



Przemieszczenia ścian wyrobiska komorowego w skałach solnych spowodowane jego wypełnieniem

The displacements of the walls of the chamber working in salt rocks caused by its filling

Dr inż. Agnieszka Maj^{*)}

Treść: W górnictwie solnym od stopnia wypełnienia pustek poeksploatacyjnych zależą przemieszczenia w jego otoczeniu, ale bardziej znaczący jest wpływ porzuconych wyrobisk na kształtowanie się stanu zagrożenia wodnego, w tym potencjalne skutki wdarcia wód. W pracy analizowano wyniki obliczeń numerycznych przeprowadzonych dla 4 wariantów sposobu wypełnienia wyrobiska na jego otoczenie skałami o właściwościach reologicznych. Stwierdzono współdziałanie dwóch procesów: spowalniania zaciskania wyrobisk wywołanego jego wypełnieniem i przyspieszenia zaciskania spowodowanego namakaniem górotworu przez solankę obecną w materiale podsadzkowym.

Abstract: In salt mining, the displacements around the post-mining voids depend on the degree of their filling. The impact of abandoned workings on the extent to which the water hazard is present, including the potential effects of water inrush, is more significant. This paper presents an analysis of results of numerical calculations carried out for 4 variants of a filled excavation surrounded by a rock mass with rheological properties. Interaction of two processes was found: the slowing down of convergence caused by working filling and acceleration of room-closure caused by soaking of the rock mass by the brine presented in the filling material.

Słowa kluczowe:

kopalnia soli, podsadzanie, solanka w podsadzce

Keywords:

salt mine, backfilling, brine in backfill

1. Wstęp

Podziemna eksploatacja górnictwa złoży powoduje powstawanie pustek, których obecność jest na ogół uciążliwa i szkodliwa. Wydobywając kopalnię z pokładów, na przykład węgiel kamienny, wyrobiska ścianowe są podsadzane, dzięki czemu opanowuje się natychmiastowe obwały i zmniejsza deformacje nadległych terenów. Celem podsadzania jest wtedy zapewnienie bezpieczeństwa prowadzenia wydobycia i ochrona terenów górniczych. Problemom podsadzania w takich warunkach poświęcono szereg publikacji (Mazurkiewicz i in. 1997, Plewa, Mysłek 2015).

Wiadomo, że warunki geologiczno-górnictwa w złożach soli kamiennej różnią się zasadniczo od warunków eksploatacji wielopokładowych złóż węgla. W górotworze pozostawiane są calizny solne o objętości przekraczającej objętość wyrobisk, na ogół wybierana jest około 1/4 pola górniczego (Kortas 2008). Zapewnia to powstrzymanie nadmiernych ruchów górotworu w trakcie wydobycia. Długotrwałe pozostawienie wyrobisk powodować może jednak powstawanie spękań i obwałów, jak w kopalni Wapno (Kortas, Maj 2014), czy w polu 1 w kopalni Kłodawa (Kortas, Maj 2012). Zjawiska takie obserwowane są także w kopalniach zabytkowych Wieliczka i Bochnia (Kortas 2004, Szewczyk 2015). Zmniejszenie objętości wyrobisk poprzez ich wypełnianie/podsadzanie, prowadzić może do spadku prędkości przemieszczeń i odkształceń w ich otoczeniu, a także na powierzchni terenu (Maciaszek i in. 2016).

Szczególnie niebezpieczne dla kopalń podziemnych soli są spękania calizny solnych ze szczelinami propagującymi

w kierunku zbiorników wód (Kortas, Maj 2014), zwłaszcza pozazłożowych, które doprowadzić mogą do wdarcia wód. Takie wypadki prowadzą na ogół do zatopienia części wyrobisk, a nawet całej podziemnej kopalni. Degradacja górotworu spowodowana przepływem wód zależy wtedy nie tylko od wydatku dopływu, ale także od objętości wyrobisk, które zostały zatopione. Zatem od stopnia wypełnienia pustek zależy kształtowanie się stanu zagrożenia wodnego, jak również potencjalne skutki wdarcia wód do kopalni.

