

NUMERYCZNE MODELOWANIE FILAROWO-KOMOROWEGO SYSTEMU EKSPLOATACJI

*Marek CAŁA**, *Jerzy FLISIAK**, *Antoni TAJDUŚ**

1. WPROWADZENIE

Od wielu lat podejmowane są próby modelowania eksploatacji systemem filarowo-komorowym za pomocą metod numerycznych (Flisiak et al., 2001). Celem niniejszego referatu jest porównanie wyników obliczeń numerycznych przeprowadzonych dla różnych modeli konstytutywnych górotworu w zależności od stopnia zaawansowania eksploatacji. Wszystkie obliczenia numeryczne prowadzone zostały za pomocą programu Metody Różnic Skończonych FLAC 3D (FLAC3D, 2002).

2. MODELOWANIE NUMERYCZNE FILAROWO-KOMOROWEGO SYSTEMU EKSPLOATACJI

Dla analizy stanu naprężenia, przemieszczenia i wyężenia w rejonie eksploatacji systemem filarowo-komorowym przeprowadzono szereg obliczeń numerycznych z zastosowaniem programu MRS FLAC 3D. Zastosowano trzy różne modele konstytutywne górotworu: model liniowo-sprężysty, model sprężysto-idealnie-plastyczny z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra oraz model sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra z osłabieniem.

Uwzględnianie plastyczności górotworu w modelu Coulomba-Mohra polega na przyjęciu założenia, że w obszarze ograniczonym powierzchniami granicznymi w przestrzeni naprężeń górotwór zachowuje się liniowo sprężyste, a poza tym obszarem plastycznie. W programie MRS FLAC3D całkowity przyrost odkształcenia jest rozdzielany na przyrost odkształcenia sprężystego oraz przyrost odkształcenia plastycznego. W procedurze numerycznej jako pierwszy jest obliczany przyrost odkształceń sprężystych wynikający z zastosowania prawa Hooke'a, a następnie na

*Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH

podstawie obliczonych wartości odkształceń określone są naprężenia. Jeżeli otrzymane wartości naprężeń znajdują się poza powierzchnią graniczną, opisaną przez kryterium wytrzymałościowe Coulomba-Mohra, przyjmuje się, że zachodzą plastyczne deformacje. W takim wypadku tylko odkształcenia sprężyste uczestniczą w procedurze kolejnych obliczeń przyrostów naprężenia.

Model sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra z osłabieniem pozwala na symulację zachowania materiałów w fazie pokrytycznej. Można to osiągnąć poprzez przyjęcie w kolejnych krokach odpowiednio obniżonych wartości parametrów wytrzymałościowych (kohezji, kąta tarcia wewnętrznego, kąta dylatacji i wytrzymałości na rozciąganie) w funkcji odkształceń plastycznych. W programie, w każdym kroku obliczeniowym, sprawdzane są wartości odkształceń plastycznych. Jeżeli osiągają one wartości graniczne zadane uprzednio przez użytkownika, to następuje zmiana wartości parametrów wytrzymałościowych i przyjęcie nowych (mniejszych), będących funkcją odkształceń plastycznych.

Niewątpliwie największą trudność stanowi tutaj poprawne opisanie pozniszczeniowej części charakterystyki odkształceniowo-naprężeniowej za pomocą odpowiednich wartości parametrów wytrzymałościowych hipotezy Coulomba-Mohra. Twórcy programu FLAC3D (FLAC3D, 2002) proponują dobór tych parametrów na podstawie analizy pokrytycznej części charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej dla próbki skalnej. Sugerują także, że odkształcenia plastyczne mogą, z pewnym przybliżeniem, odpowiadać odkształceniom osiowym próbki. Postępowanie takie może być jednak obciążone znacznym błędem wynikającym z dużego wpływu gęstości węzłów na zachowanie się modelu. Trudno także pogodzić się z faktem bezpośredniego przenoszenia zachowania się próbki skalnej wprost na górotwór. Należałoby uprzednio przeprowadzić staranną kalibrację zastosowanej dyskretyzacji modelu tak, aby ograniczyć wpływ gęstości węzłów na wyniki obliczeń numerycznych. Proces kalibracji mógłby być, na przykład, oparty o pomiary przemieszczeń w wyrobiskach górniczych w miarę postępu eksploatacji.

W ramach obliczeń numerycznych badano wpływ rozwoju eksploatacji w obrębie pola o szerokości 184 m i wybiegu 120 m zlokalizowanego na głębokości 900 m na zmiany stanu naprężenia i przemieszczenia w jego otoczeniu. W pracy ograniczono się do analizy zmian przemieszczeń pionowych oraz naprężeń pionowych i poziomych w stropie komór.

We wszystkich zbudowanych modelach przyjęto, że warstwa rud miedzi o grubości 4 m spoczywa na grubej warstwie czerwonego spągowca. Ponad furta zalega warstwa dolomitów i wapieni o grubości 50 m, na której spoczywa gruba warstwa anhydrytów.

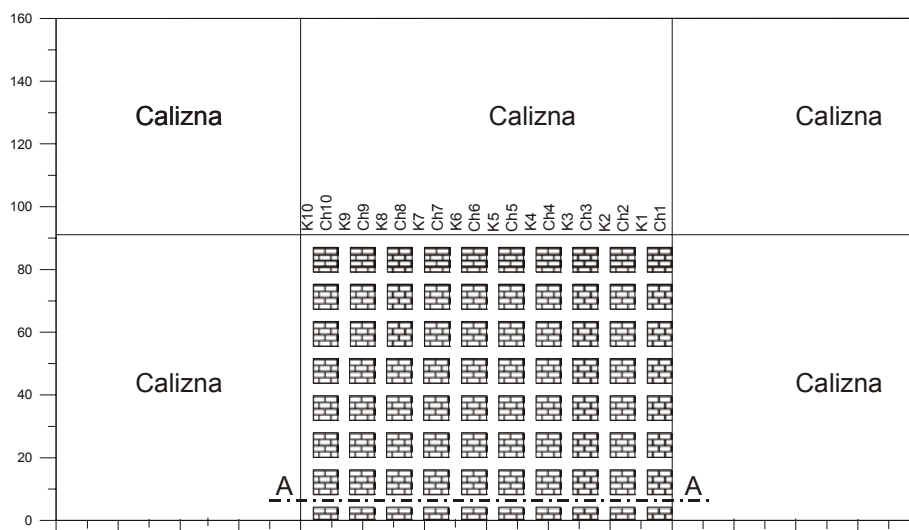
W tabeli 1 zebrano przyjmowane do obliczeń parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe poszczególnych warstw skalnych.

