zastosowania ich jako spoiw hydraulicznych w zaczynach uszczelniających nowej generacji o zwiększonej trwałości do zastosowania przy projektowaniu prac iniekcyjnych w strefie dopływu wód do wyrobisk podziemnych. Badania zmierzały do opracowania najbardziej efektywnych technicznie i ekonomicznie receptur.

Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych

Do przygotowania zaczynów iniekcyjnych uszczelniających wykorzystano receptury na podstawie popiołów:

- z fluidalnego spalania węgla brunatnego z elektrowni „Turów”,
- z pyłowego kotła spalania węgla brunatnego z elektrowni „Bełchatów”.

W tabelach 1–3 zestawiono wstępnie badane receptury oraz ich niektóre parametry technologiczne w zależności od stosowanych dodatków (cement portlandzki, ścierniwo, odpady z odsiarczania gazów odlotowych, odpady poflotacyjne).

Tabela 1
Zestawienie podstawowych parametrów wstępnych receptury zaczynów uszczelniających możliwych do zastosowania podczas iniekcji w otworach iniekcyjnych

Lp.	Oznaczenie receptury zaczynu uszczelniającego	Receptura zaczynu uszczelniającego								Wskaźnik wodno-mieszaniowy w/m [-]	Rozlewność wg AzNI [mm]	Czas wiązania	
		ciecz zarobowa Solanka [cm ³]	cement portlandzki CEM I 42,5 [dag]	popiół z fluidnego spalenia węgla brunatnego w elektrowni Turów [dag]	popiół z pyłowego kotła zespalania węgla brunatnego z elektrowni	Betchatów [dag]	ściemno [dag]	odpady z odsiarczania gazów odłotowych [dag]	odpady poflotacyjne w postaci suchej [dag]			początek [h]	początek [h]
1	2	3	5	4	6	7	8	9	10	11	12		
1	1	700	-	-	70	20	10	-	0,70	-	30	38	
2	2	700	-	-	60	20	20	-	0,70	70	18	27	
3	3	700	-	-	50	30	20	-	0,70	140	20	30	
4	4	700	-	-	50	20	30	-	0,70	60	16	24	
5	5	700	15	-	60	15	10	-	0,70	180	32	48	
6	6	770	-	-	75	10	15	-	0,70	175	28	54	
7	7	750	-	-	70	15	15	-	0,70	180	32	56	
8	8	720	-	-	65	15	10	10	0,70	190	brak wiązania po 60 h		
9	9	650	30	-	60	10	-	-	0,65	-	0,5	1,0	
10	10	600	30	-	40	20	10	-	0,60	-	17	21	
11	11	900	10	-	70	15	-	-	0,90	165	10	12	
12	12	500	-	70	-	20	10	-	0,50	240	10	12	
13	13	500	-	60	-	30	10	-	0,50	240	17	20	
14	14	700	-	-	60	20	10	10	0,70	180	30	42	
15	15	500	-	60	-	20	10	10	0,50	230	brak wiązania po 54 h		
16	16	500	10	60	-	20	10	-	0,50	220	24	36	
17	17	500	-	60	-	20	20	-	0,50	80	48	60	
18	18	500	-	50	-	30	20	-	0,50	125	48	60	
19	19	550	15	60	-	10	15	-	0,55	210	12	24	
20	20	610	-	65	-	20	15	-	0,60	210	brak wiązania po 60 h		
21	21	600	-	60	-	15	15	10	0,60	195	brak wiązania po 60 h		

