

Wpływ zatapiania likwidowanych kopalń węgla kamiennego w GZW na stan bezpieczeństwa powszechnego na terenach pogórnicznych

Przemysław Bukowski¹

The impact of flooding of abandoned hard coal mines in the Upper Silesian Coal Basin on the state of general safety of post-mining areas. Prz. Geol., 72: 225–240; doi: 10.7306/2024.10

Abstract. To answer the question whether and what is the impact of flooding of abandoned hard coal mines in the USCBA (Upper Silesian Coal Basin) on the threat to general safety, it is necessary to refer to the essence of the problem, which is the flooding of closed mines and the impact of this process on the geological surroundings and the land surface. It is also necessary to be aware of what the terms threat and general safety mean. Thus, we will not answer the fundamental question prompted by the title, without characterizing the causes, course and consequences, as well as the connections, of hydrogeological processes with processes in the field of rock mechanics and safety, which we tried to present in the article. At the same time, the disclosure and subsequent occurrence of interconnections of hydrogeological and geomechanical processes leading to threats in post-mining areas would not be possible if these were not for the mining activities within the designated range of mining area. The key to explaining the causes, course and consequences of processes leading to hazards in post-mining areas is to understand the cause and effect a sequence of events, from granting a license to extract a mineral from a deposit to decision about underground coal mine closure. Processes and phenomena that occur after the closure of a mine and decommissioning its drainage system lead to various hazards, such as water hazards, sinkholes, flood hazards, mine gas outflows, etc. They are a consequence of previous mining activity and the overlapping and differentiation of various conditions (technical and geological) that change during the successive stages of the mine flooding process. Based on the experience from 20–30 years ago and on the hazards to the land surface in the flooded former Maria coal mine, it can be seen that these issues still constitute existing, although somewhat forgotten, knowledge that remains undeveloped and unnoticed to this day (caving hazard in the former Siersza coal mine). Hence, the article attempts to characterize and explain, as well as recall and discuss, some of the consequences of drainage system decommissioning and an underground mine closure by completely flooding its mining workings.

Keywords: mining hydrogeology, mine flooding, impact of water on the properties of rock and rock mass, general safety, post-mining sinkholes, former Siersza mine in Trzebinia

Stwierdzenie, czy wystąpi, a także jaki może być związek zatapiania wyrobisk górniczych w kopalni podziemnej likwidowanej z możliwą zmianą zagrożenia wodnego dla czynnych wyrobisk górniczych kopalń węgla kamiennego nie jest zadaniem specjalnie trudnym. Wynika to z definicji zagrożeń wodnych rozumianych już tylko jako sama możliwość wdarcia się wody lub wody z luźnym materiałem do czynnej przestrzeni wyrobisk górniczych. W polskiej literaturze naukowej z zakresu geologii – hydrogeologii górniczej, górnictwa, geofizyki górniczej, a nawet geomechaniki górniczej sprzed 2000 r., rzadko można spotkać prace skupione na tematyce wpływu wody na rozwój innych niż wodne zagrożeń naturalnych w kopalni podziemnej. Prace uwzględniające wpływ wody dotyczyły zwłaszcza zagrożeń tapaniami i wykorzystania wody do osłabienia i destrukcji górotworu przez jego nawodnienie lub zruszenie struktury w procesie zapobiegania lub do opanowania zagrożenia pożarowego. W odniesieniu do powierzchni terenu, o roli wody (infiltrującej – przenikającej w głąb górotworu) mówi się w sytuacji występowania anomalnych zjawisk atmosferycznych i zjawisk zapadliskowych na terenach górniczych czynnych kopalń. Zjawiska zapadliskowe na terenach górniczych występowały zwykle jako efekt niekorzystnego splotu kilku czynników, m.in. osłabionego górotworu, występowania płytko położonej pustki, czynnika inicjującego lub obciążającego (np. wstrząsu pochodzenia górniczego, od ruchu drogowego, prac budowlanych) oraz uwarunkowań atmosferycznych sprzyjających nasyceniu górotworu

wodą i długotrwałej infiltracji (np. długotrwałe opady deszczu).

Aby powiązać powstawanie zjawisk niebezpiecznych z procesem zatapiania kopalń, jakimi są zapadliska ujawniające się na powierzchni terenu w czasie i po zatopieniu kopalni, należy najpierw sobie zdać sprawę z niektórych skutków działalności górniczej. Pomijając inne skutki, które występują w czasie działalności górniczej, jak wysokoenergetyczne wstrząsy górnicze, deformacje ciągłe i nieciągłe (związane z eksploatacją górniczą), bezpośrednio niewyczuwalnym i niewidocznym efektem działalności górniczej jest drenaż górotworu i zmiany związane z jego odwodnieniem. W rozważaniach nieinżynierskich proces drenażu górotworu jest rzadko postrzegany jako generujący nie tylko rzuty wód dołowych do cieków na powierzchni terenu, ale jako proces prowadzący do wymuszonej zmiany stanu wilgotności skał górotworu otaczającego wyrobiska górnicze. Zatem rzadko dostrzega się proces drenażu górotworu, który prowadzi do względnego „wzmocnienia” skał w wyniku ich odwodnienia, jako proces odwrotny do nasycenia wodą, prowadzący do względnego „osłabienia” skał. Procesy te można porównać do znanego ogólnie porównania długości dróg hamowania pojazdów na suchej i mokrej nawierzchni, niezależnie od procesu, który był przyczyną zwilżenia nawierzchni drogi. Podobnie odwodnienie i nasycenie wodą skał, niezależnie od procesu, który je powoduje, wpływa na wiele parametrów określających wytrzymałościowo-odkształceniowe właściwości skał.

¹ Zakład Geologii, Geofizyki i Ochrony Powierzchni, Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy, plac Gwarków 1, 40-166 Katowice; pbukowski@gig.eu; ORCID ID: 0000-0003-2956-1509

Odwodnienie górotworu ma bowiem istotne znaczenie dla zwiększenia parametrów wytrzymałościowych oraz zmniejszenia ich odkształcalności. Zmiany wilgotności skał z otoczenia wyrobisk górniczych wpływają na poprawę lub utratę stateczności górotworu wokół wyrobisk, w tym wokół płytko usytuowanych pustek pogórnich. Tym samym zmiany wilgotności skał otaczających wyrobiska górnicze, poprzez wpływ na stateczność otoczenia pustki pogórnich i terenu, mają ścisły związek ze zmiennymi stanami bezpieczeństwa powierzchni terenu pogórnich. Dlatego, to m.in. z powodu odwodnienia górotworu z wody wolnej i części słabiej związanych w skałe wód kapilarnych, obszary górnicze w okresie działalności górnictwa, można było uznać za stosunkowo bezpieczne z uwagi na zagrożenie zapadliskowe.

Procesy zapadliskowe na terenach czynnych górniczo, pomimo licznych pustek w górotworze, zwykle występujących już od powierzchni terenu (wyrobisk pionowych, płytko położonych wyrobisk eksploatacyjnych i stref zruszenia struktury górotworu), zostają uruchomione jednak stosunkowo rzadko. Ten stan na ogół ulega diametralnej zmianie w sytuacji rozpoczęcia likwidacji systemu odwadniania kopalni i rozpoczęcia procesu zatapiania wyrobisk górniczych wodami z dopływu naturalnego. Wówczas w zasięgu leża depresji wywołanego procesem drenażu i odwadniania kopalni woda spiętrzająca się w zatapianych wyrobiskach górniczych tworzy zbiornik w wolnych przestrzeniach poeksploatacyjnych oraz w przestrzeniach międzyziarnowych skał otaczających wyrobiska górnicze. Skały pomimo „nabycia” pod wpływem procesu odwodnienia wysokich wartości parametrów wytrzymałościowych i poprawy jakości górotworu, pod wpływem procesu powtórnego nasycania wodą w czasie zatapiania kopalni znacząco tracą na wytrzymałości (Bukowska, 2009, 2012). Wzrasta ich odkształcalność i kohezja, maleje kąt tarcia wewnętrznego, a proces niszczenia skał zmienia się z kruchego na bardziej plastyczny. Sprzyja to ogólnemu obniżeniu stateczności górotworu wokół wyrobisk górniczych, a tym samym wokół płytko położonych pustek, skutkuje to także zmniejszeniem bezpieczeństwa powierzchni terenu pogórnich (Bukowska, Bukowski, 2023). Wraz z przybliżaniem się zwierciadła wody w zbiorniku zatapianej kopalni do powierzchni wzrasta prawdopodobieństwo wystąpienia skutków procesu zatapiania uwidoczniających się w postaci zapadlisk, co pozwala stwierdzić, że zatapianie kopalni sprzyja wzrostowi zagrożenia zapadliskowego.

Zagrożenie zapadliskowe stanowi ten rodzaj zagrożenia, który dotyczy każdej sfery działalności gospodarczej i bezpieczeństwa człowieka. Zagrożenie to jest najczęściej utożsamiane z terminem „stanu zagrożenia powszechnego”, co jest równoznaczne z naruszeniem „stanu bezpieczeństwa powszechnego”, który można tłumaczyć np. jako stan zapewniający ochronę życia i zdrowia obywateli oraz majątku narodowego przed skutkami klęsk żywiołowych i katastrof technicznych (*vide* Socha, 2020).

Pomimo stopniowego wygaszania, a raczej likwidacji kopalń w Polsce (proces pod nazwą „restrukturyzacji” górnictwa) i utworzenia systemu odwadniania kopalń likwidowanych (Wichur i in., 1996, 1997; Szczepański, 1998, 2003, 2005; Rogoż, 2004), którym zarządza Spółka Restrukturyzacji Kopalń S.A. (dalej SRK S.A.), już w latach 90. XX w. można było zaobserwować skutki zatopienia kopalń i zagrożenia powszechnego na małą skalę w niektórych obszarach GZW (Bukowski, Augustyniak, 2005). Wyniki tych obserwacji, choć słabo rozpowszechnione

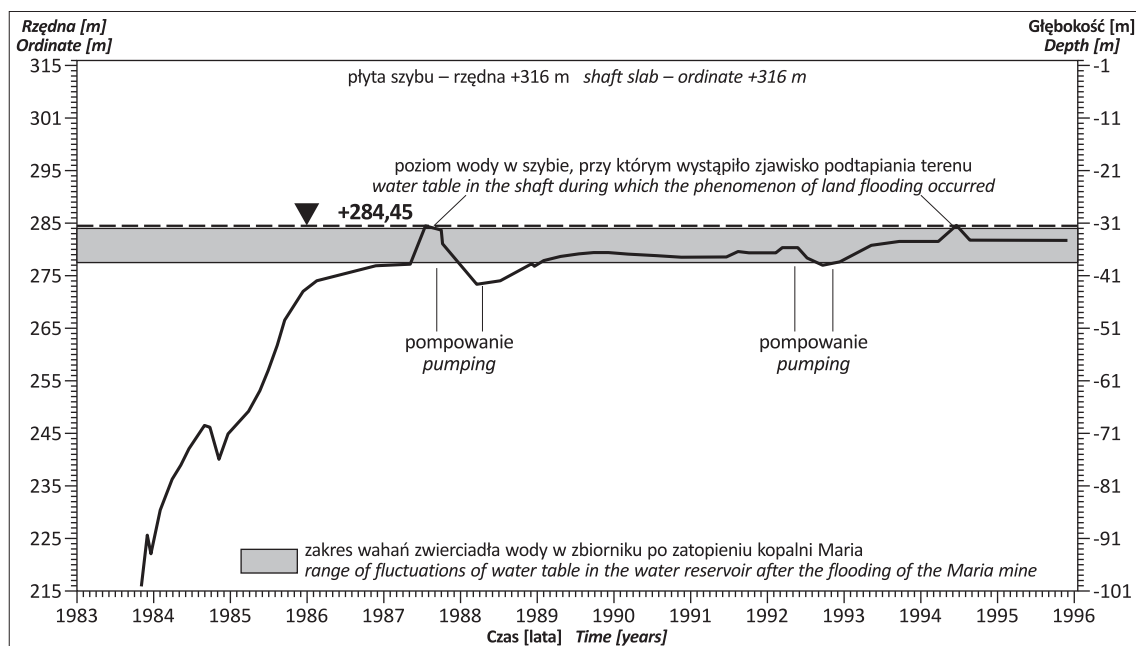
w literaturze fachowej, poprzedziły obserwacje poczynione podczas likwidacji kopalń dolnośląskich. Już na ich podstawie można było stwierdzić, że związek procesu zatapiania kopalń i zjawisk deformacyjnych o różnej skali i nasileniu jest bezsporny. W późniejszym planowaniu i zarządzaniu procesami likwidacji i zatapiania kopalń doświadczenia te nie stały się jednak przyczyną pozytywnej zmiany w planowaniu i prowadzeniu likwidacji kopalń. Konieczne jest bowiem rozumienie procesów i zjawisk towarzyszących zatapianiu kopalń oraz często zainicjowanych przez proces powtórnego nasycania wodą skał górotworu, co wymaga interdyscyplinarnego spojrzenia, z pogranicza geologii, hydrogeologii, geomechaniki i bezpieczeństwa. Niniejszy artykuł ma wskazać potrzebę szerokiego, interdyscyplinarnego i merytorycznie poprawnego spojrzenia na bezpieczeństwo powszechne na terenach pogórnich.

NAJWAŻNIEJSZE ZJAWISKA I PROCESY ZWIĄZANE Z ZATAPIANIEM KOPALNI WĘGLA KAMIENNEGO

Aby scharakteryzować procesy i zjawiska kluczowe dla możliwości wystąpienia zagrożeń, a tym samym do utraty stanu bezpieczeństwa powszechnego terenów pogórnich, należy wskazać co jest przyczyną ich wystąpienia. Proces likwidacji każdej kopalni w końcowym etapie jej istnienia rozpoczyna się po zakończeniu eksploatacji górniczej i przygotowaniu kopalni do fizycznej likwidacji. Ostatecznie likwidacja kopalni zmierza do wyrowadzenia na powierzchnię załóg górniczych i majątku przydatnego do dalszego zagospodarowania, a następnie do wyłączenia systemu odwadniania i spowodowania procesu samozatapiania wyrobisk górniczych wodami z dopływu naturalnego. Zmiany w zawodnieniu wyrobisk górniczych rozumiane jako dopływy wód oraz nagromadzenia wód w wyrobiskach górniczych zachodzące podczas i po zatopieniu kopalni likwidowanej prowadzą do wystąpienia różnych zjawisk, które są wprost wywołane przez gromadzącą się wodę lub są przez nią spotęgowane.

