

Robert Siata

## BADANIE PRZYPOWIERZCHNIOWYCH WARSTW PODŁOŻA METODĄ SEJSMICZNĄ

### Streszczenie

Określenie budowy i własności fizycznych ośrodka skalnego ma duże znaczenie dla:

- budownictwa podziemnego i lądowego,
- prognozy zagrożeń naturalnych,
- rozpoznania budowy geologicznej,
- modelowania analitycznego.

Podstawową metodą wyznaczania płytkich granic litologicznych i strefy małych prędkości fal sejsmicznych jest metoda sejsmiczna, której wariantem jest metoda płytkiej refrakcji. Może ona służyć do wyznaczania granic litologicznych do głębokości 30-50 m w zależności od lokalnych warunków geologicznych.

Określane tą metodą prędkości mogą być również wykorzystywane do klasyfikacji masywu skalnego z zastosowaniem skali opracowanych między innymi przez Bartona, Bieniawskiego, Bestyńskiego (dla fliszu karpackiego).

Warstwy leżące najpłycej utworzone są najczęściej z osadów trzecio i czwartorzędowych oraz utworów zwietrzałych. Warstwę, którą charakteryzują najniższe wartości prędkości fal sejsmicznych, tzw. strefę małych prędkości (SMP) tworzą grunty nieskonsolidowane lub utwory zwietrzałe. Prędkości te nie przekraczają 1000 m/s, podczas gdy prędkości fal sejsmicznych w twardym podłożu są większe od 1500 m/s (2000 m/s). Dodatkowym czynnikiem wpływającym na prędkości fal sejsmicznych w ośrodku jest poziom zwierciadła wód gruntowych.

SMP charakteryzuje się wzrostem prędkości fal wraz z głębokością, lecz może również charakteryzować się jedną wartością prędkości. Drugi przypadek występuje, gdy na przykład w pobliżu znajdują się warstwy piasków.

Prędkości fal sejsmicznych w warstwach zalegających nad twardym podłożem określono metodą płytkiej refrakcji wzdłuż profili sejsmicznych w następujących rejonach:

- Jaworzno, rejon zalewu Łęg,
- OG KWK Halemba, przy szybie Grunwald,
- Kopalnia Doświadczalna Barbara, przy szybie Barbara.

Do interpretacji uzyskanego materiału pomiarowego wykorzystano analizę hodografów zbieżnych. Wyznaczono prędkości i miąższości poszczególnych warstw metodą średnich arytmetycznych. Tak wyznaczony model ośrodka posłużył jako model startowy do tomograficznego odwzorowania na podstawie czasów pierwszych wejść fali sejsmicznej. Wyniki przedstawiono w postaci dwuwymiarowych map prędkości (rys. 1a, 2a, 3a).

W miejscach wykonywania pomiarów sejsmicznych stwierdzono dużą zmienność prędkości propagacji podłużnej fali sejsmicznej w utworach zaliczanych do nadkładu czwartorzędowego w zakresie od 300 do 1800 m/s. Najniższe wartości występowały w strefie przypowierzchniowej.

Zmian prędkości nie można w prosty sposób korelować z wykształceniem geologicznym utworów. Jest to spowodowane faktem, że utwory czwartorzędowe wykształcone są głównie w postaci piasków, żwirów, pyłów, glin oraz rumoszu, w przypadku których prędkości fal sprężystych związane są głównie ze stopniem zagęszczenia (gęstością) i zawodnieniem. Z tych względów płytkie granice sejsmiczne nie pokrywają się z granicami litologicznymi, a zakres zmienności prędkości fal dla podobnych utworów jest bardzo duży. Można stwierdzić, że dla piasków prędkości zmieniają się od około 300 m/s (suche

i zalegające bezpośrednio na powierzchni) do około 1500 m/s dla utworów zawodnionych. Utwory identyfikowane ze stropem karbonu zaznaczają się w postaci granicy refrakcyjnej o prędkości w przedziale 1800-2200 m/s.

### **Testing of foundation layers, adjacent to the surface, by means of the seismic method**

#### **Abstract**

The determination of the structure and physical properties of the rock medium has great significance for:

- underground building and civil engineering,
- natural hazard prediction,
- identification of geological structure,
- analytic modelling.

The basic method of determination of shallow lithological limit and zone of small seismic wave velocity is the seismic method, a variant of which is the shallow refraction method. It can serve the determination of lithological limits up to the depth of 30-50 m, depending on local geological conditions.

