

## Geofizyczne klasyfikacje właściwości górotworu

Zenon Pilecki\*

**Geophysical classifications of rock mass properties.** Prz. Geol., 51: 609–614.

*Summary.* First, a review of geotechnical classifications based on geophysical parameters for rock mass recognition has been presented. The basic interrelations of these classifications as well as graphs for determination of rock mass parameters have been described in some detail. Then, an example of rock mass quality and modulus of elasticity and deformation calculations for project of road tunnel in Węgierska Górka has been presented. Demonstrated are the consistence and great reliability of Barton (1996) method for the case of minimal values and Bestyński (1997) method used to determine deformation modulus. There is a need for further development of geophysical methods for rock mass properties recognition, especially seismic, using such parameters as S-wave velocity and attenuation.

**Key words:** geotechnics, rock mass classifications, geophysical methods, rock mass quality, elasticity and deformation modulus

W celu wyznaczenia właściwości górotworu dla potrzeb prowadzenia podziemnych robót górniczych, a zwłaszcza tunelowych, wykorzystuje się klasyfikacje geotechniczne. Klasyfikacje te służą również do wyznaczania właściwości podłoża skalnego w przypadku projektowania obiektów hydrotechnicznych czy dużych budowli na powierzchni, których stateczność zależy od jakości górotworu.

Klasyfikacje geotechniczne skupiają podstawowe informacje o górotworze z zakresu geologii inżynierskiej, geotechniki, geomechaniki i budownictwa podziemnego. Wśród nich znane są klasyfikacje oparte na parametrach geofizycznych. Najpowszechniej stosowanym parametrem jest prędkość rozchodzenia się fali podłużnej P.

W ogólnym ujęciu, klasyfikacje geotechniczne pozwalają skwantyfikować podstawowe cechy górotworu w oparciu o system punktowy opracowany metodą empiryczną. Na podstawie sumarycznej punktacji ocenianych cech wyznacza się klasy jakości górotworu, parametry stosowane w obliczeniach zachowania się układu górotwór-obudowa i dobiera się rodzaj obudowy dla konkretnych warunków. Klasyfikacje pozwalają na wyznaczenie takich parametrów górotworu jak: moduł sprężystości, spójność, kąt tarcia wewnętrznego czy stałe materiałowe kryterium wytrzymałościowego Hoeka–Browna, które posiadają dużą przydatność inżynierską w projektowaniu obiektów podziemnych.

Do najbardziej znanych klasyfikacji należą RMR<sub>89</sub> (Rock Mass Rating) opracowana po kilku modyfikacjach przez Bieniawskiego (1989) oraz Q (Rock Tunneling Quality Index) przedstawiona przez Bartona i in. (1974). Jednym z podstawowych elementów RMR<sub>89</sub> i Q jest klasyfikacja wskaźnika spękania górotworu RQD (Rock Quality Designation) opracowana przez Deere i in. (1967). W schemacie obliczeniowym podstawowych parametrów górotworu podanym przez Hoeka (1999) używa się klasyfikacji GSI (Geological Strength Index) opartej na wizualnej ocenie jakości górotworu (Hoek i in., 1995). Interesujące, szersze omówienie wymienionych klasyfikacji można znaleźć w pracy Singha i Goela (1999) oraz Pileckiego (1999). W polskim górnictwie podziemnym, zwłaszcza węgla kamiennego, korzysta się z wielu klasyfikacji właściwości

górotworu do oceny warunków urabiania, wykonania, utrzymania wyrobisk oraz do oceny wielkości zagrożeń naturalnych (Kidybiński, 1982; Dubiński & Konopko, 2000).

Praktyka pokazuje, że uśrednienie właściwości górotworu jakie daje większość klasyfikacji geotechnicznych jest akceptowane przez projektantów. W przypadku projektowania budowli liniowych, a zwłaszcza tuneli, podstawowe znaczenie ma uśrednienie warunków na dłuższych odcinkach górotworu. Technologia wykonania wyrobisk i jej ekonomika nie pozwalają na tak częste zmiany konstrukcyjne obudowy jak zmieniają się właściwości górotworu. Natomiast szczególnej uwagi konstruktora i wykonawcy wymagają strefy osłabienia, dla których zachodzi potrzeba dodatkowego wzmocnienia obudowy.

Generalnie, uśrednienie właściwości górotworu jakie uzyskuje się za pomocą klasyfikacji geotechnicznych polega na uogólnieniu empirycznych ocen wielu cech górotworu. Niekorzystne zmiany właściwości górotworu, wpływają na jego kompleksową ocenę — punktację klasyfikacji, i w konsekwencji wskazują na konieczność wprowadzenia zmian w obudowie wyrobiska. Posługiwanie się klasyfikacjami wymaga jednak dużej ostrożności, a przede wszystkim doświadczenia i znajomości procesów zachodzących w górotworze.

