



Szkodliwe oddziaływanie wód w podziemnych kopalniach soli

Damaging water effects in underground salt mines

Dr hab. inż. Grzegorz Kortas^{)}*

Treść: Praca ma charakter przeglądowy, pomija problematykę określonego przepisami górnictwem zagrożenia wodnego kopalń soli, przedstawia głównie szkodliwości spowodowane obecnością wody w wyrobiskach podziemnych polskich kopalń soli. Omówiono geomechaniczne oddziaływania wód w wyrobiskach, w powietrzu kopalnianym i w mieszaninach podporowych wypełniających wyrobiska. Także oddziaływanie zatopionych wyrobisk pod szymbami, odcieków z podsadzki oraz określania długookresowych wpływów zaciskania wyrobisk wypełnionych solanką i podsadzka. Omówiono symptomy i szkodliwe skutki przepływu wilgotnego powietrza przez wyrobiska i spowodowane tym charakterystyczne cykliczne przyrosty odkształceń prowadzące do rozwarstwienia skał w stropach komór. Wskazano na doraźne i długotrwałe skutki przepływów wód przez górotwór i wskazano na konieczność dalszej kontroli wpływów wód z zatopionych podziemnych kopalń soli na tereny górnicze.

Abstract: The paper presents damaging effects of the presence of water in the underground workings, mainly of the underground Wieliczka and Bochnia Salt Mines. The authors identify the water type classification parameters. A description of water hazards in salt mines is presented briefly. The consequences of the presence of water in the underground air and backfill mixes is discussed. The damaging effects of brine basins at the levels located under shafts and of uncontrolled leaks from the floor of the zones of occurrence of the waters penetrating the salt deposit are mentioned. There is also a broader treatment of the hazardous influence of humid air flows through the protected workings of the Wieliczka and Bochnia Salt Mines, leading to several times faster deformations occurring in the chamber ceilings during the summer time. Uncontrolled salt leaching results from unplugged leaks from the rock mass. The author describe the consequences of water encroachment, causing salt mine flooding, as well as considerable damage on land surface. The author identify the need to study the relationship between the flooded workings of the salt mine and the technical condition of the shafts, a long-term influence of the convergence of the workings backfilled with sand on the surroundings of the Wieliczka Salt Mine, and the consequences of seasonal increases of deformations found in the chamber ceilings of the underground salt mines. The authors also suggest the necessity to conduct the observations of water and ground subsidence above the flooded underground salt mines in Inowrocław and Wapno.

Słowa kluczowe:

wody kopalniane, kopalnie soli, wody podsadzki, wilgotne powietrze, zatopione kopalnie

Keywords:

underground waters, salt mines, backfill water, humid air, flooded mines

1. Wstęp

Wody, rozumiane tu szerzej także jako nienasycone solanki, są dobrym rozpuszczalnikiem soli chlorkowych. Dlatego w górnictwie solnym pełnią szczególną rolę. Są użyteczne, ale mogą być również szkodliwe. W podziemnych kopalniach soli wody/solanki pojawiają się w wyniku naturalnych warunków złożowych i działalności górniczej. W aerozolach są składnikiem powietrza kopalnianego, ulegają parowaniu i skraplaniu, wchłaniane są przez skały, zmieniając ich właściwości mechaniczne. Ługując skały solne, urabiają złożę, niosą zawiesiny, tworzą specyficzny mikroklimat, są atrakcją widowiskową. Wyprowadzone na powierzchnię kierowane są na ogół do warzelni lub innych zakładów chemicznych, także do odmrążania dróg.

Wiadomo, że wody w otoczeniu podziemnych kopalń tworzyć mogą zagrożenie wodne. Opisano to w wielu publikacjach, także w ostatnich latach (Górski, Rasała 2008, d'Obyrn 2011, Kortas 2013a). Problem ten w tej pracy nie

jest omawiany. Głównym celem artykułu jest przedstawienie rodzajów wód, ich obecności i oddziaływań na otoczenie, na przykładzie polskich podziemnych kopalń soli. Różnicuje je ich stan, pochodzenie i oddziaływania geomechaniczne na otoczenie i tereny górnicze. Wynikające stąd wnioski sformułowano w poszczególnych rozdziałach i końcowym podsumowaniu.

2. Warunki występowania wód, zagrożenia i zawodnienie wyrobisk

Wody/solanki o różnym stężeniu NaCl pojawiają się w podziemnych kopalniach soli w wyniku naturalnych warunków złożowych i działalności górniczej. Ze względu na źródło wód kopalnianych wyodrębnić można: wody technologiczne służące urabianiu złoża i przenoszeniu mieszanin do wypełnień wyrobisk, wody z przecieków w instalacjach, wycieki czyli wypływy wód z utworów wodonośnych, odcieki z wypełnień wyrobisk oraz wody wprowadzane do wyrobisk z powietrzem atmosferycznym oraz wydychane przez ludzi.

^{*)} Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Kraków

Wody w podziemnych kopalniach spełniają różne funkcje. Służą urabianiu złoża przez ługowanie, czyli rozpuszczanie w wodzie soli zawartej w skałach solnych, są nośnikiem wypełnień wyrobisk, w kopalniach zabytkowych tworzą warunki rekreacyjne oraz atrakcyjne efekty widowskowe. Wyróżnić można różne lokalizacje wód, wskazując na wody w: instalacjach, na drogach przepływu, zbiornikach wód, w wyrobiskach, ale także w skałach oraz w powietrzu kopalnianym. W odrębnym obiegu instalacyjnym występują w niektórych kopalniach także wody komunalne.

Wody/solanki wyróżniają się składem chemicznym i fizycznym, ale podstawowe znaczenie górnicze w wodach kopalnianych kopalń soli ma stężenie NaCl. Ilość wód wyraża się miarami objętości, a przepływu – wydatku. Obecność wody może być systematycznie mierzona, doraźnie identyfikowana lub tylko okazjonalnie stwierdzona. Wodom nadaje się nazwy, określa się ich lokalizację i pozycję przez pomiar, nanosi na mapy, przedstawia w technicznych schematach operacyjnych. W uzasadnionych przypadkach określane są ich cechy fizyczne i chemiczne, ich pochodzenie czy przeznaczenie. Generalnie są przedmiotem działań wynikających z przyjętych w planach ruchu zasad gospodarki wodami i zwalczania zagrożeń (Brudnik i in. 2006).

Obecność wody w wyrobiskach powoduje zawodnienie kopalni, którego wskaźnikiem może być stosunek ilości wód w wyrobiskach do objętości wyrobisk, z pominięciem wód w instalacjach wodnych. Określanie ilościowe zawodnienia, wykonalne na przykład w warunkach Kopalni Kłodawa, jest bardzo trudne dla Kopalni Wieliczka, głównie ze względu na liczną ilość miejsc występowania, niedostępność niektórych zastoisk wód czy nieznanne pochodzenie wód i dróg przepływu.

