

Wpływ UHS na zmiany energii sprężystej akumulowanej w górotworze nad polem eksploatacji rudy miedzi systemem filarowo-komorowym

The impact of directed hydrofracturing on the changes in elastic strain energy accumulated 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 analiz zmian zachodzących w warstwach stropowych nad polem eksploatacji rudy miedzi systemem filarowo-komorowym z ugięciem stropu w wyniku zastosowania ukierunkowanego hydroszczelinowania (UHS). Analizie numerycznej poddano zmiany stanu naprężenia i odkształcenia warstw stropowych w modelach numerycznych z symulowanymi zabiegami UHS w stosunku do modeli bez szczelinowania. Przeprowadzono także porównanie rozkładu gęstości energii sprężystej w obu modelach.

Abstract: This paper presents the results of analyses of changes in the roof strata above the field operation of copper ore with room and pillar system with roof deflection as a result of directed hydrofracturing (pol. ukierunkowane hydroszczelinowanie – UHS). The numerical analysis includes changes in the stress and strain of the roof strata in numerical models of the simulated procedures of UHS compared to the models without fracturing. A comparison of elastic strain energy density distribution in both models was also presented.

Słowa kluczowe:

modelowanie numeryczne, ukierunkowane hydroszczelinowanie skał, energia sprężysta

Key words:

numerical modelling, rock directed hydrofracturing, elastic strain energy

1. Wprowadzenie

Artykuł jest bezpośrednią kontynuacją analiz numerycznych nad zmianami zachodzącymi w górotworze nad polem eksploatacji rud miedzi w wyniku wykonania sztucznych nieciągłości metodą ukierunkowanego hydroszczelinowania [2]. Zaprezentowano porównanie wyników obliczeń numerycznych modeli z dodatkowymi nieciągłościami i bez nich. Przedstawiono również analizę rozkładu gęstości energii sprężystej w obu modelach wraz z analizą wpływu UHS na tą energię.

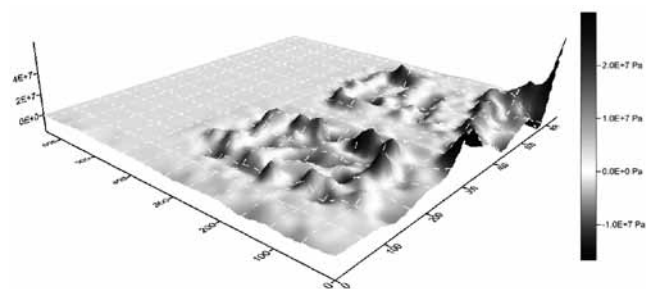
2. Porównanie modeli

Zasadniczym zadaniem prowadzonych obliczeń było określenie wpływu występowania dodatkowych nieciągłości

w warstwie anhydrytu nad polem eksploatacyjnym. W tym celu wykonano porównanie wartości naprężeń i przemieszczeń pionowych pomiędzy modelem upodatnionym bez nieciągłości i z nieciągłościami. Przedstawiają je rysunki 1÷3 dla naprężeń i 4÷6 dla przemieszczeń.

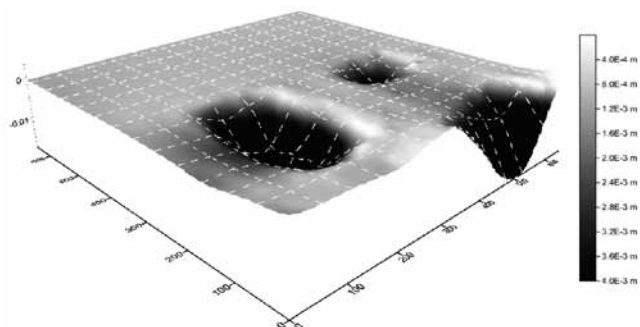
W przypadku naprężeń wartości dodatnie oznaczają odprężenie modelu ze szczelinami w stosunku do modelu bez szczelin. Jak wynika z rozkładu naprężenia różnicowego na płaszczyźnie spągu anhydrytu (rys. 1÷3), sztuczne nieciągłości powodują pewne odprężenie w przestrzeniach nad zrobami, natomiast w linii frontu robót występuje lokalne podwyższenie wartości naprężenia o około 4 MPa. Zjawisko to jest tym większe, im większa jest przestrzeń otwarcia: wymienione wartości dotyczą lewej części pola (linia przekroju A), natomiast w linii poprzecznej (przekrój E) występują wahania obrazujące dociążenie brzegów obszarów calizny przy równoczesnym odciążeniu obszarów odległych od wyrobisk. Wynika to z większego stopnia ugięcia warstw stropowych podzielonych sztucznymi nieciągłościami.

*) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach.