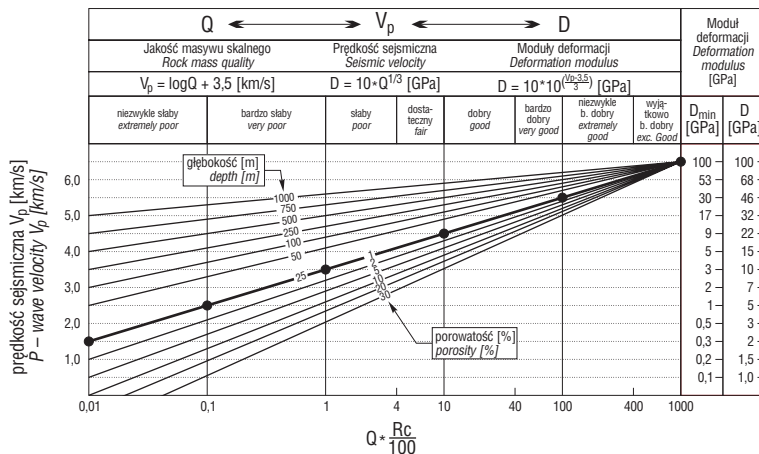
Poprawność wyznaczania parametrów górotworu można sprawdzić w wyniku obserwacji geotechnicznej zachowania się obudowy i górotworu w czasie wykonywania wyrobiska. Parametry te na ogół oblicza się metodą odwrotną na podstawie danych z monitoringu. Obliczenia takie pozwalają na wyjaśnienie wielu niepewności w ocenie parametrów na etapie ich rozpoznawania.

W dalszych rozdziałach niniejszej publikacji omówiono podstawowe klasyfikacje geotechniczne górotworu, w których wykorzystuje się wielkości wyznaczone metodami geofizycznymi. Klasyfikacje te są na ogół opracowywane dla konkretnych rodzajów górotworu, stąd niewiele jest klasyfikacji uniwersalnych. Na przykład klasyfikacja Q<sub>c</sub> przedstawiona przez Bartona (1996) należy do kategorii uniwersalnych, a klasyfikacja KFG (Bestyński, 1977) jest dostosowana do warunków lokalnych — fliszu karpackiego.

### Klasyfikacja sejsmiczna Q<sub>c</sub>

Klasyfikacja Q<sub>c</sub> (Barton, 1996) nazwana dalej sejsmiczną jest modyfikacją znanej klasyfikacji Q (Barton i in., 1974) pod kątem zastosowania metody sejsmicznej do wyznaczenia właściwości górotworu. Przy opracowywa-

\*Polska Akademia Nauk, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków



Ryc. 1. Nomogram klasyfikacji sejsmicznej  $Q_c$  (Barton, 1996)  
 Fig. 1. Diagram of  $Q_c$  seismic classification (Barton, 1996)

niem klasyfikacji wykorzystano wyniki badań wykonanych techniką refrakcji oraz prześwietlania międzyotworowego. Punktacja  $Q_c$  jest skorelowana z punktacją klasyfikacji RMR zgodnie z równaniem (Barton, 1996):

$$RMR = 15 \log Q_c + 50 \quad [1]$$

Barton (1996) dodatkowo zmodyfikował punktację systemu  $Q$  wprowadzając kolejny, siódmy parametr — wytrzymałość  $R_c$  materiału skalnego, w taki sposób, że:

$$Q = Q_c \cdot \frac{R_c}{100} \quad [2]$$

Modyfikacja ta ma na celu uzyskanie bardziej korzystnej korelacji modułu deformacji  $D$  z prędkością sejsmiczną  $V_p$  dla górotworów słabych. W efekcie otrzymuje się znormalizowaną punktację, która obniża lub podwyższa dotychczasową punktację  $Q$  dla skał odpowiednio słabszych lub mocniejszych od 100 MPa. Przy takich założeniach, podstawowa relacja obliczania  $Q_c$  przyjmuje postać (Barton, 1996):

$$Q_c = \left( \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \right) \frac{R_c}{100} \quad [3]$$

Barton (1996) badał górotwory zróżnicowane pod względem stopnia spękania od średnio do silnie spękanych, na głębokościach od 5 m do 50 m, średnio 25 m. Na podstawie analizy prędkości  $V_p$  i punktacji  $Q$  wyznaczył zależność:

$$V_p = \log Q + 3,5 \text{ [km/s]} \quad [4]$$

Natomiast po uwzględnieniu znanej zależności statycznego modułu deformacji  $D$  od punktacji  $Q$  (Barton, 1995):

$$D = 10 \cdot Q_c^{1/3} \quad [5]$$

oraz  $Q_c = Q \cdot \frac{R_c}{100}$ , otrzymał on zależność pozwalającą na wyznaczenie tego modułu w funkcji prędkości  $V_p$ :

$$D = 10 \cdot 10^{(V_p - 3,5) \cdot 3,0} \quad [6]$$

Wyznaczana wielkość modułu  $D$  jest wartością średnią, co wynika z metodyki interpretacji pomiarów sejsmicznych. Doświadczenie pokazuje, że możliwe są niższe wartości modułu związane ze strefą silnego spękania górotworu i wtedy zależność przyjmuje postać (Barton, 1996):

$$D_{\min} \approx 3Q_c^{1/2} \quad [7]$$

Konstruując nomogram Barton (1996) uwzględnił również głębokość i porowatość jako istotne czynniki mające wpływ na prędkość fal sejsmicznych (ryc. 1).

