

Krystyna STEC, Wojciech MASNY

Główny Instytut Górnictwa, Katowice

## **Analiza numeryczna dynamicznego oddziaływania wstrząsów górotworu na wyrobisko korytarzowe w zależności od położenia płaszczyzny pęknięcia w ognisku wstrząsu**

### **Słowa kluczowe**

Wstrząs górotworu, mechanizm ogniska, modelowanie numeryczne

### **Streszczenie**

Uzyskiwanie dodatkowych informacji o procesach destrukcji górotworu naruszonego eksploatacją górnictw jest niezwykle istotne dla potencjalnej oceny zagrożenia tąpnięciami w strefach o dużej aktywności sejsmicznej. Artykuł przedstawia wyniki modelowania dynamicznego oddziaływania wstrząsów górotworu na wyrobisko korytarzowe występujących w czasie eksploatacji ściany 3 w kopalni „Bobrek-Centrum”. Przy wykorzystaniu programu FLAC 2D został opracowany model górotworu, w którym do opisu sygnałów dynamicznych wykorzystano pomiary prędkości drgań cząstek górotworu PPV wykonane na stanowiskach znajdujących się w wyrobiskach przyścianowych ściany 3 (dowierzchnia badawcza 3 i 4). Analizowano wstrząsy górotworu o ścinającym mechanizmie ognisk i różnej orientacji płaszczyzny pęknięcia, w efekcie, których zarejestrowane maksymalne prędkości drgań cząstek górotworu od 0,007 m/s do 0,049 m/s, wywołały niewielkie zmiany obrazu stref zniszczonych wokół wyrobiska korytarzowego, małe przyrosty konwergencji pionowej i poziomej oraz małe zmiany wartości naprężeń zredukowanych w kształtowniku odrzwi obudowy podporowej. Ogólnie stwierdzono, że najsilniejsze oddziaływanie na wyrobisko górnicze miały sygnały dynamiczne przyłożone do płaszczyzny pęknięcia położonej pod małym kątem względem stropu wyrobiska górniczego a mniejsze wpływy uzyskano przy zbliżonym do pionowego położeniu płaszczyzny pęknięcia w ognisku.

### **1. Wstęp**

Eksploatacji górnictw w kopalni „Bobrek-Centrum” prowadzonej w latach 2009 – 2010 ściany 3 w pokładzie 503 towarzyszyła bardzo wysoka aktywność sejsmiczna stanowiąca potencjalne duże zagrożenie tąpnięciami. Wystąpiły 104 wstrząsy wysokoenergetyczne o energii  $E \geq 1,0 \text{ E}+05 \text{ J}$ , w tym 98 zjawisk o energii rzędu  $1,0\text{E}+05 \text{ J}$ , 13 o energii rzędu  $1,0\text{E}+06 \text{ J}$ , dwa wstrząsy charakteryzowały się energią rzędu  $1,0\text{E}+07 \text{ J}$  i jeden z energią  $1,0\text{E}+08 \text{ J}$ . Ze względu na tak wysoką aktywność sejsmiczną poznanie jej oddziaływania na wyrobiska górnicze było niezwykle istotne dla potencjalnej oceny zagrożenia tąpnięciami. W sejsmologii górnictw znana jest metoda (badanie mechanizmów wstrząsów przy wykorzystaniu tensora momentu sejsmicznego) pozwalająca na badanie procesów pęknięcia w ogniskach wstrząsów,

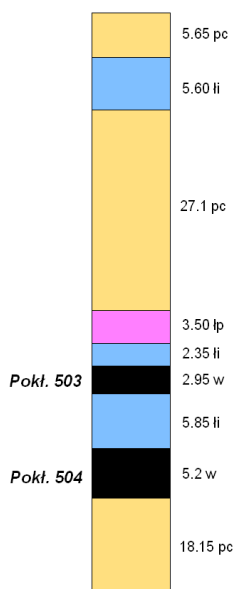
w której jednym z wyników są kątowe parametry płaszczyzny pęknięcia. Procesy dynamiczne zachodzące w górotworze w wyniku oddziaływania wstrząsów wpływają na zmiany naprężeń i deformacji w otoczeniu wyrobisk górniczych. Do określenia tych zmian zastosowano analizę numeryczną wielokrotnie przedstawianą w publikacjach (Majcherczyk i Tajduś 1995, Pilecki 1999, Genis i Gercek 2003, Pilecki i Mutke 2003, Mutke 2007, Masny 2010, Masny i Walentek 2011). W analizie tej uwzględniono położenie płaszczyzn pęknięcia w ogniskach wysokoenergetycznych wstrząsów o energii  $E \geq 1,0 E+05$  J, uzyskane z obliczeń mechanizmu ognisk. Z analizy tej uzyskano trzy grupy wstrząsów, które różniły się głębokością położenia ognisk, ale charakteryzowały się zbliżonymi parametrami rozwiązań mechanizmu w każdej z grup (Stec 2011). Dla kilkunastu wstrząsów o ścinającym mechanizmie ognisk, wykonano modelowanie dynamicznego ich oddziaływania na wyrobisko korytarzowe przy wykorzystaniu programu FLAC 2D. Został opracowany model górotworu, w którym symulowano dynamiczne oddziaływanie impulsu przyłożonego do płaszczyzny utożsamianej z płaszczyzną pęknięcia w ognisku wstrząsu. Podstawę, założonych w modelu parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych warstw skalnych, stanowiły badania laboratoryjne przeprowadzone w Głównym Instytucie Górnictwa. Próbkę pobrane zostały z rdzenia z otworu wiertniczego wykonanego w rejonie badań. Po doprowadzeniu modelu do stanu równowagi oraz wykonaniu obliczeń związanych z fazą statyczną wykonano obliczenia numeryczne, w których występowały dodatkowe obciążenia związane ze zjawiskami dynamicznymi. Do opisu sygnałów dynamicznych wykorzystano rzeczywiste pomiary prędkości drgań cząstek górotworu PPV wykonane na stanowisku w dowierzchniach 3 i 4 badawczej.