Naturalne warunki termiczne wpływać mogą znacząco na zawodnienie kopalni i obecność wody w powietrzu kopalnianym. Na dużych głębokościach, na przykład w wyrobiskach dolnych poziomów Kopalni Kłodawa temperatura osiąga 27°C na głębokości 780 m. Znacznie wyższa temperatura występuje w pokładowym złożu soli w Kopalni Soli Sierosowice, gdzie w solach na głębokości 950 m dochodzi do 38°C. W wyrobiskach tej kopalni nie występują szkodliwe zjawiska wodne.

Niezamierzona obecność wód powoduje utrudnienia ruchu górniczego, na przykład z powodu narastania rozlewisk solanki (rys. 1), ale w skrajnym przypadku nieodwracalną degradację wyrobisk czy rejonów kopalń, a nawet ich zatapanie. Sposobem zapobiegania skutkom wdarć wody jest likwidowanie dróg przepływu, tworzenie wodoszczelnych calizn ochronnych, kontrolowanie wypływu poprzez budowanie tam wodnych i likwidacja wypływu. Uszczelnianie górotworu służy powstrzymaniu wypływu wód. Tradycyjnie używano do tego materiałów powiększających objętość pod wpływem wody, na przykład ility. W latach 70. XX w. i następnych do uszczelniania instalacji i izolacji wyrobisk od wód, S. Bujakowski i J. Kielar stosowali zaprawy betonowe z cementów magnezowych z dodatkami. Służyło to zwalczaniu zagrożenia wodnego, zapewniło funkcjonalność ługowni w kopalniach otworowych, a także kawernowych podziemnych magazynach węglowodorów. W rejonie awaryjnego wycieku do poprzeczni Mina w Kopalni Wieliczka, do tamowania przepływu wód przez uszczelnienie górotworu zastosowano tzw. iniektury zawierające zmielony żużel wielkopiecowy i inne składniki o odpowiednio do warunków dobranych właściwościach fizycznych i chemicznych (Gonet i in. 1997, Garlicki i in. 2004). W Kopalni Wieliczka, po zamknięciu wycieków



Rys. 1. Wypływ solanki w poprzeczni Kaniów w kopalni Wieliczka (fot. J.Przybyło)

Fig. 1. Inflow of brine in Kaniów gallery in the Wieliczka Salt Mine (photo J.Przybyło)

w tamach wodnych, wypełnia się profilaktycznie także sąsiednie, okoliczne wyrobiska, zapobiegając skutkom powstania nieszczelności w szerszym otoczeniu likwidowanych dróg przepływu wód.

3. Urabianie złoża wodą, wypływy i skutki obecności wód w wyrobiskach

Obecność wód w kopalniach soli jest skutkiem warunków geologicznych i czynności górniczych, a ich oddziaływanie – właściwości fizycznych i chemicznych. Woda w skałach solnych zawierających minerały ilaste powoduje ich pęcznienie i ułatwia poślizgi, co prowadzi do wzrostu natychmiastowych i długotrwałych przyrostów odkształceń. Po zakończeniu ługowania solanka zawiera na ogół do 300 – 310 kg/m³ NaCl. Dłuższy jej kontakt z solami powodować może jeszcze niewielki wzrost stężenia NaCl. Występujące w złożu sole K i Mg rozpuszczają się w stężonej solance, tworząc ługi o gęstości przekraczającej nawet 400 g/dm³.

Na początku XX wieku ługowanie skał solnych było nowoczesnym sposobem urabiania złoża, następnie krystaliczną sól uzyskiwano w warzelniach. W kopalniach podziemnych rozpuszczając złoże dynamicznie (natryskowo) i statycznie (przez wypełnianie), drążono chodniki i formowano komory ługownicze. W wysadzie solnym w Inowrocławiu, pod zatopioną w 1907 r. komorowo-filarową Kopalnią Kronprinz, od lat 20. XX wieku w ten sposób powstawała regularna geometrycznie siedmiopoziomowa struktura komorowo-filarowej Kopalni Solno. W latach 1986 – 1992 kopalnia ta została planowo zatopiona.

W Kopalni Wieliczka ługownie powstawały w drugiej połowie XX w centralnym rejonie kopalni, potem głównie w wschodniej części złoża. Zakładano je w nie zawsze regularnie wykształconych skupiskach skał solnych, także o różnej podatności na rozpuszczanie. W tych warunkach dotrzymanie zakładanych wymiarów wyrobisk było trudne, powstawały niezamierzone rozługowania i w następstwie niekontrolowane obwały. Spowodowany eksploatacją ługowniczą wzrost wykorzystania złoża i jednocześnie zawilgocenia kopalni zaznaczał się zwiększeniem tempa zaciskania wyrobisk. W okresie tym nastąpił wyraźny wzrost prędkości obniżen terenu (Kortas 2007).

W ten sposób, okresowo urabiano także złoże w Kopalni Bochnia. Mimo tych doświadczeń, tak również zamierzano eksploatować złoże soli Siedlec – Moszczenia k. Bochni. Ze względu jednak na nadmierne koszty, pierwsze wyrobiska, szyby i główne przekopy nowo budowanej kopalni już po kilku latach zostały zlikwidowane przez zatopienie solanką uzyskaną w sąsiedniej otworowej Kopalni Soli Łęzkowice.

Wypływy wód/solanek w podziemnych kopalniach soli to przede wszystkim: przecieki w instalacjach, odcieki z podsadzki i wycieki z górotworu. Przecieki mogą pojawić się w czynnych i porzuconych instalacjach, ujęciach i zastoiskach wód. Wody z przecieków spływały grawitacyjnie na dolne poziomy, tworząc w różnych miejscach rozlewiska. Drogi niekontrolowanego spływu wód prowadziły przez wyrobiska, szczeliny złożowe, spowodowane odkształceniami spękania, rozmycia skał, opróżnione zbiorniki płynów złożowych, także niedostępne zroby, porzucone wyrobiska, fragmenty kasztołów i innych obudów czy nieczynne odcinki instalacji. Na ogół ich źródło i drogi spływu są zawsze trudne lub nawet niemożliwe do lokalizacji, kontroli przepływu i skutecznej likwidacji. W końcowym rozlewisku pojawia się na ogół nasycona solanka. Jej parowanie prowadzi do przesylenia roztworu NaCl. Wtedy na spągu i ścianach czy zatopionym drewnie i metalowych odpadach narastają niekiedy efektowne skupiska

kryształów solnych, które po spadku stężenia soli spowodowanym dopływem wody ulegały rozmyciu.

Odcieki z podsadzki zwracane są na ogół do instalacji podsadzkowej. Bilans doprowadzanej i odprowadzanej wody określa jej część pozostającą w wyrobiskach i potem rozplywającą się, na ogół w sposób niekontrolowany. Nieujęte odcieki nawadniają mogą skały i podobnie jak przecieki – spływać do wyrobisk na niższych poziomach. Sytuacja taka wystąpić może w przyszłości w warunkach analogicznych do rejonu podłużni Regis na VII poziomie, gdzie odcieki z podsadzki w komorach Reszner – Bilinski i wycieki wód spoza złoża są obecnie niemożliwe do rozróżnienia.