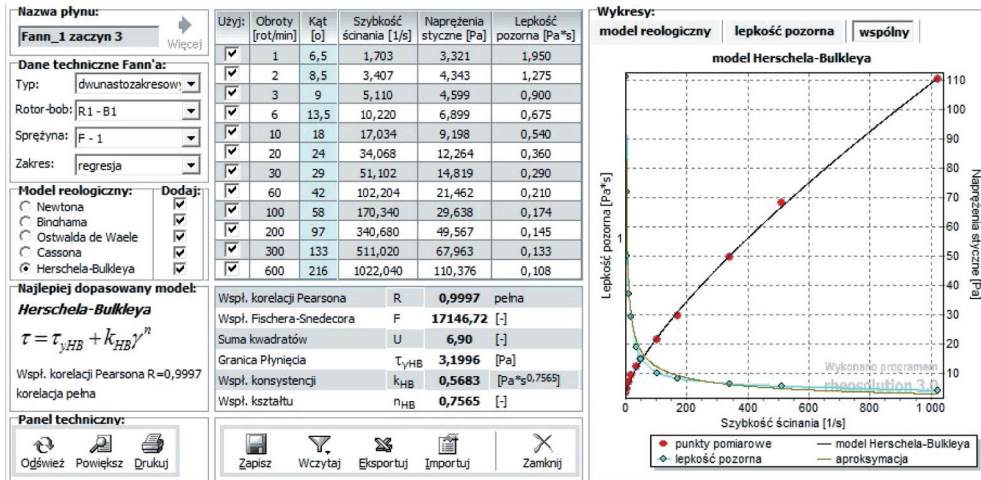
Tabela 2
 Receptury oraz niektóre parametry technologiczne zaczynów uszczelniających określone laboratoryjnie w temperaturze 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$)
 (popiół z elektrowni „Turów”)

I.d.	Oznaczenie receptury zaczynu uszczelniającego						Receptura zaczynu uszczelniającego w przeliczeniu na 1 kg składników stałych						Współczynnik wodno-mieszaniowy w/m [-]	Gęstość [kg/m ³]		Rozlewność według stożka AzNII [mm]	Kubek Forda 4 [s]	Czas wiązania	
	ciecz zarobowa [cm ³]	cement portlandzki CEM I 42,5 [dag]	popiół z fluidalnego spalania węgla brunatnego z elektrowni Turów [dag]	scierniwo [dag]	odpady z odsiarczania gazów odlotowych [dag]	odpady poftlacyjne w postaci suchej [dag]	scierniwo [dag]	odpady z odsiarczania gazów odlotowych [dag]	odpady poftlacyjne w postaci suchej [dag]	zmierzona	obliczona	początek [h]		poniec [h]					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15					
1	1	500	-	100	-	-	-	0,5	1530	1690	245	17	5 dni	-					
2	2	500	10	90	-	-	-	0,5	1560	1704	230	24	22	25					
3	3	500	-	90	-	10	-	0,5	1550	1676	190	50	45	5 dni					
4	4	500	-	85	-	15	-	0,5	1560	1668	135	30	32	42					
5	5	500	-	80	10	10	-	0,5	1560	1682	210	30	40	5 dni					
6	6	500	-	70	20	10	-	0,5	1590	1687	230	20	40	5 dni					
7	7	500	-	60	30	10	-	0,5	1600	1693	250	50	40	5 dni					
8	8	500	10	80	-	10	-	0,5	1580	1689	190	46	18	20					
9	9	500	10	70	10	10	-	0,5	1610	1695	210	30	18	24					
10	10	500	10	60	20	10	-	0,5	1630	1701	230	24	25	28					
11	11	500	-	70	20	10	-	0,5	1671	1695	240	22	10	12					
12	12	500	-	60	20	10	10	0,5	1685	1690	230	24	65	5 dni					

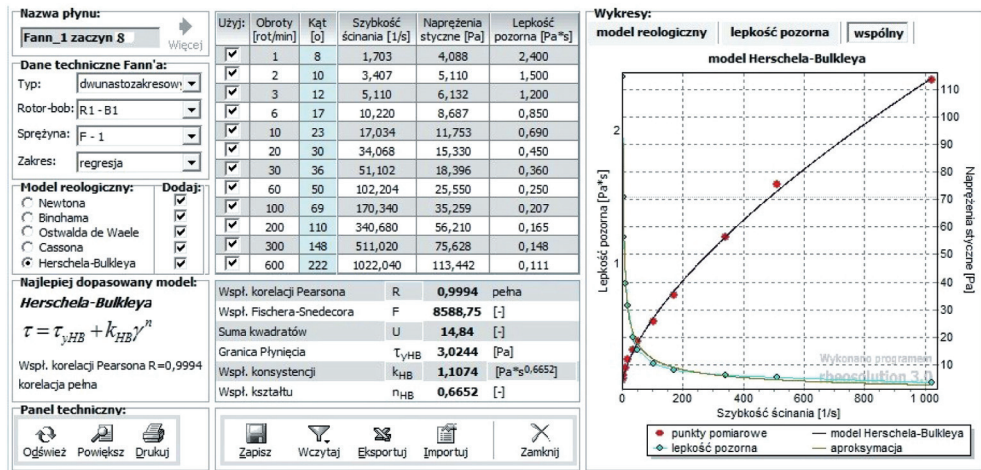
Tabela 3
 Parametry technologiczne zacyzów uszczelniających określone laboratoryjnie w temperaturze 20° (±2°C)

