

Józef DUBIŃSKI

Robert SIATA

Główny Instytut Górnictwa, Katowice

## SZCZEGÓŁOWE ROZPOZNANIE BUDOWY GEOLOGICZNEJ POKŁADÓW WĘGLA METODĄ SEJSMICZNĄ

**Streszczenie.** Metoda sejsmiczna umożliwia szczegółowe rozpoznanie budowy geologicznej pokładu węgla. Dwa podstawowe jej warianty to metoda fal przechodzących i metoda fal odbitych. Pierwsza umożliwia badanie wymyć. Do badania uskoków potrzebne jest ich połączenie. Możliwe jest wyznaczenie przebiegu uskoku i oszacowanie jego zrzutu. W artykule przedstawiono przykładowe rezultaty badań sejsmicznych w pokładach węgla.

## DETAILED STUDY OF THE COAL SEAMS GEOLOGICAL STRUCTURE USING SEISMIC METHOD

**Summary.** Such geologic disturbances, in coal seam, as faults and pinches can be detected by seismic method. The two basic field techniques are transmission and reflection surveys. Pinches can be studied using transmission survey. For the faults both methods have to be used. We can find location of the faults and at a rough estimate of their throws. In the paper the results of some in-seam seismic surveys are presented.

### 1. Wprowadzenie

Metoda sejsmiczna jest szeroko stosowaną w polskim górnictwie węgla kamiennego metodą geofizyczną. Znalazła zastosowanie, między innymi, przy:

- wyznaczaniu stref wzmożonych naprężeń,
- określaniu parametrów eksploatacji odprężającej,

- ocenie efektywności stosowanej profilaktyki tapaniowej,
- rozpoznawaniu zaburzeń geologicznych pokładów węgla.

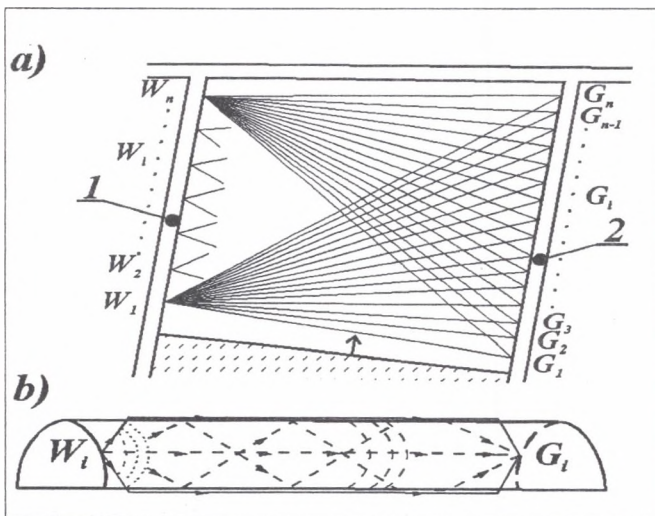
Rozpoznanie budowy geologicznej złoża uzyskiwane techniką sejsmiczną umożliwia:

- szacowanie wielkości zrzutu uskoków,
- określanie przebiegów uskoków,
- wyznaczanie zasięgu i wielkości wymyć oraz zmian miąższości pokładów węgla.

## 2. Podstawy metodologiczne

### 2.1. Metoda fal przechodzących

Metoda polega na wzbudzeniu fali sejsmicznej propagującej w górotworze za pomocą małych ładunków materiału wybuchowego i rejestracji drgań, które są zapisywane cyfrowo w postaci sejsmogramów [5]. W wyniku odpowiedniego rozmieszczenia punktów wzbudzenia i odbioru uzyskuje się siatkę promieni sejsmicznych pokrywającą badany obszar pokładu węgla. Schemat pomiarowy przedstawiony jest na rys. 1.



