

INSTYTUT GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI I ENERGIA
POLSKIEJ AKADEMII NAUK — KRAKÓW

STUDIA, ROZPRAWY, MONOGRAFIE **200**

Tomasz Łątko, Zenon Pilecki

METODA OCENY STOPNIA SPEKANIA OŚRODKA SKALNEGO
ZA POMOCĄ GEORADARU OTWOROWEGO

WYDAWNICTWO INSTYTUTU GOSPODARKI SUROWCAMI MINERALNYMI
I ENERGIA PAN • KRAKÓW • 2016

KOMITET REDAKCYJNY

prof. dr hab. inż. Eugeniusz Mokrzycki (redaktor naczelny serii)
dr hab. inż. Lidia Gawlik (sekretarz redakcji), prof. IGSMiE PAN
dr hab. inż. Zenon Pilecki, prof. IGSMiE PAN
prof. dr hab. inż. Wojciech Suwała
dr hab. inż. Alicja Uliasz-Bocheńczyk, prof. AGH

RECENZENCI

prof. dr hab. inż. Józef Dubiński
prof. dr hab. inż. Henryk Marcak

ADRES REDAKCJI

31-261 Kraków, ul. Józefa Wybickiego 7
tel. 12-632-33-00, fax 12-632-35-24

Redaktor Wydawnictwa: mgr Emilia Rydzewska
Redaktor techniczny: Beata Stankiewicz

© *Copyright by Autorzy*

© *Copyright by Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN – Wydawnictwo*

Printed in Poland

Kraków 2016

ISSN 1895-6823

ISBN 978-83-62922-69-7

IGSMiE PAN – Wydawnictwo, Kraków 2016

Nakład 150 egz.

Objętość ark. wyd. 12,0; ark. druk. 16,5 (×8)

Druk i oprawa: Drukarnia „PATRIA”, Beata Szul, 30-741 Kraków, ul. Domagały 23

Spis treści

Wstęp	5
1. Ogólne informacje o badaniu ośrodka skalnego otworową metodą georadarową	8
1.1. Ogólne informacje o otworowej metodzie georadarowej (na podstawie Łatki i Pileckiego 2015)	8
1.2. Rys historyczny rozwoju otworowej metody georadarowej	8
2. Podstawy teoretyczne metody georadarowej	11
2.1. Wybrane zagadnienia propagacji fali georadarowej	11
2.1.1. Elektromagnetyczne właściwości ośrodka geologicznego	11
2.1.2. Sposób propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku geologicznym	14
2.1.3. Podstawowe równanie zasięgu georadaru (na podstawie Ernsta 2007)	18
2.1.4. Zakłócenia elektromagnetyczne rejestrowane przez antenę odbiorczą (na podstawie Ernsta 2007)	21
2.1.5. Zasięg głębokościowy metody georadarowej	22
2.1.6. Rozdzielczość metody georadarowej	22
2.2. Schematy pomiarowe metodą BGPR	24
3. Metody oceny stanu spękań ośrodka skalnego	25
3.1. Ogólne informacje o spękaniach w ośrodku skalnym (na podstawie Pileckiego 2002)	25
3.2. Metody oceny stopnia spękania ośrodka skalnego	26
3.3. Wskaźnik stopnia spękania ośrodka skalnego RQD	29
3.4. Inne metody oceny stopnia spękania ośrodka skalnego	33
4. Sposób oceny stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą otworowej metody georadarowej	37
4.1. Podstawowe założenia metodyki badań	37
4.2. Opis metodyki badań	38
4.3. Opis etapów metodyki badań	38
4.3.1. Etap I – rejestracja danych georadarowych	38
4.3.2. Etap II – przetwarzanie i interpretacja danych georadarowych	41
4.3.3. Etap III – analiza statystyczna danych georadarowych	42
4.3.4. Etap IV – opracowanie klasyfikacji RQD-BGPR	46
5. Badania stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą otworowej metody georadarowej w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej	47
5.1 Wprowadzenie	47

5.2. Warunki geologiczne i górnicze w rejonie niecki bytomskiej	47
5.2.1. Położenie geograficzne i morfologia	47
5.2.2. Warunki geologiczne	49
5.2.3. Warunki górnicze – historyczna eksploatacja złóż rud metali (na podstawie Pi- leckiego 2014).....	56
5.2.4. Warunki geologiczno-inżynierskie.....	57
5.3. Zakres badań	62
5.4. Metodyka pomiarowa, przetwarzania i interpretacji	66
5.5. Wyniki obliczeń i ich analiza	68
5.6. Klasyfikacja RQD-BGPR oceny stopnia spękania ośrodka skalnego w warunkach geo- logicznych i górniczych niecki bytomskiej	82
6. Przykład porównania wyników klasyfikacji RQD-BGPR i klasyfikacji w ocenie stopnia spękania ośrodka skalnego	87
7. Zalety i ograniczenia sposobu oceny stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą otworo- wej metody georadarowej (na podstawie Łątki i Pileckiego 2015)	94
8. Podsumowanie i wnioski końcowe	100
Literatura	103
Załącznik 1 – Rdzenie z otworu wiertniczego OD 32	109
Załącznik 2 – Przykład danych z otworów wiertniczych przyjętych do opracowania klasyfikacji RQD-BGPR	114
Metoda oceny stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą georadaru otworowego – Streszczenie	119
Method of evaluation the degree of fracturing in the rock mass using Borehole GPR – Abstract	120

Wstęp

Głównym celem pracy jest ilościowa ocena stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą otworowej metody georadarowej. Dla osiągnięcia celu badań przeprowadzono analizę statystyczną związku między gęstością spękań ośrodka skalnego, wyrażoną przez wskaźnik stopnia spękania RQD a wielkością znormalizowanej i uśrednionej amplitudy sygnału georadarowego w warunkach geologiczno-inżynierskich niecki bytomskiej.

Otworowa metoda georadarowa BGPR (ang. *Borehole Ground Penetrating Radar*) polega na wysyłaniu i rejestracji impulsów elektromagnetycznych w ośrodku geologicznym wokół otworu z użyciem specjalnej sondy połączonej kablem z jednostką centralną położonej poza otworem. Zarejestrowane na radarogramach sygnały tzw. refleksy są efektem odbicia wysyłanych impulsów od granic o wyraźnym kontraście właściwości elektromagnetycznych. W ośrodku skalnym, naturalnymi granicami odbijającymi są najczęściej różnego rodzaju pustki, strefy rozluźnień i spękania.

Metoda BGPR znajduje najczęściej zastosowanie przy odwzorowaniu budowy i właściwości ośrodka geologicznego dla potrzeb projektowania posadowienia obiektów budowlanych oraz oceny jakości ośrodka, w tym identyfikacji pustek i stref rozluźnień, w poszukiwaniu instalacji podziemnych i innych obiektów (np. Owen i Suhler 1982; Olsson i in. 1985; Chang 1986; Haeni i in. 2002; Annan 2003). Znane są również zastosowania do celów górniczych (np. Vogt i in. 2005; Vogt 2006; Pilecki i in. 2011; Pilecki i in. 2013).

Metoda BGPR została wykorzystana do określenia stopnia spękania ośrodka skalnego. Wykonano 69 pomiarów tą metodą w otworach o głębokości od kilkunastu do około 70 m w różnych warunkach geologiczno-inżynierskich niecki bytomskiej. Badania te były realizowane pod kątem diagnostyki podłoża pod budowę szlaków komunikacyjnych. Otwory badawcze wykonane zostały metodą rdzeniową. Na odcinkach rdzenia przechodzących przez masyw skalny zostały obliczone wskaźniki stopnia spękania RQD (ang. *Rock Quality Designation*). Wstępna ocena radarogramów z badań otworowych wskazywała, że struktura i intensywność refleksów zależały od stopnia fragmentaryzacji ośrodka. Spostrzeżenia te były przyczyną podjęcia szerszych badań pod kątem ilościowej oceny zależności wielkości amplitudy sygnału georadarowego od stopnia spękania ośrodka skalnego.

Dla rozwiązania zagadnienia badawczego opracowano sposób przetwarzania i interpretacji danych georadarowych z wykorzystaniem procedur statystycznych. Podstawowa trudność w rozwiązaniu tego zadania wynikała z olbrzymiej liczby, ponad kilkaset tysięcy

wartości amplitud sygnału na każdy metr bieżący badanego otworu oraz znaczącego udziału czynnika losowego w rozkładzie amplitud. W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano empiryczne zależności matematyczne, które pozwoliły na opracowanie klasyfikacji stopnia spękania ośrodka skalnego, nazwanej RQD-BGPR, dla warunków geologiczno-inżynierskich niecki bytomskiej.

Praca składa się z dziewięciu głównych rozdziałów. Po wprowadzeniu do zagadnienia, i przedstawieniu celu badań omówiono historię badań georadarowych oraz zastosowania otworowej metody georadarowej w badaniach geoinżynierskich. Przedstawiono również podstawy teoretyczne metody georadarowej. Omówiono właściwości elektromagnetyczne ośrodka geologicznego. Opisano w ujęciu ogólnym sposób propagacji fali elektromagnetycznej na podstawie równań falowych Maxwella. Zwrócono uwagę na podstawowe cechy propagującej fali elektromagnetycznej związane ze zmianą amplitudy i fazy. Podkreślono znaczenie tzw. równania georadaru. Na podstawie literatury specjalistycznej przedstawiono najważniejsze czynniki, które mają wpływ na tzw. moc odbieranego sygnału anteny georadarowej. Przedstawiono szerzej zagadnienia rozdzielczości i zasięgu głębokościowego przyjęte w metodzie georadarowej.

W rozdziale 3 scharakteryzowano pojęcie spękania jako jeden z najważniejszych czynników mających wpływ na jakość ośrodka skalnego. Przedstawiono klasyfikację geologiczno-genetyczną spękań. Wskazano na metody oceny stopnia spękania ośrodka skalnego. Podkreślono, że informacja o stopniu spękania ośrodka skalnego najczęściej jest wykorzystywana w klasyfikacjach geotechnicznych, które pozwalają skwantyfikować podstawowe cechy ośrodka skalnego. Klasyfikacje te są m.in. wykorzystywane do obliczeń parametrów potrzebnych dla wstępnych obliczeń zachowania się ośrodka skalnego w różnych warunkach. Możliwie szczegółowo omówiono klasyfikację stopnia spękania ośrodka skalnego RQD, która w dalszej części pracy została zastosowana w metodyce badań. W dużym uproszczeniu przedstawiono też inne metody oceny stopnia spękania ośrodka skalnego.

W rozdziale 4 przedstawiony został algorytm sposobu oceny stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą metody BGPR. Omówiono podstawowe założenia rozwiązania zadania badawczego. Opisano metodykę badań, którą dla bardziej czytelnej prezentacji zilustrowano schematem. Wśród istotnych elementów metodyki badań zdefiniowano fragment przestrzeni ośrodka skalnego w kształcie cylindrycznego pierścienia odpowiadający jednej trasie analizowanego sygnału georadarowego. Przedstawiono też sposób uśredniania i normalizacji wartości amplitud sygnału georadarowego.

W rozdziale 5 ukazano badania dotyczące oceny stopnia spękania ośrodka skalnego metodą BGPR w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej. W szczególności zwrócono uwagę na skomplikowane warunki geologiczno-inżynierskie w rejonie badań w związku z naruszeniem górotworu płytką eksploatacją złóż rud metali oraz głębszą eksploatacją pokładów węgla. Górotwór ten jest silnie zróżnicowany pod kątem właściwości fizyczno-mechanicznych. Jest on silnie spękany i rozluzowany w rejonach intensywnej eksploatacji złóż rud metali do głębokości około 50–80 m. W dalszej części rozdziału przedstawiono zakres badań, uzyskane wyniki i ich analizę. W rezultacie przeprowadzonej ana-

lizej statystycznej wyznaczono liniowy związek między gęstością spękań ośrodka skalnego, wyrażoną przez wskaźnik spękań RQD a wielkością znormalizowanej i uśrednionej amplitudy sygnału georadarowego. W końcowej części rozdziału, w efekcie przeprowadzonych obliczeń przedstawiono empiryczną klasyfikację oceny stopnia spękania ośrodka skalnego na podstawie badań metodą BGPR dostosowaną do warunków geologiczno-inżynierskich niecki bytomskiej.

W rozdziale 6 przedstawiono przykład porównania wyników klasyfikacji RQD-BGPR i RQD w ocenie stopnia spękania ośrodka skalnego na podstawie pięciu wybranych otworów badawczych. Wyniki obliczeń pokazały, że wskazania obu metod są podobne, przy czym klasyfikacja RQD-BGPR jest bardziej konserwatywna, tzn. wskazuje na większe osłabienie ośrodka, lecz w niewielkim stopniu.

W rozdziale 7 omówiono zalety i ograniczenia sposobu oceny stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą metody BGPR. Podkreślono możliwie szeroko ograniczenia związane z pomiarami, przetwarzaniem i interpretacją danych. Rozdział ten jest bardzo ważny w kontekście właściwego posługiwania się metodą BGPR przy ocenie stopnia spękania ośrodka skalnego.

W rozdziale 8 przedstawiono podsumowanie zawartości rozprawy doktorskiej oraz wnioski końcowe. Podkreślono znaczenie poznawcze i praktyczne opracowanego rozwiązania oraz sformułowano kierunki dalszych badań.

Zaproponowany sposób oceny stopnia spękania ośrodka skalnego na podstawie danych zarejestrowanych metodą BGPR pozwala na określenie stanu górotworu na różnych głębokościach, a tym samym wyznaczenia stref osłabienia ośrodka, bez konieczności wykonywania kosztownych otworów rdzeniowych. Ponadto wpływ wykonania otworu wiertniczego na wyniki rejestracji BGPR jest zminimalizowany poprzez dobór danych z odległości około 1 m od otworu wiertniczego. Właściwe rozpoznanie stopnia spękania górotworu ma duże znaczenie w przypadku właściwego zaprojektowania oraz wykonania uzdatniania podłoża budowlanego zarówno pod obiekty liniowe (tj. drogi, autostrady, linie kolejowe) jak również pod obiekty konstrukcyjne (tj. wiadukty, estakady, hale produkcyjne itp.) w rejonach zagrożonych wystąpieniem deformacji nieciągłych.

Monografia została opracowana na podstawie rozprawy doktorskiej T. Łątki *Metoda oceny stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą georadaru otworowego* obronionej w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią w 2016 roku.

1. Ogólne informacje o badaniu ośrodka skalnego otworową metodą georadarową

1.1. Ogólne informacje o otworowej metodzie georadarowej (na podstawie Łątki i Pileckiego 2015)

Metoda BGPR jest jedną z metod geofizycznych służących do pozyskiwania informacji o budowie i właściwościach ośrodka geologicznego. Technika pomiaru georadarem otworowym (rys. 1.1) polega na zasadach analogicznych jak dla georadaru powierzchniowego, które zostały opisane w wielu pracach m.in. Conyersa i Goodman (1997), Annana (2001 i 2003), Bristowa i Jola (2003), Danielsa (2004), Karczewskiego (2007), Jola (2009) lub Karczewskiego i in. (2011).

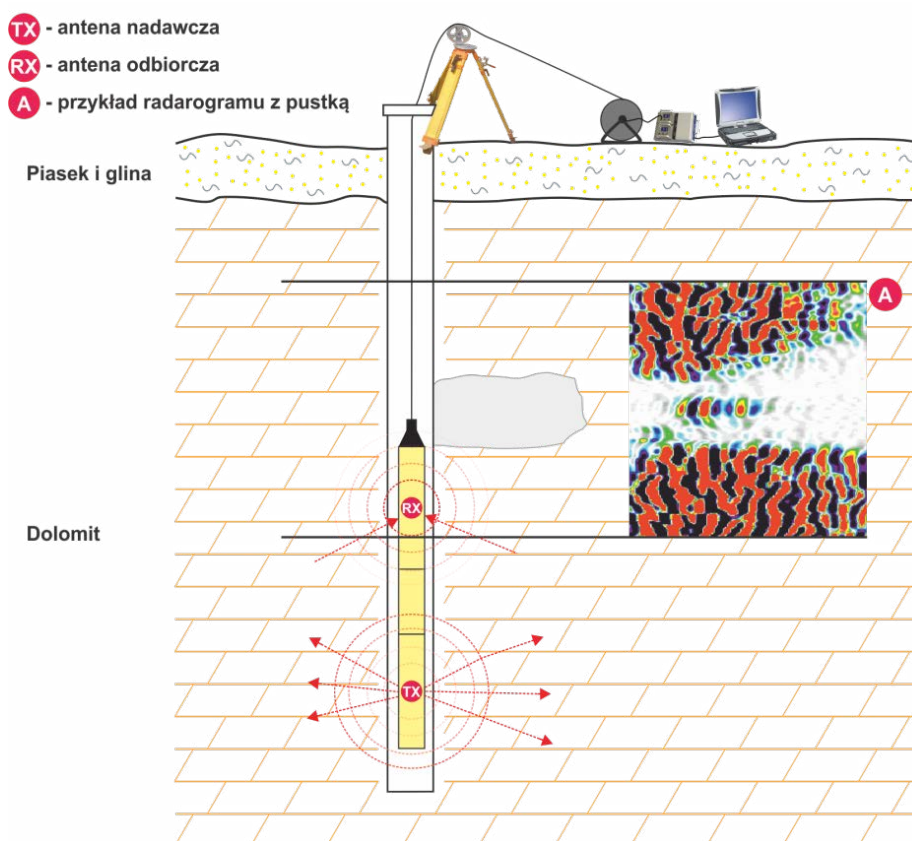
W ostatnich kilkunastu latach nastąpił rozwój otworowej metody georadarowej w wielu zagadnieniach geoinżynierskich, m.in. w badaniach stateczności i lokalizacji tuneli (Olhoeft 1988; Greenfield 1988; Cardarelli i in. 2003); w górnictwie (Vogt i in. 2005; Vogt 2006; Pilecki i in. 2011; Pilecki i in. 2013); w badaniach wysadów solnych (Mundry i in. 1983; Nickel i in. 1983); w lokalizacji pustek oraz stref spękań (Owen i Suhler 1982; Olsson i in. 1985; Chang 1986; Haeni i in. 2002; Pilecki 2014; Łątka 2014); w badaniach hydrogeologicznych oraz środowiskowych (Niva i in. 1988; Olsson i in. 1992; Lane i in. 1996; Chang i in. 2006; Charlton 2008); w stratygrafii i sedimentologii (Davis i Annan 1989; Hsi-Tien 1989).

W ogólnym ujęciu zakres dotychczasowych zastosowań otworowej metody georadarowej w zagadnieniach geoinżynierskich obejmuje:

- identyfikację zaburzeń geologiczno-tektonicznych,
- lokalizację pustek i stref rozluźnień,
- lokalizację podziemnych obiektów infrastruktury budowlanej oraz innych obiektów,
- rozpoznanie zawodnienia, oraz przepływu zanieczyszczeń w ośrodku geologicznym,
- kontrolę stateczności obiektów geoinżynierskich (zapór wodnych, tuneli i innych obiektów podziemnych).

1.2. Rys historyczny rozwoju otworowej metody georadarowej

Metoda georadarowa swoje początki zawdzięcza Christianowi Hülsmejerowi, który w 1904 roku uzyskał pierwszy na świecie patent związany z technologią radarową (patent

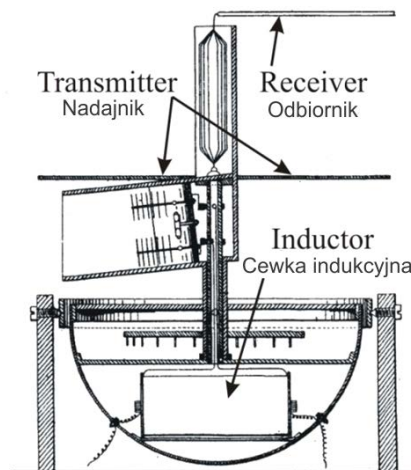


Rys. 1.1. Schemat działania otworowej sondy georadarowej w pojedynczym otworze (Łątka i Pilecki 2015)

Fig. 1.1. Scheme of borehole GPR measurement (Łątka and Pilecki 2015)

DE 165 546) (Ernst 2007). Skonstruował on urządzenie oparte na eksperymencie Hertza, które miało na celu wykrywanie oddalonych metalowych obiektów takich jak statki i ich wraki, aby zapobiec wypadkom (Hülsmeier 1904). Urządzenie to (rys. 1.2) wysyłało ciągły sygnał ze stałą częstotliwością i rejestrowało sygnał odpowiedzi w celu wykrycia metalowych obiektów w odległości do 3 km. Niestety nie było możliwe dokładne określenie odległości do tego obiektu z powodu zbyt dużych zakłóceń pomiędzy wysyłanym a rejestrowanym sygnałem (Hollmann 2001).

Kilka lat później Gotthelf Leimbach i Heinrich Löwy (Löwy 1910) opatentowali sposób zastosowania radaru do poszukiwania zakopanych w gruncie metalowych obiektów (patent DE 237 944). Sposób ten polegał na instalacji anten w otworach, które stale wysyłały i rejestrowały falę elektromagnetyczną. W 1926 firma Hülsenbeck & Co. opatentowała impulsowy system radarowy (patent DE 489 434) (Ernst 2007). To rozwiązanie pozwoliło na poprawę jakości rozpoznania i jest stosowane w aparaturach pomiarowych do czasów obecnych.



Rys. 1.2. Szkic pierwszego systemu radarowego opatentowanego przez Hülsmeyera (1904) (Ernst 2007)

Fig. 1.2. Sketch of the first radar system patented by Hülsmeyer (1904) (Ernst 2007)

Technologia radarowa była względnie szybko rozwijana podczas II wojny światowej, dla potrzeb wykrywania różnych obiektów w działaniach wojskowych. Na przykład systemy radarowe opatentowane przez Bently (1928) zostały zastosowane w 1943 roku do mierzenia wysokości lotu samolotu (radar FM).

Pierwsze zastosowanie georadaru do badania ośrodka geologicznego, polegające na pomiarach grubości lodowca alpejskiego, zostało przeprowadzone przez Sterna w 1926 r. (Stern 1929). Natomiast pierwsze próby zastosowania georadaru otworowego nie są jednoznacznie przedstawione w literaturze. Przypuszczalnie pionierskie pomiary georadarowe w otworze wiertniczym wykonano na początku lat siedemdziesiątych XX w. w wysadzie solnym (Holser i in. 1972) z wykorzystaniem patentu na antenę spiralną (Fredrikson i in. 1969). W tym czasie Cook (1973, 1977) opublikował też wyniki badań z zastosowaniem georadaru otworowego w podziemnej kopalni węgla w Australii. Kilka lat później Tarantolo i Unterberger (1978) opublikowali wyniki badań sondą georadarową w otworze w angielskiej kopalni soli. W tym samym 1978 roku udokumentowano badania z wykorzystaniem georadaru otworowego do obserwacji zmian warunków eksploatacji pokładu węgla w USA (Suhler i in. 1978). W 1982 r. w Instytucie Southwest Research w USA skonstruowano jedną z pierwszych kierunkowych anten otworowych (Suhler i Owen 1983). W 1985 r. firma SGC AB (Swedish Geological Company) skonstruowała własną kierunkową antenę georadaru otworowego RAMAC (materiały Malå GeoScience AB).

Bardziej szczegółową historię badań metodą georadarową można znaleźć m.in. w pracy Browna (1999) lub Annana (2003).

2. Podstawy teoretyczne metody georadarowej

2.1. Wybrane zagadnienia propagacji fali georadarowej

2.1.1. Elektromagnetyczne właściwości ośrodka geologicznego

Właściwości elektromagnetyczne skał i gruntów zależą od właściwości chemicznych ośrodka, w tym składników i ich mieszanin wypełniających przestrzeń porowatą (Slob i in. 2010). Wielu autorów zajmowało się badaniem właściwości elektromagnetycznych ośrodków geologicznych m.in. von Hippel (1954), Choy (1999), Sihvola (1999), lub Milton (2002). Podkreślają oni, że takie właściwości elektromagnetyczne są bardzo złożone i zależą od częstotliwości fali elektromagnetycznej propagującej w ośrodku.

Właściwości elektromagnetyczne ośrodka geologicznego mogą być opisane przewodnością elektryczną σ , przenikalnością dielektryczną μ oraz przenikalnością magnetyczną ϵ . Dla próżni parametry te przyjmują następujące wartości:

$$\sigma_0 = 0 \text{ Sm}^{-1} \quad (2.1)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} \quad (2.2)$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} \text{ Fm}^{-1} \quad (2.3)$$

gdzie:

$$c_0 = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}} - \text{prędkość światła w próżni.}$$

Zakładając dla ośrodka geologicznego, że przewodność i przenikalność dielektryczna ma wartość stałą oraz, że przenikalność magnetyczna może być przyjęta jak dla próżni, można otrzymać równania na współczynnik tłumienia α oraz prędkość propagacji fali elektromagnetycznej v w ośrodku (np. Annan 2003):

$$\alpha = \frac{Z_0 \sigma}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (2.4)$$

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2.5)$$

gdzie:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} - \text{impedancja fali płaskiej w próżni.}$$

Natomiast długość fali elektromagnetycznej dla ośrodków rozluźnionych można oszacować z zależności:

$$\lambda \approx \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.6)$$

gdzie:

ϵ_r – względna stała dielektryczna.

Na przykład dla ośrodka opisanego względną stałą dielektryczną $\epsilon_r = 9$ i prędkością fali $v = 0,1$ m/ns, dla częstotliwości 250 MHz długość fali wynosi 40 cm. Zależność 2.6 obowiązuje dla ośrodków słabo tłumiących, przy założeniu, że przenikalność magnetyczna jest równa jeden. Dla większości niemagnetycznych gruntów i skał założenie to jest poprawne. Równania 2.4 i 2.5 stosowane są powszechnie w metodzie georadarowej. W tabeli 2.1 przedstawiono wartości względnej stałej dielektrycznej, przewodności elektrycznej, współczynnika tłumienia i prędkości fali elektromagnetycznej dla kilku różnych ośrodków.

Istotny wpływ na wartość stałej dielektrycznej ośrodka (względna przenikalność dielektryczna) ma stopień zawodnienia ośrodka. Na rysunku 2.1 pokazano zależność przenikalności dielektrycznej od porowatości i stopnia zawodnienia ośrodka geologicznego. Na wykresie duży wzrost wartości przenikalności dielektrycznej przy dużych wartościach porowatości występuje jedynie dla większych stopni zawodnienia Z rzędu 0,4–0,8. W ogólności zawodnienie ośrodka może poprawić kontrast między stałymi dielektrycznymi, zwłaszcza w przypadku ośrodków silnie porowatych, lecz również powoduje większe tłumienie fali elektromagnetycznej. Tłumienie to związane jest z mineralizacją wody, która powoduje wzrost przewodności elektrycznej ośrodka.

Korzystając ze wzoru 2.6 można obliczyć względną stałą dielektryczną na podstawie pomierzonej prędkości fali elektromagnetycznej w konkretnym ośrodku np. metodyką profilowania refrakcyjnego i refleksyjnego szerokokątowego WARR (ang. *Wide Angle Reflection and Refraction*) lub wspólnego punktu głębokościowego CMP (ang. *Common Mid Point*).

