

Marek Ciał, Piotr Czaja*, Danuta Flisiak*, Michał Kowalski**

OCENA ZAGROŻENIA ZAPADLISKOWEGO WYBRANYCH KOMÓR KS „WIELICZKA” W OPARCIU O OBLICZENIA NUMERYCZNE

1. Wprowadzenie

Jednym z efektów wielowiekowej eksploatacji soli prowadzonej przez KS „Wieliczka” jest oddziaływanie niezlikwidowanych komór na powierzchnię terenu. Wpływy eksploatacji soli na powierzchnię terenu ujawniają się w dwojaki sposób. Pierwszy z nich to deformacje ciągłe, będące efektem procesów deformacji górotworu w otoczeniu komór. Są one związane głównie z procesami reologicznymi zachodzącymi w utworach solnych i skałach otaczających, prowadzącymi do zaciskania się wyrobisk. Efektem tych procesów jest pojawianie się na powierzchni terenu ciągłych niecek osiadania. Do śledzenia deformacji ciągłych zastabilizowano szereg reperów, w których dokonywane są pomiary geodezyjne, prowadzone z różną częstotliwością od 1926 roku. Wyniki tych pomiarów poddane zostały szczegółowej analizie w pracach Szewczyka (2005, 2008). Wykazały one, że intensywność procesów deformacji w ostatnich latach nie ulegała istotnym zmianom, a nawet można zauważyć pewne jej obniżenie. Może to wynikać z prowadzonego na dużą skalę podsadzania wybranych wyrobisk. Z tego też względu w pracy nie zajmowano się wpływami wytypowanych komór na ciągłe deformacje powierzchni terenu.

Drugim rodzajem deformacji, jakie mogą wystąpić na powierzchni terenu są deformacje nieciągłe w postaci zapadlisk. Deformacje te wywołane są zawałem komór wyeksploatowanych w bryłach soli zielonej na górnych poziomach kopalni. W latach 1582–1998 zanotowano 22 wypadki wystąpienia zapadlisk powierzchniowych, spowodowanych zawałem komór płytko leżących.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Ostatnie zapadlisko powstało w 1960 roku, a jego przyczyną był postępujący w górę zawał komory Schmidt na skutek:

- zniszczenia ochronnej skorupy soli (pożary podpór drewnianych, przecieki wód powierzchniowych i rozmycia, mała grubość skorupy solnej),
- specyficznej budowy warstw nadległych (iły nie dające ochrony w sensie wytrzymałościowym).

Powstałe nad komorą Schmidt zapadlisko osiągnęło średnicę ok. 100 m i głębokość 7÷8 m uszkadzając, a w końcowej fazie niszcząc, 2 budynki zlokalizowane na jego krawędzi.

Ze względu na skalę potencjalnych zagrożeń prognozowanie nieciągłych deformacji jest kluczowym zagadnieniem przy projektowaniu robót zabezpieczających, polegających głównie na podsadzeniu wybranych komór lub ich wzmocnieniu. W pracy Biela i Gołdy (1991) wytypowano 38 komór, zlokalizowanych na górnych poziomach kopalni, stwarzających zagrożenie zapadliskowe. W kolejnych latach liczbę tych komór ograniczono do 14. Przy typowaniu komór stwarzających zagrożenie zapadliskowe wykorzystywano kryterium Ryncarza, u którego podstaw leży założenie, że nad komorą powstaje strefa zawału, która przemieszcza się do góry w wyniku degradacji górotworu [1].

W pracy wykazano, że w odniesieniu do górotworu wielickiego kryterium to nie zawsze jest słuszne. W tym celu przeprowadzono numeryczną ocenę zagrożenia zapadliskowego dla wybranych komór. Największe problemy przy numerycznym modelowaniu procesów zachodzących w górotworze związane są z przyjęciem wiarygodnych wartości parametrów wytrzymałościowych, odkształceniowych i reologicznych. Szczegółowa analiza wykonanych dotychczas prac w tej dziedzinie wskazuje na olbrzymi rozrzut wartości wszystkich parametrów charakteryzujących górotwór. Wynika to zarówno z olbrzymiej zmienności górotworu jak i stosowania różnej metodyki badań właściwości geomechanicznych. Nieznajomość rzeczywistych własności górotworu nie stanowi istotnej przeszkody przy ocenie wpływu robót górniczych na stan analizowanych wyrobisk, przeprowadzonej w pracy [10]. Ocena ta polegała bowiem na porównaniu stanu naprężeń, jaki panował przed wykonaniem dodatkowych robót górniczych, ze stanem po ich przeprowadzeniu. Nieznajomość rzeczywistych wartości parametrów stwarza jednak istotne problemy przy ocenie stanu wyęźnienia wokół wyrobisk, zagrożenia zawałowego czy zapadliskowego. Obliczenia w niniejszej pracy wykonane zostały dla określonego zestawu parametrów, przyjętego na podstawie analizy wyników dotychczasowych badań.

