

Wpływ UHS na stan deformacji i naprężeń w górotworze generowanych eksploatacją rudy miedzi systemem filarowo-komorowym

The impact of directed hydrofracturing on changes in stress and strain in the orogen over the field operation of copper ore with room and pillar system



Dr inż. Janusz Makówka*)



Dr inż. Jacek Myszkowski*)

Treść: W artykule przedstawiono wyniki prac, których celem było określenie wpływu ukierunkowanego hydroszczelinowania skał na zjawiska deformacyjno-naprężeniowe zachodzące w warstwach górotworu nad polem eksploatacji złoża rudy miedzi systemem filarowo-komorowym z ugięciem stropu. Do analiz zastosowano modelowanie numeryczne metodą elementów odrębnych i programu 3DEC. Wykonano model numeryczny oparty na geometrii rzeczywistego oddziału wydobywczego wraz z jego warunkami geologiczno-górnictwymi.

Abstract: This paper presents the results of works to determine the impact of directed hydrofracturing of rocks on the changes of stress and strain occurring in the layers of rock mass above the exploitation field of copper ore deposits mined with the room and pillar system with deflection roof. The analyses were performed with the use of numerical modeling with discrete element method and the code 3DEC. A numerical model based on the actual geometry of the mining panel with its geological and mining conditions was developed.

Słowa kluczowe:

modelowanie numeryczne, ukierunkowane hydroszczelinowanie skał, energia sprężysta

Key words:

numerical modeling, rock directed hydrofracturing, elastic strain energy

1. Wprowadzenie

Prowadzenie eksploatacji górniczej złóż rudy miedzi w warunkach Legnicko-Głogowskiego Zagłębia miedziowego napotyka na bariery związane z coraz trudniejszymi warunkami górnictwymi, wynikającymi głównie z coraz większej głębokości eksploatacji. Przejawem tych utrudnień jest zwiększanie się zagrożenia sejsmicznego i coraz mniejsza skuteczność tradycyjnych metod profilaktyki tego zagrożenia, w szczególności zmniejszanie się prowokowalności wstrząsów poprzez grupowe strzelania przodków. Rodzi to konieczność poszukiwania nowych metod profilaktyki, nie kolidujących ze stosowaną technologią eksploatacji.

Jedną z metod profilaktyki, spełniającą te warunki, jest metoda ukierunkowanego hydroszczelinowania skał [4], od prawie dwudziestu lat stosowana w kopalniach węgla

kamiennego. Pierwsze próby stosowania tej metody w warunkach LGOM [3] potwierdziły możliwość wykonywania zabiegów UHS w kopalniach rud miedzi. Opierając się na tych doświadczeniach oraz z uwagi na rosnące zapotrzebowanie na nowe metody profilaktyki, zaproponowano pewne schematy wykonywania UHS w typowych warunkach oddziału wydobywczego [2]. Obecnie podejmowane są pierwsze próby zastosowania hydroszczelinowania w praktyce [5].

Jednym z etapów prowadzonej pracy było określenie wpływu ukierunkowanego hydroszczelinowania skał na proces deformowania się górotworu nad polem eksploatacji systemem filarowo-komorowym z ugięciem stropu.

Narzędziem badawczym wykorzystanym w przeprowadzonych badaniach, wyniki których przedstawiono w niniejszym artykule, jest program 3DEC firmy Itasca [1]. Przy użyciu tego programu opracowano model numeryczny górotworu w rejonie rzeczywistej eksploatacji jednej z kopalń LGOM. Rejon ten wybrano z uwagi na dostępność dobrze

*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach.

udokumentowanych danych dotyczących skutków prowadzonej eksploatacji. Zmierzone wartości konwergencji stropu zasadniczo pozwoliły na taki dobór parametrów górotworu, aby uzyskane wyniki modelowania odpowiadały możliwie w największym stopniu rzeczywistym wartościom tych wielkości. Dla kolejnych etapów przeprowadzonej eksploatacji w poszczególnych polach wykonano obliczenia, analizując rozkład naprężeń górotworu

2. Model numeryczny eksploatacji

Opierając się na wykonanych modelach tego pola analizowano przebieg zjawisk zachodzących w stropie furty eksploatacyjnej dla wariantu prowadzenia działalności górniczej bez ukierunkowanego szczelinowania oraz w przypadku jego zastosowania w trakcie dalszych robót górniczych w tym polu. Dla realizacji tego celu konieczne było zbudowanie modeli przestrzennych, umożliwiających uwzględnienie wpływu geometrii wyrobisk na stany deformacyjno-naprężeniowe w górotworze.