Rys.1. Schemat dołowych pomiarów sejsmicznych realizowanych techniką przesświetlań między wyrobiskami górnymi

Fig.1. Schematic diagram of the underground seismic measurements using the seismic transmission tomography technique between workings

Uzyskany materiał pomiarowy po selekcji tras sejsmicznych i ich wstępnym oczyszczeniu z niepożądanych sygnałów jest następnie przetwarzany z wykorzystaniem nowoczesnych technik cyfrowej obróbki sygnału [4]. Do podstawowych procedur należą:

- analiza częstotliwościowa i filtracja, eliminujące zakłócenia poszczególnych tras sejsmicznych,
- rotacja składowych (w przypadku tras wieloskładowych),
- filtracja polaryzacyjna,
- analiza dyspersyjna.

Rotacja składowych polega na rozłożeniu sygnału sejsmicznego na składową równoległą i prostopadłą do kierunku rozchodzenia się promienia sejsmicznego, w celu uwidocznienia cech fal podłużnych i poprzecznych. Operacja ta jest niezbędna dla analizy i filtracji polaryzacyjnej tras sejsmicznych. Analiza ta, mająca na celu bardziej jednoznaczną identyfikację różnych grup falowych na sejsmogramach, umożliwia wyznaczenie współczynnika prostoliniowości i kąta polaryzacji na podstawie zarejestrowanych dwóch składowych kierunkowych. Analiza dyspersyjna polega na określeniu krzywych dyspersji fali kanałowej, obrazujących zmienność prędkości rozchodzenia się tych fal w funkcji ich częstotliwości. Wszystkie te procedury mają za zadanie poprawić jakość i efektywność interpretacji prowadzonych badań sejsmicznych.

Proces interpretacyjny<sup>4</sup> w przypadku prześwietlań sejsmicznych zawiera dwa charakterystyczne dla prac sejsmicznych etapy [2, 5]:

- identyfikację poszczególnych typów fal sejsmicznych, rejestrowanych na sejsmogramach oraz określenie czasów ich przebiegu oraz amplitudy wzdłuż poszczególnych promieni sejsmicznych,
- wyznaczenie rozkładu prędkości i współczynnika tłumienia amplitudy dla wydzielonej grupy fal sejsmicznych przy pomocy realizowanych komputerowo technik obliczeniowych.

Wyznaczenie to jest najczęściej realizowane według metodyki algebraicznej rekonstrukcji tomograficznej pola prędkości lub pola tłumienia w badanej parceli eksploatowanej lub projektowanej ściany. Metodyka ta oparta jest na iteracyjnym rozwiązaniu nadmiarowego układu równań minimalizującym różnice pomiędzy zmierzonymi a teoretycznymi wartościami takich parametrów wejściowych jak czas przebiegu lub spadek amplitudy fali na trasie punkt wzbudzenia-punkt odbioru.

W kinematycznym wariacie metody sejsmicznej zależność pomiędzy prędkością propagacji a całkowitym czasem przebiegu fali sejsmicznej opisuje wzór [1]:

$$t_k = \int_{R_k} \frac{da}{v(x, y)} \quad (1)$$

gdzie:

$t_k$  - czas przebiegu  $k$ -tego promienia sejsmicznego,

$v(x, y)$  - prędkość w ośrodku w płaszczyźnie  $x, y$ ,

$da$  - element drogi całkowania,

$R_k$  - droga całkowania wzdłuż promienia  $k$ .

Wariant dynamiczny metody sejsmicznej wykorzystuje zależność pomiędzy współczynnikiem tłumienia a stosunkiem amplitudy (energii) zarejestrowanej w danym punkcie pomiarowym do amplitudy w punkcie wzbudzenia fali sejsmicznej (tzw. amplituda/energia odniesienia) [1]:

$$\ln(a_k/a_0) = \int_{R_k} -\alpha(x, y) da \quad (2)$$

gdzie:

$a_k$  - wartość amplitudy zarejestrowanej na  $k$ -tej trasie sejsmicznej,

$a_0$  - wartość amplitudy odniesienia,

$\alpha(x, y)$  - współczynnik tłumienia w ośrodku w płaszczyźnie  $x, y$ ,

$da$  - element drogi całkowania,

$R_k$  - droga całkowania wzdłuż promienia  $k$ .

