

Marek KWAŚNIEWSKI, Jinan WANG

Katedra Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej

SYMULACJA KOMPUTEROWA EKSPLOATACJI POKŁADU WĘGLA SYSTEMEM ŚCIANOWYM Z ZAWAŁEM STROPU

I. Pole przemieszczeń i strefy spękań w górotworze

Streszczenie. Posługując się programem metody różnic skończonych *FLAC* v. 3.22 zbudowano płaski, złożony z 65 warstw zaburzonych dwoma dużymi uskokami, model górotworu o wymiarach 2250 m × 650 m z zalegającym na głębokości 535 m pokładem węgla o grubości 2,25 m. Symulowano eksploatację pokładu systemem ścianowym z zawałem stropu w polu o długości 1260 m. Badano towarzyszące eksploatacji zmiany pola przemieszczeń, spękań i naprężeń w górotworze.

COMPUTER SIMULATION OF LONGWALL COAL MINING WITH ROOF CAVING

I. Displacement field and fracture zones in the rock mass

Summary. Making use of the two-dimensional finite difference program *FLAC* v. 3.22, a 2250 m wide by 650 m deep strata model has been built, consisting of 65 layers disturbed by two major faults, with a coal seam 2.25 m thick, located at the depth of 535 m. Longwall extraction of the seam, with roof caving, has been simulated in a panel 1260 m long. Changes of the displacement, fracture and stress field in the rock mass, accompanying the mining, have been investigated.

SIMULATION NUMERIQUE D'EXPLOITATION DE LA COUCHE DE CHARBON PAR LONGUE TAILLES AVEC FOUDROYAGE DU TOIT

I. Champ de déplacements et zones de fractures dans les terrains

Résumé. En utilisant le code de la méthode des différences finies *FLAC* v. 3.22 on a construit un modèle des terrains de dimensions de 2250 m × 650 m avec une couche de charbon d'épaisseur de 2,25 m située à 535 m de profondeur. On a simulé l'exploitation de la couche par la méthode de longues tailles foudroyées dans un panneau d'une longueur de 1260 m. On a étudié les changements du champ des déplacements, de fracturation et des contraintes au rocher qui accompagnent l'exploitation minière.

1. WPROWADZENIE

W artykule przedstawione zostaną wyniki badań wykonanych w 1993 roku w Laboratorium Mechaniki Skał Instytutu Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej w ramach jednego z ośmiu zadań projektu celowego nr 231/CS6-9/92 pt. "Wysokowydajny kompleks ścianowy i nowa technologia wybierania pokładów w KWK "Staszic" [20]. Zadanie to, pt. "Kompleksowe badania zjawisk zachodzących w górotworze w otoczeniu ścianowych wyrobisk eksploatacyjnych", realizowane wspólnie przez Laboratorium Mechaniki Skał IGBP i OP Politechniki Śląskiej i Zakład Tępań i Mechaniki Górotworu Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach, miało na celu poznanie i opisanie zjawisk zachodzących w górotworze w otoczeniu ścianowych wyrobisk eksploatacyjnych w pokładzie 352 w KWK "Staszic", wyposażonych w maszyny urabiające i odstawcze pozwalające na wybieranie pokładu, ścianami o długości 300 m, z prędkościami sięgającymi 10 - 12 m/dobę. Celem prac badawczych wykonywanych w Laboratorium Mechaniki Skał IGBP i OP było m.in. oznaczenie własności mechanicznych skał nienaruszonych budujących górotwór w sąsiedztwie pokładu 352 w KWK "Staszic", określenie cech morfologicznych powierzchni ścianek spękań w skałach i zbadanie zachowania się skał spękanych oraz samych spękań w polu naprężeń, opracowanie równań stanu dla szczelinowatego osrodka skalnego, zbudowanie numerycznego modelu górotworu otaczającego pokład węgla w rejonie eksploatacji i przeprowadzenie analizy stanu przemieszczenia w otoczeniu wyrobiska ścianowego w górotworze jako ośrodku nieciągłym, dyskretnym.

W trzech sąsiadujących ze sobą artykułach przedstawione zostaną wyniki prac badawczych obejmujących numeryczne modelowanie górotworu i komputerową symulację eksploatacji pokładu systemem ścianowym z zawalem stropu. Posługując się komputerowym

programem metody różnic skończonych *FLAC* v. 3.22 badano zmiany stanu przemieszczenia i naprężenia w górotworze następujące w miarę przesuwania się frontu eksploatacji ścianowej w pokładzie 352 w KWK "Staszic". Poniżej przedstawimy towarzyszące eksploatacji pokładu węgla zmiany pola przemieszczeń, spękań i naprężeń w górotworze. W kolejnych dwóch artykułach omówione zostanie zachowanie się dwóch dużych uskoków występujących w górotworze w rejonie eksploatacji pokładu 352 w polu "L" w KWK "Staszic" [18] oraz wpływ prędkości eksploatacji na wielkość i zasięg stref koncentracji naprężeń oraz deformacji ciągłych i nieciągłych w górotworze w sąsiedztwie wyrobiska [19].

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PROGRAMU *FLAC*

Program komputerowy *FLAC* (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) jest programem metody różnic skończonych, służącym do budowy płaskich numerycznych modeli górotworu i symulowania zachowania się ośrodków gruntowych i skalnych, które doznają plastycznego płynięcia lub kruche go pęknięcia po osiągnięciu punktu plastyczności lub granicy wytrzymałości. Jest oparty na schemacie obliczeniowym Lagrange'a¹, który jest szczególnie odpowiedni do modelowania dużych deformacji i zniszczenia materiału. Ta cecha sprawia, że jest on szczególnie predestynowany do rozwiązywania zagadnień inżynierii skalnej (górnictwo, budownictwo podziemne, budownictwo hydrotechniczne); służy do analizy i projektowania wyrobisk i ich obudowy oraz budowli podziemnych i naziemnych wykonywanych w ośrodkach gruntowych i skalnych. Sprzyjają temu pewne szczególne właściwości programu, które umożliwiają modelowanie nieciągłości w ośrodkach skalnych (por. [18]), symulowanie zachowania się masywu skalnego i budowli przy wymuszeniach dynamicznych "zewnętrznych" i "wewnętrznych" oraz modelowanie obudowy osłonowej, obudowy podporowej i obudowy kotwiowej.

¹ W odróżnieniu od Eulerowskiej metody zapisu ruchu, zgodnie z którą materiał porusza się i odkształca względem ustalonej (zamocowanej) siatki, w metodzie zapisu Lagrange'a przyrostowe przemieszczenia dodawane są do współrzędnych tak, że siatka porusza się i odkształca razem z materiałem, w którym została założona.

FLAC jest tym bardziej atrakcyjny dla geomechaników, że stwarza możliwość wyboru równań stanu spośród wielu modeli konstytutywnych właściwych różnym odmianom geomateriałów. Są to modele następujące:

- sprężysty izotropowy,
- sprężysty transwersalnie izotropowy,
- sprężysto-idealnie plastyczny (Coulomba),
- sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem,
- sprężysto-kruchy z osłabieniem,
- "podwójnie" plastyczny (plastyczność postaciowa i objętościowa),
- hiperboliczny Duncana i Changa,
- warunki stanu granicznego: Coulomba-Mohra i Hoeka i Browna,
- prawa płynięcia: stowarzyszone i niestowarzyszone,
- płaszczyzny osłabienia (model materiału Coulomba-Mohra, który przejawia wyrazistą anizotropię wytrzymałości),
- powierzchnie rozdziału (sztywność normalna, sztywność ścinania, warunek wytrzymałości granicznej na ścinanie Coulomba, wytrzymałość na rozciąganie),
- lepkość sprężystość (trzy modele pełzania).

Dużą zaletą programu jest zdolność do symulowania różnorodnych procesów fizykalnych zachodzących w ośrodkach skalnych i gruntowych; umożliwia on badanie nie tylko zmian pola przemieszczeń i naprężeń mechanicznych, ale i lepkiego przepływu płynów w odkształcalnych ośrodkach porowatych i procesu wymiany ciepła. Obliczenia stanu naprężenia i przemieszczenia oraz przepływu płynów i wymiany ciepła mogą być przy tym wykonywane zarówno indywidualnie, oddzielnie, jak i łącznie jako tzw. zadania sprzężone. Przykładowo, można badać wpływ wzajemnego oddziaływania pola deformacji i pola temperatury w górotworze (zadanie termomechaniczne).

Możliwe jest także symulowanie losowego rozkładu wartości "stałych" materiałowych oraz uzależnienia tych "stałych" od stanu naprężenia lub odkształcenia.

FLAC wyposażony jest dodatkowo w język programowania o nazwie *FISH* (skrót od *FLACish*), który umożliwia użytkownikowi programu m.in. samodzielne definiowanie nowych zmiennych i funkcji (np. równań stanu, warunków stanu granicznego, funkcji pełzania).

Program *FLAC* został opracowany przez dra Petera Cundalla i jego współpracowników z University of Minnesota i Itasca Consulting Group Inc. w Minneapolis na potrzeby, na początku, samej firmy zajmującej się wtedy doradztwem w branży górniczej. Pierwsza handlowa wersja programu pojawiła się na rynku w lutym 1986 roku². Od dobrych kilku już lat program stosowany jest do rozwiązywania zadań z zakresu szeroko rozumianej geomechaniki przez naukowców i inżynierów geotechników w wielu krajach o dobrze rozwiniętej mechanice skał i inżynierii skalnej (por. m.in. [4-6, 10, 13-17, 22-27, 29]).