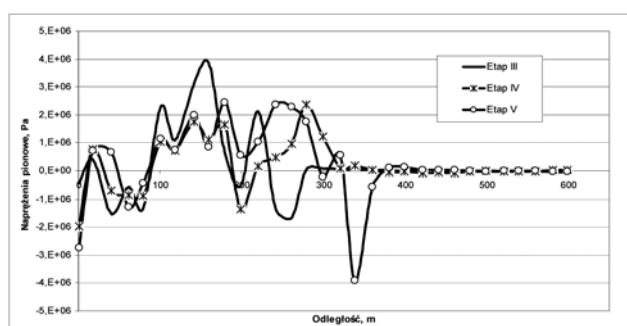
Rys. 1. Różnicowe naprężenia pionowe na horyzoncie spągu anhydrytu między modelem bez sztucznych nieciągłości i modelem z nieciągłościami dla etapu V eksploatacji

Fig. 1. Differential vertical stresses on the horizon of anhydrite floor between the model with and without artificial discontinuities for exploitation stage V



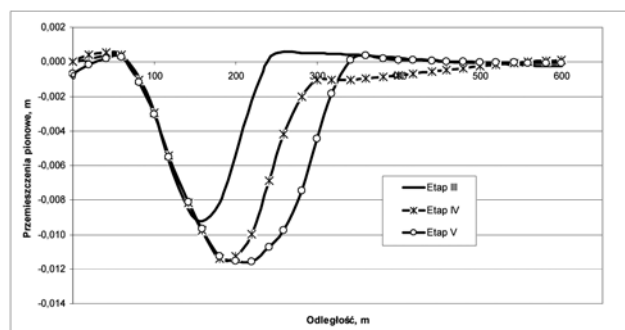
Rys. 4. Różnicowe przemieszczenia pionowe na horyzoncie spągu anhydrytu między modelem bez sztucznych nieciągłości i modelem z nieciągłościami dla etapu V eksploatacji

Fig. 4. Differential vertical displacements on the horizon of anhydrite floor between the model with and without artificial discontinuities for exploitation stage V



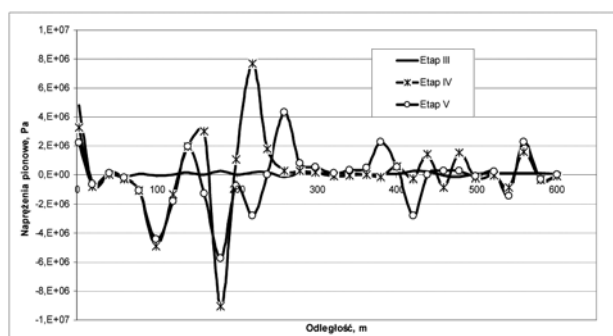
Rys. 2. Różnicowe naprężenia pionowe na horyzoncie spągu anhydrytu między modelem bez sztucznych nieciągłości i modelem z nieciągłościami wzdłuż linii przekroju A

Fig. 2. Differential vertical stresses on the horizon of anhydrite floor between the model with and without artificial discontinuities along the section line A



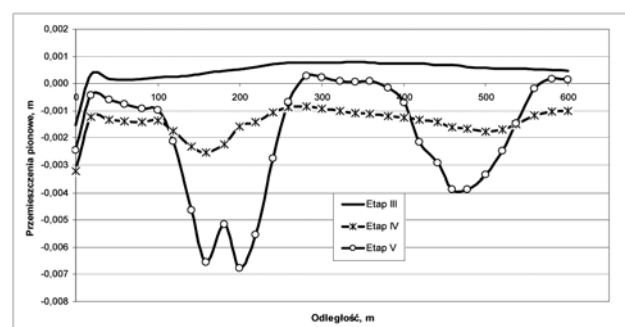
Rys. 5. Różnicowe przemieszczenia pionowe na horyzoncie spągu anhydrytu między modelem bez sztucznych nieciągłości i modelem z nieciągłościami wzdłuż linii przekroju A

Fig. 5. Differential vertical displacements on the horizon of anhydrite floor between the model with and without artificial discontinuities along the section line A



Rys. 3. Różnicowe naprężenia pionowe na horyzoncie spągu anhydrytu między modelem bez sztucznych nieciągłości i modelem z nieciągłościami wzdłuż linii przekroju E

Fig. 3. Differential vertical stresses on the horizon of anhydrite floor between the model with and without artificial discontinuities along the section line E



Rys. 6. Różnicowe przemieszczenia pionowe na horyzoncie spągu anhydrytu między modelem bez sztucznych nieciągłości i modelem z nieciągłościami wzdłuż linii przekroju E

Fig. 6. Differential vertical displacements on the horizon of anhydrite floor between the model with and without artificial discontinuities along the section line E

Wartości przemieszczeń natomiast (rysunki 4÷6) wykazują jednoznacznie, że wytworzenie nieciągłości ułatwia uginanie się warstwy anhydrytu. Różnica wartości przemieszczeń nie jest duża i wynosi maksymalnie do 12 mm (pominąwszy obszary przy brzegu modelu, które nie są wiarygodne), lecz dla tak sztywnej warstwy skalnej, jaką jest anhydryt, oznacza istotną zmianę, jeśli chodzi o proces osiadania i wytwarzanie naprężeń zginających, krytycznych w aspekcie pęknięcia i generowania wstrząsów.