Lp.	Oznaczenie receptury zacyznu uszczelniającego	Współczynnik wodno-mieszaninowy [-]	Gęstość [kg/m ³]	Rozlewność wg stożka AzNII [mm]	Lepkość względna wg Kubka Forda nr 4 [s]	Odstój [%]	Lepkość plastyczna η_p [Pa·s]	Lepkość pozoma η_a przy 600 obr./min [Pa·s]	Granica płynięcia τ_y [Pa]
1	2	3	4	5	6	7	9	10	11
1	1	0,55	1530	245	17	3	0,0506	0,0532	1,691
2	2	0,55	1560	230	24	5	0,0707	0,072	4,006
3	3	0,55	1550	190	50	1	0,1060	0,108	7,826
4	4	0,55	1560	135	30	0	0,1706	0,185	10,119
5	5	0,55	1560	210	30	0	-	-	-
6	6	0,55	1590	230	20	0	-	-	-
7	7	0,55	1600	250	50	0	-	-	-
8	8	0,55	1580	190	46	0	0,1092	0,111	10,657
9	9	0,55	1610	210	30	0	-	-	-
10	10	0,55	1630	230	21	0	-	-	-
11	11	0,55	1651	240	20	0	-	-	-
12	12	0,55	1700	230	52	0	-	-	-

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przykładowe reologiczne krzywe płynięcia dla niektórych receptur badanych zaczynów uszczelniających. Badania reologiczne były wykonywane jedynie dla zaczynów, które w swym składzie nie zawierały ścierniwa ze względu na możliwość szybkiego zużycia elementów roboczych aparatury pomiarowej.



Rys. 2. Parametry reologiczne zaczynu nr 3



Rys. 3. Parametry reologiczne zaczynu nr 8

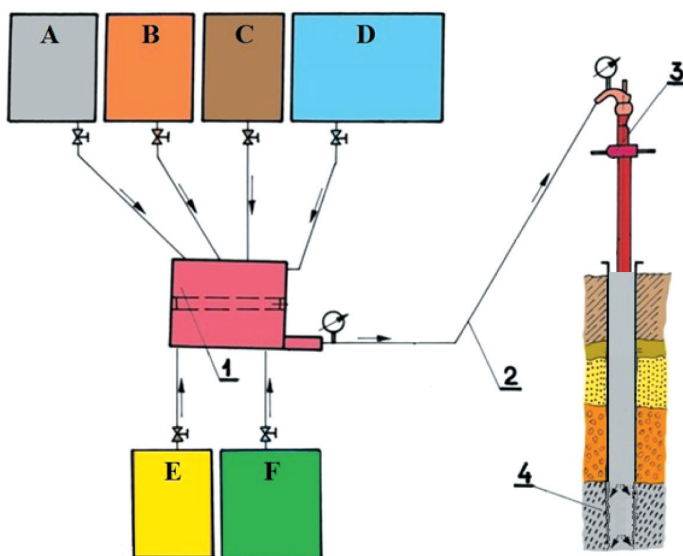
Sposób wytwarzania i zatłaczania mieszaniny iniekcyjnej