## **2. Parametry modelu numerycznego**

Dla analizy zachowania się wyrobisk przyścianowych ściany 3, poddanych wpływom zjawisk dynamicznych, zbudowano model górotworu jako ośrodek ciągły, w płaskim stanie odkształcenia, o wymiarach 50 x 70 m, składający się z 14 000 elementów i podzielony siatką obliczeniową o oczkach 0,5 m x 0,5 m. Dla obliczeń statycznych na krawędziach bocznych przyjęto warunki przemieszczeniowe. Na obu bocznych krawędziach założono zerowe przemieszczenia poziome zaś na dolnej – zerowe przemieszczenia pionowe. Na krawędzi górnej modelu przyłożono dodatkowo naprężenie pionowe o wartości odpowiadającej obciążeniu nadkładu. Ostatecznie w obrębie modelowanego wyrobiska uzyskano pierwotne naprężenie pionowe rzędu 16,9 MPa, co odpowiadało głębokości zalegania pokładu wynoszącej około 675 m. Dla górotworu przyjęto model konstytutywny ośrodka sprężysto-idealnie plastycznego z warunkiem wytrzymałościowym Coulomba-Mohra.

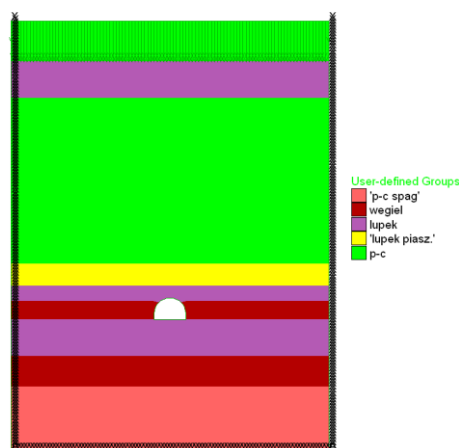
Układ litologiczny warstw skalnych w modelu odpowiadał profilowi otworu wiertniczego B-7, którego wycinek przedstawiono na rys 2.1. Pokład 503 w tym rejonie zalega na głębokości od 640 m na północy i 715 m na południu, posiada miąższość od 2,5 do 3,7 m i nachylony jest w granicach od  $5^{\circ}$  do  $12^{\circ}$  w kierunku S-W. W bezpośrednim stropie pokładu zalega warstwa piaskowca o miąższości około 20 m oraz naprzemianległe warstwy łupku ilastego i piaszczystego z przewarstwieniami piaskowca. Bezpośrednio w spągu pokładu występuje łupek ilasty a następnie 27 m warstwa piaskowca. Parcela ściany 3 znajdowała się w obszarze oddziaływania zaszłości górniczych w postaci krawędzi eksploatacji i resztek pokładów: 418, 419, 501, 507, 509 i 510. Podstawę, założonych w modelu parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych warstw skalnych stanowiły badania laboratoryjne

próbek pobranych z rdzenia wiertniczego, które zostały przeprowadzone w Głównym Instytucie Górnictwa. Widok modelu numerycznego przedstawiono na rysunku 2.2.



**Rys. 2.1.** Profil geologiczny według otworu wiertniczego B-7

**Fig. 2.1.** Fig.2.1. Geological profile at the borehole B-7



**Rys. 2.2.** Model górotworu wraz z wyrobiskiem korytarzowym

**Fig. 2.2.** Model of the rock mass together with mine working

Ze względu na występujący tzw. efekt skali wymiaru (Bukowska i Kidybiński, 2002; Bukowska 2005; Prusek 2008) oraz cech (zmienności) górotworu, które powodują, że istnieje możliwość występowania znacznych różnic w parametrach skał określanych w warunkach laboratoryjnych oraz *in situ*, do obliczenia modułu Younga ( $E$ ) i kąta tarcia wewnętrznego ( $\phi$ ), wykorzystanego w parametryzacji modelu numerycznego, zastosowano zależności zaproponowane w pracy Kalamarasa i Bieniawskiego (1995):

$$\phi = 22 + 0,05 \cdot (GSI + 5) \quad (2.1)$$

$$E = \sqrt{\frac{R_c}{100}} 10^{\frac{GSI-5}{40}} \quad \text{dla } GSI < 65 \quad (2.2)$$

gdzie:

$GSI$  – geologiczny wskaźnik wytrzymałości (*Geological Strength Index*), dla warunków GZW przyjmowano wartości: węgiel – 36, piaskowiec – 60, mułowiec – 55 (Tajduś 2008, Walentek 2010)

$R_c$  – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie określona na podstawie badań laboratoryjnych.

Wartości wytrzymałości na ściskanie  $R_c$  wyznaczone laboratoryjnie, przemnożono przez współczynnik osłabienia strukturalnego wynoszący 0,56, którego zastosowanie do skalowania parametru  $R_c$  w modelowaniu numerycznym podaje Zipf (2006, 2007). Dodatkowo wartości wytrzymałości na rozciąganie  $R_r$ , dobierano w taki sposób, aby stosunek  $R_c/R_r$  był zgodny z wynikami badań laboratoryjnych, zaś wartości spójności  $c$ , kąta tarcia wewnętrznego  $\varphi$  i wytrzymałości  $R_c$  spełniały równanie (FLAC v.6.0 2008):

$$R_c = 2c \tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.3)$$

W tabeli 2.1 przedstawiono zestawienie przyjętych do obliczeń parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych górotworu.

**Tabela 2.1.** Zestawienie parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych górotworu przyjętych w modelu numerycznym

**Table 2.1.** Summary of strength and deformation parameters of rock mass adopted in numerical model

Material	Gęstość objętościowa	Kąt tarcia wewnętrznego	Spójność	Moduł Younga	Wskaźnik Poissona	Wytrzymałość na rozciąganie	Wytrzymałość na ściskanie
	$\rho$	$\varphi$	$c$	$E$	$\nu$	$R_r$	$R_c$
	kg/m <sup>3</sup>	stopnie	MPa	GPa	-	MPa	MPa
Łupek piaszczysty	2690	25,0	7,2	11,2	0,24	2,1	22,5
Łupek ilasty	2600	24,0	6,0	10,0	0,25	1,9	19,2
Piaskowiec	2510	25,3	11,3	18,0	0,27	3,3	35,7
Węgiel	1290	24,0	3,3	3,6	0,24	0,5	15,8
Piaskowiec-spąg	2480	25,3	10,2	18,0	0,28	3,1	32,4

W obliczeniach przyjęto, że obudowę wyrobiska o szerokości 5,0 m i wysokości 3,5 m, stanowić będą odrzwia ŁP9/V29, o parametrach zestawionych w tabeli 2.2.