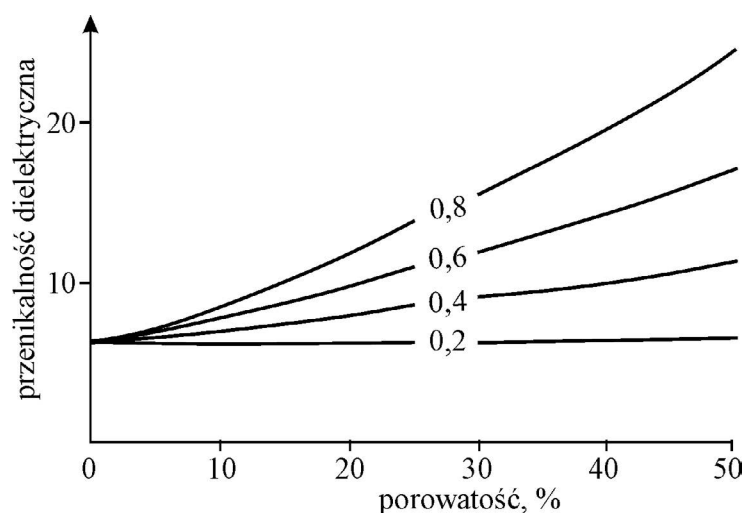
Tabela 2.1

Wartości względnej stałej dielektrycznej ϵ_r , przewodności elektrycznej σ , współczynnika tłumienia α i prędkości fali elektromagnetycznej v dla różnych ośrodków (Annan 2005)

Table 2.1

The values of the relative dielectric constant ϵ_r , electrical conductivity σ , the attenuation coefficient α and the velocity of electromagnetic wave v for different medium (Annan 2005)

Rodzaj ośrodka	Parametry			
	ϵ_r	σ [mS/m]	α [dB/m]	v [cm/ns]
Powietrze	1	0,0	0,0	30
Słodka woda	80	0,5	0,1	3,3
Słona woda	80	3000	600	1,0
Suchy piasek	3–5	0,01	0,01	13
Wilgotny piasek	20–30	0,1–1,0	0,03–0,3	6
Piaskowiec	9–14	0,5–2,0	0,4–1,0	8–10
Wapień	4–8	0,5–2,0	0,4–1,0	10–12
Gлина	5–36	2,0–1000	1–300	4–6
Halit	5–7	0,01–1,0	0,01–1,0	9–11
Łupek	5–15	1,0–100	1,0–100	9
Muł, il	14–36	1,0–100	1,0–100	5–8
Granit	4–6	0,01–1,0	0,1–1,0	13



Rys. 2.1. Zależność przenikalności dielektrycznej od porowatości i stopnia zawodnienia Z (0,2–0,8) (Kirsch 2006)

Fig. 2.1. Dependence of the dielectric permittivity from porosity and water saturation Z (0.2–0.8) (Kirsch 2006)

2.1.2. Sposób propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku geologicznym

W ośrodku jednorodnym, liniowym i izotropowym propagacja fali elektromagnetycznej może być opisana równaniami Maxwella (Annan 2003):

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \cdot \vec{E} + \varepsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.10)$$

gdzie:

- $\vec{E}$ – wektor natężenia pola elektrycznego,
- $\vec{H}$ – wektor natężenia pola magnetycznego,
- ε – przenikalność elektryczna,
- μ – przenikalność magnetyczna,
- σ – przewodność elektryczna.

W równaniach 2.7–2.10 parametry σ , ε i μ są skalarami. Równania Maxwella są wzajemnie zależne i mogą być opisane równaniem falowym Helmholtza (np. Ernst 2007):

$$\left(\nabla^2 + \mu \cdot \varepsilon \cdot \omega^2 \right) \begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{H} \end{pmatrix} = 0 \quad (2.11)$$

gdzie:

$\omega = 2\pi f$ – częstość kołowa, a ω jest to częstotliwość naturalna.

Jednym z możliwych rozwiązań równania 2.11 w układzie jednowymiarowym jest fala płaska propagująca w jednym kierunku x :

$$E(x) = E_0 \cdot e^{i(kx - \omega t)} \quad (2.12)$$

gdzie:

- E_0 – stałe pole elektryczne,
- k – liczba falowa, która wskazuje, że prędkość propagacji fali i jej długość są związane z parametrami ośrodka w postaci:

$$k = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.13)$$

gdzie:

v – prędkość fazowa.

Przyjmując w równaniu 2.12, że $k = \beta + \alpha i$, gdzie β jest współczynnikiem fazy, a α współczynnikiem tłumienia fali α_s , otrzymujemy:

$$E(x) = E_0 \cdot e^{i(k\beta x - \omega t)} \cdot e^{-\alpha k x} \quad (2.14)$$

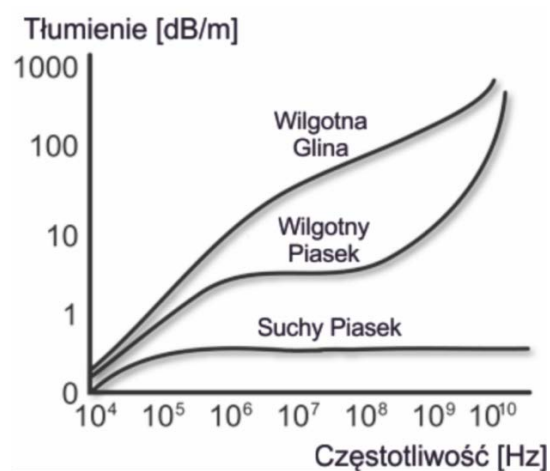
Równanie 2.14 pokazuje, że amplituda fali jest tłumiona z odległością i zależy od częstotliwości fali. Całkowite tłumienie α składa się z tłumienia α_i związanego z absorpcją energii w ośrodku, nazywanym również tłumieniem wewnętrznym oraz tłumienia związanego z rozproszeniem fali (Annan 2003):

$$\alpha = \alpha_i + \alpha_s \quad (2.15)$$

Straty energii wynikające z absorpcji spowodowane są głównie obecnością wody (von Hippel 1954). Na rysunku 2.2 widać, że obecność wody w piasku (wilgotny i suchy piasek) ma duży wpływ na tłumienie, a zwłaszcza powyżej częstotliwości około 100 MHz. Tłumienie rośnie ze wzrostem mineralizacji wody, jeżeli zwiększa się przewodność elektryczna. Tłumienie jest również większe w ośrodkach ilastych (np. Olhoeft 1987), gdyż minerały ilaste posiadają dużą wartość przewodności elektrycznej, podobnie jak substancje magnetyczne. Właściwości magnetyczne tlenków żelaza mogą również powodować dodatkowe odbicia fal elektromagnetycznych (van Dam i Schlager 2000; van Dam i in. 2002). W rzeczywistości w ośrodku geologicznym właściwości magnetyczne typowych gruntów i skał są bardzo słabe, stąd w większości przypadków są pomijane.

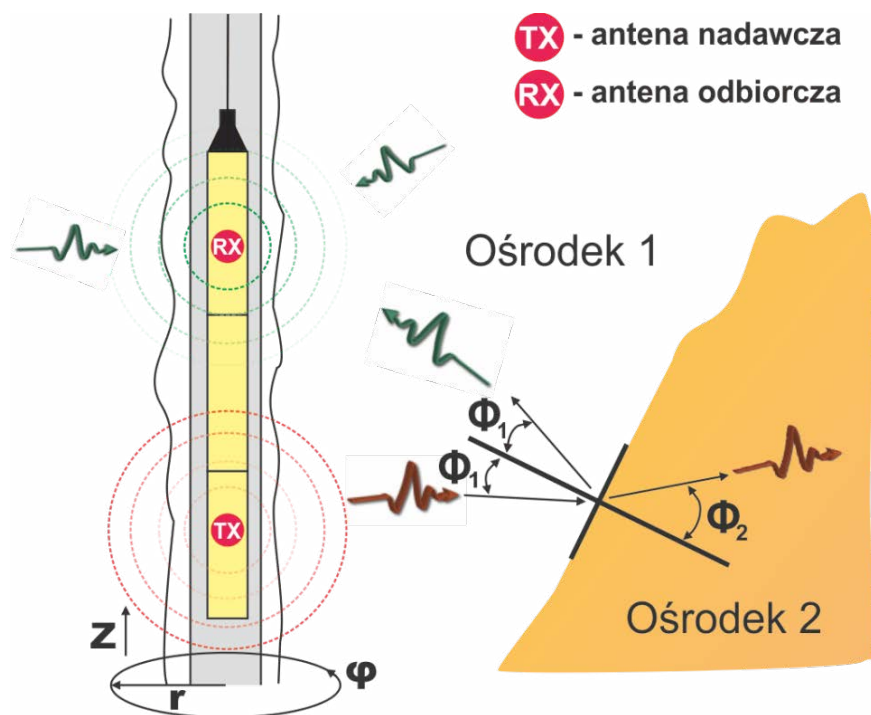
Tłumienie związane z rozproszeniem fali elektromagnetycznej jest złożone ze względu na wielkość obiektu w porównaniu do długości fali elektromagnetycznej. Według Annana (2003) fale o długości większej w porównaniu do wielkości powierzchni odbijającej, podlegają tzw. quasi-statycznemu rozproszeniu Rayleigha. Natomiast przy długości fal porównywalnych do wielkości powierzchni obiektu występuje zjawisko rezonansu lub dyfrakcji. W przypadku fal o długości mniejszej od wielkości powierzchni odbijającej propagujące fale elektromagnetyczne podlegają tym samym prawom co fale sejsmiczne (Annan 2003).

W przypadku stosowania praw optyki fala elektromagnetyczna może podlegać odbiciu, załamaniu lub dyfrakcji (rys. 2.3). Na podstawie prawa odbicia określa się, jaka część energii jest transmitowana lub odbita od granicy pomiędzy ośrodkami o różnych właściwościach elektromagnetycznych. Zgodnie z prawem Snelliusa na granicy ośrodków o różnych wartościach impedancji falowej współczynnik odbicia R_c (ang. *Reflection Coefficient*) ma postać:



Rys. 2.2. Wykres zależności tłumienia w glinie o różnej wilgotności i piasku od częstotliwości fali elektromagnetycznej (materiały informacyjne Sensor & Software)

Fig. 2.2. Graph of attenuation in the clay with different moisture and in the sand depending on the frequency of the electromagnetic wave (materials Sensor & Software)



Rys. 2.3. Rozchodzenie się fal elektromagnetycznych w ośrodku geologicznym (na podstawie Borchert 2008)

Fig. 2.3. Propagation of electromagnetic waves in the geological medium (based on Borchert 2008)

$$R_c = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.16)$$

gdzie:

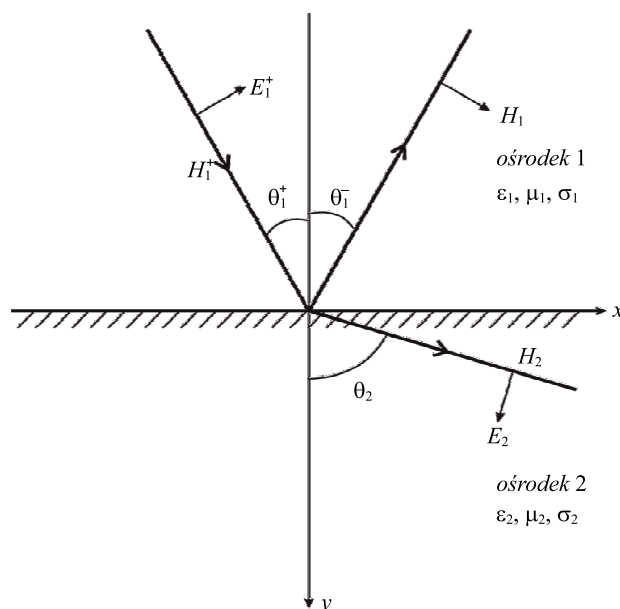
Z_1, Z_2 – impedancje falowe dwóch ośrodków 1 i 2 (jak na rys. 2.5).

Zakładając, że ośrodek jest mało stratny, współczynnik odbicia możemy zapisać w zależności od stałej dielektrycznej ϵ lub prędkości fali c :

$$R_c = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} = \frac{c_1 - c_2}{c_1 + c_2} \quad (2.17)$$

Współczynnik odbicia (2.17) z definicji jest równy stosunkowi amplitudy fali odbitej do amplitudy fali padającej. Płaszczyzna rozdzielająca dwa ośrodki tym silniej odbija fale, im większy jest kontrast impedancji falowej (lub stałych dielektrycznych) obu ośrodków. Duży współczynnik odbicia posiada np. szczelina w masywie skalnym lub granica litologiczna pomiędzy osadami o wyraźnym kontraście stałych dielektrycznej.

Należy również mieć na uwadze, że fala elektromagnetyczna składa się z wektorów pola elektrycznego i magnetycznego (rys. 2.4). Fala może być spolaryzowana równolegle, w przypadku, gdy np. wektor pola elektrycznego leży w płaszczyźnie padania oraz fala może być spolaryzowana prostopadle, gdy wektor pola elektrycznego jest prostopadły do płaszczyzny padania.



Rys. 2.4. Fala elektromagnetyczna padająca ukośnie na granicę dwóch ośrodków (Morawski i Gwarek 1985)

Fig. 2.4. Reflection of the electromagnetic wave on a boundary between two medium (Morawski and Gwarek 1985)

Współczynnik odbicia fali spolaryzowanej równoległe Rc_R oraz współczynnik odbicia fali spolaryzowanej prostopadle Rc_P można zapisać następująco (Morawski i Gwarek 1985):

$$Rc_R = \frac{Z_2 \cdot \cos\theta_2 - Z_1 \cdot \cos\theta_1}{Z_2 \cdot \cos\theta_2 + Z_1 \cdot \cos\theta_1} \quad (2.18)$$

$$Rc_P = \frac{\frac{Z_2}{\cos\theta_2} - \frac{Z_1}{\cos\theta_1}}{\frac{Z_2}{\cos\theta_2} + \frac{Z_1}{\cos\theta_1}} \quad (2.19)$$

gdzie:

- Z_1, Z_2 – impedancje falowe obu ośrodków,
- θ_1, θ_2 – kąt padania i kąt odbicia.

2.1.3. Podstawowe równanie zasięgu georadaru (na podstawie Ernsta 2007)

Georadar wysyła z anteny nadawczej krótki impuls o szerokości od kilku do kilkunastu nanosekund. W przypadku anteny o częstotliwości 100 MHz jest to czas około 10 ns. Energia ta jest emitowana z anteny nadawczej w głąb ośrodka geologicznego, a tylko jej część odbita od powierzchni różniacej się kontrastem właściwości elektromagnetycznych powraca do anteny odbiorczej. Zasięg rozpoznania systemu georadarowego określony jest przez tzw. podstawowe równanie zasięgu georadaru (Annan i Davis 1977).

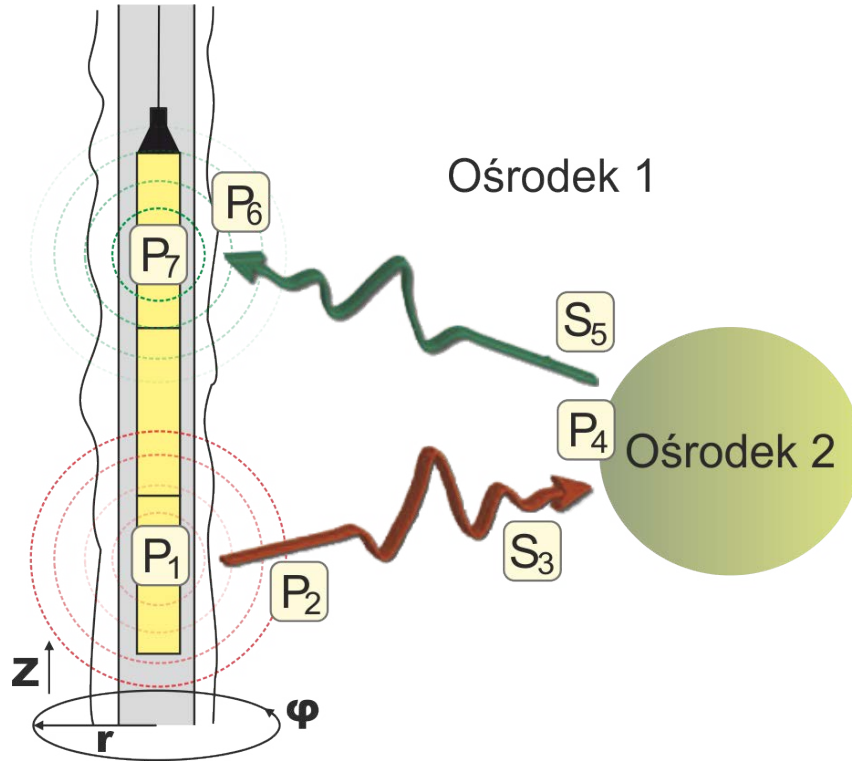
Na rysunku 2.5 przedstawiono schemat pomiaru georadarem otworowym w ośrodku geologicznym tłumiącym, jednorodnym i izotropowym (ośrodek 1), w którym znajduje się metalowa kula (ośrodek 2). Zakłada się, że moc wejściowa nadajnika jest P_0 . Nadajnik jest sprzężony z anteną nadawczą o mocy promieniowania $P_1 < P_0$. Strata mocy spowodowana jest przez niedoskonałość układu elektronicznego nadajnika i anteny nadawczej. Można określić tzw. sprawność energetyczną anteny nadawczej η_{Tx} jako stosunek mocy promieniowania anteny P_1 do mocy wejściowej anteny P_0 (Szóstka 2001):

$$\eta = \frac{P_1}{P_0} \quad (2.20)$$

W konsekwencji moc sygnału po wyjściu z anteny może być obliczona jako:

$$P_1 = \eta_{Tx} \cdot P_0 \quad (2.21)$$

Moc wysyłanego sygnału w kierunku ośrodka 2 uzależniona jest od zysku kierunkowego anteny. Współczynnik zysku kierunkowego anteny nadawczej G_{Tx} składa się z kierunkowości anteny oraz wzmocnienia anteny, jak również określa sprzężenie anteny wraz z otaczającym ją ośrodkiem. Część wysyłanego sygnału propaguje bezpośrednio do anteny odbiorczej przez powietrze (tzw. fala bezpośrednia w powietrzu) oraz po powierzchni ośrodka (tzw. fala



Rys. 2.5. Droga impulsu elektromagnetycznego z anteny nadawczej do anteny odbiorczej (objaśnienia w tekście) (na podstawie Borchert 2008)

Fig. 2.5. Propagation of electromagnetic signal from the transmitting antenna to the receiving antenna (explanation in the text) (based on Borchert 2008)

bezpośrednia między antenami). Pomimo zastosowania ekranowania w antenach efekty te są widoczne na radarogramach. Dla georadaru otworowego, gdzie pusta przestrzeń pomiędzy anteną a ścianką otworu jest mała, to strata mocy spowodowana przejściem sygnału z anteny do ośrodka jest również mała. Zatem moc sygnału promieniowania P_2 może zostać obliczona następująco:

$$P_2 = G_{Tx} \cdot P_1 \quad (2.22)$$

Antena nadawcza, która posiada dookólną charakterystykę emitowania sygnału elektromagnetycznego rozprowadza energię na dużym obszarze. Dodatkowe straty energii występują przez tłumienie ośrodka geologicznego, które zmniejsza moc emitowanego sygnału z odległością. W rezultacie gęstość mocy S_3 docierającą do ośrodka 2 można zapisać jako:

$$S_3 = \frac{e^{-\alpha \cdot R_{Tx}}}{4 \cdot \pi \cdot R_{Tx}^2} \cdot P_2 \quad (2.23)$$

W równaniu (2.23) α jest współczynnikiem tłumienia fali w ośrodku [Np/m] (neper na metr), natomiast R_{Tx} jest to odległość od anteny nadawczej do ośrodka 2.

Współczynnik przekroju poprzecznego ośrodka 9 uzależniony jest od kształtu konkretnej powierzchni zaburzającej. Zakłada się, że powierzchnia ta odbija całą moc padającego sygnału. Przekrój poprzeczny metalowej kuli jest niezależny od długości fali elektromagnetycznej λ , jeżeli długość fali jest mniejsza od średnicy tej kuli. Wtedy kula może być traktowana jako punkt.

Na podstawie równania (2.17) maksymalny współczynnik odbicia równy 1 występuje na granicy pomiędzy powietrzem a metalem. W rezultacie moc sygnału odbita od powierzchni zaburzającej P_4 możemy przedstawić jako:

$$P_4 = 9 \cdot S_3 \quad (2.24)$$

Moc sygnału, która dociera do anteny odbiorczej jest również pomniejszona o straty energii spowodowane tłumieniem w ośrodku. W rezultacie gęstość mocy S_5 jest obliczona dla odległości od ośrodka 2 do anteny odbiorczej R_{Rx} jako:

$$S_5 = \frac{e^{-\alpha \cdot R_{Rx}}}{4 \cdot \pi \cdot R_{Rx}^2} \cdot P_4 \quad (2.25)$$

Zarejestrowaną moc sygnału P_6 przez antenę odbiorczą o tzw. efektywnej powierzchni odbiorczej A_{Rx} możemy zapisać jako:

$$P_6 = A_{Rx} \cdot S_5 \quad (2.26)$$

Efektywna powierzchnia anteny odbiorczej A_{Rx} może zostać obliczona na podstawie prędkości fali elektromagnetycznej w danym ośrodku c , częstotliwości sygnału fali f oraz zysku kierunkowego anteny odbiorczej G_{Rx} .

$$A_{Rx} = \frac{c^2}{4 \cdot \pi \cdot f^2} \cdot G_{Rx} = \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot G_{Rx} \quad (2.27)$$

Moc sygnału P_7 zarejestrowana przez antenę odbiorczą jest przetworzona przez układ elektroniczny tej anteny ze sprawnością energetyczną η_{Rx} podobnie jak w przypadku anteny nadawczej:

$$P_7 = \eta_{Rx} \cdot P_6 \quad (2.28)$$

Wszystkie opisane elementy występują w tzw. równaniu zasięgu georadaru opisującego wielkość odebranej mocy sygnału P_E w antenie odbiorczej, wysłanego przez antenę nadawczą i odbitego od danego obiektu:

$$P_E = \eta_{Rx} \cdot \eta_{Tx} \cdot G_{Rx} \cdot G_{Tx} \cdot \frac{e^{-\alpha(R_{Rx}+R_{Tx})}}{(4\pi)^3 \cdot R_{Rx}^2 \cdot R_{Tx}^2} \cdot \lambda^2 \cdot 9 \cdot P_0 \quad (2.29)$$

Należy wziąć pod uwagę, że antena odbiorcza oprócz pożądanej mocy sygnału odbitego od powierzchni zaburzającej P_E rejestruje również niepożądane zakłócenia P_N nieuwzględnione w równaniu zasięgu georadaru.

2.1.4. Zakłócenia elektromagnetyczne rejestrowane przez antenę odbiorczą (na podstawie Ernsta 2007)

Zakłócenia elektromagnetyczne rejestrowane przez antenę odbiorczą mają różne przyczyny. Zasadniczo wyróżnia się trzy rodzaje zakłóceń:

- zakłócenia elektromagnetyczne pochodzenia środowiskowego,
- wpływ temperatury otoczenia w rejonie pomiarowym,
- zakłócenia elektromagnetyczne od wzmacniacza anteny odbiorczej.

Elektromagnetyczne zakłócenia pochodzenia środowiskowego związane są z pracą urządzeń elektrycznych w sąsiedztwie prowadzonych pomiarów, nadajników naziemnych, jak i oddziaływaniem promieniowania z przestrzeni pozaziemskiej. Wszystkie te zakłócenia są dobrze tłumione przez ośrodek geologiczny. W przypadku badań georadarem w otworze, na większej głębokości, zakłócenia środowiskowe są słabo odczuwalne, stąd ich wpływ na rejestrowany sygnał georadarowy jest minimalny.

Zakłócenia spowodowane temperaturą otoczenia P_{N1} można określić na podstawie równania, z uwzględnieniem stałej Boltzmana k_B , temperatury otoczenia T oraz szerokości pasma częstotliwości Δf :

$$P_{N1} = k_B \cdot T \cdot \Delta f \quad (2.30)$$

Dla temperatury około 27°C oraz pasma częstotliwości $\Delta f = 100$ MHz szacunkowa wartość $P_{N1} = 0,41$ pW.

Wielkość zakłócenia od wzmacniacza anteny odbiorczej P_{N2} można obliczyć ze wzoru:

$$P_{N2} = \frac{N_{amp}^2 \cdot \Delta f}{R} \quad (2.31)$$

Dla zakłóceń wzmacniacza $N_{amp} = 20$ nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, oporności $R = 100$ Ω , pasma częstotliwości $\Delta f = 100$ MHz wielkość zakłócenia $P_{N2} = 400$ pW.

Efekty zakłóceń można sumować. Mając na uwadze, że zakłócenia spowodowane temperaturą otoczenia są niewielkie i można je pominąć, sumaryczny efekt zakłóceń można przedstawić w postaci:

$$P_N = \sqrt{P_{N1}^2 + P_{N2}^2} \approx P_{N2} \quad (2.32)$$

W warunkach pomiarów georadarem w otworze decydującym składnikiem jest spowodowany wzmacniaczem anteny odbiorczej.

2.1.5. Zasięg głębokościowy metody georadarowej

Zasięg głębokościowy metody georadarowej zależy od przewodności elektrycznej, stałej dielektrycznej ośrodka geologicznego (inaczej względnej przenikalności dielektrycznej) oraz od mocy anteny, w tym zakresu częstotliwości emitowanej fali elektromagnetycznej. Im większa częstotliwość fali, uzyskuje się mniejszy zasięg głębokościowy. W skałach przewodzących lub w słonej wodzie zasięg sygnału jest silnie zredukowany. Zasięg sygnału w glinach lub torfach na ogół nie przekracza kilku metrów dla częstotliwości powyżej 100 MHz (Pilecki i in. 2016).

Zasięg głębokościowy systemu georadarowego można również określić na podstawie znajomości minimalnej odebranej mocy sygnału odbitego od powierzchni zaburzającej P_E , większego od poziomu zakłóceń P_N . Przyjmując, że:

$$P_N = P_E \quad (2.33)$$

$$R = \frac{R_{Rx} + R_{Tx}}{2} \quad (2.34)$$

$$P_6 = P_4 \quad (2.35)$$

Zakładając pełne odbicie od powierzchni zakłócającej (2.35) oraz brak tłumienia sygnału, maksymalny zasięg georadaru można określić następująco (Skolnik 1990):

$$R_{max} < 4 \sqrt{\frac{G_{Rx} \cdot G_{Tx} \cdot 9}{(4\pi)^3 \cdot P_N \cdot e^{4 \cdot \alpha \cdot R}} \cdot \lambda^2 \cdot P_0} \quad (2.36)$$

Maksymalny zasięg głębokościowy metody georadarowej został podany dla sprawności energetycznej anten georadarowych równej 1.

Z równania (2.36) wynika, że moc emitowanego sygnału musiałaby zostać zwiększona 16-krotnie, aby podwoić jego zasięg. Ponadto zasięg głębokościowy związany jest silnie z tłumieniem fali elektromagnetycznej w ośrodku, które z kolei zależy od jego przewodności elektrycznej oraz względnej przenikalności dielektrycznej. Oznacza to, że im więcej materiału ilastego znajduje się w ośrodku geologicznym, lub im bardziej ośrodek jest zawodnioty, tym mniejszy jest zasięg głębokościowy.

2.1.6. Rozdzielczość metody georadarowej

Rozdzielczość pionowa oraz pozioma metody georadarowej jest zależna od częstotliwości środkowej zastosowanej anteny otworowej. Pozioma i pionowa rozdzielczość metody georadarowej nie są takie same. Obie są zależne od długości fali, właściwości elektromagnetycznych ośrodka oraz geometrii pomiaru.

Rozdzielczość pionowa ΔR_V jest funkcją długości fali oraz wielkości rozpraszania sygnału. Jest również uzależniona od stosunku sygnału do szumu S/N (ang. *signal to noise ratio*). Dla radarów impulsowych, rozdzielczość pionowa ΔR_V jest zazwyczaj określana jako jedna czwarta dominującej długości fali przy przeciętnym poziomie szumu (Annan 2001; Yilmaz 2001; Daniels 2004).

Rozdzielczość w odniesieniu do szerokości pasma częstotliwości jest określana jako zdolność do rozróżnienia (wydzielenia) dwóch obiektów położonych blisko siebie. Rozdzielczość jest podawana jako stosunek prędkości rozchodzenia się fali w ośrodku do szerokości pasma częstotliwości zarejestrowanego sygnału (Noon i in. 1998):

$$\Delta R_V = \frac{c}{2\Delta f} \quad (2.37)$$

gdzie:

- c – prędkość fali elektromagnetycznej w ośrodku,
- Δf – szerokość pasma zarejestrowanego sygnału.

Rozdzielczość pionowa metody georadarowej zależy odwrotnie proporcjonalnie do szerokości pasma częstotliwości impulsu odbieranego przez antenę odbiorczą. Anteny o szerokim paśmie częstotliwościowym mają dużą rozdzielczość, a anteny o wąskim paśmie charakteryzują się małą rozdzielczością. Istotny jest fakt, iż anteny o szerszym paśmie częstotliwościowym mają węższy impuls, a w związku z tym mają niewielką średnią energię, co powoduje zmniejszenie zasięgu głębokościowego. Również istotnym czynnikiem wpływającym na rozdzielczość pionową jest prędkość fali elektromagnetycznej, która jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka ze stałej przenikalności dielektrycznej.