W praktyce rekonstrukcję tomograficzną rozkładu parametrów sejsmicznych prowadzi się zwykle dla każdej, charakterystycznej grupy falowej wydzielonej na sejsmogramach (fale bezpośrednie P i S; fale refrakcyjne P i S; fale kanałowe).

Wyniki algebraicznej rekonstrukcji pola prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych przedstawione są w formie map izolinii rozkładu mierzonego parametru w prześwietlanej partii górotworu. Stanowią one podstawę dla wydzielania na nich stref anomalnych, które związane są z różnymi formami geologicznymi zaburzającymi strukturę pokładu węgla, oraz dla jakościowej i ilościowej klasyfikacji badanego ośrodka skalnego, w tym pokładu węgla.

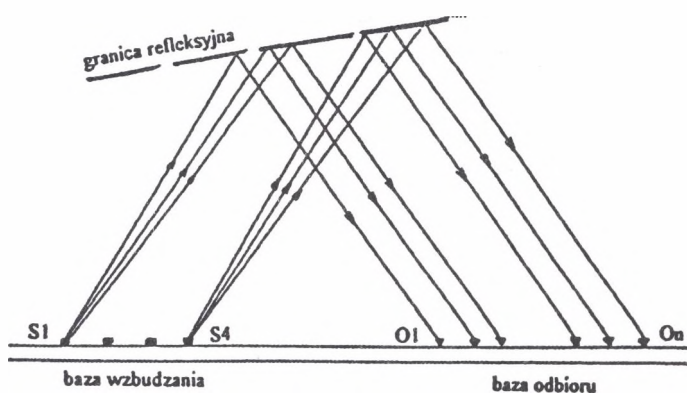
Ponadto, w metodyce sejsmicznych prześwietlań między wyrobiskami, które są ukierunkowane na rozpoznanie budowy geologicznej pokładu węgla, wykorzystuje się także specyficzne zjawisko częściowego lub całkowitego wytłumienia fali kanałowej. Obserwuje się wówczas brak przejścia lub spadek amplitud tej grupy falowej, spowodowane genetycznym

jej związkami z pokładem węgla. Tak więc przerwanie ciągłości struktury pokładu lub jej osłabienie znajduje wyraźne odzwierciedlenie w rejestrowanym obrazie fal kanałowych.

## 2.2. Pomiarów metodą fal odbitych przebiegu stref uskokowych

Technika refleksyjna jest stosowana w podziemnych badaniach sejsmicznych wyłącznie do rozwiązywania specyficznych problemów geologicznych, a w szczególności do detekcji zaburzeń uskokowych, rzadziej wymyć i ścianień pokładu węgla. Do zjawiska odbicia fali sejsmicznej dochodzi na granicy dwóch ośrodków różniących się twardością akustyczną  $Z$  ( $Z = \rho \cdot v$ ; gdzie  $\rho$  - gęstość ośrodka,  $v$  - prędkość rozchodzenia się fali sejsmicznej). Tak więc powstający kontakt pokładu węgla ze skałami otaczającymi w wyniku zaburzenia ciągłości struktury pokładu tworzy płaszczyznę odbijającą fale sejsmiczne.

Metodyka pomiarowa charakteryzuje się tym, że odbiorniki drgań i punkty ich wzbudzenia znajdują się w tym samym wyrobisku górniczym, przy czym baza punktów wzbudzenia jest odsunięta od bazy punktów odbioru o odpowiednio dobrany interwał odległości, zależny od przypuszczalnej odległości płaszczyzny odbijającej od wyrobiska pomiarowego. Schemat pomiarowy przedstawia rys.2.