Iniekt w postaci cieczy iniekcyjnej będzie zatłaczany do górotworu przy wykorzystaniu otworów wiertniczych głębokich. Zatłaczanie cieczy iniekcyjnej ma za zadanie uszczelnienie górotworu w miejscach jego podwyższonej chłonności, czyli miejscach porowatych, spękanych bądź nieciągłych. Celem iniekcji będzie wypełnienie uprzednio wymienionych przestrzeni w górotworze, przez co zostanie zablokowana bądź ograni-

czona migracja wód do wyrobisk kopalnianych. Podczas zatłaczania iniektu do górotworu, dodatkowo w celu zwiększenia objętości zaczynu i regulacji własności mechanicznych do mieszaniny bazowej składającej się z solanki i cementu portlandzkiego, okresowo lub w sposób ciągły będzie dodawany popiół lotny ze spalania węgla brunatnego oraz materiały uzupełniające w postaci pochodnych żużli z procesu metalurgicznego wytopu miedzi oraz odpady poflotacyjne. Do regulacji czasu wiązania zatłaczanej cieczy iniekcyjnej okresowo może być użyty również chlorek wapnia CaCl_2 lub węglan sodu Na_2CO_3 w połączeniu ze stosowanym cementem portlandzkim. W celu ułatwienia przetłaczania iniektu przez otwór wiertniczy i górotwór oraz redukcji współczynnika wodno-mieszaninowego okresowo stosowane będą również plastyfikatory.

Mieszanina przeznaczona do iniekcji będzie wytwarzana w sposób ciągły na wiertni przez mieszanie poszczególnych składników wchodzących w skład iniektów i ich homogenizowanie w mieszaninie, a następnie przetłaczania zawiesiny iniekcyjnej do otworu wiertniczego.

Ogólny schemat ideowy układu technologicznego do przygotowania mieszaniny iniekcyjnej i jej zatłaczania przedstawiono na rysunku 3. Widoczny na nim ciąg technologiczny składa się z układu zasobników i silosów, które stanowią układ buforowo-magazynowy dla materiałów wykorzystywanych do przygotowania iniektów.



Rys. 4. Schemat układu gravitacyjnego zatłaczania zaczynu uszczelniającego w strefę chłonną górotworu

A – zbiornik na dodatek wchodzący w skład receptury zaczynu (popiół lotny z elektrowni „Turów”), B – zbiornik na dodatek wchodzący w skład receptury zaczynu (popiół lotny z elektrowni „Bełchatów”), C – zbiornik na spoiwo hydrauliczne (cement), D – zbiornik na ciecz zarobową (solanka), E – zbiornik na dodatek wchodzący w skład receptury zaczynu (ścierniwo), F – zbiornik na dodatek wchodzący w skład receptury zaczynu (odpad poflotacyjny), 1 – mieszalnik do sporządzania zaczynu uszczelniającego według ustalonej receptury oraz pompa do jego zatłaczania do otworu iniekcyjnego, 2 – przewód tłoczny do zatłaczania zaczynu uszczelniającego do otworu wiertniczego głębokiego, 3 – głowica do na wylocie otworu wiertniczego lub prewenter, 4 – strefa iniekcyjna (strefa chłonna górotworu)

Układ ten jest zasilany w sposób ciągły przez transport kołowy. Z układu zasobników i silosów materiały sypkie do wytwarzania mieszaniny iniekcyjnej są pobierane rurociągami transportowymi, a następnie przemieszczane do układu mieszającego w odpowiednich proporcjach wagowych i/lub objętościowych zgodnych ze stosowaną recepturą zaczynu uszczelniającego podczas iniekcji. Układ mieszający jest zasilany solanką pochodzącą z odwadniania wyrobisk górniczych. Bazowa mieszanina iniecyjna w zależności od chłonności górotworu, oporów przepływu iniektu oraz ciśnienia tłoczenia jest uzupełniana dodatkami wypełniającymi oraz regulującymi reologię iniektów oraz czas ich wiązania.

5. Wnioski

Po przeprowadzeniu analiz czynników wpływających na wzmożony dopływ do wyrobisk kopalnianych oraz możliwości ograniczenia tego dopływu iniekcjami z otworów wiertniczych odwierconych z powierzchni można sformułować następujące wnioski:

1. Prowadzenie iniekcji uszczelniającej górotwór na całym obszarze oddziaływania eksploatacji górniczej oraz znajdujących się w górotworze pierwotnych zaburzeń tektonicznych nie jest możliwe z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia ze względu na objętość pustek w górotworze w rejonie wzmożonego dopływu wód oraz możliwy zasięg iniekcji otworami powierzchniowymi.
2. Prace iniecyjne powinno się prowadzić w obszarach, które najskuteczniej ograniczą strumień dopływu wód do wyrobisk kopalnianych przez zmniejszenie przepuszczalności górotworu i/lub wypełnienie pierwotnych oraz wtórnych zaburzeń górotworu.
3. Uszczelnienie górotworu otworami wierconymi z powierzchni należy prowadzić etapami poniżej utworów triasu, iniekując do utraty chłonności kolejne udostępniane interwały do osiągnięcia stropu soli kamiennej.
4. Przeprowadzone analizy wykazały, że przygotowanie iniektów wyłącznie na popiołach lotnych bez udziału cementu portlandzkiego nie jest możliwe ze względu na czas wiązania tak przygotowanych zaczynów iniekujących.
5. Badania zaczynów sporządzanych na podstawie popiołów z elektrowni „Bełchatów” wskazały, że wymagają one stosowania znacznie większych współczynników wodno-mieszaninowych w stosunku do zaczynów przygotowanych na podstawie popiołów z elektrowni „Turów”, co wydłuża czasy wiązania tych zaczynów.
6. Receptury bazujące na popiołach z elektrowni „Bełchatów” wymagają większej zawartości cementu, aby uzyskać podobny czas wiązania oraz wytrzymałość mechaniczną jak zaczyny bazujące na popiołach z elektrowni „Turów”.

7. Ze względów logistycznych (odległość do miejsca prowadzenia iniekcji) należy aplikować przede wszystkim popioły z elektrowni „Turów”, co przełoży się na obniżenie kosztów materiałowych wytworzenia iniektów.
8. Dodawanie materiałów zwiększających objętość zaczynów iniekujących (żużel pomiedziowy, materiał poflotacyjny) nie wpływa w sposób statystycznie istotny na wydłużenie czasów wiązania iniektów.

Literatura

- Andrusikiewicz W., Wątor L., 2022, *Ocena warunków geologicznych i hydrogeologicznych w rejonie pól SI-XV/7, SI-XV/8 i GA-I/6 oddziału G-61, rejonu GG-6 w O/ZG „Polkowice – Sieroszowice”, w aspekcie bezpiecznego prowadzenia robót eksploatacyjnych z uwagi na zagrożenie wodne*, Stowarzyszenie Naukowe im. S. Staszica, Kraków [praca niepublikowana].
- Chranowska A., Wątor L., 2022, *Analiza MES zachowania się górotworu i powierzchni terenu na skutek zmian warunków hydrogeologicznych i zjawisk ługowania soli wywołanych eksploatacją w rejonie SG O/ZG „Polkowice-Sieroszowice*, Stowarzyszenie Naukowe im. S. Staszica, Kraków [praca niepublikowana].
- Kotarba M., Olchowy P., Jeż P., 2018–2022, *Badania geochemiczne, mineralogiczne i mikrobialne w celu ustalenia źródła pochodzenia siarkowodoru i węglowodorów gazowych oraz próba wypracowania wskaźników zagrożeń związanych z ich występowaniem w złożu kopalń „Polkowice- Sieroszowice” i „Rudna”. Etapy I–V*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Staszica, Kraków [materiały wewnętrzne KGHM].
- Leszczyński R., 2022, *Interpretacja badań sejsmicznych wykonanych na obszarach złóż rud miedzi w latach 2011– 2014* [materiały wewnętrzne KGHM].
- Markiewicz A., 2003, *Tektonika cechsztyńskiej soli kamiennej w LGOM i jej znaczenie dla działalności gospodarczej*, Praca doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Staszica, Zakład Złóż Rud i Soli, AGH (archiwum), Kraków.
- Markiewicz A., 2007, *Tektonika obszaru złoża*, [w:] A. Piestrzyński (red.), *Monografia KGHM Polska Miedź S.A.*, KGHM Cuprum, Lubin.
- Strzycek S., Gonet A., Wiśniowski R., Biskup T., 2009, *Wpływ pyłów cementowych z cementowni Chełm na właściwości technologiczne zaczynów uszczelniających*, *Wiertnictwo, Nafta, Gaz* 2009, t. 26, z. 4, s. 677–687.