Głównym następstwem gromadzenia się wód w wyrobiskach górniczych i skałach górotworu w likwidowanej kopalni jest formowanie się nowego, zmiennego w czasie układu hydrodynamicznego. Zmienny stan hydrodynamiczny jest związany ze zjawiskami towarzyszącymi tworzeniu się rozległego zbiornika wodnego oraz zjawiskiem wypełniania wszystkich pustek poeksploatacyjnych i nasycania się wodą wolnych przestrzeni w obrębie skał górotworu, w ciągłym procesie tzw. piętrzenia wód w zrobach zatapianej kopalni. Proces piętrzenia wód postępuje do czasu przybliżenia się zwierciadła wody do powierzchni terenu i wypośrodkowania ciśnienia hydrostatycznego w zbiorniku zatapianej kopalni (poziomy wodonośne połączone hydraulicznie w wyniku destrukcyjnych wpływów eksploatacji górniczej) z ciśnieniem hydrostatycznym wód w otaczających go utworach wodonośnych (wyodrębnione poziomy wodonośne w peryferyjnych rejonach położonych poza wyrobiskami górniczymi). Stabilizacja zwierciadła wody w zbiorniku, w zatapianych wyrobiskach górniczych i ich otoczeniu, zachodzi do czasu, gdy zwierciadło wody przestanie się spiętrzać i zatrzyma się na poziomie podlegającym już tylko sezonowym wahaniom położenia (ryc. 1).

Następstwem spiętrzenia wód i przyrostów ciśnienia wody w zbiorniku, oprócz zmian hydrodynamicznych i zmian naprężeń w górotworze, są zjawiska związane



Ryc. 1. Zmiany położenia zwierciadła wody po wyłączeniu odwadniania w byłej kopalni *Maria* w okresie spiętrzania wody oraz po powrocie zwierciadła wody do stanu naturalnego – na poziomie wahań naturalnych (wg Bukowskiego, Augustyniaka, 2005)

Fig. 1. Changes in the water table level after decommission of drainage system in the former *Maria* mine during the period of water damming and after the water table returning to its natural state – to the range of natural fluctuations (acc. to Bukowski, Augustyniak, 2005)

z wypychaniem gazów kopalnianych (najczęściej metanu) na powierzchnię. Proces ten jest związany z wypychaniem gazów z odwodnionych i niezawodnionych w okresie działalności kopalni zrobów i wyrobisk górniczych oraz z por i szczelin w skałach górotworu otaczającego wyrobiska górnicze. Proces ten zachodzi przy zmniejszającej się w czasie, choć istniejącej desorpcji gazów (metanu) z pokładów węgla. Procesy wypychania gazów kopalnianych ku powierzchni mają istotne znaczenie zwłaszcza tam, gdzie zatapianie kopalni zachodzi na terenie hydrogeologicznie odkrytym i pod obszarami zurbanizowanymi, uznanymi za bezpieczne po zaniechaniu działalności górniczej i zlikwidowaniu dawnego górnictwa. Zjawiska wnikania gazów kopalnianych do obiektów kubaturowych na powierzchni GZW były obserwowane, lecz stanowią poboczny efekt zatapiania kopalni, który może być groźny, gdy zatapiane są najniższe położone wyrobiska górnicze, w obrębie pokładów o wysokiej metanonośności. Rozwój tych zjawisk w miarę piętrzenia wód w zatapianej kopalni ma jednak tendencję malejącą w związku z ubytkiem położonych powyżej zwierciadła wody w zbiorniku, przestrzeni pierwotnie gromadzących gazy kopalniane – głównie metan. Pomniejszanie się pojemności wolnych przestrzeni zawierających gaz kopalniany następuje wraz z powiększaniem się zbiornika wodnego i stopniowym zajmowaniem ich przez wodę podczas procesu zatapiania kopalni. Ubytek ten następuje jednocześnie z zatapianiem kolejnych pokładów metanowych, które występują zwykle najgłębiej. Zasilanie w metan zrobów poeksploatacyjnych położonych nad zwierciadłem wody zbiornika maleje wraz z powiększaniem się zbiornika, spiętrzaniem wód i wzrostem w nim ciśnienia wody, co blokuje rozwój procesów uwalniania się metanu z resztkowych partii pokładów węgla i ze zrobów po eksploatacji górniczej pokładów metanowych. Wypychanie gazów kopalnianych odnosi się także do skoncentrowa-

nych nad zwierciadłem wody innych gazów, w tym tzw. inertnych, których wpływ na powierzchnię może także być zaobserwowany, lecz w zaawansowanej lub końcowej fazie piętrzenia wody w zrobach. Zwykle dotyczy to wpływu gazów kopalnianych, lokalnie i w specyficznych uwarunkowaniach, które wynikają z budowy geologicznej odkrycia serii złożowej – porowatego, przepuszczalnego górotworu, lokalnie odwodnionego z wody wolnej. Połączenia stwarzające dogodne warunki dla ucieczek gazów kopalnianych z wyrobisk do powietrza atmosferycznego występują zwłaszcza w rejonach łączności powierzchni z wyrobiskami górniczymi za pomocą wyrobisk pochyłych i pionowych oraz w wyniku powstania stref destrukcji górotworu, manifestujących się zwłaszcza wystąpieniem stref zapadliskowych i progów – uskoków poeksploatacyjnych widocznych na powierzchni terenu.

Z uwagi na proces piętrzenia wody w kopalniach, w których zlikwidowano system odwadniania, kluczowe znaczenie ma zachodzący w zasięgu leja depresji proces wypełniania się wodą wyrobisk górniczych oraz nasycania się nią skał. Nasycanie wodą skał podczas spiętrzania wód w tworzącym się zbiorniku zachodzi w różnym tempie, głównie z wykorzystaniem przestrzeni ponadkapilarnych w wyrobiskach górniczych i otaczających je skałach wodochłonnych. W procesie nasycania wodą skał istotną rolę odgrywają także przestrzenie i procesy kapilarne. W efekcie końcowym powolne piętrzenie wód w zrobach i wyrobiskach zatapianej kopalni prowadzi do wystąpienia stanu saturacji skał – pełnego nasycenia wodą. W wyniku dalszego piętrzenia wody w zbiorniku zatapianej kopalni efektem nasycenia pustek w wyrobiskach i skałach je otaczających oraz narastania ciśnienia jest proces zmian naprężeń efektywnych w skałach górotworu. Proces ten inicjuje słabo rozpoznany, choć obserwowany pomiarami przemieszczeń

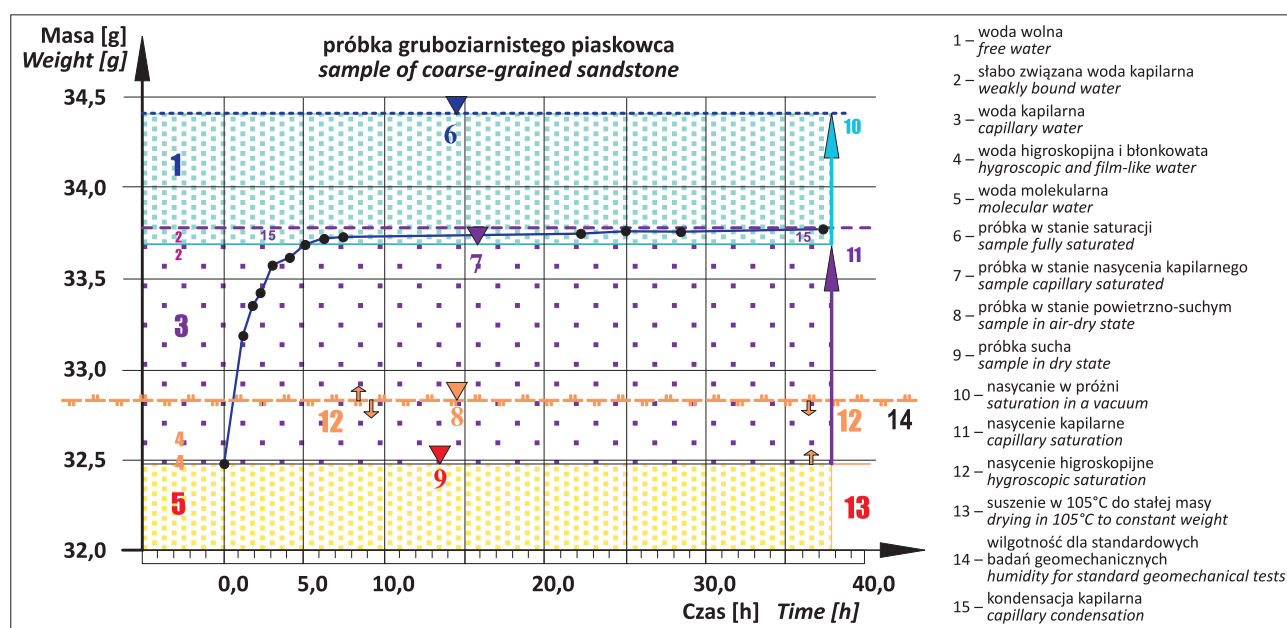
powierzchni terenu, efekt wypiętrzania powierzchni, a także nasilenie się występowania obserwowanych w niektórych zagłębieniach węglowych Europy zjawisk parasejsmicznych o małej energii wstrząsu. Zarówno nieznaczne wypiętrzanie górotworu (zwykle kilkanaście do kilkudziesięciu cm), jak i niskoenergetyczne wstrząsy górotworu (mieralne, lecz niewyczuwalne) spowodowane procesem zatapiania wyrobisk górniczych, mogą prowadzić do naruszania stanu równowagi górotworu otaczającego płytkie wyrobiska górnicze dawno zlikwidowanych kopalń. Reaktywacja zrobów i starych płytko usytuowanych wyrobisk o znaczących wymiarach i utrzymującej się znacznej kubaturze pustych przestrzeni, spowodowana wypiętrzaniem górotworu oraz parasejsmiczną aktywnością górotworu, nie została jak dotąd jednoznacznie sparametryzowana i jednoznacznie powiązana z wystąpieniem zjawisk świadczących o zagrożeniu powszechnym – zapadliskowym. W Polsce, jak dotychczas, zjawiska takie wystąpiły na terenie byłej kopalni *Maria* (obszar byłej KWK *Grodziec*) oraz ostatnio w byłej kopalni *Siersza*.

PROCES NASYCANIA WODĄ SKAŁ W OTOCZENIU WYROBISK GÓRNICZYCH A DEFORMACJE POWIERZCHNI TERENU POGÓRNICZEGO

Doniesienia o wpływie procesu zatapiania wyrobisk górniczych kopalń na powierzchnię w GZW, jak np. zaprezentowane przez Mnicha (1995) w odniesieniu do deformacji ciągłych (obniżenia powierzchni terenu), były rzadko publikowane, nie zostały dostrzeżone, ani nie były szerzej komentowane. Elementy zmiany stanu bezpieczeństwa powszechnego na terenach górniczych, a ostatnio pogórnich w GZW dostrzeżono i opisano na terenie byłej kopalni *Maria* (Bukowski, Augustyniak, 2005). Na przykładzie terenu tej kopalni wskazano przyczyny i skalę zagrożeń zmieniających stan bezpieczeństwa powszechnego w zwią-

ku z występowaniem deformacji na powierzchni terenu. Ustalono wówczas związek skutkowo-przyczynowy likwidacji odwadniania i zatapiania płytko położonych wyrobisk górniczych byłej kopalni *Maria* z lokalizacją i czasem wystąpienia zjawisk zapadliskowych i zalewisk na powierzchni terenu. W latach 90. XX w. i w pierwszej dekadzie XXI w. powszechny był jednak pogląd, że likwidacja kopalń jest głównie procesem techniczno-górnym, który nie powinien w sposób zasadniczy wpływać na stan zagrożeń na terenach pogórnich. Stąd poza skutkami likwidacji kopalń dla działań górniczych, innych skutków w tym hydrogeologicznych konsekwencji tego procesu jako kluczowych zagadnień dla planowania działań likwidacyjnych, na ogół nie dostrzegano i szerzej nie rozpatrywano. Tymczasem jednym z zasadniczych efektów zatapiania kopalni jest nasycanie skał górotworu wodą, który to proces przynosi szeroką gamę skutków dla bezpieczeństwa i utrzymania wyrobisk górniczych, a tym samym dla bezpieczeństwa wodnego (zagrożeń wodnych dla kopalń czynnych) i bezpieczeństwa powszechnego (dla powierzchni). Nasycanie skał wodą, zwłaszcza tych położonych na granicy zwierciadła wody w tworzonym zbiorniku i w strefie oddziaływania wilgoci pochodzącej pierwotnie z atmosfery kopalnianej, a następnie w wyniku procesów kapilarnych (ryc. 2), prowadzi do istotnych zmian właściwości wytrzymałościowo-odkształceniowych skał.