Rys.2. Schemat dołowych pomiarów sejsmicznych realizowanych techniką refleksyjną  
Fig.2. Schematic diagram of the underground seismic measurements using the seismic reflection method

W przypadku tej techniki badań sejsmicznych informacja użyteczna jest zawarta w grupie fal odbitych, stąd techniki przetwarzania sygnału ukierunkowane są na jej wzmocnienie w celu dokładnej identyfikacji.

Grupą falową szczególnie predysponowaną do wykorzystania w sejsmicznych badaniach dołowych prowadzonych techniką refleksyjną, dla rozwiązywania zadań geologicznych, jest

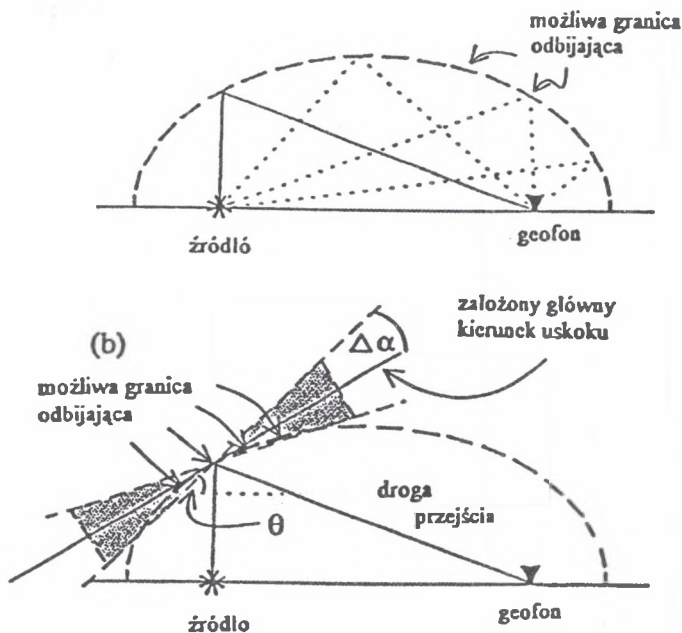
z uwagi na swoje właściwości wspomniana już grupa fal kanałowych. Preferowaną falą jest fala kanałowa typu Love'a o polaryzacji SH. Zaburzenie pokładu w formie uskoku zaznacza się w obrazie falowym w sposób zróżnicowany, zależny od jego wielkości i powoduje:

- wytłumienie części lub całości energii propagującej w postaci przechodzących fal pokładowych,
- powstanie fal odbitych,
- powstanie fal dyfrakcyjnych,
- generacje wtórnych fal typu pokładowego.

Proces interpretacyjny wykorzystujący fale odbite polega na wyznaczeniu przebiegu granicy odbijającej, jaką tworzy najczęściej strefa uskoku. Stosowane są w tym zakresie następujące techniki interpretacyjne:

- składania obwiedni sejsmogramów,
- dynamicznego sumowania tras sejsmicznych,
- sumowania opóźnień.

Na rys.3 przedstawiono najczęściej stosowane w praktyce schematy wyznaczania granicy odbijającej z zastosowaniem techniki sumowania opóźnień.



Rys.3. Schemat wyznaczania położenia granicy odbijającej: a – eliptyczna metoda sumy opoznień (ELS), b – adaptacyjna metoda sumy opóźnień (ALS)

Fig.3. Schematic diagram for determination the location of the reflecting horizon  
a – elliptical method of a delay sum (ELS – elliptical lag sum),  
b – adaptive method of a delay sum (ALS – adaptive lag sum)

Istota postępowania jest tutaj podobna do procedury migracji sumowania opartej na operatorze Kirchoffa-Huygensa [3, 6]. Proces sumowania prowadzony jest w pełnym obszarze przestrzeni i czasu w oparciu o następującą relację:

$$I(x,y) = \left| \sum_{n=1}^N s_n(t_n) \exp \left( i \omega_c \left( 1 - \frac{U}{C} \right) t_n \right) \right|^2 \quad (3)$$

gdzie :