TABELA 1 PARAMETRY MECHANICZNE WARSTW SKALNYCH

| Warstwa | E_s , MPa | ν | c , MPa | R_r , MPa | φ , deg | ρ , kg/m ³ |
|---------------------|-------------|-------|-----------|-------------|-----------------|----------------------------|
| Czerwony spągowiec | 6500 | 0.14 | 4 | 4 | 46.5 | 2300 |
| Furta | 4858.5 | 0.185 | 2.1 | 2.1 | 30-36 | 2450 |
| Wapienie i Dolomity | 45600 | 0.255 | 16.5 | 16.5 | 63.5 | 2450 |
| Anhydryt | 55500 | 0.26 | 16.5 | 16.5 | 64 | 2850 |

Głównym celem rozważań zawartych w niniejszym rozdziale było określenie zmian stanu naprężenia, przemieszczenia i wyężenia przy eksploatacji rud miedzi systemem filarowo-komorowym. Dla określenia wielkości tych stref konieczne było zbudowanie modeli przestrzennych, gdyż tylko one umożliwiają uwzględnienie wpływu układu komór i filarów na stan naprężenia i wyężenia górotworu.

Z górotworu wycięto kostkę prostopadłościenną o wymiarach: - długość - 280 m, - szerokość - 160 m, - wysokość - 174 m. Przy modelowaniu eksploatacji systemem filarowo-komorowym przyjęto, że szerokość komór wynosi 4 m, a filary mają długość 8 m i szerokość 8 m (rys. 1).



Rys.1. Schemat eksploatacji systemem filarowo-komorowym przyjęty do obliczeń

Ze względu na symetrię pola eksploatacyjnego ograniczono się do rozpatrywania jego połowy. Liczba stref w modelach wynosiła 98 560 a liczba węzłów 106 191. Na

brzegach zadano przemieszczeniowe warunki brzegowe. Górną powierzchnię modelu obciążono ciśnieniem pionowym o wartości $p_z = 20.0$ MPa, zastępującym oddziaływanie skał nadległych. W obliczeniach uwzględniano ciężar własny ośrodka.

W analizowanym obszarze zlokalizowano 10 rzędów komór, przy czym w każdym rzędzie znajduje się 8 filarów (łącznie 88 filarów).

Łącznie przeprowadzono trzy serie obliczeń:

- ❖ w serii pierwszej przyjęto że górotwór ma cechy ośrodka liniowo-sprężystego,
- ❖ w serii drugiej przyjęto, że górotwór ma cechy ośrodka sprężysto-plastycznego Coulomba-Mohra o kącie tarcia wewnętrznego równym 30° ,
- ❖ w serii trzeciej przyjęto, że górotwór ma cechy ośrodka sprężysto-plastycznego Coulomba-Mohra zaś skały furty eksploatacyjnej mają cechy ośrodka sprężysto-plastycznego Coulomba-Mohra z osłabieniem. W ramach trzeciej serii przeprowadzono obliczenia dla różnych wariantów, w których zmieniano wartość kąta tarcia wewnętrznego dla skał furty eksploatacyjnej. Przyjmowano kolejno wartości 30, 32, 33, 34, 35 i 36 stopni.

Obliczenia dla każdej z serii prowadzono symulując stopniowy postęp eksploatacji. W pierwszym etapie założono, że wykonane zostały chodniki pomiędzy filarami – oznaczenie *chl* na rys.1. Następnym krokiem było wybranie pasa oznaczonego *kl*. Procedurę tą powtarzano stopniowo aż do kroku *kl0*. Eksploatację modelowano poprzez nagłe usunięcie węzłów i stref w modelu. Po wykonaniu każdego kroku obliczenia prowadzono aż do osiągnięcia stanu równowagi. Z pewnym przybliżeniem odpowiada to rzeczywistemu procesowi eksploatacji systemem filarowo-komorowym, w którym urabianie odbywa się za pomocą materiałów wybuchowych.

Oslabienie ośrodka modelowano poprzez zmniejszenie jego parametrów wytrzymałościowych – kohezji, kąta tarcia wewnętrznego oraz wytrzymałości na rozciąganie w funkcji odkształceń. Wartości te określono na podstawie analizy wyników obliczeń uzyskanych przy modelowaniu numerycznym procesu zniszczenia próbki skalnej. W tabeli 2 podano sposób określania wartości parametrów wytrzymałościowych w zależności od odkształceń.

TABELA 2 WŁASNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWE W FUNKCJI ODKSZTAŁCEŃ

| Odkształcenie | Spadek kohezji do wartości, % | Spadek kąta tarcia wewnętrznego do wartości, % | Spadek wytrzymałości na rozciąganie do wartości, MPa |
|---------------|-------------------------------|--|--|
| 0 | 100 | 100 | 100 |
| 0.00145 | 83 | 90 | 0 |
| 0.0015 | 55 | 90 | 0 |

| | | | |
|--------|-----|----|---|
| 0.002 | 28 | 90 | 0 |
| 0.0025 | 17 | 90 | 0 |
| 0.003 | 11 | 90 | 0 |
| 0.004 | 4 | 90 | 0 |
| 0.005 | 0.5 | 90 | 0 |

Należy wszakże zaznaczyć, że wyniki obliczeń numerycznych dla ośrodków sprężysto-plastycznych z osłabieniem są silnie zależne od zastosowanej siatki węzłów. W pracy obliczenia przeprowadzono dla jednakowej geometrii i identycznej siatki węzłów dla wszystkich serii (modeli konstytutywnych), aby możliwe było jakościowe porównanie ich rezultatów.

Wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono w postaci wykresów przemieszczeń oraz naprężeń poziomych i pionowych w przekroju A-A na wysokości stropu furty (rys. 1). Zamieszczono także mapy naprężeń poziomych w przekroju A-A (przekrój pionowy przez cały model). Kolejne etapy obliczeń oznaczano symbolami od *k1* do *k10* oraz od *ch1* do *ch10* według klucza pokazanego na rys. 1. Na rysunkach stosowano także symboliczne oznaczenia dla modeli numerycznych rozpatrywanych w ramach poszczególnych serii i wariantów. Oznaczenia te zebrano w tabeli 3.