### Klasyfikacja geofizyczna utworów fliszu karpackiego (KFG)

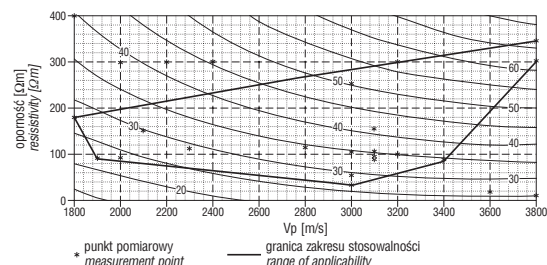
Bestyński (1997) opracował klasyfikację charakteryzującą geotechniczną przydatność utworów fliszu karpackiego. Klasyfikacja ta powstała na podstawie korelacji prędkości fali podłużnej  $V_p$  i oporności pozornej  $\rho$  z punktacją systemu RMR (Bestyński, 1997):

$$RMR = \exp(0,000369 V_p) \cdot 12,208 \text{ wsp. korelacji } r = 0,65 \quad [8]$$

$$RMR = \exp(0,00313D) \cdot 21,764 \text{ wsp. korelacji } r = 0,77 \quad [9]$$

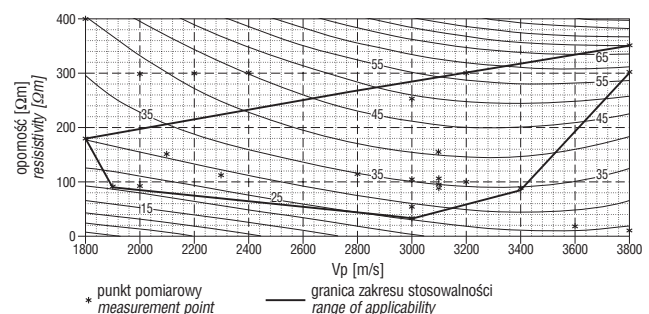
Generalnie, Bestyński (1997) przyjął, że właściwości geotechniczne fliszu karpackiego można wyrazić geofizycznym wskaźnikiem klasyfikacyjnym nazwanym KFG opisanym przez parametry geofizyczne  $V_p$  i  $\rho$ . Założył przy tym, że prędkość fali  $P$  zależy od wytrzymałości materiału skalnego oraz stopnia rozdrobnienia górotworu, a oporność pozorna  $\rho$  od parametrów opisujących głównie siły tarcia działające między elementami tego ośrodka.

Przyjmując, że parametry  $V_p$  i  $\rho$  są między sobą niezależne (niski współczynnik korelacji  $r = 0,23$  dla analizowanych 20 przypadków) przeprowadził aproksymację wielowymiarową w przestrzeni  $V_p, \rho$  i KFG, uzyskując najlepsze przybliżenie wielomianami 2 i 3 stopnia (Bestyński, 1977):



Ryc. 2. Zależność  $KFG = f(V_p, \rho)$  dla powierzchni 2-go stopnia (Bestyński, 1997)

Fig. 2. Dependence of  $KFG = f(V_p, \rho)$  of second order surface (Bestyński, 1997)



Ryc. 3. Zależność  $KFG = f(V_p, \rho)$  dla powierzchni 3-go stopnia (Bestyński, 1997)

Fig. 3. Dependence of  $KFG = f(V_p, \rho)$  of third order surface (Bestyński, 1997)

$$KGF = - 18,605 + 0,041\rho - 6,396 \cdot 10^{-5}\rho^2 + 0,024V_p + 2,839 \cdot 10^{-5}\rho V_p - 3,330 \cdot 10^{-6} V_p^2 \quad [10]$$

$$KGF = 7,6242 + 0,5329\rho - 0,0017\rho^2 + 1,2372\rho^3 - 0,041V_p - 0,00012V_p\rho + 3,2609 \cdot 10^{-7} V_p\rho^2 + 2,6759 \cdot 10^{-5} \cdot V_p^2 + 2,4878 \cdot 10^{-9} V_p^2\rho - 3,9271 \cdot 10^{-9} V_p^3 \quad [11]$$

Ilustracje tych zależności przedstawiono na ryc. 2 i 3.

Wyznaczony w powyższy sposób wskaźnik KFG jest równoważny punktacji RMR (Bestyński, 1997). Autor klasyfikacji podkreśla, że tym samym interpretacja geotechniczna KFG odpowiada klasyfikacji RMR i pozwala na „przeniesienie jej doświadczeń” na warunki utworów fliszu karpackiego.