- $I(x,y)$  - nieznormalizowane prawdopodobieństwo wystąpienia w celi współrzędnych  $x$  i  $y$  źródła emisji sejsmicznej ,
- $U, C$  - prędkość grupowa i fazowa paczki falowej o częstotliwości środkowej pasma  $\omega_c$ ,
- $s_n(t_n)$  - amplituda sygnału,
- $t_n$  - czas przebiegu fali sejsmicznej na drodze punkt wzbudzenia - element badany - punkt odbioru.

Wyróżnia się eliptyczną (ELS) – rys.3a - i radialną (RLS) sumę opóźnień. W sytuacji gdy dysponuje się dodatkową informacją o położeniu zaburzenia, najczęściej o jego kierunku, rozwiązanie jest ograniczone do pewnego zakresu kątów i metoda nazywa się wówczas adaptacyjną metodą sumy opóźnień (ALS) – rys.3b.

Wyniki wyznaczania granicy odbijającej przedstawia się w postaci odcinków odwziewiedlających położenie tzw. reflektorów. W przypadku wyraźnej granicy odbijającej wykazują one dobrą korelację położenia, co potwierdza istnienie zaburzenia ciągłości badanego pokładu węgla.

### 3. Ograniczenia stosowania metody sejsmicznej

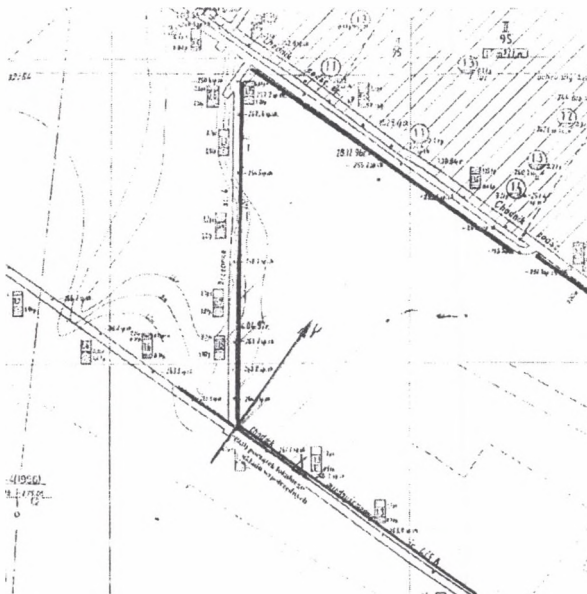
Metoda sejsmiczna stosowana w warunkach górnictwa posiada pewne ograniczenia wynikające z konieczności istnienia odpowiedniej liczby wyrobisk górnictwa wokół obszaru badanego pokładu węgla oraz zasięgu penetracji fal sejsmicznych rzędu kilkuset metrów, zależnego od lokalnych warunków geologiczno-górnictwa. Ograniczenia i przyczyny powstających w związku z tym błędów interpretacyjnych przy stosowaniu metody sejsmicznej można przypisać następującym czynnikom:

- schematy pomiarowe ograniczone przez liczbę i wzajemne położenie wyrobisk górniczych,
- nakładanie się różnego typu zaburzeń geologicznych,
- amplituda zaburzenia geologicznego zbyt duża w stosunku do obszaru objętego badaniami,
- mała liczba kanałów aparatury sejsmicznej,
- zmiany źródła sygnału sejsmicznego.

