

Andrzej LEŚNIAK, Gertruda BAŁAZIŃSKA

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Kraków

## **Polaryzacja fal sejsmicznych rejestrowanych w rejonie zbiornika Żelazny Most**

### **Streszczenie**

W artykule zaprezentowano wyniki badań dotyczących polaryzacji drgań sejsmicznych rejestrowanych systemem czujników zamontowanych na koronie i u podstawy wału otaczającego zbiornik odpadów poflotacyjnych Żelazny Most niedaleko Lubina. Artykuł zawiera niezbędny opis teoretyczny dotyczący metodyki interpretacji oraz obiektu badań. Zasadniczą część dotyczy wyników analizy polaryzacji najsilniejszych części zapisów sejsmicznych i dyskusję o ich ewentualnym wpływie na stateczność obwałowania zbiornika.

### **1. Wprowadzenie**

Badania zaprezentowane w artykule nawiązują do dyskusji w sprawie bezpieczeństwa, eksploatacji i dalszej rozbudowy zbiornika Żelazny Most (Lasocki 2004). Szereg przedsięwzięć w rejonie zbiornika a między nimi instalacja i ciągły monitoring sejsmiczny prowadzony od kilku lat w obrębie zbiornika na Żelaznym Moście potwierdza wagę problemu.

Rejestrowana siecią czujników emisja sejsmiczna z rejonu zbiornika była do tej pory poddawana jedynie analizie jakościowej głównie pod kątem oceny jej aktywności i zakresu energii rejestrowanej na poszczególnych stanowiskach. Dokładna, ilościowa analiza była prowadzona jedynie dla najsilniejszych wstrząsów pochodzenia górniczego. Dla analizy stateczności obwałowań zbiornika znaczenie ma jednak nie tylko ilość i energia drgań w rejonie nasypu zapory, lecz również sposób, w jaki te drgania się odbywają. W ośrodkach w przybliżeniu jednorodnych można oczekiwać, że drgania podłużne (zmiany objętościowe górotworu) będą prowadzić do konsolidacji materiału. Z kolei drgania poprzeczne związane ze zmianami kształtu ośrodka mogą prowadzić do jego rozluźnienia. Efekt ten może mieć istotne znaczenie, jeśli niekorzystna orientacja drgań powtarza się dla bardzo wielu rejestrowanych sygnałów. Oczywiście efekt jest tym silniejszy im większa jest energia tak spolaryzowanych drgań, aczkolwiek porównywanie niekorzystnych efektów powodowanych silnymi i nielicznymi sygnałami a efektów powodowanych przez dużą liczbę niskoenergetycznych drgań jest zadaniem bardzo trudnym (o ile w ogóle wykonywalnym).

Artykuł prezentuje wyniki badań polaryzacji drgań rejestrowanych w rejonie zbiornika Żelazny Most. Na wstępie przedstawiono niezbędny wstęp teoretyczny dotyczący metod analizy używanych w pracy. Następnie scharakteryzowano rejon, w którym wykonywane były pomiary, przedstawiono wyniki analizy oraz dyskusję rezultatów.

## 2. Analiza polaryzacji

Jeśli przyjąć, że  $X$  jest macierzą, której kolumny stanowią zapis sygnału w kierunkach  $x$ ,  $y$ , i  $z$ , to macierz kowariancji  $M$  definiuje się jako wartość oczekiwaną iloczynu wektorów losowych  $E[XX^T]$  czyli:

$$M = \begin{bmatrix} \text{cov}(x,x) & \text{cov}(y,x) & \text{cov}(z,x) \\ \text{cov}(x,y) & \text{cov}(y,y) & \text{cov}(z,y) \\ \text{cov}(x,z) & \text{cov}(y,z) & \text{cov}(z,z) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Każda ze składowych macierzy kowariancji jest średnią arytmetyczną iloczynu odchyłeń wartości zmiennych  $X$  i  $Y$  od ich średnich arytmetycznych i wynosi (Leśniak 1998):

$$\text{cov}(x, y) = \text{cov}(y, x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2.2)$$

Wektory własne macierzy kowariancji definiują kierunki półośi elipsoidy polaryzacji, natomiast odpowiadające im wartości własne związane są z projekcją energii sygnału w tych kierunkach.