**Tabela 2.2.** Zestawienie parametrów obudowy ŁP9/V29 przyjętych w modelu numerycznym

**Table 2.2.** Summary of ŁP9/V29 support parameters adopted in numerical model

Wymiar	Pole przekroju poprzecznego kształtownika	Moduł Younga	Moment bezwładności
	<b>A</b>	<b>E</b>	<b>J</b>
<b>m</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>GPa</b>	<b>m<sup>4</sup></b>
5,0 x 3,5	3,7E-03	205	6,0E-06

W pierwszym etapie obliczeń doprowadzono model do stanu równowagi i wykonano obliczenia związane z fazą statyczną. W ociosach wyrobiska otrzymano 2,0 m strefę zniszczeń, a w spągu wyrobiska 1,5 m. W stropie wyrobiska zniszczeniu uległa jedynie cienka – 0,5 m – warstwa bezpośrednio przy obrysie wyrobiska.

Dla tego etapu obliczeń wskaźnik strefy uplastycznionej – IYZ (*Index of Yield Zone*), rozumiany jako stosunek powierzchni przekroju strefy uplastycznionej wokół wyrobiska do jego powierzchni przekroju poprzecznego (Gercek i Genis 1999; Genis i Gercek 2003) wyniósł 1,37. Przemieszczenia stropu wyniosły 11,5 mm, natomiast spągu były większe i wyniosły nieco ponad 18 mm. Zarówno lewy jak i prawy ocios uległ jednakowym przemieszczeniom 7,6 mm. Dokonano również obliczeń naprężeń zredukowanych w kształtowniku odrzwi według hipotezy energii odkształcenia postaciowego, opracowanej przez Hubera, Misesa i Hencky'ego (Szuścik i Kuczyński 1998), według wzoru:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\left(\frac{M_g}{W_x} + \frac{N}{A}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{T}{A}\right)^2} \quad (2.4)$$

gdzie:

$\sigma_{red}$  – naprężenia zredukowane, MPa;

$M_g$  – moment gnący, Nm;

$N$  – siła osiowa, N;

$T$  – siła poprzeczna, N;

$W_x$  – wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie, m<sup>3</sup>;

$A$  – pole przekroju poprzecznego, m<sup>2</sup>.

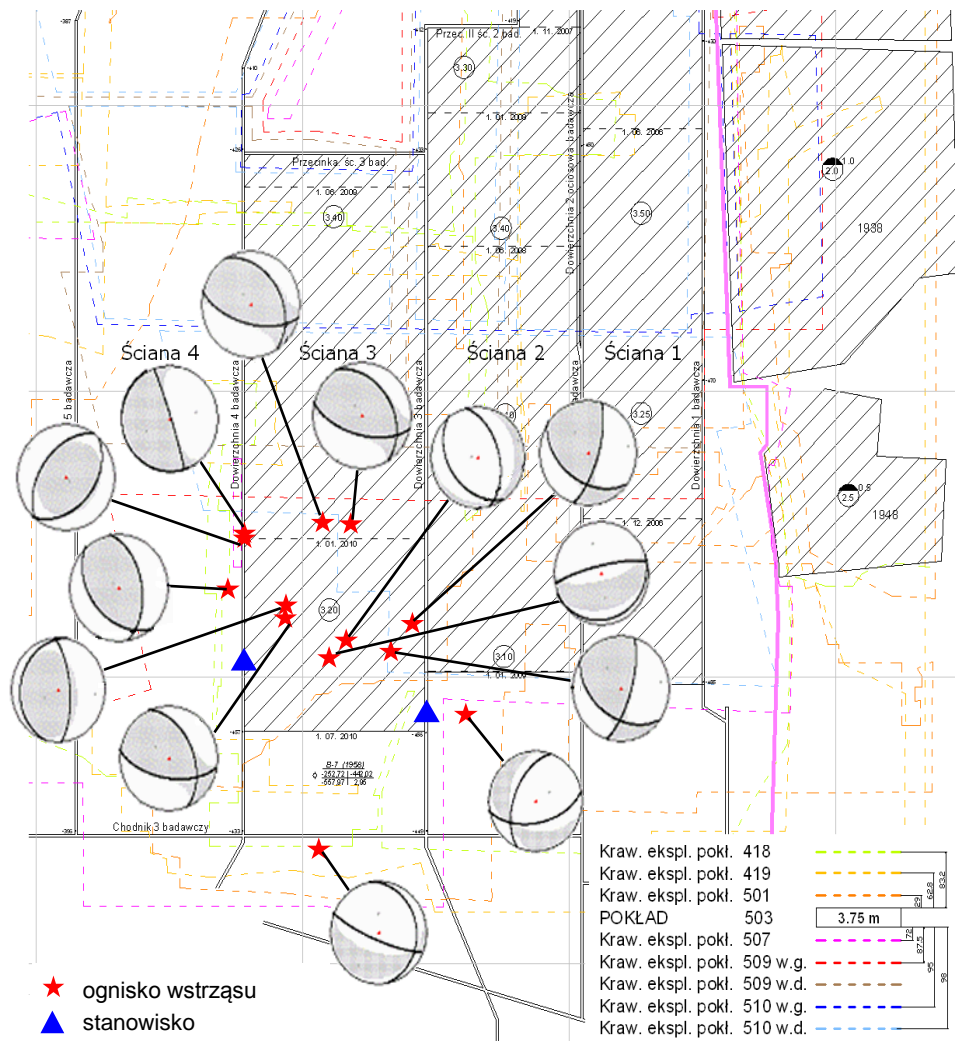
Wartość naprężeń zredukowanych w kształtowniku odrzwi dla fazy statycznej była nie większa niż 126 MPa i nie przekroczyła wartości naprężeń dopuszczalnych  $\sigma_{dop}$ , które dla kształtownika V29 wynoszą: 623,22 MPa (stal o właściwościach mechanicznych wg PN-H-93441-1:2004).