3. Energia sprężysta i jej zmiany po wykonaniu uhs

Kolejnym etapem analizy zmian zachodzących w modelowanej sytuacji górniczej po zastosowaniu symulowanego hydroszczelinowania była analiza zmian wartości energii

sprężystej w modelu. Jakkolwiek stosowanie UHS samo w sobie nie ma na celu zmianę takiej energii kumulowanej w procesie deformowania się górotworu, lecz spowodowanie wyzwania się energii w sposób bardziej rozłożony w czasie i w mniejszych jednorazowych porcjach, to sama informacja o rozkładzie takiej energii w górotworze jest również interesująca z poznawczego punktu widzenia.

Skąły, podobnie jak wszystkie rzeczywiste, pod działaniem sił zewnętrznych doznają deformacji, poprzez wykonanie na nich pewnej pracy L . Praca ta jest równa energii wewnętrznej układu W . W przypadku ciała sprężystego i obciążen statycznych energia wewnętrzna układu jest równa energii potencjalnej W_p , która równa jest pracy sił wewnętrznych na wywołane przez nie odkształcenie i nazywana jest energią sprężystą układu U : $L=W=W_p=U$. Energia ta jest odwracalna, co oznacza, że po usunięciu sił zewnętrznych jest zużywana na odzyskanie początkowego kształtu i objętości.

Gęstość energii sprężystej Φ jest ilością energii sprężystej na jednostkę objętości ciała. Jeśli to ciało, w naszym przypadku skała, o objętości V znajduje się w równowadze pod działaniem sił zewnętrznych, to w każdym punkcie tego ciała powstają stany naprężenia i odkształcenia, opisane ich tensorami T_σ i T_ϵ . Gęstość energii sprężystej rozkłada się na gęstość energii odkształcenia objętościowego, związanej z aksjatorami tensorów i naprężenia A_σ oraz odkształcenia A_ϵ , i gęstość energii odkształcenia postaciowego, związanych z odpowiednimi dewiatorami D_σ i D_ϵ . Tym samym gęstość energii w rozpatrywanej objętości skały można opisać równaniem [1]

$$\Phi = \Phi_v + \Phi_f = \frac{1}{2} A_\sigma A_\epsilon + \frac{1}{2} D_\sigma D_\epsilon \quad (1)$$

Wzory na gęstość energii można wyrazić z użyciem elementów tensora naprężeń oraz modułu sprężystości i liczby Poissona:

$$\Phi_v = \frac{1-2\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2 \quad (2)$$

$$\Phi_f = \frac{1+\nu}{E} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)] \quad (3)$$

W dalszych analizach przytaczana będzie sumaryczna energia sprężysta.

Dla analizowanych modeli numerycznych przedstawiono rozkłady gęstości energii sprężystej w warstwach stropowych. Ograniczono się do linii przekroju A, czyli wzdłuż środkowej części lewego skrzydła frontu eksploatacji. Przedstawiono gęstości dla czterech etapów eksploatacji i zmiany gęstości energii między poszczególnymi etapami. W tym ostatnim przypadku zaznaczona linia ciągła oznacza izolinię „0”, oddzielającą strefę o dodatniej i ujemnej zmianie gęstości energii. Na rysunkach oznaczono położenie frontu rozczinkowego, stronę po której znajduje się calizna oraz stronę oznaczoną jako „zrobi”, która faktycznie oznacza strefę rozciętą a w dalszej odległości strefę zrobów (oprócz etapu II, w którym faza likwidacji nie była jeszcze przeprowadzona). Dla każdego z modeli przedstawiono też średnią gęstość energii w trzech strefach stropu nad polem eksploatacji dla ostatniego, piątego etapu prowadzenia robót. Strefy te określono następująco:

- strop zasadniczy: od stropu furty eksploatacyjnej do stropu dolomitu, czyli do 17,8 m nad furką,
- strefa UHS: od stropu dolomitu i spągu anhydrytu do 20 m ponad tą płaszczyznę; w strefie tej zadano trzy sztuczne, poziome nieciągłości, symulujące wykonanie UHS (w modelu z UHS),
- strop wysoki: od płaszczyzny 20 m ponad stropem anhydrytu do górnej płaszczyzny modelu, leżącej 80 m od spągu furty eksploatacyjnej.

3.1. Model bez nieciągłości

Na rysunku 7 przedstawiono rozkład gęstości energii sprężystej w kolejnych etapach symulowanej eksploatacji w modelu numerycznym, podstawowym, czyli bez sztucznych nieciągłości. Istnieją w nim jedynie nieciągłości wynikające z granicy między dolomitem a anhydrytem w odległości 17,8 m od stropu furty eksploatacyjnej. Granica ta jest wyraźnie zaznaczona na wszystkich rysunkach cząstkowych jako granica stref o różnym poziomie energii sprężystej. Wynika to z faktu zróżnicowania modułu sprężystości tych skał, co przy porównywalnym stanie naprężenia daje zróżnicowany poziom gęstości energii.