Wyciekami w kopalniach soli określa się wypływy wody/solanki z górotworu lub z otworów wiertniczych przejawiające się zawilgoceniem, narastaniem kryształów, kożuchów solnych czy wypływów o różnym natężeniu, składzie fizycznym i chemicznym. Wycieki pojawiają się, gdy wyrobisko lub otwór wiertniczy naruszy naturalne drogi migracji wód czy prowadzącą do nich strefę spękań złożowych. W tym odkształcenia i szczeliny, spowodowane postępującą z upływem czasu degradacją pól górniczych, starzeniem się wypełnień w zlikwidowanych otworach wiertniczych oraz szybko postępującej w kontakcie z solą korozją rur wiertniczych. Dlatego wody w wyciekach powiązane mogą być ze zbiornikami wód znajdującym się nawet w znacznym oddaleniu od obserwowanego miejsca wypływu.

Wypływy ze szczelin i zbiorników złożowych wód reliktowych, ługów macierzystych, szczątkowych czy wód paleo-infiltracyjnych wyróżniają się na ogół wysokim stężeniem soli, obecnością Mg i K oraz znacznym początkowym wydatkiem, potem dość szybkim spadkiem. W kopalniach Wapno, Solno i Kłodawa, eksploatujących wysady solne, wypływy takie zdarzały się często przy otwieraniu nowych poziomów czy pól górniczych. Niebezpieczne wycieki, tworzące zagrożenie wodne w kopalniach soli, charakteryzuje na ogół długotrwały spadek stężenia NaCl przy wzrastającym wydatku wypływu. Objawy takie wskazują na ogół na możliwy kontakt wycieku z wodami pozazłożowymi.

Wycieki klasyfikowane są na ogół według wydatku wypływu. W Kopalni Kłodawa, na przykład w 2010 r. wykryto łącznie 132 zawilgocenia, wycieki kropłowe i tylko 10 wypływów. W wyrobiskach występowało 85 zjawisk wodnych, inne w otworach wiertniczych. Badania izotopowe wskazały wtedy, że już po utworzeniu pól górniczych większość z tych wycieków prowadziła wody reliktowe, powiązane z procesem tworzenia się złoża.

W strefach wypływu solanek z wycieków, przecieków czy odcieków tworzyć się mogą charakterystyczne skupiska osadzającej się soli, na przykład w formie stalaktytów. Wzmożony powierzchniowy wypływ solanki ujawnia się także w postaci wykwitów solnych. Ich przyrosty i wilgotność zależy od wydatku dopływu i powierzchni wypływu, stężenia solanki oraz prędkości przepływającego powietrza przez wyrobiska. Ze względu na nieregularność kształtu narostów, określenie na tej podstawie ilości dopływów jest trudne, praktycznie niemożliwe.

Ekstremalnym wyciekami jest awaryjny wypływ. Takie zdarzenia w kopalniach soli występowały wielokrotnie i na ogół kończyły się ich opanowaniem, ale tylko wyjątkowo całkowitym zanikiem wypływu. Awaryjne wypływy obserwował Autor w szybach kopalń Wapno i Solno, czy w polu 4 w Kopalni Kłodawa, w Kopalni Wieliczka, w 1973 r. po wdarciu wód w rejonie komory Z-32, potem w 1992 r. w poprzeczni Mina. Szczególnym dla Autora był wypływ na najwyższym czynnym poziomie Kopalni Soli Wapno, w ostatnim tygodniu czerwca w 1977 r. Przejawiał się intensywnym deszczem

solankowym ze stropów kilku komór i zbiorczymi potokami solanki. Zjawisko to zapowiadało nieuchronną katastrofę wodną, która nastąpiła kilka tygodni później.

4. Wpływ obecności wody w powietrzu kopalnianym na skały solne

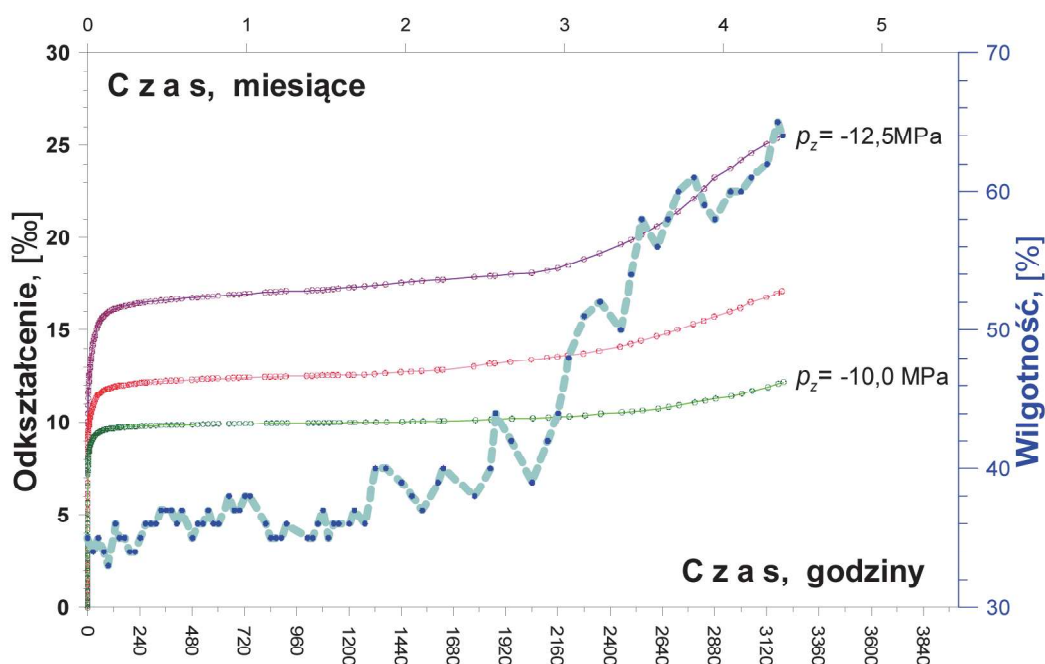
Woda w niektórych kopalniach soli pochodzi głównie z wilgotnego powietrza atmosferycznego. Na przykład w Kopalni Kłodawa w 2010 r. 83% całkowitego dopływu wód do wyrobisk o objętości 310 m³ pochodziło z powietrza atmosferycznego, a tylko 17% z wycieków kopalnianych. Na zawilgocenie powietrza kopalnianego wpływa również woda odparowana z wypełnień czy zbiorników wód, a w kopalniach Wieliczka i Bochnia – para wydychana przez turystów, kuracjuszy i inne przebywające w kopalni osoby, w 2017 roku w Kopalni Wieliczka 1,8 mln., a w Kopalni Bochni 0,19 mln. Zawartość wody w powietrzu określać można wilgotnością względną odnoszoną do wilgotności nasycenia, zależnej od temperatury i ciśnienia powietrza. Po przekroczeniu punktu rosy – woda skrapla się. Ze wzrostem temperatury w okresie letnim, zawartość wprowadzanej wody z powietrzem wzrasta i spada w sezonie zimowym. Z głębokością wyrobisk rośnie ciśnienie i temperatura. Skroplona woda atmosferyczna w szybach spływa do rzepi i jest z nich odprowadzana rurociągami.