FLAC, napisany w języku Fortran 77, przeznaczony jest głównie, ale nie jedynie, dla mikrokomputerów w zgodnych ze standardem IBM PC 386 (z koprocesorem arytmetycznym) i 486 oraz stacji roboczych SUN. Dopuszczalna wielkość (liczba elementów) obliczanego modelu zależy wyłącznie od wielkości będącej do dyspozycji pamięci o dostępie bezpośrednim komputera. Zgodnie z opisem programu (rozdział 1.7 w pierwszym tomie podręcznika [9]; por. również [7], str. 17) 16 MB RAM umożliwia obliczanie modeli o liczbie elementów sięgającej 60 000 (dla materiałów typu Coulomba-Mohra)³.

Pozostałe informacje o programie, wraz z licznymi przykładami zastosowań, można znaleźć w obszernym i bardzo szczegółowym, 3-tomowym podręczniku [9]; zwięźle są one ujęte w krótkim przewodniku [7] oraz artykule [8]. Niektóre z tych informacji, szczególnie istotne dla zagadnień poruszanych w tym artykule, zostaną podane także w jego części II i III [18, 19].

3. NUMERYCZNE MODELOWANIE ZACHOWANIA SIĘ GÓROTWORU

3.1. Modele górotworu, wyrobiska i obudowy

Przystępując do obliczeń i analizy zmian stanu przemieszczenia, naprężenia i spękań w

² Na wiosnę 1994 roku Itasca wprowadziła na rynek pierwszą wersję programu *FLAC*^{3D} przeznaczonego do modelowania i analizy zadań trójwymiarowych.

³ Według doświadczeń autorów tego artykułu, w przypadku modeli górotworu typu Hoeka i Browna, przy tym bardzo złożonych i niejednorodnych (takich, jak ten przedstawiony w rozdziale 3), maksymalna dopuszczalna liczba elementów ulega redukcji, może być nawet dwukrotnie mniejsza od standardowej.

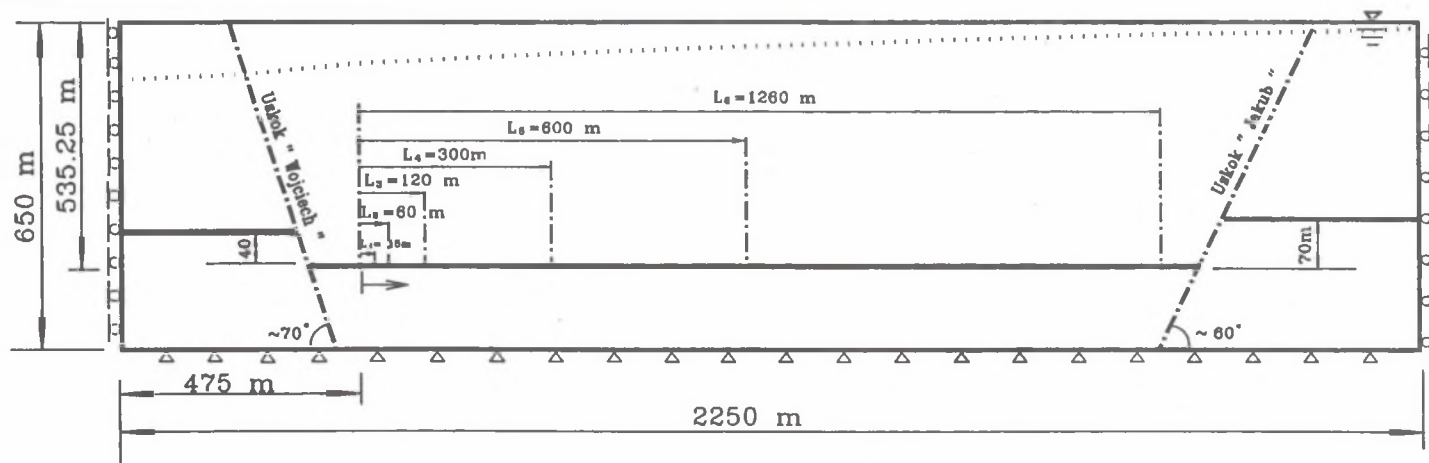
górotworze następujących w miarę przesuwania się frontu eksploatacji w pokładzie węgla, zbudowano numeryczny, strukturalny i fizyczny model górotworu w rejonie pól eksploatacyjnych 1003 i 1004 w pokładzie 352 w KWK "Staszic". Jest to model płaski obejmujący partię górotworu o długości 2250 m i miąższości 650 m, podzielony uskokami "Wojciech" i "Jakub" na trzy części: lewą (zachodnią), środkową i prawą (wschodnią) (rys. 1). Powyżej i poniżej pokładu 352 (o grubości 2,25 m) zalegającego na głębokości 535,25 m zamodelowano, odpowiednio, pięćdziesiąt dwie i dwanaście warstw zbudowanych z trzynastu różnych rodzajów skał (gleba piaszczysta, piaskowiec żółty wodonośny przewarstwiony łałami, piaskowiec, węgiel, łały szare z cienkimi wkładkami piaskowca, zlepieniec, łupek piaszczysty, łupek, łupek ilasty, łupek piaszczysty z kongrecjami żelaziaka, łupek przewarstwiony żelaziakiem, łupek ilasty z kongrecjami żelaziaka, łupek węglowy). Warstwy te wyróżniono na podstawie kart wywierconego z powierzchni (w latach 1929-1931) otworu wiertniczego "Wujek I", otworu badawczego dołowego G-52/86 i otworu hydrogeologicznego H-3/93.

Korzystając z modelu powierzchni rozdziału, które mogą się ślizgać jedna względem drugiej i/lub pękać rozdzielnie, zamodelowano również dwa duże uskoki: "Wojciech" i "Jakub" (por. rys. 1). Szczegółowo mówi się o tym w artykule sąsiednim [18].

Skałom, o gęstości objętościowej od 1400 kg/m^3 (węgiel) do 2800 kg/m^3 (łupek ilasty z kongrecjami żelaziaka), przyporządkowano model fizyczny ośrodka nieliniowego, sprężysto-krucho-plastycznego, o wytrzymałości granicznej i resztkowej opisanej warunkiem stanu granicznego Hoeka i Browna, i o niestowarzyszonej prawie plastycznego pływnięcia.

Wartości stałych materiałowych dla tych trzynastu różnych rodzajów skał i dla węgla z pokładu 352 zostały w większości oznaczone na podstawie odpowiednich badań eksperymentalnych wykonanych przez autorów tego artykułu w Laboratorium Mechaniki Skał IGBP i OP ([20], t. I). Są to wartości współczynnika sprężystości postaciowej G (równe od 38,5 MPa dla gleby piaszczystej do 5455 MPa dla zlepieńców), współczynnika sprężystości objętościowej K^4 (od 83,5 MPa dla gleby piaszczystej do 6560 MPa dla łupków

⁴ Wartości współczynników sprężystości G i K zostały obliczone na podstawie oznaczonych w próbie jednoosiowego ściskania próbek skalnych wartości modułu Younga i współczynnika Poissona. Przedtem charakteryzujące materiał skalny wartości modułu Younga E zostały odpowiednio zredukowane, tak żeby uwzględnić efekt skali, do wartości E_m odpowiadających masywowi skalnemu.



Rys. 1. "Duży" model górotworu w rejonie pola eksploatacyjnego 1003 w pokładzie 352 w KWK "Staszic" (linia przerywana oznacza pionowy zasięg strefy zalegania słabych gruntów piaszczystych)

Fig. 1. "Large" strata model in the region of the exploitation panel 1003 in the seam 352, "Staszic" colliery (the dotted line denotes vertical range of occurrence of weak sandy soils)

piaszczystych z kongrecjami żelaziaka), wytrzymałość graniczna na jednoosiowe ściskanie σ_c (od 1 MPa dla gleby piaszczystej do 90 MPa dla łupków piaszczystych z kongrecjami żelaziaka), wytrzymałości granicznej na jednoosiowe rozciąganie σ_t^5 (od 0,01 MPa dla gleby piaszczystej do 7,0 MPa dla piaskowców) oraz wartości stałych m i s w warunku wytrzymałościowym Hoeka i Browna [11, 12]:

$$\sigma_{1max} = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (1)$$

Wartości tych stałych zależą, odpowiednio, od rodzaju materiału skalnego i tzw. jakości górotworu (wskaźnik RMR (*Rock Mass Rating*) wg Bieniawskiego [2, 3] lub wskaźnik Q (*Rock Mass Quality*) wg Barton, Liena i Lundego [1, 3]), o której decyduje w pierwszym rzędzie stopień spękania skał i właściwości nieciągłości występujących w górotworze. Do oceny wytrzymałości granicznej warstw skalnych wyróżnionych w modelowanej partii górotworu w KWK "Staszic" przyjęto wartości m równe od 0,015 dla gleby piaszczystej do 8,0 dla warstw łupków piaszczystych z kongrecjami żelaziaka, i wartości s równe od 0,000001 dla gleby piaszczystej do 0,1 dla warstw zlepieńców, piaskowców, łupków piaszczystych oraz łupków i łupków piaszczystych z kongrecjami żelaziaka. Do oceny wytrzymałości reszkowej tych warstw w stanie pokrytycznym przyjęto wartości m , i s , odpowiednio, dziesięć razy mniejsze.

Zakładając, że skały budujące poszczególne warstwy górotworu są w stanie przedkrytycznym materiałami sprężystymi izotropowymi, skorzystano z rozwiązania podanego przez Wardle'a i Gerrarda [28], i określając wartości stałych sprężystości zespołu kilku cienkich warstw skalnych składających się na jedną warstwę modelowaną traktowano tę warstwę jako "ekwiwalentny", jednorodny ośrodek transwersalnie izotropowy.