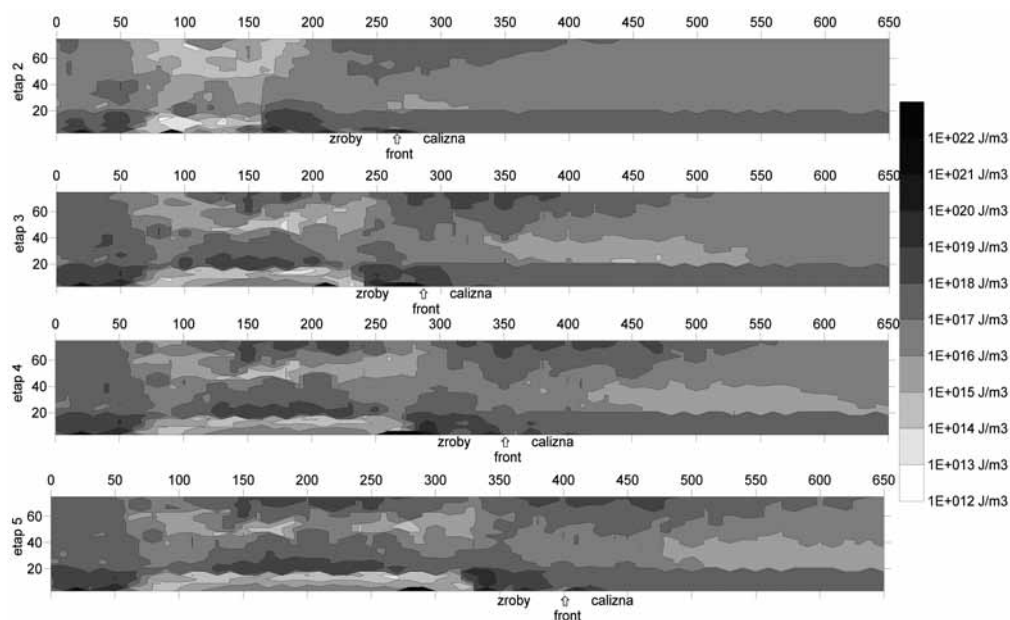
Dla wszystkich etapów przedstawionych na rysunku 7 można zauważyć, że największe zaburzenia w rozkładzie gęstości energii zachodzą w przestrzeni za frontem rozczinkowym, przy czym ich zasięg wstecz rośnie wraz z odległością od poziomu robót górniczych – jest to szczególnie widoczne dla etapu 4 i 5. Pewne zmiany, o mniejszej intensywności, zachodzą również w odległości 50÷70 m przed frontem rozczinki. Charakterystyczne jest występowanie w dolomicie stref o podwyższonej gęstości energii sprężystej do odległości około 80 m za frontem rozczinki, zaś za nią występuje obszar o wyraźnie mniejszym poziomie energii. Prawdopodobnie należy to wiązać z faktem, że za frontem ma miejsce najbardziej intensywny proces deformowania warstw tej części stropu, który w dalszej odległości ma charakter bardziej wyrównany. Znamienna jest lokalizacja stref o wyższej gęstości energii w sąsiadującym anhydrycie.

Zmiany zachodzące wraz z postępowaniem frontu są dobrze widoczne na rysunku 8, gdzie przedstawiono różnice gęstości energii między etapami eksploatacji. Zaznaczyć należy, że dodatnia wartość zmiany gęstości energii oznacza jej przyrost po przesunięciu się czoła eksploatacji, natomiast wartość ujemna – jej rozładowanie. Linia ciągła jest izolinią „0”, oddzielającą obszary o różnych znakach.

Analizując poszczególne rysunki składowe można pokusić się o wskazanie pewnych cech wspólnych i obszarów charakterystycznych. I tak tuż za linią frontu, w najbliższej części stropu bezpośredniego, obserwuje się strefę o największym przyroście gęstości energii. Jest ona bardzo mała, ale ze względu na najmniejszą odległość od przestrzeni roboczej – jest też bardzo istotna. Za tą strefą, od stropu furty aż do górnej granicy modelu, rozprzestrzenia się rozległa część górotworu, w której pomiędzy kolejnymi krokami eksploatacji zachodzą największe zmiany obniżenia gęstości energii. Strefa ta jest „nachylona” w kierunku do frontu eksploatacji. Nad frontem zaś znajduje się bardziej rozległa strefa, w której następuje przyrost energii.

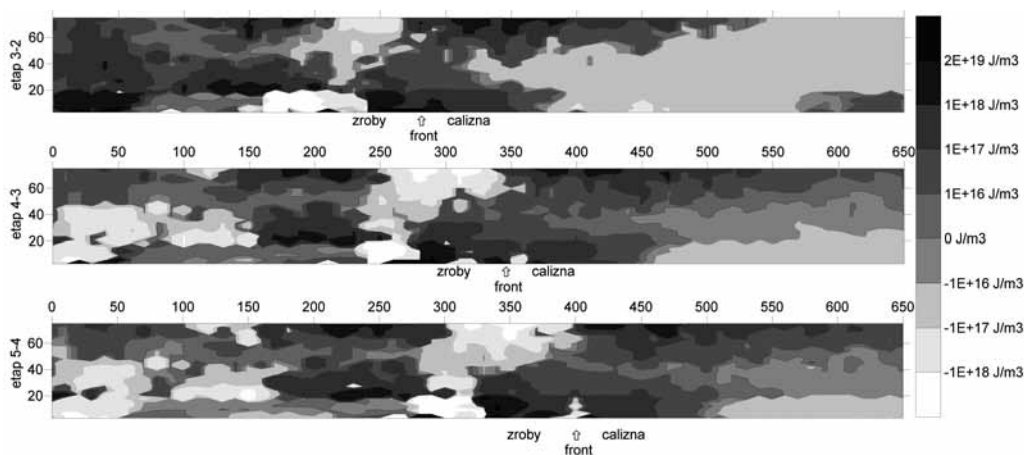
Aby wygodniej ocenić charakter zachodzących zmian, określono liniowy rozkład średniej gęstości energii sprężystej w opisanych powyżej strefach stropu, dla danej rzędnej w całym profilu pionowym strefy. Dla modelu podstawowego (bez symulowanego oddziaływania UHS), dla 5 etapu rozwoju robót, wykresy tej wartości przedstawia rys. 9. Najłatwiej zauważalne są duże wahania w stropie zasadniczym, zachodzące już od linii frontu (na $X=400$ m), osiągające apogeum około 120÷130 m za frontem, natomiast później również zmieniającej się, lecz z mniejszą amplitudą i na dużo niższym poziomie gęstości energii.