### 3. Mechanizm ognisk wstrząsów

Obciążenia dynamiczne wstrząsów na wyrobiska górnicze zależą od charakteru propagacji fal sejsmicznych wynikającej z procesu pęknięcia w ognisku wstrząsu. Proces ten można określić na podstawie analizy mechanizmu ogniska. Analiza mechanizmu wstrząsów występujących w rejonie ściany 3 eksploatowanej w pokładzie 503 w kopalni „Bobrek-Centrum” wykazała występowanie trzech grup wstrząsów różniących się głębokością występowania ognisk i zbliżonymi parametrami uzyskanych rozwiązań mechanizmu ognisk w każdej z grup (Stec 2011).

Do obliczeń numerycznych z każdej z grup wybrano 13 przykładowych wstrząsów, których lokalizacja i mechanizm ogniska przedstawiony jest na rys. 3.1. W pierwszej grupie (rejon A) najlepsze dopasowanie rozwiązania tzn. najmniejszy błąd wyznaczenia tensora momentu sejsmicznego oraz najwyższy współczynnik jakości rozwiązania, uzyskano dla wstrząsów, których ogniska zostały zlokalizowane około 20 m ( $\pm 20$  m) nad pokładem 503 – zaznaczone symbolem NP w kol. 3 tab. 4.1. Głębokość ta odpowiadała zaleganiu warstwy piaskowca o miąższości około 27 m. Wstrząsy te charakteryzowały się mechanizmem poślizgowym normalnym. Pełny tensor zawierał od 5% do 20% eksplozji, od 10% do 20% składowej

jednoosiowego rozciągania oraz duży udział składowej ścinającej wynoszący od 60% do 85%. Naprężenia ściskania P miały kierunek zbliżony do pionowego a naprężenia rozciągania T były poziome. Dla zdecydowanej większości zjawisk azymuty rozciągłości jednej z płaszczyzn nodalnych były w granicach błędu obliczeń ( $\pm 20^\circ$ ) równoległe do linii frontu eksploatacyjnego a upady wynosiły od  $60^\circ$  do  $80^\circ$ . Poślizgowy typ mechanizmu ognisk, ich położenie za frontem ściany nad pokładem oraz kierunek pęknięcia w ognisku, wskazywały, że aktywność sejsmiczna odzwierciedlała typowe procesy destrukcyjne górotworu, zachodzące wraz z postępem ściany



**Rys. 3.1.** Ogniska analizowanych wstrząsów wraz z ich mechanizmami oraz stanowiska pomiarowe PPV w rejonie ściany 3, pokład 503, kopalnia „Bobrek-Centrum”

**Fig. 3.1.** Focus analyzed tremors along their focal mechanism and measurement stations PPV in the area of the longwall 3, the seam 503, “Bobrek-Centrum” mine

polegające na pękaniu czy też załamywaniu się warstwy piaskowcowej położonej nad pokładem 503.

Drugą grupę stanowiły zjawiska, które lokalizowano około 10±20 m ( $\pm 20$  m) pod pokładem (symbol PP) przed frontem, w rejonie pozostawionych reszek wyeksploatowanych pokładów 507 i 510 (rejon B). Na tej głębokości zalega warstwa piaskowca o miąższości około 20 m. Mechanizmy tych wstrząsów były typu poślizgowego odwróconego. Taki typ pękania w ognisku może zaistnieć przy dominacji naprężeń kompresyjnych skierowanych poziomo i naprężeń rozciągających skierowanych pionowo. Dla tych zjawisk pełny tensor zawierał średnio 12% składowej izotropowej, 14% składowej jednoosiowego rozciągania oraz duży udział składowej ścinającej wynoszącej średnio 76% a dla niektórych wstrząsów prawie 90%. Azymuty płaszczyzn nodalnych dla większości wstrząsów miały kierunek NW-SE a ich upady wynosiły od 40° do 60°. Przyczynę występowania tego typu wstrząsów można wiązać z oddziaływaniem krawędzi występujących w pokładach 507 i 510.

W trzeciej grupie były wstrząsy o energiach powyżej 1,0E+06 J i ogniskach zlokalizowanych na dużej głębokości wynoszącej ponad 300 m w stosunku do eksploatowanego pokładu – symbol PPg. Zjawiska te charakteryzowały się mechanizmem ognisk typu poślizgowego odwróconego. Położenie ognisk wysokoenergetycznych wstrząsów na dużych głębokościach można wytłumaczyć występowaniem nie do końca zrelaksowanych naprężeń tektonicznych. Naruszenie górotworu w tym rejonie przez prowadzoną eksploatację może być mechanizmem uruchamiającym procesy pękania zachodzące w wyężonych warstwach w podłożu w miejscach występujących szczelin, spękań i lokalnych uskoków.

Do obliczeń numerycznych wybrano 13 przykładowych wstrząsów, których lokalizacja i mechanizm ogniska przedstawiony jest na rys. 3.1.