Detektor polaryzacji to parametr określony w oparciu o wartości własne  $\lambda$  macierzy kowariancji konkretnego okna czasowego sygnału. W przypadku sygnału spolaryzowanego liniowo obserwuje się tylko jedną niezerową wartość własną, a gdy polaryzacja jest kołowa – tylko dwie. Jeśli wartości własne sygnału posortować w taki sposób by  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ , można posłużyć się następującymi definicjami detektorów polaryzacji liniowej  $DL$  i kołowej  $DK$  (Jurkevics 1988):

$$DL = 1 - (\lambda_2 + \lambda_3) / \lambda_1 \quad DK = 1 - \lambda_3 / \lambda_2 \quad (2.3)$$

Przy orientacji układu pomiarowego  $x$  – północ,  $y$  – wschód,  $z$  – pion, azymut  $\varphi$  i inklinację  $\omega$  można obliczyć na podstawie następujących relacji (Jurkevics 1988):

$$\varphi = \arctan \left( \frac{v_y \text{sign}(v_z)}{v_x \text{sign}(v_z)} \right) \quad \omega = \arccos \left( \frac{|v_z|}{|v|} \right) \quad |v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (2.4)$$

gdzie:

$v_i$  – cosinus kierunkowe wektora własnego związanego z maksymalną wartością własną.

## 3. Lokalizacja i opis zbiornika Żelazny Most

Składowisko Żelazny Most znajduje się w województwie dolnośląskim w obrębie powiatów Lubin i Polkowice, 2 km na zachód od miejscowości Rudna. Składowisko wykorzystuje naturalne obniżenie terenu w południowo-wschodniej części Wzgórz Dalkowskich, będących częścią Wału Trzebnickiego. Obniżenie to otoczone jest wzgórzami spiętrzonyj moreny czołowej z okresu zlodowacenia środkowopolskiego. Wysokość wzgórz sięga od 150 do 180 m n.p.m. na południu, następnie łagodnie obniża się ku zachodowi (125–130 m n.p.m.), by w rejonie zapory północnej osiągnąć 140–145 m n.p.m. i ostatecznie w otoczeniu części wschodniej uzyskać najniższe rzędne – 113–115 m n.p.m.

Eksploatacja i równoczesna rozbudowa składowiska Żelazny Most trwa od 1977 r. Składowisko otoczone jest ze wszystkich stron zaporami ziemnymi o łącznej długości 14,35 km

(tabela 3.1). Obwałowania formowane są metodą nadbudowy do środka, w cyklach dwuletnich, co 2,5 m w granicach każdej z 26 sekcji namywu. Namywanie plaż prowadzone jest przy użyciu rurociągów rozmieszczonych wzdłuż korony obwałowań. Wewnątrz znajduje się akwen, wypełniony wodami nadosadowymi o głębokości do 3 m (Dubliński i in. 2004; Jasiński, Janicki 2003).

Długość zapór składowiska Żelazny Most  
Lengths of the embankments of the Żelazny Most dump

Tabela 3.1.  
Table. 3.1.

Długość zapór	Km osi odniesienia	Ilość sekcji namywu	
Zapora południowa	3 720 m	0,020–3,740	7
Zapora zachodnia	2 760 m	3,740–6,500	5
Zapora północna	3 130 m	6,500–9,630	6
Zapora wschodnia	4 744 m	9,630–14,354 (+20m)	8
Razem:	14 354 m		26

Wysokość obwałowań składowiska jest zmienna w zależności od morfologii podłoża. Przy rzędnej korony 157,5 m n.p.m. (i częściowo 160 m n.p.m. w niektórych sekcjach zapory południowej) wysokość ta wynosi 10–11 m dla zapory południowej, 25–26 m w rejonie zapory zachodniej, 18–22 m w rejonie zapory północnej. Maksymalną wysokość osiąga korona zapory wschodniej, i wynosi ona 42–45 m. Miąższość osadów poflotacyjnych plaży w rejonie osi projektowanej nadbudowy do +180 wynosi od 7–8 metrów na południu składowiska do 45–47 metrów w części wschodniej w strefie obniżenia morfologicznego doliny Malinówki.