The velocities determined by means of this method can be also applied for rock mass classification with the use of scales, developed among others by Barton, Bieniawski, Bestyński (for the Carpathian flysch).

The layers localized close to the surface are most frequently formed of Tertiary and Quarternary deposits and weathered formations. The layer, characterized by the lowest values of seismic wave velocities, the so-called low velocity zone (SMP) form non-consolidated grounds and weathered formations. These velocities do not exceed 1000 m/s, whereas the velocities of seismic waves in hard foundations are bigger than 1500 m/s (2000 m/s). An additional factor influencing the velocities of seismic waves in the medium is the underground water level.

A low velocity zone is characterized by the increase of wave velocity along with the depth, but it can be also characterized by one velocity value. The second case takes place, when for example, sandstone layers occur in the vicinity.

The velocities of seismic waves in layers occurring above the hard foundation were determined by the method of shallow, refraction on seismic profiles in the following regions:

- Jaworzno, the Łęg water reservoir region,
- Mining area of Halemba mine, at Grunwald shaft,
- Experimental Mine "Barbara" at Barbara shaft.

For the interpretation of the obtained measuring material the convergent hodograph analysis was used. The velocities and thickness of individual layers were determined by means of the arithmetic average method. The medium model, determined in such a way, served as start model for tomographic mapping on the basis of times of first seismic wave entries. The results were presented in the form of two-dimensional velocity maps.

In sites of seismic measuring execution one has stated big variability of velocity propagation of longitudinal seismic wave in formations classified among Quarternary overburden within the range from 300 to 1800 m/s. The lowest values occurred in the zone, adjacent to the surface.

Velocity changes cannot be in a simple way correlated with the structure of geological formations. This is caused by the fact that Quarternary formations occur mainly in the form of sands, gravels, dusts, clays, and rubble, in case of which the velocities of elastic waves are connected first of all with the consolidation (density) degree and water content. For these reasons the shallow seismic limits do not coincide with lithological limits, and the range of wave velocity variability for similar formations is very high. One can state that for sands the velocities change from about 300 m/s (dry and occurring directly on the surface) to about 1500 m/s for watered formations. Formations identified with the Carboniferous roof appear in the form of refraction limit with velocity within the interval 1800-2200 m/s.

## 1. WSTĘP

Poznanie budowy ośrodka skalnego, jego jakości i wytrzymałości ma duże znaczenie dla:

- budownictwa podziemnego i lądowego,
- określenia miąższości strefy małych prędkości,
- prognozy zagrożeń naturalnych,
- rozpoznania budowy geologicznej,
- wyznaczania głębokości zwierciadła wód gruntowych,
- modelowania analitycznego.

Podstawową metodą stosowaną do wyznaczania granic litologicznych na małych głębokościach i strefy małych prędkości jest metoda sejsmiczna. Granice litologiczne do głębokości 30÷50 m, w zależności od lokalnych warunków geologicznych, wyznaczyć można metodą płytkiej refrakcji, która stanowi jeden z wariantów metody sejsmicznej. Metodą tą możliwe jest także wyznaczenie parametrów dynamicznych (modułu sprężystości postaciowej i objętościowej, współczynnika Poissona, współczynnika dobroci) na podstawie zmierzonych prędkości propagacji podłużnych i poprzecznych fal sprężystych i znanej gęstości ośrodka.

Zaletą wyznaczania parametrów dynamicznych skał jest możliwość ich wyznaczania in situ w warunkach naprężeniowo-deformacyjnych, bez naruszania struktury skał. Wadą jest mniejsza dokładność pomiarowa (w porównaniu, np. z metodą ultradźwiękową) oraz całościowe traktowanie większej objętości masywu, bez możliwości wydzielenia mniejszych fragmentów (przy prędkości fali sejsmicznej 4000 m/s i częstotliwości fali 200 Hz rozdzielczość przestrzenna metody wynosi 5÷10 m).

Wyznaczone prędkości mogą być wykorzystywane również do klasyfikacji masywu skalnego na podstawie skał opracowanych, między innymi przez Bartona, Bieniawskiego, Bestyńskiego (dla fliszu karpackiego) [2, 3].