TABELA 3 OZNACZENIA DLA SERII I WARIANTÓW PRZYJĘTE NA RYSUNKACH.

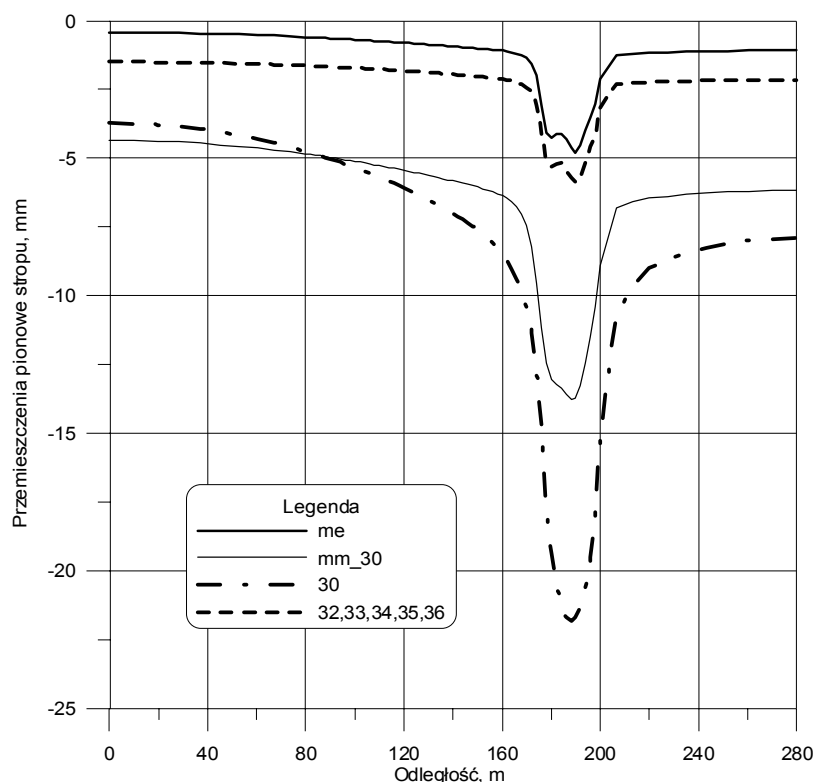
| | |
|---|--------------|
| Seria pierwsza – górotwór liniowo-sprężysty | me |
| Seria druga – górotwór sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra (C-M) | mm_30 |
| Seria trzecia – górotwór sprężysto-plastyczny C-M z osłabieniem dla $\varphi = 30^\circ$ | 30 |
| Seria trzecia – górotwór sprężysto-plastyczny C-M z osłabieniem dla $\varphi = 32^\circ$ | 32 |
| Seria trzecia – górotwór sprężysto-plastyczny C-M z osłabieniem dla $\varphi = 33^\circ$ | 33 |
| Seria trzecia – górotwór sprężysto-plastyczny C-M z osłabieniem dla $\varphi = 34^\circ$ | 34 |
| Seria trzecia – górotwór sprężysto-plastyczny C-M z osłabieniem dla $\varphi = 35^\circ$ | 35 |
| Seria trzecia – górotwór sprężysto-plastyczny C-M z osłabieniem dla $\varphi = 36^\circ$ | 36 |

Ze względu na ograniczoną objętość artykułu pokazano tylko niewielką część uzyskanych wyników skupiając się na analizie wybranych składowych stanu naprężenia i przemieszczenia w przekroju A-A (rys.1).

Na kolejnych rysunkach zamieszczono:

- rys. 2 - wykresy przemieszczeń pionowych w stropie dla kroku *k2*,
- rys. 3 - wykresy naprężeń pionowych w stropie dla kroku *k2*,
- rys. 4. - mapa naprężeń poziomych dla kroku *k2* i modelu **30**,

- rys. 5. - wykresy przemieszczeń pionowych w stropie dla kroku *k4*,
- rys. 6 - mapa naprężeń poziomych dla kroku *k4* i modelu **mm_30**,
- rys. 7 - wykresy przemieszczeń pionowych w stropie dla kroku *k10*
- rys. 8 – mapa naprężeń poziomych dla kroku *k10* i modelu **mm_30**,
- rys. 9 – mapa naprężeń poziomych dla kroku *k10* i modelu **30**,



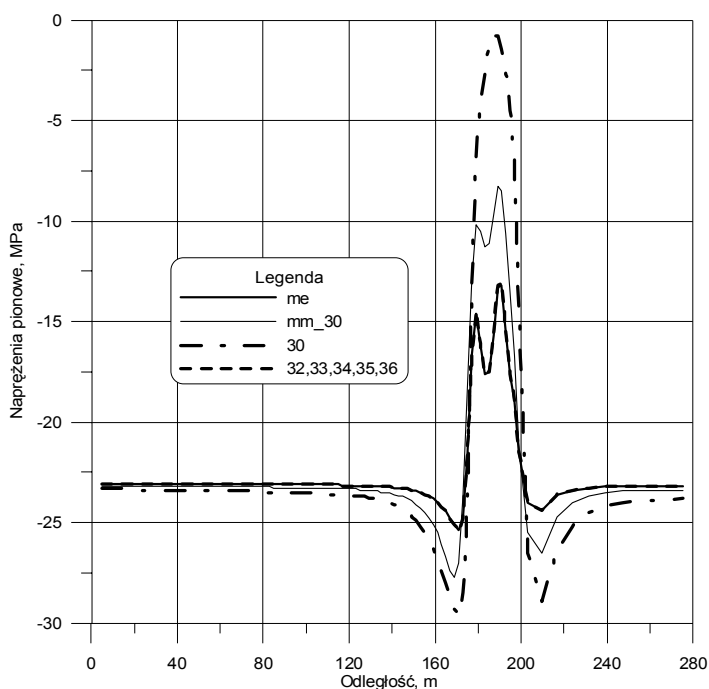
Rys. 2 - Wykresy przemieszczeń pionowych w stropie dla kroku *k2*

Analiza map i wykresów pozwala na sformułowanie szeregu wniosków dotyczących zmian stanu naprężenia, wyężenia i przemieszczenia w miarę rozwoju eksploatacji systemem filarowo-komorowym. Wnioski te zostaną poniżej przedstawione dla kolejnych kroków odpowiadających poszczególnym etapom eksploatacji.