Problem współpracy podsadzki z wyrobiskiem w warunkach górotworu wykazującego właściwości reologiczne jest zagadnieniem złożonym, bo wymaga wprowadzenia dodatkowej zmiennej, jaką jest czas rzeczywisty procesu pełzania. Celem tej pracy jest pierwsze przedstawienie reakcji otoczenia wyrobisk solnych na ich wypełnianie.

2. Założenia modelowe

Specyfiką warunków geomechanicznych długotrwałego zachowania się górotworu solnego jako ośrodka o właściwościach reologicznych wokół wyrobisk wypełnionych medium podsadzkowym jest współuczestnictwo oddziaływań:

- solnego ośrodka skalnego,
- wilgotnych piasków podsadzkowych wypełniających komorę,
- solanki uwolnionej z podsadzki.

W procesie zaciskania należy zwrócić uwagę na szczególną rolę solanki, jako nośnika wprowadzanego do komór materiału podsadzkowego. Wpływ wilgotności powietrza na odkształcanie próbek soli badany był laboratoryjnie w testach jednoosiowego pełzania (Maj 2012). Wyniki analiz ujawniły

^{*)} Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Kraków

znaczący wpływ podatności na pęczanie, obserwowany również w wynikach pomiarów przemieszczeń w wyrobiskach (Kortas 2004).

W modelowaniu zachowania się górotworu wokół prostopadłościennego wyrobiska rozważano cztery warianty warunków podsadzania:

Tabela 1. Warianty warunków wypełniania komór

Table 1. Variants of cavity filling conditions

Wariant Variant	Wypełnienie piaskiem Sand filling	Zawilgoconie konturu Contour moistness
1	0%	-
2	80%	-
3	0%	+
4	80%	+

Model stanowiła tarcza w płaskim stanie odkształcenia, odwzorowująca przekrój pionowy przez długą komorę o wymiarach: $s = 24$ m, $h = 10$ m, $l = 100$ m (kierunek prostopadły do przekroju). Wokół wyrobiska wyznaczono dwumetrową strefę zawilgoconia górotworu przez solankę (rys. 1). Spąg komory znajdował się na głębokości 100 m. Zastosowano przemieszczeniowe warunki brzegowe na dolnej i bocznych krawędziach modelu. Górną krawędź stanowiła powierzchnia terenu.

W symulacjach numerycznych wykorzystano model sprężysto-lepki Hooke'a-Nortona (Maj 2012). Przyjęto następujące wartości praw materiałowych:

Sole: $E = 2,0 \cdot 10^9$ MPa, $\nu = 0,3$, $\gamma = 2200$ kg/m³,
 $B = 0,5 \cdot 10^{-23}$ Pa⁻² $n=2,0$, $m=1,0$;
 Sole+H₂O: $E = 2,0 \cdot 10^8$ MPa, $\nu = 0,3$, $\gamma = 2200$ kg/m³,
 $B = 0,9 \cdot 10^{-22}$ Pa⁻² $n=2,0$, $m=1,0$;
 Wypełnienie: $E = 2,0 \cdot 10^8$ MPa, $\nu = 0,3$, $\gamma = 2200$ kg/m³,
 $B = 0,5 \cdot 10^{-22}$ Pa⁻² $n=2,0$, $m=1,0$.

Nie wykonywano dotąd tego typu badań, z tego względu w przyszłości dobór wartości parametrów powinien być przedmiotem odrębnego studium, powiązanego z obserwowanymi przemieszczeniami. Przeprowadzono symulację wstępnego pęczania górotworu, w celu wytworzenia hydrostatycznego stanu naprężeń pierwotnych (Δt_0) oraz pęczania górotworu z pustą komorą przez okres $\Delta t_1 = 20$ lat. Po tym okresie wykonano symulację zachowania się wypełnionej komory oraz – w celach porównawczych – nadal pozostającej bez wypełnienia ($\Delta t_2 = 25$ lat). Obliczono przemieszczenia i prędkości przemieszczenia dla ostatniego okresu symulacji numerycznych (Δt_2).

