

SEJSMICZNA OCENA SPĘKANIA GÓROTWORU KARBŃSKIEGO W REJONACH PŁYTKIEJ DZIAŁALNOŚCI GÓRNICZEJ

Seismic evaluation of the Carboniferous rock mass destruction in shallow mining regions

Jerzy DEC

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Katedra Geofizyki;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: geodeci@agh.edu.pl*

Abstract: Results of seismic investigations are presented in this paper. Investigation were carried out in regions of shallow coal exploitation. In those regions we can observe strongly disturbed zones. In such case seismic measurements show the strong velocity anomalies. Velocity of seismic P wave strongly depends on the cracks density. As a results of investigation a relationship between *RQD* (Rock Quality Designation), cracks density and P wave velocity is shown. Quality index *QI* is the best estimator of the real Carboniferous rock mass destruction. As a final result the seismic scale of the Carboniferous rocks evaluation is proposed.

Key words: cracks density, P wave velocity, Rock Quality Designation

Słowa kluczowe: spękania, prędkość fali P, jakość masywu skalnego

WPROWADZENIE

W ramach realizacji zadań statutowych Katedry Geofizyki AGH w latach 2006–2008 na terenach górniczych wykonano szereg sejsmicznych badań eksperymentalnych, mających na celu ocenę stopnia zniszczenia górotworu i jego dezintegracji.

Badania realizowane były na obszarach górniczych dawnej i obecnej eksploatacji węgla na terenie Jaworzna, Chorzowa, Katowic, Trzebinii. Wszystkie badania prowadzono pod kątem oceny spękania i określenia wgłębnej deformacji górotworu w aspekcie zagrożeń dla powierzchni terenu, tak deformacjami nieciągłymi jak i zagrożeniami sufozją, osiadaniem, a także w aspekcie geotechnicznym, tj. pod kątem stabilności podłoża.

Badania sejsmiczne były zlokalizowane na obszarach dawnej eksploatacji węgla, w miejscach występowania starych, płytkich wyrobisk górniczych. W miejscach prowadzonych badań głębokość występowania wyrobisk wynosiła od kilku metrów do około 60 metrów. W takiej sytuacji wyrobiska te stanowią duże zagrożenie dla stabilności powierzchni terenu.

W przypadku, gdy płytko leżące złożę lub stare wyrobiska ulegają zniszczeniu, powstające odkształcenia górotworu oddziaływać mogą na powierzchnię terenu. W górotworze powstają naprężenia zależne od naprężeń początkowych, a więc od głębokości i od geometrii granicy wyrobiska (Marczak & Ślusarczyk 1997). Powodują one w skałach zwiezłych spękanie materiału skalnego, a w ośrodkach plastycznych ciągle odkształcenie ośrodka i jego przesunięcie. Deformacje ciągłe polegają na odkształceniach sprężystych i plastycznych warstw nie powodujących przerwania ich ciągłości. Deformacje nieciągłe objawiają się jako spękania, przemieszczenia bloków skalnych doprowadzające do przerwania ciągłości warstw. Najbardziej groźne dla powierzchni są deformacje nieciągłe górotworu. Może to być migrujący ku powierzchni system spękań (migracja pustek) lub nieciągłe przemieszczenie bloków skalnych. W przypadku ośrodków zwiezłych i sztywnych badania sejsmiczne pozwalają na określanie stref spękanych sięgających powierzchni i miejsc przemieszczeń bloków skalnych. Dla ośrodków plastycznych badania te wskazać mogą strefy odkształceń sprężystych i plastycznych warstw.

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI SKAŁ W PRZYPOWIERZCHNIOWEJ PARTII GÓROTWORU

Liczne doświadczenia badawcze wskazują, że wartości prędkości fali P są funkcją stopnia spękania masywu skalnego (Barton 1996, Dec 2004a, b) i dlatego ważnym parametrem opisującym własności skał w powiązaniu z ich spękaniami jest prędkość fali (El-Naqa 1996).

Na podstawie znajomości prędkości fali można sklasyfikować masyw skalny w klasach sejsmicznych odpowiadających klasom *RQD* (*Rock Quality Designation*). W tym przypadku parametrem jest sejsmiczny wskaźnik *QI* (*Quality Index*) obliczany według zależności

$$QI = 100 \cdot V_{sr} / V_0 \quad (1)$$

gdzie:

- V_{sr} – wartość średnia prędkości fali P mierzonej w masywie skalnym,
- V_0 – prędkość fali P mierzona w masywie nie spękanym.

Przedziały zmienności wskaźnika *QI* odpowiadają klasom podanym w tabeli 1.