Krok k2.

- Maksymalne przemieszczenia pionowe stropu dla modelu **me** nie przekraczają 5 mm. Przyjęcie modelu **mm_30** powoduje wzrost tych przemieszczeń do około

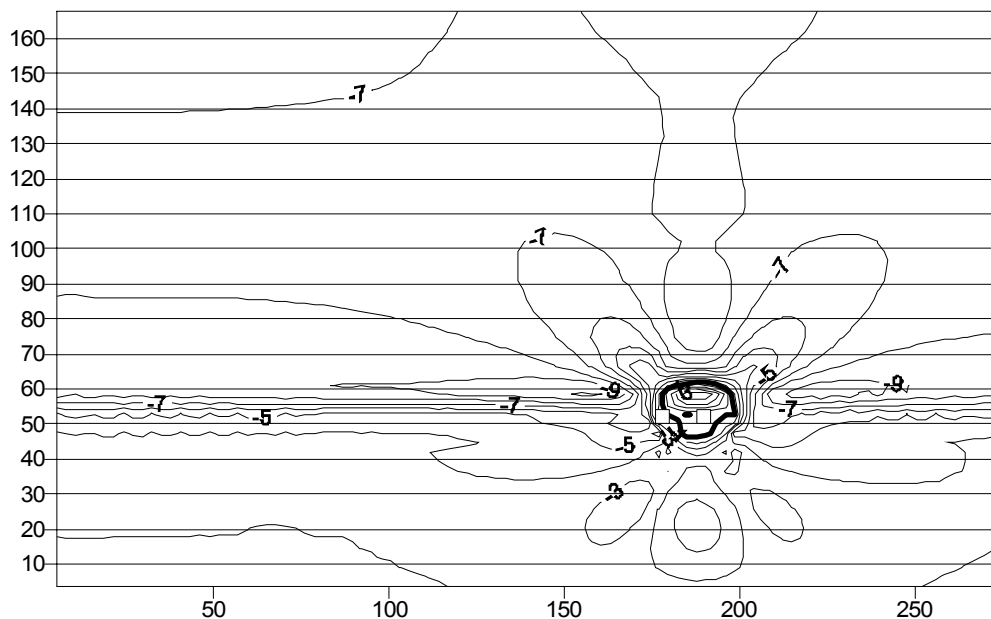
14 mm, zaś dla modelu **30** są one największe i wynoszą około 22 mm. Wartości maksymalnych przemieszczeń (rys.2) dla modeli **32, 33, 34, 35** i **36** są zbliżone i wynoszą od około 6 mm (model **32**) do 5.7 mm (model **36**).



Rys. 3 - wykresy naprężeń pionowych w stropie dla kroku k_2

- Ekstremalne wartości pionowych naprężeń ściskających (rys.3) w stropie dla modelu **me** są równe -25.4 MPa, zaś dla modelu **mm_30** maleją do -27.7 MPa. Dla modelu **30** są one najmniejsze i wynoszą -29.6 MPa. Wartości ekstremalnych pionowych naprężeń ściskających dla kolejnych modeli **32, 33, 34, 35** i **36** są zbliżone i wynoszą około -25.4 MPa.
- Ekstremalne wartości naprężeń poziomych (rys.4) w stropie dla modelu **me** są równe -3.88 MPa, zaś dla modelu **mm_30** wzrastają do 0.6 MPa. Dla modelu **30** są one największe i wynoszą 5.3 MPa. Wartości maksymalnych poziomych naprężeń dla kolejnych modeli **32, 33, 34, 35** i **36** są zbliżone i wynoszą (podobnie jak dla modelu **30**) -3.88 MPa.
- Przyjęcie modelu **me** powoduje, że otoczeniu komór praktycznie występują naprężenia ściskające. Maksymalne wartości naprężeń rozciągających nie przekraczają 0.048 MPa, a strefy ich zasięgu są bardzo małe. W modelu **mm_30**

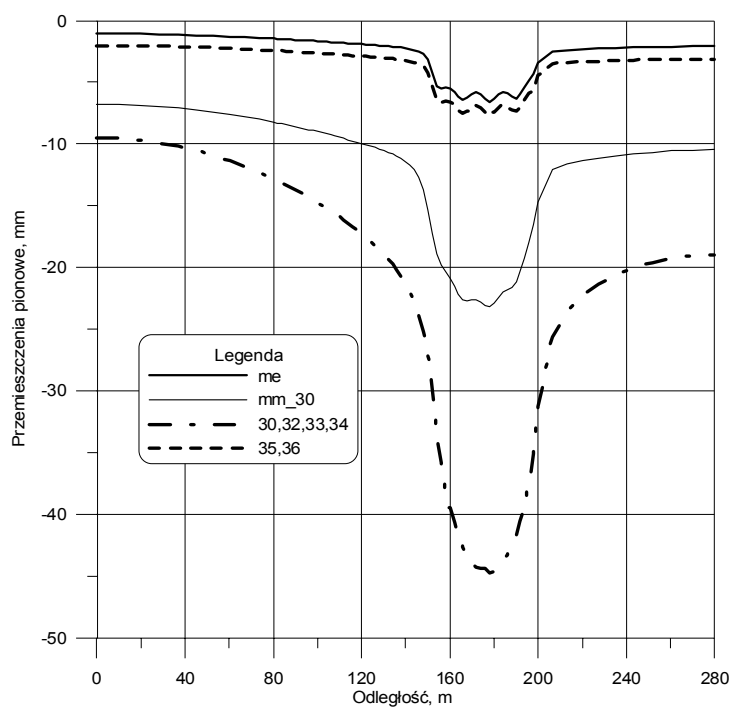
występują znacznie większe strefy naprężeń rozciągających. Maksymalne wartości naprężeń osiągają około 0.62 MPa. Maksymalny zasięg stref naprężeń rozciągających wynosi 4.8 m od stropu komór. Dla modelu **30** występują największe strefy naprężeń rozciągających dochodzące do 7.9 m, a ich maksymalne wartości wynoszą 4.92 MPa.