Osady poflotacyjne deponowane w składowisku Żelazny Most pochodzą z Zakładów Wzbogacania Rudy (ZWR) kopalni miedzi Lubin, Rudna oraz Polkowice-Sieroszowice. W wyniku ciągłego procesu składowania osadów i rozbudowy składowiska jego podstawowe parametry ulegają zmianie. Zdjęcie lotnicze zbiornika przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Zdjęcie lotnicze zbiornika Żelazny Most. (<http://www.samper.pl>)  
Fig. 3.1. Aerial photograph of Żelazny Most reservoir (<http://www.samper.pl>)

Według stanu na 31.12.2002 r. podstawowe dane składowiska Żelazny Most są przedstawione w tabeli 3.2 (Jasiński, Janicki 2003):

Podstawowe parametry zbiornika Żelazny Most

Tabela 3.2.

Basic parameters of the Żelazny Most reservoir

Tabl 3.2.

objętość zdeponowanych odpadów	343 mln m <sup>3</sup>
objętość akwenu	8 mln m <sup>3</sup>
powierzchnia całkowita składowiska	1394 ha
W tym: powierzchnia plaż	794 ha
powierzchnia akwenu	600 ha
rzędna piętrzenia wody	157,18 m n.p.m.

#### 4. Dane pomiarowe

Sieć pomiarowa obsługiwana przez stację sejsmiczną ZG Rudna składa się z dwóch systemów: WORS oraz ARP 2000. Analiza dotyczyła czujników ARP 2000 zainstalowanych na obwałowaniu zbiornika Żelazny Most. System ten umożliwia trójskładowy zapis przyspieszeń drgań sejsmicznych oraz bezprzewodową transmisję tych danych bezpośrednio do Kopalnianej Stacji Sejsmicznej.

Do rejestracji przyspieszeń drgań zastosowano czujniki firmy Brüel & Kjaer. Zapewniono przetwarzanie A/C bezpośrednio przy czujnikach z dynamiką przetwarzania 90 dB oraz odporną na zakłócenia cyfrową transmisję danych od czujnika do koncentratora. System wyposażono w bezprzewodową transmisję rejestrowanych danych do centrum, precyzyjną synchronizację podstawy czasu rejestracji zegarem satelitarnym GPS. Wartości próbek odpowiadają wielkości przyspieszeń wyrażonych w [mm/s<sup>2</sup>]. Częstotliwość próbkowania wynosi 384,6154 Hz – czyli próbka co 2,6 ms.

Dane wykorzystane w analizie pochodzą z sześciu stanowisk pomiarowych. Stanowiska zostały wykonane standardowo: betonowa studzienka wkopana w grunt, na poziomej, betonowej podstawie umieszczono czujnik drgań. Stanowiska połączone są w pary: jeden czujnik na koronie, jeden u podstawy. Dana para posiada wspólny (wzajemny) system wzbudzenia. Jedna z par stanowisk pomiarowych znajduje się we wschodniej części zapory (16E), natomiast dwie pozostałe należą do zachodniej części zapory (2W i 8W). Współrzędne poszczególnych stanowisk zamieszczono w tabeli 4.1.

Współrzędne poszczególnych stanowisk pomiarowych

Tabela 4.1.

Coordinates of the measurements stations

Table 4.1.

		X	y	z
2W	Korona	33860	13390	204
2W	podstawa	33960	13300	135
16E	Korona	32200	16950	205
16E	podstawa	32200	17050	135
8W	Korona	33000	12920	204,5
8W	podstawa	33025	12975	134

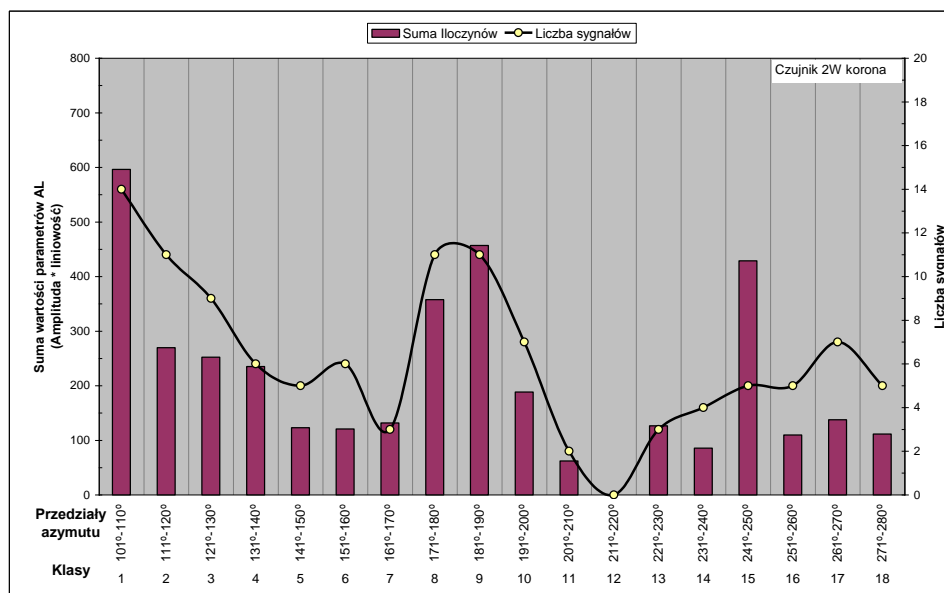
Dane wykorzystane w niniejszej pracy pochodzą z okresu od stycznia 2002 do czerwca 2003, obejmując łącznie 18 miesięcy. Zostały one udostępnione przez Kopalnię Stację Sejsmiczną Zakładu Górniczego „Rudna”. Są to pomiary przyśpieszeń drgań gruntu (wyrażone w  $\text{mm/s}^2$ ), zapisane w postaci cyfrowej. W powyższym okresie (548 dni) odnotowano w sumie 400 wstrząsów, co daje częstość ich występowania co około 33 godziny.