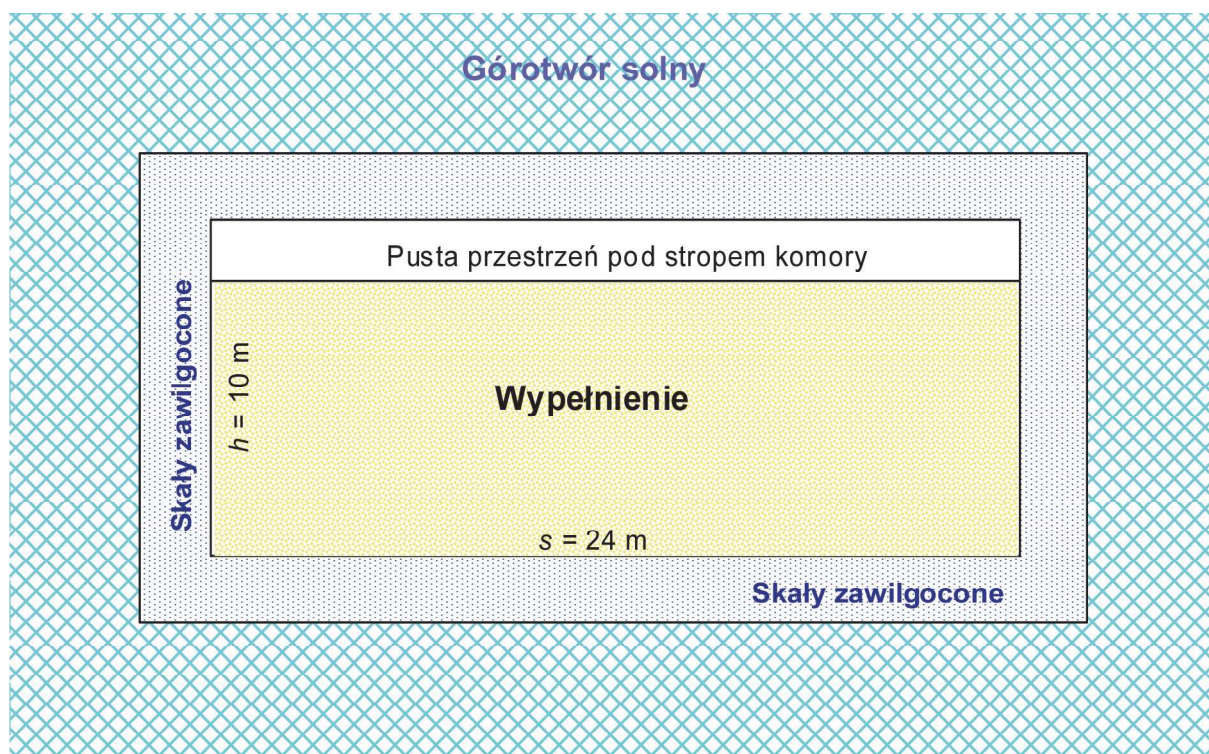
3. Zaciskanie prostopadłościennej komory

Analizowano średnią prędkość przemieszczeń spągu, stropu i ociosów komory w różnych wariantach jej wypełnienia (tab. 1). Na rysunku 2 przedstawiono prędkość przemieszczenia pionowego w stopie i spągu komory oraz poziomego na ociosach komory prostopadłościennej.