Rys. 4. Mapa naprężeń poziomych dla kroku k_2 i modelu **30**,

- Powyższe wartości naprężeń i przemieszczeń wskazują, że zachowanie się modeli **32**, **33**, **34**, **35** i **36** i modelu **me** jest bardzo zbliżone. Dla tych modeli nie nastąpiło zniszczenie skał w furcie. W modelu **mm_30** występują przemieszczenia pionowe prawie trzykrotnie większe niż dla modelu **me**. Większe są także wartości pionowych naprężeń ściskających oraz występują poziome naprężenia rozciągające (0.6 MPa), które mogą być przyczyną zniszczenia skał. Największe przemieszczenia pionowe stropu (ponad 4 razy większe niż dla modelu **me**) a także pionowe naprężenie ściskające jak i poziome naprężenia rozciągające (5.3 MPa) występują dla modelu **30**. Zarówno wartości przemieszczeń jak i naprężeń wskazują, że dla modelu **30** w kroku k_2 nastąpiło zniszczenie filarów. Spowodowało to istotne zmiany w polu naprężeń i przemieszczeń. Można więc stwierdzić, że dla modelu **30** przejście filarów w fazę pokrytyczną nastąpiło po wybraniu dwóch rzędów filarów. Spowodowało to znaczny wzrost zasięgu stref

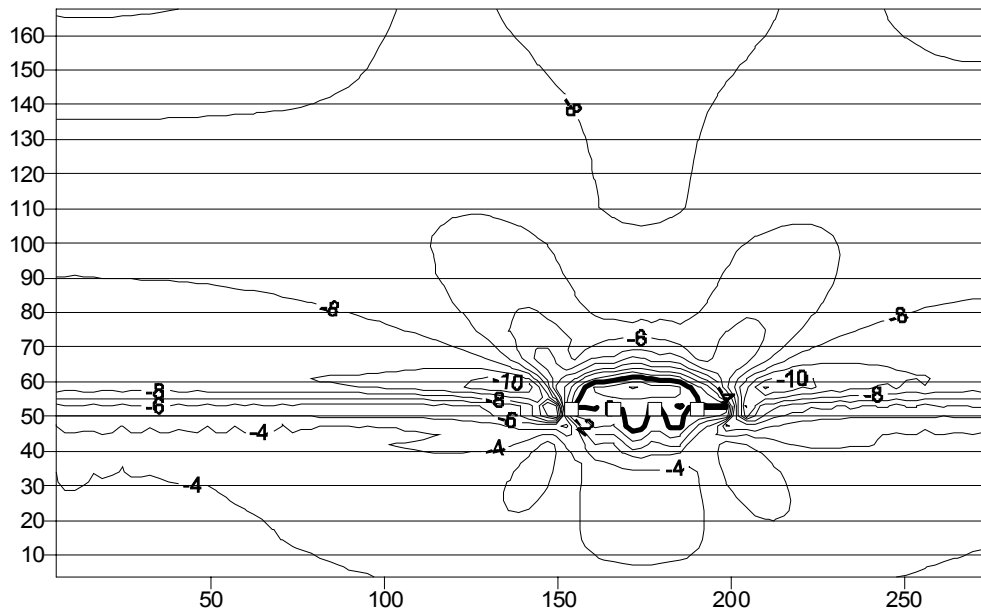
naprężeń rozciągających w warstwach stropowych (do 7.9 m), co może być źródłem utraty ich stateczności. Dla pozostałych modeli filary znajdują się w fazie przedniszczeniowej.



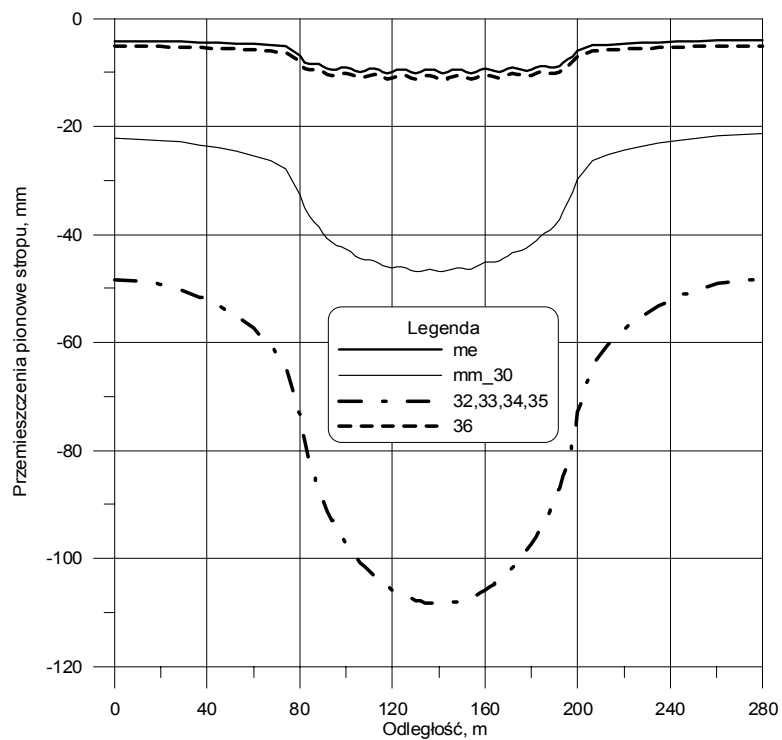
Rys. 5. - Wykresy przemieszczeń pionowych w stropie dla kroku *k4*

Krok ch3.

- Uzyskane wartości naprężeń i przemieszczeń wskazują, że zachowanie się modeli **33**, **34**, **35** i **36** i modelu **me** jest bardzo zbliżone. Dla tych modeli nie nastąpiło zniszczenie skał w furcie. Największe przemieszczenia pionowe stropu (prawie 6 razy większe niż dla modelu **me**) a także pionowe naprężenie ściskające jak i poziome naprężenia rozciągające (6.75 MPa) występują dla modeli **30** oraz **32**. Zarówno wartości przemieszczeń jak i naprężeń wskazują, że dla modelu **32** w kroku *ch3* nastąpiło zniszczenie filarów. Można więc stwierdzić, że dla modelu **32** przejście filarów w fazę pokrytyczną nastąpiło po wybraniu dwóch rzędów filarów i rozpoczęciu wybierania chodników dla następnego rzędu. Dla modeli **33**, **34**, **35** i **36** filary znajdują się w fazie przedniszczeniowej.