Wartości stałych sprężystości, i wszystkich innych stałych materiałowych występujących w przyjętym do obliczeń modelu fizykalnym, dla sześćdziesięciu pięciu warstw składających się na modelowaną tarczę górotworu w części lewej, środkowej i prawej (por. rys. 1), podane są w tomie II pracy [20] na stronach 146-151; jest to ogółem 2535 liczb.

⁵ Dla przypadku występowania w górotworze naprężeń rozciągających przyjęto warunek wytrzymałościowy w postaci $\sigma_{3min} = -\sigma_T$.

Tarcza modelowa górotworu została podzielona siatką 150×65 ($L \times H$) na 9750 elementów prostokątnych o średniej długości i szerokości (wysokości) równej, odpowiednio, 15 m i 10 m. Liczba węzłów wynosiła 9966.

Przyjęto, że punkty węzłowe znajdujące się na pionowych bocznych krawędziach tarczy mają swobodę przemieszczania się w kierunku pionowym, a w kierunku poziomym przemieszczenia ich są równe zero. Węzły znajdujące się na dolnej poziomej krawędzi tarczy mają możliwość przemieszczania się w kierunku poziomym, a w kierunku pionowym ich przemieszczenia są równe zero. Pozostałe punkty węzłowe mają możliwość swobodnego przemieszczania się w dowolnym kierunku.

Przyjęto również, że pierwotne naprężenie pionowe w górotworze pochodzi od sił masowych (ciężaru skał) i zdeterminowane jest gęstością objętościową skał, natomiast naprężenie poziome, zgodnie z klasycznym rozwiązaniem wywodzącym się z teorii sprężystości, jest ułamkiem właściwym naprężenia pionowego zależnym od wartości współczynnika Poissona.

Obudowa w wyrobisku ścianowym (o szerokości 15 m i wysokości 2,25 m) została zamodelowana 10-członowym płaskim elementem strukturalnym ("support member") o współczynniku sztywności osiowej równym 30 MN/m i podporności 1,03 MN, podpierającym strop na odcinku długości 3,5 m licząc od czoła ściany.

W celu zbadania zmian pola naprężeń i przemieszczeń w górotworze, następujących w miarę przesuwania się frontu eksploatacji w pokładzie 352, symulowano stopniowe wybieranie pokładu z zawałem warstw stropowych. Zamodelowano sześć stadiów eksploatacji (por. rys. 1):

stadium pierwsze, początkowe - pokład wybrany na odcinku długości (L_m) równej 15 m;

stadium drugie - $L_m = 60$ m;

stadium trzecie - $L_m = 120$ m;

stadium czwarte - $L_m = 300$ m;

stadium piąte - $L_m = 600$ m;

stadium szóste, końcowe - $L_m = 1260$ m.

Efekt konsolidowania się gruzowiska w strefie zawałowej modelowano przyporządkowując skałom w tej strefie różne, w zależności od odległości od czoła ściany, wartości modułu Younga. I tak, dla odległości tych równych 60 m, 120 m, 300 m, 600 m

i większych od 600 m, wartość modułu Younga skał spękanych wypełniających przestrzeń wybraną wynosiła, odpowiednio, 1/50, 1/30, 1/20, 1/10 i 1/5 wartości modułu Younga węgla z pokładu 352.

3.2. Opis zmian pola deformacji i naprężeń zachodzących w górotworze w miarę wybierania pokładu

Badając zmiany pola deformacji i naprężeń następujące w miarę przesuwania się frontu eksploatacji na odcinku długości 1260 m (pomiędzy uskokiem "Wojciech" na zachodzie i uskokiem "Jakub" na wschodzie) analizie poddano następujące wielkości:

- ★ największe naprężenia główne (σ_1),
- ★ najmniejsze naprężenia główne (σ_3),
- ★ największe naprężenia ścinające (τ_{max}),
- ★ przemieszczenia pionowe (u_y),
- ★ przemieszczenia poziome (u_x),
- ★ wektorowe pole przemieszczeń,
- ★ strefy pęknięć w górotworze,
- ★ naprężenia normalne (σ_n) i ścinające (τ) na obu uskokach,
- ★ przemieszczenia normalne (u_n) i przemieszczenia ścinania (u_s) na obu uskokach.

Szczególne uwagę zwrócono na wielkość stref koncentracji i spadku naprężeń (głównych i ścinających) w górotworze, powiększanie się strefy zawału oraz strefy pęknięć w warstwach spągowych i w stropie przed frontem eksploatacji, deformacje terenu i rozwój strefy wzmoczonych deformacji górotworu w sąsiedztwie samego wyrobiska ścianowego.

Z uwagi na szczupłość miejsca nie będzie można pokazać i omówić w tym artykule wszystkich wyników składających się na pełny obraz zmian zachodzących w górotworze (patrz [20], t. II). Pomijając szczegółową prezentację zmian pola naprężeń pokazemy tutaj przede wszystkim zmiany pola przemieszczeń oraz formowanie się stref zniszczenia, następujące w górotworze w miarę wybierania pokładu 352. Pokazane będą zmiany zachodzące w całym górotworze (będzie to tzw. obraz "globalny") i w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska, w promieniu nie większym niż ok. 100 m od niego (obraz "lokalny"). W artykule sąsiednim ([18]), omówimy zachowanie się dużych uskoków "Wojciech" i "Jakub" poddanych wpływom eksploatacji.

Dla pierwszego, początkowego stadium eksploatacji ($L_m = 15$ m), zaobserwowano

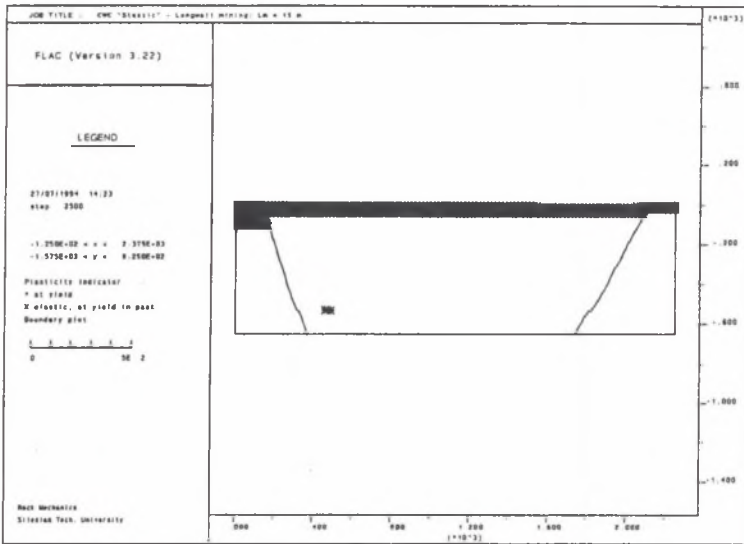
niewielką strefę koncentracji największych naprężeń głównych w czole ściany i znacznie większe strefy obniżonych naprężeń w stropie i spągu pokładu, tuż powyżej i poniżej wyrobiska. W miarę przesuwania się frontu eksploatacji strefy odprężone powiększają się, zarówno w warstwach stropowych, jak i spągowych. Dla czwartego stadium eksploatacji, gdy czoło ściany przesunięte jest już o 300 m, strefa odprężona ponad wyrobiskiem, w której największe naprężenia główne są równe 2,5 - 5,0 MPa, sięga już powierzchni terenu.

W miarę wybierania pokładu powiększają się także strefy obniżonej różnicy naprężeń głównych (największego naprężenia ścinającego: $\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$). Powiększa się również strefa wzmoczonej koncentracji największych naprężeń ścinających w górotworze przed frontem eksploatacji, powyżej i poniżej pokładu. W czwartym stadium eksploatacji ($L_m = 300$ m) strefa ta sięga już ponad 300 m w górę od pokładu. Dla stadium piątego ($L_m = 600$ m) strefa ta zbliża się już, na odległość około 100 m, do powierzchni terenu. Rozkład największego naprężenia ścinającego wydaje się wskazywać na w przybliżeniu pionowy kierunek formowania się płaszczyzn zniszczenia w górotworze.

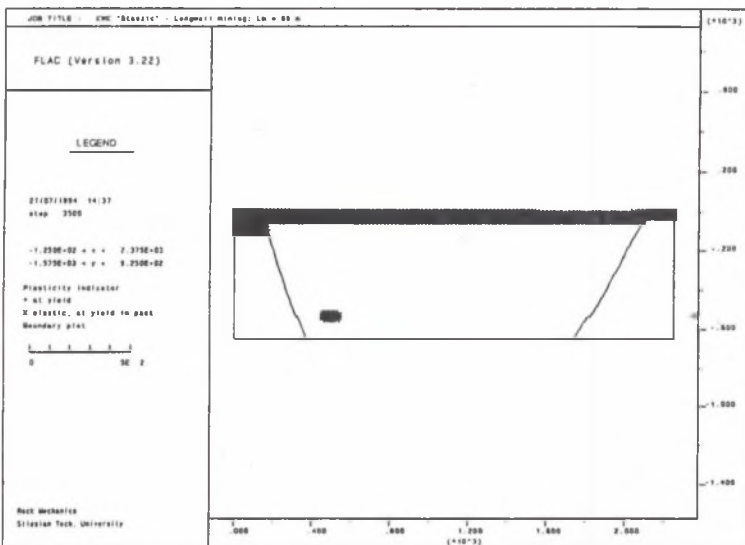
Największe naprężenia τ_{max} występują w spągu pokładu tuż u czoła ściany. Równe około 5 MPa dla początkowego stadium eksploatacji ($L_m = 15$ m), rosną do ponad 12,5 MPa dla stadium eksploatacji końcowego. Strefa koncentracji naprężeń τ_{max} ponad pokładem jest przesunięta o około 20 - 30 m w głąb górotworu, przed front eksploatacji.