Modele pola obejmują bloki prostopadłościowe o wymiarach $650 \times 650 \times 100$ m ($X \times Y \times Z$), w których przyjęto poziome zaleganie warstw skalnych zgodnie z profilem geologicznym dla przedmiotowego rejonu.

Modelowanie przeprowadzono dla kilku etapów prowadzenia eksploatacji złoża odpowiadającym postępowi prowadzenia robót górniczych w okresie kwartalnym dla czterech etapów tej eksploatacji oraz wyprzedzająco dla hipotetycznego stanu zawansowania robót górniczych w okresie kilku następnych miesięcy (zgodnie z tendencją rozwoju tych robót).

Geometrię wyrobisk górniczych w przedmiotowym rejonie, dla stanu zaawansowania ich wykonania podanym powyżej przedstawiono na rysunku 1.

W celu możliwości pokazania tych elementów modeli, warstwy skalne znajdujące się powyżej furty eksploatacyjnej zostały ukryte. Na rysunku 1e zaznaczono czerwonymi liniami miejsca przekrojów poprzecznych oznaczone literami A, B, C, D i E, wzdłuż których prowadzono analizy rozkładu naprężeń i przemieszczeń pionowych na poziomie spągu warstwy anhydrytu.

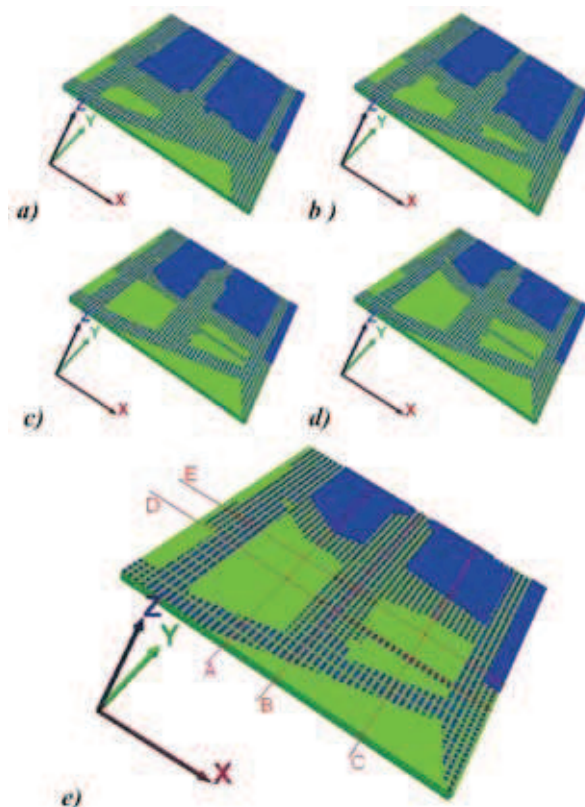
Ze względu na potrzebę usprawnienia budowy modeli uproszczono geometrię wyrobisk górniczych na poziomie furty eksploatacyjnej na filary o regularnym kształcie i rozkładzie. W modelach przedstawionych na rysunku 1 wykorzystano możliwość podziału furty na regularne filary w układzie prostokątnym. Rozmiar przyjętych szerokości filarów oraz wyrobisk górniczych został określony na podstawie średnich wartości tych parametrów odczytanych z map górniczych tego pola.

Taki sposób podziału furty na wyrobiska górnicze pozwolił na uzyskanie podobnego stopnia podparcia warstw

stropowych, jak w rzeczywistych warunkach dołowych, a jednocześnie w bardzo istotny sposób pozwolił skrócić czas budowy modelu. Ponadto z takim sposobem przemawia fakt, że celem użytecznym prowadzonych badań była analiza procesów zachodzących w stropie furty eksploatacyjnej.