## 5. Kryteria analizy sygnałów

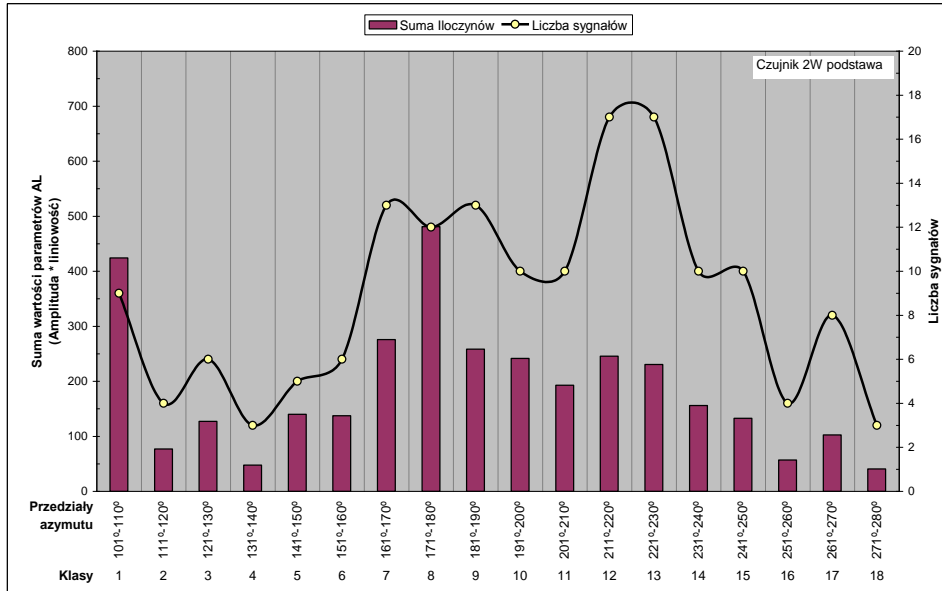
Podstawowym kryterium, warunkującym przydatność sygnału dla prowadzonej analizy była wartość amplitudy rejestrowanych drgań. Ponieważ analiza dotyczyła drgań poziomych, przyjęto wartość  $10 \text{ mm/s}^2$  jako minimalną, dla co najmniej jednej ze składowych poziomych ( $x$  lub  $y$ ). Sygnały nieosiągające takiej wartości nie były analizowane.

Jako drugie podstawowe kryterium, obrano wartość detektorów polaryzacji liniowej lub polaryzacji kołowej na poziomie nie mniejszym niż 0,75. Wyborem kierowała również konieczność wypośrodkowania między wartością zbyt wysoką (eliminującą zbyt wiele sygnałów), a zbyt małą, która jako spolaryzowane klasyfikowałaby w rzeczywistości sygnały nieposiadające tej własności. W analizie posługiwano się współczynnikiem AL będącym iloczynem maksymalnej amplitudy (najczęściej związanej z falami poprzecznymi) i detektora polaryzacji (większego z dwóch – DL lub DK).