2. Warunki geologiczno-górnice w otoczeniu wybranych komór

Złoże solne KS „Wieliczka” występuje u czoła nasunięcia karpackiego w strefie para-autochtonicznego miocenu, mocno sfałdowanego i nasuniętego na miocen autochtoniczny. Złoże ma kształt elipsy, której dłuższa oś o przebiegu E–W ma długość ponad 7 km, a krótsza S–N nie przekracza 1 km. Podłoże górotworu solnego zbudowane jest ze sztywnych jurajskich wapieni skalistych, pociętych licznymi uskokami. Utwory kredowe stanowi flisz

wykształcony w postaci pstrych, szarych i szarozielonych łupków przelawionych warstwami piaskowców. Utwory trzeciorzędowe to głównie miocen, którego dolną część stanowią warstwy skawińskie reprezentowane przez iłowce margliste lub margle ilaste z wkładkami utworów piaszczystych. Złoże solne uformowane jest jako pokłady i bryły solne. Pokłady budujące dolną, mocno zaburzoną tektonicznie część złoża, oddzielone są od siebie utworami terrygenicznymi, zawierającymi anhydryt. Złoże soli bryłowej leży tektonicznie niezgodnie ponad solami pokładowymi, tkwiąc wśród mułów i zubrów. Utwory nadsolne, reprezentowane przez warstwy chodenickie, ily, iłowce, iłowce margliste i mułowce miejscami zapiaszczone, przelawicone warstwami kruchych piasków otaczają złoże solne, są lokalnie w warstwach stropowych zwietrzałe, tworząc pyły i gliny pylaste. Piaski bogucickie zalegają na warstwach chodenickich w północnej części złoża. Utwory czwartorzędowe to osady plejstocenijskie oraz holocenijskie w postaci glin pylastych, lessopodobnych, glin ciężkich, iłów, piasków, rumoszu, namułu. Ogólnie ułożenie warstw złoża przedstawia się następująco: utwory ilaste (spąg złoża), złoże pokładowe przewarstwione skałami ilasto-anhydrytowymi, złoże bryłowe wśród mułowców i zubrów, utwory ilasto-margliste oraz utwory czwartorzędowe. Górotwór solny w skali całego złoża zachowuje się plastycznie. Obserwuje się ugięcia stropów, wyrzuszenia ociosów solnych, zjawisko „płynięcia soli”.

Do analizy wytypowano komorę Neustadter oraz zespół komór Rainer I Górny, Rainer I Dolny i Skoczyłas.

Komora Rainer I Górny charakteryzuje się średnią wysokością około 10 m (maksymalnie 12 m) i posiada objętość około 10000 m³ przy 20% stopniu jej wypełnienia. Została ona wykonana w utworach złoża bryłowego, w bryle soli zielonej bryłowej typowej ZBt, w rejonie koncentracji brył soli ZBt i w mniejszym stopniu soli zielonych bryłowych wielkokrystalicznych ZBw. Charakterystyczną cechą brył soli ZBt w tym rejonie jest niemal jednakowe ukierunkowanie laminacji w większości z nich, zarówno w przekroju pionowym w poprzek rozciągłości złoża, jak i w przekroju poziomym. W cięciu poziomym biegnie ona na kierunku NW–SE. W soli ZBt występują laminy soli tzw. „jarczystych”, stanowiące potencjalne osłabienie geomechaniczne skorupy solnej. Skały płone w otoczeniu bryły komory charakteryzują się typowym dla złoża bryłowego wykształceniem w postaci iłowców marglistych i zubrów. W najbliższym otoczeniu wyrobiska nie jest zarejestrowany żaden wyciek kopalniany. Stan komory można określić jako częściowo zawałowy. Jest ona połączona szybikiem z niżej położoną komorą Rainer I Dolny. Szybik jest niedrożny, przesłonięty opadniętą łatą stropową. W stropie komory wybity jest szybik do budowy prowadzącej z chodnika Kunegunda na poziomie I. Komora służyła do składowania urobku płonego, który sypano tym szybikiem. Komora jest częściowo podsadzona.

Komora Rainer I Dolny charakteryzuje się średnią wysokością około 6 m (maksymalnie 7 m) i posiada objętość około 3600 m³ przy 20% stopniu jej wypełnienia. Budowa geologiczna masywu jest identyczna jak dla komory Rainer I Górny. W ociosie północnym widoczne są odsłonięcia skał płonych typu iłowców marglistych i zubrów, wykształconych w sposób typowy — z przeciętną zawartością kryształków i okruchów halitu. Sieć spękań wypełnionych wtórną solą włóknistą nie jest rozbudowana. W komorze zlokalizowany jest

wyciek WIIw-3 pełnonasyconej solanki o wydatku 0,03÷0,07 l/min. Komora częściowo wykasztowana, w stropie w centralnej części komory zlokalizowany jest szybik łączący ją z wyżej położoną komorą Rainer I Górny. Z tego szybika do komory przedostała się część urobku płonego, który lokowano w komorze Rainer I Górny. Urobek ten częściowo wypełnia wyrobisko, tworząc stożkowate usypisko.