Wartości parametrów mechanicznych dla poszczególnych warstw skalnych przedstawia tabela 1, natomiast wartości parametrów mechanicznych górotworu wprowadzone w modelach numerycznych górotworu wartości parametrów mechanicznych styków przedstawiono w tabelicy 2. Wartości parametrów podanych w tabelicach poniżej opracowano w oparciu o dane źródłowe przekazane przez kopalnię.

Przystawione w artykule wyniki uzyskano z analizy modeli z zastosowaniem ośrodka sprężysto-plastycznego opisanego warunkiem Coulomba-Mohra [1].



Rys. 1 Model analizowanego pola – stan zaawansowania robót górniczych na:

a) etap I, b) etap II, c) etap III, d) etap IV, e) etap V
Fig. 1. Model of the analyzed field – the progress of mining for: a) stage I, b) stage II, c) stage III, d) stage IV, e) stage V

Tablica 1. Wartości parametrów mechanicznych warstw skalnych zastosowane w modelach numerycznych
Table 1. Values of mechanical parameters of rock layers used in the numerical models

Lp	Warstwa	Parametry skały						
		Grubość warstwy	Gęstość objętościowa ρ	Moduł Young'a E	Moduł sprężystości objętościowej K	Moduł sprężystości postaciowej G	Spójność c	Kąt tarcia wewnętrznego φ
		m	kg/dm ³	GPa	GPa	GPa	MPa	deg
1	Anhydryt	62,2	2,95	56	38,88	22,22	17,3	63
2	Dolomit wapnisty	15	2,75	60	41,66	23,81	18,3	66
3	Furta eksploatacyjna (dolomit smug., łupek dolom., piaskowiec szary)	2,8	2,7	40	25,64	16,13	14,2	63
4	Piaskowiec czerwony	20	2,1	12	6,06	5,13	5	56

Wartości współczynników sprężystości K i G zostały obliczone na podstawie wartości modułu Younga E i współczynnika Poissona ν na podstawie poniższych zależności:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

W przygotowanych do obliczeń modelach numerycznych zadano mieszane (przemieszczeniowo-naprężeniowe) warunki brzegowe. Przyjęto, że punkty węzłowe na pionowych, bocznych płaszczyznach modeli mają swobodę przemieszczenia się w kierunku pionowym, a w kierunku poziomym przemieszczenia ich są równe zeru. Węzły znajdujące się na dolnej płaszczyźnie modeli mają możliwość przemieszczenia się w kierunku poziomym, a w kierunku pionowym przemieszczenia są równe zeru. Do górnej płaszczyzny modeli przyłożono naprężenie pionowe wynikające ze średniej głębokości zalegania rozpatrywanych warstw skalnych w przedmiotowym polu, równe 21 MPa.

Inicjując pierwotny stan naprężenia w modelach przyjęto, że naprężenie pionowe w górotworze pochodzi od sił masowych i zdeterminowane jest gęstością objętościową poszczególnych warstw, natomiast naprężenia poziome, zgodnie z klasycznym rozwiązaniem wywodzącym się z teorii sprężystości, jest ułamkiem naprężenia pionowego zależnym od wartości współczynnika Poissona. Składową pionową pierwotnego stanu naprężenia (σ_{z0}) wewnątrz modeli przyjęto 21 MPa, natomiast składowe poziome $\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 6,48$ MPa.

Wykonując wszystkie niżej przedstawione modele numeryczne dokonano szereg następujących uproszczeń:

- zadano geometrię wyrobisk górniczych dla średnich wartości szerokości wyrobisk i filarów;
- złożę w przedmiotowym rejonie zalega pod niewielkim kątem, natomiast w wykonanych modelach przyjęto poziome zaleganie wszystkich warstw;
- ociosy wyrobisk przyjęto jako prostopadłe do płaszczyzny warstw skalnych, a nie pochylone jak w warunkach rzeczywistych;
- w trakcie wykonywanie wyrobisk górniczych ich pułap był zabezpieczony za pomocą obudowy kotwowej, co nie zostało uwzględnione w wykonanych obliczeniach numerycznych.

Wszystkie modele numeryczne zostały podzielone na strefy deformowalne o kształcie czworobokianu nieforemny o różnej średniej długości krawędzi. Liczba stref w analizowanych modelach wynosiła ponad 750 000.