#### 4. Wyniki obliczeń dynamicznego oddziaływania wstrząsów

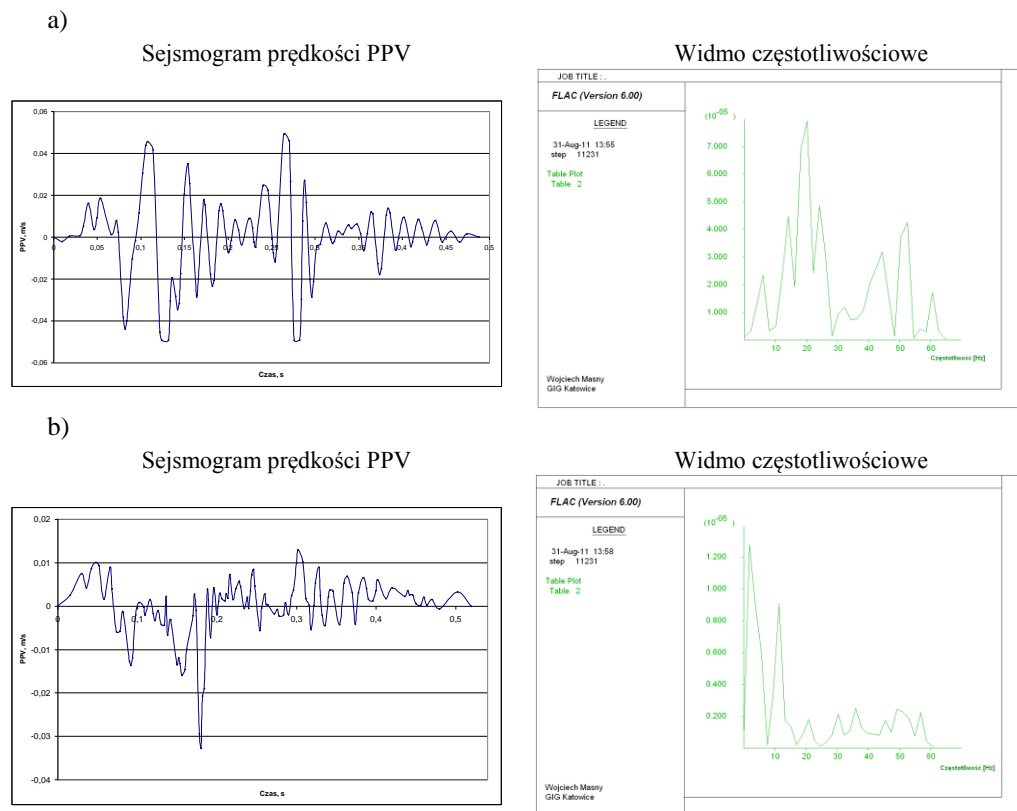
Wyniki obliczeń z fazy statycznej były bazowymi dla kolejnych obliczeń numerycznych z uwzględnieniem obciążeń dynamicznych, w których wprowadzono dodatkowe obciążenia związane ze zjawiskami dynamicznymi – wstrząsami. Do opisu sygnałów dynamicznych wykorzystano rzeczywiste pomiary prędkości drgań cząstek górotworu PPV dla 13 wysokoenergetycznych wstrząsów, wykonane na stanowiskach 3 i 8 znajdujących się w dowierzchni 3 badawczej oraz dowierzchni 4 badawczej (rys. 3.1). Zestawienie wyników obliczeń przedstawione jest w tabeli 4.1. a pełną analizę dla fazy statycznej i dynamicznej przykładowego wstrząsu przedstawiono poniżej.

##### ***Wstrząs z dnia 11.03.2010***

Wstrząs z 11.03.2010 o energii 1,0E+07 J zlokalizowany głęboko pod pokładem 503 charakteryzował się mechanizmem poślizgowym odwróconym. Jako płaszczyznę pękania wybrano płaszczyznę nodalną o upadzie 47°. Przebieg czasowy PPV zarejestrowany na stanowiskach 3 i 8 oraz widmo częstotliwościowe sygnałów przedstawiono na rysunkach 4.1a i b. Na stanowisku 3 wartości PPV wynosiły 0,049 m/s a częstotliwości dominujące około 20 Hz a na stanowisku 8 wartości PPV wynosiły 0,033 m/s a częstotliwości dominujące były niższe i wynosiły około 10 Hz.

Ze względu na fakt, że źródło wstrząsu zlokalizowane było około 400 m pod pokładem 503, zaś moc obliczeniowa stosowanego sprzętu komputerowego nie pozwalała na budowanie

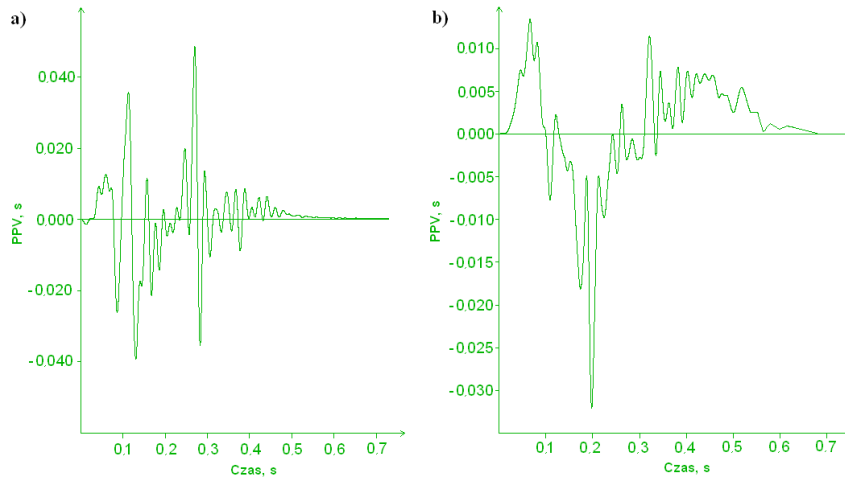
modeli o tak znacznych rozmiarach, dokonano założenia, że sygnał dynamiczny podczas obliczeń numerycznych, przyłożony został w warstwie piaskowca zalegającego w spągu pokładu 503. Podstawowym celem było jednak, aby w miejscu pomiaru wartości PPV w warunkach *in-situ* tj. w odległości około 1,0 m nad wyrobiskiem oraz w modelu numerycznym w tym samym miejscu, maksymalne wartości PPV przyjmowały jednakowe wartości. Założenie to zostało spełnione poprzez odpowiednią multiplikację sygnału wejściowego. Na rysunku 4.2 przedstawiono sejsmogramy prędkości PPV zarejestrowane w modelu numerycznym, natomiast na rysunku 4.3 model obliczeniowy wraz z zaznaczoną płaszczyzną pęknięcia oraz punktem kalibracyjnym.



**Rys. 4.1.** Sejsmogram prędkości PPV i widmo częstotliwościowe wstrząsu z 11.03.2010 o energii  $1,0E+07$ : a) stanowisko 3, b) stanowisko 8