## 4. Przykłady sejsmicznego rozpoznania geologicznego pokładów węgla

### 4.1. Badanie zasięgu wymycia pokładu 416 w KWK Polska-Wirek

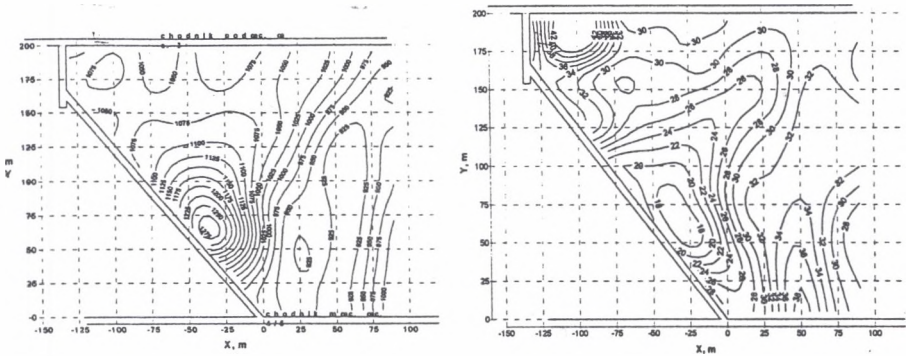
Pomiary sejsmiczne zostały wykonywane w parceli projektowanej ściany 4B w pokładzie z wykorzystaniem techniki prześwietlania sejsmicznego – rys.4. Celem badań sejsmicznych było określenie zasięgu wymycia pokładu stwierdzonego wstępnie prowadzonymi robotami górnictwami w przecince ściany 4 (ścienienie pokładu do grubości lokalnie 0.6 m).



Rys. 4. Rejon badań sejsmicznych w polu ściany 4B w pokładzie 416 w KWK Polska-Wirek  
 Fig.4. Seismic investigation site ahead of longwall coalface No 413 in coal seam No 416 of the Polska-Wirek coal mine



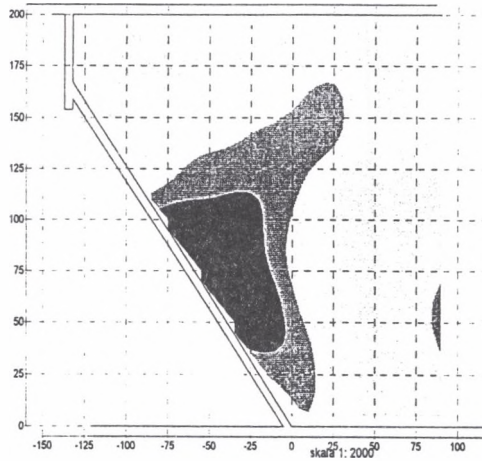
W wyniku interpretacji uzyskanych rejestracji sejsmicznych obliczono dla rejonu pomiarowego rozkład prędkości propagacji fali kanałowej oraz rozkład współczynnika transmisji jej amplitudy, będącego fizycznie odwrotnością współczynnika tłumienia, w paśmie częstotliwości 500-700 Hz. Rozkłady te przedstawione są na rys. 5.



Rys.5. Rozkład prędkości rozchodzenia się fali kanałowej (z lewej) i współczynnika transmisji jej amplitudy (z b) w paśmie częstotliwości 500 – 700 Hz

Fig.5. Propagation velocity distribution of a channel wave (a) and its amplitude transmission coefficient (b) in frequency bandwidth 500 – 700 Hz

Analiza tych rozkładów wskazuje wyraźnie na istnienie strefy anomalnej skoncentrowanej w sąsiedztwie przecinki ściany 4B w jej środkowym odcinku, która rozciąga się w polu projektowanej ściany na odległość około 50 m od przecinki ścianowej. W dalszej części pola ścianowego intensywność anomalii sejsmicznych na obydwóch rozkładach maleje. Na podstawie tych anomalii oraz związku ich amplitud z miąższością badanego pokładu wyznaczono prawdopodobne przebiegi stref zmniejszenia miąższości pokładu. Wyróżniono strefę, gdzie może mieć miejsce redukcja miąższości pokładu poniżej 0,6 m, oraz strefę, gdzie ta redukcja jest w granicach 0,6 – 1,2 m. Na pozostałym obszarze pokład jest niezaburzony geologicznie. Wyniki zbiorczej interpretacji geologicznej opartej na danych sejsmicznych przedstawiono na rys.6.