## 2. PODSTAWY FIZYCZNE PROPAGACJI FAL SEJSMICZNYCH W OŚRODKU SKALNYM

### 2.1. Kinematyczne parametry propagacji fal sejsmicznych

Podstawowym założeniem przy wyznaczaniu własności fizycznych jest fakt, że zachowuje się on sprężystość w zakresie odkształceń wywołanych propagacją fal sprężystych. Z rozwiązania równania różniczkowego dla fal podłużnych i poprzecznych propagujących w ośrodku sprężystym otrzymuje się ich prędkości wyrażone zależnościami [1, 4, 5]:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 4G/3}{\rho}}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

gdzie:

- $V_P$  – prędkość fali podłużnej,
- $V_S$  – prędkość fali poprzecznej,
- $\lambda$  – moduł sprężystości objętościowej,
- $G$  – moduł sprężystości postaciowej,
- $\rho$  – gęstość ośrodka.

Fale podłużne w ośrodku izotropowym są falami kulistymi, ruch ich polega na zmianie objętości. Fale poprzeczne polegają na zmianie postaci cząsteczek, ich ruch odbywa się w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się drgań. Fale poprzeczne nie propagują w płynach ( $G = 0$ ) [1].

Prędkości fal podłużnych i poprzecznych ujęte są zależnościami

$$V_P = V_S \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$$

W powyższym wzorze stała Poissona  $\nu$  zmienia się w zakresie od 0 do 0,5, z czego wynika, że prędkość fal podłużnych jest zawsze większa od poprzecznych. Dla typowych skał krystalicznych  $\nu=0,25$ , co daje stosunek prędkości  $k = V_P/V_S = 1,73$ . Dla utworów luźnych stosunek ten zmienia się w zakresie od 3 do 12.

Przy znajomości prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych można wyznaczyć dynamiczne stałe sprężyste z następujących zależności [1, 5, 6]:

$$\lambda_d = \rho \left( V_P^2 - \frac{4V_S^2}{3} \right)$$

$$G_d = \rho V_S^2$$

$$E_d = \rho V_S^2 \frac{3k^2 - 4}{k^2 - 1}$$

$$\nu_d = 0,5 \frac{k^2 - 2}{k^2 - 1}$$

gdzie:

- $V_P$  – prędkość fali podłużnej,
- $V_S$  – prędkość fali poprzecznej,
- $k = V_P/V_S$ ,
- $\lambda_d$  – dynamiczny moduł sprężystości objętościowej,

$G_d$  – dynamiczny moduł sprężystości postaciowej,  
 $E_d$  – dynamiczny moduł sprężystości,  
 $\nu_d$  – dynamiczny współczynnik Poissona,  
 $\rho$  – gęstość ośrodka.

## 2.2. Dynamiczne parametry propagacji fal sejsmicznych

Fale sejsmiczne, podczas rozchodzenia się, w ośrodku lepko-sprężystym ulegają tłumieniu i wykazują efekt dyspersji. Jest to wynikiem lepkości ośrodka. Wielkość amplitudy przemieszczeń  $A$  fali sejsmicznej w odległości  $r$  od źródła można przedstawić wzorem [1]

$$A = A_0 \frac{e^{-\alpha(f)r}}{r^\beta}$$

gdzie:

$A_0$  – amplituda fali w źródle,  
 $\alpha(f)$  – współczynnik tłumienia, zależny od częstotliwości drgań,  
 $r$  – odległość.

Współczynnik dobroci  $Q$  dla określonej częstotliwości drgań  $f$  definiuje się jako

$$Q = \frac{\pi f}{\alpha V}$$

gdzie:

$Q$  – współczynnik dobroci,  
 $f$  – częstotliwość,  
 $V$  – prędkość fali,  
 $\alpha$  – współczynnik tłumienia.

Współczynnik dobroci  $Q$  charakteryzuje ośrodek dla określonej częstotliwości fal (pasma częstotliwości). Współczynnik dobroci bądź tłumienia w ośrodku jest bardziej czuły (od prędkości) na zmiany własności fizykomechanicznych ośrodka, a w szczególności na obecność spękań.