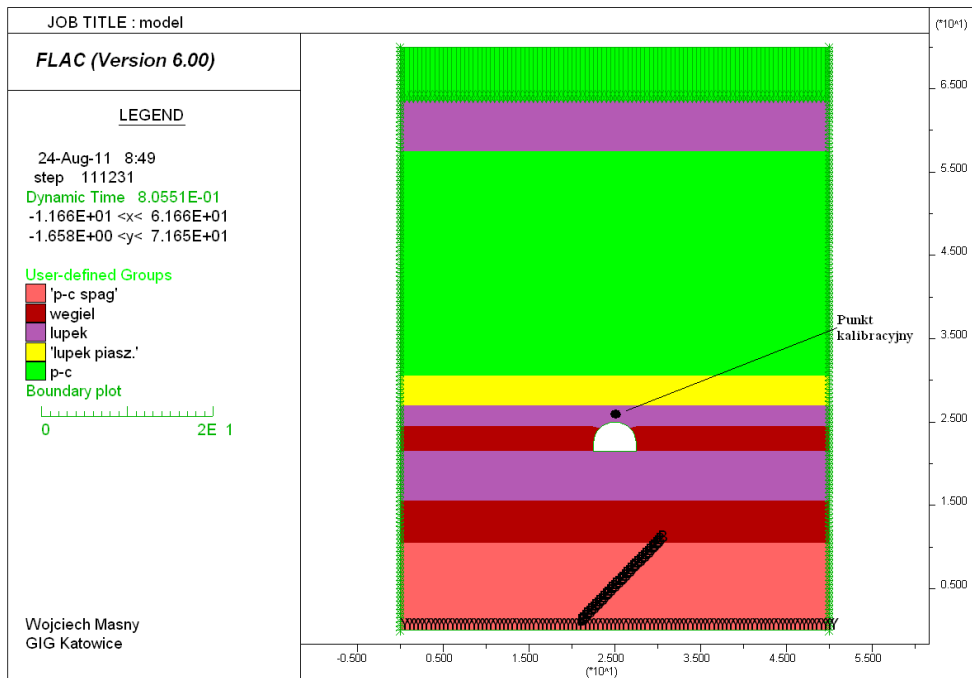
**Fig. 4.1.** Velocity seismogram PPV and frequency spectrum of the tremors at 03/11/2010 of energy  $1,0E+07$  J: a) station 3, b) station 8





**Rys. 4.2.** Sejsmogram prędkości PPV wstrząsu z 11.03.2010 zarejestrowane w modelu numerycznym: a) stanowisko 3, b) stanowisko 8

**Fig. 4.2.** Velocity seismogram PPV of the tremors at 03/11/2010 recorded in numerical model: a) station 3, b) station 8

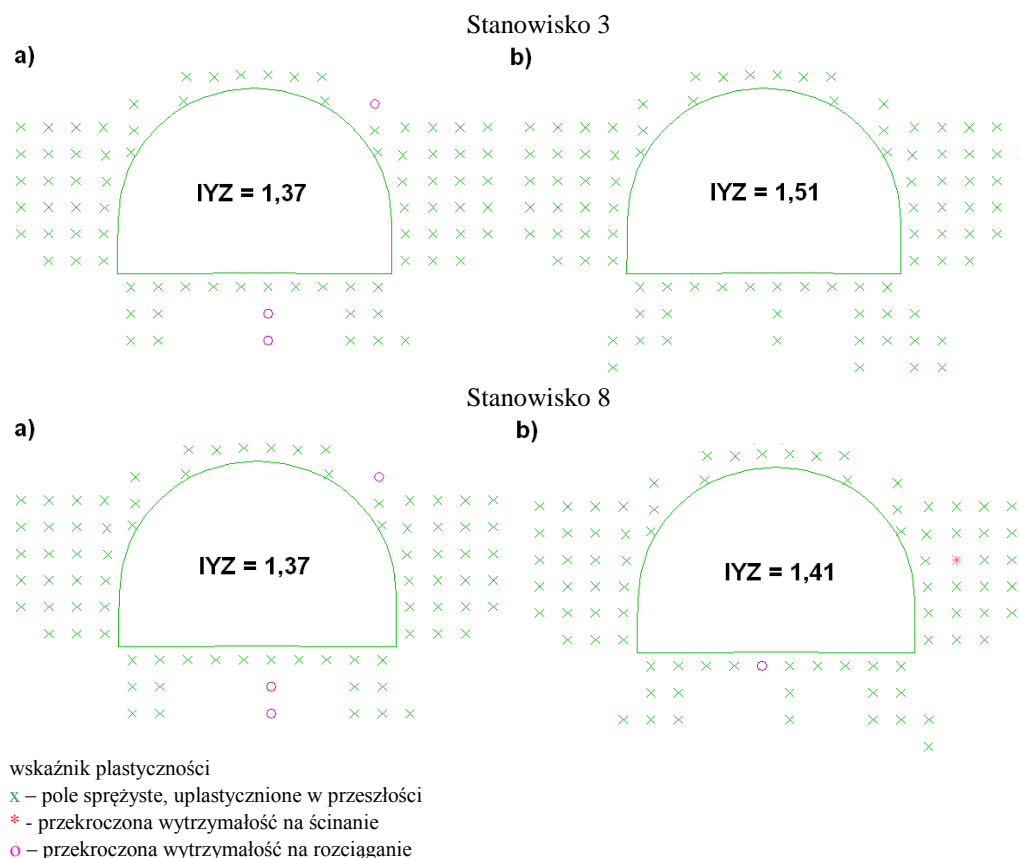


**Rys. 4.3.** Model numeryczny z zaznaczoną płaszczyzną pęknięcia i punktem kalibracyjnym

**Fig. 4.3.** Numerical model with marked plane of fracture and calibration point

Ponadto przyjęto założenia, że sygnał źródłowy, przykładany był zarówno dla składowej pionowej jak i poziomej, w założonej płaszczyźnie pęknięcia, obliczenia prowadzono w czasie 1,0 s z tym, że w niektórych przypadkach wskutek braku istotnych zmian w modelu, obliczenia kończone były przez program FLAC nieco wcześniej. Dodatkowo wprowadzono w modelu 5% tłumienie Rayleigha dla częstotliwości 20 Hz, które określono na podstawie obserwacji zachowania się modelu.

Na rysunku 4.4 przedstawiono zmiany powstałe w strefie zniszczenia wokół wyrobiska w stosunku do fazy obliczeń statycznych. Strefa spękań powiększyła się głównie w spągu wyrobiska, na co wskazuje wskaźnik stref uplastycznionych (IYZ = 1,51), który powiększył się o ponad 10% w stosunku do fazy obliczeń statycznych. W modelu numerycznym zarejestrowano również niewielkie, rzędu 1,0 mm, przemieszczenia stropu spągu i ociosów oraz ponad 2% przyrost naprężeń w kształtowniku odrzwi.



