

Marek CAŁA *

Marek JARCZYK **

Jacek POSTAWA ***

NUMERYCZNA ANALIZA MOŻLIWOŚCI UTRATY STATECZNOŚCI WYROBISK ZLOKALIZOWANYCH NA NIEWIELKIEJ GŁĘBOKOŚCI

WSTĘP

Skutki eksploatacji podziemnej związane są zazwyczaj z wpływami bezpośrednimi na powierzchnię terenu, które zanikają po kilku latach od zakończenia eksploatacji, wywołując deformacje ciągłe i ewentualnie szkody górnicze.

Nie dotyczy to jednak terenów w zasięgu starych płytkich zrobów do głębokości około 80m, stwarzających zagrożenie deformacjami nieciągłymi [1, 5, 7]. Zagrożenie powstaniem deformacji nieciągłych zależy jest od wielu czynników naturalnych i spowodowanych działalnością człowieka.

Warunkiem koniecznym do powstania takich deformacji jest wystąpienie zawału pustki. Mogą one powstawać w sposób gwałtowny, a czas ich wystąpienia jest trudny do określenia i może być przesunięty w stosunku do wytworzenia się pustki nawet o kilkadziesiąt lat.

Deformacje nieciągłe w zasięgu starych zrobów płytkiej eksploatacji na terenach po zlikwidowanych kopalniach, w istotnym stopniu ograniczają możliwość planowania tam kapitałochłonnych inwestycji bez wykonania wcześniejszych badań in situ, opracowania projektu sposobu zabezpieczenia powierzchni oraz realizacji specjalistycznych prac zabezpieczających [5, 6, 8, 9 10].

W niniejszej pracy przedstawiono sposób określania możliwości numerycznego modelowania utraty stateczności wyrobisk podziemnych zlokalizowanych na niewielkiej głębokości. W sąsiedztwie starych, płytko zalegających wyrobisk i zrobów, może nastąpić proces degradacji własności odkształceniowych i wytrzymałościowych górotworu w ich otoczeniu, prowadząc do wytworzenia się wtórnej strefy zawału ponad wyrobiskiem.

* AGH Kraków, **ZGE Sobieski Jaworzno III, *** AGH Kraków

Powstanie nowej strefy zniszczenia w pewnych warunkach doprowadzi do powstania deformacji nieciągłych na powierzchni terenu.

Wszystkie obliczenia w opracowaniu przeprowadzono z zastosowaniem programu FLAC i opartego o Metodę Różnic Skończonych [2, 3, 4]. Dla oceny wskaźnika stateczności układu zastosowano metodę redukcji wytrzymałości na ścinanie [2].

1. OKREŚLANIE WSKAŹNIKA STATECZNOŚCI UKŁADU ZA POMOCĄ METODY REDUKCJI WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

W metodzie redukcji wytrzymałości na ścinanie zakłada się, że proces zniszczenia wywołany jest stopniowym obniżaniem parametrów wytrzymałościowych ośrodka. Metoda redukcji wytrzymałości na ścinanie (SSR) wskazuje przebieg powierzchni poślizgu w miejscu, w którym najwcześniej wystąpi stan równowagi naprężenia stycznego i wytrzymałości na ścinanie.

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.

W obliczeniach zakłada się ośrodek sprężysto - plastyczny spełniający zmodyfikowany warunek plastyczności Coulomba - Mohra.

Założono wartość wskaźnika stateczności, którą można uznać za bezpieczną. W górnictwie odkrywkowym węgla brunatnego za bezpieczną przyjmuje się wartość wskaźnika stateczności równą 1.3, przy projektowaniu nasypów drogowych i kolejowych, za bezpieczną uważa się wartość wskaźnika równą 1.5, a więc większą o 0.2. W obu wymienionych przypadkach mamy do czynienia z materiałem o lepiej rozpoznanych własnościach, niż w przypadku starych wyrobisk zalegających na niewielkiej głębokości. Z tego też względu, przyjęto, że bezpieczna wartość wskaźnika bezpieczeństwa powinna być większa o kolejne 0.2 i wynosić około 1.7.

2. Opis modeli numerycznych

Model numeryczny stanowiła prostokątna tarcza utwierdzona u dołu i po bokach, obciążona od góry obciążeniem ciągłym wynikającym z grawitacji. Problem rozpatrzono w

płaskim stanie odkształcenia. Na dolnej krawędzi tarczy oraz na obu bocznych przyjęto warunki przemieszczeniowe. Rozpatrywano ośrodek uwarstwiony zachowujący się zgodnie z modelem sprężysto - plastycznym Coulomba-Mohra.