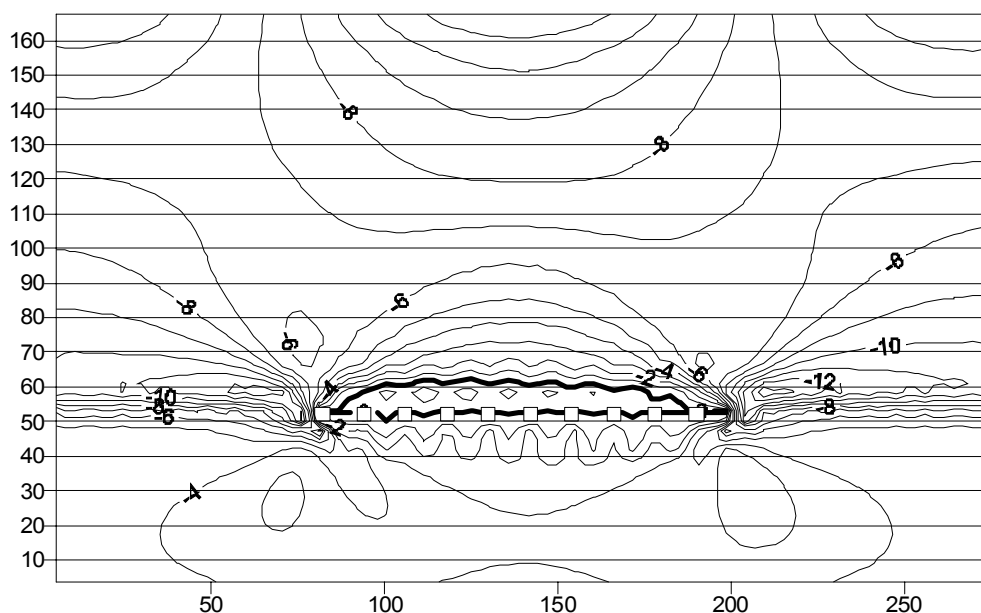
Rys. 6 - Mapa naprężeń poziomych dla kroku *k4* i modelu *mm_30*



Rys. 7 - Wykresy przemieszczeń pionowych w stropie dla kroku *k10*

Krok k3.

- Wartości naprężeń i przemieszczeń wskazują, że zachowanie się modeli **34**, **35** i **36** i modelu **me** jest bardzo zbliżone. Dla tych modeli nie nastąpiło zniszczenie skał w furcie. Największe przemieszczenia pionowe stropu (prawie 7 razy większe niż dla modelu **me**) a także pionowe naprężenie ściskające i poziome naprężenia rozciągające (7.11 MPa) występują dla modeli **30**, **32** oraz **33**. Zarówno wartości przemieszczeń jak i naprężeń wskazują, że dla modelu **33** w kroku *k3* nastąpiło zniszczenie filarów. Można więc stwierdzić, że dla modelu **33** przejście filarów w fazę pokrytyczną nastąpiło po wybraniu trzech rzędów filarów. Postęp eksploatacji powoduje wzrost zasięgu stref naprężeń rozciągających w warstwach stropowych (do 10.2 m), co może być źródłem utraty ich stateczności. Dla modeli **34**, **35** i **36** filary znajdują się w fazie przedzniszczeniowej.

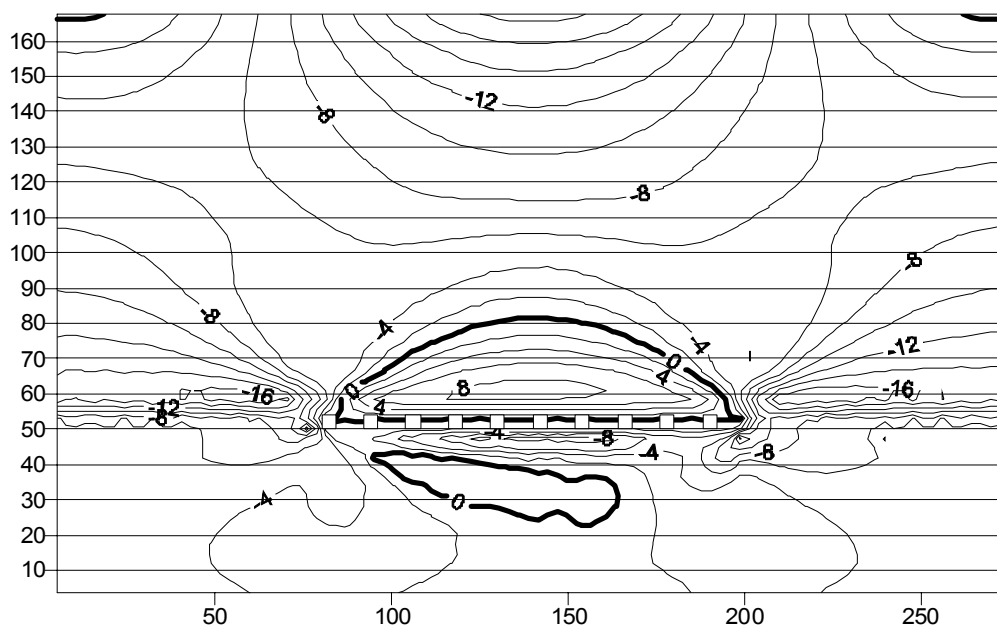


Rys. 8 – Mapa naprężeń poziomych dla kroku *k10* i modelu **mm_30**

Krok k4.

- Wartości naprężeń i przemieszczeń wskazują, że zachowanie się modeli **35** i **36** oraz modelu **me** jest bardzo zbliżone. Dla tych modeli nie nastąpiło zniszczenie skał w furcie. W modelu **mm_30** występują przemieszczenia pionowe prawie czterokrotnie większe niż dla modelu **me** (rys.5). Największe przemieszczenia pionowe stropu (około 7 razy większe niż dla modelu **me**) a także pionowe naprężenie ściskające jak i poziome naprężenia rozciągające (7.72 MPa)

występują dla modeli **30**, **32**, **33** oraz **34** (rys.6). Zarówno wartości przemieszczeń jak i naprężeń wskazują, że dla modelu **34** w kroku *k4* nastąpiło zniszczenie filarów. Można więc stwierdzić, że dla modelu **34** przejście filarów w fazę pokrytyczną nastąpiło po wybraniu czterech rzędów filarów. Następuje dalszy wzrost zasięgu stref naprężeń rozciągających w warstwach stropowych (do 12.9 m), co może być źródłem utraty ich stateczności. Dla modeli **35** i **36** filary znajdują się w fazie przedniszczeniowej.