Na podstawie pomiarów na stanowiskach wielkoskalowych Bestyński (1997) skorelował wielkość wskaźnika KFG ze statycznym modułem sprężystości  $E_s$  i modułem deformacji  $D$ . Otrzymał następujące zależności dla aproksymacji KFG powierzchnią 2 stopnia:

$$E_s = 371,6 \cdot \exp^{(0,050KFG)} \text{ [MPa]} \quad (\text{wsp. kor. } r = 0,86) \quad [12]$$

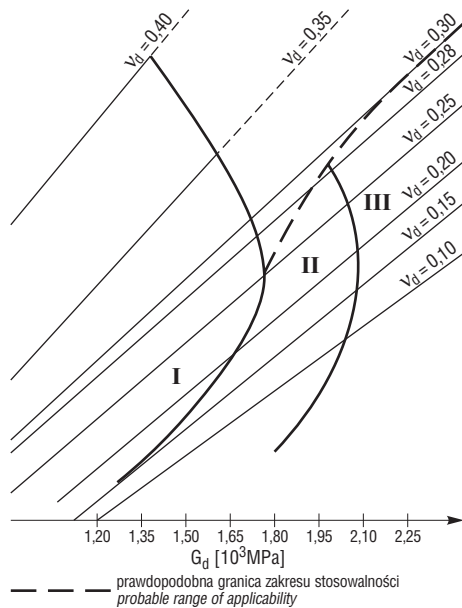
$$D = 204,1 \cdot \exp^{(0,058KFG)} \text{ [MPa]} \quad (\text{wsp. kor. } r = 0,87) \quad [13]$$

oraz dla aproksymacji powierzchnią 3-stopnia:

$$E_s = 386,2 \cdot \exp^{(0,048KFG)} \text{ [MPa]} \quad \text{wsp. kor. } r = 0,83 \quad [14]$$

$$D = 203,8 \cdot \exp^{(0,057KFG)} \text{ [MPa]} \quad \text{wsp. kor. } r = 0,87 \quad [15]$$

Analizując założenia klasyfikacji KFG należy zauważyć, że nie uwzględnia ona anizotropii utworów fliszu karpackiego, która ma duże znaczenie dla technologii drażenia wyrobiska. Wydaje się również wątpliwa niezależność prędkości  $V_p$  i dla ośrodka spękanego. Na przykład dla warunków zaciskania spękań w górotworze prędkość  $V_p$  wzrasta a oporność maleje. Przydatność klasyfikacji KFG została jednak pozytywnie zweryfikowana przy projektowaniu sztolni hydrotechnicznych zapory Świnna Poręba (Bestyński, 1997).



Ryc. 4. Klasyfikacja skłonności węgla do tąpnięć metodą  $G_{WT}$  (Dworak, 1990)

Fig. 4. Classification of hard coal prone to rock burst by  $G_{WT}$  method (Dworak, 1990)

### Klasyfikacje geofizyczne górotworu dla potrzeb podziemnej eksploatacji złóż

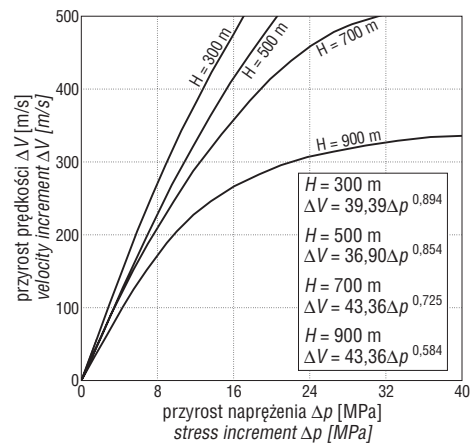
W latach osiemdziesiątych opracowano klasyfikację skłonności pokładu węgla do tąpnięć przy wykorzystaniu pomiaru prędkości fal podłużnej P i poprzecznej S (Goszcz & Dworak, 1982; Goszcz, 1985; Dworak, 1990). Podstawą tej klasyfikacji jest geofizyczny wskaźnik tąpliwości  $G_{WT}$ . Obejmuje on trzy klasy pokładu węgla — nieskłonny do tąpnięć (I), skłonny (II) i silnie skłonny (III). W celu zaliczenia pokładu do konkretnej klasy wykorzystuje się nomogram przedstawiony na ryc. 4.

I, II, III — klasy skłonności do tąpnięć, I, II, III — classes of rockburst danger;

$V_d$  — dynamiczny współczynnik Poissona,  $V_d$  — dynamic Poisson's ratio;

$G_d$  — dynamiczny moduł sprężystości postaciowej,  $G_d$  — dynamic shear modulus

Znajomość anomalnych zmian prędkości fal sejsmicznych pomierzonych w pokładach węgla jest podstawą tzw. sejsmicznej metody oceny zagrożenia wstrząsami górniczymi kopalniach węgla (Dubieński, 1989). Metoda ta jest szeroko stosowana w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w celu optymalnego projektowania użycia środków profilaktyki tąpaniowej. W celu wyznaczenia



Ryc. 5. Zależność przyrostu prędkości fali sejsmicznej w pokładzie węgla od przyrostu pionowej składowej naprężenia (Dubieński, 1989)

Fig. 5. Dependence of seismic velocity increment in coal seam on vertical stress increment (Dubieński, 1989)

Tab. 1. Klasyfikacja sejsmiczna oceny wzrostu naprężenia w warunkach kopalń GZW (Dubieński, 1989)

Table 1. Seismic classification of stress increase in coal mines of the Upper Silesian Coal Basin (Dubieński, 1989)

Stopień wzrostu naprężenia Level of stress increase	Charakterystyka wzrostu naprężenia Description of stress increase	Anomalia sejsmiczna Seismic anomaly %	Przyrost naprężenia Stress increase %
0	brak no increase	poniżej 5 less than	poniżej 20 less than
1	słaby low	5–15	20–60
2	średni medium	15–25	60–140
3	duży high	ponad 25 more than	ponad 140 more than

anomali sejsmicznej, wymagana jest znajomość prędkości odniesienia  $V_0$  — charakteryzującej warunki stanu naprężenia pierwotnego. Prędkość ta jest zależna od głębokości  $H$  (Dubiński, 1989):

$$V = 1200 + 4,83H^{0,76} \quad [16]$$

Głębokość ma również wpływ na wielkość anomali sejsmicznej związanej z przyrostem naprężenia  $\Delta p$ , co zostało zilustrowane na ryc. 5.