Na podstawie analizy przekrojów geologicznych przyjęto, że od powierzchni terenu zalega warstwa piasków luźnych o miąższości 2.0m, dalej warstwa piasków średniozagęszczonych o grubości 7 m oraz warstwa pylastych ilów brunatnych o miąższości 3 m. Bezpośrednio pod warstwą ilów zalega warstwa spękanego piaskowca o miąższości 3 m i dalej gruba warstwa piaskowca zwięzłego.

Dla tak przyjętych danych przeprowadzono kilkadziesiąt obliczeń numerycznych. Rozpatrzono 13 modeli numerycznych. W każdym z nich zmieniano głębokość lokalizacji pokładu węgla. Założono, że zawsze posiada on miąższość 6 m i jest zlokalizowany na głębokości: od 10m *dla modelu 1* do 130m *dla modelu 13*.

Analiza sposobu eksploatacji pokładu 207 na przełomie XIX i XX wieku wskazuje, że była ona prowadzona systemem zabierkowo – chodnikowym (rys.1 i 2). Wykonano analizę dla pięciu różnych wariantów umiejscowienia wyrobisk. W **wariancie 1** założono, że w dolnej warstwie pokładu węgla zlokalizowany jest chodnik o wysokości 3 m i szerokości 3 m. W **wariancie 2** założono, że pojedynczy chodnik jest z dwóch stron otoczony zrobami zawałowymi o wysokości 3 m i szerokości 9 m. **Warianty 3, 4 i 5** są oparte na stopniowym poszerzaniu schematów omówionych w wariantach 1 i 2, a ich szczegółowa geometria jest przedstawiona na rys. 3.

3. Analiza wyników obliczeń numerycznych

Wyniki obliczeń numerycznych otrzymano w postaci map odkształceń postaciowych obrazujących sposób utraty stateczności analizowanego układu z zaznaczoną wartością wskaźnika bezpieczeństwa. Ze względu na ograniczoną objętość opracowania zamieszczono i omówiono tylko wybrane mapy.

Przykładowo pokazano wyniki obliczeń dla **modelu 2** (pokład węgla na głębokości 20m). Na rys. 4 pokazano rozkład odkształceń postaciowych oraz wektory przemieszczeń dla wariantu 1. Wskaźnik stateczności w tym przypadku jest równy 4.1, co sugeruje stosunkowo dużą pewność utrzymania stateczności układu. Jednakże, w przypadku utraty jego stateczności wystąpią deformacje nieciągłe sięgające powierzchni terenu.

Na rys. 5 pokazano rozkład odkształceń postaciowych oraz wektory przemieszczeń dla wariantu 1 **modelu 8**. Wskaźnik stateczności jest nieco niższy i przyjmuje wartość 2.56. Warto jednak zauważyć, że w przypadku utraty stateczności układu, wywołane tym deformacje nieciągłe występują tylko w bezpośrednim otoczeniu wyrobiska. Oznacza to, że nawet w przypadku utraty stateczności, wyrobisko ulegnie samopodsadzeniu zniszczonym materiałem skalnym.

Należy także zwrócić uwagę na fakt, że przy analizie stateczności wyrobiska, trzeba rozpatrywać zarówno sposób w jaki ono traci stateczność jak i wartość wskaźnika stateczności. Przy różnych układach wyrobisk może się zdarzyć sytuacja, gdy dwa układy mają taki sam wskaźnik stateczności, ale jeden z nich może generować deformacje nieciągłe, a drugi ulega samopodsadzeniu.

Na rys. 6 pokazano rozkład odkształceń postaciowych oraz wektory przemieszczeń dla wariantu 2 **modelu 10**. Wskaźnik stateczności jest tutaj nieco niższy i równy 1.86, ale w przypadku utraty stateczności układu, deformacje nieciągłe tym wywołane występują tylko w bezpośrednim otoczeniu wyrobiska. Przy osiągnięciu pewnej głębokości, nawet w przypadku utraty stateczności, wyrobisko ulegnie samopodsadzeniu zniszczonym materiałem skalnym.