Komora Skoczylas charakteryzuje się średnią wysokością około 12 m (maksymalnie 15 m) i posiada objętość około 5280 m³ przy 40% stopniu jej wypełnienia. Komora wybrana jest w utworach złoża bryłowego, w bryle soli zielonej bryłowej typowej ZBt, w rejonie koncentracji brył soli ZBt i w mniejszym stopniu brył soli zielonych wielkokrystalicznych ZBw. Laminacja soli w cięciu poziomym rozciąga się na kierunku NNE–SSW, odmiennie w porównaniu z innymi bryłami soli ZBt w tym rejonie. Bryła komory Skoczylas jest posadowiona pionowo (w większości rozmieszczenie brył wykazuje pewien stopień uporządkowania — dłuższe ich osie w cięciu poziomym są ukierunkowane zgodnie z rozciągłością złoża, bryły są też pochylone w kierunku na północ). W ociosie zachodnim widoczne jest odsłonięcie skał płonych typu ilowców marglistych i zubrów, wykształconych w sposób typowy — z przeciętną zawartością kryształków i okruchów halitu. Sieć spękań wypełnionych wtórną solą włóknistą nie jest rozbudowana. W komorze nie obserwuje się żadnych zjawisk hydrogeologicznych. W komorze została urządzona wysypka materiału płonego, który w większej mierze wypełnił ją do wysokości rzędnej poziomu IIw.

Komora Neustadter charakteryzuje się średnią wysokością około 5 m (maksymalnie 9 m) i posiada objętość około 8050 m³ przy 20% stopniu jej wypełnienia. W komorze Neustadter, podobnie jak w sąsiadującym z nią zespołem komór Geramb, eksploatowano utwory łuski centralnej złoża pokładowego, wykształcone w postaci kompleksu soli spizowych. Komorą eksploatowano krańcowy zachodni fragment łuski. Sole spizowe wykazują tu rozciągłość w kierunku NW–SE i zapadanie na SW pod średnim kątem 30÷45°. Poszczególne pokłady soli kamiennej poprzedzielane są przerostami skał płonych typu ilowców anhydrytowych. Wśród przerostów wyróżnia się przerost centralny soli spizowych, o miąższości dochodzącej do 2 m. W komorze nie jest zarejestrowany żaden wyciek kopalniany. Była ona eksploatowana na sucho, metodą wrębową. W części centralnej nastąpił obwał półki stropowej sięgający zubrów solnych w obrębie utworów złoża bryłowego.

3. Analiza wpływu wybranych komór na powierzchnię terenu

3.1. Klasyczna metoda oceny zagrożenia zapadliskowego

Dotychczasową ocenę zagrożenia powierzchni terenu powstawaniem zapadlisk przeprowadzano na drodze rozważań analitycznych, wykorzystując wyprowadzoną przez Rynca [6, 7] zależność opisującą wysokość strefy zawału nad wyrobiskiem komorowym wzorem:

$$h_z = h_k \left[\frac{2f(1-\varepsilon n)}{k-1} - (1-f) \right] \quad (1)$$

w którym:

- h_k — wysokość komory;
- f — współczynnik kształtu komory, który określa stosunek rzeczywistej objętości komory do objętości umownego walca o wysokości równej wysokości komory, obejmującego w przekroju poprzecznym komory;
- ε — współczynnik konsolidacji podsadzki lub skał pochodzących z zawału stropu;
- n — stopień wypełnienia komory wprowadzoną z zewnątrz podsadzka;
- k — współczynnik rozluźnienia skał tworzących zawał.

Na tej podstawie zostało sformułowane kryterium powstania zapadliska w postaci:

$$h_z \geq h_n \quad (2)$$

gdzie h_n jest miąższością nadkładu.