Znaczenie zmiennych stanów wilgotności skał w kopalni zlikwidowanej może się ujawnić w szczególności w zachowaniu się zrobów poeksploatacyjnych, które znajdują się w strefie wahań zwierciadła wody w zbiorniku zlikwidowanej kopalni (patrz ryc. 1, Bukowski, Augustyniak, 2005; Bukowski, Bukowska, 2005; Bukowski i in., 2005, 2007). Na rycinie 2 przedstawiono typowy przebieg nasycania kapilarnego gruboziarnistego piaskowca karbońskiego pochodzącego z górnośląskiej serii piaskowcowej (GSP), który wskazuje, że czas potrzebny do osiągnięcia przez próbkę skały (badano próbkę o wysokości ok. 4 cm) stanu



Ryc. 2. Przykładowy przebieg procesu kapilarnego nasycania próbki zwięzłego (do słabozwięzłego), gruboziarnistego piaskowca kwarcowego o spoiwie żelazisto-kwarcowym z nielicznymi wtrąceniami węgla (arenit kwarcowy), pochodzącego z górnośląskiej serii piaskowcowej GZW (na podstawie Bukowskiego, 1999)

Fig. 2. An exemplary course of the capillary saturation process of a sample of compact (to slightly compact), coarse-grained quartz sandstone with a ferro-quartz concrete with small inclusions of coal (quartz arenite), originating from the Upper Silesian Sandstone Series of USC (based on Bukowski, 1999)

nasylenia kapilarnego wynosi do ok. 5 godz. Czas doprowadzenia skały do stanu saturacji jest nieco dłuższy i w warunkach laboratoryjnych zależy od przyjętej procedury badań (metoda próżniowa), a w warunkach polowych – od szybkości spiętrzania się wody i tempa nasylenia się skał w wyniku oddziaływania narastającego ciśnienia hydrostatycznego (wtłaczania wody w pory skał wraz z narastaniem ciśnienia wody w zbiorniku). Czasy te dla różnych typów skał z różnych serii karbonu produktywnego są zróżnicowane. Dla próbek piaskowców i zlepieńców karbońskich o wysokości do 5 cm w kształcie prostopadła lub walca o smukłości 1 przeciętnie wynoszą od ok. 1–2 godz. do kilkunastu godz. Przebieg nasylenia wodą przykładowej próbki skalnej (ryc. 2) wskazuje także, że w pewnej odległości od zwierciadła wody w zbiorniku, w obrębie zruszonego wpływami eksploatacji górniczej górotworu oraz w zrobach położonych nad zwierciadłem wody występuje strefa podwyższonej wilgotności. W zakresie występowania tej strefy, na granicy i powyżej zwierciadła wody dochodzi do najbardziej intensywnych zmian wytrzymałości i odkształcalności skał (Bukowski i in., 2005, 2003–2006, 2007). Zmiany te są szczególnie intensywne w górotworze, w którym skały z otoczenia wyrobisk przeszły w stan pozniszczeniowy, zwłaszcza w zrobach i w zasięgu strefy szczelin nadzawałowych nad polami pokładów węgla, wyeksploatowanymi systemem ścianowym z zawałem skał stropowych. W takim przypadku spiętrzana w zrobach woda generalnie przynosi dodatkowo zwiększenie efektu obniżenia wytrzymałości skał i zwiększenia ich odkształcalności.

Proces zmian tych właściwości zachodzi w różnym czasie, zazwyczaj stosunkowo szybko i jednocześnie z postępem procesu zatapiania wyrobisk górniczych. Proces zatapiania wyrobisk górniczych zachodzi na ogół w tempie od kilku do kilkunastu, rzadziej do kilkudziesięciu i więcej cm na dobę. Szybkość zmian zależy od aktualnego w kopalni stadium procesu zatapiania (początek, zaawansowanie, koniec). Zakres zmian właściwości skał jest różny i w górotworze karbońskim jest silnie powiązany z warunkami, w których skała została uformowana i nabyła pierwotne właściwości, następnie zmienione wskutek drenażu górniczego. Zakres zmian różni się w zależności od typu skały, jej wieku, i głębokości (stopnia skonsolidowania), na której występuje (Bukowski; Bukowska, 2005; Bukowska, 2009, 2012).

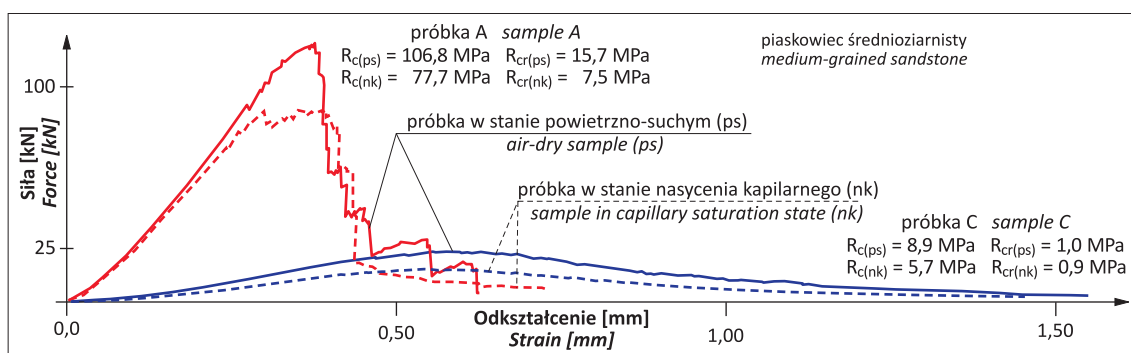
Tempo zatapiania wyrobisk górniczych i zmian właściwości skał w strefie bliskiej aktualnemu położeniu zwierciadła wody w zbiorniku zależy od wielu czynników i warunkowań, lecz przy relatywnie dużej i szybkiej zmianie właściwości skał na granicy zwierciadła wody w zbiorniku, zmiany nacisku pionowego górotworu zruszonego wpływami eksploatacji górniczej zachodzą stosunkowo powoli i w sposób słabo zauważalny. Jest bezsporne, że szybkiej zmianie wytrzymałości skały nasyconej wodą nie towarzyszy równie szybki ubytek pionowego ciśnienia górotworu, który można uznać za stały przy relacji np. głębokości liczonej w setkach metrów do wysokości strefy o zmienionej wilgotności skał (rzędu dziesiątek cm do kilku-, kilkunastu m). Powoduje to przyspieszenie procesów destrukcji skał w strefie wilgotnej w sąsiedztwie zwierciadła wody w zbiorniku, zwłaszcza w zruszonej części górotworu i w zrobach, a zatem sprzyja reaktywacji zrobów (Bukowski i in., 2005, 2007). Oddziaływanie wody na cechy wytrzymałościowe i odkształceniowe skał ma kluczowe znaczenie dla stateczności górotworu wokół prze-

strzeni poeksploatacyjnych wypełnianych wodą w procesie zatapiania kopalni, a tym samym w procesie osłabiania skał prowadzącym do wzrostu zagrożenia reaktywacją zrobów poeksploatacyjnych i zagrożenia zapadliskowego (Bukowska, Bukowski, 2023).

Zmiany parametrów opisujących właściwości skał pod wpływem procesów nasylenia wodą były od 2002 r. przedmiotem licznych publikacji z zakresu geomechaniki górniczej i hydrogeologii górniczej (Bukowska, Kidybiński, 2002; Bukowski, Bukowska, 2005). Prowadząc badania naukowe nad wpływem wody na właściwości skał karbońskich, stwierdzono, że pomimo wysokich wytrzymałości skał serii brzeżnej procesy cykliczne nasylenia i odwadniania otoczenia skalnego płytkich wyrobisk górniczych mogą prowadzić do znacznego osłabienia utworów karbońskich w strefie przystropowej i do uruchomienia procesów rozmakania i wymywania luźnych utworów nadkładu w strefach załamywania się stropu wyrobisk górniczych oraz zruszenia górotworu i naruszenia podporności półki stropowej nad wyrobiskami górniczymi. Możliwość taka pojawia się zwłaszcza w odniesieniu do byłej kopalni *Siersza*, w której pokłady położone najwyżej to pokłady położone głównie wśród bardzo słabych, nawet w stanie odwodnionym, piaskowców warstw łaziskich – krakowskiej serii piaskowcowej. Utwory te charakteryzują się małą lub bardzo małą, jak na skały w GZW, wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie, a pod wpływem wody mogą tracić nawet kilkadziesiąt procent pierwotnej wytrzymałości na ściskanie (ryc. 3, próbka C, wg Bukowskiego, Bukowskiej, 2005).

Na przykładowym wykresie ilustrującym przebieg niszczenia mocnej (A) i słabej (C) próbki skalnej (ryc. 3 – wg Bukowskiego, Bukowskiej, 2005), zilustrowano różnice w wytrzymałości i odkształcalności pomiędzy piaskowcami pochodzącymi z otoczenia, na ogół głęboko położonych, pokładów węgla serii paralicznej (próbka A), a piaskowcami pochodzącymi z otoczenia płytko zalegających pokładów węgla krakowskiej serii piaskowcowej (próbka C).

Zmianę w przebiegu niszczenia wyciętych z tej samej bryły próbek skał pobranych z każdej ze wskazanych serii obserwowano podczas eksperymentu laboratoryjnego w serwosterowalnej, tzw. sztywnej maszynie wytrzymałościowej. Przebieg niszczenia próbki w stanie powietrzno-suchym zilustrowano linią ciągłą, a w stanie nasylenia kapilarnego – linią przerywaną. Wpływ wilgotności skał na zmianę wytrzymałości obu próbek oraz na zmiany odkształcalności, jak również na charakter niszczenia próbki A, o wysokiej wytrzymałości na ściskanie i kruchości, manifestuje się przesunięciem krzywej niszczenia próbki nasyconej wodą w stosunku do krzywej w stanie powietrzno-suchym. Przeważnie występuje przesunięcie fragmentu charakteryzującego wytrzymałość krytyczną, w kierunku mniejszych wartości naprężenia krytycznego – w dół, które świadczy o zmniejszeniu się wytrzymałości skały nasyconej wodą. Przesunięcie krzywej niszczenia próbki w obu kierunkach w poziomie może występować zarówno we wznoszącej, jak i opadającej części wykresu. Kształt krzywej niszczenia próbki A wskazuje ponadto na przebieg kruchości niszczenia w części pozniszczeniowej o większych odkształceniach w fazie pozniszczeniowej (w schodzącej części krzywej – odcinkowe, skokowe wzrosty naprężeń a następnie gwałtowne spadki naprężenia, przy małym odkształceniu). Ta faza niszczenia próbki trwa aż do osiągnięcia w części pokrytycznej tzw. wytrzy-



Ryc. 3. Porównanie wpływu nasycenia kapilarnego piaskowców karbońskich różnych serii litostratygicznych (próbka A – seria paraliczna, próbka C – krakowska seria piaskowcowa) na wytrzymałość na ściskanie ($R_{c(ps)}$ – w stanie powietrzno-suchym, $R_{c(nk)}$ – w stanie nasycenia kapilarnego), wytrzymałość tzw. resztkową ($R_{cr(ps)}$ – w stanie powietrzno-suchym, $R_{cr(nk)}$ – w stanie nasycenia kapilarnego) oraz przebieg niszczenia próbki skalnej (rysunek wg Bukowskiego, Bukowskiej, 2005); wykres w układzie: siła (kN) – odkształcenie (mm)

Fig. 3. Comparison of the influence of capillary saturation of Carboniferous sandstones of different lithostratigraphic series (sample A – Paralic Series, sample C – Cracow Sandstone Series) on compressive strength ($R_{c(ps)}$ – in the air-dry state, $R_{c(nk)}$ – in the capillary saturation state), on the so-called residual strength ($R_{cr(ps)}$ – in the air-dry state, $R_{cr(nk)}$ – in the capillary saturation state) and on deformability and course of destruction of the rock sample (figure acc. to Bukowski, Bukowska, 2005); diagram in the system: force (kN) – deformation (mm)

małości resztkowej (połogo położona końcowa część krzywej niszczenia próbki).

Wytrzymałość na ściskanie próbki A w stanie nasycenia kapilarnego zostaje zmniejszona do 72,5% wytrzymałości wykazywanej w stanie powietrzno-suchym. Natomiast wytrzymałość resztkowa próbki w stanie nasycenia kapilarnego do wartości 47,8% w stosunku do wytrzymałości resztkowej próbki w stanie powietrzno-suchym. Należy zaznaczyć, że pomimo trudności w precyzyjnym wyznaczeniu w badaniu laboratoryjnym wytrzymałości resztkowej, wytrzymałość ta dla skał mocnych nadal jest wysoka (ryc. 3, $R_{cr(ps)} = 15,7$ MPa i $R_{cr(nk)} = 7,5$ MPa) i przy gęstości skał rzędu $2,5 \text{ g/cm}^3$ może znacznie przewyższać ewentualny nacisk pionowy skał położonych nad stropem wyrobisk górniczych na głębokości $H < 200$ m.

Krzywe uzyskane w teście niszczenia piaskowca krakowskiej serii piaskowcowej (KSP – próbka C) nawet dla stanu powietrzno-suchego wskazują na małą wytrzymałość i bardziej plastyczny charakter niszczenia próbki skalnej. Po nasyceniu kapilarnym wodą próbki badanej znacząco zmniejsza się jej wytrzymałość, a charakter niszczenia próbki jeszcze bardziej przybliża się do plastycznego. Próbka C z serii KSP o bardzo małej wytrzymałości na ściskanie, nawet w stanie powietrzno-suchym (8,9 MPa), po jej nasyceniu wodą do stanu wilgotności kapilarnej uzyskuje zaledwie 64% (5,7 MPa) wytrzymałości w stosunku do próbki w stanie powietrzno-suchym. Natomiast wytrzymałości resztkowe tak słabych skał, niezależnie od stanu wilgotności, nie różnią się między sobą w sposób istotny (różnica 10% – ryc. 3, $R_{cr(ps)} = 1,0$ MPa i $R_{cr(nk)} = 0,9$ MPa). Pomimo ogólnie słabych skał występujących w serii KSP, bardzo dużą zmianę w ich wytrzymałości przekraczającą 80% można zaobserwować pomiędzy skałą w stanie powietrzno-suchym a stanem kapilarnego nasycenia wodą. W przypadku przykładowej próbki C wytrzymałość resztkowa w stanie powietrzno-suchym stanowi zaledwie 11% (1,0 MPa) wytrzymałości krytycznej. W stanie nasycenia kapilarnego wytrzymałość resztkowa stanowi 16% (0,9 MPa) maksymalnej wytrzymałości krytycznej (ryc. 3 – 5,7 MPa).