## 3. PŁYTKIE BADANIA REFRAKCYJNE

Warstwy najpłycej zalegające w górotworze najczęściej składają się z osadów trzecio i czwartorzędowych oraz utworów zwietrzałych. Warstwą o najniższych wartościach prędkości fal sejsmicznych jest tzw. strefa małych prędkości (SMP), którą tworzą grunty nieskonsolidowane lub utwory zwietrzałe. Strefa ta charakteryzuje się małymi wartościami prędkości poniżej 1000 m/s, podczas gdy twarde podłoże charakteryzuje się prędkościami większymi od 1500 m/s (2000 m/s). Dodatkowym czynnikiem wpływającym na prędkości fal w ośrodku jest poziom zwierciadła wód gruntowych. SMP charakteryzuje się wzrostem prędkości wraz z głębokością, lecz

może również charakteryzować się jedną wartością prędkości. Drugi przypadek występuje, na przykład przy warstwach piasków.

#### **4. SEJSMICZNE POMIARY POŁOWE DLA ROZPOZNANIA BUDOWY GEOLOGICZNEJ WARSTW PRZYPOWIERZCHNIOWYCH**

##### **4.1. Metoda pomiaru**

Do określenia prędkości fal sejsmicznych w warstwach zalegających nad twardym podłożu zastosowano metodę płytkiej refrakcji. Na profilach sejsmicznych rozmieszczano 24 geofony w odległościach 3÷5 m. Falę sejsmiczną wzbudzano po obydwu stronach profilu w odległościach 5÷10 m oraz w środku rozstawu. Profile sejsmiczne zostały wykonane w następujących rejonach:

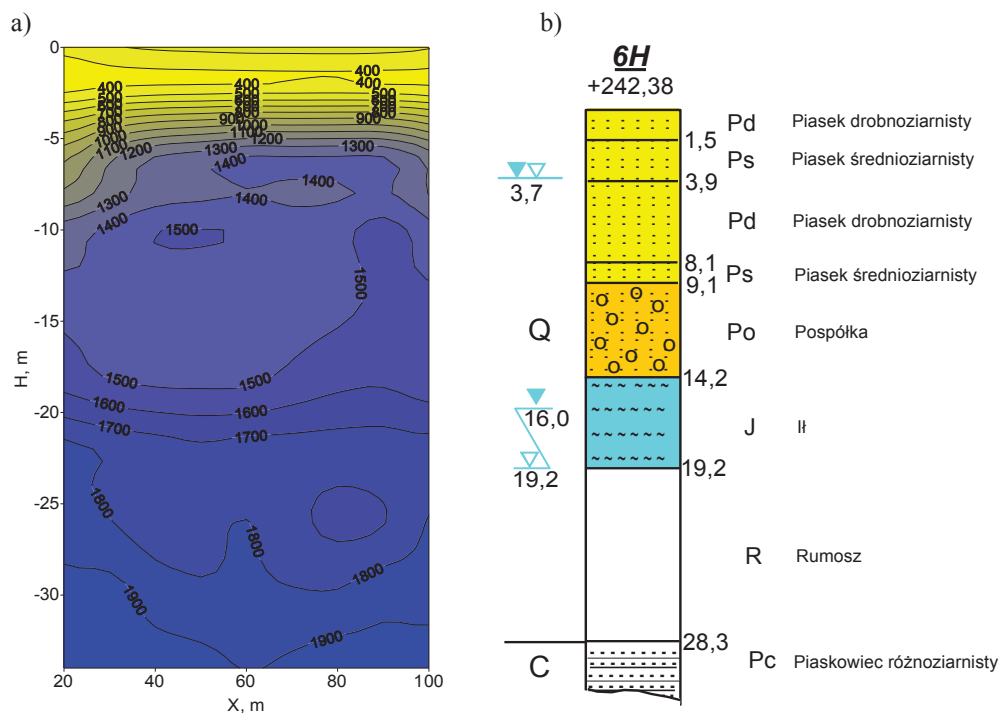
- Jaworzno, przy zalewie Łęg,
- OG KWK Halemba, przy szybie Grunwald,
- KD Barbara, przy szybie Barbara.

Metoda ta umożliwia uzyskiwanie hodografów zbieżnych.

##### **4.2. Interpretacja**

Do interpretacji materiału pomiarowego wykorzystano – w czasie badań hodografy zbieżne. Na ich podstawie określono prędkości i miąższości poszczególnych warstw metodą średnich arytmetycznych. Metoda ta ma szerokie zastosowanie w interpretacji hodografów związanych z granicami refrakcyjnymi, których promień krzywizny jest znacznie większy od głębokości występowania granicy sejsmicznej. Stosując tę metodę pomija się jednak zjawisko przenikania fal i nie może być ona stosowana w przypadkach gwałtownych zmian prędkości granicznych wzdłuż profilu sejsmicznego.