Na rys. 7 pokazano rozkład odkształceń postaciowych oraz wektory przemieszczeń dla wariantu 3 **modelu 10**. Wskaźnik stateczności jest równy 1.48, co oznacza duże prawdopodobieństwo wystąpienia utraty stateczności układu, zaś deformacje nieciągłe tym wywołane będą sięgać aż do powierzchni terenu.

Na rys. 8 zebrano wyniki obliczeń dla modeli 1÷13 i wariantów 1÷5, pokazuje on więc wyniki wszystkich 65 obliczeń wskaźników stateczności, przeprowadzonych w płaskim stanie odkształcenia. Grubą czarną linią zaznaczono granicę pomiędzy występowaniem deformacji nieciągłych wewnątrz górotworu i na powierzchni terenu oraz brakiem deformacji nieciągłych na powierzchni (samopodsadzeniem).

Wyniki obliczeń wskaźników stateczności zestawiono również w tabeli 1, która ułatwia dokładną analizę wyników obliczeń.

Wyróżniono komórki tabeli (odpowiadające odpowiedniemu modelowi i wariantowi), gdzie istnieje duże prawdopodobieństwo wystąpienia deformacji nieciągłych wewnątrz górotworu i na powierzchni terenu oraz komórki, dla których prawdopodobieństwo wystąpienia deformacji nieciągłych na powierzchni jest niewielkie, z uwagi na samopodsadzenie wyrobiska lub układu wyrobisk.

Wyniki obliczeń wskazują wyraźnie, że w miarę wzrostu głębokości lokalizacji wyrobiska lub układu wyrobisk otoczonych strefami zawału, wskaźnik stateczności maleje. Stosunkowo

największe wartości wskaźników stateczności określono dla modeli 1÷13 i **wariantu 1**. Dla wszystkich modeli wskaźnik stateczności osiągał wartość powyżej 2, co sugeruje stosunkowo duży zapas bezpieczeństwa. Obliczenia dla **wariantu 2** wskazują, że do głębokości 100÷110 m wskaźnik stateczności utrzymuje się na poziomie powyżej 1.7, zaś dla większych głębokości spada łagodnie, aż do wartości 1.63 dla modelu 13. Dla **wariantów 3 i 4**, tylko wskaźnik stateczności dla głębokości 10m jest większy od wartości 1.7. Dla pozostałych rozpatrywanych głębokości wartości wskaźnika stateczności są mniejsze od 1.7, przyjętego za granicę bezpieczeństwa. Dla **wariantu 5** – taka sytuacja zachodzi dla każdej głębokości.

Celem tych obliczeń była ocena powierzchni terenu w zasięgu starych płytkich zrobów przewidzianego do zagospodarowania, przy założeniu, odpowiedniego stopnia bezpieczeństwa dla planowanych przedsięwzięć inwestycyjnych.

W celu wyeliminowania, w miarę możliwości, przytoczonych w obliczeniach sytuacji proponuje się zastosowanie kontrolowanego prowokowania zawału metodą strzelań ładunkami MW umieszczonymi w otworach, wykonanych z powierzchni terenu.

4. Sposób kontrolowanego uzdatniania powierzchni terenu w zasięgu starych płytkich zrobów

W przypadku niewielkich głębokości eksploatacji (50÷80m) niskie ciśnienie pionowe utrudnia lub uniemożliwia powstanie pełnego zawału w zrobach systemów filarowych, filarowo-zabierkowych lub chodnikowych. Stan taki występuje szczególnie w rejonach, gdzie strop bezpośredni ma zbyt małą grubość, a strop zasadniczy tworzą skały zwarte. W takich warunkach okres czasu ujawnienia się deformacji powierzchni może być bardzo długi, niekiedy nawet ponad 100 lat, co potwierdzają badania metodami geofizycznymi, wiercenia badawcze oraz rejestrowane przypadki powstania deformacji nieciągłych.

Przekroczenie istniejącego stanu równowagi granicznej i powstanie deformacji, bardzo często nieciągłej, może być spowodowane w wielu przypadkach stosunkowo niewielkim trudnym do przewidzenia w czasie impulsem, związanym z działalnością poza górnictwem lub prowadzoną na większych głębokościach eksploatacją podbierającą.

Sposób kontrolowanego wymuszania zawału nad zrobami

Wymuszenie kontrolowanego zawału nad zrobami lub w strefie rozluzowanego gruzowiska zawałowego stwarza możliwość ujawnienia się stref o najwyższym stopniu zagrożenia zapadliskami w okresie przed podjęciem decyzji o lokalizacji planowanych

inwestycji. Sposób kontrolowanego prowokowania zawału objaśniono na rys.9.