Z przedstawionych zależności wynika, że konkretna wartość anomali sejsmicznej charakteryzuje odmienny stan naprężenia na różnej głębokości. Dla inżynierskiego zastosowania tej zależności Dubiński (1989) uśrednia i skaluje wyznaczone wielkości. Na przykład, w tab. 1 przedstawiono klasyfikację dla przedziału głębokości od 500 do 900 m.

### Inne klasyfikacje geofizyczne

Sjögren i in. (1979) przeprowadzili badania związku pomiędzy prędkością fali podłużnej  $P$ , a liniową gęstością spękań i wskaźnikiem  $RQD$ . Dokonali oni interpretacji ok. 115 km profili refrakcyjnych i analizy spękań 2850 m rdzeni z mocnych skał takich jak granity, gnejsy, amfibolity, pegmatyty, anortozyty i kwarcyty. Na podstawie znajomości prędkości fali  $P$  sklasyfikowali oni górotwór w klasach odpowiadających klasom  $RQD$ . Parametrem jest sejsmiczny wskaźnik  $Q_I$  (*Quality Index*) obliczany następująco (Sjögren i in., 1979):

$$Q_I = 100 \frac{V_p}{V_{p0}} \quad [17]$$

gdzie:

$V_{p0}$  — prędkość fali  $P$  w ośrodku niespękanym,

**Tab. 2. Klasyfikacja górotworu według sejsmicznego wskaźnika jakości górotworu  $Q_I$  na podstawie Sjögrena i in. (1979)**  
Table 2. Rock mass quality classification by seismic index  $Q_I$  based on Sjögren i in. (1979)

Wartość $Q_I$	100–91	90–76	75–51	50–25	< 25
Klasa górotworu Class of rock mass	bardzo dobry very good	dobry good	średnio dobry fair	słaby weak	bardzo słaby

**Tab. 3. Klasyfikacja górotworu na podstawie prędkości fali sejsmicznej według Masudo (Thiel, 1980)**  
Table 3. Rock mass classification based on seismic velocity according to Masudo (Thiel, 1980)

Skala Rock	Prędkość fali bezpośredniej w ośrodku sztolni Velocity of direct wave in the wall of tunnel [m/s]	Prędkość fali przechodzącej między sztolniami Velocity of wave passing between tunnels [m/s]	Klasa litologiczna * Lithological class *
Wapień Limestone	< 2000 2000–3000 3000–4500 > 4500	< 2300 2300–3300 3300–4500 > 4500	D, C <sub>1</sub> D, C <sub>m</sub> C <sub>n</sub> , B B, A
Skały typu łupku, andezytu Rocks type of shales, andesite	< 2000 2000–3000 3000–4000 > 4000	< 2300 2300–3300 3300–4000 > 4000	D, C <sub>1</sub> C <sub>m</sub> C <sub>n</sub> B, A
Granit, gnejs Granite, gneis	< 1500 1500–2500 2500–4000 > 4000	< 1800 1800–2800 2800–4000 > 4000	D, C <sub>1</sub> C <sub>m</sub> C <sub>n</sub> B, A
Piaskowiec Sandstone	< 1500 1500–2500 2500–3500 > 3500	< 1500 1800–2800 2800–3800 > 3800	D, C <sub>1</sub> C <sub>m</sub> C <sub>n</sub> , B B, A

A — skała niezwiertzała twarda, składniki mineralne niezwiertzałe, spękania zamknięte, brak wietrzenia w pobliżu części kontaktowych spękań;

A — not weathered hard rock, not weathered mineral components, closed joints, contact walls of joints not weathered;

B — skała niezwiertzała, zwiertzała, w początkowym stadium wietrzenia składników mineralnych, spękania są zamknięte;

B — not weathered consistent rock, primary stage of weathering of mineral components, closed joints;

C<sub>n</sub> — skała zwiertzała w stadium zaawansowanego wietrzenia, składniki mineralne zmienione nieznacznie, części kontaktowe spękań nieznacznie zwiertzałe;

C<sub>n</sub> — consistent rock in the stage of intensified weathering, mineral components slightly changed, contact walls of joints slightly weathered;

C<sub>m</sub> — skała raczej zwiertzała, większość składników mineralnych, z wyjątkiem kwarcu uległa zwiertzeniu, spękania są otwarte, powierzchnie spękania są silnie zwiertzałe;

C<sub>m</sub> — rather consistent rock, the most of mineral components weathered except of quartz, open joints, contact walls of joints strongly weathered;

C<sub>1</sub> — skała zwiertzała, miękka, na ogół z dużą liczbą spękań;

C<sub>1</sub> — weathered soft rock, generally a great number of joints;

D — skała z bardzo dużą liczbą dużych spękań oddzielających poszczególne bloki skalne.