**Rys. 4.4.** Strefa zniszczenia wokół wyrobiska korytarzowego: (a) faza obliczeń statycznych, (b) faza po wstrząsie o energii 1,0E+07 J

**Fig. 4.4.** Fracture zone around the mine workings: (a) phase of the static calculation, (b) phase after the tremor of energy 1,0E+07 J

Jak można zauważyć, na podstawie wyników obliczeń zaprezentowanych w tabeli 4.1 wstrząsy górotworu, w efekcie, których zarejestrowano maksymalne prędkości drgań cząstek górotworu od 0,0065 m/s do 0,049 m/s, wywołały niewielkie zmiany obrazu stref zniszczonych wokół wyrobiska korytarzowego, małe przyrosty konwergencji pionowej i poziomej oraz małe zmiany wartości naprężeń zredukowanych w kształtowniku odrzwi obudowy podporowej.

Wyjątek stanowi tu jedynie wstrząs z dnia 17.04.2010, w efekcie, którego zarejestrowano w warunkach *in situ* wartości PPV – 0,13 m/s, co spowodowało niemal 28% wzrost wartości wskaźnika stref uplastycznionych (IYZ) oraz ponad 17% wzrost naprężeń zredukowanych w kształtowniku odrzwi w stosunku do fazy obliczeń statycznych.

**Tabela 4.1.** Zestawienie wyników obliczeń numerycznych dla analizy dynamicznej  
**Table 4.1.** Summary of numerical calculation results for the dynamic analysis

Data r-m-dz Czas h:m:s	Energia, J	Uwagi*	Upad płaszczysty pęknięcia, °	Rejon/Grupa typ mechanizmu	PPV, m/s	Naprężenia zredukowane, MPa	Konwergencja pionowa, mm	Konwergencja pozioma, mm	IYZ	Stanowisko
2010-01-26 15:35:16	9,0E+05	80 PF 20 PP	86	B/II RE	0,014	125	0,0	0,2	1,37	3
					0,017	124	0,3	0,3	1,37	8
2010-02-04 16:37:32	5,0E+06	90 PF 450 Pg	50	B/III RE	0,021	126	0,1	0,1	1,37	3
					0,024	124	0,7	0,6	1,41	8
2010-02-05 11:59:14	1,0E+07	110 PF 300 Pg	62	B/II RE	0,049	131	0,6	0,8	1,47	3
					0,033	129	0,3	0,6	1,42	8
2010-02-12 3:52:39	2,0E+06	120 PF 400 Pg	60	B/III RE	0,049	134	0,5	0,5	1,42	3
					0,033	126	0,3	0,3	1,41	8
2010-02-19 9:32:38	8,0E+05	5 ZF 10 NP	66	A/I NO	0,008	126	0,0	0,0	1,37	3
					0,02	124	0,3	0,4	1,37	8
2010-02-19 18:27:34	5,0E+06	110 PF 400 Pg	49	B/III RE	0,049	132	1,2	1,1	1,51	3
					0,014	126	0,2	0,0	1,37	8
2010-03-02 0:06:38	8,0E+06	20 PF 200 Pg	60	B/III RE	0,040	125	0,4	0,4	1,41	3
					0,024	124	1,1	1,6	1,42	8
2010-03-04 20:24:02	8,0E+05	60 PF 100 PP	80	B/II RE	0,049	134	0,6	0,7	1,41	3
					0,014	128	0,2	0,1	1,37	8
2010-03-06 12:11:45	9,0E+05	10 ZF 50 PP	68	B/II RE	0,038	124	1,8	3,5	1,41	3
					0,024	125	0,4	0,4	1,41	8
2010-03-11 1:07:16	1,0E+07	30 PF 400 Pg	52	B/III RE	0,049	129	1,2	1,0	1,51	3
					0,033	125	0,9	1,1	1,41	8
2010-03-12	7,0E+05	50 PF	77	B/II	0,049	131	2,7	6,4	1,44	3

13:50:00		100 PP		RE	0,016	124	0,3	0,3	1,37	8
2010-03-18	3,0E+05	400 PF	78	A/I	0,007	126	0,0	0,0	1,37	3
21:55:07		20 NP		NO	0,004	126	0,0	0,0	1,37	8
2010-04-17	2,0E+06	110 ZF	54	A/I	0,13	148	3,4	2,1	1,76	3
15:03:41		50 PP		NO	0,057	125	0,2	0,2	1,37	8

Oznaczenia w tabeli 4.1:

\*Uwagi: położenie ogniska np. 60 – odległość od frontu, ZF – ognisko za frontem, PF – ognisko przed frontem, NP – ognisko nad pokładem, PP – ognisko pod pokładem, PPg – ognisko głęboko pod pokładem,

Płaszczyzna pękania:  $\delta$  – upad płaszczyzny,

PPV – prędkość drgań cząstek górotworu,

NO – mechanizm ogniska poślizgowy normalny,

RE – mechanizm ogniska poślizgowy odwrócony,

IYZ - strefy uplastycznionej – IYZ (Index of Yield Zone)

## 5. Podsumowanie

Przy oszacowaniu obciążeń dynamicznych na wyrobiska górnicze istotne jest poznanie charakteru propagacji fal sejsmicznych dla różnych modeli ognisk wstrząsów. Zamodelowanie propagacji pola falowego pozwala na zrozumienie różnicy w dynamice drgań w różnych fragmentach górotworu. Zaobserwowano, że analizowane wstrząsy o zbliżonej energii i z tego samego rejonu charakteryzowały się zróżnicowanymi wartościami maksymalnej prędkości drgań cząstek górotworu PPV na stanowiskach pomiarowych.

Ogólnie stwierdzono, że większe oddziaływanie na wyrobiska górnicze miał sygnał dynamiczny pochodzący od płaszczyzny pękania położonej pod mniejszym kątem względem stropu wyrobiska górniczego. Związane to jest ze sposobem radiacji sejsmicznej dla poślizgowego modelu ogniska.

Pomimo wstępnych wyników, metoda analizy numerycznej wykorzystująca położenie płaszczyzny pękania w ognisku może się przyczynić do pełniejszego wykorzystania metody sejsmologicznej w ocenie zagrożenia tąpnięciami, ze względu na uzyskanie dodatkowej informacji w określeniu stateczności wyrobiska górniczego, które poddane jest oddziaływaniu dynamicznemu wstrząsów górotworu.