Tabela (Table) 1

Quality Index *QI* jako miara jakości masywu skalnego
Quality Index QI as an indicator of rock mass quality

QI	100÷91	90÷76	75÷51	50÷25	< 25
Klasa masywu skalnego <i>Class of rock massif</i>	bardzo dobry <i>very good</i>	dobry <i>good</i>	średnio dobry <i>fair</i>	słaby <i>poor</i>	bardzo słaby <i>very poor</i>

Wykonanie badań refrakcyjnych pozwala na pokazanie struktury i morfologii skał stanowiących bezpośrednie podłoże podczwartorzędowe, a więc w sensie geotechnicznym podłoże przenoszące obciążenia. Dlatego znajomość jego właściwości i struktury pozwala na ocenę zagrożeń wynikających z jego nieciągłości i odkształcalności. Strefy silnie spękane są zarówno podatne na odkształcenia, jak i niosą zagrożenia procesami sufozji. W miejscach, gdzie masyw skalnych nie jest spękany lub spękania są małe, ale z kolei górotwór jest podzielony

deformacjami na bloki skalne, na kontaktach bloków mogą wystąpić zagrożenia sufozyjne dla warstwy czwartorzędowej i dalej dla powierzchni terenu.

Problematykę tą przedstawiają wyniki badań prowadzonych na obszarze górnictwem likwidowanej Kopalni Węgla „Katowice” w Katowicach. Ze względu na występowanie licznych starych, płytkich wyrobisk górniczych, stanowiących tu bardzo duże zagrożenie dla powierzchni, badania ukierunkowano na określanie ciągłości powierzchni stropu karbonu i właściwości fizyko-mechanicznych skał karbońskich poniżej tej granicy. Pozwoliło to na ocenę realnych zagrożeń powierzchni terenu na podstawie wyników badań sejsmicznych.

W rejonie tym górotwór zbudowany jest ze skał karbońskich, przykrytych czwartorzędem. Utwory czwartorzędowe stanowią piaski ilaste i gliny o miąższości około kilku metrów. Karbon reprezentowany jest przez „warstwy siodłowe”, w których występują głównie piaskowce, iłowce, łupki i pokłady węgla serii 500. W rejonie badań strop karbonu jest powierzchnią erozyjną wychodni tych skał. Upad warstw jest tu nieznaczny i wynosi $6\div8^\circ$. W obrębie pokładów 501, 504 i 510 występują stare wyrobiska z przełomu wieków (1890–1938). Głębokość ich występowania wynosi $20\div50$ m.

Stwierdzono liczne miejsca, w których górotwór zachowuje ciągłość, a skały nie są spękań. Prędkość fali P w tych obszarach osiąga wartości powyżej 2000 m/s. Jednak w większości badanych miejsc występuje silne spękanie skał karbońskich poniżej powierzchni stropu oraz przemieszczenia bloków skalnych (Fig. 1). Prędkość fali ma w tym przypadku wartości w przedziale $700\div1800$ m/s i występują przerwy ciągłości granicy refrakcyjnej.

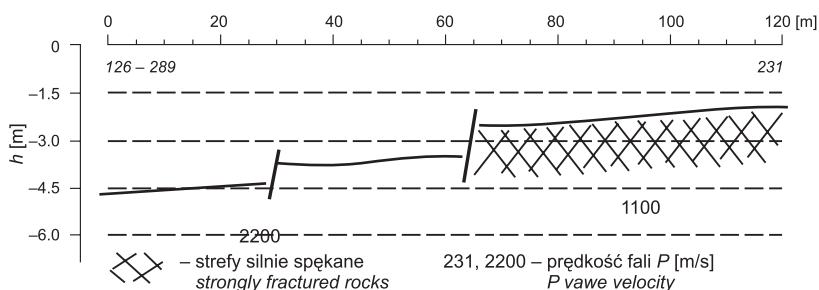


Fig. 1. Refrakcyjny przekrój głębokościowy – Katowice, ul. Morelowa. Masyw podzielony na bloki skalne, lokalnie silnie spękań

Fig. 1. Refraction depth section along Morelowa street in Katowice. Rock mass divided to blocks, locally cracked

Wyniki badań sejsmicznych, prowadzonych w różnych miejscach, korelowane były z wynikami prac wiertniczych tak jakościowo (opis rdenia) jak i ilościowo (norma RQD). W przeważającej ilości przypadków masyw skalny karbonu reprezentowany był w partii stropowej przez piaskowce drobno- i średnio-ziarniste. W zależności od miejsca badań partia stropowa górotworu charakteryzowała się różnym stopniem spękania, występowaniem wyrobisk stojących jak i wyrobisk zniszczonych, obserwowanych w profilu wiertniczym jako strefy rozluźnione. Często w partii stropowej występuje zwietrzelina, jednak poniżej niej w miejscach, gdzie wyrobisk nie ma lub zachowały się jako stojące, spękania masywu są małe lub nie występują. Natomiast ponad zniszczonymi wyrobiskami w różnym stopniu rozwinął się system spękań.