W „strefie UHS”, podobnie jak w strefie stropu wysokiego, zmiany gęstości energii wzdłuż obserwowanej linii przekroju zachodziły z mniejszą intensywnością; na podstawie rozkładu tego parametru można z dużą wiarygodnością wyznaczyć strefę zrobową (między $X=100$ m, a $X=320$ m).



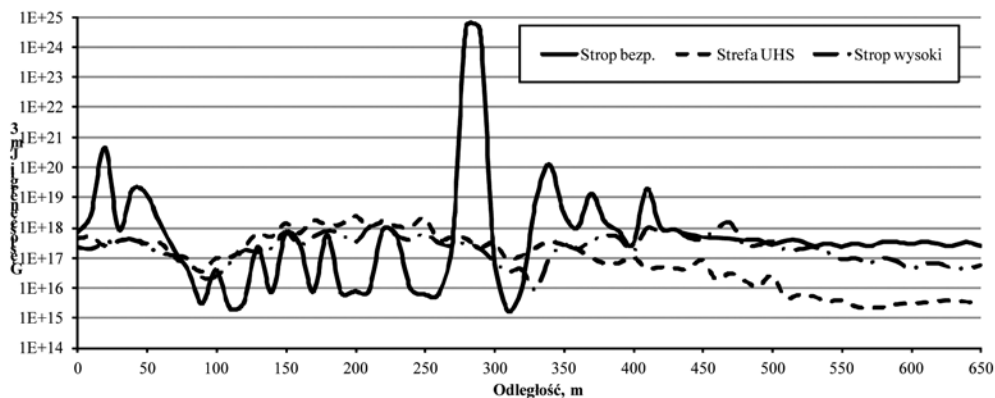
Rys. 7. Rozkład gęstości energii w przekroju wzdłuż lewego skrzydła frontu eksploatacyjnego - model bez UHS

Fig. 7. Distribution of energy density in the cross-section along the left side of the mining front - model without UHS



Rys. 8. Rozkład zmian gęstości energii w przekroju wzdłuż lewego skrzydła frontu eksploatacyjnego – model bez UHS

Fig. 8. Distribution of energy density changes in the cross-section along the left side of the mining front – model without UHS



Rys. 9. Rozkład średniej gęstości energii w strefach stropu – model bez UHS

Fig. 9. Distribution of average energy density in the roof zones – model without UHS

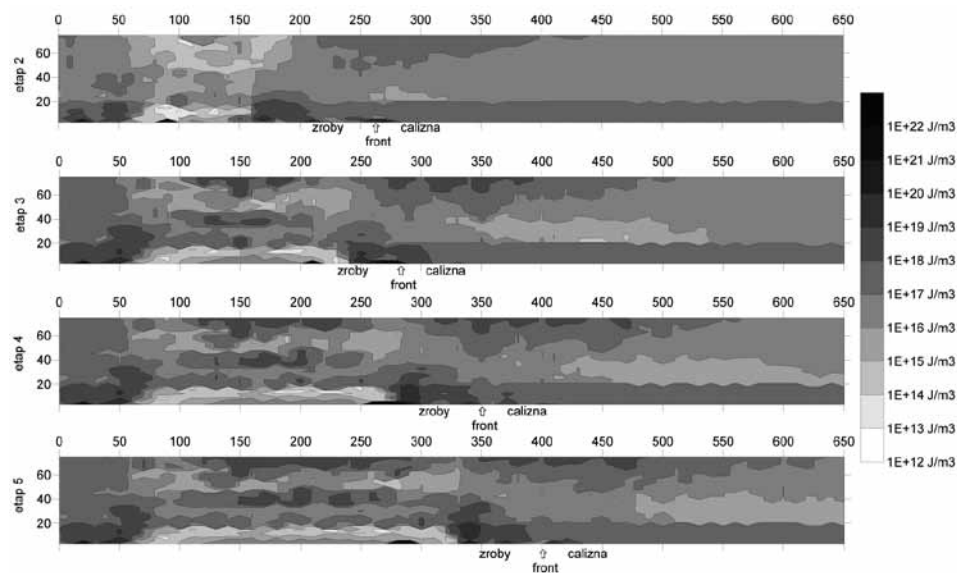
3.2. Model z nieciągłościami

W modelu, w którym wykonano symulację prowadzenia UHS rozkłady gęstości energii w kolejnych etapach eksploatacji (rys. 10) są podobne jakościowo jak w modelu poprzednim i można na nich zaobserwować wszystkie charakterystyczne elementy wymienione powyżej. Obserwowalna jest natomiast istotna różnica nad przestrzenią zrobową, gdzie w poprzednim modelu w dolnej części anhydrytu widoczna była podwyższona gęstość energii, natomiast w tym modelu występuje wyraźnie wyodrębniona strefa o istotnie niższej energii. Jest to wpływ nowych nieciągłości poziomych, symulujących wykonanie UHS.