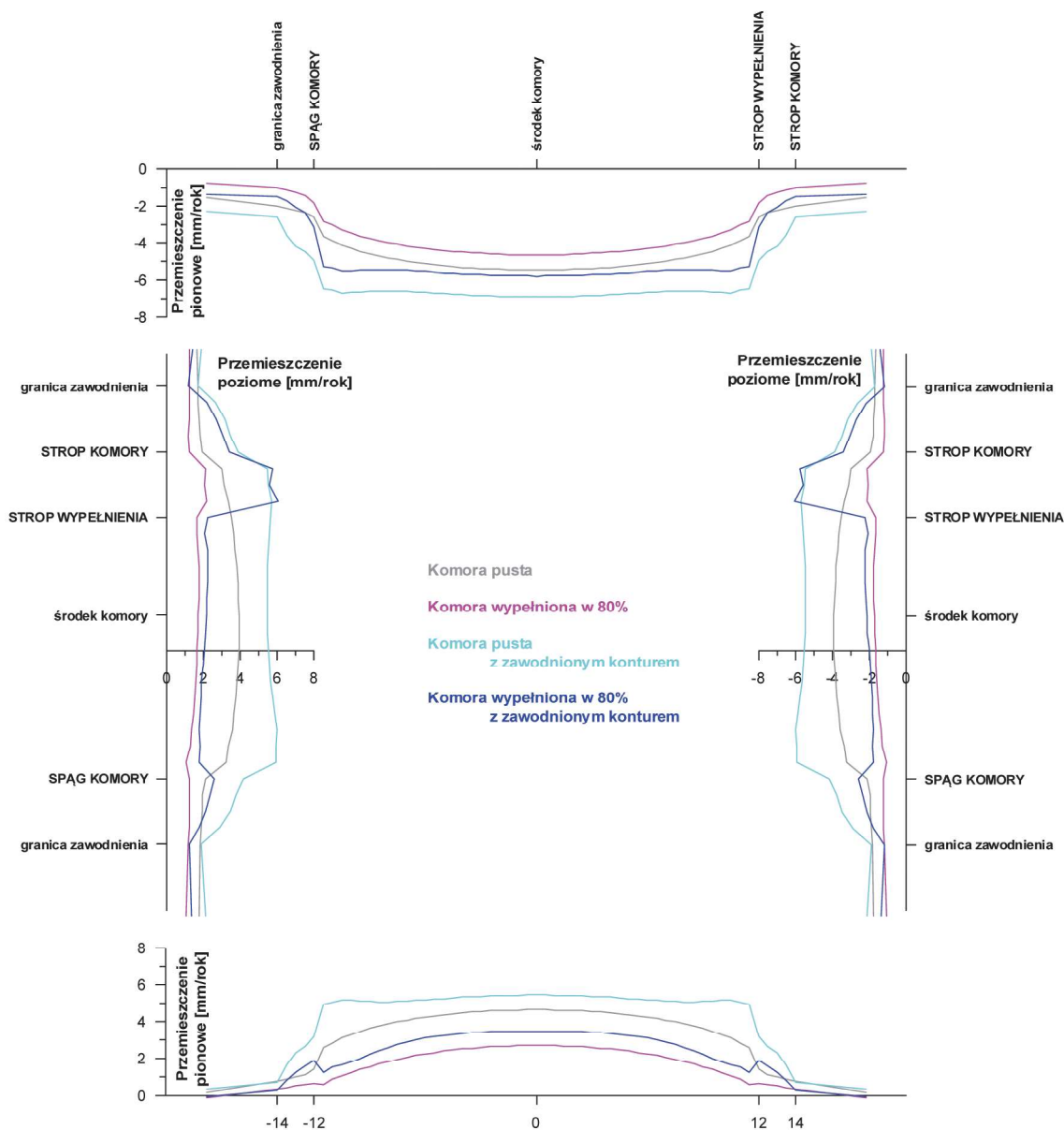
3.1. Przemieszczenie pionowe stropu komory

Przy założonych parametrach modelu w pustej komorze $dw_{max}/dt = -5,5$ mm/rok, wartość dw/dt maleje w kierunku ociosów. Przy samym ociosie następuje skok z -3,7 do -2,6 mm/rok i liniowa zmiana w głąb górotworu do -2,0 mm/rok na granicy warstw (2 m od ociosu) i do -1,5 mm/rok ok. 6 m od konturu wyrobiska.