Rozdzielczość pozioma ΔR_H podobnie jak w przypadku metody sejsmicznej jest związana ze strefą Fresnela. Strefa ta określa kołowy obszar na płaszczyźnie (lub obszar elipsoidalny), który rozprasza energię fali (Smith 1997; Yilmaz 2001). Rozdzielczość pozioma jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego iloczynu długości fali i odległości do obiektu (Daniels 2004):

$$\Delta R_H = \frac{\sqrt{R \cdot \lambda_c}}{2} \quad (2.38)$$

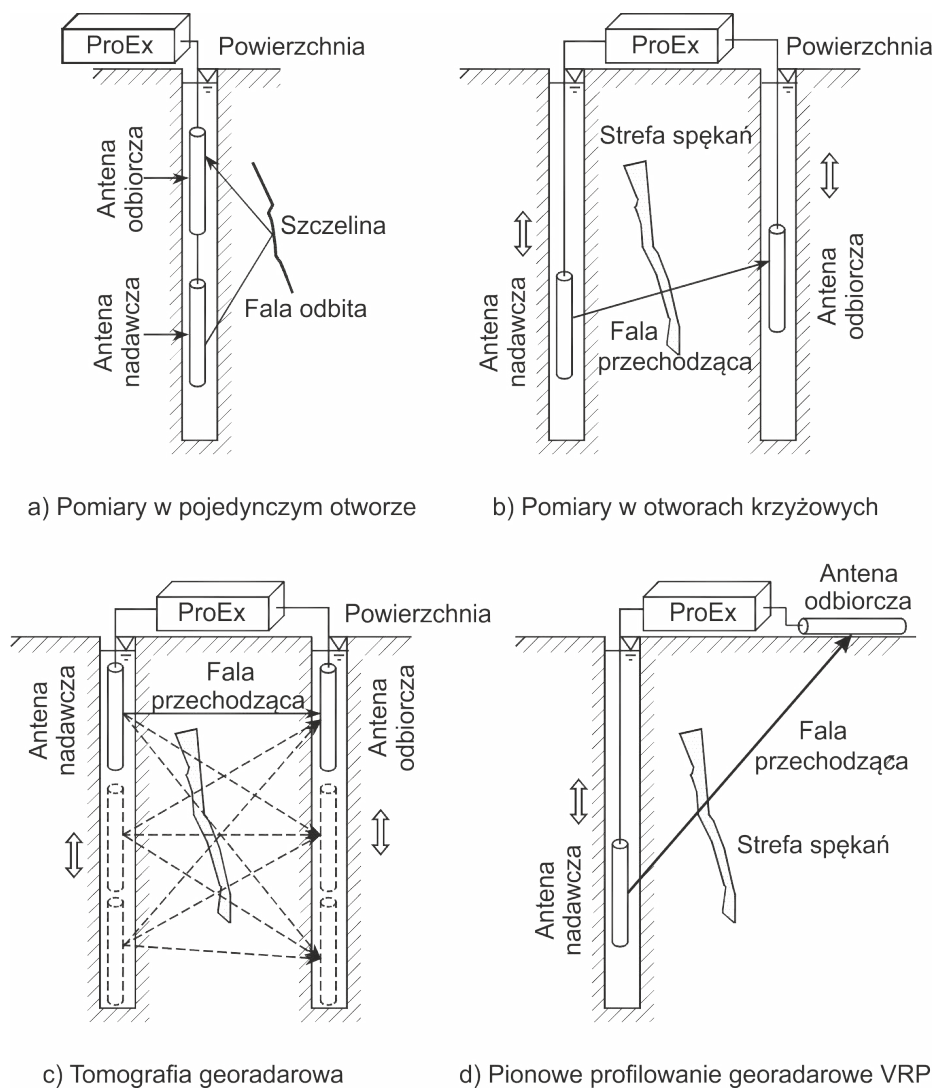
gdzie:

- λ_c – długość fali elektromagnetycznej odpowiadająca częstotliwości środkowej anteny,
- R – odległość do obiektu zaburzającego.

Rozdzielczość pozioma zależy od odległości do obiektu oraz częstotliwości środkowej anteny, jak również od geometrii układu pomiarowego oraz tłumienia fal elektromagnetycznych w ośrodku. Rozdzielczość pozioma poprawia się wraz ze wzrostem tłumienia fali elektromagnetycznej w ośrodku (Daniels 2004). Na etapie przetwarzania rozdzielczość pozioma może być poprawiona przez migrację, natomiast rozdzielczość pionową można czasami poprawić przez zastosowanie dekonwolucji.

2.2. Schematy pomiarowe metodą BGPR

W badaniach metodą BGPR dla rozpoznania budowy i właściwości ośrodka geologicznego schematy pomiarowe mogą być różne (rys. 2.6). Najczęściej pomiary georadarem otworowym są przeprowadzane w pojedynczym otworze. Mogą być również przeprowadzane pomiędzy dwoma otworami (tomografia międzyotworowa), pomiędzy otworem a powierzchnią terenu (pionowe profilowanie georadarowe VRP (ang. *Vertical Radar Profiling*) lub pomiędzy otworem a wyrobiskiem.



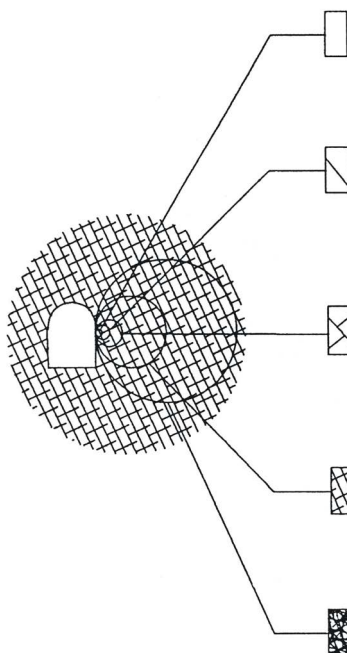
Rys. 2.6. Schematy pomiarów georadarem otworowym (Yelf 2007)

Fig. 2.6. Measurement schemes of borehole GPR (Yelf 2007)

3. Metody oceny stanu spękań ośrodka skalnego

3.1. Ogólne informacje o spękania w ośrodku skalnym (na podstawie Pileckiego 2002)

Jednym z ważniejszych elementów mających zasadniczy wpływ na jakość ośrodka skalnego jest stopień jego spękania. Struktura spękań zmienia się w zależności od skali wymiaru badanego fragmentu masywu skalnego (rys. 3.1). Ze zmianą wielkości badanego fragmentu ośrodka skalnego zmienia się struktura spękań. Spękania dzielą mocniejsze skały na bloki, a słabsze na systemy kostkowe o niewielkich rozmiarach, rzędu nawet centymetrów.



Rys. 3.1. Zmiany struktury spękań wraz ze zmianą wymiaru masywu skalnego
(na podstawie Hoeka i in. 1995)

Fig. 3.1. Changes in the structure of fractures with the change of the scale of dimension of the rock mass
(based on Hoek et al. 1995)

Ze względu na sposób powstawania spękań można je analizować z dwóch punktów widzenia – mechanicznego zachowania się skał i ogólnogeologicznego uwzględniającego procesy fizyczne zachodzące w górotworze. Omówienie tych zagadnień znaleźć można w pracach Pazdro (1964), Książkiewicza (1972), Niecia (1990), Smiechowa (1974), Hobbsa i in. (1976), Liszkowskiego i Stochlaka (1976), Thiela (1980, 1989), Dennisa (1987), lub Dadleza i Jaroszewskiego (1994).

Na rysunku 3.2 przedstawiono klasyfikację geologiczno-genetyczną spękań podaną przez Jawańskiego (Thiel 1980). W warunkach naturalnych do najpowszechniej spotykanych spękań zalicza się spękania ciosowe.

Spękania mogą tworzyć różne formy geometryczne bloków skalnych (rys. 3.3). W skałach magmowych spękania ciosowe powstały w wyniku kurczenia się skał w czasie stygnięcia. W skałach osadowych spękania ciosowe mogą być związane z obciążeniem wyżej leżących warstw skalnych (Piermjakow 1949) lub nierównomierną konsolidacją niejednorodnych, kruchych serii osadowych. Do tego rodzaju spękań należą również spękania międzywarstwowe powstające na granicy warstw o różnym składzie mineralnym, w wyniku różnej reakcji skały na zmiany temperatury i zawodnienia. Spękania ciosowe mogą być również związane z procesami geochemicznymi.

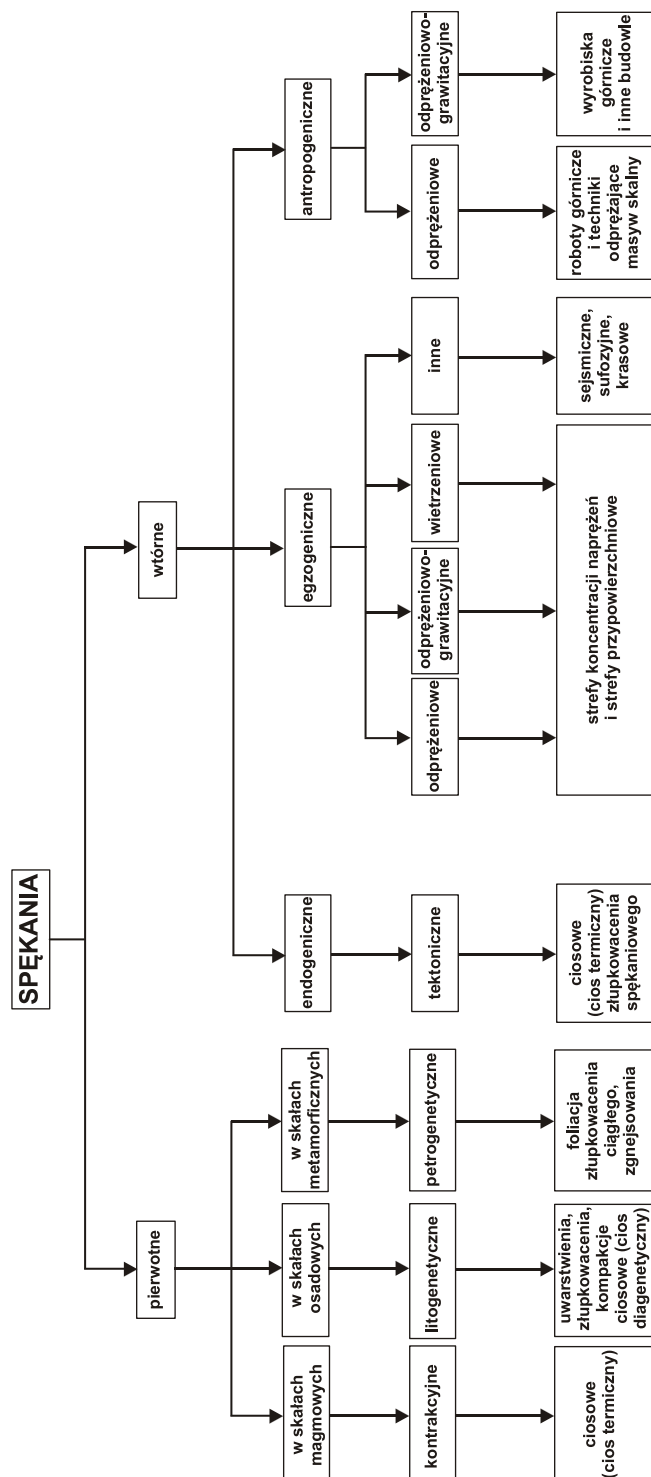
Innym typem spękania o charakterze tektogenicznym jest kliważ. Z mechanicznego punktu widzenia są to spękania wynikające ze ścinania, powstałe przy znaczących odkształceniach plastycznych. Do spękań pochodzenia tektonicznego należą również uskoki, spękania wytworzone w wyniku nasunięcia, fałdowania itp.

Na terenach górniczych i pogórnich ośrodek skalny jest najczęściej dodatkowo spękany w wyniku prowadzonej działalności górniczej. Spękania tego rodzaju, nazywane wtórnymi, są najbardziej intensywne w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobisk górniczych. W warunkach bardziej intensywnej eksploatacji, gdy dochodzi do deformacji powierzchni terenu, spękania wtórne są obecne w całym ośrodku skalnym w stropie wyrobisk górniczych. Spękania pierwotne i wtórne w ośrodku skalnym są przyczyną wielu złożonych procesów geofizycznych i geomechanicznych (Marcak 1993, 1998).

3.2. Metody oceny stopnia spękania ośrodka skalnego

Informacja o stopniu spękania ośrodka skalnego najczęściej jest wykorzystywana w klasyfikacjach geotechnicznych. Klasyfikacje te pozwalają skwantyfikować podstawowe cechy ośrodka skalnego najczęściej na podstawie systemu punktowego. Na podstawie punktacji wyznacza się klasy jakości górotworu, które są wykorzystywane do obliczeń parametrów potrzebnych dla wstępnych obliczeń zachowania się ośrodka skalnego w różnych warunkach. Klasyfikacje geotechniczne pozwalają na wyznaczenie takich parametrów górotworu jak: moduł sprężystości, spójność, kąt tarcia wewnętrznego czy stałe materiałowe warunku wytrzymałościowego Hoeka-Browna.

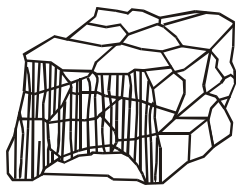
Jedną z pierwszych klasyfikacji geotechnicznych podał Ritter w 1879 roku dla potrzeb empirycznego sposobu projektowania tunelu, w szczególności zaś jego obudowy (Hoek



Rys. 3.2. Geologiczno-genetyczna klasyfikacja spękań na podstawie Jawańskiego (Thiel 1980)

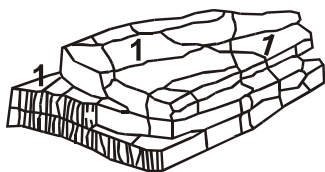
Fig. 3.2. Geological and genetic classification of fractures based on Jawański (Thiel 1980)

a) bloki wielościenne



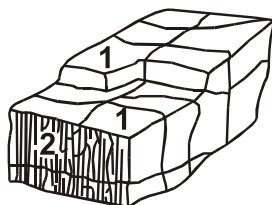
spękania nieregularne

b) bloki płytowe



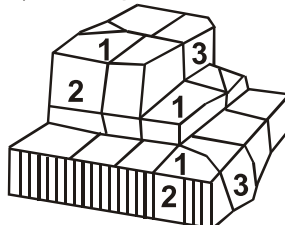
dominuje jeden system spękań

c) bloki pryzmatyczne



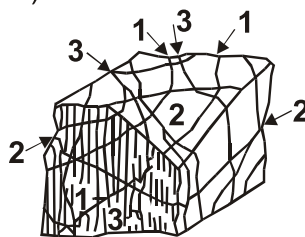
dominują dwa systemy spękań

d) bloki quasi-równowymiarowe



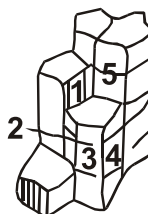
trzy systemy spękań

e) bloki romboidalne



dominują trzy systemy skośnych spękań

f) bloki kolumnowe



dominuje kilka systemów równoległych spękań

Rys. 3.3. Formy geometryczne bloków skalnych (na podstawie Önorm EN ISO 14689)

Fig. 3.3. Geometric forms of rock blocks (based on ÖNORM EN ISO 14689)

i in. 1995). Z czasem powstało wiele klasyfikacji właściwych dla miejsc ich stosowania oraz bardziej uniwersalnych wraz z modyfikacjami. Do najbardziej znanych klasyfikacji należą RMR₈₉ (ang. *Rock Mass Rating*) opracowana przez Bieniawskiego (1989) oraz Q (ang. *Rock Tunelling Quality Index*) podana przez Bartona i in. (1974).

Jednym z podstawowych elementów RMR₈₉ i Q jest klasyfikacja wskaźnika spękania górotworu RQD (ang. *Rock Quality Designation*) opracowana przez Deere i in. (1967). Interesujące, szersze omówienie wymienionych klasyfikacji można znaleźć w pracy Afrouza (1992), Hoeka i in. (1995) czy Singha i Goela (1999). W polskich warunkach górniczych korzysta się z wielu klasyfikacji właściwości górotworu wykorzystywanych do celów projek-

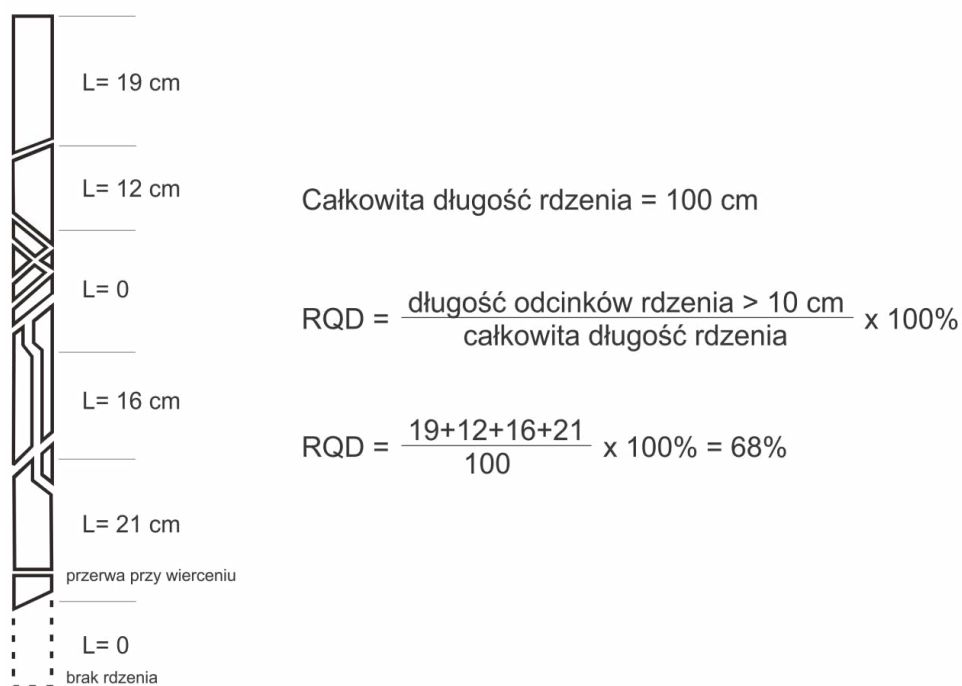
towania, wykonania i utrzymania wyrobisk oraz do oceny wielkości zagrożeń naturalnych (Kidybiński 1982; Dubiński 1989; Dubiński i Konopko 2000).

Znane są również klasyfikacje oparte na parametrach geofizycznych, związanych ze stopniem spękania ośrodka skalnego. Klasyfikacje te są na ogół opracowywane dla konkretnych maszyn skalnych, stąd niewiele jest klasyfikacji uniwersalnych. Na przykład klasyfikacja Q_c przedstawiona przez Bartona (1996) należy do kategorii uniwersalnych, a klasyfikacja KFG (Bestyński 1997) jest dostosowana do warunków lokalnych – fliszu karpackiego.

3.3. Wskaźnik stopnia spękania ośrodka skalnego RQD

Deere i in. (1967) opracowali ilościowy sposób oceny stopnia spękania górotworu na podstawie pomiaru długości fragmentów rdzeni z otworów badawczych.

Podali oni sposób obliczania wskaźnika stopnia spękania RQD jako procentowy stosunek sumy długości odcinków rdzenia dłuższych od 10 cm do całkowitej długości rdzenia (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Sposób pomiaru i obliczania wskaźnika RQD (Deere D.U. i Deere D.W. 1988)

Fig. 3.4. The method of measuring and calculating the RQD index (Deere D.U. and Deere D.W. 1988)

Deere D. U. i Deere D. W. (1988) sprecyzowali zasady przeprowadzenia analizy:

- standardowo średnica rdzenia powinna wynosić 47,5 mm. Dopuszczalne są średnice od 36,5 do 85 mm, jeśli nie powodują nadmiernych spękań rdzenia,
- standardowo RQD należy przeliczać do jednometrowych odcinków otworu,
- długość pomiędzy odcinkami rdzenia można wyznaczać wzdłuż osi rdzenia lub po obrysie, a także po obwodzie,
- w przypadku wątpliwości co do pochodzenia spękania należy przyjąć je do obliczeń jako naturalne.

Interpretację pomiaru stopnia spękania górotworu przedstawiono w tabeli 3.1. Wielkość wskaźnika RQD opisuje stopień spękania ośrodka skalnego (Deere i in. 1967), który jest wykorzystywany w wielu klasyfikacjach geotechnicznych.

Tabela 3.1

Klasyfikacja stopnia spękania ośrodka skalnego RQD (Deere i in. 1967)

Table 3.1

RQD classification (Deere et al. 1967)

Stopień skali	Przedział zmienności wskaźnika RQD [%]	Jakość górotworu
I	0–25	bardzo słaba
II	26–50	słaba
III	51–75	średnia
IV	76–90	dobra
V	91–100	bardzo dobra

Dla zobrazowania sposobu oceny stopnia spękania za pomocą RQD, na fotografiach 3.1–3.5 przedstawiono przykład wyników takiej analizy przeprowadzonej na rdzeniach z otworów badawczych wykonanych w warunkach geologicznych niecki bytomskiej.



Fot. 3.1. Bardzo słaba jakość górotworu, RQD ≤ 25%

Phot. 3.1. Very poor quality of the rock mass, RQD ≤ 25%



Fot. 3.2. Słaba jakość górotworu, $25 < \text{RQD} \leq 50\%$

Phot. 3.2. Poor quality of the rock mass, $25 < \text{RQD} \leq 50\%$



Fot. 3.3. Średnia jakość górotworu, $50 < \text{RQD} \leq 75\%$

Phot. 3.3. Medium quality of the rock mass, $50 < \text{RQD} \leq 75\%$



Fot. 3.4. Dobra jakość górotworu, $75 < \text{RQD} \leq 90\%$

Phot. 3.4. Good quality of the rock mass, $75 < \text{RQD} \leq 90\%$



Fot. 3.5. Bardzo dobra jakość górotworu, $90 < \text{RQD} \leq 100\%$

Phot. 3.5. Very good quality of the rock mass, $90 < \text{RQD} \leq 100\%$

W przypadku, gdy brak jest danych z otworów badawczych, wskaźnik RQD oblicza się z zależności związanej z liczbą spękań w jednostce objętości (Palmström 1974):

$$\text{RQD} = 115 - 3,3 \cdot J_v \quad (3.1)$$

Dla mniejszego od 4,5: $\text{RQD} = 100$.

Wielkość J_v opisuje liczbę spękań należących do systemów spękań w 1 m^3 górotworu (ISRM 1978):

$$J_v = \sum \frac{J_{ni}}{\sum J_{ni}} \quad (3.2)$$

gdzie:

J_{ni} – liczba spękań danego systemu spękań w 1 m^3 .

Do obliczenia J_{ni} we wskazaniach ISRM (1978) sugeruje się zliczenie spękań na odcinku 5–10 m masywu skalnego. Na podstawie wskaźnika J_v klasyfikuje się wielkość bloków skalnych górotworu (tab. 3.2).

Tabela 3.2

Klasyfikacja wielkości bloków skalnych (ISRM 1978)

Table 3.2

Classification of the size of rock blocks (ISRM 1978)

Opis wielkości bloku skalnego	Liczba spękań w jednostce objętości J_v [liczba / m^3]
Bardzo duże	$< 1,0$
Duże	1–3
Średnie	3–10
Małe	10–30
Bardzo małe	> 30

W klasyfikacjach geotechnicznych wykorzystywana bywa również wielkość nazywana wskaźnikiem wielkości bloku skalnego I_b (ISRM 1978). Wskaźnik ten wyraża przeciętną odległość pomiędzy płaszczyznami siatki spękań.

W sytuacji, gdy do określenia RQD mamy dostępny jedynie ocios wyrobiska, można wykorzystać zależność Priesta i Hudsona (1976):

$$RQD = 100 \cdot (1 + 0,1 \cdot J_{ns}) e^{-0,1 \cdot J_{ns}} \quad (3.3)$$

gdzie:

J_{ns} – liczba spękań na 1 m.

Zależność 4.3 opracowana została przy założeniu losowego rozkładu spękań zgodnie z rozkładem Poissona.

Wskaźnik RQD używany jest powszechnie do oceny stopnia spękania masywu skalnego w zagadnieniach z zakresu budownictwa górniczego i inżynierskiego. Jest on podstawowym parametrem wielu klasyfikacji geotechnicznych, takich jak RMR₈₉, SMR (ang. *Slope Mass Rating*) (Romana 1985) lub Q.

3.4. Inne metody oceny stopnia spękania ośrodka skalnego

Metoda endoskopowa

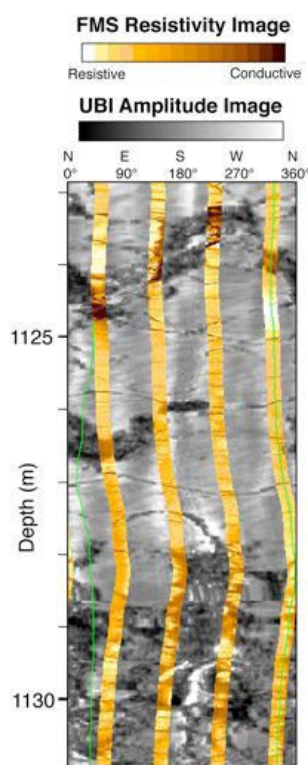
Metoda ta polega na analizie rejestracji obrazu ścianki otworu badawczego wykonanego w masywie skalnym pod kątem identyfikacji i charakterystyki występujących spękań. Używa się do tego celu specjalnej głowicy badawczej z wbudowaną miniaturową kamerą, której obiektyw wraz z mikroprocesorem znajduje się w krótkim odcinku rury. W skład urządzenia wchodzi także rejestrator z podglądem obrazu. Pomiarów rozwarcia spękań i kątów, pod jakimi przecinają one otwór wiertniczy można dokonać bezpośrednio w trakcie pomiaru, lub z większą precyzją w laboratorium, co umożliwia uzyskanie dokładności rozmiarów identyfikowanych szczegółów rzędu 0,1 mm. Analiza wykonanych obrazów polega na określeniu trzech wielkości: zasięgu strefy spękań, liczby spękań i szczelin oraz sumarycznego rozwarcia szczelin. Powtarzając pomiary wielokrotnie można porównywać sekwencje obrazu i wychwycić zachodzące w czasie różnice w rozwarciu i lokalizacji spękań. Podstawową zaletą tego typu badań jest możliwość ilościowej i jakościowej oceny stopnia spękania ścianki otworu badawczego.

Metoda elektrooporowego obrazowania ścianki otworu

Pomiary elektrooporowego obrazowania ścianki otworu wykonywane są w głębokich otworach wiertniczych. Badania polegają na pomiarze mikrooporności elektrycznej w otworze wypełnionym płuczką. Pomiary te pozwalają na uzyskanie obrazu ścianki otworu, dzięki którym możliwe jest określenie, jak również scharakteryzowanie struktury spękań w otworze wiertniczym.

Metoda obrazowania ścianki otworu skanerem ultradźwiękowym

Skaner ultradźwiękowy pozwala analizować strukturę spękań w otworze wiertniczym za pomocą fali akustycznej. Metodę stosuje się w otworze bez płuczki wiertniczej. Pomiarzy skanerem ultradźwiękowym mogą być wykonane w otworach niezależnie od sposobu zabezpieczenia jego ścianek. Na rysunku 3.5 przedstawione zostało porównanie wyników pomiarów obrazowania ścianki otworu sondą FMS Schlumbergera oraz skanera ultradźwiękowego UBI Schlumbergera.



Rys. 3.5. Porównanie wyników obrazowania ścianki otworu sondą FMS oraz skanera ultradźwiękowego UBI (Williams 2008)

Fig. 3.5. Comparison of the results of imaging borehole wall with probe FMS and ultrasound scanner UBI (Williams 2008)

Metoda sejsmiczna

Barton (1996) opracował klasyfikację Q_c na podstawie wyników badań wykonanych techniką refrakcji oraz prześwietlania między otworowego. Klasyfikacja Q_c wynika z następującej zależności (Barton 1996):

$$Q_c = \left(\frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \right) \cdot \frac{R_c}{100} \quad (3.4)$$

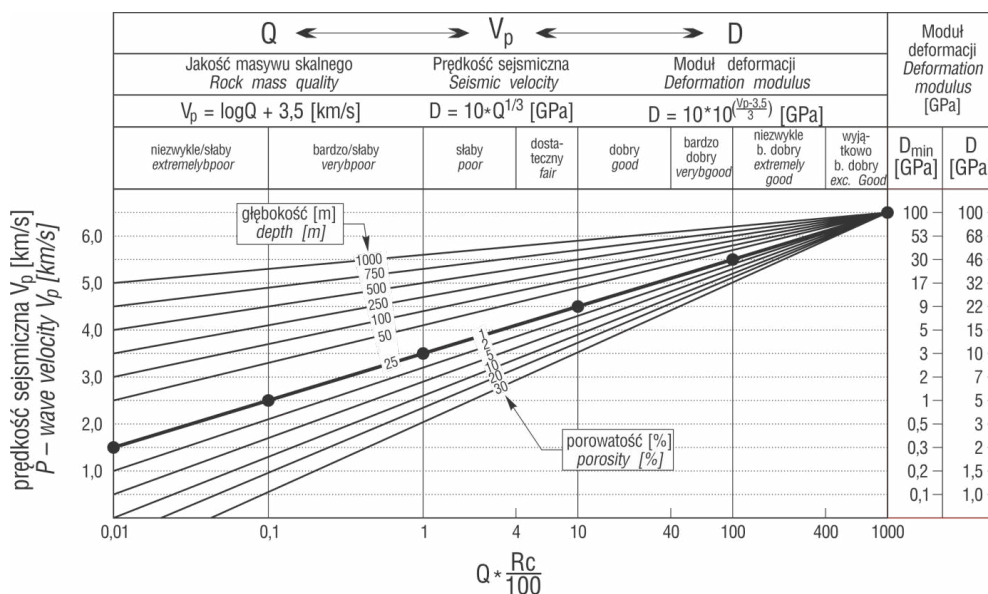
gdzie:

- RQD – wskaźnik stopnia spękania górotworu,
- J_n – wskaźnik systemów spękań,
- J_r – wskaźnik określający chropowatość powierzchni spękań,
- J_a – wskaźnik określający przeobrażenie płaszczyzn nieciągłości,
- J_w – wskaźnik dopływu wody,
- SRF – wskaźnik stanu naprężenia,
- R_c – wytrzymałość skał na jednoosiowe ściskanie.