Tak duża utrata wytrzymałości (o ponad 35%) w wyniku nasycenia skał górotworu wodą (zmiana ze stanu po-

wietrzno-suchego i $R_{c(ps)}$ do stanu nasycenia kapilarnego $R_{c(nk)}$) może zachodzić w różnym tempie. Analizując tempo procesu zatapiania kopalni (ryc. 1) i tempo laboratoryjnego naturalnego podsiąkania skał wodą (ryc. 2), prawdopodobne jest, że w skałach grubookruchowych (piaskowce, żwirowce KSP), położonych płytko pod powierzchnią terenu, proces osłabiania skał wodą może zachodzić w tempie zgodnym z tempem zatapiania kopalni. Tak znacząca zmiana wytrzymałości skał powinna być rozpatrywana jako szybkie zmniejszanie się wytrzymałości skały w stanie powietrzno-suchym (odwodnionym), przy przejściu skały w procesie zatapiania kopalni do wytrzymałości w stanie nasycenia kapilarnego, a następnie stanu saturacji. To już w stanie wilgotności kapilarnej, powyżej zwierciadła wody w zbiorniku zatapianej kopalni dochodzi do zachwiania stanu równowagi pomiędzy wytrzymałością i ciśnieniem pionowym skał górotworu położonych wyżej oraz do zainicjowania procesów niszczenia skał (stan wyężenia górotworu). Następnie, już po zniszczeniu struktury skał budujących filar, płot lub zroby, zmiany wytrzymałości mogą zmierzać do stanu wytrzymałości resztkowej i resztkowej podporności górotworu. Zmniejszenie wytrzymałości skał górotworu wokół wyrobisk, w rejonie płytko pod powierzchnią terenu położonych filarach, zrobach i płotach skalnych, w trakcie ich nasycania wodą w procesie zatapiania kopalni, w głównym stopniu może odpowiadać za stateczność górotworu wokół wyrobisk. Za dalszą podporność skał wyrobisk górniczych w strefie położonej na granicy zwierciadła wody w zbiorniku, po zniszczeniu ich struktury, odpowiada już wytrzymałość resztkowa, zwłaszcza w stanie nasycenia wodą.

Nasilenie się ruchów powierzchni terenu w byłej KWK *Siersza* zaobserwowano w 2021 r. już przy rzędnej zwierciadła wody od ok. +300 do ok. +305 m n.p.m. (głębokość ok. 50 m). Zwierciadło wody w zbiorniku w zrobach w byłej KWK *Siersza* jest obecnie utrzymywane na rzędnej z zakresu +308 ÷ +310 m n.p.m. (głębokość ok. 20–40 m). Zakładając gęstość skał, jak wskazano wyżej, ich wytrzymałość resztkową po przejściu górotworu w stan wyężenia o wartości $R_{cr(nk)} = 0,9$ MPa, można założyć, że do przekroczenia tej wartości wytrzymałości resztkowej (podporności późniszczeniowej) oraz spowodowania dalszej destruk-

cji górotworu w warunkach oddziaływania procesu nasycenia kapilarnego skał, wystarczające może być obciążenie stropu płytkich wyrobisk nadkładem skał o miąższości już tylko ok. 35 m. Warto zwrócić uwagę na czas oddziaływania wody na skały w okresie przemieszczenia się zwierciadła wody zaledwie o ok. 3 m w czasie 8–9 miesięcy (od czasu medialnie nagłośnionego zapadliska na cmentarzu w Trzebini do czasu uruchomienia pomp).

Na przykładzie jednostkowego wyniku badania próbek piaskowców o skrajnie różnym przebiegu krzywych niszczenia (ryc. 3) można zauważyć różne zachowanie się skał karbońskich z GZW pod wpływem nacisku pionowego. Zatem, jeśli skały młodsze otaczające węglowe wyrobiska górnicze w GZW, usytuowane na małej głębokości, zostały sklasyfikowane jako skały o bardzo małej wytrzymałości w stanie powietrzno-suchym jak na warunki w GZW (Bukowska, 2012), a pomimo tego nacisk pionowy utworów położonych powyżej stropu wyrobisk nie spowodował zawalenia tych wyrobisk, to oznacza, że nie doszło jeszcze do zachwiania stanu równowagi między siłą niszczącą (naciśkiem pionowym), a ich wytrzymałością krytyczną. Warunek utrzymania tego stanu równowagi najczęściej istnieje nawet w sytuacji, gdy górotwór wokół wyrobisk (np. płyty i półki skalne, filary w systemie filarowo-komorowym eksploatacji) przeszedł w wyniku oddziaływania eksploatacji górniczej (także w wyniku oddziaływania tej prowadzonej głębiej pod płytko usytuowanymi wyrobiskami) w stan wyżeżenia (stan pozniszczeniowy o resztkowej podporności). W przypadku zaś górotworu o wysokiej pierwotnej wytrzymałości, jaką ilustruje krzywa niszczenia próbki A, wytrzymałość ta nawet w stanie pozniszczeniowym może znacząco przewyższać wartość nacisku pionowego, co oznacza wysoką stateczność górotworu karbońskiego i utrzymywanie się w nim pustki do czasu wystąpienia impulsu dodatkowego. Takim impulsem może być np. oddziaływanie wstrząsów i wypiętrzanie górotworu, przy oddziaływaniu wody, która ma wpływ na zmniejszenie się wytrzymałości skał i tarcie między blokami skalnymi, a zatem ma wpływ na ich przemieszczanie się – reaktywację zrobów. Proces reaktywacyjny może z kolei nasilić w zrobach wpływ spowodowany prowadzoną niżej eksploatacją górniczą.

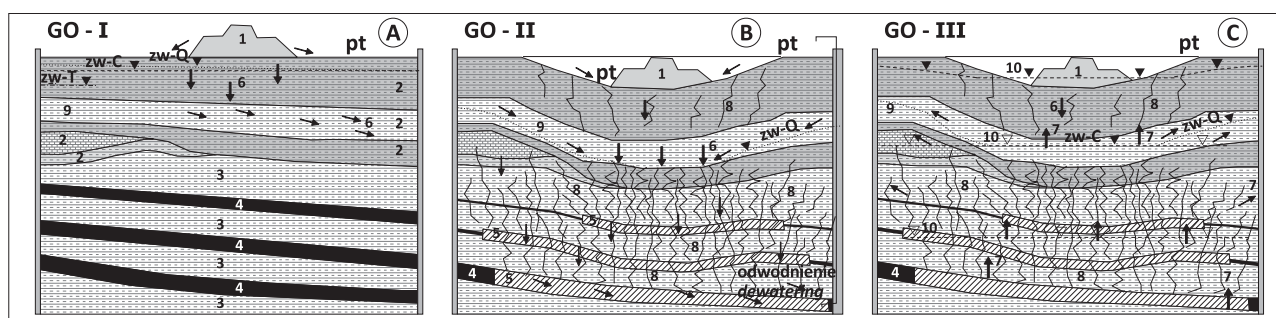
W sytuacji powtórnego zawodnienia płytko usytuowanych wyrobisk górniczych i skał górotworu otaczającego o wysokiej wytrzymałości kluczową rolę w wystąpieniu procesu reaktywacji zrobów oraz inicjacji procesów zapadliskowych odgrywa stopień zruszenia i deformacje przypowierzchniowych warstw górotworu. Wpływ procesu zmniejszania się pod wpływem wody wytrzymałości skał zaznaczy się w mniejszym stopniu, ponieważ skały starsze o dużej pierwotnej wytrzymałości nawet po ich zruszeniu posiadają i tak dużą wytrzymałość resztkową w obszarze pozniszczeniowym (Bukowska, 2012). Wytrzymałość resztkowa takich skał na ogół znacznie przewyższa siłę nacisku pionowego na strop płytkich wyrobisk górniczych, wytworzoną przez niezbyt gruby nadkład skał górotworu, co zasygnalizowano wyżej. Stąd na ogół nie występują warunki do przekroczenia wytrzymałości krytycznej skał stropowych płytkich wyrobisk górniczych, chyba że zaznaczy się wpływ innego czynnika lub procesu, jak np. czasu, wody oraz procesów erozji i sufozji na drodze przepływu – infiltracji wód z powierzchni, lub nasiąkania utworów nadkładu wodą i dodatkowego obciążenia stropu pustki.

Całkowicie odmienna sytuacja dotyczy kopalń, na terenach których występują płytko położone wyrobiska górnicze w otoczeniu skał młodszych serii karbońskich – krakow-

skiej serii piaskowcowej (KSP) (głównie piaskowców – 80–90% udziału w profilu), o małej lub bardzo małej wytrzymałości na ściskanie. Wówczas skały budujące strop płytkich wyrobisk górniczych pozostają w stanie równowagi nietrwałej – na granicy stateczności, co w przybliżeniu odpowiada zrównaniu się nacisku pionowego z wytrzymałością półki stropowej wyrobisk. Każdy dodatkowy impuls, który może prowadzić nawet do niewielkiej dodatkowej destrukcji calizny skalnej, zwłaszcza szybko zachodzące, powtórne osłabienie wodą skał ociosów wyrobisk, podstawy filara i półki stropowej (nawet o kilkadziesiąt % w stosunku do wytrzymałości maksymalnej – krytycznej, ryc. 3), przy tej samej wartości nacisku pionowego, całkowicie zmienia warunek stateczności górotworu. Nawodnienie skał w procesie piętrzenia wody w płytkich wyrobiskach górniczych i spowodowana tym procesem utrata wytrzymałości skał w stosunku do wytrzymałości charakterystycznej dla stanu powietrzno-suchego staje się bezpośrednią przyczyną utraty stateczności przez górotwór otaczający pustkę – wyrobisko. W warunkach istnienia wyrobiska w otoczeniu górotworu „słabego”, jak na warunki w GZW, i odkształcalnego pod wpływem wody, dochodzi do odkształceń inicjujących załamanie się półki stropowej i do przemieszczenia się skał położonych nad stropem wyrobiska do wnętrza pustki poeksploatacyjnej. Wówczas w sposób dynamiczny dochodzi do powstania zapadliska lub w sposób o zmiennej dynamice (początkowo powolnie, a następnie w sposób przyspieszony). Po załamaniu się półki skał karbońskich i dalszego spiętrzania wód, zapadlisko powstaje na bazie pustki jako wynik stopniowego wymywania materiału skalnego w nadkładzie skał zwięzłych z przemieszczaniem się lub rozszerzaniem się pustki w sposób utajony, do czasu gwałtownego powstania zapadliska na powierzchni w końcowej fazie jego tworzenia się.

Zmiana wytrzymałości skał pod wpływem wody ma znaczenie dla zachowania stateczności górotworu otaczającego nie tylko pustki uformowane w obrębie płytkich wyrobisk i zrobów, ale też na większych głębokościach. W zależności od wzajemnej relacji wytrzymałości skał otaczających wyrobiska i budujących – wypełniających przestrzeń zrobową, oraz ciśnienia pionowego na danej głębokości w różnym tempie może następować proces zaciskania się przestrzeni zrobowych lub może nie dochodzić do ich zaciskania w stopniu przewidywanym. Ma to bezpośrednie przełożenie na trafność prognoz hydrogeologicznych, zwłaszcza w odniesieniu do podziemnych zbiorników wód dołowych, ustalania parametrów odwadniania kopalń systemem głębinowym i ostatecznie prognoz przebiegu procesu i czasu zatapiania kopalń (Bukowski i in., 2005, 2003–2006, 2007). Stosunkowo mała wytrzymałość skał i duży jej ubytek w warunkach nasycenia wodą wskazuje na możliwe zachowanie się skał budujących zawał poeksploatacyjny i strefę zruszenia górotworu, poddanych ustalonymu naciskowi pionowemu warstw nadległych, tym samym na możliwość reaktywacji zrobów w sekwencji pokładów węgla w profilu pionowym, a położonych pomiędzy aktualnym położeniem zwierciadła wody a powierzchnią terenu.

Z przeprowadzonych po 2000 r. w GIG badań geomechanicznych wynika, że zapadliska na obszarze kopalni *Siersza* mogły się zacząć rozwijać już w czasie, gdy podsiąkanie kapilarne pod najwyżej usytuowanymi wyrobiskami między zwierciadłem wody a stropem karbonu spowodowało obniżenie realnych wartości wytrzymałościowych



Ryc. 4. Geotypy obszarowe jako pierwszy etap selekcji w ocenie PWP i ocenie ryzyka dla zagrożenia wód podziemnych (vide Bukowski i in., 2020). **A** – geotyp I (GO-I): obszary poza wpływem górnictwa, **B** – geotyp II (GO-II): obszary pod wpływem działalności górniczej, **C** – geotyp III (GO-III): obszary pod wpływem likwidacji i zatapiania kopalń, gdzie: pt – pierwotna i obniżona powierzchnia terenu, 1 – ognisko zanieczyszczenia wód (np. zwałowisko odpadów), 2 – zawodnione nienaruszone utwory pokrywające złożę, 3 – nienaruszone skały płonne złoża, 4 – nienaruszone pokłady przewidziane do eksploatacji, 5 – zroby poeksploatacyjne, wyrobiska, 6 – kierunki infiltracji, przepływu/filtracji, 7 – kierunki zmian w położeniu zwierciadła wody podczas zatapiania kopalni, 8 – górotwór zruszony ze szczelinami i efektami destrukcji pod wpływem eksploatacji górniczej, 9 – utwory luźne, 10 – zwierciadło wody w zatapianej kopalni

Fig. 4. Area geotypes as the first stage of selection in GVP assessment and risk assessment for groundwater threats (see: Bukowski et al., 2020). **A** – geotype I (GO-I): areas beyond the influence of mining, **B** – geotype II (GO-II): areas under the influence of mining activities, **C** – geotype III (GO-III): areas under the influence of mine closure and flooding, where: pt – original and lowered land surface, 1 – water pollution sources (e.g. waste dump), 2 – water-saturated, intact formations covering the deposit, 3 – intact barren rocks of the deposit, 4 – intact seams intended for exploitation, 5 – post-mining goafs, workings, 6 – directions of infiltration, flow/filtration, 7 – directions of changes in the water table level during mine flooding, 8 – rock mass with cracks and destruction effects caused by mining, 9 – loose formations, 10 – water table in the flooded mine

górotworu zdeformowanego wielokrotnymi wpływami eksploatacji górniczej na poziomie spągu płytko położonych wyrobisk i u podstawy filarów pozostałych po filarowo-komorowym systemie eksploatacji górniczej (Bukowski, Bukowska, 2012; Bukowska, Bukowski, 2023).

Tak duży stopień skomplikowania i powiązania procesów naturalnych z tymi zainicjowanymi nawet przeszłą działalnością górniczą nie dotyczy obszarów, które nigdy nie były poddane wpływom działalności górniczej (Bukowski i in., 2003–2006, 2006, 2019). Obszary takie zaleca się zaliczać do tzw. geotypu obszarowego I (GO-I, ryc. 4 – wg Bukowskiego i in., 2020), dla którego oceny uwarunkowań prowadzących do określenia zagrożeń (naturalnych – np. osuwiska, zapadliska) nie wymagają odrębnych, specjalnych procedur i uprawnień zawodowych, tak jak ma to miejsce w odniesieniu do terenów górniczych (GO-II) i pogórnich (GO-III).