U podstaw tego kryterium leży założenie, że nad komorą powstaje strefa zawału, która przemieszcza się do góry w wyniku degradacji górotworu. Wprawdzie Ryncarz przyjmował, zgodnie z teorią Protodiakonowa dla wyrobisk chodnikowych, że wysokość strefy odprężonej nad komorą zależy od szerokości wyrobiska l i współczynnika zwięzłości skał μ , określanego na podstawie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie lub wartości kąta tarcia wewnętrznej skały ρ :

$$h_z = \frac{l}{2\mu} = \frac{l}{\operatorname{tg} \rho} \quad (3)$$

to jednak kryterium określone wzorem (1) nie uwzględnia żadnego parametru wytrzymałościowego górotworu, który decydowałby o możliwości zniszczenia stropu komory i powstania zawału, a jedynie wysokość wyrobiska i stopień rozluźnienia skał oraz ściśliwość podsadzki. Kryterium to nie uwzględnia również rzeczywistego stanu naprężenia, panującego w otoczeniu komory, zakładając a priori, że powstanie zapadliska na powierzchni jest zawsze możliwe, jeżeli tylko objętość skał pochodzących z zawału stropu, z uwzględnieniem stopnia ich rozluźnienia i powtórnej konsolidacji, nie pozwoli na całkowite wypełnienie powstałej pustki. Na jego podstawie każdy nieobudowany tunel poprowadzony blisko powierzchni można ocenić jako zagrożenie zapadliskowe, nawet gdy znajduje się w skałach o dużej wytrzymałości.

Należy przy tym zauważyć, że współczynnik rozluźnienia skał i stopień konsolidacji zawału, jako wartości w znaczący sposób wpływające na wysokość strefy zawału, ściśle zależą od rodzaju i właściwości skał i są trudne do jednoznacznego określenia w warunkach *in situ*, zwłaszcza w warunkach górotworu wielickiego [5].

Pewnym rozszerzeniem tego kryterium są rozważania podane przez Mikosia [5], który, obok zjawisk w stropie komory, uwzględnia również udział degradacji skał w ociosach wyrobiska w wypełnianiu niepodsadzonej pustki. Sformułowane na tej podstawie kryterium również uwzględnia tylko te same parametry, co wzór (1).

Na podstawie powyższych uwag można stwierdzić, że przedstawione kryterium, stosowane dotychczas dla wyrobisk komorowych Kopalni Soli „Wieliczka”, zawsze wskaże na zagrożenie zapadliskowe, o ile tylko bilans objętości potencjalnej pustki w stosunku do możliwości jej wypełnienia jest dodatni. Jak pokazuje doświadczenie, o możliwości wystąpienia zawału stropu wyrobiska, jako koniecznej przyczyny powstania deformacji zapadliskowych na powierzchni, decydują dwa istotne czynniki: właściwości wytrzymałościowe górotworu oraz stopień jego wyęźnienia, zależny od stanu naprężenia panującego na danej głębokości oraz od kształtu i rozmiarów komór lub układu komór, czego omawiane kryteria nie uwzględniają. Ponadto należy uwzględnić fakt, że na skutek upływu czasu może nastąpić proces degradacji własności wytrzymałościowych skał w otoczeniu komór, prowadzący do rozwoju stref zniszczenia. Dotychczas nie istnieje rozwiązanie analityczne tego problemu, które ujmowałoby wzajemne oddziaływanie tak wielkiej liczby czynników. Z tego względu należy wykorzystać możliwości, które dają metody numerycznej analizy stateczności wyrobisk zlokalizowanych na niewielkiej głębokości.

Wobec powyższych uwag w pracy przeprowadzono numeryczną ocenę zagrożenia zapadliskowego ze strony komory Neustadter, w której zaobserwowano przejawy utraty stateczności oraz zespołu komór Skoczylas, Rainer I Górny i Rainer I Dolny, zlokalizowanych na górnych poziomach kopalni. W tym celu zbudowano przestrzenne modele wymienionych komór, dla których metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie, określono wartości wskaźników stateczności.

Wszystkie obliczenia dla potrzeb niniejszej pracy przeprowadzono z zastosowaniem programu FLAC3D opartego o Metodę Różnic Skończonych [4].

Dla oceny wskaźnika stateczności układu zastosowano metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie [2, 3].

3.2. Określanie wskaźnika stateczności układu za pomocą metody redukcji wytrzymałości na ścinanie

Głównym założeniem metody redukcji wytrzymałości na ścinanie jest, że proces zniszczenia jest wywołany stopniowym obniżaniem parametrów wytrzymałościowych ośrodka. Metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR) określa przebieg powierzchni poślizgu w miejscu, w którym najwcześniej nastąpi stan równowagi naprężenia stycznego i wytrzymałości na ścinanie (stan równowagi granicznej).

Przeprowadzanie analizy stateczności metodą redukcji wytrzymałości na ścinanie polega na swoistej symulacji, podczas której serią wskaźników stateczności F^{trial} przeprowadza się obniżenie kohezji c i kąta tarcia φ , czyli parametrów wytrzymałościowych ośrodka.

Można uznać, iż wskaźnik stateczności jest definiowany dla dwóch materiałów. Pierwszy to aktualny, rzeczywisty materiał, a drugi to materiał fikcyjny, dla którego układ traci stateczność.