Na rysunku 3.6 przedstawiony został nomogram skonstruowany przez Bartona (1996), który uwzględnia również głębokość i porowatość jako istotne czynniki wpływające na prędkość fali podłużnej.

Punktacja Q_c jest skorelowana z punktacją klasyfikacji RMR zgodnie z równaniem (Barton 1996):

$$RMR = 15 \cdot \log Q_c + 50 \quad (3.5)$$



Rys. 3.6. Nomogram klasyfikacji Q (Barton 1996)

Fig. 3.6. Nomogram of Q classification (Barton 1996)

Inną klasyfikację geofizyczną z zastosowaniem fal sejsmicznych zaproponował Sjögren i in. (1979). Przeprowadzili oni badania związku pomiędzy prędkością fali podłużnej V_p a liniową gęstością spękań oraz wskaźnikiem stopnia spękania RQD. Zaproponowali sejsmiczny wskaźnik Q_1 (ang. *Quality Index*) obliczany następująco (Sjögren i in. 1979):

$$Q_I = 100 \cdot \frac{V_{p \text{ } \acute{s}r}}{V_{P0}} \quad (3.6)$$

gdzie:

- $V_{p \text{ } \acute{s}r}$ – wartość średnia prędkości fali podłużnej P mierzonej w masywie skalnym,
 V_{P0} – prędkość fali podłużnej P mierzona w masywie niespękanym.

Przedziały zmienności wskaźnika odpowiadają klasom górotworu podanym w tabeli 3.3.

Tabela 3.3

Klasyfikacja masywu skalnego Q_1 (Sjögren i in. 1979)

Table 3.3

QI Classification (Sjögren et al. 1979)

Wartość Q_1	100–91	90–76	75–51	50–25	< 25
Klasa górotworu	bardzo dobra	dobra	średnio dobra	słaba	bardzo słaba

4. Sposób oceny stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą otworowej metody georadarowej

4.1. Podstawowe założenia metodyki badań

W metodyce badań przyjmuje się, że istnieje związek między gęstością spękań ośrodka skalnego a wielkością amplitudy zarejestrowanego sygnału georadarowego. Im większa gęstość spękań, tym mniejsze amplitudy ze względu na tłumienie sygnału. Tłumienie w tym przypadku jest łącznym efektem rozproszenia i tłumienia wewnętrznego, nazywanego również materiałowym. Jeżeli tłumienie wewnętrzne pominiemy przy porównaniach różnych odcinków pomiarowych w tym samym ośrodku skalnym, to decydujący wpływ na wielkość amplitudy będzie miało rozproszenie zależne od stopnia spękań ośrodka. W związku z tym przedmiotem badań jest ilościowa zależność między wartością znormalizowanej i uśrednionej amplitudy sygnału georadarowego, a stopniem spękania ośrodka skalnego opisanym wskaźnikiem RQD i obliczonym na podstawie rdzenia wiertniczego. W tym celu opracowano specjalny sposób przetwarzania i interpretacji danych georadarowych przedstawiony w tym rozdziale. Ze względu na bardzo dużą liczbę próbek sygnału, rzędu kilkuset tysięcy dla otworu o głębokości ok. kilkudziesięciu metrów, przetwarzanie i interpretacja danych wymaga zastosowania narzędzi statystycznych. Należy również podkreślić, że obliczenia wskaźnika RQD dla potrzeb korelacji z danymi georadarowymi wymagają specjalnego podejścia, a zwłaszcza przyjęcia jednakowej metodyki jego wyznaczania oraz najkorzystniej jest gdy są realizowane przez jednego interpretatora. W efekcie badań można wyznaczyć klasyfikację oceny stopnia spękania ośrodka skalnego na podstawie rejestracji amplitudy sygnału georadarowego, którą nazwano RQD-BGPR.

Rozpoznanie jakości ośrodka metodą BGPR powinno być jak najbardziej szczegółowe (rozdzielcze) w możliwie jak największym zasięgu radialnym od otworu. W rzeczywistości jakość rozdzielczości oraz zasięg penetracji w ośrodku metodą BGPR wzajemnie się ograniczają. Na przykład w celu zwiększenia zasięgu penetracji należy użyć anteny BGPR o mniejszej częstotliwości. Jednocześnie powoduje to zmniejszenie rozdzielczości radarogramu (Karczewski 2011). W celu uzyskania możliwie korzystnych wyników oceny jakości ośrodka najczęściej stosuje się anteny BGPR od 100 do 250 MHz. W opracowanej metodyce badań, w warunkach ośrodka skalnego, zastosowano antenę o częstotliwości środkowej 100 MHz.

Podstawowe zasady pomiaru BGPR są podobne do techniki sejsmicznego profilowania refleksyjnego w otworze. Zastosowane w metodyce procedury przetwarzania danych pomiarowych są również podobne do procedur sejsmiki refleksyjnej.

Metodyka badań została opracowana dla BGPR z dookólną rejestracją danych. Przyjmuje się, że punktem pomiarowym jest środek odległości pomiędzy anteną odbiorczą i nadawczą.

Pomiary BGPR zaleca się przeprowadzać w pustych, niezawodnionych otworach. W przypadku otworów wypełnionych wodą lub płuczką, należy liczyć się z dodatkowym tłumieniem sygnału.

Ścianki otworu powinny być zabezpieczone przed utratą stateczności w taki sposób, aby nie zakłócać sygnału georadarowego. Najkorzystniej jest zastosować plastikowe rury obsadowe z polichlorku winylu (PCW).

4.2. Opis metodyki badań

Metodykę badania stopnia spękania ośrodka skalnego na podstawie rejestracji amplitudy sygnału BGPR przedstawiono za pomocą schematu na rysunku 4.1. Schemat ten został skonstruowany z wykorzystaniem doświadczeń własnych związanych z wykonywaniem, przetwarzaniem i interpretacją ponad 100 pomiarów metodą GPR w różnych warunkach geologiczno-inżynierskich, na powierzchni terenu i w warunkach kopalń podziemnych.

Metodyka badań jest realizowana w czterech podstawowych etapach:

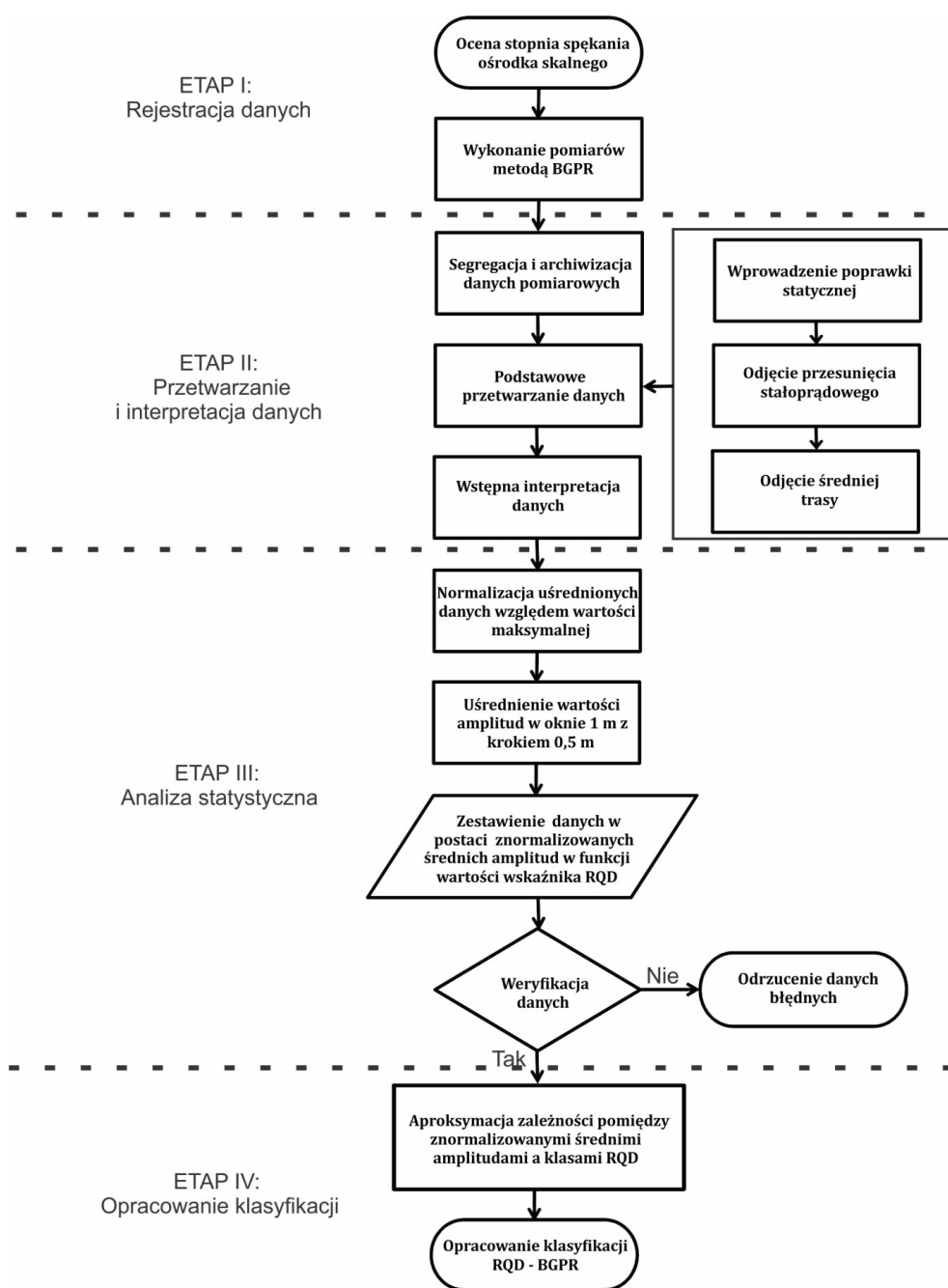
- Etap I – rejestracja danych georadarowych na odcinkach otworu z obliczonym wskaźnikiem RQD.
- Etap II – przetwarzanie i interpretacja danych georadarowych w określonej trójwymiarowej przestrzeni wokół otworu badawczego.
- Etap III – analiza statystyczna danych georadarowych w celu wyznaczenia zależności między znormalizowaną średnią amplitudą sygnału BGPR a stopniem spękania ośrodka skalnego opisanego wskaźnikiem RQD.
- Etap IV – opracowanie klasyfikacji RQD-BGPR w charakterystycznych warunkach geologiczno-inżynierskich.

4.3. Opis etapów metodyki badań

4.3.1. Etap I – rejestracja danych georadarowych

Rejestracja danych pomiarowych związana jest z doбором następujących parametrów:

- okna czasowego zarejestrowanego sygnału TW (ang. *Time Window*),
- częstotliwości próbkowania trasy sygnału SF (ang. *Sampling Frequency*),



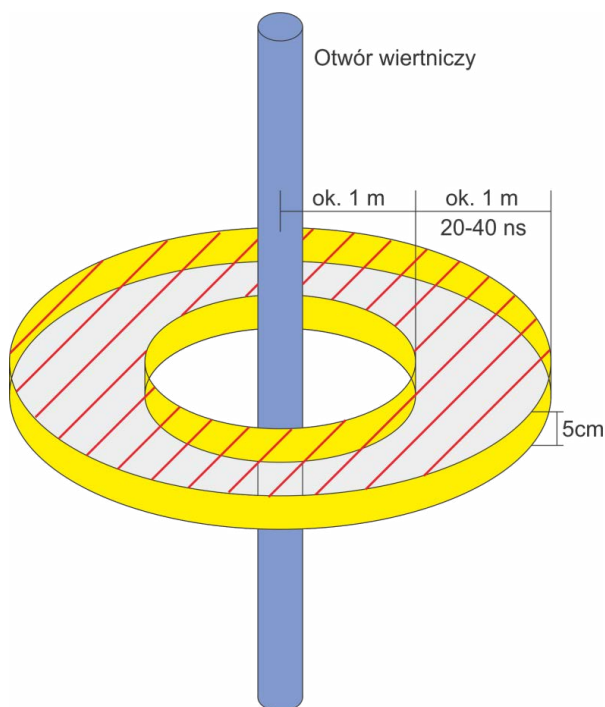
Rys. 4.1. Schemat sposobu oceny stopnia spełnienia ośrodka skalnego na podstawie zmian wartości znormalizowanej średniej amplitudy sygnału georadarowego

Fig. 4.1. Process scheme of evaluation the degree of fracturing in the rock mass on the basis of changes in the value of the normalized average amplitude of GPR signal

- częstotliwości wzbudzenia sygnału w domenie czasu lub odległości TI (ang. *Trig Interval*),
- liczby złożów (sumowań) sygnału lub gęstości pokrycia NS (ang. *Number of Stacks*).

Na podstawie wielu testów w warunkach pomiarowych omawianych badań dla każdej trasy zostało wybrane stałe okno czasowe TW od 20 do 40 ns, w którym wykonuje się dalszą analizę sygnału BGPR. Okno TW odpowiada zasięgowi rozpoznania od około 1 do około 2 m od osi otworu.

Biorąc pod uwagę dookólny sposób rejestracji anteny otworowej, wartości amplitudy sygnału w tym oknie są odpowiedzią ośrodka skalnego w kształcie cylindrycznego pierścienia o promieniu wewnętrznym około 1 m i promieniu zewnętrznym około 2 m, licząc od osi otworu oraz wysokości 5 cm (rys. 4.2). Zakłada się, że taki cylindryczny pierścień odpowiada jednej zarejestrowanej trasie. Przyjęcie takiego sposobu odwzorowania danych georadarowych związane jest z jednej strony z usunięciem części rejestracji zniekształconej odpowiedzi ośrodka skalnego naruszonego wykonaniem otworu, a z drugiej strony rejestracją sygnału jedynie w małym stopniu zniekształconego tłumieniem ośrodka w przypadku anteny o częstotliwości 100 MHz.



Rys. 4.2. Wymiary umownego fragmentu przestrzeni ośrodka skalnego w kształcie cylindrycznego pierścienia przyporządkowanego jednej trasie sygnału georadarowego

Fig. 4.2. The dimensions of the contractual fragment of rock mass in the shape of a cylindrical ring assigned to a single trace of GPR signal

Przyjęto stałą częstotliwość próbkowania trasy SF. Na podstawie badań własnych częstotliwość ta wynosi 1191 MHz i odpowiada krokowi próbkowania równemu około 0,84 ns.

W przypadku częstotliwości wzbudzenia sygnału TI przyjęto krok 0,05 m.

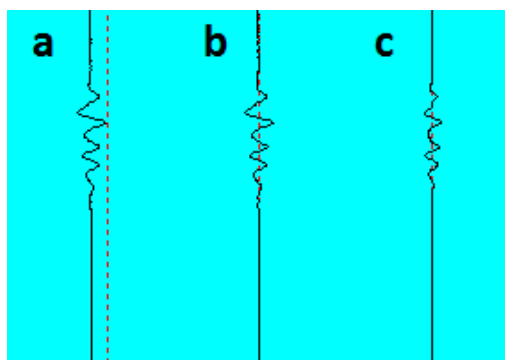
W celu uzyskania jak najlepszych danych zastosowano złożenie NS równe 64 trasy. Jest to liczba większa od zalecanej dla typowych pomiarów georadarowych, lecz w przypadku analizy amplitudy sygnału jest to wskazane.

4.3.2. Etap II – przetwarzanie i interpretacja danych georadarowych

Dane georadarowe podlegają uproszczonemu przetwarzaniu w celu ograniczenia zniekształcenia amplitudy zarejestrowanego sygnału BGPR. W związku z tym nie stosuje się procedur wzmocnienia sygnału i filtracji częstotliwościowej. Metodyka badań przewiduje jedynie wprowadzenie poprawki statycznej oraz usunięcie składowej stałoprądowej.

Wprowadzenie poprawki statycznej polega na wyeliminowaniu przesunięcia czasowego spowodowanego zróżnicowanym położeniem anteny otworowej względem ściany otworu. W rezultacie zastosowanej procedury obliczeniowej czasy pierwszych wstąpień zarejestrowanego sygnału są sprowadzone do czasu T_0 .

Składowa stałoprądowa sygnału jest związana ze zwiększoną wartością amplitudy w wyniku wpływu fal powietrznej, Stoneley'a oraz odbitej wytworzonych w otworze. Składowa ta powoduje wzmocnienie i zniekształcenie rejestrowanego sygnału (Fisher i in. 1992). Powstaje zakłócenie o niskiej częstotliwości, które może narastać w czasie. Składowa stałoprądowa jest w przybliżeniu identyczna dla każdej trasy. W celu jej usunięcia najczęściej wykorzystywane są dwie procedury: odjęcie średniej trasy oraz odjęcie przesunięcia stałoprądowego. Na rysunku 4.3 przedstawiono przykładową trasę przed (rys. 4.3a) i po usunięciu składowej stałoprądowej (rys. 4.3b i c).



Rys. 4.3. Przykładowa trasa georadarowa (a) po odjęciu przesunięcia stałoprądowego (b) oraz odjęciu średniej trasy (c)

Fig. 4.3. Sample of a GPR trace (a) after DC-shift (b) and subtracting the mean trace (c)

Opisane procedury są poprzedzone usunięciem zniekształconych tras spowodowanych błędami aparatury pomiarowej oraz zniekształconych tras zarejestrowanych w strefie przypowierzchniowej, głównie na odcinku gruntów antropogenicznych.

Natomiast wstępna interpretacja związana jest z konwersją danych georadarowych z domeny czasu do domeny odległości w wybranym oknie pomiarowym.

4.3.3. Etap III – analiza statystyczna danych georadarowych

Sposób statystycznej obróbki danych został zilustrowany za pomocą schematu na rysunku 4.4.

Przetworzone dane georadarowe są transformowane z formatu zapisu producenta aparatury MALÅ .rd3 do formatu ASCII. W tym formacie są one przedstawione w następujący sposób: w każdym wierszu, w trzech kolumnach znajdują się kolejno numer trasy, numer próbki oraz wartość amplitudy dla danej próbki.

Analiza statystyczna jest prowadzona dla danych znajdujących się w oknie czasowym każdej trasy od 20 do 40 ns. Obliczana jest wartość bezwzględna, a następnie średnia amplituda w danym oknie konkretnej trasy. Uzyskane w ten sposób wartości średnie amplitudy dla danej trasy, w celu korelacji danych między różnymi otworami badawczymi, są normalizowane względem wartości maksymalnej amplitudy obliczonej według następującego wzoru:

$$Amp_{max} = \bar{x} + 3 \cdot \sigma \quad (4.1)$$

gdzie:

- $\bar{x}$ – wartość średnia amplitudy georadarowej dla całego rejonu badań,
- σ – odchylenie standardowe.

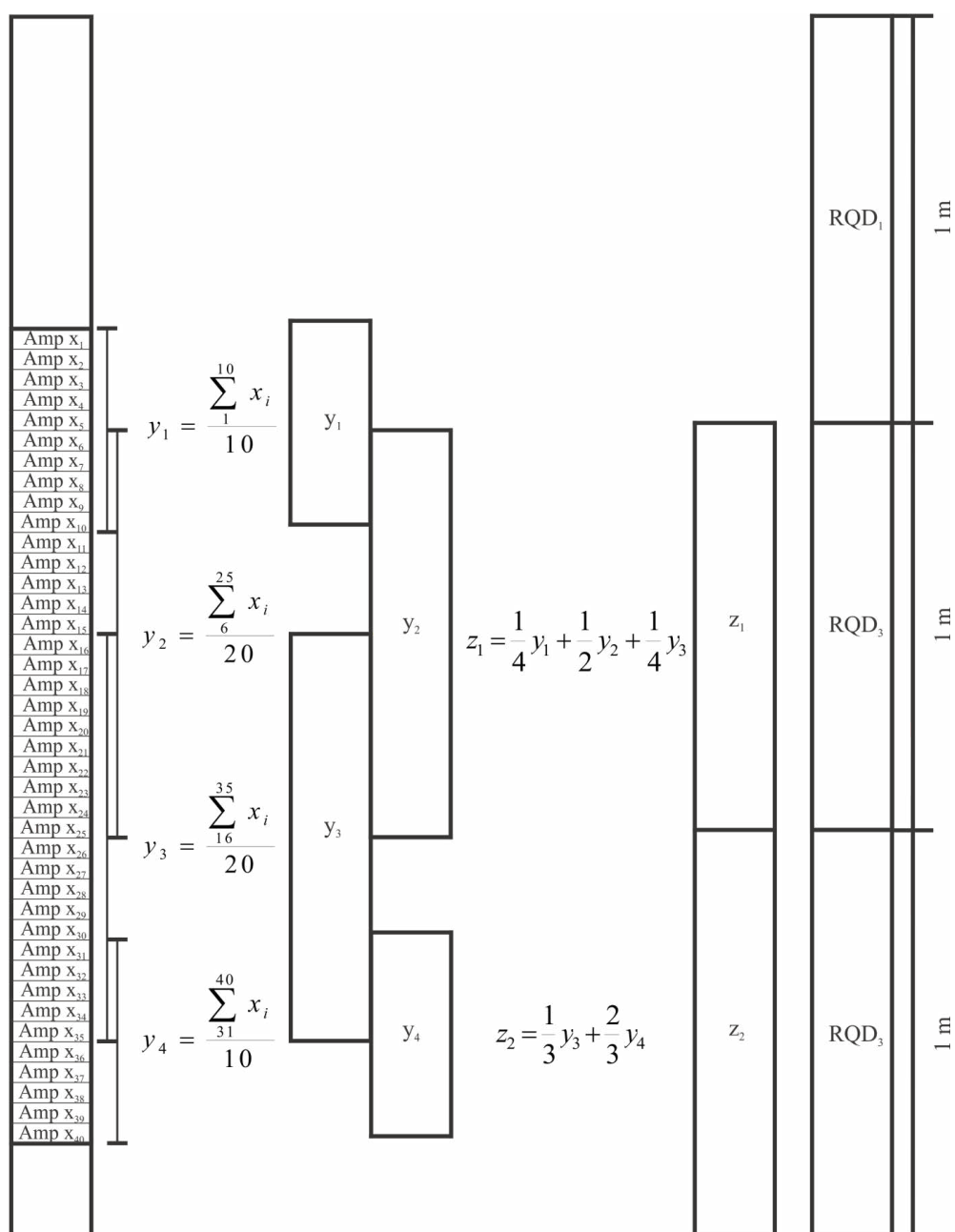
W następnej kolejności oblicza się średnią arytmetyczną amplitudy dla kolejnych odcinków o długości 1 m z krokiem co 0,5 m. Odcinki uśrednienia o długości 1 m należy dobrać w taki sposób, aby odpowiadały one odcinkom obliczenia wskaźników RQD. W tym celu oblicza się średnią arytmetyczną z kolejnych 20 wartości znormalizowanych amplitud odpowiadających kolejnym trasom, mając na uwadze założenie, że każda trasa jest przyporządkowana cylindrycznemu pierścieniowi w ośrodku o wysokości 5 cm. W przypadku odcinków skrajnych w otworze, liczba tras może być inna niż 20. W tym wypadku należy dostosować sposób obliczenia średniej.

Wartości amplitudy uśrednione na odcinkach jednometrowych wzdłuż osi otworu są pomnożone przez wartości wagowe w następujący sposób:

$$Amp z_j = 0,25 \cdot Amp y_{i-1} + 0,5 \cdot Amp y_i + 0,25 \cdot Amp y_{i+1} \quad (4.2)$$

gdzie:

- $Amp z_j$ – wartość znormalizowanej średniej amplitudy na odcinku 1 m odpowiadającemu odcinkowi obliczenia wskaźnika RQD,



Rys. 4.4. Schemat sposobu uśredniania znormalizowanych wartości średnich amplitud

Fig. 4.4. Process scheme of the averaging of normalized average values of amplitudes

- $Amp\ y_i$ – wartość znormalizowanej średniej amplitudy na odcinku 1 m, liczonej z krokiem co 0,5 m,
 $Amp\ y_{i\pm 1}$ – wartość znormalizowanej średniej amplitudy przed, lub po $Amp\ y_i$.

W przypadku odcinków skrajnych wartości wag zostały opisane równaniem:

$$Amp\ z_j = 0,33 \cdot Amp\ y_{i\pm 1} + 0,66 \cdot Amp\ y_i \quad (4.3)$$

Obliczane są wartości znormalizowanej średniej amplitudy z każdego odcinka jednego metra pomierzonego otworu odpowiadającego jednometrowemu odcinkowi obliczenia wskaźnika RQD. Uzyskane uśrednione wartości znormalizowanych średnich amplitud zestawione zostają z wartościami RQD otrzymanymi na podstawie rdzeni wiertniczych dla danego otworu, którym zostały przypisane wartości klas zgodnie z klasyfikacją przedstawioną w tabeli 3.2. W efekcie wartości znormalizowanych średnich amplitud są korelowane z wartościami wskaźników RQD.

Następnie odrzucono dane z otworów dla których współczynnik korelacji liniowej Pearsona jest mniejszy niż 0,4. Weryfikacja taka pozwala na odrzucenie zniekształconych danych pod kątem oceny stopnia spękania na podstawie zarejestrowanej odpowiedzi impulsowej ośrodka.

W kolejnych obliczeniach analizuje się cechy rozkładu przetworzonych amplitud sygnału BGPR. W tym celu analizuje się wyniki korelacji wartości znormalizowanej średniej amplitudy z wartościami wskaźnika stopnia spękania RQD w poszczególnych klasach RQD. Zostały zastosowane różnego rodzaju miary statystyczne, a mianowicie:

- średnia arytmetyczna, która obrazuje przeciętny wynik w danej klasie;

$$\bar{\mu} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{N} \quad (4.4)$$

- średnia geometryczna, która jest miarą przeciętnego poziomu wartości;

$$\bar{\mu}_g = \sqrt[n]{x_1 + x_2 + \dots + x_n} \quad (4.5)$$

- mediana – określająca wartość środkową w danej klasie;

$$M_e = \frac{\frac{x_n}{2} + \frac{x_{n+1}}{2}}{2} \text{ lub } M_e = \frac{x_{n+1}}{2} \quad (4.6)$$

- odchylenie standardowe – charakteryzujące rozrzut wartości w klasie;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{\mu})^2}{N}} \quad (4.7)$$

- współczynnik zmienności czyli zmienność wyników od wartości średniej;

$$v = \frac{\sigma}{\bar{\mu}} \quad (4.8)$$

- błąd standardowy średniej, który mówi o ile może zmienić się wartość średnia;

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.9)$$

- błąd standardowy mediany, który mówi o ile może zmienić się wartość mediany;

$$SE_{Me} = \frac{1,253 \cdot \sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.10)$$

- błąd standardowy odchylenia standardowego, który mówi o ile może zmienić się wartość odchylenia standardowego,

$$SE_{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{2N}} \quad (4.11)$$

- wariancja, która informuje o tym, jak duże jest zróżnicowanie wartości w danej klasie;

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{\mu})^2}{N} \quad (4.12)$$

- kurtoza, która określa jak bardzo skoncentrowane są wyniki wokół wartości średniej;

$$K = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{x - \bar{\mu}}{\sigma} \right)^4 - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (4.13)$$

- skośność, będąca miarą asymetrii informująca jak wartości kształtują się wokół wartości średniej;

$$SKE = \frac{n \sum (x_i - \bar{\mu})^3}{(n-1)(n-2)\sigma^3} \quad (4.14)$$

- zakres wartości amplitudy, czyli przedział wartości w danej klasie RQD;
- suma wartości amplitudy w danej klasie RQD;
- liczebność populacji amplitudy w danej klasie RQD;
- przedziały ufności dla $\alpha = 0,05$ i $\alpha = 0,1$ oraz typowe przedziały zmienności dla średniej arytmetycznej oraz mediany w poszczególnych klasach RQD.