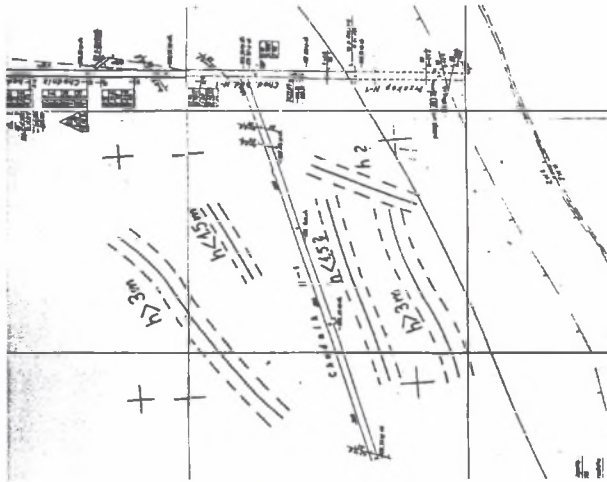
Rys.6. Wyznaczenie stref zaburzenia miąższości pokładu 416 w oparciu o wyniki badań sejsmicznych; kolor czerwony - redukcja miąższości poniżej 0,6 m, kolor pomarańczowy - redukcja miąższości poniżej 1,2 m

Fig.6. Determination of coal seam No 416 thickness disturbance zones from the seismic survey results: - reduction in thickness less than 0.6 m., - reduction in thickness less than 1.2 m

#### 4.2. Badania przebiegu uskoków w pokładzie 404/1-2 w KWK „Morcinek”

Badania sejsmiczne przeprowadzone zostały z chodnika N-1 w pokładzie 404/1 w KWK „Morcinek”. Celem tych badań było określenie przebiegów i zrzutów uskoków występujących w otoczeniu tego wyrobiska. Lokalne warunki i dostępność tylko jednego wyrobiska (chodnik N-1) spowodowały wybór metody pomiarowej z zastosowaniem techniki fal odbitych. Uzyskane rezultaty geologicznej interpretacji danych sejsmicznych przedstawione są na rys.7.

Po obydwóch stronach chodnika N-1 stwierdzono występowanie uskoków o zrzucie przekraczającym miąższość pokładu (około 3 m) oraz szeregu mniejszych dyslokacji o zrzutach szacowanych na mniejsze od 1,5 m. W tym przypadku uzyskane wyniki zostały częściowo zweryfikowane podczas dalszych rozpoznawczych prac górniczych prowadzonych w tym rejonie. Podczas drażenia wyrobiska z chodnika N-1 na południe potwierdzono występowanie szeregu uskoków, w tym dużego o zrzucie ponad 3 m, położonych w strefie wyznaczonej badaniami sejsmicznymi. Natomiast zaniechano dalszych prac górniczych w kierunku na północ od chodnika N-1, co uniemożliwiło sprawdzenie efektywności badań sejsmicznych dla tej części pola pokładu 404/1-2.



Rys. 7. Wyznaczone na podstawie badań sejsmicznych przebiegi uskoków w pokładzie 404/1-2 w KWK „Morcinek”  
 Fig.7. The fault strikes in coal seam No 404/1-2 in the Morcinek coal mine determined from the seismic survey