D — rock with great number of large joints separated rock blocks

$V_p$  — prędkość fali P w górotworze.

Przedziały zmienności wskaźnika  $Q_t$  odpowiadają klasom górotworu wyróżnionym w tab. 2.

Jedną z pierwszych charakterystyk górotworu opartych na kompleksowych badaniach geofizycznych przedstawił Dziewański (1985). Klasyfikacja ta oparta na wynikach metod sejsmicznej, elektrooporowej i grawimetrycznej pozwalała na jakościową ocenę właściwości górotworu dla potrzeb projektowania sztolni hydrotechnicznej elektrowni Młoty.

Znana jest również klasyfikacja (tab. 3) oparta na sejsmicznych badaniach inżynierskich, podana przez Masudo (Thiel, 1980).

A — skała niezwięzła twarda, składniki mineralne niezwięzłe, spękania zamknięte, brak wietrzenia w pobliżu części kontaktowych spękań;

B — skała niezwięzła, zwięzła, w początkowym stadium wietrzenia składników mineralnych, spękania są zamknięte;

$C_n$  — skała zwięzła w stadium zaawansowanego wietrzenia, składniki mineralne zmienione nieznacznie, części kontaktowe spękań nieznacznie zwięzłe;

$C_m$  — skała raczej zwięzła, większość składników mineralnych, z wyjątkiem kwarcu uległa zwięzleniu, spękania są otwarte, powierzchnie spękania są silnie zwięzłe;

$C_1$  — skała zwięzła, miękka, na ogół z dużą liczbą spękań;

D — skała z bardzo dużą liczbą dużych spękań oddzielających poszczególne bloki skalne.

6. Przykład oceny właściwości górotworu za pomocą klasyfikacji geofizycznych dla potrzeb projektowania tunelu drogowego w Węgierskiej Górcie.

**Położenie terenu badań.** Teren badań położony był w zachodniej części Karpat fliszowych na granicy Beskidu

Śląskiego i Beskidu Żywieckiego. Pod względem geologicznym na terenie tym występują utwory fliszowe wieku kredowego — paleogenu (eocen–oligocen) oraz utwory czwartorzędowe.

Wzdłuż projektowanej trasy tunelowej w Węgierskiej Górcie utwory fliszu karpackiego wchodzi w skład dwóch jednostek geologicznych — śląskiej i przedmagurskiej. Tektonika fliszu jest złożona, a bieg i upad warstw zmienny. Generalnie, warstwy mają rozciągłość SW–NE, a kierunek upadu tych warstw zmienia się od 40 do 70° ku S.

**Zakres i metodyka badań.** Wykonano 1600 mb refrakcyjnych profili sejsmicznych podłużnych — wzdłuż osi projektowanego tunelu i poprzecznych — prostopadłych do niej. Rozstawy posiadały długość 115 m i zakładkę 15 m, a odstęp między czujnikami wynosił 5 m. Fałę sejsmiczną wzbudzano za pomocą uderzenia 6 kg młotem. Sygnał został zarejestrowany z taktom 0,125 ms. Czas rejestracji wynosił 0,512 s, przy 5–8 krotnym składaniu. Pomiary przeprowadzono za pomocą 24. kanałowej aparatury sejsmicznej Geode produkcji USA. Aparatura ta charakteryzuje się dynamiką 144 dB i rozdzielczością 24 bitów. Do pomiarów wykorzystano geofony o częstotliwości własnej 14 Hz produkcji Geospace, USA. System pomiarowy był obsługiwany za pomocą oprogramowania firmy Geometrics Inc. produkcji USA. Dane zostały zapisane w formacie sejsmicznym SEG–2.

Zarejestrowane trasy sejsmiczne po sortowaniu i składaniu zostały przefiltrowane częstotliwościowo i prędkościowo, a następnie wyznaczono czasy wejścia fali refrakcyjnej. Do przetwarzania danych wykorzystano program PickWin95, a interpretację sejsmiczną wykonano w programie Plotrefa. W programie interpretacyjnym do obliczenia modelu prędkościowego i głębokościowego ośrodka wykorzystano metodę uogólnioną czasu wzajemnego (*generalised reciprocal traveltimes method*). Korekty

**Tab. 4. Parametry geotechniczne górotworu wyznaczonych na podstawie refrakcyjnych pomiarów sejsmicznych dla projektowanego tunelu Węgierska Górka**

Table 4. Rock mass geotechnical parameters determined on the basis of seismic refraction data for planned Węgierska Górka tunnel