## Literatura

- [1] Bukowska M. 2005: Prognozowanie skłonności do tąpnięć górotworu metodą wskaźnikowej oceny geologiczno-geomechanicznej w warunkach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Prace Naukowe GIG nr 866, 88-95.
- [2] Bukowska M., Kidybiński A. 2002: Wpływ czynników naturalnych masywu skalnego na jego wytrzymałość określaną metodami penetrometryczną i laboratoryjną. Prace Naukowe GIG, seria Górnictwo i Środowisko nr 1, 35-46.
- [3] FLAC v.6.0 2008: User's Guide. Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- [4] Genis M., Gercek H. 2003: A numerical study of seismic damage to deep underground openings. ISRM 2003 - Technology Roadmap for Rock Mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 351-355.

- [5] Gercek H., Genis M. 1999: Effect of anisotropic in situ stresses on the stability of underground opening. Proc. of the 9<sup>th</sup> Int. Congress on Rock Mechanics, ISRM Rotterdam, Balkema, vol. 1, 367-370.
- [6] Kalamaras G. S., Bieniawski Z. T. 1995: A Rock Mass Strength Concept for Coal Seams Incorporating the Effect of Time. Proc. of 8th ISRM Congress, Tokio.
- [7] Majcherczyk T. Tajduś A. 1995: Numeryczny model dynamicznego obciążenia obudowy kotwiowej. Prace Naukowe GIG, seria konferencje nr 1, 7-28.
- [8] Masny W. 2010: Dynamiczne oddziaływanie wstrząsów górotworu na obudowę wyrobisk korytarzowych. Praca doktorska, GIG Katowice, (praca niepublikowana)
- [9] Masny W., Walentek A. 2011: Numerical Analysis of Dynamic Impact of Rock Mass Tremors on Mine Roadways Support. 30th International Conference on Ground Control in Mining. USA, Morgantown, July 2011, 192-200.
- [10] Mutke G. 2007: Charakterystyka drgań wywołanych wstrząsami górnictwymi w odległościach bliskich źródła sejsmicznego w aspekcie oceny zagrożenia tąpnięciem. Prace Naukowe GIG nr 87.
- [11] Mutke G. 2011: Ocena stopnia potencjalnego zagrożenia stateczności wyrobisk trzyścianowych poddanych oddziaływaniu wstrząsów górotworu. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Górnictwo i Środowisko”, Prace Naukowe GIG, Kwartalnik Górnictwo i Środowisko, nr 4/2/2011, 327-335.
- [12] Pilecki Z. 1999: Dynamic analysis of mining tremor impact on excavation FLAC. Symp on Numerical Modeling in Geomechanics. Detournay & Hart (eds) Rotterdam, AA. Balkema, 397-400.
- [13] Pilecki Z., Mutke G. 2003: Oddziaływanie wstrząsu górnictwowego w strefie bliskiego pola falowego na wyrobisko górnictwowe – analiza numeryczna. X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Tapania 2003 nt. Problemy koncentracji eksploatacji w warunkach zagrożenia tąpnięciami i metanem. Wyd. GIG Katowice, 223-232.
- [14] PN-H-93441-1:2004. Kształtowniki stalowe walcowane na gorąco dla górnictwa – Część 1: Ogólne wymagania i badania.
- [15] Prusek S. 2008: Metody prognozowania deformacji chodników przyścianowych w strefach wpływu eksploatacji z zawałem stropu. Prace Naukowe GIG nr 874.
- [16] Stec K. 2011: Informatywność metody określenia mechanizmu ognisk wstrząsów w przybliżeniu procesów destrukcji górotworu, Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko nr 4/2/2011, 439-540.
- [17] Szuścik W., Kuczyński J. 1998: Wytrzymałość materiałów. Mechanika modelu ciała odkształcalnego i ciała rzeczywistego – Część 1. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [18] Tajduś K. 2008: Określanie wartości parametrów odkształceniowych górotworu uwarstwowionego w rejonie wpływów eksploatacji górnictwowej. Praca doktorska, AGH, Kraków, (praca niepublikowana).
- [19] Walentek A. 2010: Oddziaływanie frontu eksploatacji na zasięg strefy spękań wokół chodników przyścianowych. Prace Naukowe GIG, Kwartalnik Nr 2/1. 315-329.
- [20] Zipf R. K. 2006: Numerical Modeling Procedures for Practical Coal Mine Design. Proc. of the 41<sup>st</sup> U.S. Rock Mechanics Symposium, Golden, Colorado, 1-11.
- [21] Zipf R. K. 2007: Failure mechanics of multiple-seam mining interactions. Proc.: New Technology for Ground Control in Multiple-seam Mining, Mark C. & Tuchman R.J. (ed.), NIOSH, Pittsburgh, USA, 73-88.

*Niniejszy artykuł jest wynikiem projektu badawczego własnego MNiSW 3608/B/T02/2010/38 realizowanego w Głównym Instytucie Górnictwa w latach 2010-2013.*

## **Numerical analysis of the dynamic influence of seismic tremors on mine workings depending to the location of focal plane**

### Key words

Seismic tremors, focal mechanism, numerical modeling

### Summary

Getting more information about the processes of destruction of the rock mass disturbed by mining extraction is essential for assessing the potential risk of rockbursts in areas of high seismic activity. This paper presents the results of the influence dynamic modeling of tremors on mine workings that occurred during the exploitation of coal seams 503 in "Bobrek-Centrum" Mine, done by longwall 3. Using the FLAC 2D programme, a rock mass model has been worked out, in which to describe the dynamic impulse used actual measurements of rock mass particle velocity PPV set out in the excavation longwall 3 (the research gallery 3 and 4). The calculations were performed for the tremors characterized by a shearing focus mechanism and different orientations of focal plane. As a result, the analyzed tremors recorded peak particle velocity of the rock mass from 0.0065 m/s to 0.049 m/s, caused slight changes in the fracture zone around mine workings, small increments of vertical and horizontal convergence and the value of reduced stresses in the frame section of yielding arch support.

Overall, it was found that the strongest influence on the mine working had the dynamic impulse applied to the cracking plane situated at a small angle towards the roof of the mine working and the smaller influence were obtained at close to a vertical position in the focal plane on the focus.

*Przekazano: 4 kwietnia 2012 r.*