Rys. 9 – Mapa naprężeń poziomych dla kroku *k10* i modelu **30**,

Krok k7.

- Wartości naprężeń i przemieszczeń wskazują, że zachowanie się modelu **36** oraz modelu **me** jest bardzo zbliżone. Dla tych modeli nie nastąpiło zniszczenie skał w furcie. W modelu **mm_30** występują przemieszczenia pionowe czterokrotnie większe niż dla modelu **me**. Największe przemieszczenia pionowe stropu (prawie 10 razy większe niż dla modelu **me**) a także pionowe naprężenie ściskające jak i poziome naprężenia rozciągające (7.71 MPa) występują dla modeli **30**, **32**, **33**, **34** oraz **35**. Zarówno wartości przemieszczeń jak i naprężeń wskazują, że dla modelu **35** w kroku *k7* nastąpiło zniszczenie filarów. Można stwierdzić, że dla modelu **35** przejście filarów w fazę pokrytyczną nastąpiło po wybraniu siedmiu rzędów filarów. Następuje dalszy wzrost zasięgu stref naprężeń rozciągających w

warstwach stropowych (do 22.2 m), co może być źródłem utraty ich stateczności. Dla modelu **36** filary znajdują się w fazie przedzniszczeniowej.

Krok k10.

- Wartości naprężeń i przemieszczeń (rys.7) wskazują, że zachowanie się modelu **36** oraz modelu **me** jest bardzo zbliżone. Dla tych modeli nie nastąpiło zniszczenie skał w furcie. W modelu **mm_30** występują przemieszczenia pionowe czterokrotnie większe niż dla modelu **me**. Większe są także wartości pionowych naprężeń ściskających (rys.8) oraz poziomych naprężeń rozciągających. Największe przemieszczenia pionowe stropu (prawie 10 razy większe niż dla modelu **me**) a także pionowe naprężenie ściskające jak i poziome naprężenia rozciągające (7.71 MPa) występują dla modeli **30, 32, 33, 34** oraz **35** (rys.9) . Następuje dalszy wzrost zasięgu stref naprężeń rozciągających w warstwach stropowych (do 27.4 m), co może być źródłem utraty ich stateczności. Dla modelu **36** filary znajdują się w fazie przedzniszczeniowej. Oznacza to, że po wybraniu 10 rzędów filarów dalej nie nastąpiło ich zniszczenie.

3. PODSUMOWANIE

Celem przeprowadzonych obliczeń numerycznych było wykazanie różnic wynikających z przyjęcia różnych sposobów numerycznego modelowania eksploatacji złóż miedzi systemem filarowo-komorowym. Przeprowadzone obliczenia pozwalają na stwierdzenie, że stosowanie różnych modeli konstytutywnych górotworu prowadzi do uzyskania całkowicie odmiennych wyników w zakresie stanu naprężenia, przemieszczenia i wyężenia w otoczeniu poszczególnych komór i skrzyżowań.

Wiadomo, że jedynie przestrzenne modelowanie numeryczne pozwala na wiarygodny opis stanu naprężenia, przemieszczenia i wyężenia występującego w otoczeniu systemu komór i filarów. Rozpatrzono tutaj możliwości opisu zachowania górotworu za pomocą trzech różnych modeli konstytutywnych górotworu: liniowo-sprężystego, sprężysto-idealnie-plastycznego oraz sprężysto-plastycznego z osłabieniem.

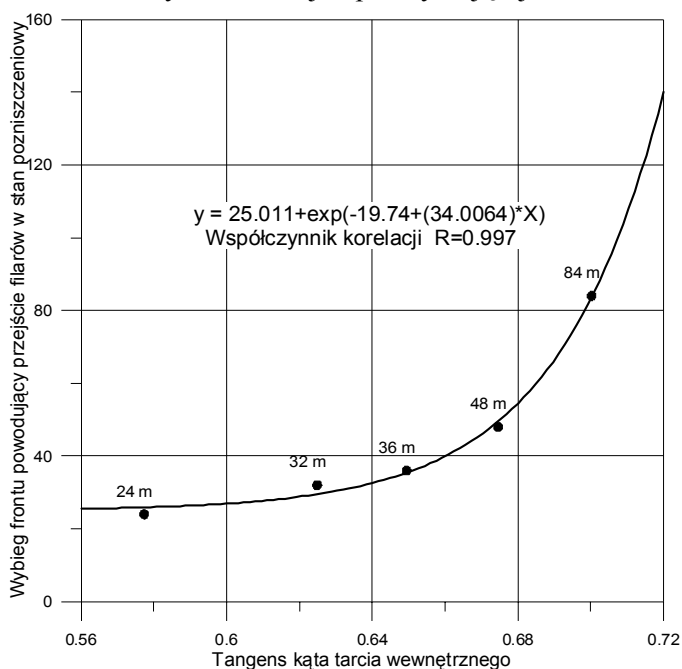
Analiza wyników obliczeń wskazuje, że przyjęcie modelu sprężystego nie może w sposób wiarygodny symulować zmian stanu naprężenia i wyężenia związanych z postępowaniem eksploatacji. O wiele bardziej uzasadnione jest zastosowanie modelu sprężysto-plastycznego. Należy jednak zauważyć, że w takie założenie pozwala tylko w ograniczony sposób symulować zmiany stanu naprężenia i wyężenia związane z postępowaniem eksploatacji.

Wyniki obliczeń wskazują, że model sprężysto-plastyczny z osłabieniem może, przy spełnieniu pewnych określonych warunków, dobrze symulować proces eksploatacji kolejnych pasów w systemie filarowo-komorowym. Umożliwia on prognozowanie istotnych zmian stanu naprężenia, przemieszczenia i wyężenia w otoczeniu komór związanych ze zmianą charakteru pracy na pokrytyczny. Przeprowadzone analizy pozwalają na stwierdzenie, że zmiana charakteru pracy filarów na pokrytyczny jest funkcją rozwoju eksploatacji oraz parametrów mechanicznych skał furty. Nawet niewielkie różnice we własnościach wytrzymałościowych mogą prowadzić do znacząco odmiennego zachowania się filarów oraz istotnych zmian w stanie naprężenia, przemieszczenia i wyężenia. Przykładowo dla wartości kąta tarcia równego 34 stopnie przejście filarów w stan pokrytyczny następuje po wybraniu czterech rzędów, zaś dla kąta tarcia 35 stopni zmiana stanu filarów następuje po wybraniu siedmiu rzędów.