Strefy zniszczenia pojawiły się już w pierwszym stadium eksploatacji, po wykonaniu przecinki ścianowej (rys. 2). Pierwsze pęknięcia wystąpiły w pokładzie tuż przed frontem eksploatacji oraz w stropie tuż nad pokładem w tyle ściany, a więc tam, gdzie wystąpiły duże naprężenia ścinające ([20], t. II). Graniczny stan naprężenia objął całą przypowierzchniową, zbudowaną z piasków i gleby piaszczystej, partię górotworu. Szczególnie duża strefa zniszczenia pojawiła się w przypowierzchniowej partii górotworu w wiszącym skrzydle uskoku "Wojciech".

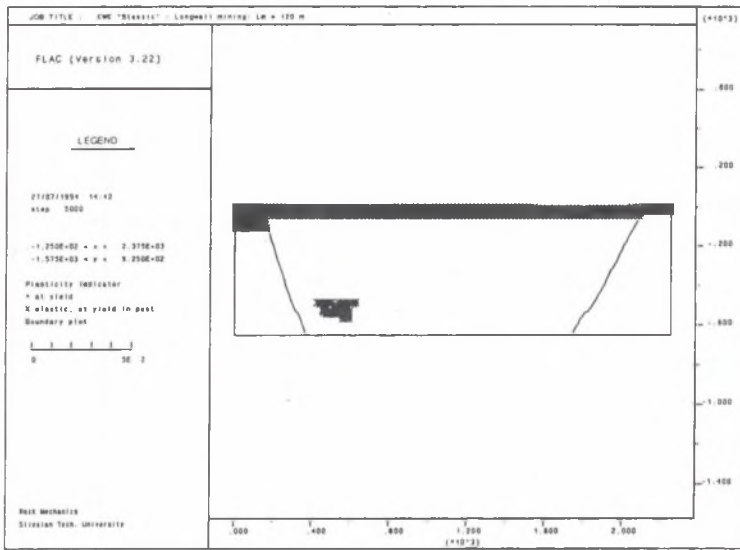
W miarę postępującej eksploatacji pokładu 352 powiększa się zarówno strefa zniszczenia sięgająca od powierzchni terenu w dół w środkowej części badanej partii górotworu, jak i strefa spękań w sąsiedztwie wyrobiska ścianowego. W piątym stadium eksploatacji ($L_m = 600$ m; rys. 6) obie strefy łączą się już ze sobą. Po zakończeniu robót eksploatacyjnych w pokładzie 352 w polu 1003 spękaniem objęty jest niemal cały górotwór pomiędzy uskokami. Strefa zniszczenia nie sięgnęła jednak uskoku "Jakub" na wschodzie, a więc należy



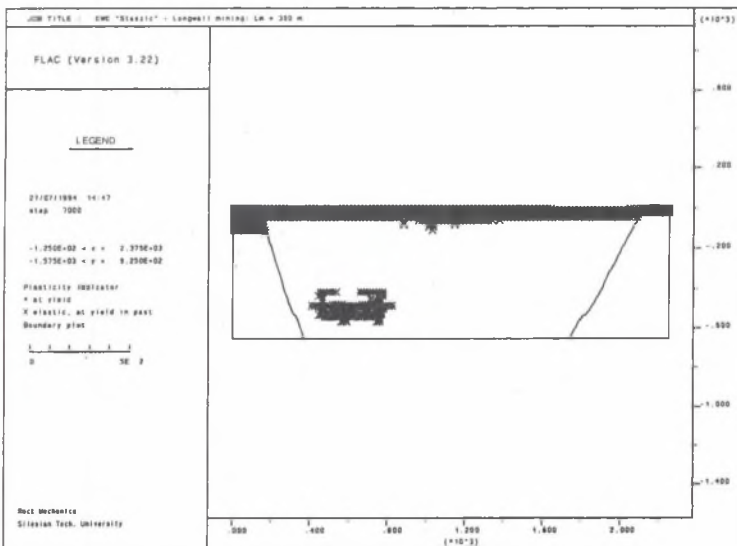
Rys. 2. Strefy zniszczenia w górotworze dla $L_m = 15$ m (1 stadium eksploatacji)
Fig. 2. Failure zones in the rock mass for $L_m = 15$ m (extraction stage 1)



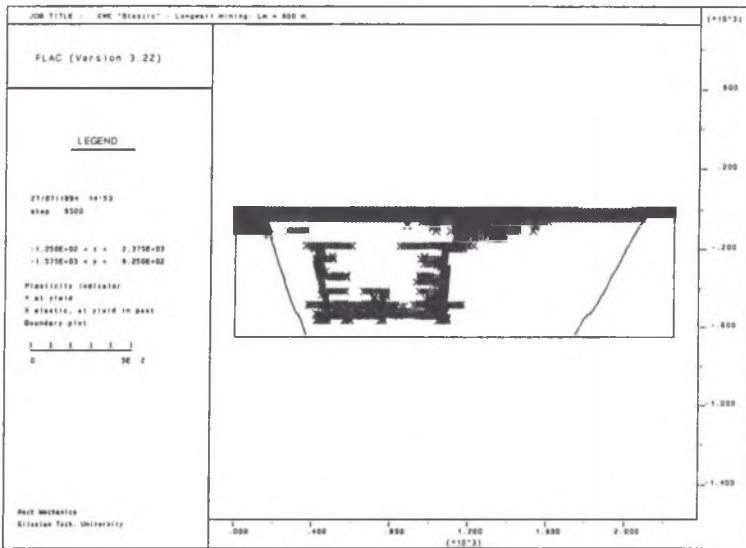
Rys. 3. Strefy zniszczenia w górotworze dla $L_m = 60$ m (2 stadium eksploatacji)
Fig. 3. Failure zones in the rock mass for $L_m = 60$ m (extraction stage 2)



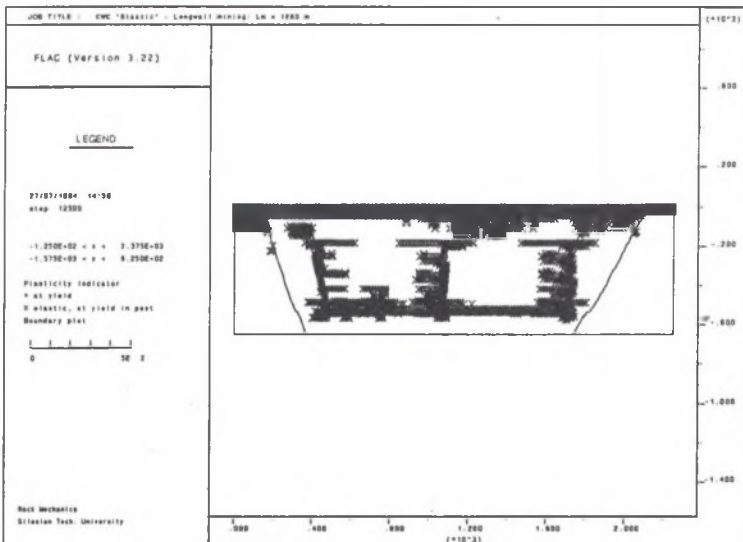
Rys. 4. Strefy zniszczenia w górotworze dla $L_m = 120$ m (3 stadium eksploatacji)
Fig. 4. Failure zones in the rock mass for $L_m = 120$ m (extraction stage 3)



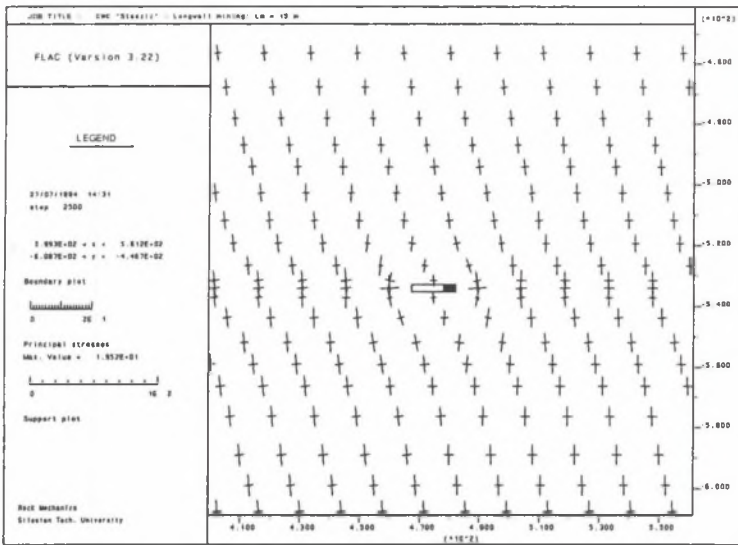
Rys. 5. Strefy zniszczenia w górotworze dla $L_m = 300$ m (4 stadium eksploatacji)
Fig. 5. Failure zones in the rock mass for $L_m = 300$ m (extraction stage 4)