W komorze w 80% wypełnionej piaskiem $dw_{max}/dt = -4,6$ mm/rok, wartość dw/dt maleje w kierunku ociosów. Przy samym ociosie następuje skok z -2,8 do -1,8 mm/rok i malejąca zmiana w głąb górotworu do -1,0 mm/rok na granicy warstw (2 m od ociosu) i do -0,8 mm/rok ok. 6 m od konturu wyrobiska.



Rys. 1. Schemat modelu górotworu z wypełnioną komorą
 Fig. 1. Scheme of a rock mass model with a filled chamber



Rys. 2. Roczne przyrosty przemieszczeń pionowych / poziomych ścian komory
 Fig. 2. Annual increments of vertical / horizontal displacements of the chamber walls

W pustej komorze z nawilgoconymi ociosami, stropem i spągami $dw_{max}/dt = -6,9$ mm/rok, wartość dw/dt jest prawie stała na całej szerokości wyrobiska. Przy samym ociosie następuje skok z $-6,5$ do $-5,0$ mm/rok. W warstwie za ociosem (2 m od ociosu) wartość dw/dt znacząco maleje do $-2,6$ mm/rok, a w głąb górotworu maleje łagodnie do $-2,3$ mm/rok ok. 6 m od konturu wyrobiska.

W komorze w 80% wypełnionej piaskiem o zawilgoconych konturach $dw_{max}/dt = -5,8$ mm/rok, wartość dw/dt jest prawie stała na całej szerokości wyrobiska. Przy samym ociosie pojawia się skok z $-5,2$ do $-3,2$ mm/rok. W warstwie za ociosem (2 m od ociosu) wartość dw/dt znacząco maleje do $-1,5$ mm/rok, a w głąb górotworu maleje łagodnie do $-1,3$ mm/rok ok. 6 m od konturu wyrobiska.

3.2. Przemieszczenie pionowe spągu komory

Reakcja spągu komór jest podobna do stropu, ale kierunek wektora przemieszczeń jest przeciwny (rys. 2). Zaznacza się

tu zauważalny wpływ obciążenia podsadzką powodujący nieco mniejsze bezwzględne wartości przemieszczeń niż w stropie.

W pustej komorze $dw_{max}/dt = 4,6$ mm/rok, wartość dw/dt maleje w kierunku ociosów. Przy samym ociosie następuje skok z $2,5$ do $1,4$ mm/rok i liniowa zmiana w głąb górotworu do $0,8$ mm/rok na granicy warstw (2 m od ociosu) i do $0,25$ mm/rok, ok. 6 m od konturu wyrobiska.

W komorze w 80% wypełnionej piaskiem $dw_{max}/dt = 2,7$ mm/rok, wartość dw/dt maleje w kierunku ociosów do $0,6$ mm/rok i dalej do $0,4$ mm/rok na granicy warstw (2 m od ociosu) i do $-0,1$ mm/rok, ok. 6 m od konturu wyrobiska.

W pustej komorze, której ociosy, strop i spąg zostały nawilgocone $dw_{max}/dt = 5,4$ mm/rok, wartość dw/dt jest prawie stała na całej szerokości wyrobiska. Przy samym ociosie następuje skok z $5,0$ do $3,3$ mm/rok. W warstwie za ociosem (2 m od ociosu) wartość dw/dt znacząco maleje do $0,7$ mm/rok, a w głąb górotworu maleje łagodnie do $0,4$ mm/rok, ok. 6 m od konturu wyrobiska.

W komorze o zawilgoconych konturach w 80% wypełnionej piaskiem $dw_{max}/dt = 3,5$ mm/rok, wartość dw/dt maleje w kierunku ociosów. Przy samym ociosie dw/dt zmienia wartości z 1,3 mm/rok do 1,9 mm/rok na konturze wyrobiska, a następnie znacząco maleje w warstwie zawilgoconej do 0,3 mm/rok, a w głąb górotworu maleje łagodnie do 0,0 mm/rok, ok. 6 m od konturu wyrobiska.

3.3. Przemieszczenie poziome ociosów komory

Podobne tendencje ruchu pod wpływem omawianych warunków występują w ociosach komory.