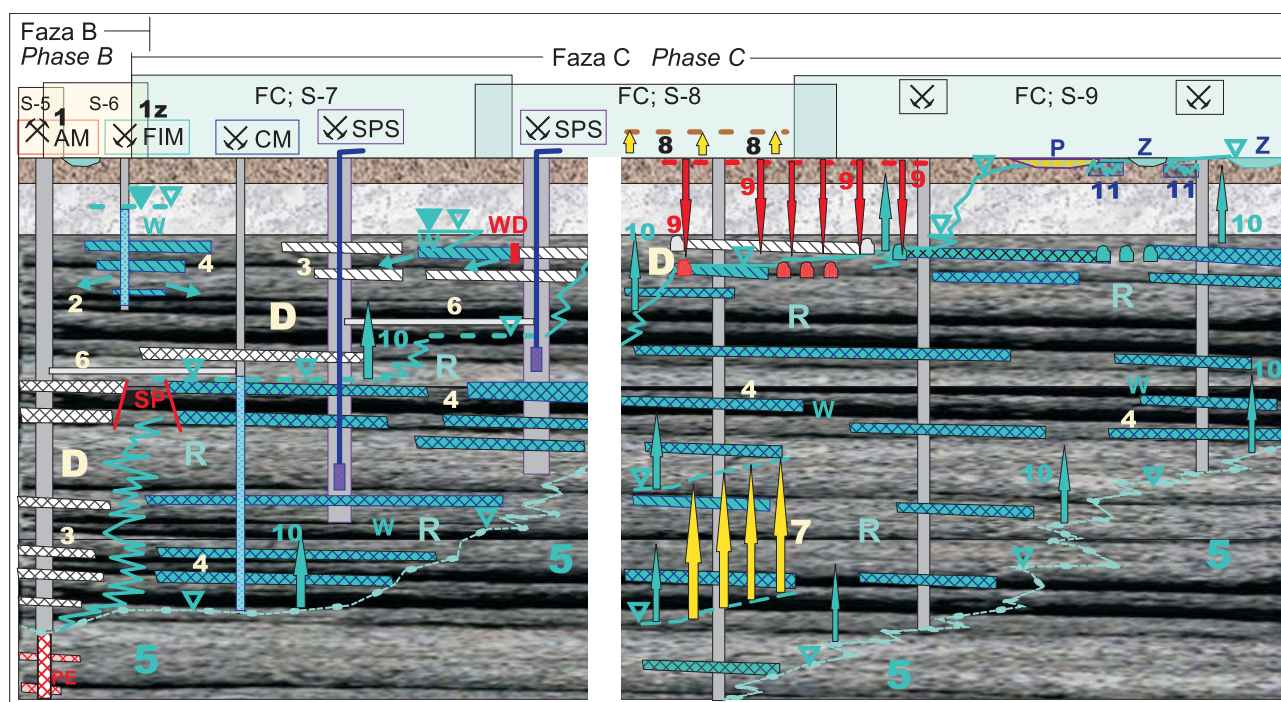
Jak starano się zatem wykazać, powiązanie procesów zapadliskowych z procesem zatapiania kopalń nie jest zadaniem prostym. Wymaga ustalenia interakcji skała–woda w czasie trwania procesów piętrzenia wód w likwidowanych kopalniach, zachodzących z różną dynamiką (ryc. 1), a także zachodzących z różną dynamiką procesów nasycania się skał wodą (ryc. 2) i odpowiadającemu temu procesowi tempem zmian właściwości wytrzymałościowo-odkształceniowych (ryc. 3).

KOŃCOWE STADIA ZATAPIANIA KOPALNI WĘGLA KAMIENNEGO A MOŻLIWOŚĆ WYSTĘPOWANIA ZAGROŻENIA ZAPADLISKOWEGO

Rozwój procesów i zjawisk spowodowanych działalnością górniczą kopalń, a następnie zatapianiem wyrobisk górniczych likwidowanych kopalń węgla kamiennego w istotnym stopniu różni się dla każdej kopalni. Różnice są spowodowane nie tylko różnymi uwarunkowaniami naturalnymi, ale także technicznymi, związanymi z aktualnym rozwinięciem infrastruktury podziemnej kopalni i etapem rozwoju w jej tzw. cyklu życia (Bukowski i in., 2019,

2020). Dla uogólnienia charakterystyki zmian warunków naturalnych i technicznych w kopalni dokonano podziału cyklu życia kopalni na trzy fazy rozwojowe (Bukowski, Bukowska, 2012). Pierwsza (faza A) dotyczy początku rozwoju od rozpoznania złoża w obszarze nienaruszonym działalnością górniczą (warunki pierwotne – geotyp obszarowy I, wg ryc. 4, Bukowski i in., 2020) i wykonania już wyrobisk udostępniających, po podjęcie odwadniania złoża do poziomu udostępnienia. Faza druga (faza B), zgodnie ze schematem dopływu wód wg Wilka (2003), dotyczy okresu rozwoju frontów eksploatacji górniczej i rozwoju drenażu górotworu. Trzecia natomiast (faza C) obejmuje schyłkowy okres istnienia kopalni – od czasu końca eksploatacji górniczej i robót górniczych przygotowujących kopalnię do likwidacji, przez wyłączenie odwadniania i zatapianie wyrobisk górniczych, po okres stabilizacji zwierciadła wody w zbiorniku do czasu całkowitego ustania jakichkolwiek skutków w górotworze i na powierzchni (ryc. 5). Ten ostatni okres jest okresem występującym permanentnie, który będzie trwał w wieloletniej i bliżej nieokreślonej przyszłości (do ∞).

W całym cyklu życia kopalni występuje możliwość zaistnienia zagrożenia zapadliskowego. Od początku działań rozpoznawczych i dokumentowania niektórych złóż w otoczeniu utworów krasowych prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia zapadliskowego istnieje od początku prac rozpoznawczych i działalności górniczej, nawet w fazie A. Pierwotnie jest to zagrożenie wystąpieniem zapadlisk krasowych naturalnych – tak jak na każdym terenie o podobnej budowie geologicznej. Wraz z pojawieniem się wpływów działalności górniczej, a nawet tylko odwadniania, sytuacja ta może ulec zmianie. Wówczas, pomimo że rozpoznanie jest prowadzone na terenie, który jeszcze jest zaliczony do geotypu obszarowego I (nie poddany wpływom działalności górniczej), istnieje możliwość aktywacji zapadlisk na bazie terenów występowania naturalnych zjawisk krasowych (nie tylko jako skutku robót wiertniczych lub rozwoju odwadniania). W fazie B rozwoju działalności kopalni, zwłaszcza w okresie jej końca, zagrożenie zapadliskowe występuje już także na terenach płytko prowa-



Ryc. 5. Zmiany uwarunkowań naturalnych i technicznych oraz stanu bezpieczeństwa górniczego i powszechnego na tle stadiów rozwoju zmian warunków hydrogeologicznych w schyłkowym okresie fazy B w cyklu życia kopalni i w schyłkowej – likwidacyjnej fazie C (wg Bukowskiego, Bukowskiej, 2012; Bukowskiej, Bukowskiego, 2023): 1 (AM) – kopalnia czynna, 1 z FIM – kopalnia zatopiona, CM – kopalnia zlikwidowana, SPS – kopalnia częściowo zatopiona odwadniana systemem głębinowym, FC; S-7 – faza C i stadium 7. w cyklu życia kopalni, P – podtopienie, Z – zalewisko, WD – tama wodna (inna budowla piętrząca), SP – przeciwwodny filar bezpieczeństwa, PE – projektowane roboty górnicze, w – zawadniony górotwór, D – górotwór zdrenowany, R – powtórnie zawadniony górotwór, 2 – kierunki przepływu wód, 3 – wyrobiska i zroby niezawadnione, 4 – wyrobiska i zroby zawadnione, 5 – górotwór nieeksploatowany i niedrenowany, 6 – chronione wyrobiska łączące kopalnie, 7 – strefa prawdopodobnej inicjacji mierzalnych procesów wypiętrzania górotworu, 8 – strefa prawdopodobnych wypływów gazów kopalnianych i największych wartości wypiętrzzeń górotworu, 9 – prawdopodobne występowanie deformacji nieciągłych, 10 – wznios piętrzonego zwierciadła wody w zbiorniku w zrobach, 11 – strefa sezonowych wahań zwierciadła wody po zatopieniu kopalni (patrz ryc. 1)

Fig. 5. Changes in natural and technical conditions and the state of mining and general safety against the background of the stages of development of changes in hydrogeological conditions in the final period of phase B in the mine life cycle and in the final – liquidation phase C (acc. to Bukowski, Bukowska, 2012; Bukowska, Bukowski, 2023): 1 (AM) – active mine, 1z FIM – flooded mine, CM – closed mine, SPS – partially flooded mine drained by submersible pumps, FC; S-7 – phase C and stage 7 in mine's life cycle, P – swamp, Z – overflow land, WD – water dam (other damming structure), SP – waterproof safety pillar, PE – planned mining works, w – water-saturated rock mass, D – drained rock mass, R – re-watered rock mass, 2 – directions of water flow, 3 – protected workings connecting mines, 4 – water-saturated goafs and workings, 5 – unexploited and undrained rock mass, 6 – zone of probable initiation of measurable rock mass uplift processes, 7 – zone of probable outflows of mine gases and the highest rock mass uplifts, 8 – zone of probable outflows of mine gases and the highest rock mass uplifts, 9 – probable occurrence of discontinuous deformations, 10 – elevation of the dammed water table in the reservoir in goafs, 11 – zone of seasonal fluctuations of the water table after the mine flooding (see Fig. 1)

dzonej eksploatacji górniczej, zwykle w terenie hydrogeologicznie odkrytym. Jednak rozwój zapadlisk na terenie zakwalifikowanym do geotypu obszarowego II (tereny aktywnie poddane wpływom działalności górniczej) na ogół jest ograniczony i może się nieco nasilić, zwłaszcza w końcowym stadium rozwoju fazy B, jako efekt nakładania się wielu wpływów i czynników pochodzenia górniczego. Pomimo poddania terenów górniczych obniżeniom i innym deformacjom poeksploatacyjnym i ich skutkom (zalewiska, podtopienia), wstrząsom górotworu, składowaniu odpadów pogórnich, zrzutowi wód dołowych, wpływom gazów kopalnianych itp., wraz z rozwojem eksploatacji górotworu musi być i jest odwadniany, a zatem coraz bardziej zdrenowany z wody wolnej. Poddanie górotworu stałemu intensywnemu drenażowi górniczemu, jako działaniu koniecznemu, powoduje wzrost ilości zanieczyszczonych wód kopalnianych, a do końcowego stadium rozwoju fazy B – konieczność zrzutu tych wód na powierzchnię, a także powoduje nierównomierne odwodnienie górotworu. To w okresie trwania fazy B, po zdrenowa-

niu górotworu z wody wolnej, nabiera on właściwości pozwalających na długotrwałe utrzymanie i zabezpieczanie infrastruktury dołowej kopalni w stanie pozwalającym na funkcjonowanie i planowanie dalszej działalności kopalni (ryc. 5 – faza B; S-5 i S-6). Odwodnienie skał otaczających wyrobiska górnicze przynosi zwiększenie sztywności górotworu, jego kruchości i wytrzymałości oraz zmniejszenie odkształcalności skał. Proces drenażu w końcowej części fazy eksploatacji górniczej (faza B) powoduje, że otoczenie płytko położonych wyrobisk górniczych jest wzmocnione i tylko wyjątkowo niekorzystne okoliczności i uwarunkowania mogą doprowadzić do powstania deformacji o wysokiej dynamice rozwoju, np. zapadlisk. Zjawiska zapadliskowe na obszarach zakwalifikowanych do geotypu II, choć mogą wystąpić w sposób nieprzewidywalny w czasie, to jednak w okresie trwania fazy B w rozwoju kopalni występują na ogół sporadycznie.

Sytuacja zmienia się z chwilą zakończenia fazy B i wyłączenia systemu odwadniania kopalni oraz dopuszczenia do zatopienia jej wyrobisk górniczych wodami

z dopływu naturalnego. Wówczas, w okresie początkowym, zasilanie w wodę zatapianego górotworu i wyrobisk górniczych stanowi dopływ lateralny i dopływ pochodzący z infiltracji. Według schematu przedstawionego na rycinie 5, w nawiązaniu do całego cyklu życia kopalni (wg Bukowskiego, Bukowskiej, 2012) oraz uogólniając przebieg procesów w obrębie fazy schyłkowej (faza C), podzielono ją na trzy różniące się stadia rozwojowe: S-7, S-8 i S-9. Stadia te w różnym zakresie zachodzą na siebie, podobnie jak nakładają się na siebie końcowe etapy rozwoju kopalni w fazie B, gdy zakończono eksploatację górniczą, lecz gdy jeszcze nie ustały wpływy tej działalności. Charakterystyczne cechy stadiów rozwojowych fazy likwidacyjnej kopalń (faza C) w sposób schematyczny zestawiono w tabeli 1.

Zgodnie ze schematem rozwoju dopływów wody do kopalni przedstawianych przez Wilka (2003) oraz schematem faz rozwoju kopalni w cyklu jej życia (Bukowski, Bukowska, 2012) dla terenów górniczych kopalń kończących eksploatację górniczą zasadnicze znaczenie mają procesy, których rozwój następuje w końcowej fazie C cyklu życia kopalni (ryc. 5). Tereny górnicze (geotyp obszarowy II) po zaprzestaniu eksploatacji górniczej i przekazaniu kopalni do likwidacji stają się terenami pogórnymi (geotyp obszarowy III), a roboty górnicze są prowadzone pod kątem uporządkowania spływu i gromadzenia się wód w wyrobiskach górniczych i ewentualnego ich ujęcia i odprowadzenia na powierzchnię.