Wilgotne powietrze przepływając przez wyrobiska w solach kamiennych osusza się, oddziałuje mechanicznie i chemicznie. Woda absorbowana jest przez skały solne i spływając grawitacyjnie dosyca się. Im szybszy przepływ powietrza, większa wilgotność i mniejsze stężenie NaCl w niesionych wodach, spowodowane tym odługowania skał są większe. Wilgotne powietrze, opływając figury, płaskorzeźby czy skupiska kryształów solnych powoduje ich niszczenie. W Kopalni Wieliczka szkody takie wystąpiły na przykład w kaplicy Św. Antoniego i w Grotach Kryształowych. Określenie warunków klimatycznych w rejonie Parku Krajobrazowego z Grotami Kryształowymi i sposób ich regulacji był przedmiotem prac badawczych i projektowych.

Pomimo absorbowania wody przez calizny solne, przepływ powietrza w wyrobiskach trasy turystycznej w kopalniach Wieliczka i Bochnia, powoduje wzrost ilości wody w powietrzu. Przyczyną tego jest przede wszystkim ruch turystyczny. Dla regulowania temperatury i wilgotności powietrza w Kopalni Wieliczka założono instalacje klimatyczne przy szybach wdechowych Kinga i Regis, zapewniając stałe kondycjonowanie powietrza wprowadzanego do wyrobisk trasy turystycznej, a oddzielana woda odprowadzana jest do instalacji wodnej. Odwodnione powietrze ma temperaturę 18°C, przy szybach wilgotność około 42%. Mimo absorbowania wody przez skały solne w nieobudowanych wyrobiskach, w szybach wydechowych Kościuszko i Wilson w Kopalni Wieliczka rejestruje się wzrost średniej wilgotności względnej powietrza, odpowiednio 64% i 67%.

Obecność wody w skałach solnych wpływa znacząco na ich właściwości odkształceniowe. W laboratorium OBR Chemkop badano wpływ wody w powietrzu otaczającym próbki soli na proces ich odkształcania. W teście pełzania próbki skał solnych poddano stałym jednoosiowym obciążeniom osiowym $p_z = -10$ MPa i $-12,5$ MPa. Okazało się, że przy takich naprężeniach w wilgotnym powietrzu w otoczeniu próbek znacząco wzrastała prędkość ich odkształcania (rys. 2).

Wzrost wilgotności względnej powietrza w otoczeniu próbek z 38% do 65% powodował aż około 10-krotny wzrost prędkości pełzania. Przyczyną tego był spadek modułu odkształceń i wzrost podatności na pełzanie, spowodowany sorpcją wody. Szczególnie wrażliwe na obecność wody są skały solne zawierające ility. Mechanizm fizyczny tego zjawiska wynika z charakterystycznej reakcji odkształceniowej na stan naprężeń, przejawiającej się procesem cyklicznych efektów obejmujących: pokonywaniem oporów tarcia w mikrospekaniach skał, zmianami objętościowymi wywołanymi nawadnianiem i osuszeniem, posunięciami pod wpływem naprężeń i zatrzymywaniem ruchu w wyniku tarcia. Proces ten *in situ* wyraźnie sygnalizują przemieszczenia obserwowane czujnikami w komorze Pieskowa Skała w Kopalni Wieliczka (Kortas 2013a). Ponieważ wchłanianie wody



Rys. 2. Wpływ wilgotności powietrza na pełzanie próbek pod jednoosiowym obciążeniem (Maj 2012)
Fig. 2. Influence of air humidity on the creep of samples under uniaxial loading (Maj 2012)

i osuszanie skał solnych tak znacznie wpływa na natychmiastowe i reologiczne właściwości odkształceniowe utworów solnych, laboratoryjne oznaczanie wpływu wilgotności na proces pełzania powinno być rozpoznane dla typowych kilku rodzajów skał solnych występujących w otoczeniu szczególnie chronionych wyrobisk.

Temperatura i wilgotność powietrza w naszym klimacie zmienia się sezonowo. W okresach zima/lato także znacznie różnicuje się intensywność ruchu turystycznego. W tym rytmie rejestruje się wyraźnie zmiany prędkości przemieszczeń stropów komór w Kopalni Wieliczka oraz konwergencji w komorach Ważyn i w Kaplicy św. Kingi w Kopalni Bochnia (Kortas 2004, 2013a). Ponieważ w obu kopalniach w obrębie tras turystycznych utrzymywana jest stała temperatura, przyczyną obserwowanego zjawiska jest zmienna okresowo wilgotność powietrza. Wskaźnikiem tego związku niech będzie wielkość w , określona stosunkiem prędkości przemieszczeń calizn w okresach letnich do zimowych. Nawet przy bardzo małych wartościach przyrostów przemieszczeń, jakie obserwuje się w stropie Kaplicy Św. Kingi w Kopalni Wieliczka, wskaźnik w osiągał wartość 3,9, a w stropie komory Warszawa 5,5. Ponieważ ilość wydychanej pary wodnej jest proporcjonalna do liczby osób w wyrobiskach, zasadniczą przyczyną wzrostu wilgotności powietrza w okresie letnim jest wzmożony ruch turystyczny.

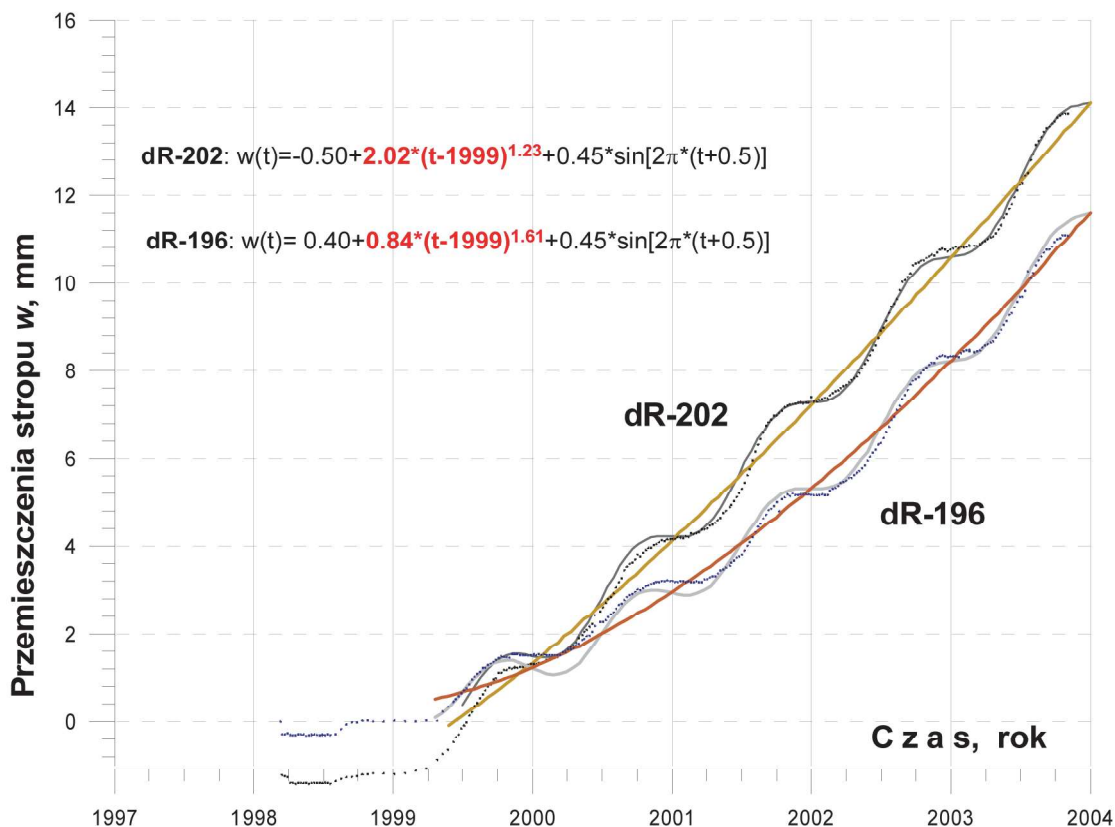
Inne, krótkookresowe zmiany prędkości zaciskania wyrobisk, na przykład dzień/noc czy wpływy okazjonalnych, znacznych zgromadzeń osób w komorach nie są badane. Ze względu na szkodliwość nadmiernych odkształceń skał, szczególnie chronionych wyrobisk, na przykład komory Św. Kingi w Kopalni Wieliczka, powinno zapewniać utrzymanie dopuszczalnej, bezpiecznej wilgotności powietrza. Osiągnąć to można na dwa proste sposoby: poprzez ograniczenie licz-