Detonacja ładunków MW w otworach jest źródłem intensywnych drgań parasejsmicznych, które stanowią impuls do powstania kontrolowanego doszczelnienia zrobów lub powstania zawału, wymuszając objawienie się deformacji w strefach osłabień stropu, gdzie przekroczony został stan równowagi granicznej związany z dezintegracją stropu zasadniczego. Takie działania mogą przyczynić się do wcześniejszego i kontrolowanego powstania deformacji na powierzchni, a w konsekwencji do likwidacji powstałych zapadlisk i przeklasyfikowania terenu oraz stworzenia możliwości jego zagospodarowania. Sytuacja taka może pozwolić na wykorzystanie do zabudowy terenów uważanych za całkowicie nieprzydatne do zabudowy.

5. WNIOSKI

1. Dokonana w przeszłości płytka eksploatacja, do głębokości około 80m, może stanowić potencjalne zagrożenie powierzchni terenu powstaniem deformacji nieciągłych.
2. Metoda Różnic Skończonych pozwala na budowę modelu numerycznego dla dowolnej sytuacji górniczo-geologicznej. Należy jednak posiadać wystarczające informacje dotyczące geometrii starych, płytko zalegających wyrobisk lub układu wyrobisk, a także zestaw własności mechanicznych dla każdej warstwy skał lub gruntu.
3. 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 i własności układu, założono, że wskaźnik stateczności równy 1.7 z dużym prawdopodobieństwem zapewnia stateczność układu.
4. Stosując zaproponowaną metodykę postępowania, można określić zarówno wskaźnik stateczności jak i wskazać sposób utraty stateczności (samopodsadzenie lub deformacje nieciągłe wewnątrz górotworu i na powierzchni terenu) dla dowolnego układu wyrobisk podziemnych.
5. Obliczenia przeprowadzono dla płaskich modeli numerycznych. Obliczenia w płaskim stanie odkształcenia pozwalają jednak na udzielenie stosunkowo szybkiej odpowiedzi na pytanie o możliwości utraty stateczności analizowanego wyrobiska lub układu wyrobisk.

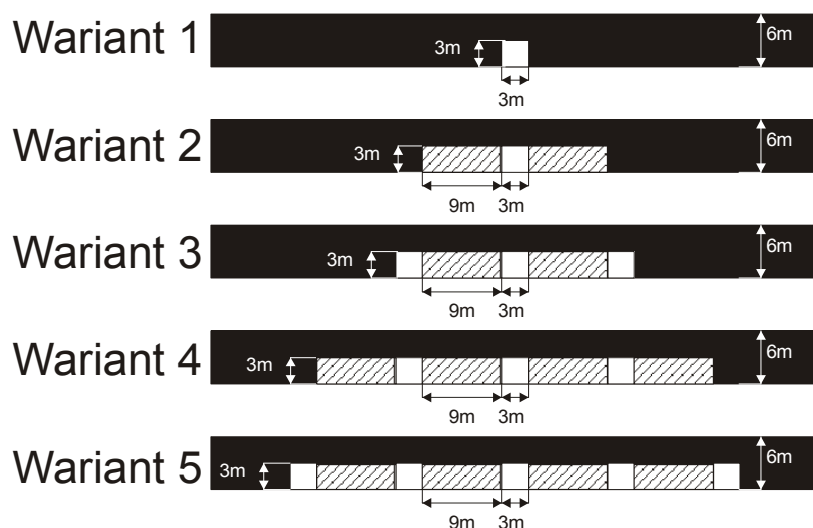
6. W celu wyeliminowania, w miarę możliwości, przytoczonych w obliczeniach sytuacji proponuje się zastosowanie kontrolowanego prowokowania zawału metodą strzelań ładunkami MW umieszczonymi w otworach, wykonanych z powierzchni terenu.
7. Wymuszenie kontrolowanego zawału nad zrobami lub w strefie rozluźnianego gruzowiska zawałowego stwarza możliwość ujawnienia się stref o najwyższym stopniu zagrożenia zapadliskami w okresie przed podjęciem decyzji o lokalizacji planowanych inwestycji.
8. Proponowane rozwiązanie może przyczynić się do wcześniejszego i kontrolowanego powstania deformacji na powierzchni a w konsekwencji po likwidacji powstałych ewentualnych zapadlisk do przeklasyfikowania terenu oraz stworzenia możliwości jego zagospodarowania.