Stan górotworu silnie wpływa na wartość mierzonej w masywie karbońskim prędkości fali podłużnej, która to wartość, zgodnie z teoretycznymi przewidywaniami, koreluje ze stopniem spękania i podzielnością skał.

Uzyskane dane są reprezentatywne dla obszaru Górnego Śląska, gdyż obejmują dość zróżnicowane rejony płytkiego występowania warstw łaziskich, rudzkich i siodłowych. W miejscach badań często stwierdzono wychodnie tych warstw i znajdujące się w nich płytkie, stare wyrobiska w pokładach grupy 200, 400 i 500.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki prac sejsmicznych przeprowadzonych w sąsiedztwie wykonanych otworów wiertniczych. Na podstawie analizy rdzeni uzyskanych z tych otworów określono wartość parametru RQD charakterystycznego dla ośrodka skalnego w danym miejscu.

Tabela (Table) 2

Prędkość fali sejsmicznej P i parametr geotechniczny RQD

P wave velocity and RQD values

Lokalizacja badań <i>Location of investigation</i>	Prędkość fali P <i>P wave velocity v [km/s]</i>	Wartości rzeczywiste <i>Real value RQD [%]</i>
Katowice – ul. Kopalnia	2.121	92
Katowice – ul. Morelowa	2.098	82
Katowice – Nowe Centrum Handlowe	2.014	88
Jaworzno – obszar górniczy Jaworzno III	1.953	77
Katowice – ul. Kopalnia	1.955	74
Katowice – Nowe Centrum Handlowe	1.881	69
Jaworzno – obszar górniczy Jaworzno III	1.745	74
Katowice – ul. Ściegiennego	1.112	38
Trzebinia – obszar KWK Siersza	1.681	66
Jaworzno – obszar górniczy Jaworzno III	1.513	66
Chorzów – ul. Katowicka	1.452	55
Katowice – Szopienice	1.367	59
Chorzów – ul. Kaszubska	1.251	50
Katowice – ul. Olszewskiego	1.258	58
Jaworzno – obszar górniczy Jaworzno III	1.166	49
Katowice – ul. Dębowa	1.121	38
Jaworzno – obszar górniczy Jaworzno III	0.856	44
Jaworzno – obszar górniczy Jaworzno III	0.809	31

Zmierzone wartości prędkości fali podłużnej są generalnie niezależne od kierunku profilu pomiarowego w stosunku do rozciągłości warstw. Oznacza to, że mierzona dla powierzchni stropu skał karbońskich wartość prędkości opisuje właściwości masywu skalnego, a nie właściwości poszczególnych warstw o różnej litologii (np. mułowce, piaskowce). Zaobserwowane natomiast na niektórych krzyżówkach profili różnice wartości prędkości (nawet do 20%) należy wiązać z anizotropią ośrodka jako efektem występowania spękań. W takich

przypadkach dla celów korelacji z wynikami geotechnicznymi zastosowano uśrednione wartości prędkości.

Maksymalne wartości prędkości, zmierzone dla masywu karbońskiego w jego partii przypowierzchniowej, osiągają wielkość około 2600 m/s. Również w tych częściach masywu uzyskano z otworów wiertniczych długie, niepodzielne fragmenty rdzenia ($RQD > 85$). Dlatego też maksymalną wartość prędkości przyjęto jako charakterystyczną dla masywu niespękanego i w odniesieniu do niej obliczano parametr QI , opisujący spękanie górotworu. Figura 2 przedstawia wykres QI w funkcji prędkości fali P na tle rzeczywistych wartości RQD oraz estymatory rozkładu RQD .