Obliczenia parametrów przeprowadzane są w następujący sposób:

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c \quad (4)$$

$$\varphi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \varphi\right) \quad (5)$$

gdzie:

F^{trial} — wskaźnik stateczności układu,

c^{trial} — kohezja materiału, przy którym układ traci stateczność,

c — kohezja materiału, kPa,

φ^{trial} — kąt tarcia wewnętrznego materiału, przy którym układ traci stateczność,

φ — kąt tarcia wewnętrznego materiału.

W obliczeniach zakłada się, że górotwór jest ośrodkiem sprężysto-plastycznym spełniającym zmodyfikowany warunek plastyczności Coulomba-Mohra.

Ponadto należy sprecyzować wartość wskaźnika stateczności, którą uznaje się za bezpieczną. Dla przykładu: w górnictwie odkrywkowym węgla brunatnego przy analizie stateczności skarp za bezpieczną przyjmuje się wartość wskaźnika stateczności równą 1,3, a przy projektowaniu nasypów drogowych i kolejowych wartość ta wynosi 1,5. W obu wymienionych przypadkach mamy do czynienia z materiałem o własnościach lepiej rozpoznanych, niż w przypadku górotworu wielickiego. Z tego też względu, przyjęto, że bezpieczna wartość wskaźnika stateczności dla komór solnych zlokalizowanych na niewielkiej głębokości powinna być większa i wynosić około 2,0.

3.3. Opis modeli numerycznych

Dla określenia wpływu wytypowanych układów komór na możliwość wystąpienia deformacji nieciągłych na powierzchni zdecydowano się na przeprowadzenie przestrzennych obliczeń numerycznych dla wybranych wariantów i modeli. Model numeryczny stanowiła prostopadłościenna kostka utwierdzona u dołu i po bokach w odpowiednich kierunkach (prostopadłych do poszczególnych płaszczyzn). Rozpatrywano ośrodek uwarstwiony zachowujący się zgodnie z modelem sprężysto-plastycznym Coulomba-Mohra.

Podstawowe parametry odkształceniowe i wytrzymałościowe warstw przyjęte do obliczeń zamieszczono w tabeli 1.

Obliczenia przeprowadzono osobno dla komory Neustadter oraz dla zespołu Komór Reiner I Dolny, Reiner I Górny i Skoczylas.

TABELA 1

Podstawowe parametry modelu obliczeniowego

Warstwa	Gęstość objętościowa, kg/m ³	Moduł Younga, MPa	Liczba Poissona	Kohezja, kPa	Kąt tarcia wewnętrznego, stopnie	Wytrzymałość na rozciąganie, kPa
Piasek gliniasty	1850	80	0,3	5	35	2
Iło-gipsy	2140	397	0,35	75	7	75
Zubry	2200	850	0,35	950	19,1	950
Sól spisowa	2200	2570	0,4	2400	21	2400

Przyjęto, że komora Neustadter o długości około 66 m, szerokości około 28 m i wysokości około 13 m jest zlokalizowana na głębokości około 87 m (strop komory). Przyjęto, że od powierzchni terenu zalegają kolejno: warstwa piasku gliniastego o miąższości 12 m, warstwa ıło-gipsów o miąższości 25 m, warstwa zubrów o miąższości 55 m i poniżej warstwa soli spizowej. Rozpatrywany model numeryczny ma wymiary: 357 m w kierunku osi x , 238 m w kierunku osi y , 187 m w kierunku osi z .

Jako drugi rozpatrzono zespół komór, który posiada następujące wymiary i lokalizacje:

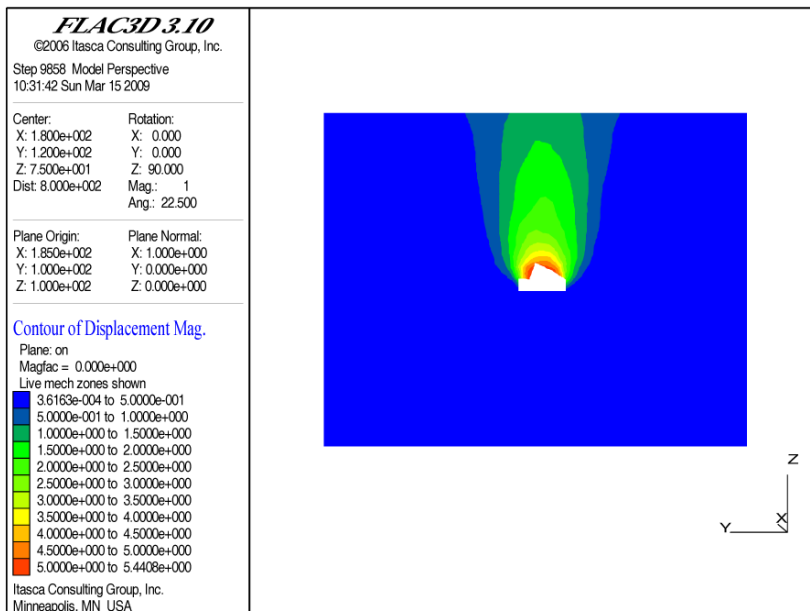
- komora Skoczylas ma wysokość 19 m, a jej strop zalega na głębokości ok. 74 m;
- komora Reiner I Górny ma wysokość 11,5 m, a jej strop zalega na głębokości ok. 58 m;
- komora Reiner I Dolny ma wysokość 5,5 m, a jej strop zalega na głębokości ok. 79,5 m.