Tak wyznaczony rozkład prędkości posłużył jako model startowy do tomograficznego odwzorowania pola prędkości na podstawie czasów pierwszych wejść fali sejsmicznej. Wyniki przedstawiono w postaci dwuwymiarowych map prędkości (rys. 1a, 2a, 3a).



**Rys. 1.** Badanie sejsmiczne w rejonie otworu 6H w kopalni „Jaworzno”: a – rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej; b – profil litologiczny otworu; Pd – piasek drobnoziarnisty, Ps – piasek średnioziarnisty, Po – pospółka, R – rumosz, Pc – piaskowiec różnoziarnisty

**Fig. 1.** Seismic test in the area of 6H borehole, “Jaworzno” Colliery: a – distribution of longitudinal seismic wave velocity, b – borehole lithological profile, Pd – fine-grained sand, Ps – moderately grained sand, Po – sand-gravel aggregate, R – rubble; Pc – sandstone of different granularity

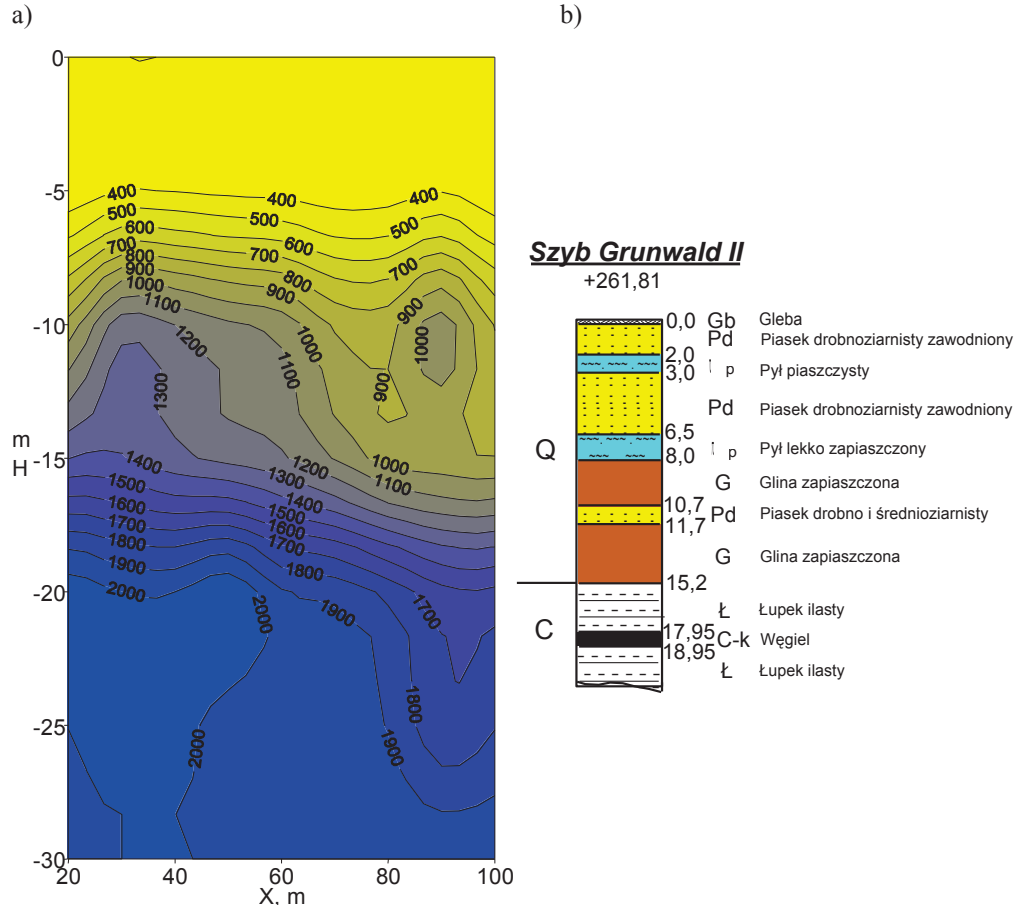
### 4.3. Wyniki płytkich badań refrakcyjnych

#### Profil sejsmiczny w rejonie miasta Jaworzna

W rejonie Jaworzna wybrany do badań profil sejsmiczny znajdował się w pradolinie Przemyszy, gdzie miąższość utworów czwartorzędu wynosi około 30 m.