Analiza wyników modelowania, mają na celu określenie wpływu prowadzenia ukierunkowanego hydroszczelinowania, w tym polu, na stan deformacji i naprężeń w skałach stropowych. Analizy takie pozwolą wyprzedzająco ustalić najkorzystniejszy schemat prowadzenia tych robót profilaktycznych. Zgromadzony materiał obliczeniowy jest bardzo obszerny. Ze względu na ograniczone możliwości, poniżej przedstawiono jedynie wyniki dla dwóch linii przekrojów: linii A równoległej do kierunku prowadzonej eksploatacji oraz linii E o przebiegu prostopadłym do tego kierunku (rys. 1e).

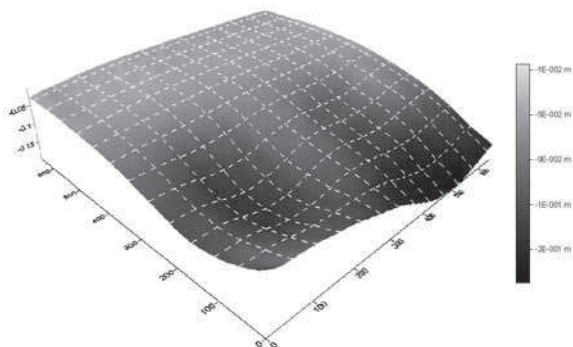
3. Wyniki obliczeń

3.1. Model podstawowy – bez nieciągłości

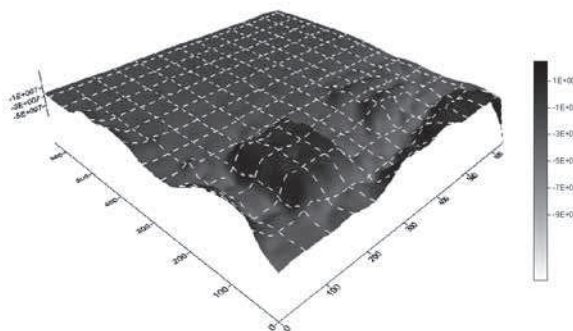
Model podstawowy przedstawia górotwór z nieciągłościami jedynie w płaszczyznach sedymentacji, a parametry geomechaniczne skał i nieciągłości wynikające z badań laboratoryjnych zostały obniżone. Obraz przemieszczeń pionowych generalnie oddaje przemieszczanie się frontu eksploatacyjnego, z charakterystycznym wygładzeniem wynikającym z oddalenia od przestrzeni wybranej (rys. 2). Jest to widoczne zarówno w rozkładzie na płaszczyźnie jak i w liniach przekrojów. Przemieszczenia osiągają do 15 cm nad środkową częścią przestrzeni zrobów. Jest to wartość mniejsza od konwergencji mierzonej w wyrobiskach, co wynika z dość wysokich wartości parametrów ośrodka, szczególnie jego sztywności, jak i braku wpływu wypiętrzania spągu. Rozkłady naprężeń pionowych zobrazowane są w konwencji, w której naprężenia ściskające mają znak ujemny, z tego względu fragmenty wypiętrzone na rysunku 3 oznaczają obszary odprężone. Obszary te ulegają systematycznemu poszerzeniu wraz z powiększaniem się strefy zrobowej. W sąsiedztwie linii frontu robót naprężenia osiągają poziom 35 MPa, większe filary i fragmenty calizny w obszarach nieregularnego wybierania koncentrują naprężenia nawet do 54 MPa. Prognozowane wartości przemieszczeń i naprężeń pokazano na rysunkach 4, 5, 6, 7.

Tablica 2. Wartości parametrów mechanicznych styków między blokami skalnymi
Table 2. Values of mechanical parameters of contacts between blocks of rock