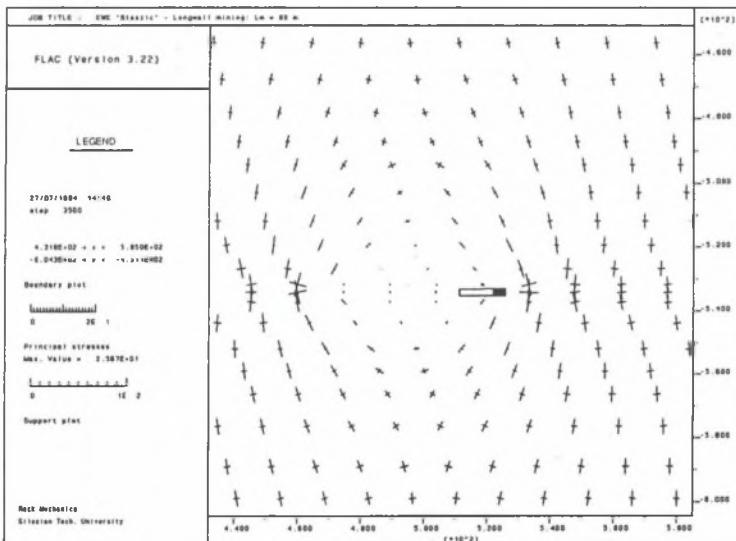
Rys. 6. Strefy zniszczenia w górotworze dla $L_m = 600$ m (5 stadium eksploatacji)
Fig. 6. Failure zones in the rock mass for $L_m = 600$ m (extraction stage 5)



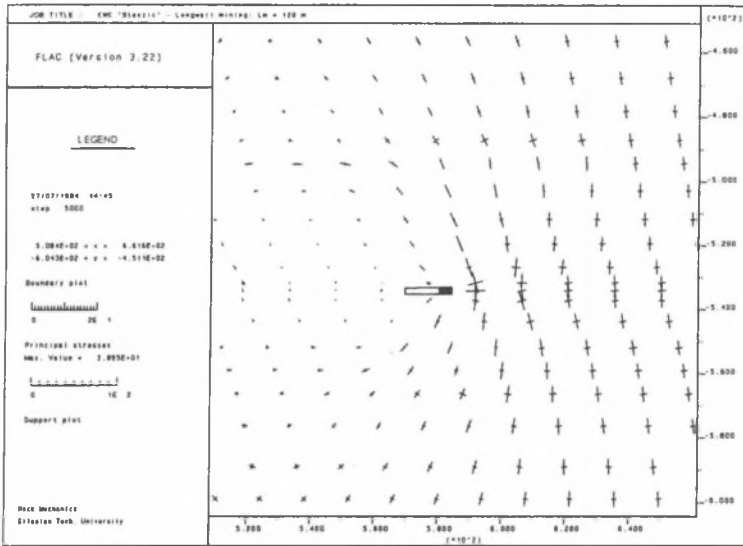
Rys. 7. Strefy zniszczenia w górotworze dla $L_m = 1260$ m (ostatnie stadium eksploatacji)
Fig. 7. Failure zones in the rock mass for $L_m = 1260$ m (the last extraction stage)



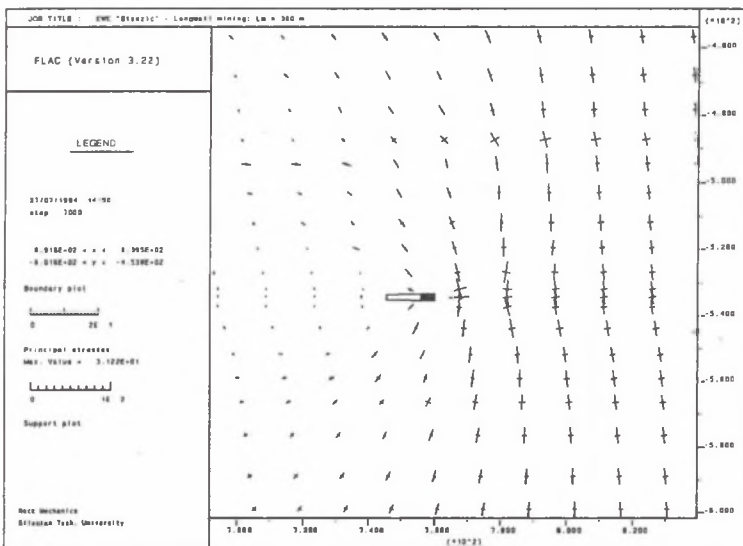
Rys. 8. Pole naprężeń głównych w pobliżu wyrobiska ścianowego - $L_m = 15$ m (1)
 Fig. 8. Principal stress field in a vicinity of the longwall working - $L_m = 15$ m (1)



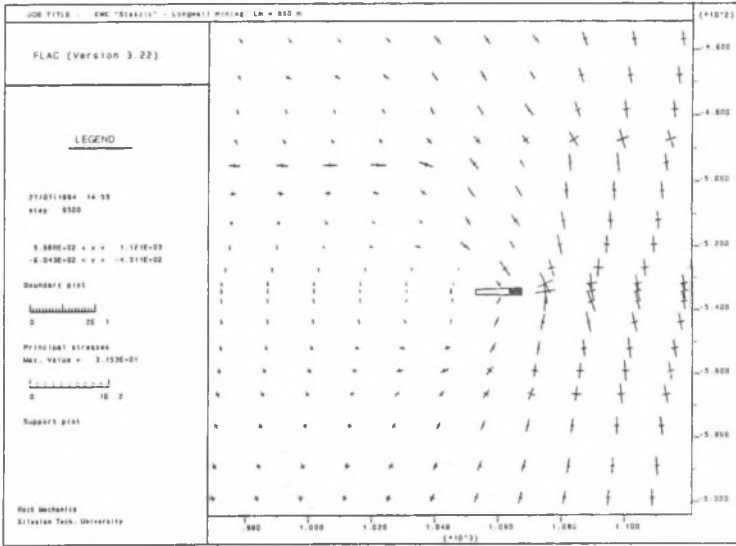
Rys. 9. Pole naprężeń głównych w pobliżu wyrobiska ścianowego - $L_m = 60$ m (2)
 Fig. 9. Principal stress field in a vicinity of the longwall working - $L_m = 60$ m (2)



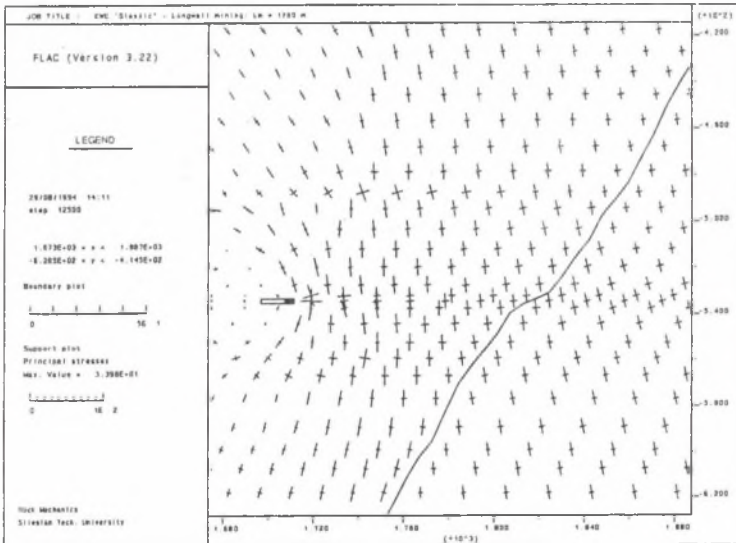
Rys. 10. Pole naprężeń głównych w pobliżu wyrobiska ścianowego - $L_m = 120$ m (3)
 Fig. 10. Principal stress field in a vicinity of the longwall working - $L_m = 120$ m (3)



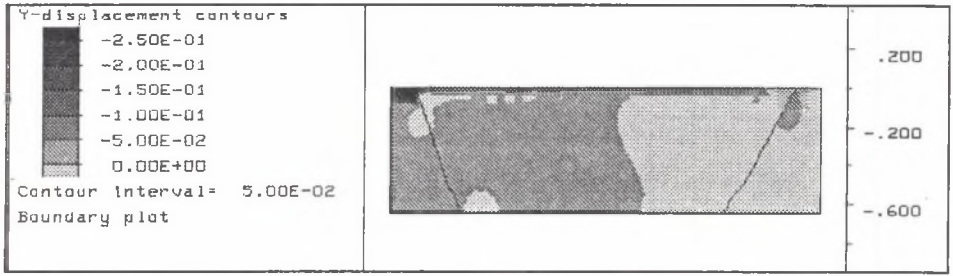
Rys. 11. Pole naprężeń głównych w pobliżu wyrobiska ścianowego - $L_m = 300$ m (4)
 Fig. 11. Principal stress field in a vicinity of the longwall working - $L_m = 300$ m (4)



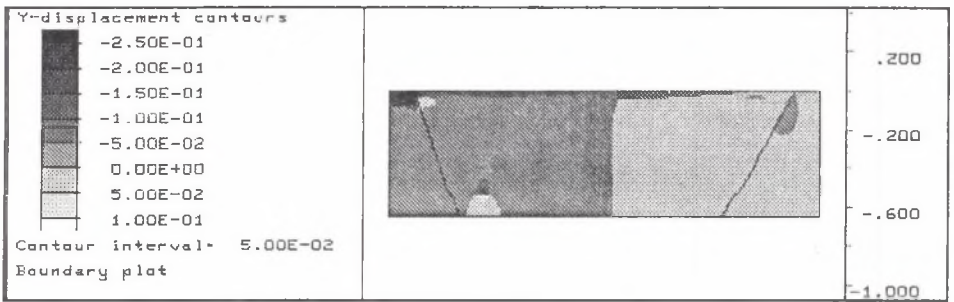
Rys. 12. Pole naprężeń głównych w pobliżu wyrobiska ścianowego - $L_m = 600$ m (5)
Fig. 12. Principal stress field in a vicinity of the longwall working - $L_m = 600$ m (5)