Odcinek pomiarowy Survey section od km — do km	RMR [pkt]	Q [pkt]	KFG [pkt]	D średn. (Barton, 1996) [GPa]	D min. (Barton, 1996) [GPa]	D (Bestyński, 1997) [GPa]	Es (Bestyński, 1997) [GPa]	Es (Serafim & Pereira, 1980) [GPa]
10+970–11+030	24,3	0,11	36,3	4,8	1,0	1,7	2,3	2,3
11+031–11+080	22,2	0,09	35,3	4,5	0,9	1,6	2,2	2,0
11+081–11+145	23,3	0,10	35,8	4,6	0,9	1,6	2,2	2,2
11+146–11+195	24,3	0,11	36,3	4,8	1,0	1,7	2,3	2,3
11+196–11+240	24,3	0,11	31,4	4,8	1,0	1,3	1,8	2,3
11+241–11+280	24,3	0,11	28,9	4,8	1,0	1,1	1,6	2,3
11+281–11+350	25,3	0,13	29,2	5,0	1,0	1,1	1,6	2,4
11+351–11+405	22,2	0,09	30,6	4,5	0,9	1,2	1,7	2,0
11+406–11+450	19,1	0,06	26,4	4,0	0,8	0,9	1,4	1,7
11+451–11+510	19,1	0,06	33,9	4,0	0,8	1,5	2,0	1,7
11+511–11+580	19,1	0,06	31,6	4,0	0,8	1,3	1,8	1,7
11+581–11+640	19,1	0,06	31,6	4,0	0,8	1,3	1,8	1,7
11+641–11+705	17,1	0,05	25,8	3,7	0,7	0,9	1,3	1,5
11+706–11+745	15,0	0,04	27,9	3,4	0,7	1,0	1,5	1,3
11+746–11+815	13,5	0,03	27,3	3,2	0,6	1,0	1,5	1,2
11+816–11+880	12,9	0,03	27,1	3,2	0,6	1,0	1,4	1,2

modelu dokonano metodą analizy odwrotnej. Poprzez zmianę położenia granic modelu głębokościowego dopasowano hodografy obliczone do obserwowanych w taki sposób, aby średni błąd kwadratowy tego dopasowania był minimalny.

**Wyniki badań.** Generalnie, wyniki wykonanych badań sejsmicznych przedstawiono w formie przekrojów sejsmicznych, mapy sejsmicznej podłoża skalnego oraz zestawień obliczonych wielkości opisujących właściwości górotworu. Metodykę tych obliczeń szerzej omówiono w pracy Dziewańskiego i in. (2001).

Wielkość modułu deformacji  $D$  wyznaczono z zależności korelacyjnych na podstawie prędkości fali  $P$ . Punktacja klasyfikacji  $Q$  została wyznaczona z zależności [4] przy znajomości prędkości refrakcyjnej  $V_p$ . Punktację klasyfikacji RMR wyznaczono z zależności (Bieniawski, 1984):

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad [17]$$

Natomiast moduł sprężystości  $E_s$  z zależności Serafima i Pereiry (1980) którzy zmodyfikowali zależność Bieniawskiego (1978) dla słabszych górotworów:

$$E_s = 10^{(RMR-10)/40}, \text{ dla } RMR < 58 \quad [18]$$

Punktację klasyfikacji KFG wyznaczono z zależności [10]. Dla potrzeb klasyfikacji KFG przeprowadzono pomiary elektrooporowe (Krzeszowiec, 2002).

W tab. 4 zestawiono obliczone parametry geotechniczne górotworu dla tunelu Węgierska Górka. Przyjęto, że warunki drażenia na poziomie tunelu będą odpowiadać warunkom pomierzonym w stropowej części podłoża.

Obliczone parametry to punktacja RMR,  $Q$  i KFG oraz moduły deformacji  $D$  i sprężystości  $E_s$ . Wyznaczone moduły  $D_{\min}$  wg Bartona (1996) i moduły  $D$  wg Bestyńskiego (1997) osiągają zbliżone wartości. Natomiast moduły  $D$  średni wg Bartona (1996) przyjmuje zbyt wysokie wartości. W przypadku modułów sprężystości zachodzi dobra korelacja wyników dla zależności Bestyńskiego (1997) i Serafima i Pereiry (1980), jednakże może to świadczyć o poprawnym skalowaniu klasyfikacji KFG wg klasyfikacji RMR. Niemniej jednak uzyskane wielkości  $E_s$  i  $D$  mieszczą się w zakresie wyników pomiarów tych wielkości w utworach fliszu karpackiego wykonanych metodą dylatometryczną (Zabuski i in., 1999).

### Podsumowanie

W ostatnich kilkudziesięciu latach badania właściwości górotworu za pomocą metod geofizycznych, niewątpliwie znajdują się w stanie intensywnego rozwoju związanego z budownictwem podziemnym i wielkogabarytowym na powierzchni ziemi. Metody te umożliwiają empiryczną ocenę właściwości górotworu w miejscu jego występowania, na dłuższym odcinku, w sposób szybki i bardziej efektywny w porównaniu do innych metod. Do najbardziej rozpowszechnionych należy metoda sejsmiczna, pomimo, że jest pracochłonna i wymaga specjalistycznej aparatury i oprogramowania.

Ocena właściwości górotworu za pomocą metody sejsmicznej opiera się głównie na prędkości fali podłużnej  $P$ . Należy sądzić, że pomimo trudności w wyznaczeniu prędkości fali poprzecznej  $S$  i tłumienia, parametry te powinny dostarczyć dodatkowych informacji o właściwościach górotworu. Trudności w dalszym rozwoju metody sejsmicznej stwarza niewystarczająca znajomość zależności pomiędzy parametrami dynamicznymi i statycznymi,

zwłaszcza z uwzględnieniem skali wymiaru. Nierozpoznana pozostaje również zależność pomiędzy właściwościami wytrzymałościowymi górotworu a parametrami sejsmicznymi.