Następnie, z użyciem miar statystycznych, analizowano rozkład danych pod kątem zgodności z rozkładem normalnym. Została określona gęstość prawdopodobieństwa oraz dystrybuenta prawdopodobieństwa rozkładu normalnego w każdej klasie RQD. Odrzucono anomalne wartości znormalizowanych średnich amplitud.

4.3.4. Etap IV – opracowanie klasyfikacji RQD-BGPR

Ostatnim etapem zaproponowanego sposobu oceny stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą metody BGPR jest przyporządkowanie znormalizowanych średnich amplitud dla poszczególnych klas RQD, czyli opracowanie klasyfikacji RQD-BGPR. W tym celu należy przeprowadzić aproksymację zależności wartości przetworzonych znormalizowanych średnich amplitud od wartości wskaźnika RQD. Dla potrzeb aproksymacji autor rozprawy, po przeprowadzeniu wielu testów, zaproponował zastosowanie regresji liniowej z jednym predyktorem w postaci $y = bx + a$. W praktyce oznacza to, że wraz ze wzrostem klasy RQD rośnie przewidywana wartość znormalizowanej średniej amplitudy sygnału georadarowego.

Zakresy w każdej klasie RQD-BGPR_i określone są za pomocą zależności:

$$\bar{\mu}_i - \sigma_i \leq RQD - BGPR_i \leq \bar{\mu}_i + \sigma_i \quad (4.15)$$

gdzie:

- $\bar{\mu}_i$ – średnia arytmetyczna znormalizowanych średnich amplitud w danej klasie RQD-BGPR,
- σ_i – odchylenie standardowe znormalizowanych średnich amplitud w danej klasie RQD-BGPR.

Poszczególne zakresy wartości amplitudy w klasyfikacji RQD-BGPR zależą od otrzymanej zależności liniowej, która jest charakterystyczna dla konkretnych warunków geologiczno-inżynierskich.

5. Badania stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą otworowej metody georadarowej w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej

5.1. Wprowadzenie

Badania stopnia spękania ośrodka skalnego metodą BGPR przeprowadzono w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej. Rejon badań znajdował się na obszarze odcinka autostrady A-1 pomiędzy Piekarami a Bytomiem (rys. 5.1). W tym rejonie zostały wykonane badania metodą BGPR w celu identyfikacji pustek i stref rozluźnień w górotworze w podłożu realizowanej autostrady. Wykonane otwory badawcze posłużyły w dalszej kolejności do uzdatnienia podłoża w rejonach występowania anomalii geofizycznych.

Badania metodą BGPR zostały przeprowadzone w 146 otworach. Dla 69 z nich obliczone zostały wartości wskaźnika stopnia spękania górotworu RQD. Obliczenia wskaźnika RQD wykonał uprawniony geolog inżynierski zatrudniony przy budowie autostrady. Wyniki tych obliczeń były również weryfikowane przez geologa nadzorującego ze strony IGSMiE PAN.

W rozdziale tym omówiono możliwie szczegółowo realizację kolejnych etapów metodyki oceny stopnia spękania ośrodka skalnego przedstawionej w rozdziale 4. W efekcie, w końcowej części tego rozdziału, przedstawiono klasyfikację RQD-BGPR dostosowaną do warunków przeprowadzonych badań. Klasyfikacja została zweryfikowana pod kątem zgodności wskazań z klasyfikacją RQD na przykładzie wybranych otworów badawczych.

5.2. Warunki geologiczne i górnicze w rejonie niecki bytomskiej

5.2.1. Położenie geograficzne i morfologia

Obszar niecki bytomskiej jest położony w obrębie Wyżyny Śląskiej, na Płaskowyżu Bytomsko-Katowickim przez który przebiega dział wód Odry i Wisły. Niecka bytomska charakteryzuje się przebiegiem niemalże równoleżnikowym. Znajduje się ona w północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (rys. 5.2).



Rys. 5.1. Lokalizacja otworów z przeprowadzonymi badaniami metodą BGPR na tle przebiegu autostrady A-1 oraz zarejestrowanych anomalii geofizycznych i wyrobisk historycznej eksploatacji złoża rud metali na obszarze między Bytomiem a Piekarami Śląskimi

Fig. 5.1. Location of boreholes with BGPR measurements on the background of the A-1 motorway with marked geophysical anomalies and historical excavations of metal ore mining in the area between Bytom and Piekary Śląskie



Rys. 5.2. Szkic tektoniczny Górnosląskiego Zagłębia Węglowego (Zajac 2012)

Fig. 5.2. Tectonic sketch of the Upper Silesian Coal Basin (Zajac 2012)

Powierzchnia tego obszaru jest słabo zmienna, jedynie fragmentarycznie lekko pofałdowana. Rzędna analizowanego obszaru nie przekracza wysokości 300 m n.p.m. z wyjątkiem północnej części niecki. Morfologia terenu jest efektem przede wszystkim działalności silnej erozji trzeciorzędowej i wietrzenia krasowego oraz następującej po niej aktywności lodowca plejstoceniowego (Piwowarski i Żeglicki 1977). Dzisiejsze ukształtowanie okolic Bytomia jest także rezultatem wpływów podziemnej eksploatacji górniczej, która do niedawna funkcjonowała z dużą dynamiką. Na powierzchni terenu obserwuje się różnego rodzaju deformacje nieciągłe w postaci zapadlisk, zrębów, lejów itp. Widoczne są różnego rodzaju pogórnice i pohutnicze hałdy.

5.2.2. Warunki geologiczne

Budowa geologiczna w rejonie niecki bytomskiej objętej płytką eksploatacją rud jest bardzo złożona. Występują tu zarówno utwory karbońskie, triasowe, fragmentarycznie utwory jurajskie w postaci płatów, trzeciorzędowe (neogenu), czwartorzędowe, jak również utwory antropogeniczne. Bardziej szczegółowe omówienie budowy geologicznej można znaleźć w pracy Piwowarskiego i Żeglickiego (1977).

Utwory karbonu występują w podłożu osadów triasowych na głębokości około 180 m, a miejscami na głębokości 60 m. Reprezentowane są przez warstwy rudzkie (namur C i we-

stfał A) należące do serii limnicznej, o przewodzie łupków piaszczystych z wkładkami piaszczystymi, o miąższości około 20 m, warstwy siodłowe (namur B-C) tworzące tzw. górno-śląską serię piaszczystą zaliczaną do serii limnicznej o miąższości od 180 do 200 m oraz warstwy grupy brzeżnej (namur A). Najwyższe ogniwo należy do serii paralicznej i wykształcone w facji piaszczysto-ilastej z cienkimi pokładami węgla. W rejonie przeprowadzonych badań karbon w zasadzie nie odsłania się na powierzchni terenu.

Pomimo że na całym obszarze śląsko-krakowskim na utworach karbońskich niezgodnie zalegają powstałe w warunkach lądowych klimatu suchego skały permskie, to wyjątkowo w niecce bytomskiej nie występują zlepionce myślachowickie czerwonego spągowca, ani czerwone iły z gipsami i solą (Ekiert i Gałkiewicz 1960).

Utwory triasowe zalegają niezgodnie na pofałdowanych i poprzecinanych uskokami utworach karbonu. Utwory te obejmują środkową część niecki bytomskiej wraz z północnym obrzeżem. Niecka bytomska zapada w kierunku południowym, w taki sposób, że na południowych obrzeżach utwory triasowe posiadają znaczącą miąższość dochodzącą do 240 m, natomiast na północnych obrzeżach znajdują się wychodnie warstw triasowych. Utwory triasowe zbudowane są z warstw takich jak:

- **środkowy i dolny pstry piaskowiec** – reprezentuje sedymentację lądową w klimacie suchym. Najstarsze utwory triasowe występują w postaci żółtych i białych piasków kwarcowych z podrzędną ilością skałeni i łyszczyków. Pojawiają się miejscami żwirry oraz piaskowce scementowane ilastym i wapiennym spoiwem. Powyżej warstw piaskowcowych, pojawia się ławica ilów wapiennych wykazująca barwę wiśniową, czerwoną, brunatną, a niekiedy niebieskawą lub szarozieloną. Miąższość tych utworów wynosi od kilku do 25 m;
- **górny pstry piaskowiec** – w okresie retu następuje zmiana środowiska sedymentacyjnego. W dolnych partiach osady mają charakter osadów morza transgresywnego przechodzącego w osady izolowanego, wysychającego zbiornika wodnego o dość dużych rozmiarach. Utwory dolnoreckie reprezentowane są przez brunatno-kremowe, żółtawe lub zielonawoszare ilaste margle dolomityczne z przerostami kremowych dolomitów marglistych, a także ciemnoszare, warstwowane wapienie drobno-krystaliczne. Miąższości tych utworów w rejonie niecki bytomskiej osiągają około 25 m. W górnych partiach ret górny, którego miąższość waha się od około 10 do 20 m, zdominowany jest przez żółte i brunatne, gruboziarniste wapienie krystaliczne z drobnymi wkładkami ilasto-gliniastymi i przeławiczeniami wapienia drobno-krystalicznego z bułami krzemianowymi. Charakterystyczny dla tej części retu jest wapień grubokrystaliczny z wtórnym jamistym wykształceniem;
- **warstwy gogolińskie** – w rejonie niecki bytomskiej warstwy gogolińskie dolne podzielone są na trzy części: wapienie z *Pecten discites* i *Dadocrinus kunischi*, wapień falisty I oraz wapienie komórkowe. Na granicy pomiędzy retem górnym a wapieniem muszlowym dolnym występują cienkopłytowe wapienie krystaliczne z marglami oraz z licznymi szczątkami liliowców, zawierające kalcyt i glaukonit. Kolejnym ogniwo jest wapień falisty I. Są to warstewki jasnoszarego, zbitego wapienia drobnofalistego

z przeławieniami wapieni krystalicznych i margli. Najwyższe ogniwo facjalne warstw gogolińskich zbudowane jest z cienkopłytkowych wapieni krystalicznych i marglistych, które na wychodniach są wylugowane, co wygląda jak nieregularne komórki. Miąższości tych osadów wahają się od 10 do 17 m. Z kolei w warstwach gogolińskich górnych wyróżnione są cztery ogniwa: wapień zlepieńcowy, wapień falisty II, wapień międzyfalisty oraz wapień falisty III. Wapień zlepieńcowy to płaskie otoczaki zbitego, jasnego wapienia pelitycznego, scementowane wapieniami drobnokrystalicznymi. Zlepieńce przeławicone są marglami, łupkami marglistymi oraz cienkimi warstewkami wapieni płytowych i falistych. Następnie wapień zlepieńcowy przechodzi w szare wapienie margliste, składające się z cienkich, silnie ze sobą zespolonych warstw o powierzchni drobnofalistej – wapień falisty II. Następny poziom, wapień międzyfalisty, to cienkopłytkowe, pelityczne wapienie margliste. Najwyższym ogniwem warstw gogolińskich jest wapień falisty III z licznymi szczątkami liliowców (*Dadocrinus gracilis*). Miąższość górnych warstw gogolińskich jest różna i wynosi od 25 do 40 m. Warstwy gogolińskie dolne i górne rozciągają się na całym obszarze niecki bytomskiej, a ich wychodnie tworzą jej południowe skrzydło, przebiegając wzdłuż południowej granicy Dąbrówki Wielkiej, w rejonie Piekar Śląskich oraz wzdłuż północnego biegu rzeki Brynicy. Warstwy te tworzą również północne obrzeże niecki bytomskiej, jako wychodnie przykryte bezpośrednio utworami czwartorzędowymi. Wapienie gogolińskie są skałami podatnymi na wietrzenie. Na powierzchni tych utworów, w rejonie ich wychodni, rozwinęły się intensywnie różnej wielkości zagłębienia erozyjne wypełnione osadami i rudami żelaza brunatnego oraz formy krasowe;

- **dolny wapień muszłowy** – tworzą warstwy gorażdzańskie, terebratulowe i karchowickie wykształcone jako dolomity kruszconośne (Ekiert i Gałkiewicz 1960). Dolomity te powstały w wyniku wtórnego procesu dolomityzacji skał wapiennych warstw gorażdzańskich, terebratulowych i karchowickich oraz reprezentowane są przez dolomity krystaliczne, średnio i grubokrystaliczne. Jednak dolomityzacji uległy również części górne niższej ległych warstw gogolińskich i części dolne warstw diploporowych, które należą już do wapienia muszłowego środkowego. Z tego powodu dolomity kruszconośne nie są poziomem stratygraficznym, a jedynie petrograficznym. Dolomity kruszconośne występują w sposób ciągły z wyjątkiem rejonów wymyć erozyjnych. Są one twarde, zbite i w różnym stopniu zwietrzałe. Czasami są obecne buły krzemianowe. Występuje w nich również okruszcowanie siarczkowymi minerałami cynku, ołowiu i żelaza. Dolomity te mają barwę szarą i szaro-brązową, beżową i brunatno-czerwoną o zmiennej zawartości MgO. Spotyka się również dolomity ziamiste na ogół lekko zwietrzałe, niekiedy kruche o barwie żółto-rdzawej i brązowo-żółtej. Dolomity barwy szarej są bardziej zwarte. Jeżeli dolomity ulegną procesom wietrzenia ich barwa zmienia się na żółto-szarą lub brunatno-czerwoną, wówczas nazywane są dolomitami czerwonymi. Dolomity te mają wytrzymałość mniejszą od szarych i są mniej zwarte. Barwa tych dolomitów związana jest z wysoką zawartością utlenionych związków żelaza i manganu. Silnie spękane dolomity czerwone wykazują wysoki stopień zmineralizowania tlenkowymi związkami

cynku, ołowiu i żelaza, a więc zawierają rudy utlenione (tzw. galmany), czyli są to rudy wtórne w stosunku do rud siarczkowych. Na granicy pomiędzy warstwami gogolińskimi a dolomitami kruszonośnymi występuje warstwa ilu witriolowego o dość dyskusyjnej genezie (Pszonka 2007). Iły witriolowe tworzą w niecce bytomskiej prawie ciągły poziom o zmiennej miąższości, od paru centymetrów do około 1,5 m. Iły te są dość zmienne. Mają barwę od szarej do czarnej w stanie świeżym, a po wysuszeniu ich zabarwienie zmienia się na jasnoszare. W stanie świeżym są one plastyczne, tłuste i pęcznią pod wpływem wody, natomiast w stanie wysuszonym stają się twarde i łupliwe;

- **środkowy wapień muszlowy** – są to osady rozległego morza śródlądowego, ulegającego stopniowemu spłycaaniu (Gruszczuk 1956). Reprezentowane są przez dolomity diploporowe o miąższości od 5 do 25 m. Dolomity te charakteryzują się barwą brązowo-żółtą, żółto-rdzawą, lub brązową oraz szaro-żółtą i różową. Są porowate i kawerniste, spękanne oraz w partiach przypowierzchniowych zwietrzałe. Spękania i kawerny są w różnym stopniu wypełnione kalcytem, tlenkami żelaza oraz zwietrzeliną węglanową. Zawierają również przeławicenia dolomitów oolitowych. Wychodnie na powierzchni terenu podlegały intensywnym procesom erozji, dlatego nie zachowały się na całym obszarze;
- **górny wapień muszlowy** – w rejonie niecki bytomskiej reprezentowany jest przez warstwy tarnowickie (Ekiert i Gałkiewicz 1960) o miąższości wynoszącej od kilku do około 20 m. Są to przeważnie płytowe dolomity margliste i margle dolomityczne, lekko porowate, niekiedy gąbczaste. Skały te są spękanne i wykazują podzielną płytkową, a barwa ich jest brązowa, brązowo-żółta, szarożółta i kremowa. Warstwy te występują w postaci płatów, które są efektem późniejszej działalności erozyjnej.

Zasadniczo utwory jurajskie nie mają większego znaczenia w budowie geologicznej niecki. Głównie są to osady lądowe, tj. gliny, iły i piaskowce. Utwory te zawierają nagromadzenia rud żelaza brunatnego. Zazwyczaj ruda występuje wśród ilów i piasków, wchodząc w skład utworów krasowych. Rudy te tworzą skupienia o bardzo nieregularnych kształtach, podobnych czasem do gniazd lub soczewek o różnej wielkości. Utwory jurajskie występują w postaci gniazd żwirów kwarcowych o grubości do 10 m, w postaci piasków i ilów z żelaziakiem ilastym zaliczonym do liasu, a także w postaci pojedynczych płatów w okolicy Piekar Śląskich.

Neogen występuje lokalnie i fragmentarycznie w obniżeniach erozyjnych podłoża triasowego. Reprezentowany jest przez osady miocenu, wykształcone w postaci ilów marglistych lub piasków. Utwory te wypełniają leje krasowe w utworach wapienia muszlowego i w związku z tym ich zasięg jest mocno ograniczony.

Utwory czwartorzędowe pokrywają powierzchnię terenu i reprezentowane są głównie przez utwory polodowcowe. Stanowią one płaszcz o bardzo zmiennej miąższości od kilku centymetrów do kilkudziesięciu metrów w wymyściach erozyjnych. Utwory plejstocenu występują przeważnie w postaci glin piaszczystych, glin, piasków zailonych i piasków kwarcowych, żwirów oraz ilów. Występują one na przeważającej części terenu z wyjątkiem wzniesień, gdzie odsłaniają się utwory starsze, głównie triasowe. Miąższość ich jest różna i waha się od 1 do 50 m. Najmniejszą miąższość posiadają w rejonach wychodni dolomitów kruszonośnych i wapieni gogolińskich. Grubość ich wynosi zaledwie 1 m, a miejscami

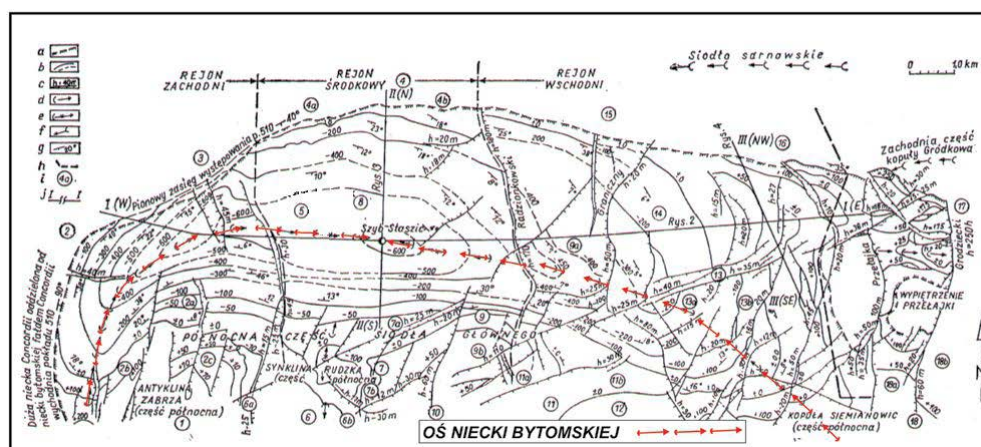
nie występują. Najmłodsze utwory holocenijskie, wykształcone są w postaci piasków różnoziarnistych i pylastych, piasków gliniastych, namulów, żwirów, glin i sporadycznie torfów spotykanych głównie w dolinie i pradolinie rzeki Szarlejki oraz jej dopływów. Utwory te występują także w postaci madow rzecznych w rejonach Radzionkowa, Seretu i w okolicach doliny Szarlejki. Utwory holocenijskie osiągnęły miąższość do 40 m.

Grunty antropogeniczne związane są z występowaniem hałd pogórnich. Osady takie występują na terenie Piekar Śląskich i Bytomia. Miąższość utworów antropogenicznych wynosi od kilkudziesięciu centymetrów do około 17 m. Obszary występowania tych osadów zagrożone są powstawaniem osuwisk oraz zjawisk nierównomiernego osiadania terenu.

5.2.2.1. Tektonika

W północnej części GZW występuje urozmaicona i zarazem skomplikowana budowa tektoniczna. Znajdują się tutaj zarówno struktury fałdowe, jak i dysjunktywne. Procesy geotektoniczne miały miejsce już przed triasem w orogenezie hercyńskiej w fazie asturyjskiej. Z fazą tą związane jest powstanie niecki bytomskiej. Pofałdowaniom hercyńskim przypisuje się także powstanie wielu uskoków o różnych kierunkach, zrzucających partie karbonu od kilku do kilkudziesięciu metrów. Orogeniza ta utworzyła również mezozoiczne podłoże zbiornika sedymentacyjnego. Prawdopodobnie obecne struktury powstały tylko przez odnowienie młodszymi orogenezami wyników ruchów hercyńskich.

Tektonika fałdowa północnego obszaru GZW zaznacza się jako pofałdowane w siodła i łęki warstwy triasu. Dzięki strukturom fałdowym na obszarze występowania złóż kruszczo- nośnych wydzielono liczne niecki, z których największą jest niecka bytomska. Niecka ta ma długość około 30 km, szerokość od 2 do 9 km i głębokość około 200 m. Jest ona strukturą synkinalną, przebiegającą z kierunku WNW na ESE, a następnie, w części wschodniej, skracającą na południowy wschód (rys. 5.3). Synklina ta ma budowę asymetryczną, tzn. os



Rys. 5.3. Tektonika niecki bytomskiej (Drewniak 1980)

Fig. 5.3. Tectonic of Bytom Basin (Drewniak 1980)

podłużna znajduje się bliżej skrzydła północnego. W związku z asymetrią kąty zapadania skrzydła północnego i skrzydła południowego są różne. W skrzydle północnym kąt zapadania jest większy i wynosi około 8° , a maksymalnie nawet około 20° . W łagodniejszym skrzydle południowym wielkości te zwykle nie przekraczają 3° .

Młodsze, pokarbońskie ruchy tektoniczne występowały na opisywanym terenie między triasem a jurą. Są to ruchy związane z orogenezą starokimeryjską. Zaznaczyły się one zarówno w osadach triasowych, jak i w osadach karbońskich. W wyniku tych ruchów niecka bytomska obniżyła się do obecnego położenia.

Tektonika dysjunktywna zawdzięcza najprawdopodobniej swoje powstanie orogenezie alpejskiej. Powstałe wówczas uskoki charakteryzują się trzema kierunkami rozciągłości. Dominującym kierunkiem linii uskokowych jest SW-NE lub WSW-ENE, natomiast podrzędnie występują uskoki o przebiegu zbliżonym do N-S i WNW-ESE. Wiele uskoków zostało rozpoznanych podczas robót górniczych w kopalniach rud metali. Zazwyczaj strome płaszczyzny uskokowe o kącie nachylenia od 70° do 85° tną lub obcinają skały triasowe. Struktury uskokowe, obniżając schodowo triasowe warstwy skalne, tworzą rowy tektoniczne, zanotowane m.in. w dawnych kopalniach Marchlewski, Waryński czy Orzeł Biały. W rejonie badań największy rów tektoniczny ma przebieg w kierunku NWW-SEE i jest szerokości około 80 m, a wielkość jego zrzutu wynosi od 4 do 25 m. Rów ten ograniczony jest od zachodu uskokiem radzionkowskim, który zrzuca utwory triasowe i karbońskie na wschód. Płaszczyzna uskokowa nachylona jest pod kątem 65° do 70° w kierunku zachodnim, a zrzut tego uskoku w utworach karbońskich wynosi około 240 m, natomiast w utworach triasowych około 15 m. W rowach tektonicznych na obszarze niecki bytomskiej pojawiają się wąskie szczeliny uskokowe wypełnione przez utwory ilaste, gliniaste oraz przez drobny druzgot skał bocznych. Poza tym w rowach tych w sąsiedztwie uskoków, na kontakcie dolomitów kruszczońskich i wapieni występują progi, leje, wory, kieszenie oraz inne nieregularne formy krasowe. Bardzo często uskokom głównym towarzyszą uskoki schodowe niższej rangi, tworząc w ten sposób szerokie (do kilkudziesięciu metrów) strefy zdyslokowane.

5.2.2.2. Warunki hydrogeologiczne

W rejonie niecki bytomskiej warstwy wodonośne występują w piętrach czwartorzędowym, triasowym i karbońskim. Zgodnie z przyjętą regionalizacją hydrogeologiczną Polski według Paczyńskiego (1993), obszar niecki bytomskiej znajduje się w makroregionie centralnym, regionie XII śląsko-krakowskim, subregionie triasu śląskiego XII₁. Zasadnicze znaczenie dla występowania wód zwykłych mają hydrostruktury południowej części monokliny krakowsko-śląskiej, zaliczanej do pokrywowych struktur epoki alpejskiej. Uwzględniając zmodyfikowaną regionalizację słodkich wód podziemnych Polski według Kleczkowskiego (1990), obszar niecki bytomskiej zlokalizowany jest w prowincji hydrogeologicznej górsko-wyżynnej, w zasięgu części triasowej monokliny krakowsko-śląskiej.

Czwartorzędowe piętro wodonośne charakteryzuje się dużą zmiennością parametrów hydrogeologicznych i związane jest głównie z dolinami rzecznyymi i utworami rzeczno-lodowcowymi. Zbudowane jest ono z plejstoceńskich i holocenijskich piasków i żwirów

o miąższości od kilku do kilkunastu metrów. Wody podziemne w obrębie tego piętra występują w formie zawieszonych izolowanych soczewek, warstw czy wkładek piaszczystych o niewielkiej zasobności, zasilanych opadami atmosferycznymi. Zwierciadło ma charakter swobodny i występuje na głębokości od 1 m do kilku metrów. Lokalnie może występować na większych głębokościach pod przykryciem utworów nieprzepuszczalnych. Z uwagi na wyraźną przewagę osadów gliniastych nad piaszczystymi zasobność w wodę poziomu czwartorzędowego jest niewielka i nie odgrywa on roli jako źródło wody pitnej. W rejonach, gdzie poziom ten nie jest podścielony utworami nieprzepuszczalnymi, występuje kontakt hydrauliczny z piętrzem triasowym.

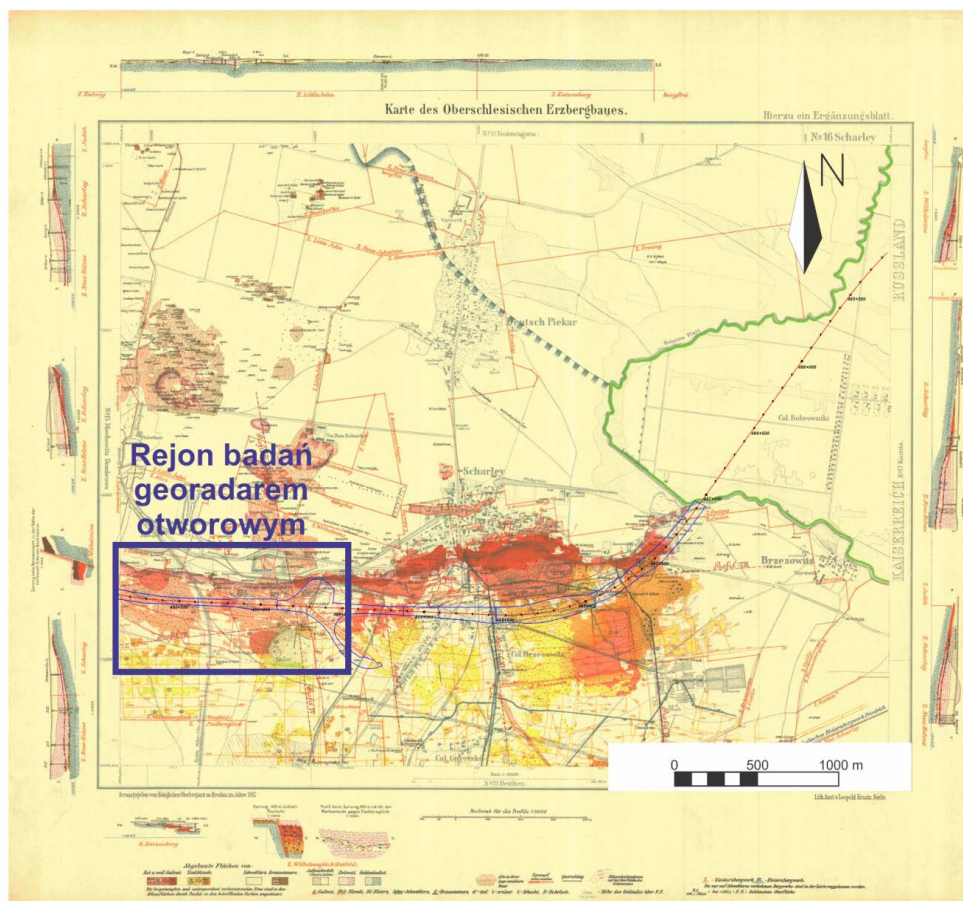
Triasowe piętro wodonośne występuje w utworach pstrygo piaskowca, retu i wapienia muszlowego. Poziomy wodonośne wapienia muszlowego i retu zbudowane są z wapieni i dolomitów, tworząc kolektor szczelinowo-krasowo-porowy. Poziomy triasu są bardzo wydajne i tworzą główne, użytkowe poziomy wodonośne. Miąższość utworów wodonośnych triasu wynosi od kilkunastu do ponad 150 m. Wartość współczynnika filtracji zmienia się od 0,1 do 84,6 m/dobę, a wodoprzewodność zmienia się w zakresie od poniżej 100 do 1000 m²/dobę, co odpowiada ośrodkowi o średniej lub dobrej przepuszczalności. Zwierciadło wody ma charakter napięty, a w rejonach wychodni posiada charakter swobodny. Zwierciadło to występuje na głębokości od kilkunastu do ponad 100 m. Znaczące obniżenie poziomu zwierciadła wód podziemnych tego piętra spowodowało miejscami wzmożoną infiltrację z rzek. W rejonie badań zwierciadło to zwykle występuje poniżej 50 m p.p.t. Zasilanie tego poziomu jest bezpośrednie w rejonach wychodni oraz pośrednie przez utwory czwartorzędowe. Charakter górotworu, roboty górnicze w kopalniach rud cynku i ołowiu, a także eksploatacja złóż węgla kamiennego spowodowały, że głównymi drogami krążenia wód obok szczelin, pustek i kanałów krasowych są również nieczynne, niekiedy zaciśnięte, wyrobiska górnicze oraz pustki i strefy rozluźnień pochodzenia eksploatacyjnego. Drenaż poziomu wapienia muszlowego następuje poprzez pompownię Bolko, odprowadzającą wody z rozległego systemu wyrobisk górniczych w rejonie Bytomia.