Przyjęto, że od powierzchni terenu zalegają kolejno: warstwa piasku gliniastego o miąższości 15 m, warstwa ıło-gipsów o miąższości 25 m i poniżej warstwa zubrów. Rozpatrywany model numeryczny ma wymiary: 280 m w kierunku osi x , 315 m w kierunku osi y , 187 m w kierunku osi z .

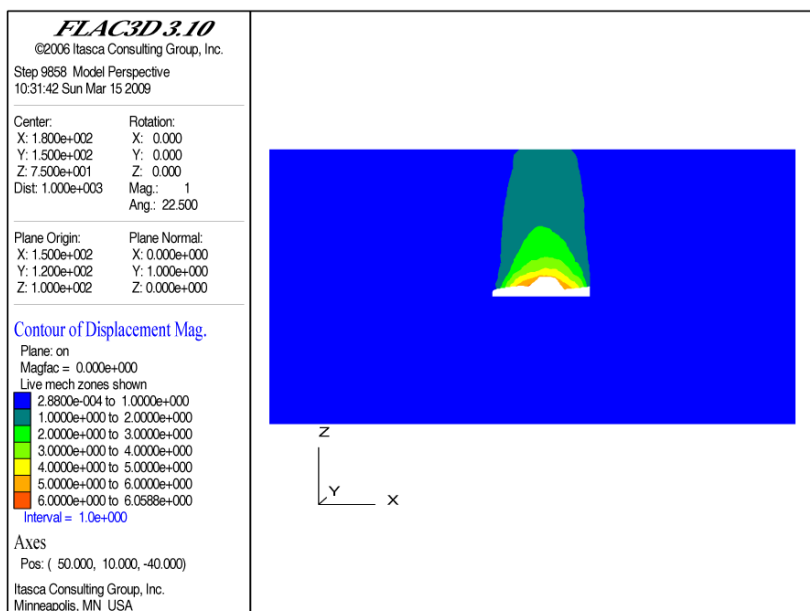
3.4. Analiza wyników obliczeń numerycznych

Wyniki obliczeń numerycznych otrzymano w postaci wartości przemieszczeń, odkształceń postaciowych, prędkości przemieszczeń oraz wskaźników uplastycznienia. Mapy przemieszczeń całkowitych, w otoczeniu komory Neustadter, w przekroju poprzecznym w płaszczyźnie yz pokazano na rysunku 1 zaś w płaszczyźnie xz na rysunku 2.

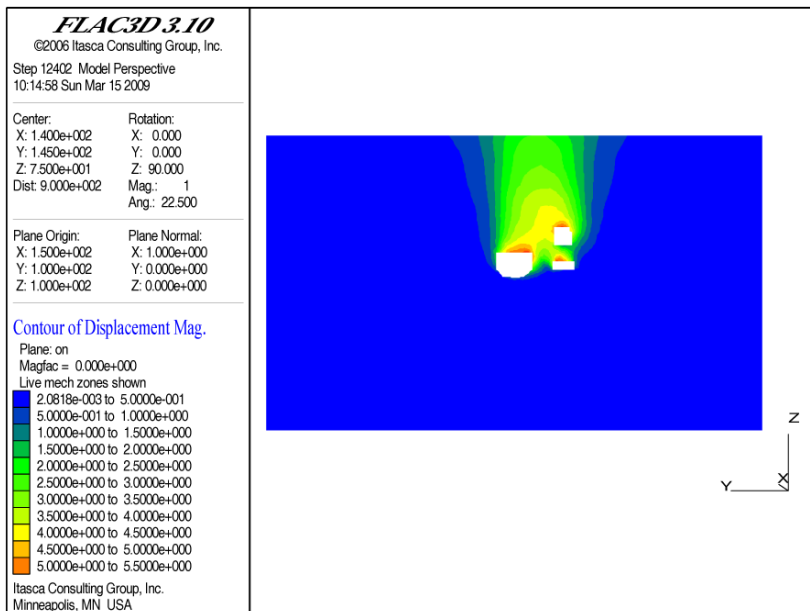
Mapy przemieszczeń całkowitych w otoczeniu zespołu komór Reiner I Górny, Reiner I Dolny i Skoczylas, w przekroju poprzecznym w płaszczyźnie yz pokazano na rysunku 3, zaś w płaszczyźnie xz na rysunku 4.