Literatura:

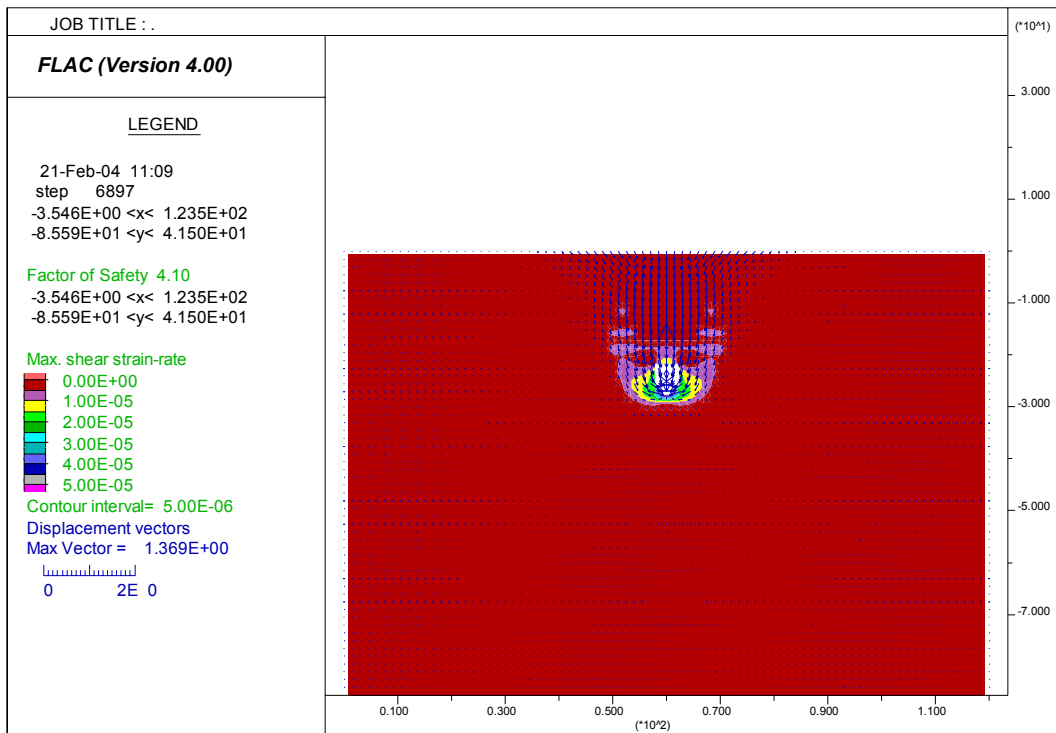
1. Chudek M., Janusz W., Zych J. 1988: *Studium dotyczące stanu rozpoznania tworzenia się i prognozowania deformacji nieciągłych pod wpływem podziemnej eksploatacji złóż*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 141.
2. FLAC v. 4.0. *Theory and background*. 2000. Itasca Consulting Group. Minneapolis. USA.
3. FLAC v. 4.0. *Users manual*. 2000. Itasca Consulting Group. Minneapolis. USA.
4. FLAC v 4.0. *Optional features*. 2000. Itasca Consulting Group. Minneapolis. USA.
5. Kwiatek J. Praca zbiorowa 1997: *Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*. WGIG. Katowice.
6. Palarski J i inni 2000: *Likwidacja płytko zalegających pustek poeksploacyjnych i wyrobisk górniczych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Górnictwo z. 264, Gliwice.
7. Postawa J. Jarczyk M., Stryczek S. 2003: *Technologia uzdatniania, dla celów inwestycji budowlanych, powierzchni terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Z.258. Gliwice.
8. Postawa J., Jarczyk M. 2003.: *Sposoby określania zagrożenia powierzchni deformacjami nieciągłymi w zasięgu starej płytkiej eksploatacji na obszarze likwidowanych kopalń*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Z.258. Gliwice.
9. Stryczek S., Gonet A., Postawa J. 2003: *Technologia likwidacji zagrożenia zapadliskowego na obszarze płytkiej eksploatacji górniczej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Z.258. Gliwice,
10. Zych J i inni 2001: *Sposób likwidacji płytkich wyrobisk górniczych byłej kopalni barytu w Boguszowie*. Sympozja i Konferencje nr 49. Przywracanie wartości użytkowych terenom górniczym. Stare kopalnie – nowe perspektywy. PAN IGSMiE. Kraków.