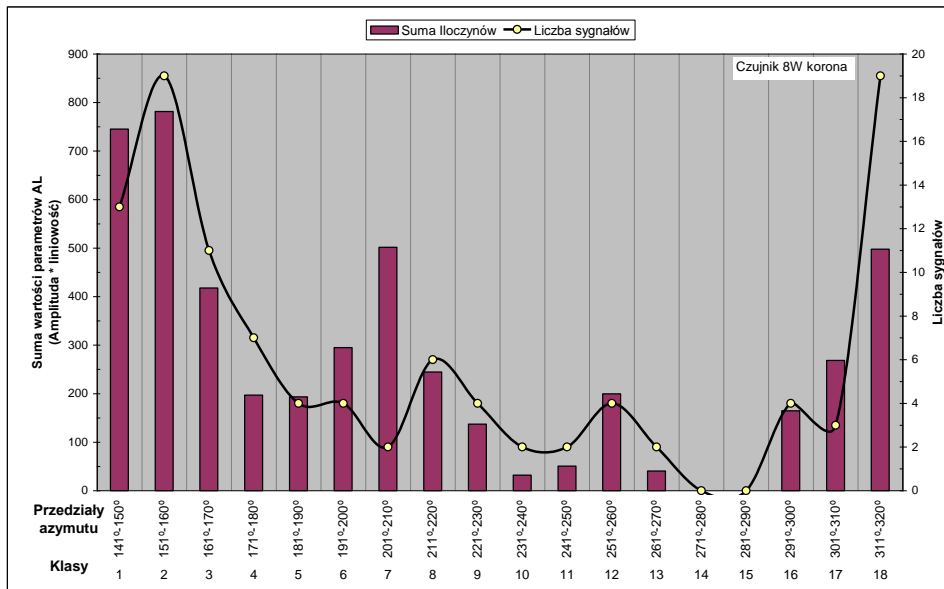
Oba kryteria, kryterium amplitudy i kryterium polaryzacji stały się warunkiem selekcjonowania sygnałów użytecznych dla tej analizy. Analizie poddano 1772 zapisy sygnałów, z czego podane kryteria spełniło zaledwie 789 zapisów czyli 44,52%. Wyniki analizy przedstawiono na rysunkach 5.1, 5.2 i 5.3. Przedstawiają one ilość analizowanych sygnałów i wartość współczynnika AL w przedziałach zmieniających się z krokiem równym  $10^\circ$ .



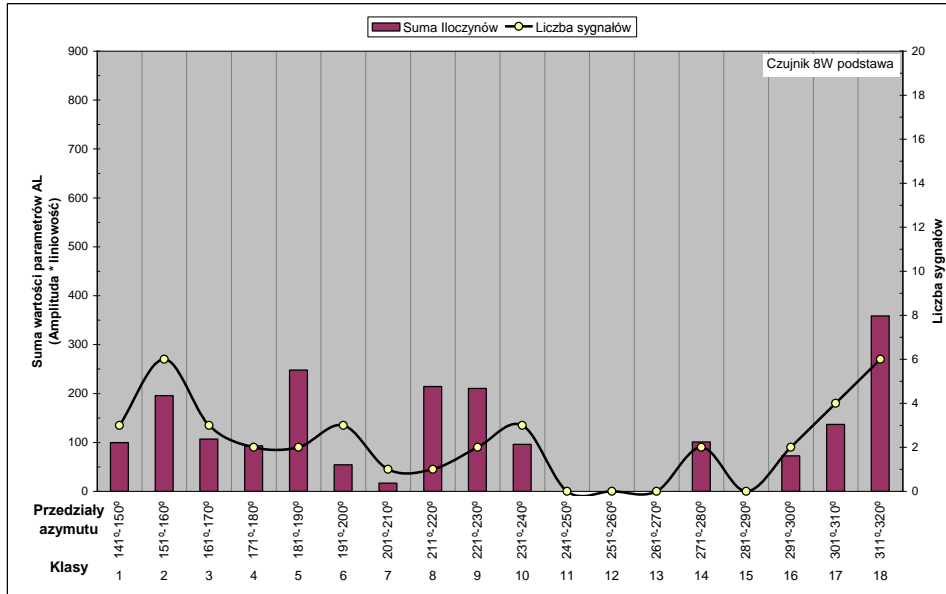
Rys. 5.1. Wartości parametru AL i liczba analizowanych sygnałów dla stanowiska 2W korona  
 Fig. 5.1. The AL parameter values and number of analyzed signals for stations 2W top