Karbońskie piętro wodonośne jest objęte w całości drenażem kopalnianym, który spowodował duże przeobrażenia naturalnych warunków hydrogeologicznych i hydrograficznych (Rózkowski i in. 1997). Piętro to tworzy zespół oddzielnych, szczelinowo-porowych poziomów wodonośnych oddzielonych od siebie wkładkami iłowców i mułowców. Utwory zbiornikowe to przede wszystkim piaskowce należące do serii mułowcowej, górnosławskiej serii piaskowcowej i warstw brzeżnych serii paralicznej. Utwory wodonośne są tu w znaczącym stopniu zdrenowane. Miąższość utworów wodonośnych nie przekracza na ogół 30 m, a współczynnik filtracji zmienia się w zakresie 0,1–6,7 m/dobę. Zasilanie poziomów wodonośnych odbywa się na ich wychodniach, bezpośrednio z infiltracji opadów atmosferycznych lub poprzez przepuszczalne utwory nadkładu (Kropka i in. 1998). Górnośląska seria piaskowcowa tworzy główny kompleks wodonośny karbonu na terenie niecki bytomskiej. Są to piaskowce o średnim współczynniku filtracji 2,13 m/dobę. W wyniku długoletniej eksploatacji nastąpiło całkowite szczypanie zasobów statycznych, a woda występuje lokalnie tzw. woda zawieszona. Obecnie nie stwierdza się ciągłych poziomów wodonośnych w obrę-

bie tej serii. Jedynie grube ławice piaskowców są zawodnione i dopływy do tych ławic mają zasadniczy wpływ na zawodnienie kopalń zlokalizowanych w rejonie niecki bytomskiej.

5.2.3. Warunki górnicze – historyczna eksploatacja złóż rud metali (na podstawie Pileckiego 2014)

Pierwsze dostępne mapy eksploatacji złóż rud metali pochodzą z 1848 roku. Cennym źródłem informacji o zasięgu eksploatacji są mapy górnośląskiego górnictwa rudnego z 1911 r. Mapy te dokumentują zasięg eksploatacji złoża galeny, blendy cynkowej, galmanu i żelaznika brunatnego. Na rysunku 5.4 przedstawiona została mapa historycznej eksploatacji złóż rud metali z zaznaczonym rejonem badań oraz projekcją przebiegu trasy autostrady A-1.



Rys. 5.4. Mapa historycznej eksploatacji złóż rud metali z zaznaczoną projekcją autostrady A-1 oraz rejonem badań (na podstawie map górnośląskiego górnictwa rudnego z 1911 r.)

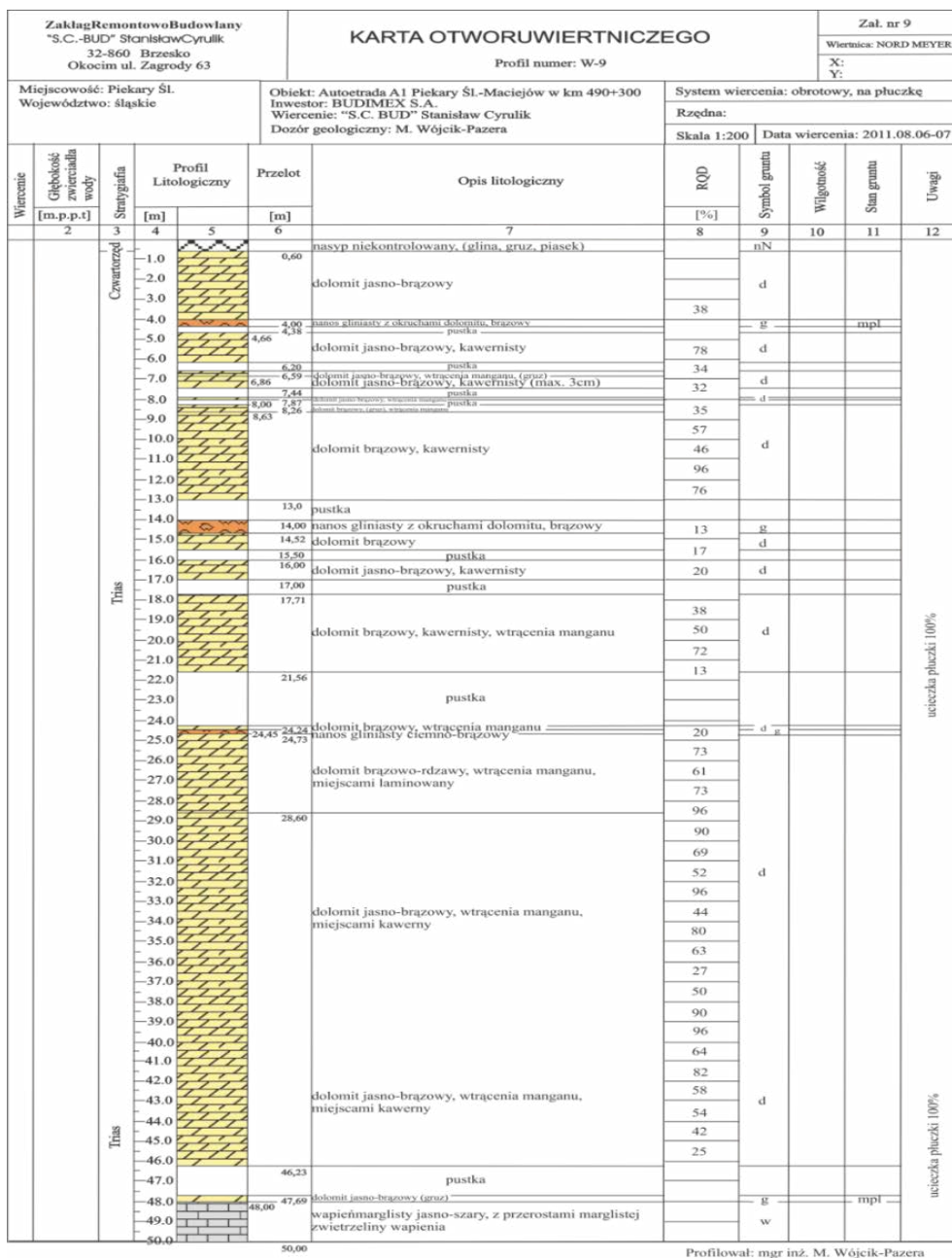
Fig. 5.4. Map of historical mining of metal ore deposits with a marked projection of the A-1 motorway and the area of research (based on maps of Upper Silesian ore mining from 1911)

Pierwotnie rozwinęła się eksploatacja galmanów w rejonie wychodni dolomitów kruszczonośnych zarówno w skrzydle południowym, jak i północnym niecki bytomskiej (Pilecki 2014). Na terenie Piekary Śląskich eksploatacja galmanów prowadzona była od 1859 roku w rejonie na wschód od drogi do Bobrownik, od roku 1866 w rejonie dworca kolejowego Piekary Śląskie–Szarlej. Od roku 1864 datuje się eksploatację galeny w rejonie obecnej zabudowy Miechowic oraz w rejonie ulic Kochanowskiego, Królowej Jadwigi, Reymonta i Brzezińskiej w Bytomiu, następnie eksploatacja zarówno złóż siarczkowych, jak i tlenkowych prowadzona była na całym obszarze od Miechowic do Dąbrówki Wielkiej. W 1935 r. przystąpiono do eksploatacji złoża zalegającego w filarach ochronnych, stosując podsadzkę suchą. Od 1955 r. prowadzono również eksploatację złoża naruszonego w zawałach pierwotnych wyrobisk. Od roku 1960 przy eksploatacji w filarach ochronnych do likwidacji wyrobisk używano podsadzki piaskowej i cementowej. Złoże wybierano na głębokości od 20 m w rejonie wychodni dolomitów kruszczonośnych do 100 m w osi niecki bytomskiej w okolicach zakładu Bolko. Grubość wybieranego złoża wahała się od 2 do 6 m, sięgając miejscami do 10 m, przy czym eksploatację prowadzono warstwami. W niektórych rejonach złoże rudne wybierano w dwu ławach, w dolnej oraz w górnej 15 m powyżej. W latach siedemdziesiątych XX w. nastąpił stopniowy zanik eksploatacji złóż rud metali w niecce bytomskiej. W roku 1975 zamknięto kopalnię Nowy Dwór, a w roku 1981 zamknięto kopalnię Waryński istniejącą od 1857 roku. W roku 1985 zamknięto kopalnię Marchlewski. Od roku 1985 stopniowo likwidowana była kopalnia Orzeł Biały założona w 1869 roku. Z uwagi na wyczerpanie się złóż cynkowo-ołowiowych zakończenie eksploatacji rudnej nastąpiło w 1989 roku. Po likwidacji większość kopalń została przekształcona w ujęcia wody.

5.2.4. Warunki geologiczno-inżynierskie

Górotwór na terenie historycznej, płytkiej eksploatacji złóż rud metali w niecce bytomskiej jest silnie zróżnicowany pod kątem właściwości fizyczno-mechanicznych. Jest on silnie spękany i rozluzowany w rejonach intensywnej eksploatacji złóż rud metali do głębokości około 50–80 m, prowadzonej w dwóch ławach (Pilecki 2014). Ośrodek ten podlegał również wpływom głębszej eksploatacji pokładów węgla. Na rysunku 5.5 przedstawiono przykład karty otworu badawczego odwierconego w rejonie prowadzonej płytkiej eksploatacji po usunięciu kilkumetrowej grubości nadkładu utworów czwartorzędowych. Na profilu geologicznym tego otworu wyraźnie widać strefy pustek pochodzenia górniczego.

W rejonie badań, na terenie budowy węzła Piekary Śląskie autostrady A-1, przeprowadzono pomiary parametrów przestrzennych masywu skalnego dolomitu (fot. 5.1 i 5.2) (Pilecki 2014). Dominującym na tym obszarze kierunkiem rozciągłości utworów triasu jest NW-SE, a w mniejszym stopniu wyróżnia się kierunek zbliżony do W-E (rys. 5.6g). Dominujące kierunki głównych pęknięć nie są zgodne z kierunkiem rozciągłości uskoku radzionkowskiego (kierunek NNW-SSW), przebiegającego w bezpośrednim sąsiedztwie. Na rysunku 5.6a pokazano kierunki naturalnego systemu spękań górotworu. System ten posia-



Rys. 5.5. Przykład profilu geologicznego z rejonu badań w pobliżu obiektu WK-432 autostrady A-1 (Dokumentacja 2011)

Fig. 5.5. Example of geological profile from the area of research in the nearby of WK-432 object on A-1 motorway (Dokumentacja 2011)



Fot. 5.1. Systemy spękań masywu dolomitu w strefie wietrzenia w rejonie Piekar Śląskich (fot. Z. Pilecki)

Phot. 5.1. Systems of fracture in dolomite rock mass in the weathering zone in the area of Piekary Śląskie (phot. Z. Pilecki)

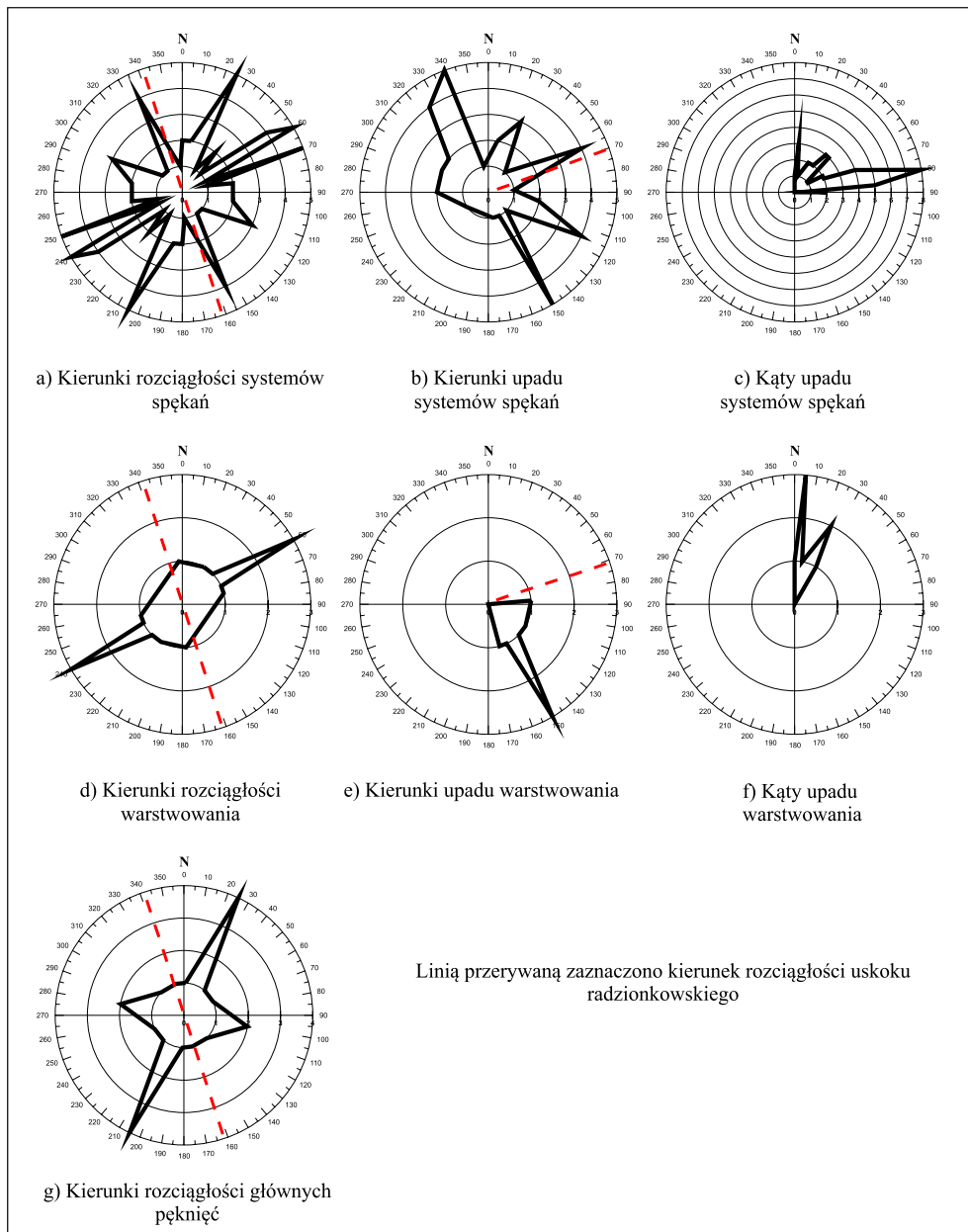


Fot. 5.2. Systemy spękań masywu dolomitu w strefie mniej zwietrzałej w rejonie Piekar Śląskich (fot. Z. Pilecki)

Phot. 5.2. Systems of fracture in dolomite rock mass in the less weathered zone in the area of Piekary Śląskie (phot. Z. Pilecki)

da cztery główne kierunki pęknięcia oraz są one nieregularne. Jeden z głównych kierunków pokrywa się z kierunkiem rozciągłości warstwowania (NE-SW) i jest w przybliżeniu prostopadły do rozciągłości uskoku radzionkowskiego. Zasadniczo warstwy dolomitu zalegają niemal poziomo, a dominujące kąty upadu warstwowania wynoszą kilka stopni.

Przykład systemów spękań ośrodka skalnego pokazano w załączniku 1 na rdzeniu z otworu odwierconego na terenie odcinka autostrady między Piekarami a Bytomiem.



Rys. 5.6. Diagramy spękań masywu skalnego dolomitu w bezpośrednim podłożu węzła Piekary autostrady A-1; a–c) parametry systemów spękań; d–f) parametry warstwowania; g) kierunki rozciągłości głównych pęknięć (Pilecki 2014)

Fig. 5.6. Diagram of fracture system of dolomite rock mass in the Piekary junction of A-1 motorway; a–c) parameters of fracture system; d–f) parameters of stratification; g) directions of main fissures (Pilecki 2014)

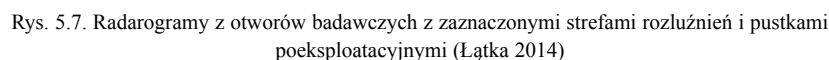
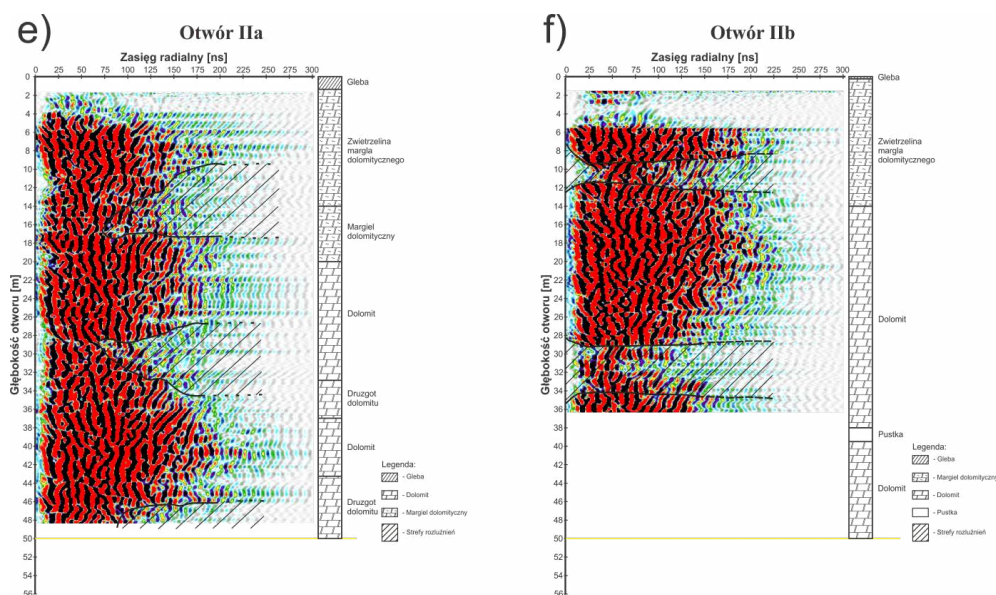


Fig. 5.7. Radarograms from tested boreholes with marked loosened zones and exploitation voids (Łatka 2014)



Rys. 5.7 cd. Radarogramy z otworów badawczych z zaznaczonymi strefami rozluźnień i pustkami poeksploatacyjnymi (Łątka 2014)

Fig. 5.7 cont. Radarograms from tested boreholes with marked loosened zones and exploitation voids (Łątka 2014)

złóż rud obserwuje się strefy rozluźnień. W niektórych przypadkach zaznaczają się również niezlikwidowane fragmenty wyrobisk w postaci silnych poziomych granic.

5.3. Zakres badań

Do badań wytypowano 69 otworów badawczych, dla których wykonano pomiary georadarem otworowym oraz wyznaczono wskaźniki stopnia spękania górotworu RQD. Lokalizację otworów przedstawiono na rysunku 5.1.

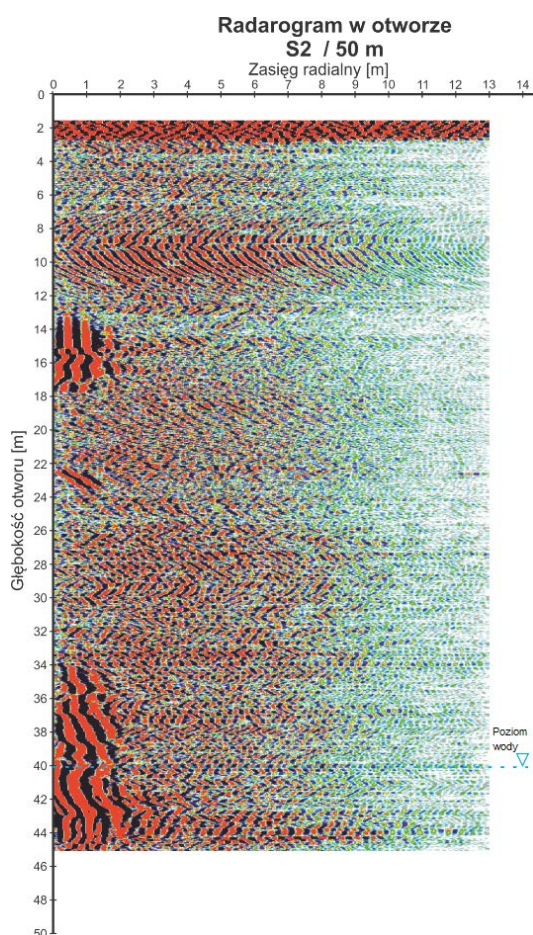
Otwory badawcze, w których zostały przeprowadzone badania georadarowe wykonano w technice wiercenia obrotowego z użyciem płuczki. Lokalizacja otworów została wyznaczona na podstawie stwierdzonych anomalii geofizycznych zidentyfikowanych po przeprowadzeniu badań grawimetrycznych, sejsmicznych oraz georadarowych powierzchniowych (Pilecki 2014). Anomalie, w których wykonano otwory, zostały sklasyfikowane według przyczyn, które je spowodowały w sposób następujący:

- anomalie pochodzenia górniczego związane z występowaniem wyrobisk górniczych pionowych i poziomych oraz pustek i rozluźnień wytworzonych w górotworze w wyniku rozwoju procesów zapadliskowych,
- anomalie będące efektem zasypanych obiektów budowlanych na terenach pogórnich,

- anomalie pochodzenia geologicznego wynikające ze zjawisk krasowych, różnych form geologicznych typu niecek, rynien itp. wypełnionych materiałem o mniejszej gęstości objętościowej.

Głębokość i położenie otworów kontrolnych zostały uszczegółowione po uwzględnieniu dodatkowych informacji górniczych i geologiczno-inżynierskich (Dokumentacja 2007). Dla wszystkich analizowanych otworów, w których przeprowadzone zostały badania georadarowe, sporządzono karty otworów wiertniczych (rys. 5.5).

Po weryfikacji danych o wskaźnikach RQD do dalszych badań zakwalifikowano 65 otworów. Odrzucono 4 otwory: S 1, S 2, S 3 oraz S 4, z uwagi na to, że były odwiercone na terenie nieczynnego składowiska odpadów komunalnych o kilkudziesięciometrowej grubości, a wskaźniki RQD dotyczyły jedynie ośrodka skalnego w podłożu składowiska. Ponadto obrazy georadarowe charakteryzowały się bardzo słabą jakością (rys. 5.8).



Rys. 5.8. Radarogram z otworu S2 odwierconego na terenie nieczynnego składowiska odpadów komunalnych

Fig. 5.8. Radarogram from the borehole S2 drilled at the disused landfill of municipal waste

Dodatkowo wybrano 5 otworów: 34a/III, GD 3, GD 14, OD 32 i W 10, które posłużyły do weryfikacji wskazań opracowanej klasyfikacji opisanej w rozdziale 6. Otwory te były zlokalizowane w różnych miejscach rejonu badań.

W tabeli 5.1 zestawiono współrzędne wszystkich branych pod uwagę otworów badawczych (X, Y, Z), data wykonania pomiaru georadarem otworowym, głębokość otworu (H)

Tabela 5.1

Zestawienie współrzędnych (XYZ) wszystkich otworów kontrolno-iniekcyjnych wraz z ich głębokością (H) oraz długością profilu georadarowego (L)

Table 5.1

Coordinates (XYZ) of all tested boreholes with their depth (H) and the length of the borehole GPR profile (L)

Lp.	Nazwa otworu	Data pomiaru	X	Y	Z	H [m]	L [m]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	31/III	17.02.2010	881954,7	234433,9	277,7	50,0	42,9
2	32/III	01.03.2010	881904,9	234432,5	278,4	50,0	46,6
3	33/III	01.03.2010	881936,3	234401,8	278,7	50,0	45,2
4	34/III	12.02.2010	881939,9	234323,5	278,2	50,0	47,5
5	34a/III	09.03.2010	881961,6	234320,5	277,8	55,0	52,5
6	34c/III	29.03.2010	881959,9	234304,6	279,3	55,5	51,9
7	C30/1	05.10.2011	881975,5	235130,9	268,1	30,0	26,9
8	C30/2	07.09.2011	881953,1	235148,6	268,7	30,0	23,8
9	C30/3	07.09.2011	881920,7	235160,5	269,2	30,0	27,0
10	GD 1	08.07.2011	881865,9	234748,8	275,4	25,0	21,7
11	GD 2	02.06.2011	881918,9	234930,7	270,5	25,0	20,6
12	GD 3	02.06.2011	881906,3	234958,1	270,5	25,0	21,8
13	GD 4	08.07.2011	881877,3	235009,2	269,0	25,0	21,1
14	GD 5	27.06.2011	881916,7	235118,3	268,5	25,0	22,2
15	GD 6	08.07.2011	881835,1	235099,8	276,4	25,0	22,1
16	GD 7	08.07.2011	881814,8	235146,6	278,9	25,0	22,4
17	GD 8	27.06.2011	881856,7	235205,6	269,0	25,0	22,3
18	GD 9	27.06.2011	881847,7	235279,9	267,7	26,0	21,8
19	GD 10	27.06.2011	881828,2	235283,3	271,3	26,0	22,9
20	GD 11	27.06.2011	881785,2	235295,6	271,6	25,0	21,9
21	GD 12	08.07.2011	881674,1	235294,6	276,4	25,0	21,1
22	GD 13	02.06.2011	881669,0	235347,4	271,2	25,0	21,7
23	GD 13a	14.07.2011	881661,8	235369,4	271,5	26,0	22,7
24	GD 14	02.06.2011	881683,2	235338,0	271,2	25,0	22,8
25	GD 14a	07.09.2011	881617,9	235473,4	271,4	30,0	24,2
26	GD 15	27.06.2011	881907,0	235279,9	267,7	26,0	22,5
27	GD 15a	30.08.2011	881603,9	235496,1	272,5	30,0	23,6
28	GD 16	02.06.2011	882027,9	235237,0	263,9	25,0	22,0

Tab. 5.1 cd.