by jednocześnie obecnych w komorze osób lub dodatkową, automatycznie uruchamiającą się miejscową klimatyzację z progowym parametrem wilgotności powietrza w komorze.

Cykliczne wzrosty przemieszczeń zarejestrowano szczególnie wyraźnie w komorze Pompowni w Kopalni Wieliczka (rys. 3). Wskaźnik w osiągał tam w okresie od 1999 r. – 2004 r. wartość 6,1. Rejestrowany ruch górotworu wykazuje charakterystyczną regularność, ujawniając stałą wieloletnią tendencję ruchu. Analiza wskazuje, że obniżenia stropu aproksymuje suma funkcji potęgowej – określającej trend wieloletni i funkcji okresowej – określającej zmiany sezonowe. Jeżeli $w > 1$, to funkcja trendu opisuje tendencję wzrostu prędkości obniżenia stropu (rys. 4). Utrzymywanie znacznych wartości w w dłuższym czasie jest sygnałem narastania niebezpieczeństwa.

Wyniki omawianych obserwacji ruchu w stropach komór określają przyrosty odcinka 10 m pionowej bazy pomiarowej. Zróżnicowanie litologiczne skał stropowych na tym odcinku czy początkowe nieciągłości powodować mogą szkodliwe skupienie odkształceń w pobliżu stropu w rozciągłości płaszczyzny równoległej do powierzchni stropu komory. Powodować mogą także otworzenie kontaktu z solankami w górotworze, powodując namakanie skał, wzrost prędkości ruchu, czy wypływ solanki, ujawniający się także narostami soli, na przykład w miejscach założonych kotew. Ze względu na znaczenie takich obserwacji dla stanu bezpieczeństwa, wyniki pomiarów powinny być okresowo wnikliwie i obiektywnie analizowane i interpretowane.

Zakończenie wydobywania soli, szczególnie szkodliwej eksploatacji ługowniczej, osuszanie powietrza kopalnianego i ograniczanie jego przepływów przez stare zroby w Kopalni Wieliczka w latach 90. XX w., wpłynęło znacząco na spadek tempa zaciskania wyrobisk. Zaznacza się to wyraźnie w obniżeniach terenowych punktów obserwacyjnych na powierzchni



Rys. 3. Przemieszczenia czujników w stropie komory Pompownia w Kopalni Wieliczka i ich aproksymacje (Kortas 2013a)

Fig. 3. Displacements of the ceiling sensors in the Pompownia room in the Wieliczka Salt Mine, with its approximations (Kortas 2013a)

terenu. Maksymalne prędkości obniżenia, poprzednio 45 mm/rok w rejonie szybu Kościuszko, obecnie zmniejszyły się dwukrotnie. Także analiza wieloletnich pomiarów w Kopalni Bochnia wykazała, że przebudowy, kotwienie i osuszanie powietrza spowodowały po 2004 r. korzystne dla utrzymania zabytkowych komór odwrócenie trendu przyrostu prędkości konwergencji.

5. Oddziaływanie wód na górotwór w likwidowanych strefach kopalni

Porzucone wyrobiska – stare zroby, nieczynne części struktury komorowo-filarowej ulegają obwałom i powolnemu zaciskaniu. Stają się uciążliwe, niedostępne i mogą być źródłem zagrożeń górniczych czy szkód górniczych. W Kopalni Wieliczka w XIX w. i potem w drugiej połowie XX wieku, rozległe, usytuowane blisko powierzchni komory uznane za zagrażające zawałem sięgającym do powierzchni terenu, wypełniano piaskiem „na sucho”. Obecnie nieobjęte ochroną konserwatorską komory i brzeżne rejonry Kopalni likwidowane były „na mokro”, wypełniając wyrobiska mieszaniną piasków i solanki. Z powodu powolnego zaciskania wyrobisk, ze względu na małe głębokości i niewielkie wykorzystanie przestrzeni górniczej spodziewać się należy bardzo długiego okresu czasu zaciskania wypełnionych komór. W początkowym jednak okresie, wchłanianie przez skały wprowadzanej z piaskami wody, powodować może w otoczeniu wypełnianej komory wzrost prędkości odkształceń (Maj 2018). Długotrwały wpływ tak likwidowanych wyrobisk może być szkodliwy dla zabytkowych komór w części centralnej Kopalni.

Główne zlewnie, zbiorniki wód kopalnianych zakładane są we wszystkich kopalniach na najniższym poziomie.

W kopalniach soli wprowadzanie do nich nienasyconych solanek, także z kondensacji pary wodnej w szybach, powoduje rozpuszczanie calizn solnych. Przy przepelnieniach nienasycona solanka powoduje rozługowania, na kontakcie lustra wody ze stropem poszerza jego powierzchnię. W trybie awaryjnym, z konieczności do wyrobisk najniższego IX poziomu Kopalni Wieliczka, skierowane zostały awaryjne wypływy wody z wycieku w poprzeczni Mina w 1992 r. (rys. 4). Obecnie taki zbiornik na IX poziomie jest w fazie likwidacji poprzez wypełnianie iniektem.