Prędkości podłużnej fali sejsmicznej zarejestrowane wzdłuż profilu zmieniały się od 400 do 1900 m/s. Do głębokości około 5 m wartości prędkości były niższe od 1000 m/s. Później następował dalszy przyrost wartości do około 1800–1900 m/s na głębokości 30 m, gdzie występuje strop utworów karbońskich. Należy zauważyć, że niskie wartości prędkości w warstwie przypowierzchniowej związane były z luźnymi piaskami. Wzrost prędkości wraz z głębokością związany był natomiast z zagęszczeniem utworów i ich zawodnieniem. Dla przedziału głębokości, gdzie występuje rumosz, prędkości zmieniają się w przedziale 1700÷1800 m/s. Strop karbonu, wykształcony w postaci piaskowca, zaznaczał się jako granica refrakcyjna o prędkości 1900 m/s.

### Profil sejsmiczny w OG Halemba (przy szybie Grunwald)



**Rys. 2.** Badanie sejsmiczne w rejonie szybu Grunwald w kopalni „Halemba”: a – rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej; b – profil litologiczny szybu Grunwald; Gb – gleba, Pd – piasek drobnoziarnisty zawodniony, π – pył lekko zapiaszczony G – glina zapiaszczona, Ł – łupek ilasty, C-k – węgiel

**Fig. 2.** Seismic test in the area of “Grunwald” shaft, “Halemba” Colliery: a – lithological profile of “Grunwald” shaft; b – distribution of longitudinal seismic wave velocity, Gb – soil; Pd – watered fine-grained sand, π – faintly sandy dust, G – sandy clay, Ł – mudstone; C-k – coal

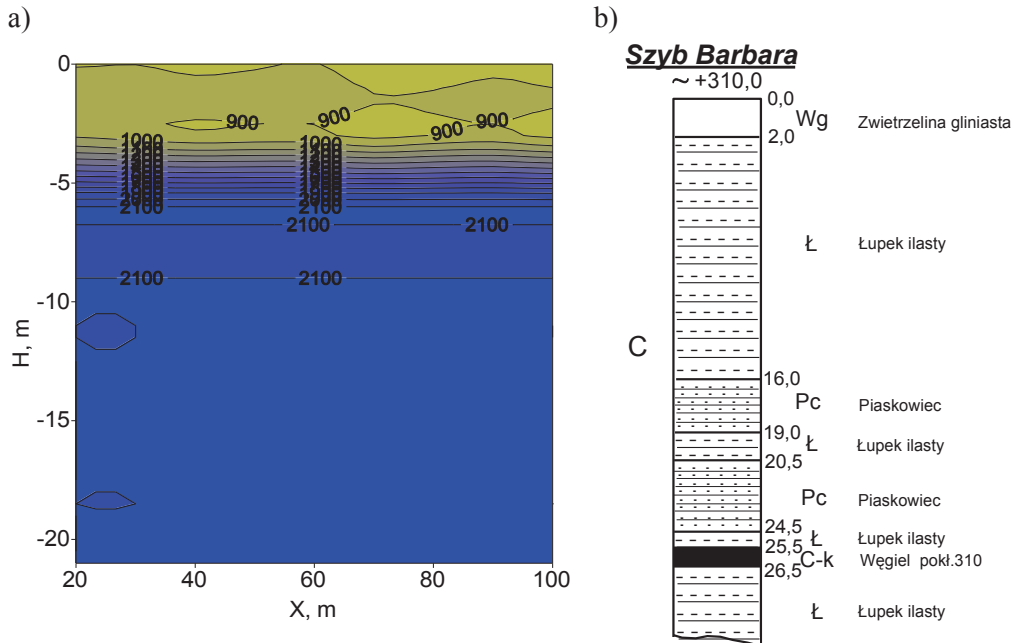
Zarejestrowane podczas badań wartości prędkości zmieniały się w przedziale od 300 do 2000 m/s. Prędkości w zakresie 300÷900 m/s należy korelować z piaskami i pyłami piaszczystymi, które w profilu szybu Grunwald II występują do głębokości 8 m. Następnie w profilu występują gliny zapiaszczone, którym należy przypisać prędkości w przedziale 900÷1500 m/s. Od głębokości około 15 do 20 m prędkości stopniowo wzrastały do 2000 m/s. W przekroju geologicznym temu przedziałowi



odpowiada rumosz zwietrzelinowy. Na głębokości około 20 m występują już karbońskie łupki ilaste, którym przypisać należy prędkość fali sejsmicznej 2000 m/s.