Podsumowując należy podkreślić, że przydatność metody sejsmicznej i innych metod geofizycznych w rozwiązywaniu zagadnień geotechnicznych jest znacząca i niewątpliwie będzie się zwiększać.

Badania zostały częściowo sfinansowane z projektu badawczego KBN nr T12A01720.

### Literatura

- BARTON N. 1995 — The influence of joint properties in modeling of jointed rock asses. Keynote Lecture, Proc. 8<sup>th</sup> ISMR Congress Tokyo, vol. III.
- BARTON N. 1996 — Estimating rock mass deformation modulus for excavation disturbed zone studies. Proc. of Excavation disturbed zone workshop, eds. J. B. Montino & C. D. Martin, September 20 1996, Manitoba, Canada, 133–144.
- Barton N. R., LIEN R. & LUNDE J. 1974 — Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6: 189–239.
- BESTYŃSKI Z. 1997 — Ocena właściwości geotechnicznych fliszu karpackiego na podstawie badań geofizycznych. Praca doktorska, AGH, Kraków.
- BIENIAWSKI Z. T. 1978 — Determining rock mass deformability: experience from case-histories. *Int. J. Rock Mech. Min. Sc. & Geomech. Abstr.*, 15: 237–247.
- BIENIAWSKI Z. T. 1984 — Rock mechanics design in mining and tunneling. Balkema, Rotterdam.
- BIENIAWSKI Z. T. 1989 — Engineering rock mass classification. Wiley, New York.
- DEERE D. U., HENDRON A. J., PATTON F. D. & CORDING E. J. 1967 — Design of surface and near surface construction in rock. Proc. 8<sup>th</sup> US Symp. on Rock Mech., New York, 237–302.
- DUBIŃSKI J. 1989 — Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górnictwem w kopalniach węgla kamiennego. Pr. Nauk. GIG, seria dodatkowa.
- DUBIŃSKI J. & KONOPKO W. 2000 — Tąpnięcia — ocena, prognoza i zwalczanie. Wyd. GIG, Katowice.
- DWORAK J. 1990 — Wykorzystanie kinematycznych charakterystyk fal sejsmicznych w diagnostyce górotworu. Praca doktorska. GIG.
- DZIEWAŃSKI J. 1985 — Badanie metodami geofizycznymi właściwości masywu skalnego. *Mat. I Kraj. Konf. Nauk. Techn. „Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych”*, t. I, Jaworze, 6–8 listopada 1985, 85–93.
- DZIEWAŃSKI J., PILECKI Z. & SROCYŃSKI W. 2001 — Zagadnienia badań geologiczno-inżynierskich w projektowaniu tuneli komunikacyjnych w utworach fliszu karpackiego — na przykładzie tunelu w Lalikach. *Studia, Rozprawy, Monografie* 96, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- GOSZCZ A. 1985 — Prześwietlanie sejsmiczne jako jedna z metod oceny stanu zagrożenia tąpnięciami. *Prz. Górn.*, 11–12: 354–358.
- GOSZCZ A. & DWORAK J. 1982 — Określenie skłonności do tąpnięć na podstawie analizy tektonofizycznej oraz pomiarów sprężystych pokładu metodą sejsmiczną w wyrobiskach górnictw. *Arch. Górnictwa*, 27, z. 1–2.
- HOEK E. 1999 — Rock Engineering — course notes by Evert Hoek, Toronto, (manuskrypt).
- HOEK E., KAISER P. K. & BAWDEN W. F. 1995 — Support of underground excavations in hard rock. Balkema, Rotterdam.
- KIDYBIŃSKI A. 1982 — Podstawy geotechniki kopalnianej. Wyd. Śląsk, Katowice.
- KRZESZOWIEC M. 2002 — Badanie górotworu metodą geofizyczną — elektrooporową wzdłuż tuneli projektowanych w ciągu drogi ekspresowej S–94 na odcinku Węgierska Górka–Milówka, Dokumentacja badań elektrooporowych „Mak” P.W, Mysłówice, marzec 2002.
- PILECKI Z. 1999 — Metoda oceny zachowania się masywu skalnego wokół wyrobiska na podstawie badań *in situ*. *Studia i Rozprawy*: 59, Wyd. PAN IGSMiE, Kraków.
- SERAFIM J. L. & PEREIRA J. P. 1983 — Consideration of the geomechanical classification of Bieniawski. *Proc. Int. Symp. on Eng. Geology and Underg. Constr.*, Lisbon, vol. 1 (II): 33–44.
- SINGH B. & GOEL R. K. 1999 — Rock Mass Classification. Elsevier, Oxford.
- SJÖGREN B., OFSTHUS A. & SANDBERG J. 1979 — Seismic classification of rock mass qualities. *Geophys. Pros.*, 27: 409–442.
- THIEL K. 1980 — Mechanika skał w inżynierii wodnej. PWN, Warszawa.
- ZABUSKI L., THIEL K. & BOBER L. 1999 — Osuwiska we fliszu Karpat Polskich. Wyd. IBW PAN, Gdańsk.