Tab. 5.1 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8
29	K 1	12.01.2012	881893,8	235919,3	263,2	40,0	35,9
30	OB1	09.03.2010	881953,4	234094,0	277,0	50,0	46,4
31	OD/14	15.07.2010	881926,0	234159,7	276,7	50,0	48,0
32	OD/15	08.06.2010	881954,7	234153,1	275,3	70,0	66,9
33	OD/17	12.07.2010	881962,0	234135,4	275,3	50,0	48,0
34	OD/23	27.05.2010	881934,9	234052,1	278,4	70,0	66,8
35	OD/28	08.06.2010	881951,6	234172,4	275,1	65,0	59,6
36	OD/29	23.06.2010	881945,7	234191,7	275,6	50,0	32,1
37	OD/32	24.06.2010	882062,2	233796,7	273,2	50,0	47,7
38	OWA 433/1	18.03.2010	881985,3	234020,6	278,6	50,0	47,2
39	OWA 433/2	23.03.2010	881948,0	233985,9	278,6	50,0	46,2
40	OWA 433/3	29.03.2010	881959,3	233922,3	277,6	50,0	46,5
41	PKT 6/11	02.06.2011	881881,9	235233,7	266,6	70,0	68,1
42	PKT 23/11	02.06.2011	881887,1	235193,7	266,6	70,0	67,3
43	PS-1	07.09.2011	881920,7	235160,5	269,2	30,0	27,5
44	PS-2	07.09.2011	881857,8	235200,1	269,1	30,0	25,4
45	S 1	23.08.2011	882010,3	234757,1	277,8	50,0	42,7
46	S 2	23.08.2011	882005,5	234780,8	278,2	50,0	43,6
47	S 3	23.08.2011	882003,1	234811,5	278,5	50,0	46,1
48	S 4	14.07.2011	881979,3	235064,5	278,2	50,0	49,2
49	W 1	08.07.2011	881904,4	234608,0	278,2	50,0	45,6
50	W 2	28.06.2011	881914,2	234600,8	278,4	50,0	45,8
51	W 3	28.06.2011	881923,7	234592,9	278,3	50,0	46,0
52	W 4	27.06.2011	881933,5	234584,2	278,3	50,0	46,2
53	W 5	08.07.2011	881894,5	234616,4	278,1	50,0	37,9
54	W 6	23.08.2011	881888,6	234633,6	278,6	50,0	46,7
55	W 7	09.08.2011	881962,3	234572,3	279,9	50,0	46,2
56	W 8	09.08.2011	881941,2	234555,5	277,5	50,0	46,7
57	W 9	23.08.2011	881934,5	234562,1	278,0	50,0	44,1
58	W 10	23.08.2011	881930,0	234565,5	277,9	50,0	41,5
59	W 11	23.08.2011	881918,9	234573,5	277,5	50,0	45,6
60	W 12	30.08.2011	881913,1	234577,7	277,4	50,0	47,2
61	W 13	07.09.2011	881907,4	234582,0	277,6	50,0	27,9
62	W 14	30.08.2011	881902,1	234585,9	277,6	50,0	47,2
63	W 15	12.01.2012	881941,5	234575,8	277,5	40,0	35,8
64	W 16	12.01.2012	881949,9	234574,5	280,2	40,0	35,9
65	W 17	12.01.2012	881939,6	234549,1	276,9	40,0	35,8
66	W 18	13.12.2011	881918,9	234566,5	277,5	40,0	35,8
67	W 19	23.12.2011	881900,6	234568,3	277,5	40,0	13,8
68	W 20	23.12.2011	881893,7	234589,8	278,6	40,0	36,0
69	W 21	23.12.2011	881881,7	234594,5	279,3	40,0	36,0

oraz długość profilu georadarowego w otworze (L). Łączna długość profili georadarowych wynosiła około 2400 metrów bieżących. Obliczenia przeprowadzono dla około 500 000 tras georadarowych składających się z ponad 250 000 000 próbek. W tym celu wykorzystano specjalną stację komputerową typu PC.

5.4. Metodyka pomiarowa, przetwarzania i interpretacji

Otwory badawcze, w których przeprowadzone zostały pomiary georadarem otworowym, wykonane zostały w technice z pozyskaniem rdzenia wiertniczego. Dla uzyskanych odcinków rdzeni określono wartości wskaźnika RQD, jak również sporządzono profile litologiczne dla każdego otworu. Dodatkowo otwory te zostały zabezpieczone rurami z polietylenu (PE) lub polichlorku winylu (PCW) o średnicy 10 cm dla potrzeb wykonania pomiarów georadarowych. Otwory te po wykonanych badaniach w większości przypadków posłużyły do zatłoczenia materiału podsadzkowego w celu wypełnienia pustek i rozluźnień.

W większości otworów długość profilu georadarowego jest mniejsza niż głębokość otworu (tab. 5.1). Jest to spowodowane kilkoma czynnikami. Bardzo często dno otworu było zasypane fragmentami skał i gruntu wskutek obrywania się ścianek otworu przed ich zabezpieczeniem. Ponadto 13 otworów było częściowo niedrożnych wskutek zaciśnięcia dolnej części otworu lub przez wypełnienie dolnej części otworu materiałem podsadzkowym pochodzącym z sąsiednich otworów.

Badania BGPR zostały wykonane za pomocą otworowej anteny georadarowej o częstotliwości środkowej 100 MHz produkcji Mała GeoScience AB (tab. 5.2). Przyjęte parametry pomiarowe przedstawiono w tabeli 5.3. W pomiarach we wszystkich otworach badawczych przyjęto jednakowe parametry pomiarowe. Pozwoliło to na wyeliminowanie wpływu błędów systemowych.

Do rejestracji danych pomiarowych wykorzystano komputerowy system rejestracyjny GroundVision 2.0 produkcji Mała GeoScience AB (Szwecja). Jest to oprogramowanie oparte na systemie operacyjnym Windows™, które służy zarówno do rejestracji, jak i zarządzania zarejestrowanymi danymi. Program pozwala na bezpośrednią kontrolę jakości zarejestrowanych radarogramów, jak również umożliwia wykonanie podstawowego przetwarzania danych wraz ze wstępną interpretacją.

Przetwarzanie i interpretacja zarejestrowanych danych została wykonana zgodnie z metodyką możliwie szczegółowo przedstawioną w rozdziale czwartym. Należy podkreślić, że przygotowanie danych do przetwarzania polegało na usunięciu tras zarejestrowanych w strefie przypowierzchniowej, głównie w nasypie antropogenicznym, w którym zapis odpowiedzi impulsowej był fragmentarycznie czytelny.

Zgodnie z zaproponowaną metodyką dane zostały poddane przetwarzaniu, które polegało na wprowadzeniu poprawki statycznej oraz usunięciu składowej stałoprądowej. Zarówno wzmocnienie sygnału, jak i filtracja częstotliwościowa nie były stosowane przy przetwarzaniu danych w celu ograniczenia wpływu przetwarzania na analizowaną odpowiedź amplitudową.

Tabela 5.2

Parametry techniczne georadaru otworowego

Table 5.2

Technical parameters of borehole GPR

Parametr	Wartość
Jednostka centralna – ProEx	
Częstotliwość powtarzania sygnału	100, 200 kHz – nieprzeplatane
Przetwornik analogowo-cyfrowy (A/D)	16 bit
Ilość próbek na trasę	128–2048
Ilość złożań/sumowań	1–32 768
Częstotliwość próbkowania	0,2–> 400 GHz
Zakres temperatury pracy aparatury	–10°–+50°C
Złącza optyczne	Lemo/ST
Nadajnik anteny otworowej 100 MHz	
Średnica	40 mm
Długość	1,89 m z bateriami
Waga	3,3 kg
Długość elementu anteny	0,426 m
Pobór mocy	0,3 A; 7,4 V
Bateria	7,4 V; 6,4 Ah litowo-jonowa
Częstotliwość centralna	100 MHz
Czas pracy	21 godzin
Odbiornik anteny otworowej 100 MHz	
Średnica	40 mm
Długość	1,76 m z bateriami
Waga	3,6 kg
Długość elementu anteny	0,426 m
Pobór mocy	0,75 A; 7,4 V
Bateria	7,4 V; 6,4 Ah litowo-jonowa
Wzmocnienie przedwzmacniacza	18 dB
Całkowite wzmocnienie	~29 dB
Teoretyczny zakres dynamiczny	96 dB (16 bit)
Częstotliwość centralna	100 MHz
Czas pracy	7,6 godzin
Zestaw anteny otworowej 100 MHz	
Całkowita długość zestawu anteny	4,65 m
Odległość Tx – Rx	2,77 m
Odległość PP od górnej krawędzi anteny	2,28 m
Odległość PP od dolnej krawędzi anteny	2,03 m

Tabela 5.3

Parametry pomiarowe zastosowane w badaniach metodą BGPR

Table 5.3

Parameters used in BGPR measurements

Nazwa parametru	Wartość
Częstotliwość próbkowania	1191 MHz
Okno czasowe	470 ns
Liczba próbek na trasę	560
Interwał pomiędzy trasami	0,048 m
Składanie	64

5.5. Wyniki obliczeń i ich analiza

Istotnym elementem obliczeń było wyznaczenie właściwej długości i położenia okna czasowego na trasie sygnału georadarowego, w którym prowadzono obliczenia. Konieczność wyboru okna czasowego wynikała z następujących założeń:

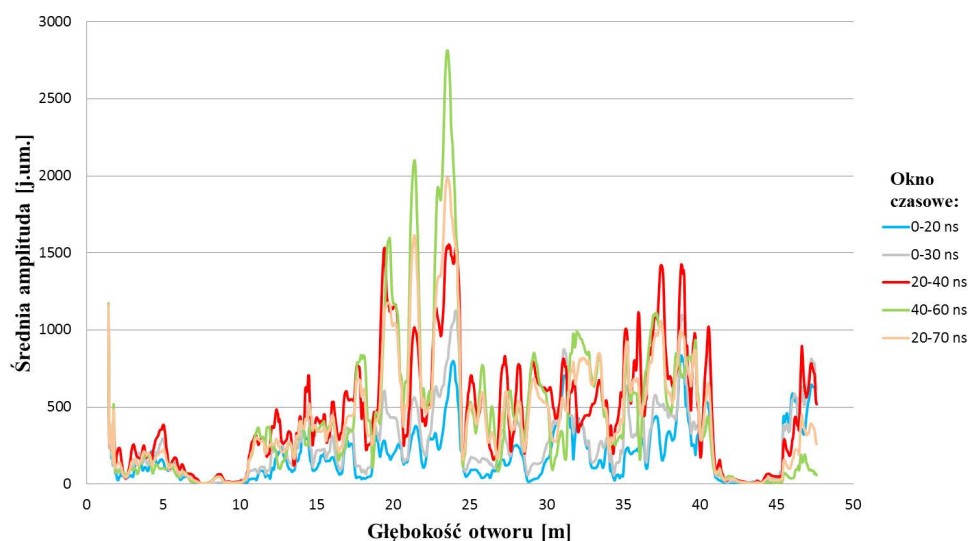
- wielkość okna czasowego odwzorowywała wymiary przestrzeni ośrodka skalnego wokół otworu. W związku z tym wielkość okna czasowego była jednakowa dla wszystkich analizowanych tras georadarowych w konkretnych warunkach geologiczno-inżynierskich;
- w zależności od wielkości tego okna zmieniała się również wartość uzyskanej względnej średniej amplitudy oraz dynamika jej zmian;
- dobór okna czasowego umożliwiał znaczące ograniczenie liczby próbek i w efekcie zmniejszenie czasu obliczeń.

Na rysunku 5.9 przedstawiono wyniki porównania średniej amplitudy sygnału georadarowego z zastosowaniem różnych okien czasowych w przykładowym otworze badawczym.

Ostatecznie wybrane zostało okno czasowe w zakresie 20–40 ns ze względu na położenie strefy i korzystną dynamikę zmian. Okno to odpowiada fragmentowi ośrodka wokół otworu w kształcie cylindrycznego pierścienia o promieniu około 2 m i szerokości około 1 m (rys. 4.2). Przyjęcie okna czasowego pozwoliło na zmniejszenie liczby próbek w obliczeniach do około 10 mln dla wszystkich analizowanych otworów.

W celu porównania danych pochodzących z różnych otworów, wykonanych w warunkach zróżnicowanego stopnia spękania, znormalizowano zarejestrowane amplitudy. W efekcie na podstawie przeprowadzonych przez autora rozprawy testów, wykonano normalizację względem maksymalnej średniej arytmetycznej zwiększonej o trzy odchylenia standardowe. Przyjęto wartość 1000 jednostek umownych.

W następnej kolejności przeprowadzono korelację obliczonych wartości znormalizowanych średnich amplitud w oknie 20–40 ns z wartościami wskaźnika RQD na odcinkach o długości jednego metra wzdłuż otworu.



Rys. 5.9. Porównanie wartości średnich amplitud obliczonych w różnych oknach czasowych dla przykładowego otworu badawczego

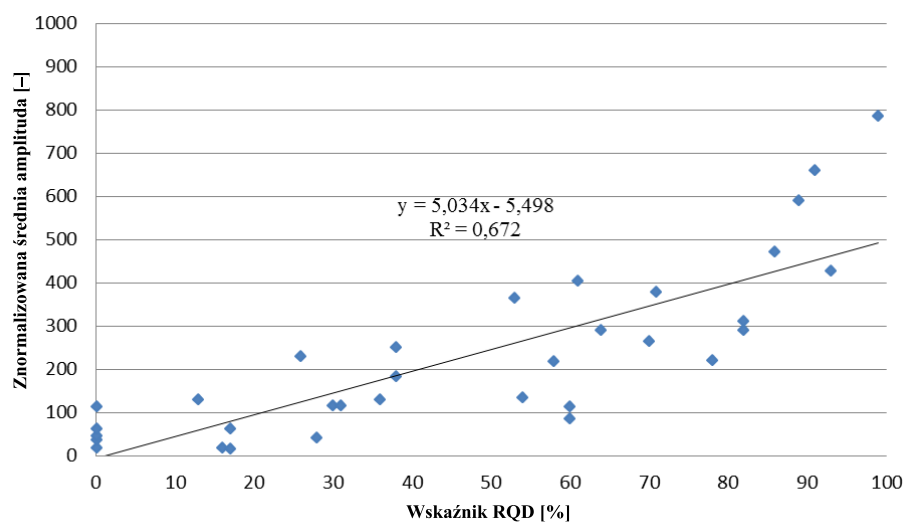
Fig. 5.9. Comparison of average values of the amplitudes calculated in different time windows for the exemplary borehole

Ze względu na sposób rejestracji sygnału przez sondę georadarową wartości znormalizowanych średnich amplitud w oknie 20–40 ns wymagały kolejnego uśrednienia. W wyniku przeprowadzonych testów uzyskano najlepsze rezultaty dla średniej wartości na odcinkach odpowiadających 1 metrowi z krokiem co 0,5 metra. Następnie została obliczona średnia ważona z trzech kolejnych odcinków o długości 1 m, a w przypadku odcinków skrajnych z dwóch sąsiednich odcinków (rys. 4.4).

Obliczone wartości znormalizowanych średnich amplitud zostały przyporządkowane do wartości wskaźników RQD dla poszczególnych otworów. Na rysunku 5.10 przedstawione zostało przykładowe zestawienie wyników znormalizowanych średnich amplitud z klasami RQD dla otworu W9 z rejonu wiaduktu kolejowego WK-432.

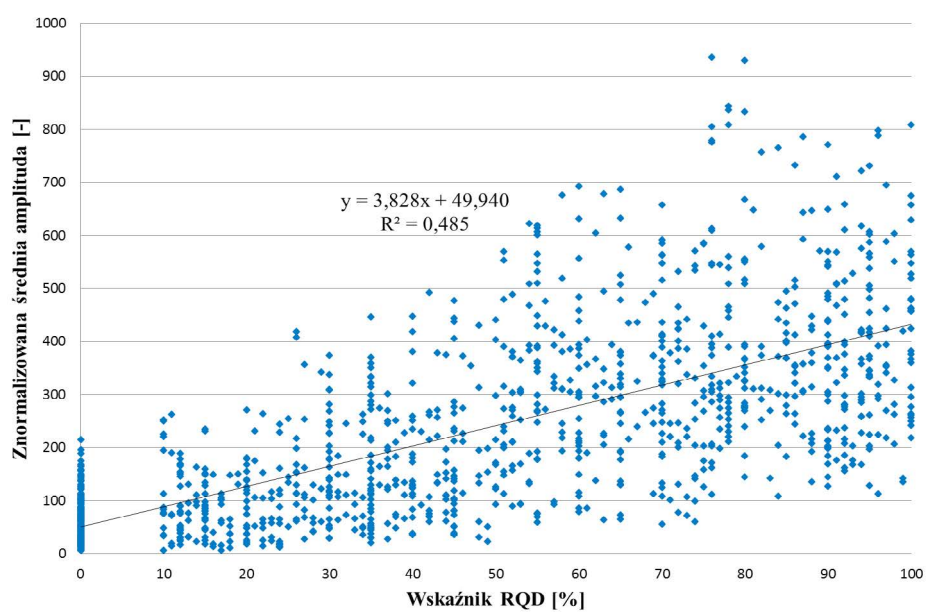
Zgodnie z przyjętą metodyką badań (rozdział 4) wartości znormalizowanych średnich amplitud zostały skorelowane z wartościami wskaźników RQD dla 60 otworów. W efekcie odrzucono dane z 14 otworów (23%), w których współczynnik korelacji liniowej Pearsona był mniejszy niż 0,4. Dla pozostałych 46 otworów wartości znormalizowanych średnich amplitud zostały zestawione z wartościami wskaźników RQD (rys. 5.11). Przykład podstawowych danych dla otworów pokazano w załączniku 2.

Następnie poszczególnym wartościom wskaźników RQD zostały przypisane odpowiadające im klasy stopnia spękania górotworu opracowane przez Deere i in. (1967) według tabeli 3.1. Taka segregacja została opracowana dla poszczególnych otworów (rys. 5.12), jak i zbiorczo dla wszystkich otworów (rys. 5.13). Dla tak przygotowanych danych została przeprowadzona analiza statystyczna opisana w rozdziale 4. W przypadku wszystkich otworów



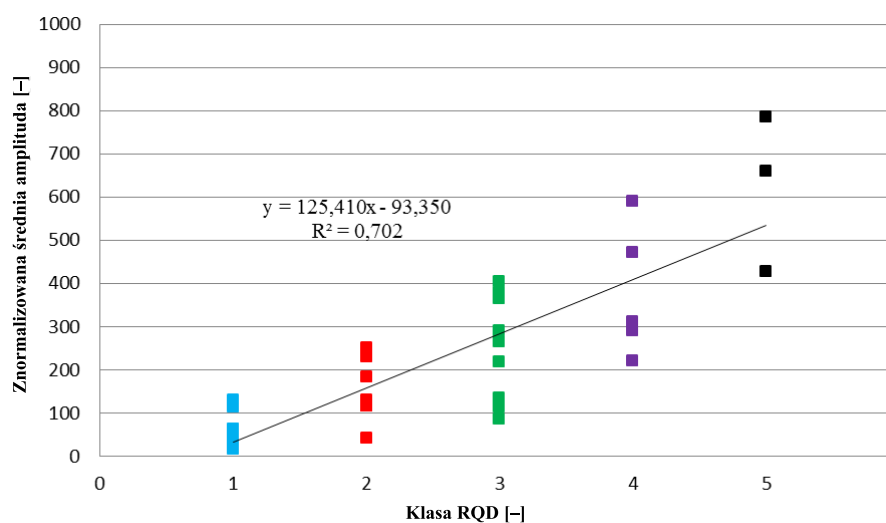
Rys. 5.10. Przyporządkowanie wartości znormalizowanych średnich amplitud do wartości wskaźników RQD dla otworu W9

Fig. 5.10. Assigning values of normalized average amplitude to values of RQD index for the W9 borehole



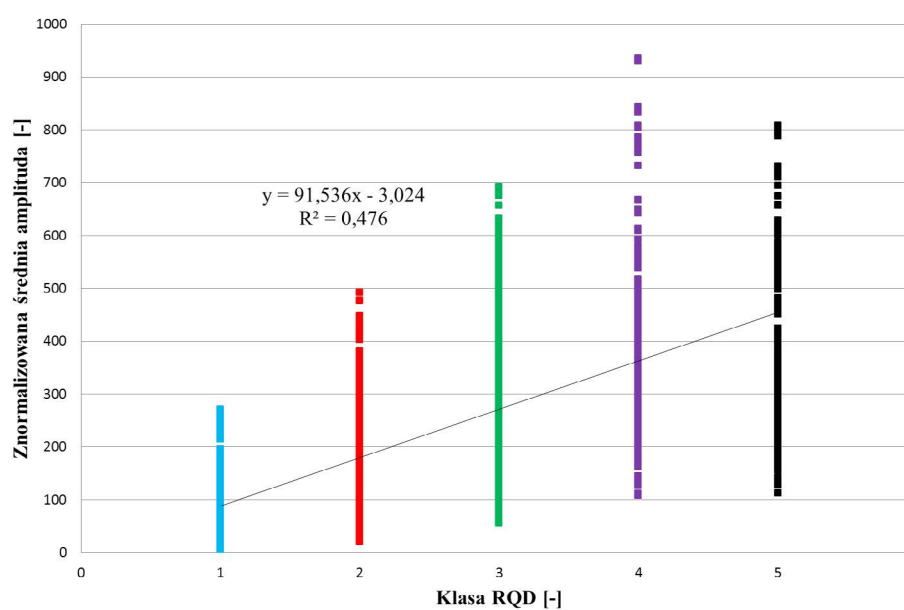
Rys. 5.11. Przyporządkowanie wartości znormalizowanych średnich amplitud do wartości wskaźników RQD dla 46 otworów z rejonu badań

Fig. 5.11. Assigning values of normalized average amplitude to values of RQD index for the 46 boreholes from area of research



Rys. 5.12. Przykład przyporządkowania wartości znormalizowanych średnich amplitud do klas RQD w otworze W9

Fig. 5.12. Example of assigning values of normalized average amplitude to RQD classes in W9 borehole



Rys. 5.13. Przyporządkowanie wartości znormalizowanych średnich amplitud do klas RQD dla wszystkich 46 otworów z rejonu badań

Fig. 5.13. Assigning values of normalized average amplitude to RQD classes for all 46 boreholes from area of research

badawczych, wartości obliczonych parametrów statystycznych charakteryzujących każdą klasę RQD zostały przedstawione w tabeli 5.4.

Tabela 5.4

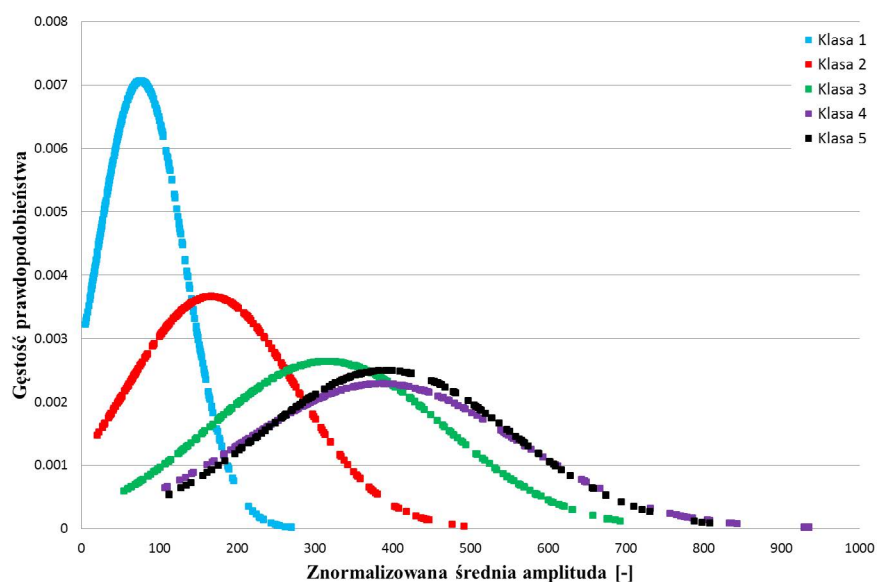
Wyniki analizy statystycznej danych z 46 otworów z rejonu badań

Table 5.4

The results of the statistical analysis of data from 46 boreholes in research area

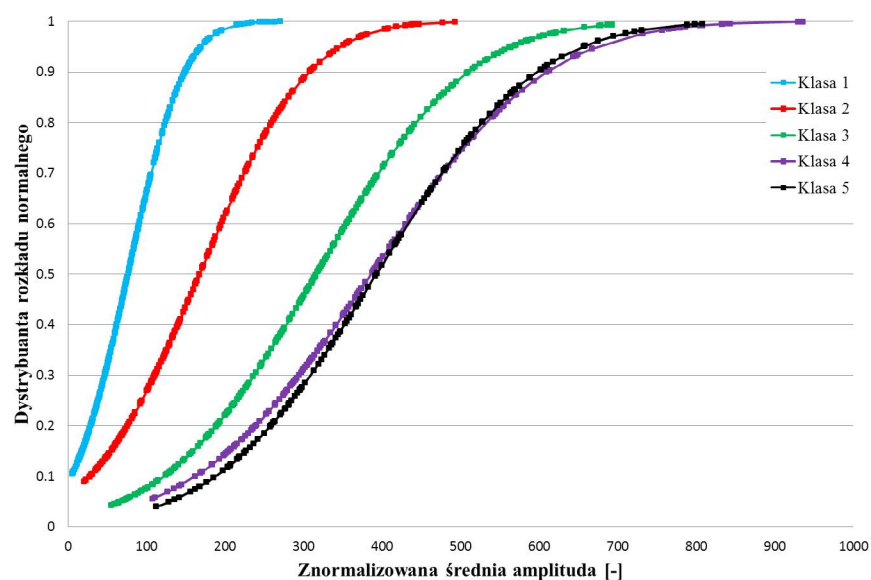
Parametr		Klasa RQD				
		I	II	III	IV	V
Średnia arytmetyczna		76,33	167,45	316,15	385,84	392,51
Średnia geometryczna		56,60	133,15	275,55	350,28	359,66
Mediana		64,27	136,36	305,43	350,93	367,22
Odchylenie standardowe		56,48	108,97	151,22	174,75	159,78
Współczynnik zmienności		73,99%	65,08%	47,83%	45,29%	40,71%
Błąd standardowy średniej		2,91	6,82	9,25	12,92	13,85
Błąd standardowy mediany		3,65	8,55	11,60	16,19	17,36
Błąd standardowy odch. stand.		2,06	4,83	6,54	9,13	9,80
Wariancja		3 190,05	11 874,14	22 866,30	30 537,92	25 530,40
Kurtosa		1,01	0,12	-0,49	0,78	-0,37
Skośność		1,15	0,91	0,39	1,05	0,51
Zakres		264,52	471,90	637,83	827,77	695,75
Minimum		5,58	20,54	54,93	107,71	112,47
Maksimum		270,11	492,44	692,77	935,48	808,22
Suma		28 700,91	42 699,66	84 412,81	70 609,34	52 204,13
Liczebność klasy		376	255	267	183	133
Przedział ufności dla średniej	min.	71,53	156,19	300,88	364,53	369,65
	max.	81,14	178,71	331,42	407,16	415,37
Przedział ufności dla średniej	min.	70,62	154,07	298,01	360,52	365,36
	max.	82,04	180,82	334,29	411,16	419,67
Przedział ufności dla mediany	min.	58,25	122,25	286,30	324,22	338,57
	max.	70,29	150,46	324,56	377,64	395,86
Przedział ufności dla mediany	min.	57,12	119,60	282,70	319,21	333,19
	max.	71,43	153,12	328,16	382,66	401,24
Typowy przedział zmienności dla średniej	min.	19,85	58,48	164,94	211,09	232,73
	max.	132,81	276,42	467,37	560,59	552,29
Typowy przedział zmienności dla mediany	min.	7,79	27,39	154,21	176,18	207,43
	max.	120,75	245,33	456,64	525,68	527,00

Dla analizowanych danych zostały obliczone dodatkowo gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuanty rozkładu normalnego w każdej klasie RQD (rys. 5.14 i 5.15).



Rys. 5.14. Wykresy gęstości prawdopodobieństwa dla klas RQD

Fig. 5.14. Diagrams of the probability density for RQD classes



Rys. 5.15. Wykresy dystrybuanty rozkładu normalnego dla klas RQD

Fig. 5.15. Diagrams of cumulative function of normal distribution for RQD classes

Największa liczba danych (30,96%) występowała w klasie I RQD o najgorszej jakości górotworu, a najmniejsza liczba danych (10,97%) występowała w klasie V RQD opisującej bardzo dobrą jakość górotworu. Taki rozkład danych potwierdza stan silnego naruszenia górotworu działalnością górnictwem oraz oddziaływaniem różnych procesów wietrzenia skał.

Analizując obliczone wartości parametrów statystycznych można zauważyć, że największą zmiennością cechują się dane sklasyfikowane w I i II klasie RQD. Charakteryzują się one również najmniejszymi wartościami błędu standardowego średniej, mediany oraz odchylenia standardowego. W związku z tym wartości przetworzonej amplitudy dla tych klas są najbardziej przewidywalne.

Można również zauważyć, że rozkłady dla wszystkich klas są asymetryczne i charakteryzują się prawostronną asymetrią. Oznacza to, że rozkłady gęstości prawdopodobieństwa dla tych klas są wydłużone w stronę większych wartości znormalizowanych średnich amplitud. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa w klasie II RQD, czyli o słabej jakości górotworu, jest mezokurtyczny, tj. podobny do rozkładu normalnego. Wartości amplitud w klasie I i IV RQD posiadają rozkłady leptokurtyczne, tj. o większym skupieniu danych wokół średniej i bardziej smukłe w porównaniu do rozkładu normalnego. Natomiast dane w klasach III i V RQD posiadają rozkład platykurtyczny, tj. o większym spłaszczeniu w porównaniu do rozkładu normalnego, a w związku z tym znajduje się w nich więcej wyników skrajnych, czyli oddalonych od wartości średniej.