### Profil sejsmiczny w rejonie KD Barbara

Profil sejsmiczny usytuowany był w sąsiedztwie szybu Barbara Kopalni Doświadczalnej Barbara (około 100 m na południe). W rejonie tym utwory karbońskie występują bezpośrednio na powierzchni, wykształcone są w postaci łupków i piaskowców.



**Rys. 3.** Badanie sejsmiczne w rejonie szybu Barbara Kopalni Doświadczalnej Barbara: a – rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej; b – profil litologiczny szybu Barbara; Wg – zwierzelina gliniasta, Ł – łupek ilasty, Pc – piaskowiec, C-k – węgiel pokład 510

**Fig. 3.** Seismic test in the area of “Barbara” shaft of Experimental Mine “Barbara”: a – distribution of longitudinal seismic wave velocity, b – lithological profile of “Barbara” shaft; Wg – argillaceous eluvium, Ł – mudstone, Pc – sandstone, C-k – coal, seam 510

Zarejestrowane podczas badań wartości prędkości zmieniały się w przedziale 900÷2100 m/s. Granica refrakcyjna o prędkości 2000 m/s znajdowała się na głębokości około 5 m i była związana z skałami karbońskimi wykształconymi w postaci łupków. Wyżej występowała warstwa zwietrzliny (2 m według profilu z szybu Barbara) i prawdopodobnie mocno spękane łupki.

## 5. PODSUMOWANIE

W miejscach wykonywania pomiarów sejsmicznych stwierdzono dużą zmienność prędkości propagacji podłużnej fali sejsmicznej, w zakresie od 300 m/s do 1800 m/s, w utworach zaliczanych do nadkładu czwartorzędowego. Najniższe wartości wystąpiły w strefie przypowierzchniowej. Stwierdzono także, że zmian prędkości nie można w prosty sposób korelować z wykształceniem geologicznym utworów. Jest to spowodowane faktem, że utwory czwartorzędu wykształcone są głównie w postaci piasków, żwirów, pyłów, glin oraz rumoszu, w przypadku których prędkości fal sprężystych związane są głównie ze stopniem zagęszczenia (gęstością) i zawodnieniem. Z tych względów płytkie granice sejsmiczne nie pokrywają się z granicami litologicznymi, a zakres zmienności prędkości fal dla podobnych utworów jest bardzo duży. Można stwierdzić, że dla piasków prędkości zmieniają się od około 300 m/s (suche i zalegające bezpośrednio na powierzchni) do około 1500 m/s dla utworów zawodnionych. Utwory identyfikowane ze stropem karbonu zaznaczają się w postaci granicy refrakcyjnej o prędkości w przedziale 1800÷2200 m/s. Wyniki pomiarów wskazują jednak na ich dużą przydatność dla budownictwa. Pozwalają bowiem na określenie miąższości warstwy utworów luźnych i słabo skonsolidowanych oraz na określenie granicy zalegania twardego podłoża. Pomiar sejsmiczne umożliwiają również określenie stref zawodnionych i występowania wód gruntowych, co ma duże znaczenie w przypadku przygotowania podłoża do posadowienia fundamentów.

### Literatura

1. Aki K, Richards P.G.: *Quantitative seismology*. San Francisco, W.H. Freeman and Company 1980 Vol. I, II.
2. Bieniawski Z.T.: *Engineering rock mass classification*, New York, Wiley 1989.
3. Barton N.: *General report Concerning Some 20<sup>th</sup> Century Lessons and 21<sup>st</sup> Century Challenges in Applied Rock Mechanics, Safety and Control of the Environment*. Paris 1999.
4. Dubiński J.: *Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górniczymi w kopalniach węgla kamiennego*. Prace Naukowe GIG. Seria dodatkowa 1989.
5. Fajkiewicz Z. (red.): *Zarys geofizyki stosowanej*. Warszawa, Wydawnictwo Geologiczne 1972.
6. Gustkiewicz J. (red.): *Własności fizyczne wybranych skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Kraków, IGSMiE PAN 1999.
7. K. Stec (red.): *Geologiczne przyczyny wzmocnienia drgań w nadkładzie serii węglowej na obszarze GZW*. Katowice, Wydaw. GIG 2001.

**Recenzent:** dr inż. Grzegorz Mutke