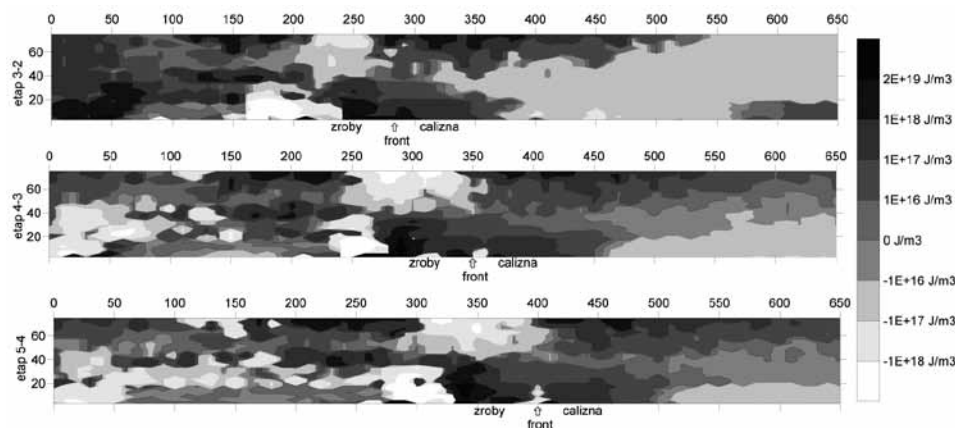
Na rysunku 11 również można zaobserwować podobną zmianę gęstości energii pomiędzy poszczególnymi etapami eksploatacyjnymi. Szczególnie dotyczy to różnicy w gęstości energii pomiędzy etapami 5 i 4, gdzie w strefie $Z=18$ m do 38 m zachodzi istotne obniżenie się energii. Obserwowane uprzednio strefy obniżenia energii za frontem i podwyższania energii w sąsiedztwie frontu są w przypadku tego modelu dość mocno zaburzone. Można natomiast zauważyć, że około 70÷80 m za

frontem rozczinkowym, po każdym kroku eksploatacyjnym, obserwuje się strefę, w której gęstość energii jest istotnie podwyższana. Strefa ta wraz z przesuwaniami się frontu ulega powiększeniu.

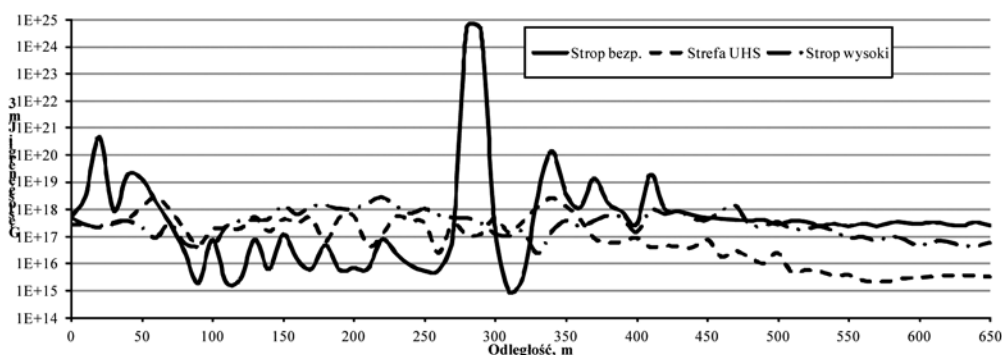
Wykres uśrednionych gęstości energii w poszczególnych strefach skał stopowych, przedstawiony na rysunku 12, jest bardzo podobny w części dotyczącej stropu bezpośredniego, dla wykresu opisującego model podstawowy (rys. 9). W przypadku modelu z symulacją UHS również występują bardzo istotne zmiany średniej gęstości energii wzdłuż linii przekroju i mają one bardzo podobny przebieg. W części dalszej za linią frontu, odpowiadającej przestrzeni „likwidacji”, zauważyć można mniejszą amplitudę zmian energii przy jej ogólnie niższym poziomie. Bardziej istotna zmiana zaszła w przebiegu linii wykresu średniej gęstości energii „strefy UHS”: linia ta częściowo nabrała charakteru podobnej zmienności, jak dla stropu zasadniczego, lecz o przeciwnych kierunkach wychyleń. Oznacza to, że „strefa UHS” zaczęła pracować niezależnie od stropu wysokiego i zjawiska zachodzące w tej strefie bardziej zależą od warunków stwarzanych przez niżej leżącą warstwę stropu bezpośredniego.