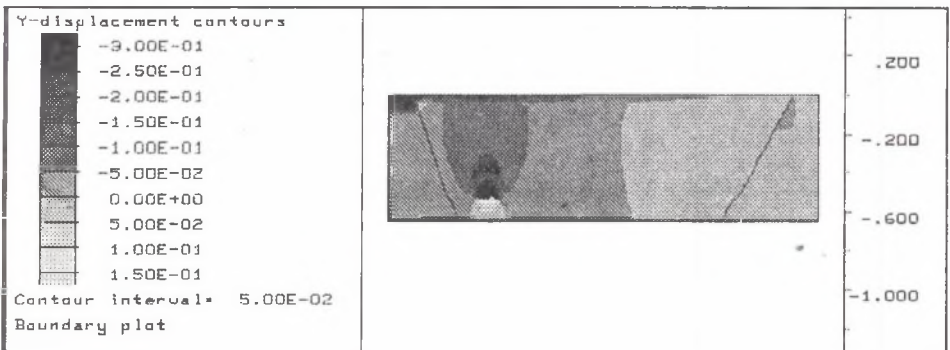
Rys.13. Pole naprężeń głównych w pobliżu wyrobiska ścianowego - $L_m = 1260$ m (6)
Fig.13. Principal stress field in a vicinity of the longwall working - $L_m = 1260$ m (6)



$L_m = 15$ m (1)

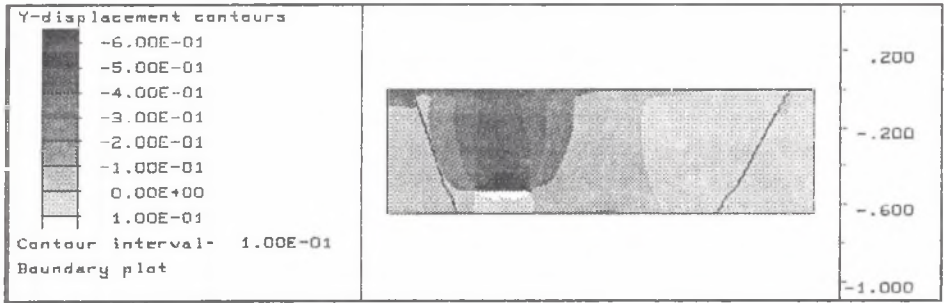


$L_m = 60$ m (2)

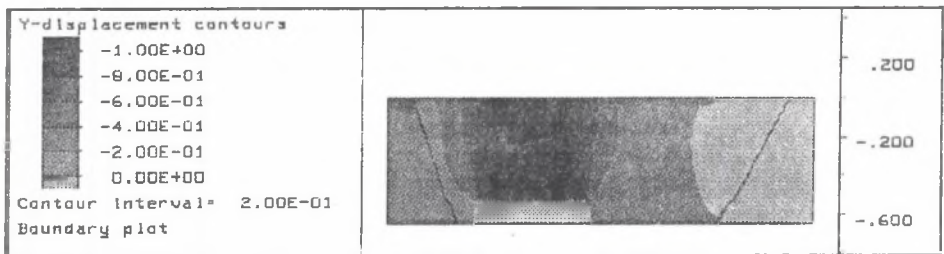


$L_m = 120$ m (3)

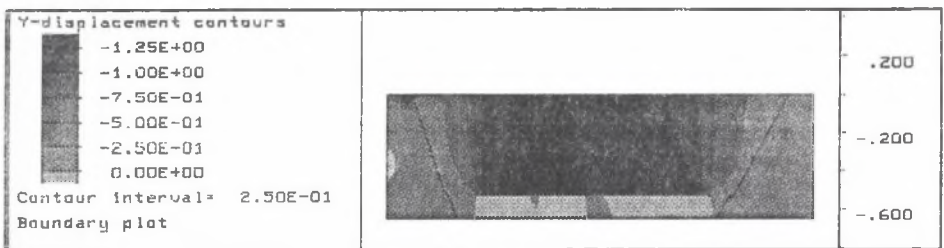
Rys. 14. Pole przemieszczeń pionowych dla pierwszych trzech stadiów eksploatacji
Fig. 14. Vertical displacement field in the rock mass for the first three extraction stages



$L_m = 300 \text{ m (4)}$

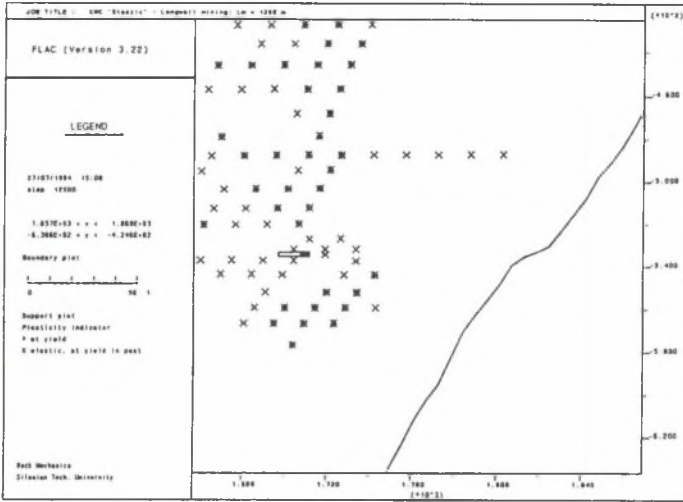


$L_m = 600 \text{ m (5)}$

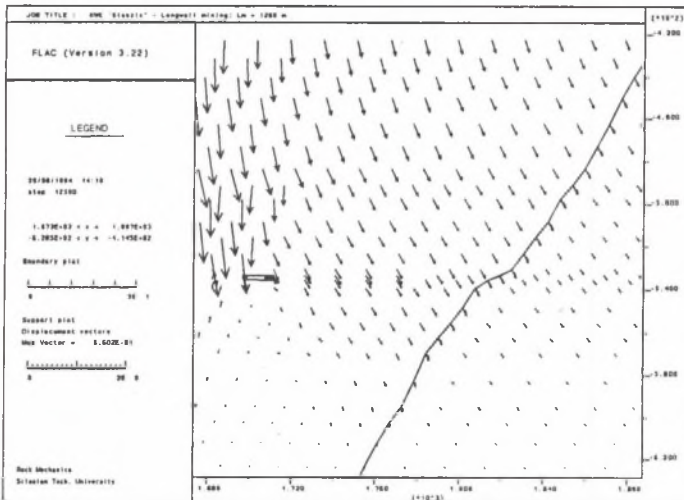


$L_m = 1260 \text{ m (6)}$

Rys. 15. Pole przemieszczeń pionowych dla ostatnich trzech stadiów eksploatacji
Fig. 15. Vertical displacement field in the rock mass for the last three extraction stages

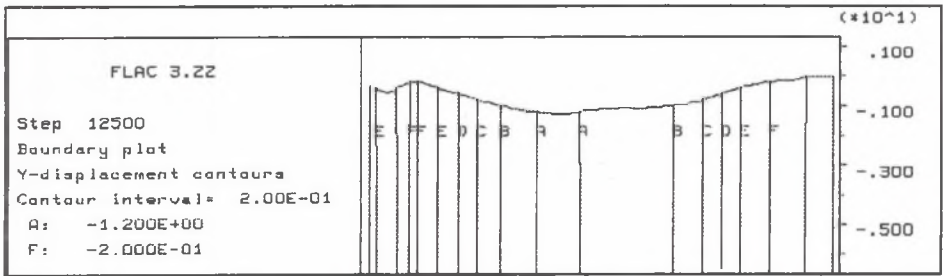


(a)



(b)

Rys. 16. Strefy spękań (a) i wektory przemieszczeń górotworu (b) w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska ścianowego i uskoku "Jakub" po zakończeniu eksploatacji pokładu Fig. 16. Fracture zones (a) and rock displacement vectors (b) in a vicinity of the longwall working and the "Jakub" fault after finishing extraction of the seam



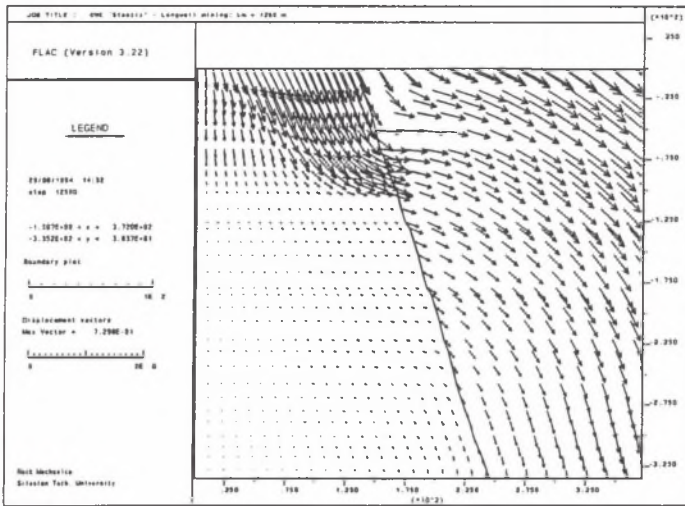
Rys. 17. Profil niecki osiadania powierzchni terenu po zakończeniu eksploatacji pokładu (stosunek skali na osi pionowej do skali na osi poziomej wynosi 125)
 Fig. 17. Surface subsidence trough profile after finishing extraction of the seam (vertical to horizontal scale ratio is 125)

uznać, że prawidłowo zaplanowano wielkość filara przyuskokowego i zakończono eksploatację pokładu 352 w polu 1003 w bezpiecznej odległości od uskoku.