W Kopalni Bochnia, wyrobiska poniżej poziomu Gołuchowski stanowiły większość wyrobisk Kopalni. Zostały zlikwidowane w końcowych latach XX wieku przez wypełnienie ich solanką z piaskiem i częściowo odpadowym urobkiem. Tak powstała przestrzeń wielopoziomowego zbiornika do głębokości przekraczającej 400 m z chodnikami, komorami i wewnętrznymi caliznami. Nad wypełnieniem pod stropem występuje warstwa solanki. Średnie ciśnienie we wnętrzu zbiornika rośnie z głębokością, w przybliżeniu proporcjonalnie z odległością pionową od stropu zbiornika. Natomiast w skałach na zewnątrz – występują ciśnienia o wartościach rosnących proporcjonalnie z głębokością. Podatność na pęcznienie skał z frakcją ilastą przy oddziaływaniu różnic tych ciśnień, są głównym czynnikiem wywołującym wzmożoną konwergencję objętościową. Mierzalnym jej przejawem jest podnoszenie się poziomu zwierciadła solanki w stropie zatopionych wyrobisk. Z postępującą obecnie konwergencją objętościową tych wyrobisk powiązane są obniżenia stropu oraz nadległych skał. Prędkość maksymalnych obniżenia na najniższym czynnym poziomie przekracza 30 mm/rok, ale na powierzchni terenu jest ok. trzykrotnie mniejsza. Skutkiem tego jest narastanie pionowych odkształceń rozciągających.

Podobne zjawisko występuje także w Kopalni Wieliczka, a jego przejawem jest rozwój rozległych szczelin o prawie



Rys. 4. Pochylnia Centralna z poz. VIII na poz. IX zalana w 1992 r. awaryjnymi wodami z pop. Mina w 1992 r. (fot. J. Przybyło)

Fig. 4. Central gallery on VIII level flooded in 1992 y. by catastrophic water from Mina gallery (photo J. Przybyło)

poziomej rozciągłości. Jest to szczególnie szkodliwe dla nieodpornej na to obudowy szybów w obu kopalniach, co prowadzi do konieczności ich okresowych napraw. Sposobem utrzymania długotrwałej funkcjonalności szybów powinno być opanowanie szkodliwej konwergencji w wyrobiskach pod szybami.

6. Długotrwałe ruchy terenów i wyrobisk spowodowane wdarciem wód do wyrobisk

Wdarcia wód do kopalń soli zawsze są szkodliwe (Zuber i in. 2000, Poborska-Młynarska 2017), dramatyczne, wtedy gdy prowadzą do zatopienia podziemnych kopalń czy znacznych zniszczeń na powierzchni terenu. Problem długotrwałych oddziaływań na tereny i wody podziemne zatopionych kopalń soli nie jest uregulowany przepisami prawnymi.

Katastrofy górnicze występowały prawie we wszystkich krajach pozyskujących sole w podziemnych kopalniach. Szczególnie dotkliwie było wdarcie wód do Kopalni Kronprinz w Inowrocławiu, powodując katastrofalne jej zatopienie w 1907 r. Potem, aż do 1933 r. szkodliwe było niekontrolowane intensywne czzerpanie solanki z zatopionych wyrobisk i proces rozługowań pod zabudową miasta. Sutkiem tego były zapadliska, deformacje powierzchni terenu i zniszczenia zabudowy miasta (Budryk 1933). Planowe, bezpieczne zatopienie Kopalni Solno w Inowrocławiu o objętości wyrobisk 19 mln m³ zakończono w 1992 r. (Kortas 1997). Mimo nadal występujących w Inowrocławiu zagrożeń budowlanych ze względu na naturalne kawerny w czapie wysadu i w dłuższej perspektywie także wpływów pogórnicych, w 1994 r. obserwacje terenów zostały wstrzymane. Na konieczność ich kontynuacji wskazuje raport Najwyższej Izby Kontroli (Wiceprezes... 2009).

Katastrofalne wdarcie wody do Kopalni Soli Wapno k. Wągrowca w 1977 r. doprowadziło do niekontrolowanego przepływu 2,5 mln m³ wody przez półkę solną (Ślizowski, Kortas 1980). Powstały wtedy znaczne obniżenia powierzchni terenu oraz zapadliska, największe o głębokości 10 m, nad miejscem wdarcia wód. Zniszczeniu uległo 40 domów, drogi i torowiska linii kolejowej. W trakcie zatapiania Kopalni, szybkie uruchomienie dopływu przez szyby kopalniane 3,3 mln m³ wody z jeziora Czeszewskiego, znacznie ograniczyło skutki niekontrolowanego przepływu wód. Obecnie, nadal występują obniżenia na powierzchni terenu, maksymalnie z prędkością kilku mm/rok.

Awaryjne wdarcie wód do poprzeczni Mina w Kopalni Wieliczka w 1992 r. spowodowało obniżenia terenu, maksymalne 2,5 m, uszkadzając linię kolejową, zabudowania klasztoru i kilku domów (Kortas 2001). Po przeprowadzeniu iniekcji w strefie spływu wód przy tamie, wyciek został zamknięty w 2007 r. Strefę odwodnionego górotworu po uszczelnieniach wypełnia teraz woda, kończąc przywracanie naturalnych warunków hydrogeologicznych.

Zatopienie wyrobisk, czy nawodnienie górotworu zmienia stan naprężenia w caliznach. Pojawia się wtedy wszechstronne hydrostatyczne parcie o wartościach proporcjonalnych do głębokości. Reakcją odkształceniową na nowy stan naprężeń jest zaciskanie calizn i podnoszenie nadległych skał. Obserwowana na nadległych horyzontach rewersja przemieszczeń, czyli przejście z obniżen do wypiętrzeń, pojawia się na ogół z zachowaniem podobnych do osiadań rozkładów przemieszczeń pionowych, ale z przeciwnym znakiem. Zjawisko to obserwowane było wyraźnie na najwyższym 1 poziomie Kopalni Solno już w trakcie kontrolowanego jej zatapiania. Maksymalne wypiętrzenie po zatopieniu 2 i niższych poziomów osiągnęło tam wtedy wartość maksymalną +80 mm. Po zakończeniu zatapiania Kopalni precyzyjne pomiary

niwelacyjne w latach 1992 - 1994 wykazały w tym okresie maksymalne podniesienia terenu o +2 mm.