Rys. 10. Rozkład gęstości energii w przekroju wzdłuż lewego skrzydła frontu eksploatacyjnego – model z UHS
 Fig. 10. Distribution of energy density in the cross-section along the left side of the mining front – model with UHS



Rys. 11. Rozkład zmian gęstości energii w przekroju wzdłuż lewego skrzydła frontu eksploatacyjnego – model z UHS
 Fig. 11. Distribution of energy density changes in the cross-section along the left side of the mining front – model with UHS



Rys. 12. Rozkład średniej gęstości energii w strefach stropu – model z UHS

Fig. 12. Distribution of average energy density in the roof zones – model with UHS

3.3. Porównanie wyników dla obu modeli

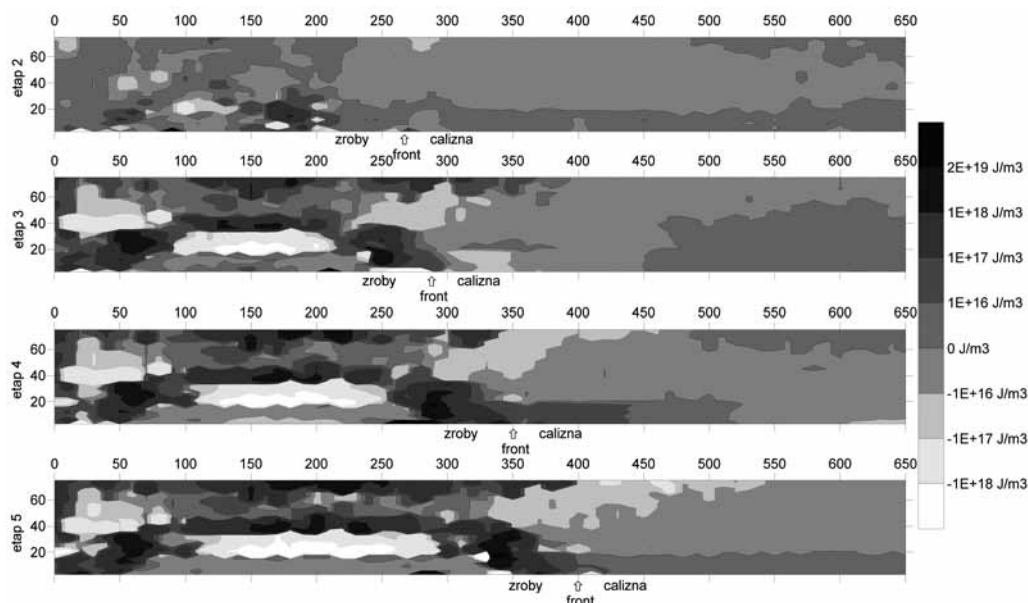
Bardziej bezpośrednie porównanie uzyskanych wyników rozkładu gęstości energii jest możliwe po obliczeniu różnicy jej wartości dla modelu podstawowego i z symulowanym ukierunkowanym hydroszczelinowaniem skał

$$\Delta\Phi = \Phi_{UHS} - \Phi_{NAT} \quad (4)$$

Rozkłady różnicowe przedstawiono na rysunku 13, gdzie ujemna wartość oznacza, że w wyniku zastosowania UHS gęstość energii w danym punkcie modelu jest niższa niż była w modelu podstawowym. Podobnie jak na rysunkach 8 i 11 ciągła linia oddziela strefy o dodatnim i ujemnym znaku gęstości różnicowej.

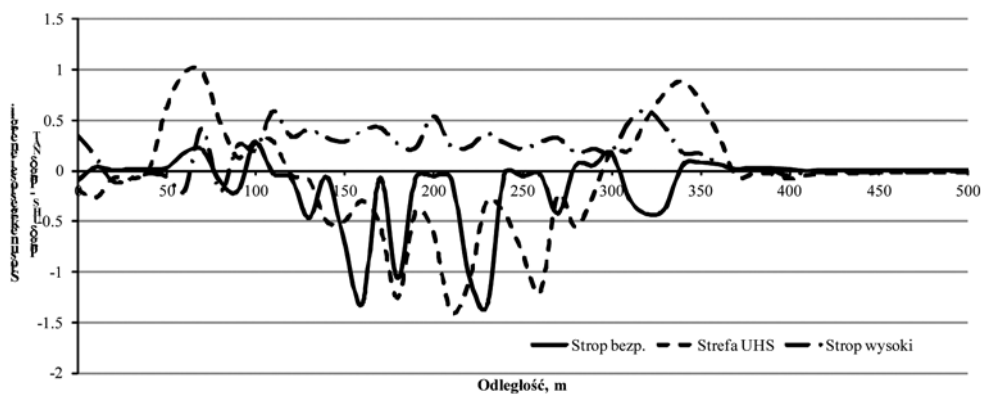
Na rysunku 13 można zauważyć, że o ile w przypadku etapu 2, kiedy to eksploatacja nie była jeszcze w pełni rozwinięta i nie wykonywano robót likwidacyjnych, różnice między gęstościami energii dla obu modeli były niewielkie i raczej chaotyczne, to dla kolejnych etapów można określić pewne