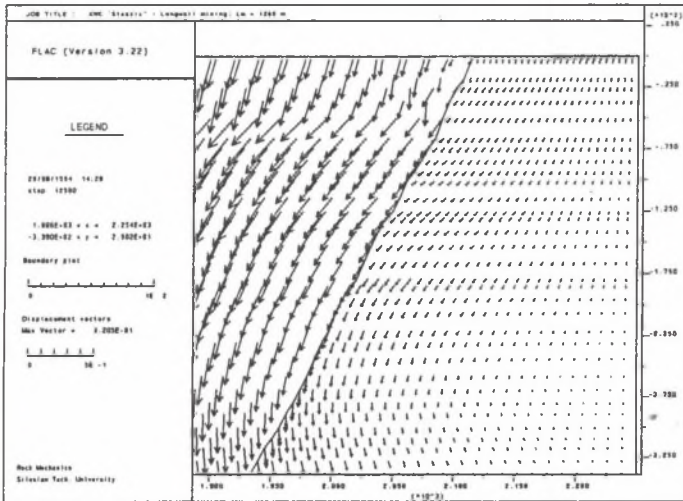
Śledząc bardziej szczegółowo wielkość i usytuowanie strefy spękań w górotworze w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska ścianowego (obraz "lokalny"; por. [20], t. II) można zauważyć, że już w drugim stadium eksploatacji strefa spękań obejmuje nie tylko warstwy stropowe nad wyeksploatowaną częścią pokładu, ale i warstwy spągowe poniżej wyrobiska ścianowego. W trzecim stadium eksploatacji ($L_m = 120$ m) strefa spękań sięga już około 60 m w górę ponad wyrobisko i o około 50 m wyprzedza front robót wybierkowych; w warstwach spągowych rozciąga się na około 35 m poniżej wyrobiska. Na rysunku 16a widać, jak po zakończeniu eksploatacji (stadium (6)) strefa zniszczenia zbliża się do uskoku "Jakub" na odległość około 45 m.

Na rysunkach 8 - 13, obejmujących bezpośrednio sąsiedztwo wyrobiska ścianowego w pokładzie 352, widać, jak największe naprężenie główne, równe około 20 MPa w czole ściany dla pierwszego, początkowego stadium eksploatacji ($L_m = 15$ m), rośnie w miarę wybierania pokładu, sięgając dla stadium końcowego ($L_m = 1260$ m) wartości większych od 32,5 MPa. Jednocześnie zasięg strefy koncentracji największych naprężeń głównych w czole ściany, równy około 40 m dla drugiego stadium eksploatacji ($L_m = 120$ m), powiększa się również i, gdy front eksploatacji znajduje się w połowie pola wybierkowego 1003 ($L_m = 600$ m), wynosi już około 200 m.

Tuż powyżej i poniżej wyrobiska ścianowego, w stropie i spągu pokładu, występuje strefa



(a)



(b)

Rys. 18. Wektory przemieszczeń w przypowierzchniowej strefie górotworu w bezpośrednim sąsiedztwie uskoku "Wojciech" (a) i "Jakub" (b) po zakończeniu eksploatacji pokładu
 Fig. 18. Displacement vectors in the near-surface part of the strata in a vicinity of "Wojciech" (a) and "Jakub" (b) faults after finishing extraction of the seam

obniżonych największych naprężeń głównych. Dla początkowego stadium eksploatacji ($L_m = 15$ m) naprężenia te wynoszą około 8 MPa w stropie i około 9 MPa w spągu. W miarę postępującej eksploatacji strefy zmniejszonych naprężeń głównych powiększają się.

Na samym początku robót wybierkowych, po wykonaniu przecinki ścianowej, niemal cały górotwór na odcinku długości około 1300 m, licząc od wschodniej krawędzi modelu, doznał niewielkich, nie przekraczających 2,5 cm, osiadań. Tylko lokalnie, same słabe warstwy przypowierzchniowe przemieszczają się w kierunku pionowym (osiadają) o 5 - 7,5 cm. Szczególnie duże osiadania, sięgające 27,5 i więcej centymetrów, występują w górnej części wiszącego skrzydła uskoku "Wojciech" (tam, gdzie występują szczególnie grube osady piasku i łatwo odkształcającej się gleby piaszczystej - por. rys. 1). Warstwy skalne w prawej części modelu, w partii oddalonej o co najmniej 800 m od wyrobiska ścianowego, doznają niewielkich, nie przekraczających 2,5 cm, wypiętrzeń (rys. 14 (1)).

W miarę postępujących robót wybierkowych konfiguracja przemieszczeń pionowych w całym górotworze pozostaje bez zmian. Intensyfikują się tylko osiadania i wypiętrzenia w rejonie bieżącej eksploatacji. W drugim stadium eksploatacji ($L_m = 60$ m) strefa wzmożonych osiadań górotworu sięga już około 230 m w górę. Podobnie rozległa wydaje się być strefa wzmożonych wypiętrzeń w górotworze poniżej wyrobiska ścianowego (rys. 14 (2)).

W trzecim stadium eksploatacji ($L_m = 120$ m) osiadania górotworu w dużej odległości od frontu robót wybierkowych nie przekraczają 2,5 cm. Mniej więcej tyle samo wynoszą wypiętrzenia warstw skalnych w odległych, tych położonych bliżej uskoku "Jakub", partiach górotworu. Strefa wzmożonych osiadań nad wyeksploatowaną częścią pokładu sięga już powierzchni terenu. Zasięg poziomy tej strefy, równy około 450 m w głębi górotworu (na głębokościach większych od około 50 m), na powierzchni wynosi około 700 m (rys. 14 (3)).

W czwartym i piątym stadium eksploatacji ($L_m = 300$ m i 600 m) szerokość niecki osiadania na powierzchni terenu sięga, odpowiednio, 1000 m i 1200 m. Przemieszczenia pionowe powierzchni terenu sięgają, odpowiednio, 35 - 40 cm i 90 - 100 cm. Osiadania górotworu nad wyeksploatowaną częścią pokładu wynoszą, odpowiednio, 60-65 cm i 100-110 cm (rys. 15 (4) i (5)).

W szóstym, końcowym stadium eksploatacji ($L_m = 1260$ m) strefa wzmożonych przemieszczeń pionowych obejmuje już cały badany obszar górotworu. Przemieszczenia

pionowe powierzchni terenu w centrum niecki osiadania wynoszą około 127 cm. Osiadania górotworu tuż nad wybranym pokładem sięgają 135 cm; zasięg tej strefy maksymalnych przemieszczeń pionowych sięga około 300 m w górę nad pokładem (rys. 15 (6)).

Pole przemieszczeń górotworu w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobiska ścianowego po zakończeniu eksploatacji pokładu 352 (stadium (6)) scharakteryzowane jest bardzo dobrze wektorami przemieszczeń na rysunku 16b. Największy wektor przemieszczeń górotworu nad przestrzenią wybraną, skierowany w przybliżeniu pionowo w dół, równy jest 111,2 cm (w pierwszym stadium eksploatacji największa wartość wektora przemieszczeń wynosiła zaledwie 2,2 cm ([20], t. II).

Na rysunku 17 pokazane są przemieszczenia pionowe powierzchni terenu po zakończeniu eksploatacji. Wyraźnie zarysowana jest niecka osiadań górotworu nad wyeksploatowaną częścią pokładu 352. Zauważalne są również duże obniżenia terenu w zachodniej części modelu (na lewo od uskoku "Wojciech"), w rejonie występowania gruntowych utworów piaszczystych o dużej miąższości.

Bardzo interesujący jest dostrzegalny na rysunku 15 efekt ograniczenia, krępowania niecki osiadania przez uskoki "Wojciech" i "Jakub". Przemieszczenia górotworu na zewnątrz obszaru objętego tymi dużymi uskokami są znacznie mniejsze niż przemieszczenia we wnętrzu tego obszaru. Ten powstrzymujący formowanie (rozbudowywanie) się niecki osiadań wpływ szczelin uskokowych jest bardzo dobrze widoczny także na rysunku 18; nawet bardzo duże przemieszczenia przypowierzchniowej, bardzo grubej (sięgającej 90 metrów miąższości) partii utworów gruntowych w wiszącym skrzydle uskoku "Wojciech" (rys. 18b) są częściowo przez ten uskok akomodowane, przejmowane.

4. PODSUMOWANIE

W artykule tym przedstawiono wyniki pierwszych prac, których celem było zbudowanie numerycznego modelu górotworu w sąsiedztwie pola eksploatacyjnego 1003 w pokładzie 352 w KWK "Staszic" i analiza zmian pól deformacji ciągłych i nieciągłych oraz naprężeń zachodzących w górotworze w miarę eksploatacji pokładu systemem ścianowym z zawalem warstw stropowych.

Dzięki wykorzystaniu specyficznych właściwości programu *FLAC*, który specjalnie

przystosowany jest do modelowania i analizy numerycznej złożonych - tak pod względem strukturalnym, jak i fizykalnym - ośrodków skalnych, uzyskano kompletny, jakościowy i ilościowy obraz zachowania się dużego obszaru górotworu, w którym - pomiędzy dwoma dużymi uskokami - prowadzona jest eksploatacja pokładu. Zbadano, jak w miarę postępującej eksploatacji zmieniają się pola naprężeń, spękań i przemieszczeń w górotworze. Wyniki te są tym bardziej wartościowe, że - przynajmniej jeśli chodzi o przemieszczenia - pozostają w zgodzie z wynikami pomiarów osiadań terenu w rejonie eksploatacji (por. [21]).

Był to pierwszy etap badań. Obecnie przygotowywane są do druku wyniki kolejnej już, jeszcze bardziej rozbudowanej analizy numerycznej zachowania się górotworu, w którym prowadzone są roboty eksploatacyjne. Analizie tej poddano ten sam model górotworu w rejonie pól eksploatacyjnych 1003 i 1004 w KWK "Staszic"; tym razem wzięto dodatkowo pod uwagę, że powyżej pokładu 352 został wcześniej częściowo wybrany pokład 334 i 350.