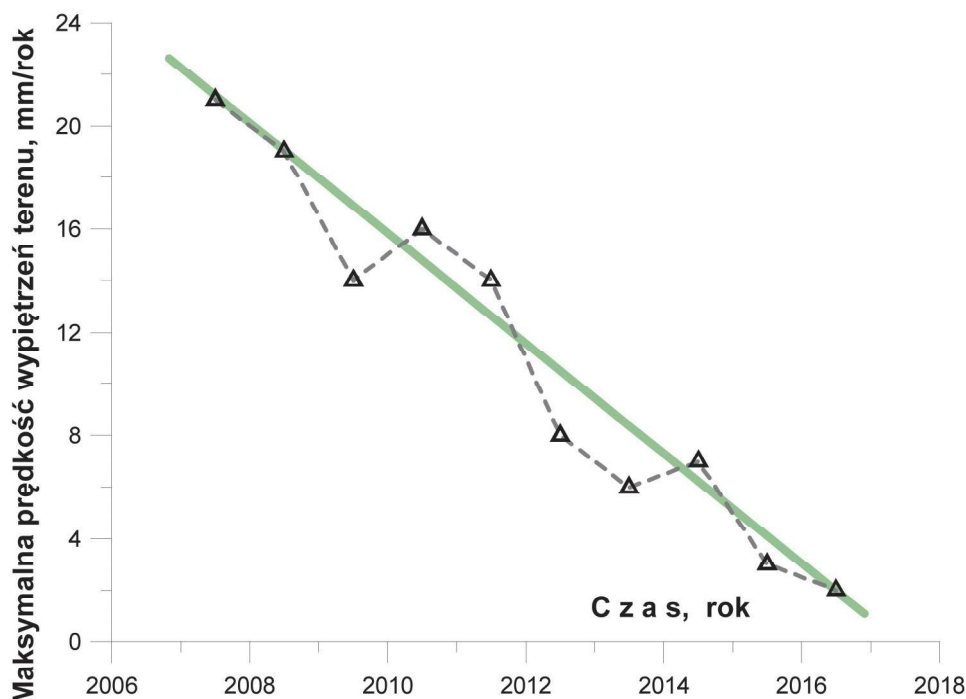
Rewersja przemieszczeń pionowych na powierzchni terenu wystąpiła także w Wapnie. W trakcie wypełniania wyrobisk, wypiętrzenia osiągały tam okresowo wartość nawet +40 mm, co było skutkiem szybkiego w trybie awarii wypełniania wyrobisk. W następnych latach prędkość osiadań zmniejszała się. Pomiary przemieszczeń terenu nad zatopioną Kopalnią wykazywały w 2012 r. obniżenia dochodzące do 4 mm/rok (Kortas, Maj 2014), co nie wyklucza możliwości wystąpienia w przyszłości większych ruchów terenów.

Zamknięcie wypływu w poprzeczni Mina w Kopalni Wieliczka spowodowało podnoszenie poziomu wód w obrębie zanikającego leja depresji wód i rosnące podparcie hydrauliczne poprzednio odwodnionych pustek krasowych i po wymyciach spowodowanych przepływem wód. Skutkiem zmian naprężeń w caliznach była rewersja przemieszczeń pionowych na powierzchni terenu. Największe podniesienie poziomu wód i przyrost wypiętrzeń wystąpiły po zamknięciu wycieku w miejscu poprzednich maksymalnych osiadań. Przeprowadzane corocznie precyzyjne pomiary geodezyjne (Ulmaniec i in. 2017), wykazały stopniowe zmniejszanie się prędkości wypiętrzeń w następnych latach. Zanikanie wypiętrzeń nie jest jednak regularne (rys. 5). Przyczyną tego może być nierównomierne rozmieszczenie szczelin, kawern, rozmyć, lokalnie izolowanych przez pęcznienie ponownie nawadnianych utworów ilastych (Maj i in. 2012) oraz przeprowadzane iniekcje. Także pod wpływem rosnącego ciśnienia po otwarciu przepływu wód do niewypełnionych jeszcze stref górotworu. Średni spadek prędkości maksymalnych wypiętrzeń w okresie 10 lat osiągał 2,1 mm/rok.

W zatopionych kopalniach soli w wysadach solnych, w nasyconej NaCl solance postępować będzie nadal rozpuszczanie utworów zawierających sole K i Mg. W wysadach solnych, na przykład w Wapnie, utwory te wykształcone są w formie pionowej warstwy. Ponieważ chłodniejsze i gęściejsze (ze względu na obecność w roztworze soli K i Mg) solanki spływać będą ku dołowi, do stropu dopływać będzie nienasycona tymi jonami, lżejsza i cieplejsza solanka. Proces ten doprowadzić może do całkowitego rozpuszczenia tych utworów w solance. Wzrost zawartości jonów K i Mg na najwyższym poziomie obserwowany był po zatopieniu Kopalni w Wapnie, pobierając okresowo solankę poprzez sondowanie w otworze L1. Ze względu na niemożliwe obecnie do określenia tempo, zasięg i szkodliwość takiego procesu, zjawisko to powinno być zbadane.

Zatopienie kopalń soli w Inowrocławiu i Wapnie nie eliminuje, ale tylko znacznie ogranicza oddziaływania tych kopalń na powierzchnię terenu. Ponieważ wyrobiska wypełnione są cieczą, a nie skałami z obwałów czy mieszaninami podsadzkowymi (jak na przykład w likwidowanych wyrobiskach kopalń węgla kamiennego), nadal postępować będzie powolny proces ich zaciskania. Skutkiem tego będzie wytłaczanie solanki do górotworu i powiązane z tym niewielkie, ale długotrwałe obniżenie terenów. Obecnie nie wiemy z jaką prędkością narastają obniżenia i jak szkodliwy dla horyzontów wodnych i zabudowy terenu jest ten proces. Aby to w przyszłości określić, istniejąca jeszcze sieć znaków obserwacyjnych powinna podlegać zachowaniu i ochronie, szczególnie w obrębie miasta Inowrocław.

Symptodem szkodliwości zaciskania wyrobisk jest także trudny do określenia wzrost zasolenia wód podziemnych w otoczeniu zatopionych kopalń. Ilość wypływu solanki z zaciskanych wyrobisk można jednak pośrednio określić na podstawie pomiaru przyrostów przemieszczeń w wykształcającej się obecnie niecce obniżeń terenu.



Rys. 5. Wypiętrzenia terenu w Wieliczce po zamknięciu wycieku w poprzeczni Mina (dane liczbowe: Ulmaniec i in. 2017)

Fig. 5. The ground surface uplift after closure of water inflow in Mina gallery in the Wieliczka Salt Mine (data of Ulmaniec i in. 2017)

7. Podsumowanie i wnioski

- Praca przeglądowo przedstawia problem uciążliwości i szkodliwości, spowodowanych obecnością i przepływem wód/solanek w wyrobiskach podziemnych kopalń soli. Wskazano na funkcje wód, warunki i objawy ich oddziaływania, szkodliwość wilgotnego powietrza, zaciśnięcia zbiorników solanek pod szybami oraz zatopionych kopalń soli na zabudowane tereny. W tym ujęciu artykuł jest pierwszą pracą poświęconą tak ujętej problematyce.
- Wody w powietrzu kopalnianym znacząco oddziałują na górotwór solny, szczególnie na skały zawierające minerały ilaste, powodując ich zwiększone odkształcenia. Prowadzi to także do rozwoju rozwarstwień na kontakcie różnych skał, szczególnie niebezpiecznym w stropach komór i uciążliwym w ich spągach. W kopalniach Wieliczka i Bochnia oddziaływania te są wielokrotnie większe w okresie wzrostu natężenia ruchu turystycznego w okresie letnim. W szczególnie chronionych komorach i rejonach skutki zawilgocenia ograniczyć można przez dodatkowo automatycznie włączając się miejscową klimatyzację.
- Okresowe określanie ilości wód w instalacjach, wyciekach złożowych, w wyrobiskach czy w powietrzu kopalnianym pozwala oszacować ich wpływ na stan zawodnienia kopalni. Badania takie mogą być potrzebne dla kontroli warunków długotrwałego i bezpiecznego zachowania zabytkowych wyrobisk kopalń soli.
- Zgodnie z raportem NIK, w Inowrocławiu powinna zostać przeprowadzona kontrola wód w wyrobiskach oraz następnym po 1994 r. pomiar osiadań terenu spowodowanych wpływami: niekorzystnych warunków geologicznych, awaryjnie zatopionych wyrobisk podziemnej Kopalni Kronprinz, rozługowań po niekontrolowanym czerpaniu solanek i planowo zlikwidowanej w 1992 r. Kopalni Solno. Wyniki tych pomiarów powinny służyć ocenie długookresowej perspektywy bezpiecznej zabudowy miasta.