W pustej komorze $du_{max}/dt = +/-4,0$ mm/rok, wartość du/dt maleje w kierunku stropu i spągu. Przy samym stropie następuje skok z $+/-3,0$ do $+/-2,0$ mm/rok i liniowa zmiana w głąb górotworu do $+/-1,7$ mm na granicy warstw (2 m od ociosu). Podobnie przy spągu – skok z $+/-3,2$ do $+/-2,1$ mm/rok i liniowa zmiana w głąb górotworu do $+/-1,8$ mm/rok na granicy warstw.

W komorze w 80% wypełnionej piaskiem $du_{max}/dt = +/-2,1$ mm/rok występuje w pustej części nad stropem wypełnienia. W części wypełnionej wartość du/dt nie przekracza $+/-1,7$ mm/rok i spada przy spągu do $+/-1,2$ mm/rok.

W pustej komorze, której ociosy, strop i spąg zostały nawilgocone $du_{max}/dt = +/-5,9$ mm/rok występuje nad spągami komory, na całej jej wysokości przemieszczenia poziome oscylują wokół wartości $+/-5,5$ mm/rok. W wilgotnej warstwie stropowej i spągowej przemieszczenia te znacząco zmniejszają wartość do $+/-1,7$ mm/rok w stropie i $+/-1,9$ mm/rok w spągu.

W komorze w 80% wypełnionej piaskiem o zawilgoconych konturach $du_{max}/dt = +/-5,8$ mm/rok występuje w pustej części nad stropem wypełnienia. W części wypełnionej wartość du/dt nie przekracza $+/-2,2$ mm/rok, tylko przy samym spągu, który jest zawilgocony $du/dt = +/-2,6$ mm/rok.

4. Analiza wyników

Analiza wyników prowadzi do spostrzeżenia, że wpływ wypełnienia i zawilgoconia na przemieszczenia spągu, stropu i ociosów komory jest znaczący.

Największe obniżenia stropu występują w komorze pustej o zawilgoconych ociosach, spągu i stropie, mniejsze w komorze o zawilgoconych konturach wypełnionej piaskiem, jeszcze mniejsze w komorze pustej o suchych konturach, a najmniejsze obniżenia w komorze o suchych konturach, wypełnionej piaskiem. Największe wypiętrzenia spągu i przemieszczenia poziome ociosów występują w komorze pustej o zawilgoconych ociosach, spągu i stropie, mniejsze w komorze pustej, jeszcze mniejsze w komorze o zawilgoconych konturach wypełnionej piaskiem (z wyjątkiem niewypełnionej części komory), a najmniejsze w komorze o suchych konturach, wypełnionej piaskiem.

Maksymalne obniżenie stropu występuje nad środkiem wyrobiska i maleje w kierunku ociosów, jednak zjawisko to wyraźnie widoczne jest jedynie w suchych komorach. Maksymalne wypiętrzenie spągu występuje pod środkiem wyrobiska i maleje w kierunku ociosów (zjawisko mało widoczne w pustej komorze o zawilgoconych konturach).

Obserwowane w kopalniach wybrzuszenie ociosów, w wynikach symulacji numerycznych występuje tylko w pustej, suchej komorze. W przypadku komór wypełnionych można zauważyć zwiększenie prędkości przemieszczeń w części, która nie została jeszcze wypełniona – szczególnie jest to widoczne w komorze o wilgotnych konturach. W części wypełnionej podsadzka zauważalny jest również spadek prędkości przemieszczeń z głębokością.

W wyrobiskach o zawilgoconych konturach obniżenia stropu są prawie stałe na całej jego szerokości, podczas, gdy w suchych komorach strop ugina się, powodując zauważalne wybrzuszenie. W wyrobisku pustym o zawilgoconych konturach wypiętrzenie spągu jest prawie stałe na całej jego szerokości, podczas gdy w pozostałych przypadkach spąg wypiętrza się, powodując zauważalne wybrzuszenie.