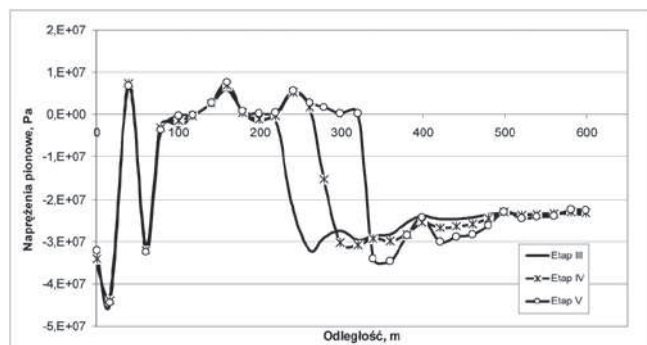
Lp.	Warstwa	Parametry styków warstw skalnych					
		Współczynnik sztywności normalnej <i>jkn</i>	Współczynnik sztywności stycznej <i>jks</i>	Współczynnik wytrzymałości granicznej na rozciąganie <i>jten</i>	Kąt tarcia <i>ffri</i>	Spójność <i>jcoh</i>	Kąt dylatacji <i>jdil</i>
		GPa	GPa	MPa	deg	MPa	deg
1	Anhydryt	685	222	3,25	31	17,3	12
2	Dolomit wapnisty	710	230	9,3	45	18,3	12
3	Furta eksploatacyjna (dolomit smug., łupek dolom., piaskowiec szary)	469	160	9,0	43	14,2	12
4	Piaskowiec szary	127	50	4,4	51	2,0	12



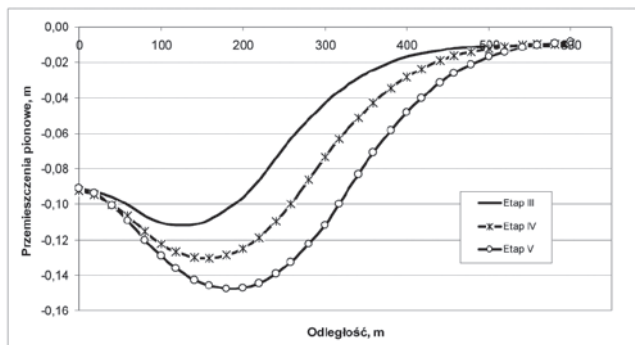
Rys. 2. Rozkład prognozowanych wartości przemieszczeń pionowych na poziomie spągu warstwy anhydrytu – stan robót górniczych dla etapu IV bez nieciągłości w stropie
 Fig. 2. Distribution of the predicted values of vertical displacements at the level of the floor of anhydrite layers – the state of mining works for stage IV without discontinuities in the roof layers



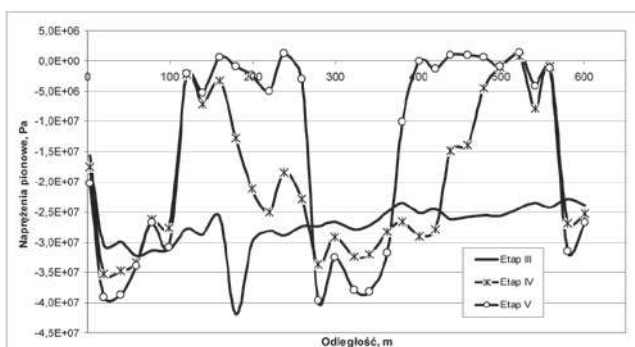
Rys. 3. Rozkład prognozowanych wartości naprężeń pionowych na poziomie spągu warstwy anhydrytu – stan robót górniczych dla etapu III – model bez nieciągłości w stropie
 Fig. 3. Distribution of the predicted values of vertical stresses at the level of the floor of anhydrite layers – the state of mining works for stage IV without discontinuities in the roof rocks



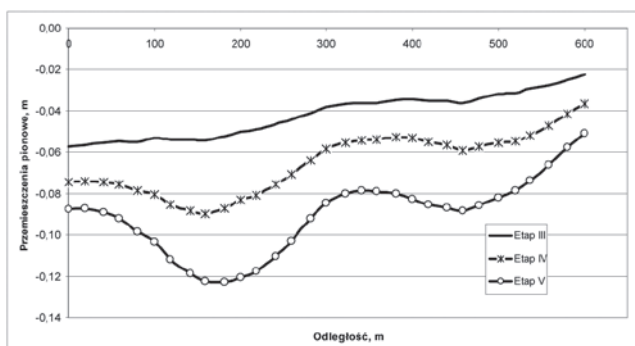
Rys. 4. Prognozowane wartości naprężeń pionowych wzdłuż przekroju „A” na poziomie spągu warstwy anhydrytu – model bez nieciągłości w stropie
 Fig. 4. Predicted values of vertical stresses along cross-section A at the level of the floor of anhydrite layers – a model without discontinuities in the roof rocks