- Przemieszczenia powierzchni nad zatopioną awaryjnie Kopalnią Soli w Wapnie k. Wągrowca powinny być kontrolowane, obecnie w znacznie uproszczonym zakresie, tylko przez wycinkowy pomiar osiadań terenu w rejonie zabudowy przy największym zapadlisku terenu.

Literatura

- BRUDNIK K., PRZYBYŁO J., WINID B. 2006 - Zawodnienie złoża soli Wieliczka na podstawie stanu wycieków kopalnianych. „Wiertnictwo Nafta Gaz” t. 23/1, s. 101-109.
- BUDRYK W. 1933 - Zapadliska na terenie miasta Inowrocław. „Przeгляд Górnictwo-Hutniczy” t. 25, nr 8, s. 431-444.
- DULIŃSKI M., GARLICKI A., GRABARCZYK J., ZUBER A. 1997 - Badania izotopowe pochodzenia wód w polskich kopalniach. Naturalne zagrożenia w kopalniach soli. Materiały z IV Spotkania PSGS, Ślesin 16-18.10.1997, s. 16-27.
- d'OBYRN K. 2011 - The analysis of destructive water infiltration into the Wieliczka Salt Mine – a unique UNESCO site. Geological Quarterly. No. 56 (1), s. 85-94.
- GARLICKI A., GONETA A., STRYCZEK S. 2004 - Target model for protecting the Wieliczka salt mine after a disastrous water influx in 1992. Proc. of the ISRM Inter. Symposium 3-rd ARMS, Kyoto Japonia.
- GONETA A., BRUDNIK K., STRYCZEK S. 1997 - Zabezpieczenie Kopalni Soli Wieliczka przed zagrożeniem wodnym w otoczeniu poprzeczni „Mina”. „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” nr 12.
- GÓRSKI J., RASALA M. 2008 - Hydrogeologia wybranych wysadów solnych regionu kujawskiego – aspekty poznawcze i użytkowe. GEOLOGOS 13 (2008), Monographiae 5. UAM Poznań, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, s. 152.
- KORTAS G. 1982 - Model stanu zagrożenia wodnego kopalń soli. „Archiwum Górnictwa” t. 27, z. 1-2, s. 57-89.
- KORTAS G. 1997 - Wpływy eksploatacji górniczej w Inowrocławiu na powierzchnię. „Przeгляд Górnictwo” nr 4, s. 7-15.

- KORTAS G. 2001 - Kształtowanie się zagrożeń i warunki przywrócenia ruchu kolejowego w Wieliczce po wdarciu wód do kopalni w 1992 r. Materiały Sympozjum „Warsztaty 2001” nt. Zagrożeń naturalnych w górnictwie. Wieliczka, 29.05-1.06.2001, s. 353-365.
- KORTAS G. (red.). 2004 - Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalni soli. Wydawnictwo IGSMiE PAN. Kraków. s. 23-44, 46-90.
- KORTAS G. 2007 - Przemieszczenia powierzchni nad historyczną kopalnią w Wieliczce. „Przeгляд Górnicy” nr 3, s. 4-12.
- KORTAS G. 2013a - Long- and Short-Term Process Indicated by the Displacement of the Chamber Roof in the Monumental Wieliczka Salt Mine. Archives of Mining Sciences. Vol. 58, Iss. 1, s. 119-130.
- KORTAS G. 2013b - Zagrożenie wodne w polskich podziemnych kopalniach soli. „Przeгляд Górnicy” nr 5, s. 83-88.
- KORTAS G., MAJ A. 2014 - Deformations of the protection shelf in the “Wapno” salt mine, based on model studies. Archives of Mining Sciences. Vol. 59, Iss. 4, s. 869-886.
- MAJ A. 2012 - Convergence of Gallery Workings in Underground Salt Mines. Archives of Mining Sciences. Monograph. No. 14, s. 111.
- MAJ A. 2018 - Przemieszczenia ścian wyrobiska komorowego w skałach solnych spowodowane jego wypełnieniem. „Przeгляд Górnicy” nr 12, s. 15-19.
- MAJ A., KORTAS G., ULMANIEC P. 2012 - Ground uplift after the closure of water leak on Mina drift of the Wieliczka Salt Mine. Geology, Geophysics & Environment. Vol. 38, No.1(2012), s. 9-22.
- POBORSKA-MLYNARSKA K. 2017 - Katastrofy wodne w górnictwie solnym na świecie – przyczyny, sposoby zwalczania, skutki. Prezentacja na Międzynarodowym Sympozjum Solnym Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego Quo Vadis Sal, Wieliczka 2017.
- ŚLIZOWSKI K., KORTAS G. 1980 - Zagrożenie powierzchni spowodowane eksploatacją wykładów solnych na przykładzie Kopalni Soli im. T. Kościuszki w Wapnie. „Ochrona Terenów Górniczych” nr 51, s. 33-40.
- ULMANIEC P., PARASZCZUK K., MALINOWSKA A., HEJMANOWSKI R. 2017 - Deformacje powierzchni terenu w aspekcie wycieku „Mina” w Kopalni Soli Wieliczka. Prezentacja na Międzynarodowym Sympozjum Solnym Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego Quo Vadis Sal, Wieliczka 2017.
- Wiceprezes** Najwyższej Izby Kontroli, Wystąpienie pokontrolne z dnia 8 listopada 2010 r., znak: I/09/07, LOP-4114-17-01/2009, Tekst ujednolicony (do Prezesa Wyższego Urzędu Górniczego w Katowicach)
- Delegatura** w Opolu, Wystąpienie pokontrolne z dnia 14 stycznia 2011 r., znak: I/09/017, LOP- 4114-17-02/2009, Tekst ujednolicony (do Dyrektora Okręgowego Urzędu Górniczego w Poznaniu)
- Delegatura** w Opolu, Wystąpienie pokontrolne z dnia 26 stycznia 2011 r., znak: I/09/017, LOP- 4114-17-03/2009, Tekst ujednolicony (do Prezydenta Miasta Inowrocławia)
- Delegatura** w Opolu, Wystąpienie pokontrolne z dnia 25 marca 2011 r., znak: I/09/017, LOP- 4114-17-04/2009, Tekst ujednolicony (do Prezesa Zarządu Inowrocławskich Kopalni Soli Solino S.A. w Inowrocławiu)
- ZUBER A., GRABCZAK J., GARLICKI A. 2000 - Catastrophic and dangerous inflows to salt mines in Poland as related to the origin of water determined by isotope methods. Environmental Geology. No. 39, 3-4, s. 299-311.