NIKTÓRE MOŻLIWOŚCI ZAPOBIEGANIA KONSEKWENCJOM ZATAPIANIA KOPALŃ LIKWIDOWANYCH

W końcowych stadiach (tab. 1, stadium 8 i 9 fazy C) likwidacji kopalni, następuje ona do czasu pełnego samozatopienia wyrobisk górniczych. Proces zatapiania wyrobisk i formowania się zbiornika wodnego trwa do czasu osiągnięcia przez wodę poziomu wynikającego z powstania warunków dla wytworzenia się tzw. stanu równowagi hydrodynamicznej. Kończy się on po ustabilizowaniu się poziomu zwierciadła wody usytuowanego na ogół blisko powierzchni terenu (ryc. 1). Zatopienie wyrobisk górniczych prowadzące do wyprowadzenia wód tuż pod i lokalnie ponad powierzchnię terenu w obszarach tzw. hydrogeologicznie odkrytych, przynosi skutek w postaci poeksploatacyjnych podtopień i zalewisk uwidoczonych na powierzchni terenu (Bukowski i in., 2003–2006, 2006; Bukowski, 2006). Jest to stan, przy którym tereny pogórnice i górnicze są kwalifikowane jako nieprzydatne do zagospodarowania – kat. C terenów pogórnich (wg Dobaka i in., 2009). Jednocześnie bliski powierzchni terenu poziom zwierciadła wody odpowiada stanowi quasi-równowagi hydrodynamicznej, w którym zwierciadło wody w zbiorniku zatopionej kopalni podlega zróżnicowanym, zależnym od warunków atmosferycznych, sezonowym zmianom położenia. Osiągnięcie tego stanu, bez wystąpienia komplikacji i zagrożeń oznacza pomyślny przebieg i zakończenie procesu zatapiania kopalni (wg informacji zaczerpniętych od geologa powiatowego właściwego dla terenu byłej kopalni *Maria*, w okresie ostatnich lat, nie odnotowano doniesień o zjawiskach zapadliskowych). Od czasu stabilizacji zwierciadła wody rozpoczyna się okres polikwidacyjny, który jest okresem permanentnym, otwartym czasowo i nieokreślonym w czasie, w którym wystąpienie zjawiska zapadliskowego jest stale możliwe, już tylko

z uwagi na istnienie zrobów i istnienie zbiornika w zrobach poeksploatacyjnych.

W warunkach pomyślnego przebiegu zatapiania kopalni podjęcie uregulowania stosunków wodnych jest możliwe, lecz możliwości są wówczas niewielkie. Na ogół wysokie położenie zwierciadła wody w zbiorniku utworzonym w zrobach kopalni zlikwidowanej i jej głębokościowe zróżnicowanie jest zależne od ukształtowania powierzchni terenu i rozcięcia jej korytami cieków powierzchniowych. Przy większym zróżnicowaniu powierzchni terenu, nachyleniu koryt i kierunkach oraz warunkach spływu wód cieków, niezakłóconych obniżeniami poeksploatacyjnymi, mogą one w sposób naturalny lub po wykonaniu zabiegów hydrotechnicznych, stanowić odbiorniki naturalne dla samowypływu wód kopalnianych po likwidacji kopalni. Zanim jednak od tego dojdzie, to piętrzenie wód kopalnianych w końcowym etapie tworzenia zbiornika zwykle sięga powyżej usytuowanych wyrobisk górniczych położonych poniżej obniżen morfologicznych terenu. W zależności od właściwości mechanicznych skał górotworu otaczającego wyrobiska górnicze, od dokładności rozpoznania przestrzennego położenia pustek poeksploatacyjnych, stanu zagospodarowania powierzchni terenu, charakteru utworów nadkładu serii złożowej i grubości półek stropowych nad wyrobiskami, należy wziąć pod uwagę potrzebę okresowego lub ciągłego pompowania wód, lub możliwość uwolnienia zwierciadła wody w zbiorniku kopalnianym.

W sytuacji występowania pustek pogórnich w otoczeniu słabego górotworu na małej głębokości (do ok. 100 m) oraz hydrogeologicznie odkrytego charakteru terenu pogórnego trzeba rozważyć możliwość ujęcia i pompowania wód kopalnianych jeszcze przed osiągnięciem przez zwierciadło wody spągu tych wyrobisk górniczych. Wynika to wprost z opisanego we wcześniejszej części artykułu wpływu procesu nasykania wodą skał otaczających pustki poeksploatacyjne, jako głównej przyczyny zmian wytrzymałości skał (ryc. 3). Szybkie (w okresie godzin i dni) drastyczne zmniejszenie wytrzymałości skał budujących zroby oraz stanowiących podstawy filarów po eksploatacji systemem filarowo-komorowym, przy stałej wartości nacisku pionowego prowadzą do utraty stateczności górotworu wokół pustki i do deformacji powierzchni terenu pogórnego. Uniknięcie tego zjawiska w wodochłonnym i słabym górotworze stanowi jedynie niedopuszczenie do zawodnienia najwyższej usytuowanych wyrobisk i górotworu położonego w ich otoczeniu.

Natomiast w przypadku otoczenia pustek, które stanowią skały o dużej wytrzymałości, z grubą półką stropową, w terenie o dobrze rozpoznanym rozkładzie przestrzennym płytkich wyrobisk górniczych, a także w terenie położonym poza rejonami wystąpienia zagrożenia dla ludności i infrastruktury powierzchniowej, jest możliwe, pod pewnymi rygorami, rozważenie uwolnienia zwierciadła wody w zbiorniku do poziomu naturalnej stabilizacji zwierciadła. Jak wynika z ryciny 1 w okresie wzmożonych opadów atmosferycznych może jednak wystąpić potrzeba okresowego odwadniania wyrobisk górniczych dla zabezpieczenia powierzchni terenu, co wiąże się ze zmniejszeniem grubości strefy aeracji i pojemności wodnej utworów pomiędzy powierzchnią terenu a zwierciadłem wody. W przypadku zagrożenia zawodnieniem terenu, istotną rolę może odegrać ukształtowanie powierzchni terenu w czasie zbliżania się zwierciadła wody w zbiorniku ku powierzchni. Rygory dopuszczenia do pełnego zatopienia zlikwidowanej kopalni powinny dotyczyć wykonania działań

Tab. 1. Charakterystyka obiektów pogórnicych (zlikwidowanych kopalni) w ramach stadiów rozwojowych schyłkowej – likwidacyjnej i polikwidacyjnej fazy C w cyklu życia kopalni
Table 1. Characteristics of post-mining facilities (closed mines) within the development stages of closure and post-closure phase C in the mine life cycle

FAZA w „cyklu życia” PHASE in the “life cycle”	Stadium rozwoju Stage of development	Cechy charakterystyczne Characteristics	Uwagi (działania/skutki) Comments (actions/effects)
A Wczesna	FA; S-1 FA; S-2 FA; S-3 FB; S-4 FB; S-5 FB; S-6	<p>scharakteryzowano w: – Bukowski, Bukowska, 2012; – Bukowski i in., 2019, 2020; – Bukowska, Bukowski, 2023</p>	
B Rozwinięta	FC; S-7 stadium likwidacji odwadniania (<i>vide</i> ryc. 5, FC; S7)	<p><input type="checkbox"/> górotwór odwodniony; <input type="checkbox"/> mała początkowa pojemność wodna zaangażowanych w proces zatapiania wyrobisk górniczych, zrobów i górotworu położonych na największych głębokościach; <input type="checkbox"/> zasilanie w wodę z infiltracji lub/i lateralne oraz początkowo odciekami wód technologicznych; <input type="checkbox"/> maksymalne natężenie dopływu wody do tworzącego się zbiornika dolowego; <input type="checkbox"/> zwierciadło wody w zbiorniku położone na dużej głębokości, o początkowo dużej dynamice zmian położenia; <input type="checkbox"/> początek etapu spiętrzania wód i wypychania metanu z najniżej położonych zrobów i wyrobisk, jeśli są lub były wykonane w otoczeniu pokładów metanowych; <input type="checkbox"/> spiętrzanie wód zachodzi do wysokości najniżej położonego połączenia hydraulicznego lub w wyniku podjęcia odwadniania na poziomie determinowanym wytrzymałością zabezpieczenia i stanem zagrożeń wodnych, lub w sposób nieskrepowany (ryc. 1); <input type="checkbox"/> początkowo relatywnie szybki, lecz spowalniający, przebieg procesu zatapiania z możliwymi wahaniem i położenia zwierciadła wody (ryc. 1); <input type="checkbox"/> brak widocznych istotnych skutków likwidacji kopalni w górotworze i na powierzchni, w tym: – ustanie deformacji ciągłych od ok. 1 roku do 5–6 lat po zakończeniu eksploatacji górniczej, – brak deformacji nieciągłych w przeważającej części odwodnionego górotworu i zmniejszenie się zagrożenia zapadliskowego, – brak zmian w zawadnieniu powierzchni terenów pogórnicych – zalewisk i podtopień, – brak wstrząsów pochodzenia górniczego, – ustanie wpływu działalności górniczej na obiekty budowlane i infrastrukturę powierzchniową, – możliwość okresowy, lecz zanikający wzrost wpływu gazów kopalnianych, – ustanie produkcji odpadów pogórnicych, – brak zrzutów wód dolowych do cieków na powierzchni do czasu podjęcia odwadniania lub do całkowitego zatopienia kopalni;</p>	<p><input type="checkbox"/> prace koncepcyjne, prognostyczne i dokumentacyjne; <input type="checkbox"/> eksploatacja górnicy całkowicie zakończona, roboty górnicze – przygotowanie kopalni do całkowitego lub częściowego zatopienia wyrobisk i ewentualnego podjęcia odwadniania prewencyjnego; <input type="checkbox"/> możliwe podjęcie odwadniania do czasu całkowitej likwidacji kopalni, lub uwolnienie zwierciadła wody; <input type="checkbox"/> wyłączenie systemu odwadniania; <input type="checkbox"/> początek samozatapiania wyrobisk górniczych naturalnym dopływem wód; <input type="checkbox"/> obserwacje zmian położenia zwierciadła wody; <input type="checkbox"/> EFEKT: – poprawa jakości środowiska naturalnego i warunków życia, w tym poczucia spokoju, dobrostanu i bezpieczeństwa lokalnych społeczności.</p>
C Schyłkowa – likwidacyjna i polikwidacyjna	FC; S-8 stadium zatapiania (<i>vide</i> ryc. 5, FC; S8)	<p><input type="checkbox"/> górotwór odwodniony w pomniejszającej się części nadwodnej i powiększającej się części tworzącej zbiornik wód dolowych – poniżej zwierciadła wody górotwór powolnie w pełni nawodniony, ze strefą przejściową od stanu nasycenia, przez stany wilgotności kapilarniej w niewielkiej strefie od zwierciadła wody wznwyż do górotworu odwodnionego; <input type="checkbox"/> wzrasta pojemność wodna zaangażowanych w proces zatapiania wyrobisk górniczych, zrobów i górotworu do wartości zbliżonych do maksymalnych w końcowej części S-8 (ryc. 5); <input type="checkbox"/> zasilanie w wodę z infiltracji ze stopniowym zanikiem dopływów lateralnych i wód technologicznych; <input type="checkbox"/> w końcowej części S-8 maleje natężenie dopływu wody do tworzącego się zbiornika dolowego do wielkości zasilania infiltracyjnego z opadów atmosferycznych;</p>	<p><input type="checkbox"/> prace koncepcyjne i dokumentacyjne dla uzupełnienia monitoringu hydrogeologicznego; <input type="checkbox"/> eksploatacja górnicy całkowicie zakończona, roboty górnicze – przygotowanie kopalni do podjęcia odwadniania prewencyjnego; <input type="checkbox"/> możliwe podjęcie odwadniania do czasu całkowitej likwidacji kopalni, lub uwolnienie zwierciadła wody; <input type="checkbox"/> możliwe okresowe włączenie systemu odwadniania – jeśli przewidziane;</p>