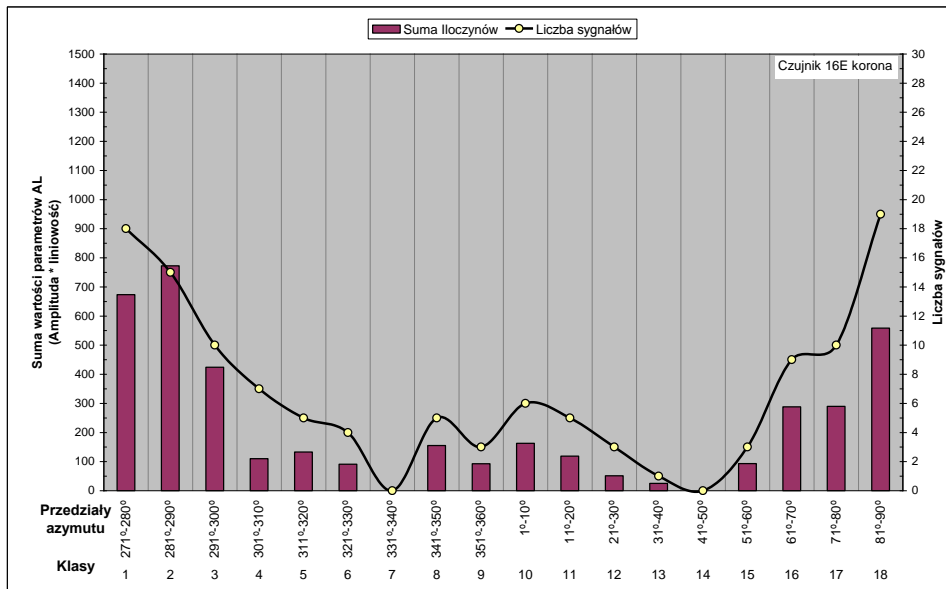
Rys. 5.2. Wartości parametru AL i liczba analizowanych sygnałów dla stanowiska 2W podstawa  
 Fig. 5.2. The AL parameter values and number of analyzed signals for stations 2W bottom



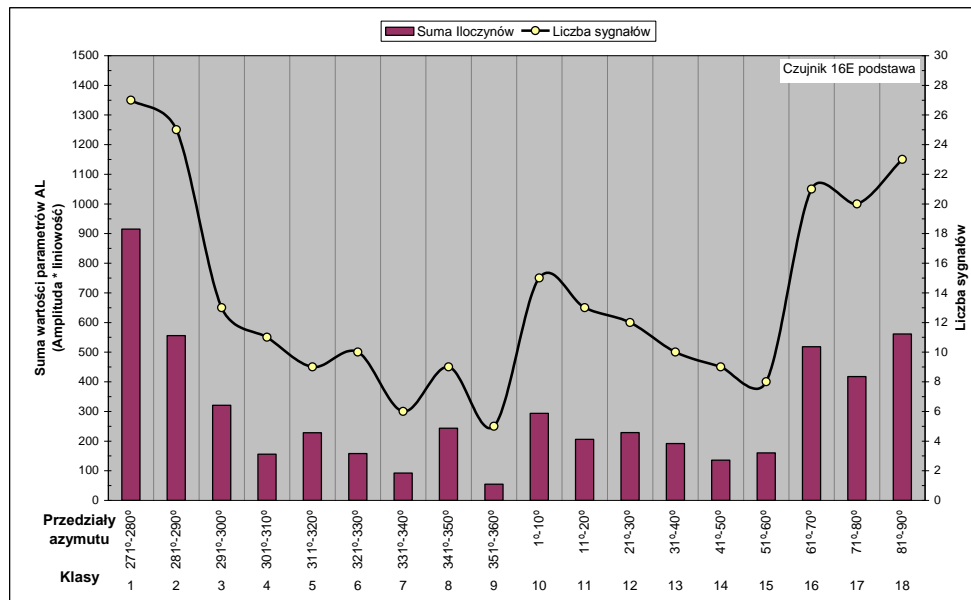
Rys. 5.3. Wartości parametru AL i liczba analizowanych sygnałów dla stanowiska 8W korona  
 Fig. 5.3. The AL parameter values and number of analyzed signals for stations 8W top



Rys. 5.4. Wartości parametru AL i liczba analizowanych sygnałów dla stanowiska 8W podstawa  
 Fig. 5.4. The AL parameter values and number of analyzed signals for stations 8W bottom