Tabela 1. Wyniki obliczeń wskaźników stateczności dla wszystkich rozpatrywanych wariantów i modeli

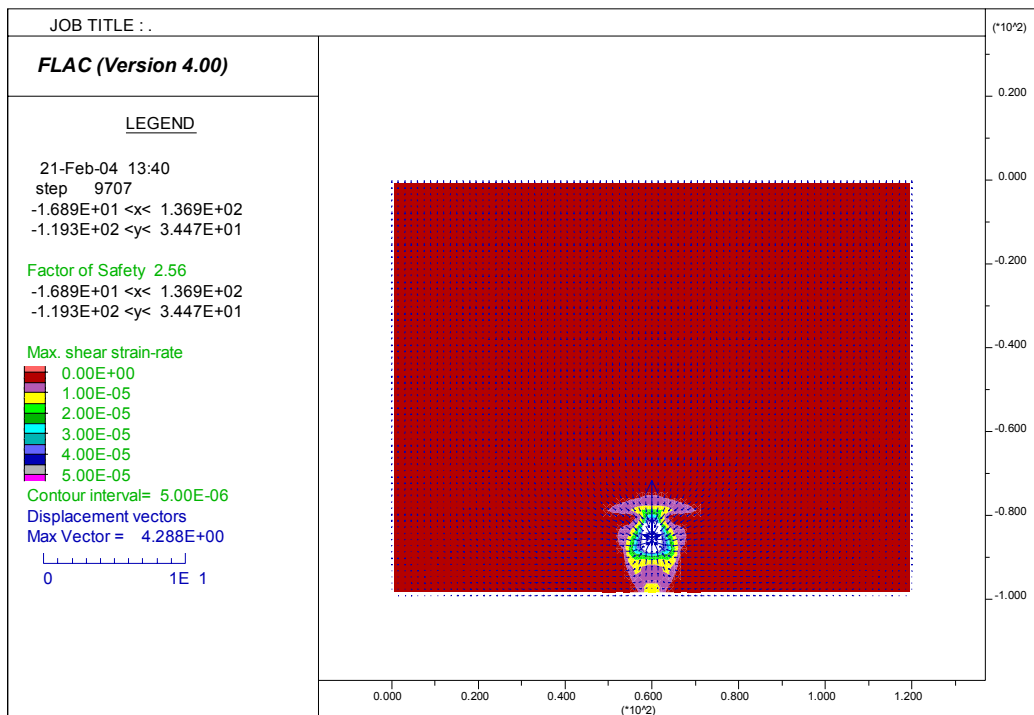
wariant Model	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 4	Wariant 5
Model 1	5.55	2.34	1.8	1.71	1.65
Model 2	4.1	2.12	1.58	1.5	1.45
Model 3	3.48	2.04	1.47	1.39	1.33
Model 4	3.16	2	1.48	1.36	1.26
Model 5	3.06	2.07	1.54	1.36	1.23
Model 6	2.83	1.93	1.51	1.36	1.19
Model 7	2.74	1.92	1.49	1.36	1.18
Model 8	2.56	1.86	1.49	1.35	1.18
Model 9	2.35	1.89	1.48	1.36	1.22
Model 10	2.35	1.86	1.48	1.36	1.24
Model 11	2.23	1.69	1.47	1.36	1.26
Model 12	2.23	1.7	1.41	1.37	1.25
Model 13	2.12	1.63	1.39	1.36	1.24