FAZA w „cyklu życia” PHASE in the “life cycle”	Stadium rozwoju Stage of development	Cechy charakterystyczne Characteristics	Uwagi (działania/skutki) Comments (actions/effects)
<p>Tab. 1. Charakterystyka obiektów pogórnicznych (zlikwidowanych kopalni) w ramach stadiów rozwojowych schyłkowej – likwidacyjnej i polikwidacyjnej fazy C w cyklu życia kopalni (cd.) Table 1. Characteristics of post-mining facilities (closed mines) within the development stages of closure and post-closure phase C in the mine life cycle (cont.)</p>	<p>FC; S-8 stadium zatapiania (vide ryc. 5, FC; S8)</p>	<p><input type="checkbox"/> zwierciadło wody w zbiorniku jest położone na coraz mniejszej głębokości – spiętrzane zachodzi w dużym zakresie głębokości, o początkowo stałej, a następnie malejącej dynamice zmian położenia zwierciadła wody;</p> <p><input type="checkbox"/> zaawansowanie etapu spiętrzania wód i wypychania metanu z najbliższego kopalnianego wyrobisk ze zmniejszeniem się ilości metanu desorbowanego w powietrzu kopalnianym do zniknięcia desorpcji w wyniku zablokowania uwalniania metanu z pokładów węgla przez narastającą warstwę spięzanej wody;</p> <p><input type="checkbox"/> nieskrepowane spiętrzanie wód zachodzi z coraz mniejszą prędkością i możliwymi wahaniami położenia zwierciadła wody (ryc. 1) związanymi z przerywaniem kolejnych barier na drodze przepływu wód w obrębie zbiornika, do wysokości stropu najwyższych wyrobisk górniczych, a następnie zwierciadło wody z różną prędkością, w zależności od budowy geologicznej nadkładu, zmierza do poziomu stabilizacji i sezonowych zmian położenia;</p> <p><input type="checkbox"/> znacząco spowalniający przebieg procesu zatapiania do osiągnięcia najwyższej usytuowanych wyrobisk górniczych (ryc. 1);</p> <p><input type="checkbox"/> możliwe uwidocznienie się, lecz na ogół brak istotnych skutków likwidacji kopalni w górotworze i na powierzchni, w tym:</p> <ul style="list-style-type: none"> – możliwe ujawnienie się, a następnie narastanie wypiętrzania górotworu w trakcie zatapiania kopalni w stadium 8, – możliwość wystąpienia ewentualnego trudnego do udokumentowania wpływu wypiętrzania górotworu z wystąpieniem wtórnych deformacji nieciągłych i wzrostem zagrożenia zapadliskowego, – nadal brak zmian w zawodnieniu powierzchni terenów pogórnicznych – zalewisk i podtopień, – brak wstrząsów pochodzenia górniczego i możliwe pojawienie się zjawisk parasejsmicznych o małej energii wstrząsu, jako efektu wypełniania się wodą zbiornika, praktycznie bez możliwości udokumentowania wpływu na powstawanie deformacji górotworu i zapadlisk, – możliwe reaktywowanie zróbów i wpływu procesu zatapiania na obiekty budowlane i infrastrukturę powierzchniową o trudnej do ustalenia intensywności, – możliwe zanikające do całkowitego ustania, wypływy gazów kopalnianych, zwłaszcza w początkowym okresie stadium 8, – całkowity brak produkcji odpadów pogórnicznych, – całkowity brak zrzutów wód dołowych do cieków na powierzchni podczas zatapiania nieskrepowanego, lub zrzut okresowy w czasie podjęcia odwadniania zabezpieczającego, – możliwe nakładanie się na siebie procesów osłabienia skał górotworu wodą, wypiętrzeń górotworu oraz niewyczuwalnych wstrząsów parasejsmicznych o małej energii wstrząsu w strefach prowadzenia odwadniania zabezpieczającego, – w końcowym okresie zaawansowanego 8. stadium zatapiania, zwłaszcza płytko położonych wyrobisk górniczych, intensyfikacja procesów deformacji górotworu i zagrożenia zapadliskowego (ryc. 5, powyżej objaśnień: 7, 8 i 9 – FC; S8); 	<p><input type="checkbox"/> samozatapanie wyrobisk górniczych zmniejszającym się naturalnym dopływem wód;</p> <p><input type="checkbox"/> dalsze obserwacje zmian położenia zwierciadła wody, możliwe modyfikacje sieci monitoringu, prace regulacyjne w sieci hydrograficznej;</p> <p><input type="checkbox"/> EFEKT:</p> <ul style="list-style-type: none"> – dalsza odczuwana przez lokalne społeczności poprawa jakości środowiska naturalnego i warunków życia, – wyjątek – okresowy zanik wody w ciekach powierzchniowych – odbiornikach wód kopalnianych, – ogólne poczucie spokoju, dobrostanu i bezpieczeństwa lokalnych społeczności powoduje demobilizację i niechęć do podejmowania działań wyprzedzających, – wraz z ujawnieniem się wpływu wypiętrzeń górotworu i możliwych deformacji i uszkodzeń w infrastrukturze zostaje zachowane poczucie spokoju, – przybliżenie się zwierciadła wody ku powierzchni nasila procesy deformacyjno-zapadliskowe i zagrożenie zawadnieniem powierzchni terenów pogórnicznych, – w końcowym etapie rozwoju stadium 8. następuje utrata poczucia dobrostanu i bezpieczeństwa, – prace koncepcyjne i dokumentacyjne dla podjęcia działań interwencyjnych i zabezpieczających;
<p>C Schyłkowa – likwidacyjna i polikwidacyjna</p>	<p>FC; S-9 stadium polikwidacyjne (vide ryc. 5, FC; S9)</p>	<p><input type="checkbox"/> górotwór nasycony wodą w przeważającej części profilu pionowego kopalni i serii złożowej, w części nadwodnej procesem zatapiania objęte będą utwory powyżej stropu najwyższej usytuowanych wyrobisk i utwory nadkładu serii złożowej o różnym zawodnieniu i przepuszczalności;</p> <p><input type="checkbox"/> tylko nieznacznie wzrasta pojemność wodna zbiornika – o pojemności górotworu, zróbów i wyrobisk zaangażowanych w proces zatapiania kopalni, głównie wyrobisk udostępniających, np. szybowych, oraz o pojemności wodną górotworu położonego powyżej zatopionych wyrobisk eksploatacyjnych, pojemność całkowita zbiornika sięga wartości maksymalnych;</p> <p><input type="checkbox"/> zasiłanie w wodę zbiornika zachodzi z głównym udziałem wód z infiltracji, co odpowiada maksymalnym wartościom natężeniu dopływu wody do utworzonego zbiornika dołowego połączonego z zawodnionymi utworami nadkładu złoża;</p>	<p><input type="checkbox"/> prace koncepcyjne i dokumentacyjne dla uzupełnienia monitoringu hydrogeologicznego i wyprzedzającego zabezpieczenia powierzchni terenu przed skutkami zatopienia kopalni (wykrywanie i doszczelnianie pustek, odnowa sieci hydrograficznej i przygotowanie punktów samowypływu wód kopalnianych, budowa systemu monitoringu i odwadniania podpowierzchniowego itp.);</p> <p><input type="checkbox"/> możliwe podjęcie podpowierzchniowego odwadniania prewencyjnego i zrzutów wód;</p>

FAZA w „cyklu życia” PHASE in the “life cycle”	Stadium rozwoju Stage of development	Cechy charakterystyczne Characteristics	Uwagi (działania/skutki) Comments (actions/effects)
	FC; S-9 stadium polikwidacyjne (<i>vide</i> ryc. 5, FC;S9)	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> zwierciadło wody w zbiorniku sytuuje się na głębokości przypowierzchniowej o na ogół małym zakresie zmian położenia zwierciadła wody, wynikającym z sezonowych warunków zasilania zbiornika; w przypadku zatapania płytkich zróbn wahańa sezonowe mogą być większe i w celu ochrony powierzchni mogą wymagać okresowych interwencji – pompowania (ryc. 1); <input type="checkbox"/> występuje całkowity zanik procesu wypychania gazów kopalnianych z wyrobisk górnictwowych przez warstwę spiętrzanej wody; <input type="checkbox"/> możliwe jest różne tempo spiętrzania wód (zarówno bardzo powolne, jak i bardzo szybkie), zależne od zawodnienia, przepuszczalności i wodochłonności utworów w nadkładzie karbonu i potłożonych powyżej stropu płytkich wyrobisk górnictwowych, zależne od budowy geologicznej nadkładu; <input type="checkbox"/> zakończenie procesu zatapania przez osiągnięcie długotrwałe obserwowanego stanu sezonowych wahań zwierciadła wody w zbiorniku (ryc. 1); <input type="checkbox"/> możliwe i prawdopodobne jest wystąpienie istotnych skutków likwidacji kopalni w górotworze i na powierzchni: <ul style="list-style-type: none"> – możliwe ujawnienie się, a następnie ustanie wypiętrzania górotworu po zakończeniu zatapania kopalni w stadium 9,; – możliwość wystąpienia wpływu nasycania wodą górotworu z wystąpieniem wtórnych deformacji nieciągłych i wzrostem zagrożenia zapadliskowego, w początkowym okresie stadium 9, z ustabilizowaniem się występowania tego zagrożenia po stabilizacji zwierciadła wody w stadium 9, – do nadal, – wystąpienie zmian w zawodnieniu powierzchni terenów pogórnictwowych – zalewisk i podtopień oraz odnowienie cieków powierzchniowych i zawodnienie obniżen terenu i pradolin cieków w zasięgu wzniosu zwierciadła wody w granicach wypełnionego lejka depresji, – występowanie wstrząsów górotworu o charakterze zjawisk parasejsmicznych o małej energii, jako efektu wypełniania się wodą Zbiornika, – możliwa reaktywacja zróbn jako wpływu procesu sezonowego wahańa się zwierciadła wody – nasycania i odwadniania skał w otoczeniu pustek, i ich wpływu na obiekty budowlane i infrastrukturę powierzchniową, – zaniknięcie – ustanie wpływu gazów kopalnianych, – całkowity brak produkcji odpadów pogórnictwowych, – samowypływy wód z wyrobisk górnictwowych, lub ich zrzut jako wynik pompowania zabezpieczającego powierzchnię terenu przed skutkami zatapania kopalni, – w końcowym okresie zaawansowanego 9, stadium zatapania, intensyfikacja procesów prowadzących do zawodnienia terenu pogórnictwowych i do ustabilizowania się zagrożenia zapadliskowego (ryc. 5, pozycje objaśnień: 7, 8 i 9 – FC; S8) 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> dalsze obserwacje zmian położenia zwierciadła wody, możliwe modyfikacje sieci monitoringu, <input type="checkbox"/> EFEKT: <ul style="list-style-type: none"> – odczuwana przez lokalne społeczności utrata jakości środowiska naturalnego i pogorszenie się warunków życia, – straty ekonomiczne w wyniku zmian możliwości zagospodarowania terenów, – wyjątek – powrót do zrzutu wód do cieków – ogólny brak poczucia spokoju, dobrostanu i bezpieczeństwa lokalnych społeczności może powodować migrację ludności, – w końcowym etapie rozwoju stadium 9, następuje utrata poczucia dobrostanu i bezpieczeństwa, teren stanowi podstawę przywrócenia przydatności terenów do zagospodarowania

poprzedzających decyzję o uwolnieniu zwierciadła wody, tj. opracowania aktualnych map powierzchni, map hydro-morfologicznych i zagrożenia zawodnieniem powierzchni terenu, map występowania i rozkładu płytkich wyrobisk górniczych oraz rejonów potencjalnie zagrożonych zapadliskami. Dopiero na tej podstawie należy określić zakres prac dotyczących regulacji stosunków wodnych, zabezpieczenia terenu i sposobu ostrzegania, optymalizacji sieci monitoringu hydrogeologicznego i hydrologicznego, a także wykonania badań uzupełniających (geofizycznych, wiertniczych, geomechanicznych i hydrogeologicznych). Generalnie jednak w latach 90. XX w. lub w I dekadzie po 2000 r. podejmując decyzje dotyczące likwidacji kopalń, czyli na wiele lat przed ich zatopieniem, nie przewidywano lub rzadko przewidywano kategoryzowanie obszarów przyszłych podtopień i zalewisk z uwagi na przewidywany sposób zagospodarowania powierzchni. Prognozy takie są możliwe do wykonania i są zalecane w okresie jeszcze przed zakończeniem eksploatacji górniczej, zwłaszcza w celu projektowania i realizacji działań wyprzedzających, rozpatrywanych dla poprawy warunków wodnych na przyszłych terenach pogórnich (Ignacy, 2018, 2019). W praktyce część obszarów, które mogą być narażone na zawodnienie powierzchni lub aktywację innych zagrożeń po całkowitej likwidacji kopalń, nie została wyłączona z użytkowania, a nawet została częściowo zagospodarowana.

Proces całkowitego wyrównania poziomu zwierciadła wody w zatopionej kopalni z położeniem zwierciadła wody poziomów wodonośnych występujących w jej otoczeniu powinien zakończyć lub znacząco ograniczyć i ustabilizować procesy prowadzące do powstawania deformacji związanych z przemieszczaniem się skał do pustek poeksploatacyjnych. Brak takiej stabilności w otoczeniu górotworu o wysokich parametrach wytrzymałościowych i małych odkształceniowych może być związany z występowaniem pustek objętych procesami wahań sezonowych zwierciadła wody w zbiorniku o znaczącej amplitudzie wahań, jak w przypadku byłej kopalni *Maria* (Bukowski, Augustyniak, 2005). Wówczas swój wpływ ujawniają procesy erozji, poprzez rozmakanie, rozmywanie i wymywanie materiału skalnego, zwłaszcza w rejonach spękań półek stropowych i otoczenia wyrobisk, które prowadzą do powolnego poszerzania się płaszczyzn nieciągłości a wreszcie do utraty podporności i zawału generującego pustkę zapadliskową.

Na obszarach zbudowanych ze skał starszych i mocniejszych, o innej charakterystyce mechanicznej, niebezpieczeństwo wystąpieniem zapadlisk istnieje, lecz możliwości jego ujawnienia się w porównaniu z utworami krakowskiej serii piaskowcowej znacząco maleją. Nie oznacza to, że bez stosownej analizy i ewentualnie badań można w sposób nieskrępowany i bez działań zapobiegawczych prowadzić zatapianie kopalni. Zabezpieczenia i monitoringu wymagają zwłaszcza tereny, na których występują płytkie stare wyrobiska górnicze udostępniane z powierzchni szybkami i szybami w różny sposób likwidowanymi w przeszłości. Przed decyzją o całkowitym uwolnieniu zwierciadła wody nie należy wykluczyć potrzeby podjęcia prac na rzecz uzdatnienia terenu przez doszczelnienie pustek i zabezpieczenia szybów kopalnianych oraz ewentualne wyznaczenie stref bezpieczeństwa wokół szybów i przez ewentualne przeprowadzenie zabiegów ograniczających lokalnie możliwość infiltracji wód z powierzchni lub z infrastruktury wodno-kanalizacyjnej itp.

Osiągnięcie stanu stabilizacji zwierciadła wody może być niebezpieczne i ryzykowne głównie na obszarach gór-

nicznych i pogórnich w kopalniach, które funkcjonują lub pracowały w utworach krakowskiej serii piaskowcowej, jak ma to miejsce w byłej KWK *Siersza*. Wówczas należy w porę podjąć odwadnianie zabezpieczające lub wykryć i skutecznie podsadzić pustki w górotworze przed ich zatopieniem – jeśli to możliwe. Po trwałym podsadzeniu pustek i zabezpieczeniu rejonów starych szybów, szybków, a być może również niektórych otworów wiertniczych, można dopiero rozważać ewentualność doprowadzenia do całkowitego spiętrzenia wód na terenie przygotowanym na zmiany w sytuacji hydrogeologicznej i hydrologicznej. Proces zatapiania kopalni na terenie hydrogeologicznie zakrytej części GZW z mięszym, nieprzepuszczalnym nadkładem zbudowanym z gruntów spolistych, z wyjątkiem rejonów likwidowanych szybów górniczych i ich otoczenia można rozważać jako proces ciągły do stabilizacji zwierciadła wody lub do jej kontrolowanego samowypływu. W rejonie płytkich wyrobisk górniczych położonych w otoczeniu mocnego górotworu z wystarczającej grubości półką stropową, po rozpatrzeniu innych wskazanych wcześniej uwarunkowań, także można rozważać jako obszary możliwego kontynuowania procesu zatapiania kopalni, od wyłączenia odwadniania po stabilizację zwierciadła wód dołowych w zrobach i w górotworze.