Wypełnienie komory w 80% jej objętości powoduje zmniejszenie obniżenia stropu o ok. 16% (oba przypadki: suchych i mokrych komór) oraz zmniejszenie wypiętrzenia spągu o ok. 35-40% (oba przypadki: suchych i mokrych komór).

W warstwie przyociosowej wartość przemieszczenia znacząco spada, zwłaszcza w komorach o zawilgoconych konturach, dalej w głąb górotworu przemieszczenia maleją 0,05 – 0,15 mm/m.

5. Podsumowanie i wnioski

Wypełnienie pustek pozostałych po eksploatacji soli, poza funkcją podporową, ogranicza objętość ewentualnego zbiornika cieczy w przypadku katastrofalnego wdarcia wód do kopalni.

Wypełnienie komory suchym materiałem powoduje znaczące zmniejszenie przemieszczeń pionowych stropu i poziomych ociosów, a pomimo braku podparcia stropu zmniejszają się również obniżenia na całej linii stropowej.

Nawilgotnienie konturu powoduje znaczące zwiększenie przemieszczeń oraz wypłaszczenie powierzchni ścian wyrobiska – wynika to z większej podatności ośrodka na odkształcenia i szybszej relaksacji naprężeń. Zawilgocona warstwa łatwiej się odkształca, więc spadek wartości przemieszczeń jest większy niż w warstwie suchej.

Nałożenie obu procesów, tzn. wypełnienia piaskiem i nawilgotnienia górotworu wokół wyrobiska, zmienia krzywą przemieszczenia – jest ona bardziej płaska. Wartości przemieszczeń są zależne od przyjętych założeń (wartości parametrów praw materiałowych warstwy zawilgoconej i wypełnienia wyrobiska). Mogą być mniejsze lub większe od wartości przemieszczeń w komorze pustej.

Skutki obecności solanki jako nośnika podsadzki mają znaczenie lokalne, a spowodowany nią wzrost prędkości pełzania zawodnionych soli jest zjawiskiem korzystnym, powodującym szybsze zaciskanie wypełnianych wyrobisk.

Praca została wykonana w 2018 roku w ramach prac statutowych IMG PAN w Krakowie.

Literatura

- MAZURKIEWICZ M., PIOTRKOWSKI Z., TAJDUŚ A. 1997 - Lokowanie odpadów w kopalniach podziemnych. Część I (ekologia i technologia), Część II (geoinżynieria) Szkoła Eksploatacji Podziemnej. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, nr 5.
- KORTAS G. 2008 - Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- KORTAS G., MAJ A. 2014 - Defomation of the protection shelf in the „Wapno” Salt Mine, based on model studies. Archives of Mining Sciences. Vol 59, Iss. 4, s. 869-886.
- KORTAS G., MAJ A. 2012 - Warunki geomechaniczne w caliznach chroniących kopalnię przed wodami na przykładzie kopalni soli „Kłodawa”. „Przegląd Górniczy” nr 12, s. 112-117.
- KORTAS G. 2004 - Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- MACIASZEK J., STOCH T., SZEWCZYK J. 2016 - Badanie deformacji powierzchni i górotworu w rejonie centralnym kopalni w aspekcie ochro-

ny powierzchni i wyrobisk, prowadzenia podsadzania wyrobisk oraz zagrożeń wodnych. Opracowanie na zlecenie KS Wieliczka, Kraków.
MAJA. 2012 - Convergence of gallery workings in underground salt mines. Archives of Mining Sciences. Monograph. No.14.
PLEWAF., MYSLEK Z. 2015 - Wpływ podsadzania pustek po podziemnym zgazowaniu węgla na wielkość deformacji powierzchni. „Przeгляд Górnicy”, nr 12. s. 28-31.

SZEWczyk J. 2015 - Wykonanie analizy stałości sieci kątowno-liniowej do badania deformacji powierzchni. Opracowanie na zlecenie KS Wieliczka. Kielce.

Artykuł wpłynął do redakcji - lipiec 2018
Artykuł akceptowano do druku 10.11.2018