Rys. 5. Prognozowane wartości przemieszczeń pionowych wzdłuż przekroju „A” na poziomie spągu warstwy anhydrytu – model bez nieciągłości w stropie
 Fig. 5. Predicted values of vertical displacements along cross-section A at the level of the floor of anhydrite layers – a model without discontinuities in the roof rocks



Rys. 6. Prognozowane wartości naprężeń pionowych wzdłuż przekroju „E” na poziomie spągu warstwy anhydrytu – model bez nieciągłości w stropie
 Fig. 6. Predicted values of vertical stresses along cross-section E at the level of the floor of anhydrite layers – a model without discontinuities in the roof rocks



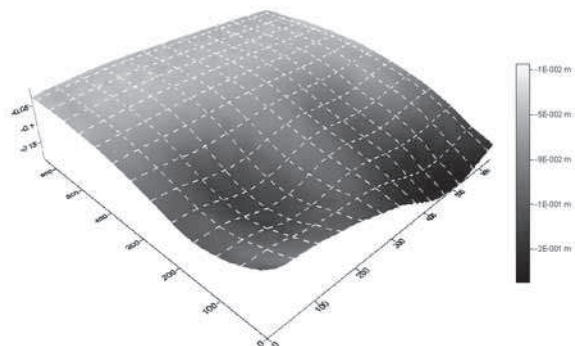
Rys. 7. Prognozowane wartości przemieszczeń pionowych wzdłuż przekroju „E” na poziomie spągu warstwy anhydrytu – model bez nieciągłości w stropie
 Fig. 7. Predicted values of vertical displacements along cross-section E at the level of the floor of anhydrite layers – a model without discontinuities in the roof rocks

3.2. Model ze sztucznymi nieciągłościami

Model ten uwzględnia istnienie 3 poziomych nieciągłości 5, 10 i 15 m powyżej spągu anhydrytu na całej płaszczyźnie modelu. (rys. 8, 9) Celem tego zabiegu było próba odzwierciedlenia idealnego przypadku wykonania UHS. W rzeczywistości sztuczne rozwarstwienie górotworu będzie odnosiło właściwy skutek w postaci umożliwienia większego

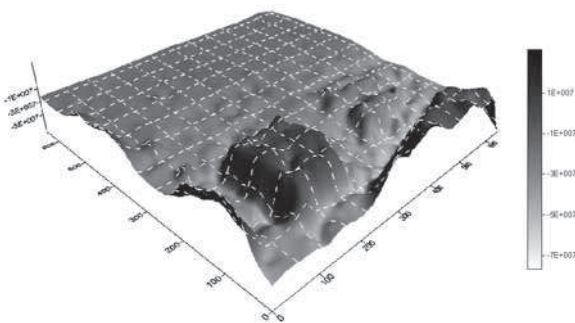
odkształcania się górotworu jedynie w sąsiedztwie pustek eksploatacyjnych. Głęboko w caliznie dodatkowe nieciągłości nie spowodują dodatkowych przemieszczeń a tym samym i zmian naprężeń.

W świetle uzyskanych wyników obliczeń stanu naprężenia i przemieszczenia wybranego horyzontu spągu anhydrytu należy stwierdzić, że jakościowo są bardzo zbliżone dla modelu z nieciągłościami i bez nieciągłości. Ilościowo zmiany są widoczne w przypadku obu wielkości: w obszarach zbliżonych do pionowego rzutu wyrobisk górniczych, w szczególności w sąsiedztwie frontu eksploatacyjnego, naprężenia osiągają wartości rzędu 38 MPa w ostatnim etapie eksploatacji (rys. 10), natomiast przemieszczenia pionowe w przestrzeni zrobowej w linii przekroju A – wzdłuż lewego skrzydła frontu eksploatacji – osiąga wartość 0,16 m (rys. 11). W linii przekroju E, ułożonej równoległe do linii frontów, naprężenia w sąsiedztwie rzutu linii ociosów wyrobisk dzielących dwa skrzydła eksploatacji, osiągają wartości od 26 MPa (III etap), poprzez 34 MPa (IV etap) do 39 MPa (V etap). Naprężenia nad lewą częścią lewego skrzydła, w sąsiedztwie zrobów sąsiedniego pola, dochodzą do 35 MPa, natomiast nad prawą częścią prawego skrzydła, czyli w sąsiedztwie calizny, są wyraźnie niższe, ulegają małym zmianom w trakcie eksploatacji i maksymalnie dochodzą do 32 MPa (rys. 12). Przemieszczenia w tej linii przekroju ulegają podobnym jakościowo zmianom jak w modelu bez nieciągłości i maksymalnie wynoszą około 0,13 m w środku lewego skrzydła frontu na V etapie rozwoju eksploatacji (rys. 13).