LITERATURA

- [1] Barton N., Lien R. and Lunde J.: Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* 6, 183-236, 1974.
- [2] Bieniawski Z.T.: Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng.* 15, 335-344, 1973.
- [3] Bieniawski Z.T.: *Engineering Rock Mass Classifications*, 260 p. John Wiley & Sons, New York 1989.
- [4] Brady T.M. and Johnson J.C.: Comparison of a finite-difference code to a finite-element code in modeling an excavation in an underground shaft pillar. In *Numerical Models in Geomechanics (NUMOG III)* (S. Pietruszczak & G.N. Pande, eds), pp. 608-619. Elsevier Applied Science, London 1989.
- [5] Clark I.H.: The cap model for stress path analysis of mine backfill compaction process. In *Computer Methods and Advances in Geomechanics* (G. Beer et al., eds), Vol. 2, pp. 1293-1298. Balkema, Rotterdam 1991.
- [6] Clark I.H., Fuller P.G. and McLean D.: Numerical stress analysis to assess the stability of a combined open pit and underground mining operation in central Australia. In *Static and Dynamic Considerations in Rock Engineering* (R. Brummer, ed.), pp. 103-112. Balkema, Rotterdam 1990.
- [7] Coetzee M.J., Hart R.D., Varona P.M. and Cundall P.A.: *FLAC Basics*, 105 p. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis 1993.
- [8] Cundall P. and Board M.: A microcomputer program for modeling large-strain plasticity problems. In *Numerical Methods in Geomechanics* (G. Swoboda, ed.), Vol. 3, pp. 2101-2108. Balkema, Rotterdam 1988.

- [9] *FLAC User's Manual* (3 vols): Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis 1992.
- [10] Hobbs B.E. and Ord A.: Numerical simulation of shear band formation in a frictional-dilatational material. *Ingenieur-Archiv* **59**, pp. 209-220, 1989.
- [11] Hoek E. and Brown E.T.: Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Eng. Div., Proc. ASCE* **106**, No. GT9, 1013-1035, 1980.
- [12] Hoek E. and Brown E.T.: The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update. *Rock Engineering for Underground Excavation (Proceedings of 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, October 1988)*, 31-38. University of Toronto, 1988.
- [13] Iannacchione A.T.: Numerical simulation of coal pillar loading with the aid of a strain-softening finite difference model. In *Rock Mechanics as a Guide for Efficient Utilization of Natural Resources* (A.W. Khair, ed.), pp. 775-782. Balkema, Rotterdam 1989.
- [14] Iannacchione A.T. and Vallejo L.E.: Stress and behavior of material under direct shear. In *Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science* (J.-C. Roegiers, ed.), pp. 549-558. Balkema, Rotterdam 1991.
- [15] Johansson E., Riekkola R. and Lorig L.: Design analysis of multiple parallel caverns using explicit finite difference methods. In *Key Questions in Rock Mechanics* (P.A. Cundall et al., eds), pp. 325-333. Balkema, Rotterdam 1988.
- [16] Konietzky H.: Numerical modeling of the behavior of soft ground for a near-surface tunneling project in the Rhine/Ruhr District. *Interfels News* **9**, 1-10, 1994.
- [17] Konietzky H. and Rummel F.: Calibrated numerical stress field modeling. *Geotechnik* **16** (1), 6-11, 1993.
- [18] Kwaśniewski M. i Wang J.-A.: Symulacja komputerowa eksploatacji pokładu węgla systemem ścianowym z zawalem stropu, II. Zachowanie się uskoków poddanych wpływowi eksploatacji. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, nr 1256, seria *Górnictwo*, z. 221, Gliwice 1994.
- [19] Kwaśniewski M. i Wang J.-A.: Symulacja komputerowa eksploatacji pokładu węgla systemem ścianowym z zawalem stropu, III. Wpływ prędkości eksploatacji na zachowanie się górotworu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, nr 1256, seria *Górnictwo*, z. 221, Gliwice 1994.
- [20] Kwaśniewski M., Wang J.-A. i Szutkowski I.: Badania nad własnościami i zachowaniem się skał spękanych oraz samych spękań w polu naprężeń ściskających (2 tomy). *Prace Instytutu Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Ochrony Powierzchni*, PC nr 231/CS6-9/92-93, 374 s., Gliwice 1993.
- [21] Kwiatek J. i Kowalski A.: Ochrona powierzchni nad szybko postępującym frontem eksploatacyjnym - Etap II. Dokumentacja pracy badawczo-usługowej, 54 s. GIG, Katowice 1993.
- [22] Larsson H., Glamheden R. and Åhring G.: Storage of natural gas at high pressure in lined rock caverns - Rock mechanics analysis. In *Storage of Gases in Rock Caverns* (B. Nilsen & J. Olsen, eds), pp. 177-184. Balkema, Rotterdam 1989.
- [23] Müller W.: Entstehungsbedingungen für Liegendenschläge. *Glückauf-Forschungshefte* **51** (3), 111-118, 1990.
- [24] Ozbay M.U. and Ryder J.A.: Investigations into foundation failure mechanisms of hard rock squat rib pillars. In *Rock at Great Depth* (V. Maury & D. Fourmaintraux, eds), Vol. 2, pp. 527-535. Balkema, Rotterdam 1989.
- [25] Roest J.P.A., Kamp W., Zhongjie H. and Cockram M.J.: Basic research for the

- destressing of the rock ring surrounding a gallery under severe stress. In *Rock at Great Depth* (V. Maury & D. Fourmaintraux, eds), Vol. 2, pp. 517-525. Balkema, Rotterdam 1989.
- [26] Roest J.P.A. and Kuilman W.: Geomechanical analysis of small earthquakes at the Eleveld Gas Reservoir. In *Rock Mechanics in Petroleum Engineering (Proceedings of EUROCK '94 International Conference, Delft, August 1994)*. Balkema, Rotterdam 1994.
- [27] Swan G. and Board M.: Fill-induced post-peak pillar stability. In *Innovations in Mining Backfill Technology* (F.P. Hassani et al., eds), pp. 81-88. Balkema, Rotterdam 1989.
- [28] Wardle L. J. and Gerrard C.: M. The "equivalent" anisotropic properties of layered rock and soil masses. *Rock Mech.* 4, 155-175, 1972.
- [29] Whyatt J.K. and Board M.P.: A strain-softening model for representing shear fracture in continuous rock masses. In *Rockbursts and Seismicity in Mines* (C. Fairhurst, ed.), pp. 61-64. Balkema, Rotterdam 1990.

Badania zrealizowano w ramach projektu celowego nr 231/CS6-9/92 finansowanego w latach 1992-1994 przez Komitet Badań Naukowych i KWK "Staszic".

Recenzent: Prof. dr hab., inż. Jan WALASZCZYK

Wpłynęło do redakcji we wrześniu 1994 r.

Abstract

Making use of the two-dimensional finite difference program *FLAC* v. 3.22, computations and analysis have been carried out, of the state of displacement and stress in the rock mass in which a longwall panel in a coal seam is excavated with roof caving. A structural and physical model of the strata in the area of the extraction panels 1003 and 1004 in seam 352 in the "Staszic" coal mine, has been built. It is a 2250 m wide by 650 m deep strata model, with the 352 seam 2.25 m thick, located at the depth of 535 m (Fig. 1). Above and below the seam, sixty-four layers built of thirteen different kinds of rocks (sandy soil, yellow water-bearing sandstone interbedded with clays, sandstone, coal, grey clays with thin interbedded layers of sandstone, conglomerate, sandy shale, shale, clayey shale, sandy shale with ironstone concretions, shale interbedded with ironstone, clayey shale with ironstone concretions and carbonaceous shale) of different volumetric density and different mechanical properties, were modelled. A physical model of a non-linear, elastic-brittle-plastic material

of ultimate and residual strength described by Hoek and Brown condition of the limiting state, was prescribed to the rocks.

Using a model of the interface to represent physical discontinuity planes along which slip and/or tensile separation can occur, two major faults "Wojciech" and "Jakub" were also modelled.

The strata model was divided by a 150×65 ($W \times H$) grid into 9750 rectangular elements of the average width and height equal to 15 m and 10 m, respectively.

The support in the longwall working was modelled with a 10-element support member of the axial stiffness coefficient and the yield strength equal to 30 MN/m and 1.03 MN, respectively, which supported the roof over a section 3.5 m long, starting from the longwall face.

To study the changes of the stress and displacement field in the rock mass, occurring with the advancing of the mining face in seam 352, longwall extraction of the seam with roof caving was simulated. Six extraction stages were modelled, to which corresponded seam extraction over a distance of the length (L_m) equal, respectively, to 15 m, 60 m, 120 m, 300 m, 600 m, and 1260 m (cf. Fig. 1).

The effect of gob compaction in the caved zone was modelled, assigning to the rocks in this zone different values of Young's modulus, depending on the distance from the longwall face. Thus for the distances 60 m, 120 m, 300 m, 600 m, and greater than 600 m, the values of Young's modulus of the broken rocks filling the extracted area was, respectively, 1/50, 1/30, 1/20, 1/10 and 1/5 of the value of Young's modulus of the coal.

Changes of the field of stresses and displacements taking place as longwall mining moves along the direction of mining in a panel 1260 long (between the fault "Wojciech" in the west and the fault "Jakub" in the east) were investigated. Particular attention was paid to the increase of the caved zone and fractured zone areas in the roof and floor strata in front of the mining face. Ground surface deformation as well as development of the enhanced rock deformation zone in proximity of the longwall working were studied.

A complete, qualitative and quantitative picture of the behavior of a large area of the rock mass in which longwall coal mining is carried out with roof caving was obtained. The results, discussed in Section 3.2, are illustrated with numerous diagrams (Fig. 2 - 18).