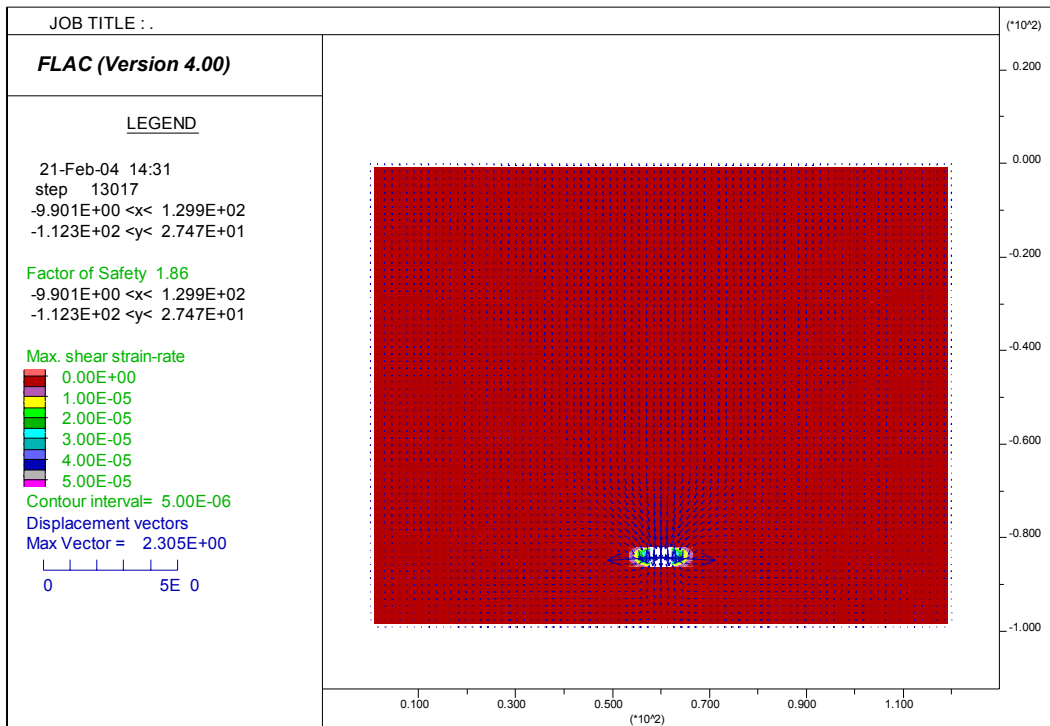
Rys.3. Pięć wariantów eksploatacji rozpatrywanych dla każdego modelu.



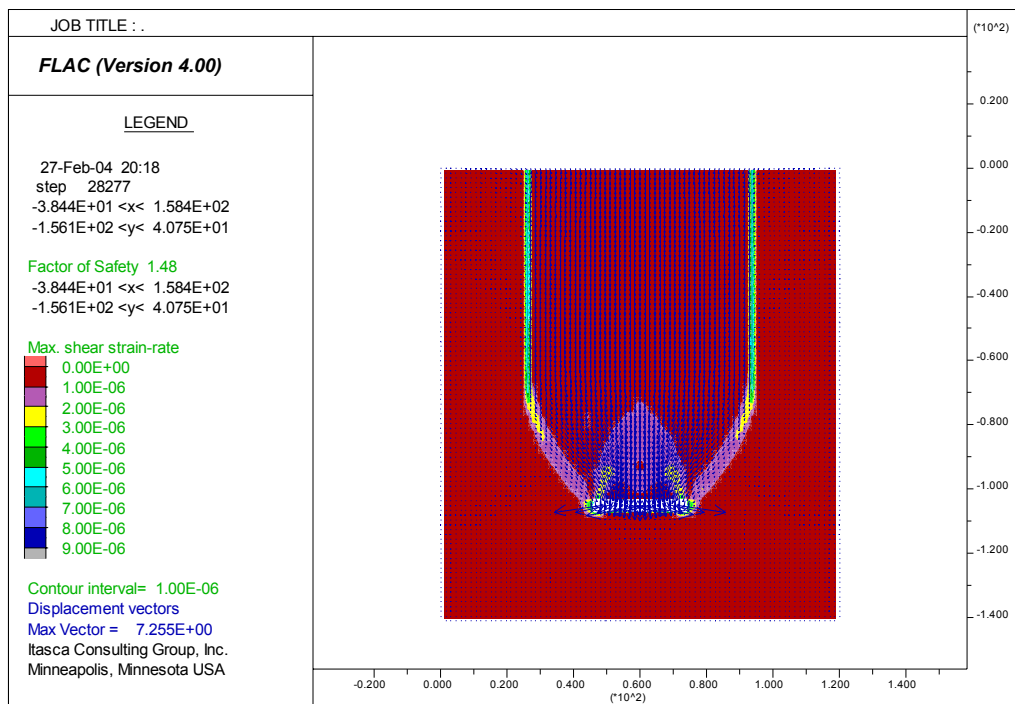
Rys. 4 Rozkład odkształceń postaciowych oraz wektory przemieszczeń dla wariantu 1 modelu 2