Na rysunku 10 przedstawiono wielkości wybiegu frontu powodującego przejście filarów w stan pozniszczeniowy w funkcji tangensa kąta tarcia wewnętrzznego skał furty eksploatacyjnej.

Na rysunku zamieszczono także wykres funkcji aproksymującej analizowaną zależność z bardzo wysokim współczynnikiem korelacji.

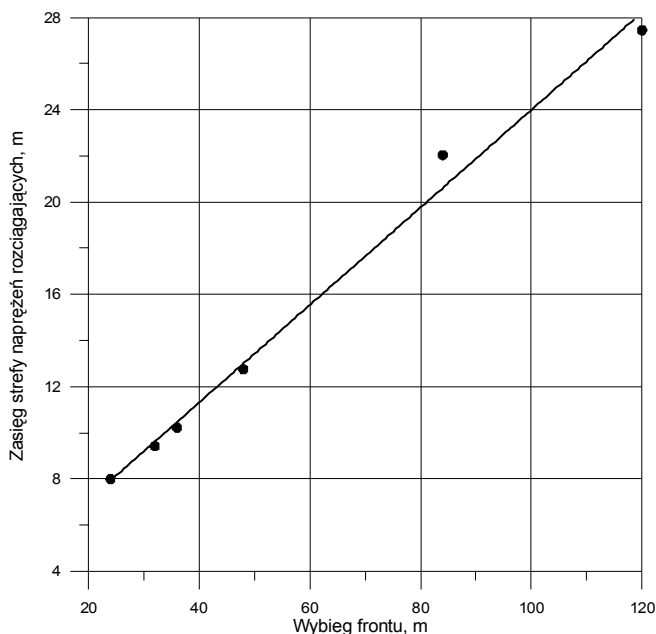
Warto także zauważyć, że przyjęcie modelu sprężysto-plastycznego C-M z osłabieniem prowadzi do występowania rosnących, w miarę rozwoju eksploatacji, stref zasięgu poziomych naprężeń rozciągających. Strefy te pojawiają się głównie w warstwach stropowych. Przykładowo w ostatnim analizowanym kroku eksploatacji strefy poziomych naprężeń rozciągających sięgają aż



Rys.10. Wybieg frontu powodujący przejście filarów w stan pozniszczeniowy w funkcji tangensa kąta tarcia wewnętrzniego skał furty eksploatacyjnej

27.4 m powyżej stropu komór, zaś maksymalne naprężenia rozciągające wynoszą 8.5 MPa. Takie wartości naprężeń mogą doprowadzić do nagłego zniszczenia warstw stropowych. Na rys. 11 przedstawiono zasięg stref naprężeń rozciągających w stropie w funkcji wybiegu frontu dla modelu 30. Widać wyraźnie, że w miarę rozwoju eksploatacji zasięg strefy naprężeń rozciągających w stropie rośnie praktycznie liniowo.

Należy jednakże zaznaczyć, że model sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra z osłabieniem przyjęto tylko dla skał w obrębie furty eksploatacyjnej. Można przypuszczać, że zastosowanie takiego modelu dla wszystkich warstw pozwoliłoby w wiarygodny sposób prognozować postępujący, w miarę rozwoju eksploatacji, proces zniszczenia kolejnych warstw skalnych. Należałoby jednak uprzednio przeprowadzić staranną kalibrację zastosowanej geometrii modelu, aby ograniczyć wpływ gęstości węzłów na wyniki obliczeń numerycznych. Proces kalibracji może być oparty na przykład o pomiary przemieszczeń pionowych w miarę postępu eksploatacji.



Rys. 11. zasięg stref naprężeń rozciągających w stropie w funkcji wybiegu frontu dla modelu 30.

LITERATURA

- FLAC3D v.2.1. 2002. *Users Manual*. Itasca Consulting Group. Minneapolis. USA.
 FLISIAK J., CAŁA M., TAJDUŚ A. 2001. *Możliwości numerycznego modelowania filarowo-komorowego systemu eksploatacji*. XXIV ZSMG. Prace Naukowe IGiH Politechniki Wrocławskiej, 173-182.

STRESZCZENIE Numeryczne modelowanie filarowo-komorowego systemu eksploatacji

W poniższym referacie zajęto się problematyką numerycznego modelowania eksploatacji systemem filarowo-komorowym z ugięciem stropu. Dla wybranej sytuacji górniczo-geologicznej przeprowadzono szereg symulacji stanu naprężenia, przemieszczenia i wyężenia w otoczeniu filarów i komór. Obliczenia wykonano za pomocą programu Metody Różnic Skończonych FLAC3D w przestrzennym stanie odkształcenia. Zastosowano trzy różne modele konstytutywne górotworu - model liniowo-sprężystego, model sprężysto-idealnie-plastyczny oraz model sprężysto-plastycznego z osłabieniem. Okazało się, że w zależności od przyjętego modelu konstytutywnego otrzymano znaczące różnice w wynikach obliczeń numerycznych. Przyjęcie modelu sprężystego nie może w sposób wiarygodny symulować zmian stanu naprężenia i wyężenia związanych z postępem eksploatacji. O wiele bardziej uzasadnione jest zastosowanie modelu sprężysto-plastycznego. Należy jednak zauważyć, że w takie założenie pozwala tylko w ograniczony sposób symulować zmiany stanu naprężenia i wyężenia związane z postępem eksploatacji. Wyniki obliczeń wskazują, że model sprężysto-plastyczny z osłabieniem może, przy spełnieniu pewnych określonych warunków, dobrze symulować proces eksploatacji kolejnych pasów w systemie filarowo-komorowym. Umożliwia on prognozowanie istotnych zmian stanu naprężenia, przemieszczenia i wyężenia w otoczeniu komór związanych ze zmianą charakteru pracy na pokrytyczny.