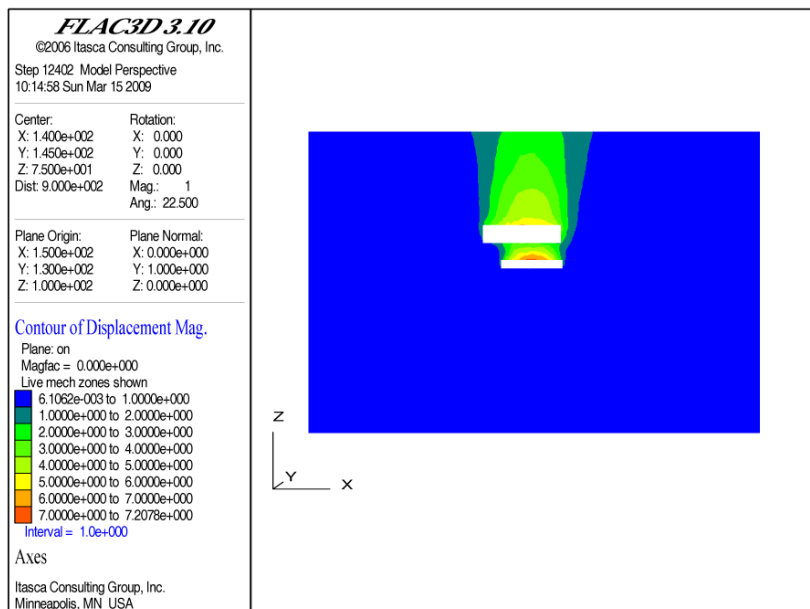
Rys. 1. Mapa przemieszczeń całkowitych w przekroju poprzecznym w płaszczyźnie yz w otoczeniu komory Neustadter



Rys. 2. Mapa przemieszczeń całkowitych w przekroju poprzecznym w płaszczyźnie xz w otoczeniu komory Neustadter



Rys. 3. Mapa przemieszczeń całkowitych w przekroju poprzecznym w płaszczyźnie yz w otoczeniu komór Reiner I dolny, Reiner I górny i Skoczylas



Rys. 4. Mapa przemieszczeń całkowitych w przekroju poprzecznym w płaszczyźnie xz w otoczeniu komór Reiner I dolny, Reiner I górny i Skoczylas

Na podstawie przedstawionych wyników obliczeń można sformułować następujące wnioski dotyczące stateczności:

- wartość wskaźnika stateczności dla komory Neustadter, określona za pomocą metody redukcji wytrzymałości na ścinanie jest równa 3,95, co wskazuje na duży zapas bezpieczeństwa;
- w przypadku utraty stateczności komory Neustadter, największe przemieszczenia wystąpią w jej bezpośrednim otoczeniu i przyjmą wartości około 6,37 m, przemieszczenia na powierzchni terenu, bezpośrednio nad komorą osiągną wartości od 1,0 do 2,0 m i mogą wywołać ciągle i nieciągle deformacje powierzchni terenu;
- wartość wskaźnika stateczności dla zespołu komór Reiner I Dolny, Reiner I Górny i Skoczylas jest równa 3,36, co także wskazuje na duży zapas bezpieczeństwa;
- przy utracie stateczności zespołu komór Reiner I Dolny, Reiner I Górny i Skoczylas, największe przemieszczenia wystąpią w ich bezpośrednim otoczeniu i przyjmą wartości około 5,86 m, przemieszczenia na powierzchni terenu, bezpośrednio nad komorą osiągną wartości od 2,0 do 3,0 m i mogą wywołać ciągle i nieciągle deformacje powierzchni terenu.

4. Podsumowanie i wnioski

Wnioski z przeprowadzonych rozważań teoretycznych oraz wyniki wykonanych przestrzennych obliczeń numerycznych pozwalają na sformułowanie kilku najważniejszych wniosków dotyczących stateczności komór ujętych w analizach:

- 1) Za pomocą metody redukcji wytrzymałości na ścinanie można określić wskaźnik stateczności układu, który jest miarą jego zbliżenia do utraty stateczności. Ze względu na ograniczoną dokładność rozpoznania geometrii układu komór i własności masywu solnego założono, że wskaźnik stateczności równy 2,0 z dużym prawdopodobieństwem zapewnia stateczność układu komór.
- 2) Stosując zaproponowaną metodykę postępowania, można określić zarówno wskaźnik stateczności, jak i wskazać sposób utraty stateczności (samopodsadzenie lub deformacje nieciągle wewnątrz górotworu i na powierzchni terenu) dla wytypowanego układu komór.
- 3) Zarówno dla komory Neustadter jak i dla układu komór Rainer I Górny, Rainer I Dolny i Skoczylas otrzymano wartości wskaźnika stateczności większe od 3,0. Z dużym prawdopodobieństwem pozwala to na stwierdzenie, że oba rozpatrywane układy są stateczne ze znacznym zapasem bezpieczeństwa. Należy podkreślić, że powyższe wartości wskaźników stateczności uzyskano dla określonego zastawu parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych, przyjętego na podstawie analizy wyników dotychczasowych badań. Udzielenie jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, czy są to wartości charakteryzujące rzeczywiste własności górotworu w KS „Wieliczka” jest w chwili obecnej niemożliwe.

- 4) Warto także zauważyć, że w przypadku utraty stateczności obu rozpatrywanych układów, strefa zniszczenia sięga do powierzchni terenu i może wywołać ciągłe i nieciągłe deformacje. Taki scenariusz jest jednakże możliwy tylko w przypadku dużej degradacji własności otaczającego masywu, co mogłoby wywołać proces postępującego zawalu. W obu rozpatrywanych sytuacjach jest to mało prawdopodobne. Należy jednak prowadzić ciągłe obserwacje stanu rozpatrywanych komór i w razie wystąpienia jakichkolwiek oznak utraty stateczności podjąć natychmiastowe działania zabezpieczające.
- 5) Przy aktualnym stanie wiedzy możliwe jest przeprowadzenie obliczeń numerycznych, umożliwiających określenie stanu naprężenia, wyężenia oraz lokalizację na tej podstawie rejonów zagrożonych, dla skomplikowanych, przestrzennych układów wyrobisk. Przykłady przestrzennego modelowania zamieszczone w pracy wskazują, że w chwili obecnej możliwe jest zbudowanie numerycznego modelu tych rejonów kopalni, które są szczególnie istotne dla zachowania stateczności powierzchni i podziemnych obiektów zabytkowych. Wiarygodność uzyskiwanych wyników obliczeń uzależniona jest jednak od znajomości rzeczywistych parametrów opisujących górotwór. Z analizy dotychczasowych badań wynika olbrzymi rozrzut i niejednorodność parametrów charakteryzujących górotwór. Dlatego też celowe wydaje się przeprowadzenie dodatkowych badań własności górotworu, z wykorzystaniem odpowiednio opracowanej, ujednoliconej metodyki badawczej.

LITERATURA

- [1] *Biel A., Golda J. in.*: Weryfikacja spisu komór zagrażających zapadliskiem powierzchni. OBRGSCh Chemkop, Kraków, 1991 (praca niepublikowana)
- [2] *Cala M., Flisiak J.*: Slope stability analysis with FLAC and limit equilibrium methods. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics* (edited by Bilaux, Rachez, Detournay & Hart), A.A. Balkema Publishers, 2001, s. 111–114
- [3] *Cala M., Jarczyk M., Postawa J.*: Numeryczna analiza możliwości utraty stateczności wyrobisk zlokalizowanych na niewielkiej głębokości. *UWND, Górnictwo i Geoinżynieria*, r. 28, z. 4/1, 2004, s. 69–78
- [4] Itasca Consulting Group. *FLAC3D. Users manual*, Minneapolis, USA, 2008
- [5] *Mikoś T.*: Metodyka kompleksowej rewitalizacji, adaptacji i rewaloryzacji zabytkowych obiektów podziemnych z wykorzystaniem technik górniczych. *UWND AGH, Kraków*, 2005
- [6] *Ryncarz T., Majcharezyk T.*: Wpływ podsadzania podziemnych komór w kopalni soli Wieliczka na deformacje powierzchni oraz na stateczność komór chronionych. *Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo*, r. 5, z. 2, Kraków, 1981
- [7] *Ryncarz T.*: Ruchy górotworu wywołane wyrobiskami podziemnymi. *Wydawnictwa AGH, Kraków*, 1992
- [8] *Szewczyk J.*: Interpretacja rezultatów badań deformacji powierzchni i górotworu w rejonie centralnym Kopalni „Wieliczka” w aspekcie ochrony powierzchni i wyrobisk oraz zagrożeń wodnych za rok 2005. *Kraków*, 2005 (praca niepublikowana)
- [9] *Szewczyk J.*: Kopalnia Soli Wieliczka — 80 lat obserwacji deformacji pogórnicych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi, kwartalnik*, t. 24, z. 2/3, 2008
- [10] *Tajduś A. i in.*: Wpływ wykonywanych robót górniczych w tym wykonania chodnika dojsciowego, na stateczność komory „Warszawa” na poziomie III oraz stateczność innych komór zlokalizowanych w jej rejonie. *Kraków*, 2009 (praca niepublikowana)