PODSUMOWANIE

– CZY ISTNIEJE ZWIĄZEK ZATAPIANIA LIKWIDOWANYCH KOPALŃ WĘGLA KAMIENNEGO Z ZAGROŻENIAMI DLA BEZPIECZEŃSTWA POWSZECHNEGO?

Wpływ zatapiania likwidowanych kopalń węgla kamiennego w GZW na stan bezpieczeństwa powszechnego na terenach pogórnich kopalń węgla kamiennego intuicyjnie jest bezsporny. Jednak wskazanie, czy występuje i jaki jest związek pomiędzy procesem zatapiania kopalń likwidowanych a zagrożeniami zapadliskowymi, nie jest już takie oczywiste i jednoznaczne. Z uwagi na stosunkowo małą liczbę obserwacji i analiz skutków zatapiania kopalń dotychczas zlikwidowanych w GZW, które opublikowano lub udostępniono, udokumentowanie tego związku nadal nie jest sprawą prostą. Zatem, jak starano się wykazać w artykule, znalezienie związku zatapiania kopalni z powstawaniem zapadlisk na powierzchni terenów pogórnich nie jest możliwe bez znalezienia i poznania wzajemnych interakcji procesów hydrogeologicznych i geomechanicznych, które razem z rozpoznaniem przestrzennego położenia struktury zbiornika tworzonego w kopalni i pustek stanowiących źródło zagrożenia powszechnego, leżą u podstaw oceny tego zagrożenia.

Likwidacja kopalni stanowi zagrożenie dla powierzchni terenu i bezpieczeństwa powszechnego, jeśli w jej wyniku występuje wpływ na bezpieczeństwo lub warunki życia człowieka. Taki wpływ w sposób widoczny może się ujawnić głównie w wyniku zaniechania odwadniania wyrobisk górniczych i nieskrępowanego spiętrzenia wód do poziomu naturalnej stabilizacji zwierciadła tworzonego w kopalni zbiornika wodnego. Może też wystąpić w wyniku długotrwałych procesów wietrzenia skał i infiltracji wód z opadów atmosferycznych do płytko usytuowanych pustek pogórnich, przez warstwy zruszonego w wyniku wpływów eksploatacji górniczej górotworu. W obu przypadkach efektem jest wzrost częstotliwości i zbieżność czasowa procesów hydrogeologicznych z utratą stateczności górotworu wokół pustki. W przypadku zatapiania

kopalni efektem dodatkowym jest proces powolnego, nieodczuwalnego wypiętrzania górotworu i generowania wstrząsów parasejsmicznych, które mogą wpływać na reaktywację starych płytko usytuowanych zrobów i destabilizację górotworu wokół pustek poeksploatacyjnych w miarę piętrzenia wód. Na terenach pogórnich, na których nie ma uwarunkowań do zaistnienia naturalnych zjawisk deformacyjnych (np. krasowych), bez istnienia działalności górniczej, o szerokim wachlarzu wpływów na górotwór i powierzchnię, zjawiska takie nie mogłyby wystąpić. Dopiero przesłedzenie wpływu wody na skałę w warunkach laboratoryjnych (ryc. 2 i 3), po wyniki obserwacji prowadzonych w skali kopalni (ryc. 1) z obserwacjami zjawisk zapadliskowych i zalewiskowych zachodzących w czasie, umożliwiła powiązanie procesu zatapiania kopalni, przebiegu procesów nasycania skał wodą i niszczenia ich struktury z procesami zapadliskowymi.

Przedstawiony w artykule scenariusz rozwoju zmian zachodzących w górotworze w końcowej fazie istnienia kopalni likwidowanej pozwala stwierdzić, że decydującą rolę w kształtowaniu zagrożenia zapadliskowego – zagrożenia powszechnego, odgrywają procesy hydrogeologiczne i geomechaniczne, które zaczynają się rozwijać na krótko po rozpoczęciu zatapiania kopalni. W początkowym okresie mają one znaczenie dla wyrobisk położonych najgłębiej i dla bezpieczeństwa górniczego (wzrost zagrożenia wodnego i metanowego), by w kolejnych etapach zatapiania woda zmieniła układ naprężeń w górotworze i doprowadziła do zainicjowania procesu wypiętrzania górotworu oraz pojawienia się pierwszych symptomów jego sejsmiczności po rozpoczęciu zatapiania wyrobisk górniczych likwidowanej kopalni. Procesy wypiętrzania i sejsmiczności górotworu mogą się nieznacznie rozwinąć do końcowego etapu piętrzenia wód, w którym następuje nasycanie wodą skał w strefie przypowierzchniowej oraz wypełnianie pustek poeksploatacyjnych położonych powyżej. W tym okresie najbardziej widoczna staje się interakcja skała–woda i współzależność procesu nasycania skał otaczających pustki pogórnice ze zmniejszeniem się ich wytrzymałości na ściskanie oraz ze wzrostem odkształcalności skał. Współzależność tę, zaobserwowaną na obszarze byłej KWK *Siersza* i byłej KWK *Maria*, można powiązać czasowo z położeniem zwierciadła wody w płytkich wyrobiskach górniczych zatapianej kopalni i powstaniem zapadlisk na powierzchni terenu. Różnice właściwości skał górotworu w otoczeniu płytko położonych wyrobisk górniczych w GZW pozwalają także wskazać dwa główne schematy powstawania zapadlisk na powierzchni:

- związany głównie z trwającym procesem końcowym zatapiania kopalni, który zachodzi w otoczeniu słabego górotworu,

- zachodzący w otoczeniu mocnego górotworu, mniej związany z wpływem procesu zatapiania kopalni, a głównie z występowaniem, sezonowych wahań zwierciadła wody o dużej amplitudzie wahań w zbiorniku pokopalnianym utworzonym po zatopieniu kopalni.

Wyniki tych obserwacji i prowadzonych w latach ubiegłych badań pozwalają uznać występowanie związku procesu zatapiania kopalni ze wzrostem prawdopodobieństwa wystąpienia i wzrostem ryzyka wystąpienia zagrożenia zapadliskowego. Umożliwiają ponadto przewidywanie wzrostu częstotliwości ujawniania się zjawisk zapadliskowych pochodzenia górniczego.

Autor pragnie podziękować recenzentowi dr. hab. inż. Krzysztofowi Polakowi za poświęcony czas i konstruktywne uwagi do treści artykułu.

LITERATURA

- BUKOWSKA M. 2012 – Skłonność górotworu do tąpnięć – geologiczne i geomechaniczne metody badań. Wydaw. GIG, Katowice.
- BUKOWSKA M., KIDYBIŃSKI A. 2002 – Wpływ czynników naturalnych masywu skalnego na jego wytrzymałość określoną metodami in situ i laboratoryjną. Pr. Nauk. GIG, Górniczo i Środowisko, 1: 35–46.
- BUKOWSKA M. (red.) 2009 – Kompleksowa metoda oceny skłonności górotworu do tąpnięć w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Wydaw. GIG, Katowice.
- BUKOWSKA M., BUKOWSKI P. 2023 – Investigation of Geomechanical Properties of Carboniferous Rocks for Evaluating the Possibility of Energetic Use of Water and Methane from Hard Coal Mines. Arch. Min. Sci., 68 (2): 207–225.
- BUKOWSKI P. 1999 – Chłonność wodna górotworu karbońskiego i jej wpływ na przebieg zatapiania likwidowanych kopalń. Praca doktorska (niepublikowana). Arch. GIG, Katowice.
- BUKOWSKI P. 2006 – Zawodnienie powierzchni terenu spowodowane działalnością górniczą prowadzoną w GZW w okresie od rozwoju górnictwa lat 70. i 80. XX wieku do okresu restrukturyzacji kopalń. Prz. Górn., 5: 15–24.
- BUKOWSKI P., AUGUSTYNIAN I. 2005 – Analiza zjawisk związanych z zaprzestaniem odwadniania wyrobisk górniczych na przykładzie byłej kopalni „Maria”. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górniczym, 1: 13–21.
- BUKOWSKI P., BUKOWSKA M. 2005 – Zmiany niektórych właściwości środowiska geologicznego w strefie wahań zwierciadła wód w zbiornikach utworzonych w kopalniach węgla kamiennego w GZW. [W:] Sadurski A., Krawiec A. (red.), Współczesne Problemy Hydrogeologii, T. 12, Wydaw. UMK, Toruń: 77–83.
- BUKOWSKI P., BUKOWSKA M., HAŁADUS A. 2005 – Charakterystyka zagrożeń wodnych w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w związku z restrukturyzacją przemysłu węglowego. Materiały Symp. Warsztaty Górnicze. Zagrożenia Naturalne w Górniczym. Seria Sympozja i Konferencje nr 65, IGSMiE PAN, Kraków; 209–221.
- BUKOWSKI P., GRZYBEK I., HAŁADUS A., BUKOWSKA M., BROMEK T., ZDECHLIK R., AUGUSTYNIAN I., MUNIAK A., CHEĆKO J., ŚWISTAK M., DZBIK J. 2003–2006 – Opracowanie metodyki prognozowania i monitorowania procesu zatapiania likwidowanych kopalń węgla kamiennego w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa kopalń czynnych i terenów pogórnich. Dokumentacja GIG – Sprawozdanie merytoryczne projektu badawczego własnego KBN, nr 5 T12B 037 24 (niepublikowana).
- BUKOWSKI P., BROMEK T., AUGUSTYNIAN I. 2006 – Using the DRASTIC System to Assess the Vulnerability to Ground Water to Pollution in Mined Areas of the Upper Silesian Coal Basin. Mine Water and the Environment. Journal of the International Association (IMWA). Tech. Communicat., 25: 15–22.
- BUKOWSKI P., HAŁADUS A., MUNIAK A. 2007 – Monitoring położenia zwierciadła wody w procesie zatapiania wyrobisk górniczych w aspekcie oceny stanu bezpieczeństwa górniczego i powszechnego. Pr. Nauk. GIG, Górniczo i Środowisko, wyd. spec., 3: 127–139.
- BUKOWSKI P., BUKOWSKA M. 2012 – Changes of Some of the Mechanical Properties of Rocks and Rock Mass in Condition of Mining Exploitation and Mine Workings Flooding. AGH J. Min. Geoindeer., 36 (1): 57–67.
- BUKOWSKI P., BUKOWSKA M., RAPANTOVA N., HEMZA P., NIEDBALSKA K. 2019 – Secondary Water Saturation of a Carboniferous Rock Mass in an Abandoned Mines as the Cause Behind the Changes of Geomechanical Conditions and State of Hazards in Active Mines of the Upper Silesian Coal Basin. Proc. of IMWA Conference: Mine Water Technological and Ecological Challenges. Perm, Russia: 3–9.
- BUKOWSKI P., KROGULEC E., HAŁADUS A. 2020 – Charakterystyka głównych geotypów obszarowych ocen podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia. Prz. Geol., 68 (4): 22–232.
- DOBĄK P., DRĄGOWSKI A., FRANKOWSKI Z., FROLIK A., KACZYŃSKI R., KOTYRBA A., PINIŃSKA J., RYBICKI S., WOŹNIAK H. (red.) 2009 – Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich dla celów likwidacji kopalń. MŚ, Warszawa.
- IGNACY D. 2018 – Zarządzanie zawodnieniami terenów górniczych w procesie planowania przestrzennego gmin górniczych. Gospod. Wod., 11: 341–345.
- IGNACY D. 2019 – Zarządzanie zawodnieniami terenów górniczych w procesie napraw szkód górniczych. Gospod. Wod., 4: 7–12.
- MNICH S. 1995 – Wpływ zmian stosunków wodnych w górotworze na przebieg procesu odkształceń powierzchni. Pr. Nauk. GIG, Seria Konfe-

rencje nr 3, pt. Ochrona powierzchni i obiektów budowlanych przed szkodami górniczymi. Wydaw. GIG, Katowice: 229-232.

ROGOŹ M. 2004 – Hydrogeologia kopalniana podstawami hydrogeologii ogólnej. Zespół Wydawnictw i Usług Poligraficznych GIG, Katowice.

SOCHA R. 2020 – Charakterystyka zagrożeń bezpieczeństwa powierzchniowego w strefie nadgranicznej Śląska Cieszyńskiego w kontekście doskonalenia współdziałania służb ratowniczych. [W:] Wróblewski Ł. (red.), Śląsk Cieszyński w świetle wyzwań i zagrożeń XXI wieku, TRANSCARPATICA. Pr. EuroInstytutu Polsko-Czesko-Słowackiego, 7: 43–59.

SZCZEPAŃSKI A. 1998 – Centralny system odwadniania likwidowanych kopalń w NE części GZW. [W:] Przyszłość węgla kamiennego w Europie Środkowowschodniej. Konferencja Programu SYNERGY, kwiecień 1998, GIG, Katowice: 149–180.

SZCZEPAŃSKI A. 2003 – Hydrogeologiczne uwarunkowania i skutki likwidacji zakładów górniczych w Polsce. [W:] Kozerski B., Jaworska-Szulc B. (red.), Współczesne Problemy Hydrogeologii, T. 11, cz. 2. WBWiŚ PG, 221–228.

SZCZEPAŃSKI A. 2005 – Efektywność odwadniania zlikwidowanych kopalń z wykorzystaniem głębinowych agregatów pompowych. [W:] Sadurski A., Krawiec A. (red.), Współczesne Problemy Hydrogeologii, T. 12, Toruń. Wydaw. UMK, 684–694.

WICHUR A., KRYWULT J., GŁAŻEWSKI S. 1996 – Badania nad opracowaniem zabezpieczającego systemu odwadniania górotworu w rejonach likwidowanych kopalń GZW. Budown. Górn. i Tunelowe, nr 1, Katowice.

WICHUR A., KRYWULT J., GŁAŻEWSKI S. 1997 – Założenia techniczno-organizacyjne zabezpieczającego systemu odwadniania górotworu w rejonie likwidowanych kopalń w GZW. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, Miesięcznik WUG, 9: 15–21.

WILK Z. (red.) 2003 – Hydrogeologia polskich złóż kopalni i problemy wodne górnictwa. Część I. Uczelniane Wydaw. Nauk.-Dydakt. AGH., Kraków.

Praca wpłynęła do redakcji 27.02.2024 r.
Akceptowano do druku 19.04.2024 r.