wspólne cechy. Powyżej stropu zasadniczego, w „strefie UHS”, zauważalne jest wyraźne obniżenie gęstości energii sprężystej po wykonaniu UHS. Ma to związek z uginaniem się skał w warstwach o mniejszej grubości i kumulowaniu mniejszej energii sprężystej w części odpowiadającej za odkształcenia postaciowe. Równocześnie wyżej leżąca warstwa anhydrytu, nie poddana podziałowi na warstwy jest mocniej zdeformowana i gromadzi więcej energii sprężystej, niż to miało miejsce w modelu bez zastosowania UHS. Przyrost gęstości energii zachodzi też za frontem eksploatacyjnym a przed linią robót likwidacyjnych, co niewątpliwie należy uznać za zjawisko niekorzystne. Wynika to z faktu, że w tej strefie zachodzą największe zmiany w sposobie uginania się warstw stropu zasadniczego po zastosowaniu UHS i warstwy te, podobnie jak warstwy objęte hydroszczelinowaniem, podlegają większym ugięciom, zmieniając energię odkształcenia postaciowego. Ponadto należy odnotować, że w linii frontu rozczekowego nieznacznie podwyższona jest gęstość energii w warstwach dolomitu (do 18 m ponad stropem furty), natomiast obniżona w anhydrycie (powyżej 18 m).



Rys. 13. Rozkład różnic gęstości energii w przekroju wzdłuż lewego skrzydła frontu eksploatacji między dwoma modelami: z symulacją stosowania UHS i bez UHS

Fig. 13. Distribution of energy density differences in cross-section along the left side of the mining front between the two models: with simulation of the use of UHS and without UHS



Rys. 14. Rozkład stosunku średniej gęstości energii między modelem bez UHS i z zastosowaniem UHS (dla etapu 5)

Fig. 14. Distribution of the average energy density ratio between the model with and without the use of UHS (for stage V)

Dla dopełnienia obrazu przedstawionego powyżej porównania na rysunku 14 dokonano analizy zmian energii w odpowiednich strefach stropu. Rysunek ten zawiera stosunek średniej gęstości energii w modelu z UHS do średniej gęstości w modelu bez UHS. Zależność na przedstawiony parametr opisuje poniższe równanie

$$\log(\Delta\Phi) = \log(\Phi_{UHS}) - \Phi \log(\Phi_{NAP}) \quad (5)$$

Parametr ten pozwala określić ile razy zmniejszyła (znak „-”) lub zwiększyła się (znak „+”) średnia gęstość energii w danej strefie stropu.

W strefie stropu zasadniczego, praktycznie na całej długości linii przekroju (od linii frontu $X=400$ m, wstecz), zachodzi obniżenie gęstości energii, z silnymi lokalnymi wahaniami. W strefie, w której wykonano symulowane hydroszczelinowania obserwuje się dość istotne podwyższenie gęstości energii już od około 30 m za frontem robót rozcińkowych aż do około 120 m przed tym frontem (od $X=370$ m do 290 m), natomiast dalej gęstość energii jest wyraźnie obniżona. Równocześnie w strefie stropu wysokiego już w sąsiedztwie frontu aż do końca przestrzeni wybranej widoczny jest praktycznie stały przyrost gęstości energii, na poziomie $\log(\Delta\Phi)$ od 0,5 do 1.

4. Podsumwanie

Przedstawione wyniki analiz rozkładu gęstości energii sprężystej w modelu eksploatacji rudy miedzi systemem filarowo-komorowym z ugięciem stropu i z symulacją zastosowania

UHS wykazały zróżnicowane wyniki zależnie od lokalizacji analizowanej strefy skał stropowych. Dla warstw skał stropu zasadniczego można oczekiwać obniżenia średniej gęstości energii, co należy uznać za korzystne ze względu na bieżące prowadzenie robót górniczych. Jednocześnie lokalnie nastąpiło podwyższenie gęstości tej energii, wynikające z odmiennego charakteru uginania się warstw, szczególnie w obszarze, w którym wykonano sztuczne nieciągłości. W warstwach stropu wysokiego nastąpiło podwyższenie średniej gęstości energii z powodu wymuszenia w tej strefie większych deformacji powstałych w wyniku uginania się warstw niższych.

Powyższe obserwacje stanowią niewielki przyczynek do poznania zjawisk, jakie zachodzą w górotworze LGOM poddanych wpływowi eksploatacji i jaki wpływ na te procesy może mieć wykonywanie ukierunkowanego hydroszczelinowania skał. W wykonanych modelach numerycznych nie dokonano symulacji pęknięcia warstw skalnych poddanych uginaniu. Umożliwienie pęknięcia skał w mniejszych pakietach jest zasadniczym celem stosowania UHS, dlatego – obok prób dołowych i obserwacji ruchowych – niezbędne jest prowadzenie dalszych prac modelowych uwzględniających to zjawisko.

Literatura

1. Bodnar A.: Wytrzymałość materiałów. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2004.
2. Makówka J., Myszkowski J.: Wpływ UHS na stan deformacji i naprężeń w górotworze generowanych eksploatacją rudy miedzi systemem filarowo-komorowym. Przegląd Górniczy nr 1/2015