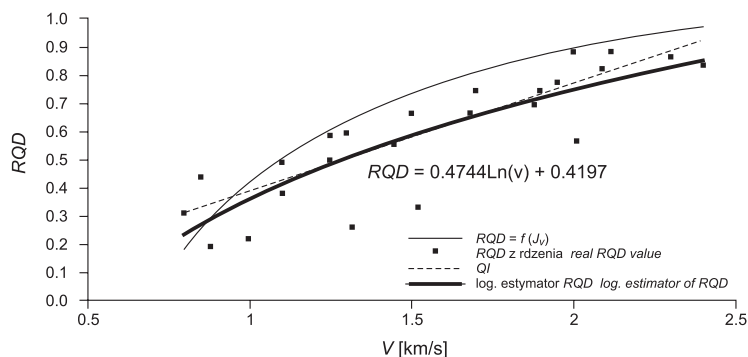


Fig. 2. Rozkład RQD w funkcji prędkości i jego estymatory

Fig. 2. RQD versus velocity and RQD estimators

Maksymalną wartość prędkości $V_o = 2600$ m/s zastosowano do estymacji gęstości spękań i parametru RQD jako funkcji gęstości spękań. Estymator gęstości spękań (Sjogren *et al.* 1979) ma następującą postać

$$J_v = \xi \cdot (V - V_o) / (V \cdot V_o) \quad (2)$$

gdzie:

- V_o – prędkość w skałach nie spękaných,
- V – prędkość mierzona,
- J_v – liniowa gęstość spękań,
- ξ – stała.

W tabeli 3 zestawiono wartości prędkości, rzeczywiste wielkości RQD i ich estymatory oraz gęstość spękań i QI .

Z analizy uzyskanych zależności wynika jednoznacznie, że dla masywu karbońskiego występuje liniowa zależność pomiędzy stopniem spękania a wartością prędkości. Najlepszym estymatorem parametru RQD , a zatem i spękań, jest sejsmiczny parametr QI liniowo zależny od prędkości.

Współczynnik korelacji pomiędzy RQD a QI osiąga wartość 0.84. Dlatego można przyjąć, że dla masywu karbońskiego parametr QI bezpośrednio wskazuje na stopień dezintegracji górotworu w jego partii przypowierzchniowej. Parametr QI jest liniową funkcją gęstości spękań i prędkości (Fig. 3) oraz najlepszym liniowym estymatorem wielkości RQD .

Tabela (Table) 3

Zestawienie prędkości fali P, rzeczywistego *RQD* i jego estymatorów
Comparison of P wave velocity, real RQD value and RQD estimators

v [km/s]	RQD rzeczywiste <i>Real RQD value</i>	<i>QI</i>	$RQD = f(v)$	J_v (1/m)	$RQD = f(J_v)$
2.40	84	92	84	0.31	97
2.30	6	88	81	0.48	95
2.12	88	82	78	0.83	92
2.09	82	80	77	0.89	91
2.01	56	77	75	1.08	89
2.00	88	77	75	1.10	89
1.95	77	75	74	1.22	88
1.90	74	73	72	1.35	87
1.88	69	72	72	1.40	86
1.70	74	65	67	1.94	81
1.68	66	65	67	2.01	80
1.52	33	58	62	2.60	74
1.50	66	58	61	2.69	73
1.45	55	56	60	2.91	71
1.32	26	51	55	3.55	65
1.30	59	50	54	3.66	64
1.25	50	48	53	3.96	61
1.25	58	48	53	3.96	61
1.10	49	42	46	5.00	51
1.10	38	42	46	5.00	51
0.88	19	34	36	7.16	29
0.85	44	33	34	7.54	25
1.00	22	38	42	5.87	42
0.80	31	31	31	8.24	18
Współczynnik korelacji $R(RQD, \text{estymator})$ <i>Correlation coefficient</i> $R(RQD, \text{estimator})$	1.00	0.84	0.81		0.78

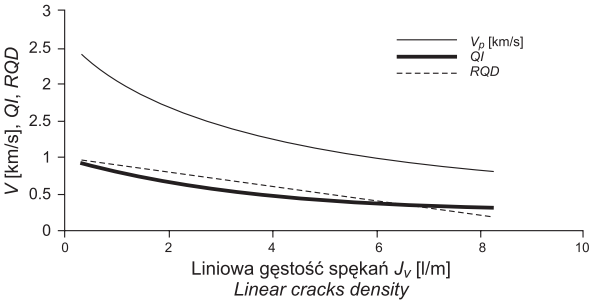


Fig. 3. Prędkość, QI i RQD w funkcji estymowanej gęstości spekań

Fig. 3. Velocity, QI and RQD as a function of cracks density

Generalnie dla wartości prędkości poniżej 1500 m/s górotwór można uznać za spękany, a w takim przypadku wartości RQD i QI spadają poniżej 0.6 (lub inaczej 60%), co w sensie geotechnicznym oznacza masyw skalny średnio dobry. Dla wielkości prędkości poniżej 1100 m/s parametry RQD i QI osiągają wartości poniżej 0.4 (lub inaczej 40%), co plasuje górotwór w klasach ośrodka słabego i bardzo słabego.