Rys. 5.5. Wartości parametru AL i liczba analizowanych sygnałów dla stanowiska 16E korona  
 Fig. 5.5. The AL parameter values and number of analyzed signals for stations 16W top



Rys. 5.6. Wartości parametru AL i liczba analizowanych sygnałów dla stanowiska 16E podstawa  
 Fig. 5.6. The AL parameter values and number of analyzed signals for stations 16W bottom

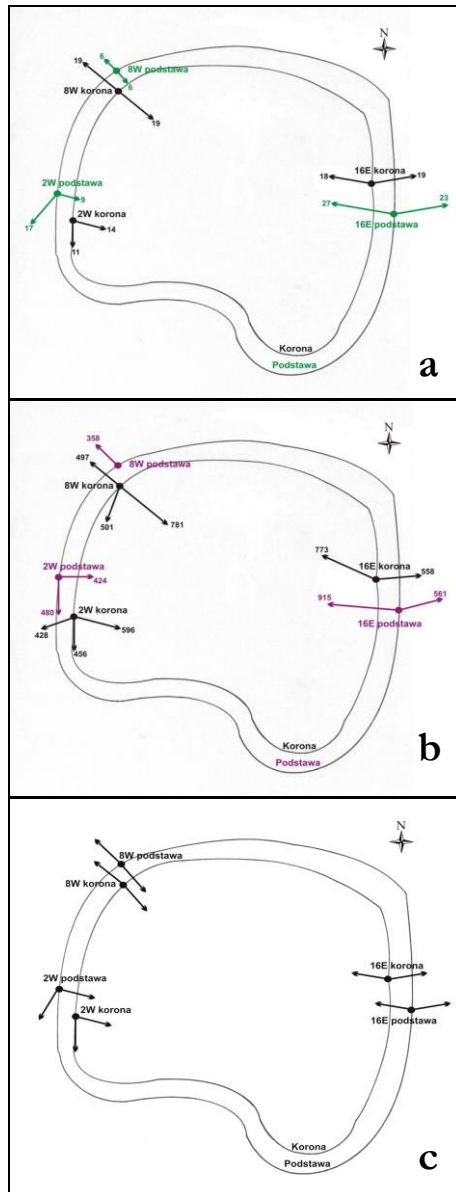
Rys. 5.7 obrazuje wyniki przeprowadzonej analizy. Na tle obrysu zbiornika przedstawiono kierunki polaryzacji dla dominujących ilościowo klas (rys. 5.7a), kierunki polaryzacji dla klas o największej sumarycznej wartości współczynnika AL (rys. 5.7b) oraz uśrednione kierunki polaryzacji dla sygnałów spolaryzowanych – tj. spełniających warunek  $DL > 0,75$  lub  $DK > 0,75$  (rys. 5.7c). Na końcach strzałek zaznaczono liczbę sygnałów w danej klasie. Długości strzałek są proporcjonalne do tych liczb.

## 6. Dyskusja wyników interpretacji i podsumowanie

Dominująca część drgań rejestrowanych prezentowaną siecią czujników ma swoje źródło w obrębie obszarów górniczych ZG „Rudna”, ZG „Polkowice-Sieroszowice” i ZG „Lubin”, KGHM „Polska Miedź” S.A. Docierają one zatem do zbiornika z kierunku zachodniego i południowo-zachodniego. W zapisach tych można wyróżnić szereg składowych: od fal podłużnych P (identyfikowanych tylko dla najsilniejszych wstrząsów) poprzez fale poprzeczne S aż po szereg fal typu interferencyjnego (fale powierzchniowe, fale coda). Poza jasno identyfikowanymi drganiami będącymi rezultatem wstrząsów górniczych rejestrowana jest stosunkowo liczna grupa drgań, których źródła nie są wstrząsy, a lokalnie prowadzona działalność człowieka, a także szумы pochodzenia przemysłowego i komunikacyjnego. W pracy przeprowadzono analizę polaryzacji bez rozróżniania źródła pochodzenia drgań.

Wiadomo, że degradujące skutki fali spolaryzowanej kołowo np. fali poprzecznej typu S są znacznie większe niż w przypadku fali typu P, zwłaszcza, gdy propagacja fali następuje wzdłuż obiektu, takiego jak zaporą zbiornika. Najbardziej zatem niekorzystnymi konfiguracjami są:





Rys. 5.7. Schemat zbiornika Żelazny Most z zaznaczonymi lokalizacjami stanowisk 2W, 8W i 16E i naniesionymi wynikami interpretacji. A) Kierunki polaryzacji dla klas zawierających największą ilość sygnałów. B) Kierunki polaryzacji dla klas o największej sumarycznej wartości współczynnika AL. C) Uśrednione kierunki polaryzacji dla sygnałów spolaryzowanych liniowo.