## 5. Wnioski

1. Wieleletnie doświadczenia w zakresie stosowania metody sejsmicznej dla wyprzedzającego rozpoznania szczegółowej budowy geologicznej pokładów węgla wskazują, że osiągnięto poziom rozwiązań technicznych i metodologicznych zapewniający zadowalającą dokładność lokalizacji występujących zaburzeń ciągłości pokładu węgla oraz oceny ich intensywności.
2. Stosowane w praktyce procedury przetwarzania cyfrowych zapisów sejsmicznych i interpretacji wyników odpowiadają istniejącym w tym zakresie standardom światowym.
3. Zapewnienie wysokiej efektywności rozpoznania sejsmicznego wymaga odpowiedniego doboru metodyki pomiarów i parametrów ich prowadzenia, które muszą uwzględniać lokalną sytuację geologiczno-górnictwiczną oraz charakter rozwiązywanego zadania.
4. Szczególnie istotne znaczenie w sejsmicznym rozpoznaniu zaburzeń struktury pokładów węgla posiada wstępne rozeznanie w miejscu pomiarowym, którego dane stanowią informację bazową dla korelacji wyników sejsmicznych z rzeczywistością.
5. Proces pomiarowy, a przede wszystkim interpretacyjny musi uwzględniać istniejące ograniczenia metody sejsmicznej, zarówno wywołane warunkami dostępności, jak i fizyczną stroną rozchodzenia się fal sejsmicznych w ośrodku skalnym.

## LITERATURA

1. Aki K., Richards P.G.: Quantitative seismology, Vol. I, II. W.H. Freeman and Company, San Francisco 1980.
2. Buchanan D.J.: In-seam seismics for fault detection, Glückauf-Forschungshefte 43. 1979.
3. Buchanan D.J., Jackson P.J, Taylor P.M, Doyle J.F: Attenuation and anisotropy of channel waves in coal seams, Geophysics 48, 133-147. 1982.
4. Dresen L., Rüter H.: Seismic coal exploration, 1994.
5. Dubiński J., Dworak J.: Recognition of the zones of seismic hazard in Polish coal mines by using a seismic method", Pure and Applied Geophysic (PAGEOPH), Vol.129, No 3. 1989.
6. Mason L.M.: Algebraic reconstruction of a two dimensional velocity inhomogeneity in the High Hazles seam of the Thoresby colliery. Geophysics, 46. 1981.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bernard Drzęźła

## Abstract

The seismic method is given the reformed Polish coal mining industry a great chance to better understand the detailed structural trends of coal beds in which mining operations can be either planned or carried out. The existing knowledge of these trends is unsatisfactory and is exposing mines to risking production losses.

The distinctive feature of the seismic method is its capability to obtain premonitory and effective information about coal beds structural disturbances. The quality of this information can be superior to and the costs lower than that of the standard mining methods (exploratory drifts, drilling, etc.).

The digital measuring instrumentation introduced to underground seismic survey at the beginning of the nineties and now commonly used has created new possibilities as far as the processing of seismic data and the geological interpretation the results are concerned. In practice, the existing measurement and interpretation standards used in Polish coal mining industry under the supervision of the Central Mining Institute research team do not stay from the standards used in such countries as Australia, Germany, Great Britain where the seismic method is commonly used at each active longwall coalface in order to premonitorily recognize the coal seam structure ahead of the face. In conditions of high productions of high production concentration, a company can hardly afford to interrupt the work because of the incorrect examination of the mined seam's geologic setting (faults, washouts, etc.).

In this paper, the two following basic measurement techniques have been considered:

- seismic transmission tomography between mine workings,
- the reflection method using seismic waves reflected back from the geological interface.

The fundamental features of these techniques are presented. These are used depended on the local geologic setting and certain circumstances regarding possible coal seam continuity disturbance forms. The experience shows that if the above features were lacking these techniques should be used jointly. The determination effectiveness would increase and the scope of measurements would be reduced if there were available premonitory geological information on disturbance forms of a given mine area and on their presence in gate roads (the so called reference points). It should be noted that there are certain limitations in using the seismic method in geological surveys.

The two presented measurement examples of the most common geological disturbance forms that occur in the Upper Silesian Coal Basin – faults and washouts – show practical survey possibilities of using the seismic method.