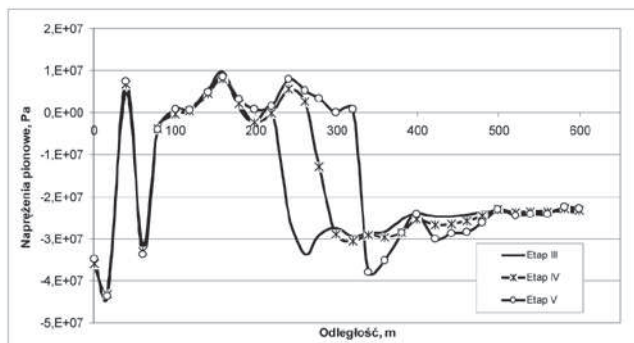
Rys. 8. Rozkład prognozowanych wartości przemieszczeń pionowych na poziomie spągu warstwy anhydrytu – stan robót górniczych dla etapu IV z nieciągłościami w stropie

Fig. 8. Distribution of the predicted values of vertical displacements at the level of the floor of anhydrite layers – the state of mining works for stage IV with discontinuities in the roof rocks



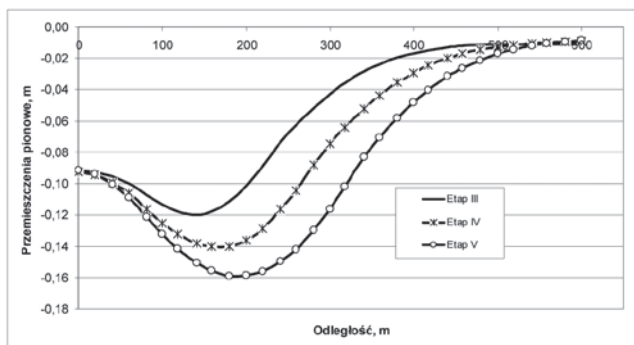
Rys. 9. Rozkład prognozowanych wartości naprężeń pionowych na poziomie spągu warstwy anhydrytu – stan robót górniczych dla etapu IV – model z nieciągłościami w stropie

Fig. 9. Distribution of the predicted values of vertical stresses at the level of the floor of anhydrite layers – the state of mining works for stage IV with discontinuities in the roof rocks



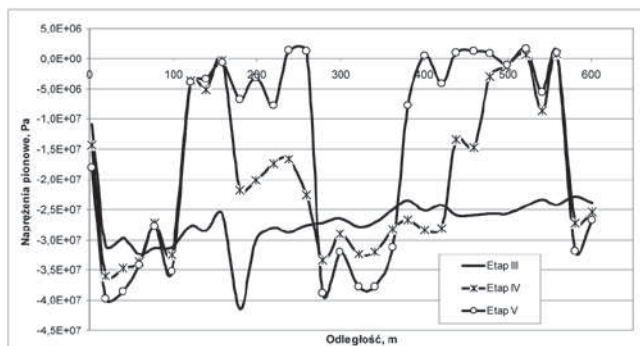
Rys. 10. Prognozowane wartości naprężeń pionowych wzdłuż przekroju „A” na poziomie spągu warstwy anhydrytu – model z nieciągłościami w stropie

Fig. 10. Predicted values of vertical stresses along cross-section A at the level of the floor of anhydrite layers – a model with discontinuities in the roof rocks