Długości strzałek są proporcjonalne do obrazowanych wartości.

Fig. 5.7. The scheme of Żelazny Most reservoir with the marked locations of the stations 2W, 8W and 16E and with the results of the interpretations. A) Directions of the waves polarizations for the classes which contain maximal number of signals B) Directions of the waves polarizations for the classes with maximal AL coefficient C) Averaged directions of the polarization for signals linearly polarized.

The lengths of the arrows are proportional to their values.

- propagacja fali typu S z kierunku południowego wzdłuż zachodniej części zapory;
- propagacja fali typu S z kierunku południowo-zachodniego wzdłuż północnej części zapory.

Można pokusić się o próbę określenia w obrębie każdego ze stanowisk parametrów takich jak częstotliwość sygnału  $-f_0$ , długość fali  $\lambda$ , przy założonym kroku próbkowania (2,6 ms) oraz prędkościach fal typu: P i S ( $V_{Psr} = 370$  m/s,  $V_{Ssr} = 210$  m/s) (Dubliński i in. 2004).

Częstotliwość średnia dla rejestracji składowych poziomych nie przekroczyła na żadnym ze stanowisk 20 Hz. Po obliczeniu długości fali poprzecznej okazało się, że jej wartość maksymalna (dla stanowiska 8W podstawa) wyniosła 35 m. Dla pozostałych stanowisk wartości  $\lambda$  mieściły się w przedziale od 11–26 m. Na podstawie tych danych (oraz wiedząc, że szerokość wału waha się od 90–100 m) można się spodziewać, iż fala ścinająca, propagująca wzdłuż obwałowania może mieć wpływ na rozluźnienie ośrodka.

Wyniki zaprezentowane powyżej, dla poszczególnych czujników, pozwoliły określić oczekiwane przedziały azymutów, w których obserwuje się względny wzrost ilości sygnałów, oraz wzrost amplitudy i polaryzacji. Dla każdego z nich istnieje co najmniej jeden kierunek potencjalnie niekorzystnie oddziałujący na materiał obwałowania zbiornika. Są to jednak stwierdzenia wymagające osobnego i dogłębnego badania, i w nich autorzy upatrują kierunków kontynuacji niniejszej pracy.

## Literatura

- [1] Dubiński, J., Mutke, G., Pilecki, Z. 2004: Wpływ silnych wstrząsów na stateczność składowiska „Żelazny Most” w świetle obliczeń numerycznych. [W:] Mat. XI Międzynarodowej Konferencji Tąpania 2004, Ustroń, 101–112.
- [2] Jasiński A., Janicki K. 2003: Geologiczne uwarunkowania wpływu składowiska Żelazny Most, Mat. Symp. „Warsztaty Górnicze 2003” z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, IGSMiE PAN, Kraków, 89–104.
- [3] Jurkevics A. 1988: Polarization analysis of three-component array data. Bull. Seism. Soc. Am. Geophysics 78.
- [4] Lasocki S. 2004: Prognoza granicznych wielkości drgań gruntu na obiektach składowiska Żelazny Most dla okresu 2003–2028, XVII Zimowa Sesja Mechaniki Górnotworu, Zakopane.
- [5] Leśniak, A., Cianciara, B., Isakow, Z., Dworak, M., Szkapka, M., Koziaż, E. 1998: Analiza stanu górnotworu na podstawie trójskładowych rejestracji sejsmoakustycznych. [W:] Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej 98, PAN, Kraków, 493–508.
- [6] Witryna internetowa: <http://www.samper.pl>, Samodzielna Pracownia Informacji Obrazowej.

## Polarization of the seismic waves recorded near Żelazny Most reservoir

The results of the polarisation analysis of the seismic waves recorded by the array of the sensors located near the flotation reservoir in Żelazny Most is presented in the paper. The sensors were located on the top and in the bottom of the dam surrounded the reservoir. The theoretical description of the polarization estimates and the object of the research are described. The description of the results of the analysis and the discussion of their influence on the embankment stability are the essential parts of the paper.

*Przekazano: 31 marca 2006 r.*