Przeprowadzone sejsmiczne badania refrakcyjne skał stropu karbonu w miejscach występowania starych, płytkich wyrobisk górniczych wykazały jednoznacznie bardzo zmienne właściwości skał stropowych i zróżnicowany stopień ich deformacji. Na podstawie wykonanych badań opracowano sejsmiczną klasyfikację skał karbońskich, którą przedstawia tabela 4.

Tabela (Table) 4
Sejsmiczne kategorie masywu karbońskiego
Seismic class of the Carboniferous rock mass quality

Kategoria masywu <i>Rock mass category</i>	Prędkość fali P [m/s] <i>P wave velocity [m/s]</i>	Budowa karbońskiego masywu skalnego <i>Carboniferous rock mass structure</i>	Występowanie spękań <i>Fractures</i>	Oczekiwana wartość RQD <i>Expected RQD value</i>	Zagrożenia powierzchni <i>Hazards to ground surface</i>
A	> 1900	Masyw skalny ciągły <i>Continuous rock mass</i>	brak <i>none</i>	> 80	brak <i>none</i>
B	> 1900	Górotwór podzielony na bloki skalne, ciągły w granicach bloku <i>Separate blocks of rocks, rock mass continuous within a block</i>	brak <i>none</i>	70÷80	Zagrożenie sufozją na kontakcie bloków <i>Suffosion hazard at block contacts</i>
C	1500÷1900	Powierzchnia stropu karbonu ciągła <i>Continuous surface of Carboniferous top</i>	Skały spękane <i>Fractured rocks</i>	50÷70	Zagrożenie sufozją <i>Suffosion hazard</i>
C1	1500÷1900	Górotwór podzielony na bloki skalne wzajemnie przemieszczone <i>Separate blocks of rocks, displaced</i>	Bloki skalne spękane, zwietrzałe <i>Fractured blocks of rocks</i>	50÷70	Zagrożenie deformacjami nieciągłymi <i>Discontinuous deformation hazard</i>
C2	1100÷1500	Górotwór nieciągły, możliwe występowanie bloków <i>Discontinuous rockmass, possible blocks of rocks</i>	Skały silnie spękane, zwietrzałe <i>Strongly fractured rocks</i>	40÷50	Zagrożenie sufozją i deformacjami nieciągłymi <i>Suffosion and discontinuous deformation hazards</i>
D	< 1100	Górotwór zniszczony <i>Destruction of rockmass</i>	Bardzo silne spękania, szczeliny, rumosz skalny <i>Very strongly fractured rocks, fissures</i>	< 40	Bardzo duże zagrożenia deformacjami nieciągłymi <i>High danger of discontinuous deformations</i>

WNIOSKI

1. Wartość parametru QI najlepiej odwzorowuje stopień dezintegracji masywu karbońskiego w jego partii przypowierzchniowej.
2. Parametr QI jest liniową funkcją gęstości spękań i prędkości, a także jest najlepszym liniowym estymatorem wielkości RQD .
3. Dla wielkości prędkości poniżej 1100 m/s parametry RQD i QI osiągają wartości poniżej 40%, co plasuje górotwór w klasach ośrodka słabego i bardzo słabego.

Praca była prezentowana na VII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska” organizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH na WGGiOŚ.

LITERATURA

- Barton N., 1996. Estimating rock mass deformation modulus for excavation disturbed zones studies. W: Montino J.B. & Mortin C.D. (eds), *Designing Excavation Disturbed Zones For a Nuclear Repository in Hard Rock*, Workshop, Winnipeg, Canada, 133–144.
- Dec J., 2004a. Seismic survey to evaluate the danger of ground surface damage in built-up terrain in mining areas. *Polish Journal of Environmental Studies*, 13, 111–116.
- Dec J., 2004b. Badania sejsmiczne w określaniu zagrożeń powierzchni w rejonach starej działalności górniczej. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie. *Miesięcznik Wyższego Urzędu Górniczego*, 9, 12–15.
- El-Naqa A., 1996. Assessment of geomechanical chracterization of a rock mass using a seismic geophysical method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 14, 291–305.
- Marcak H., Ślusarczyk R., 1997. Changes in Seismic Velocity due to Fracture Development in Mine. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2, 1, 47–59.
- Sjogren B., Ofsthus A. & Sandberg J., 1979. Seismic classification of rock mass qualities. *Geophysical Prospecting*, 27, 409–422.