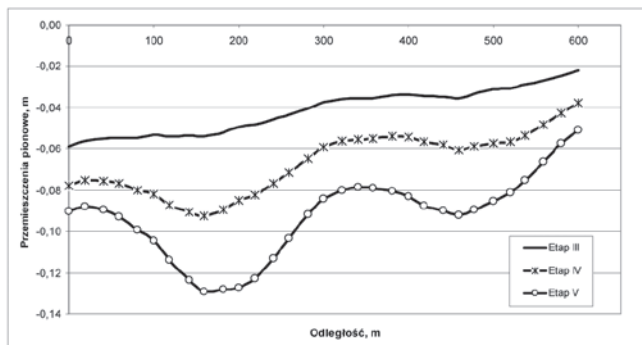
Rys. 11. Prognozowane wartości przemieszczeń pionowych wzdłuż przekroju „A” na poziomie spągu warstwy anhydrytu – model z nieciągłościami w stropie

Fig. 11. Predicted values of vertical displacements along cross-section A at the level of the floor of anhydrite layers – a model with discontinuities in the roof rocks



Rys. 12. Prognozowane wartości naprężeń pionowych wzdłuż przekroju „E” na poziomie spągu warstwy anhydrytu – model z nieciągłościami w stropie

Fig. 12. Predicted values of vertical stresses along cross-section E at the level of the floor of anhydrite layers – a model with discontinuities in the roof rocks



Rys. 13. Prognozowane wartości przemieszczeń pionowych wzdłuż przekroju „E” na poziomie spągu warstwy anhydrytu – model z nieciągłościami w stropie

Fig. 13. Predicted values of vertical displacements along cross-section E at the level of the floor of anhydrite layers – a model with discontinuities in the roof rocks

4. Dyskusja wyników

Porównanie wyników obliczeń na podstawie danych z bezpośrednich obliczeń jest trudne i możliwe jedynie na dużym poziomie ogólności. Analiza zjawisk zachodzących w górotworze nad polem eksploatacyjnym, poddanym hydroszczelinowaniu jest przedstawiona w artykule [6]. Została tam zawarta analiza zmian naprężeń i przemieszczeń poprzez obliczenie wartości różnicowych. Ogólnie można stwierdzić,

że wykonanie nieciągłości w anhydrycie spowodowało wystąpienie nieco większych przemieszczeń w linii A – usytuowanej w środku pola eksploatacyjnego: zmiana wyniosła z 0,145 do 0,16 m, zaś w linii E poprzecznej przed frontem robót: z 0,12 do 0,13 m. Zmiany te odniosły efekt w postaci pewnego podwyższenia się naprężenia w linii frontu robót: z 35 do 39 MPa, natomiast w linii E zmiana nie była obserwowana.

Literatura

1. 3DEC v.4.1. User's Manual. Itasca Consulting Group, Inc, 2007.
2. *Kabiesz J., Makówka J.*: UHS potencjalną metodą profilaktyki tapaniowej w kopalniach rud miedzi. Materiały II Międzynarodowego Kongresu Górnictwa Rud Miedzi, Lubin 2012.
3. *Kabiesz J., Drzewiecki J.*: Próba ukierunkowanego szczelinowania górotworu w KGHM Polska Miedź S.A. Prace Naukowe GIG. Kwartalnik. Górnictwo i Środowisko. Nr III/2008/. Katowice 2008. Ss. 79÷91.
4. *Konopko W., Kabiesz J., Merta G., Makówka J. i inni*: Ukierunkowane hydroszczelinowanie skał i kierunku jego wykorzystania. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, No 824, Katowice 1997. Ss. 1÷33.
5. *Makówka J. i zespół*: Badanie możliwości osłabiania struktury mocnych warstw stropowych metodami ukierunkowanego hydraulicznego szczelinowania (UHS) w kopalniach rud miedzi. Etap II: Analiza sytuacji górnictwo-geologicznej w oddziale, analiza rozkładu naprężeń i deformacji, wykonanie projektu rozkładu otworów do UHS. Dokumentacja pracy badawczo-rozwojowej GIG nr 58144222-141. Katowice 2013.
6. *Makówka J., Myszkowski J.*: Wpływ UHS na zmiany energii sprężystej akumulowanej w górotworze nad polem eksploatacji rudy miedzi systemem filarowo-komorowym. Przegląd Górniczy nr 1/2015.