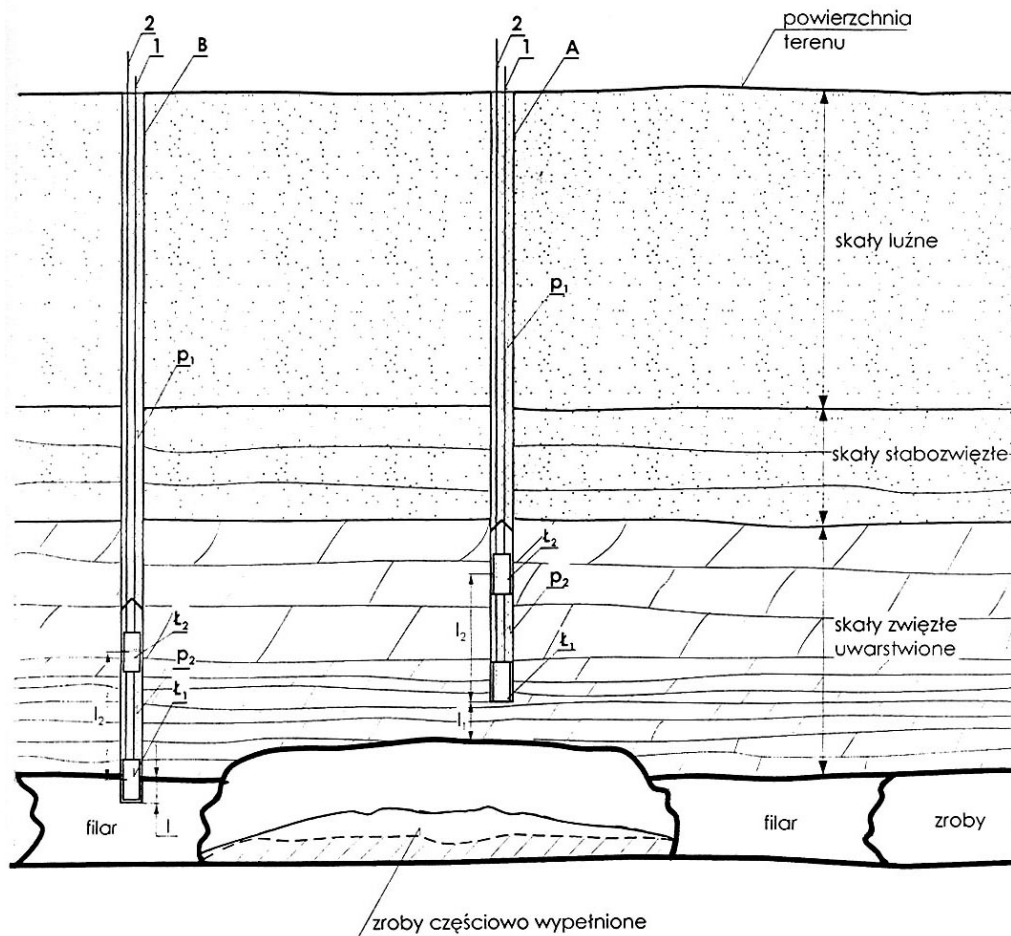
Rys. 5 Rozkład odkształceń postaciowych oraz wektory przemieszczeń dla wariantu 1 modelu 8



Rys. 7 Rozkład odkształceń postaciowych oraz wektory przemieszczeń dla wariantu 2 modelu 10



Rys. 8 Rozkład odkształceń postaciowych oraz wektory przemieszczeń dla wariantu 3 modelu 10



A - otwór wiertniczy $\varnothing 100 - 150\text{mm}$ do zrobów lub strefy anomalnej,

B - otwór wiertniczy do calizny (filar) wybranego pokładu,

p_1 - przybitka zasadnicza,

p_2 - przybitka wewnętrzna $\sim 3\text{m}$,

Ł_1 - ładunek MW z ZE_1

Ł_2 - ładunek MW z ZE_2

zwłoka: $\text{ZE}_1 < \text{ZE}_2$,

l_1 - odległość ładunku od stropu pustki $-1,0\text{m}$,

l_2 - odległość pomiędzy ładunkami zależna od charakterystyki skał otaczających,

1 - zagłębienie otworu w strop filara,

1 - przewody strzałowe,

2 - zawieszenie ładunków MW.

Rys. 9 Sposób prowokowania zawału nad zrobami.