Na podstawie otrzymanych wyników analizy statystycznej oraz obliczonej gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuanty rozkładu normalnego dla pięciu klas RQD przeprowadzono powtórne obliczenia w przedziałach zmienności dla każdej klasy. Do dalszej analizy wzięte zostały tylko te wartości znormalizowanych średnich amplitud, które mieściły się w przedziale według kryterium:

$$\bar{x} - \sigma < X < \bar{x} + \sigma \quad (5.1)$$

gdzie:

- $\bar{x}$ – średnia arytmetyczna w danej klasie RQD,
- σ – odchylenie standardowe w danej klasie RQD,
- X – przedział zmienności w danej klasie RQD.

Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej dla tak przygotowanych danych zostały zestawione w tabeli 5.5. Na rysunku 5.16 przedstawione zostało zestawienie wartości znormalizowanych średnich amplitud z odpowiadającymi im wartościami wskaźników RQD, a na rysunku 5.17 ich przyporządkowanie do poszczególnych klas RQD. Rysunki 5.18 oraz 5.19 przedstawiają gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuanty rozkładu normalnego dla każdej klasy RQD.

Rozkład liczby danych w poszczególnych klasach RQD jest bardzo podobny do przypadku poprzedniego, przed weryfikacją. Najbardziej liczebna jest klasa I RQD (31,59%),

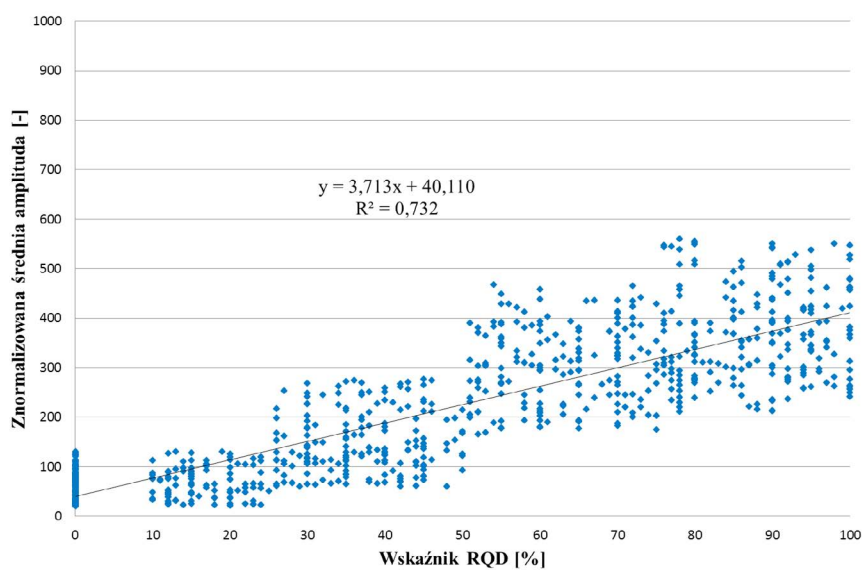
Tabela 5.5

Wyniki analizy statystycznej dla danych w przedziale zmienności wg kryterium 6.1 dla 46 otworów badawczych w podziale na 5 klas RQD

Table 5.5

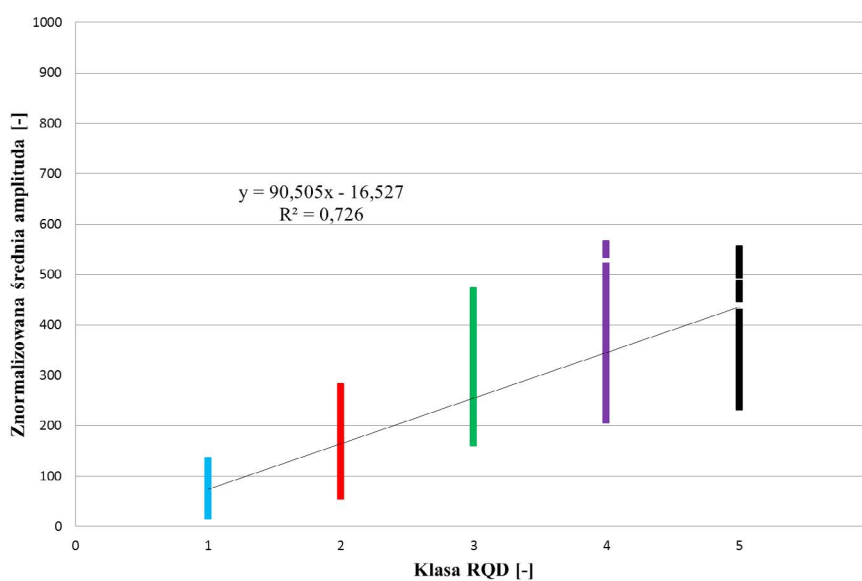
The results of the statistical analysis of data within the range of variation according to the criterion 6.1 for the 46 boreholes divided into 5 RQD classes

Parametr		Klasa RQD				
		I	II	III	IV	V
Średnia arytmetyczna		63,52	149,33	304,06	359,20	377,21
Średnia geometryczna		56,12	136,84	293,33	347,06	366,93
Mediana		61,50	134,74	305,15	349,55	367,12
Odchylenie standardowe		30,09	61,48	79,51	95,23	88,73
Współczynnik zmienności		47,37%	41,17%	26,15%	26,51%	23,52%
Błąd standardowy średniej		1,84	4,61	5,98	8,20	9,57
Błąd standardowy mediany		2,31	5,77	7,49	10,27	11,99
Błąd standardowy odch. stand.		1,30	3,26	4,23	5,80	6,77
Wariancja		9 05,21	3 780,18	6 321,71	9 068,08	7 873,22
Kurtoza		-0,89	-0,84	-1,06	-0,68	-1,09
Skośność		0,39	0,49	0,07	0,50	0,26
Zakres		110,06	216,83	301,56	349,07	314,45
Minimum		20,21	59,29	165,30	211,11	236,16
Maksimum		130,26	276,12	466,86	560,18	550,61
Suma		16 895,74	26 580,61	53 819,07	48 491,48	32 439,70
Liczebność klasy		266	178	177	135	86
Przedział ufności dla średniej	min.	60,47	141,73	294,20	345,67	361,42
	max.	66,56	156,93	313,92	372,72	392,99
Przedział ufności dla mediany	min.	59,90	140,30	292,35	343,13	358,45
	max.	67,13	158,36	315,78	375,26	395,96
Przedział ufności dla mediany	min.	57,68	125,21	292,80	332,61	347,34
	max.	65,31	144,27	317,51	366,50	386,90
Przedział ufności dla mediany	min.	56,97	123,42	290,48	329,43	343,62
	max.	66,03	146,06	319,83	369,68	390,62
Typowy przedział zmienności dla średniej	min.	33,43	87,85	224,55	263,97	288,47
	max.	93,60	210,81	383,57	454,42	465,94
Typowy przedział zmienności dla mediany	min.	31,41	73,26	225,65	254,33	278,39
	max.	91,58	196,22	384,66	444,78	455,85



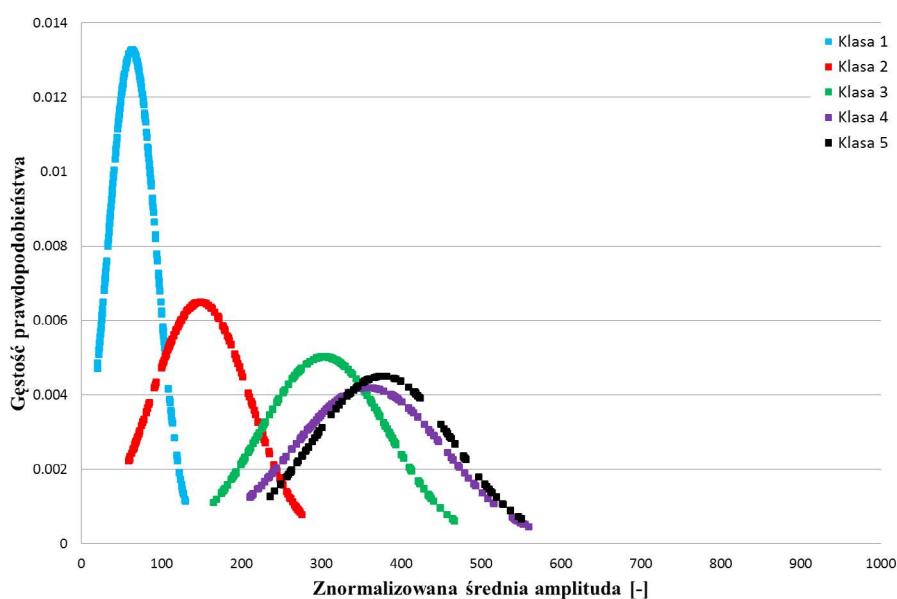
Rys. 5.16. Zestawienie wartości znormalizowanych średnich amplitud ze wskaźnikami RQD dla danych z 46 otworów badawczych wg kryterium 6.1

Fig. 5.16. Values of normalized average amplitude with RQD values for data from 46 boreholes according to the criterion 6.1



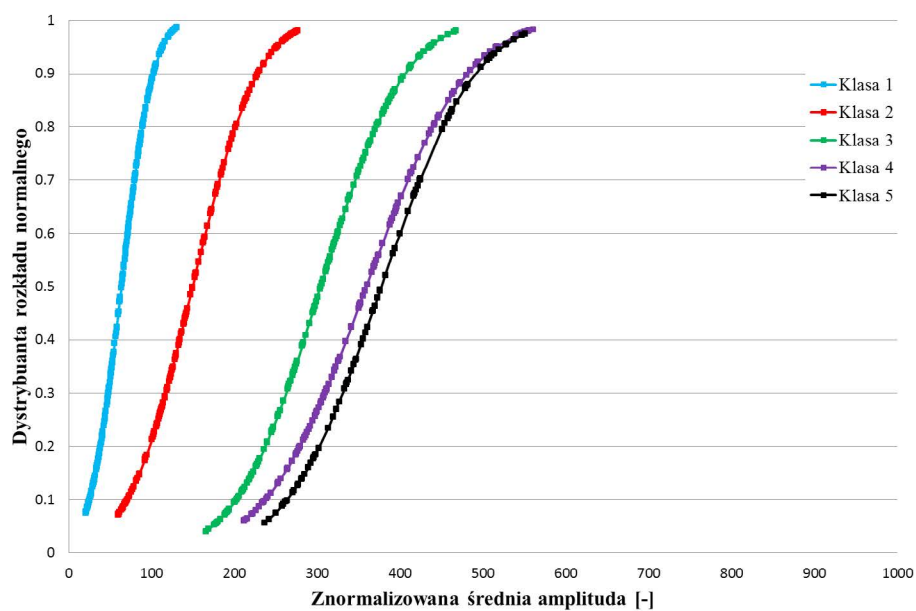
Rys. 5.17. Zestawienie wartości znormalizowanych średnich amplitud z klasami RQD dla danych z 46 otworów badawczych według kryterium 6.1

Fig. 5.17. Values of normalized average amplitude with RQD classes for data from 46 boreholes according to the criterion 6.1



Rys. 5.18. Wykres gęstości prawdopodobieństwa dla klas RQD wg kryterium 6.1

Fig. 5.18. Diagrams of the probability density for RQD classes according to the criterion 6.1



Rys. 5.19. Wykres dystrybuanty rozkładu normalnego dla klas RQD wg kryterium 6.1

Fig. 5.19. Diagrams of cumulative function of normal distribution of RQD classes according to the criterion 6.1

natomiast najmniej danych jest w klasie V RQD (10,21%). Podobnie znormalizowane średnie amplitudy wykazują największą zmienność w I i II klasie RQD. Współczynnik zmienności zmniejszył się o około 40% dla każdej klasy w stosunku do pełnego zakresu danych. Wartości w I klasie RQD charakteryzują się najmniejszym zróżnicowaniem wyników, czyli wyniki w tej klasie są najbardziej skoncentrowane wokół średniej. Z kolei klasa III RQD charakteryzuje się największym zróżnicowaniem wyników w danym zbiorze.

Również w tym przedziale zmienności dane wykazują asymetrię prawostronną rozkładu dla wszystkich klas, oznacza to że większość danych jest mniejszych od wartości średniej w każdej klasie.

Rozkład danych we wszystkich klasach ma charakter leptokurtyczny, tj. większe skupienie wokół wartości średniej. Granice przedziałów w przypadku zakresu zmienności dla poziomów ufności $\alpha = 0,05$ i $\alpha = 0,1$ uległy niewielkim zmianom w granicach około 5–10%. Porównując wyniki analizy statystycznej dla zbioru danych przed i po weryfikacji (kryterium 6.1) największą różnicę można zaobserwować dla zmian wartości współczynnika determinacji R^2 w odniesieniu do liniowego dopasowania krzywej dla poszczególnych wskaźników RQD, jak i dla klas RQD. Współczynnik ten wzrósł od wartości około 0,48 (dopasowanie niezadowalające od 0 do 0,5) do wartości około 0,73 osiągając dopasowanie zadowalające (w przedziale 0,6–0,8). Zależność ta ma postać:

$$y = 3,713 \cdot x - 40,110 \quad (5.2)$$

gdzie:

- y – zmienna opisująca znormalizowaną średnią amplitudę sygnału,
- x – zmienna opisująca wskaźnik RQD.

Należy zauważyć, że dane z pełnego zakresu, jak i po weryfikacji, wykazują niewielką zmienność pomiędzy dwoma klasami RQD – klasą IV (76–90%) i klasą V (91–100%) charakteryzujących górotwór o dobrej i bardzo dobrej jakości. Wartości średnich znormalizowanych amplitud w obydwu klasach są niemal identyczne. W związku z tym uzasadnione jest połączenie tych dwóch klas w jedną charakteryzującą ośrodek o dobrej i bardzo dobrej jakości, dla której wartości wskaźnika RQD są większe od 76%.

Należy również zwrócić uwagę na nieciągłość danych w przedziale zmienności RQD od 0 do 10% (rys. 5.11 i 5.16). Zaobserwowano brak danych w tym przedziale ze względu na sposób obliczenia RQD (Deere i in. 1967). Przetworzone amplitudy z tego przedziału zostały przyporządkowane do 0%, a faktycznie powinny być rozłożone w całym przedziale. W związku z tym autor wprowadził podział klasy I RQD na klasę Ia (od 0 do 10%) oraz klasę Ib (od 11 do 25%). Zaproponowane zmiany zostały pokazane w tabeli 5.6.

W zmienionych zakresach przedziałów klas RQD przeprowadzono ponowną analizę statystyczną dla danych pochodzących z 46 otworów badawczych w rejonie badań. Wyniki obliczonych parametrów statystycznych przedstawione zostały w tabeli 5.7. Na-

Tabela 5.6

Modyfikacja klasyfikacji RQD z wykorzystaniem badań metodą BGPR w warunkach niecki bytomskiej

Table 5.6

Modification of RQD classification using the BGPR method in Bytom Basin conditions

Klasy RQD wg Deere i in. (1967)	Przedział zmienności wskaźnika RQD [%]	Klasy RQD na podstawie BGPR	Przedział zmienności wskaźnika RQD [%]	Jakość górotworu
I	0–25	Ia	0–10	bardzo słaba
		Ib	11–25	
II	26–50	II	26–50	słaba
III	51–75	III	51–75	średnia
IV	76–90	IV	76–100	dobra i bardzo dobra
V	91–100			

tomiast na rysunku 5.20 przedstawiono przyporządkowanie wartości znormalizowanych średnich amplitud do zmodyfikowanych klas RQD, które nazwano RQD-BGPR. Na rysunkach 5.21 i 5.22 przedstawione zostały wykresy gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuanty rozkładu normalnego charakteryzujące dane w poszczególnych klasach RQD-BGPR.

Ustalenie klas RQD-BGPR pozwoliło na uzyskanie bardziej wyrównanych rozkładów danych. Wartości współczynnika zmienności w klasach RQD-BGPR Ia, Ib oraz IV były mniejsze w porównaniu do klas RQD. Wartości wariancji w tych klasach uległy zmniejszeniu, co świadczy o mniejszym zróżnicowaniu danych. Dane wykazały również mniejsze wartości kurtozy, a ich rozkład w klasach Ib, II oraz IV RQD-BGPR był zbliżony do rozkładu normalnego. Natomiast w klasie III dane posiadały rozkład platokurtyczny, a w klasie Ia rozkład leptokurtyczny. Wprowadzenie klas RQD-BGPR nie wpłynęło na zmianę asymetrii rozkładów pozostawiając je prawostronnie asymetrycznymi.

Zgodnie z dotychczasowym schematem przeprowadzono również analizę statystyczną w klasach RQD-BGPR w przedziale zmienności określonym kryterium 6.1. Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej przedstawione zostały w tabeli 5.8 oraz na rysunku 5.23. Na rysunkach 5.24 oraz 5.25 przedstawiono wykresy gęstości prawdopodobieństwa oraz dystrybuanty rozkładu normalnego dla analizowanych danych.

Dane w przedziale zmienności określonym kryterium 6.1 cechowały się zbliżoną liczebnością próbek. Analiza statystyczna na tych danych, podobnie jak w przypadku klas RQD, wykazała spadek współczynnika zmienności o około 35–45%, odchylenia standardowego o około 45%, a wariancji o około 70% w każdej klasie. Wszystkie klasy posiadały rozkłady platokurtyczne oraz asymetrię prawostronną. Wartość współczynnika determinacji w tym przypadku również wzrosła i wyniosła około 0,74, co oznacza że otrzymany wynik wykazał zadowalające dopasowanie. Obliczona zależność liniowa ma postać:

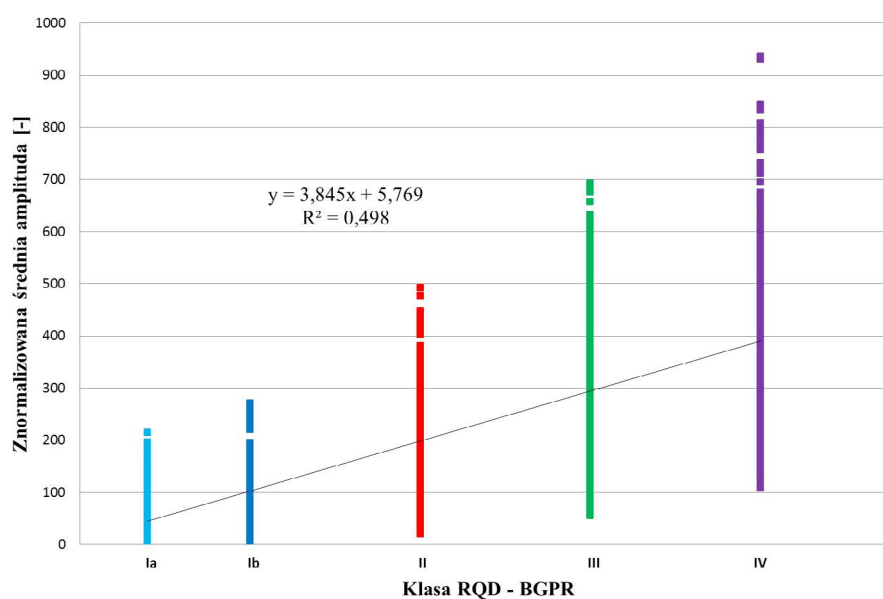
Tabela 5.7

Wyniki analizy statystycznej dla klas RQD-BGPR dla 46 otworów badawczych

Table 5.7

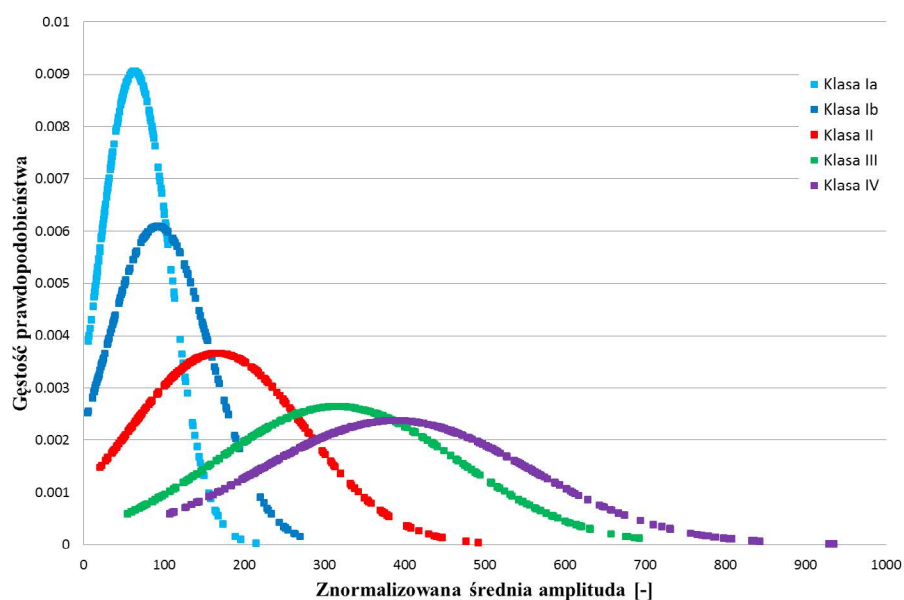
The results of the statistical analysis for RQD-BGPR classes for 46 boreholes

Parametr		Klasa RQD-BGPR				
		Ia	Ib	II	III	IV
Średnia arytmetyczna		63,34	92,60	167,45	316,15	388,65
Średnia geometryczna		48,53	68,63	133,15	275,55	354,20
Mediana		51,82	78,12	136,36	305,43	357,28
Odchylenie standardowe		44,06	65,53	108,97	151,22	168,38
Współczynnik zmienności		69,57%	70,78%	65,08%	47,83%	43,33%
Błąd standardowy średniej		3,05	5,07	6,82	9,25	9,47
Błąd standardowy mediany		3,82	6,35	8,55	11,60	11,87
Błąd standardowy odch. stand.		2,16	3,59	4,83	6,54	6,70
Wariancja		1 941,66	4 294,83	1 1874,14	22 866,30	28 353,46
Kurtoza		0,51	0,06	0,12	-0,49	0,37
Skośność		1,00	0,87	0,91	0,39	0,85
Zakres		208,71	264,52	471,90	637,83	827,77
Minimum		6,07	5,58	20,54	54,93	107,71
Maksimum		214,78	270,11	492,44	692,77	935,48
Suma		13 237,53	15 463,39	42 699,66	84 412,81	122 813,47
Liczebność klasy		209	167	255	267	316
Przedział ufności dla średniej	min.	58,31	84,23	156,19	300,88	373,02
	max.	68,37	100,96	178,71	331,42	404,28
Przedział ufności dla mediany	min.	57,36	82,66	154,07	298,01	370,08
	max.	69,31	102,53	180,82	334,29	407,22
Przedział ufności dla mediany	min.	45,52	67,63	122,25	286,30	337,70
	max.	58,12	88,60	150,46	324,56	376,86
Przedział ufności dla mediany	min.	44,33	65,66	119,60	282,70	334,02
	max.	59,30	90,57	153,12	328,16	380,54
Typowy przedział zmienności dla średniej	min.	19,27	27,06	58,48	164,94	220,27
	max.	107,40	158,13	276,42	467,37	557,04
Typowy przedział zmienności dla mediany	min.	7,75	12,58	27,39	154,21	188,90
	max.	95,88	143,65	245,33	456,64	525,67



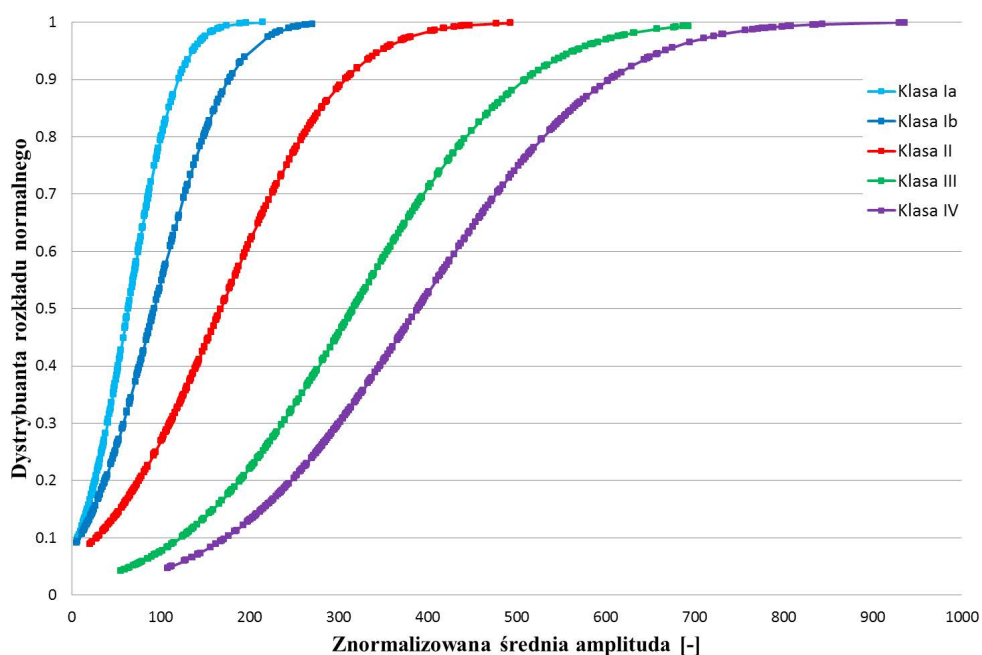
Rys. 5.20. Przyporządkowanie wartości znormalizowanych średnich amplitud dla klas RQD-BGPR dla 46 otworów badawczych w niecce bytomskiej

Fig. 5.20. Assigning values of normalized average amplitude for RQD-BGPR classes for 46 boreholes



Rys. 5.21. Wykres gęstości prawdopodobieństwa dla klas RQD-BGPR

Fig. 5.21. Diagrams of the probability density for RQD-BGPR classes



Rys. 5.22. Wykres dystrybuanty rozkładu normalnego dla klas RQD-BGPR

Fig. 5.22. Diagrams of normal distribution function for RQD-BGPR classes

$$y = 3,690 \cdot x - 0,469 \quad (5.3)$$

gdzie:

- y – zmienna opisująca znormalizowaną średnią amplitudę sygnału,
- x – zmienna opisująca wskaźnik RQD.

5.6. Klasyfikacja RQD-BGPR oceny stopnia spękania ośrodka skalnego w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej

Klasyfikacja RQD-BGPR oceny stopnia spękania ośrodka skalnego w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej została przedstawiona w tabeli 5.9. Klasyfikacja ta pozwala, na podstawie pomierzonych w otworze metodą BGPR amplitud sygnału i przetworzonych według sposobu opisanego w rozdziale 4, wyznaczyć stopień spękania ośrodka skalnego według klas RQD.

W klasyfikacji przyporządkowano przedziały zmian wartości znormalizowanych średnich amplitud do empirycznie wyznaczonych klas RQD-BGPR. Klasa I RQD została uszczegółowiona poprzez podzielenie jej na klasę Ia RQD-BGPR (od 0 do 10%) i Ib RQD-BGPR (od

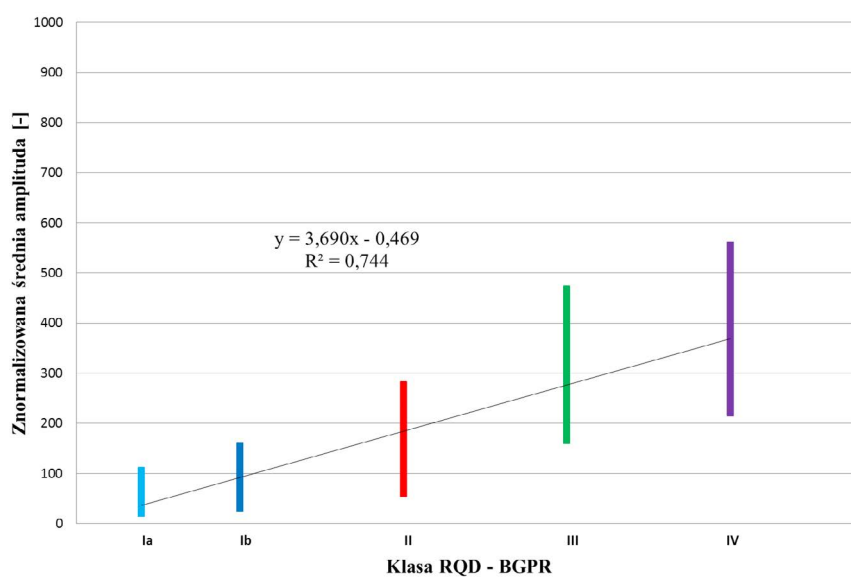
Tabela 5.8

Wyniki analizy statystycznej dla klas RQD-BGPR dla danych z przedziału zmienności określonego kryterium 6.1

Table 5.8

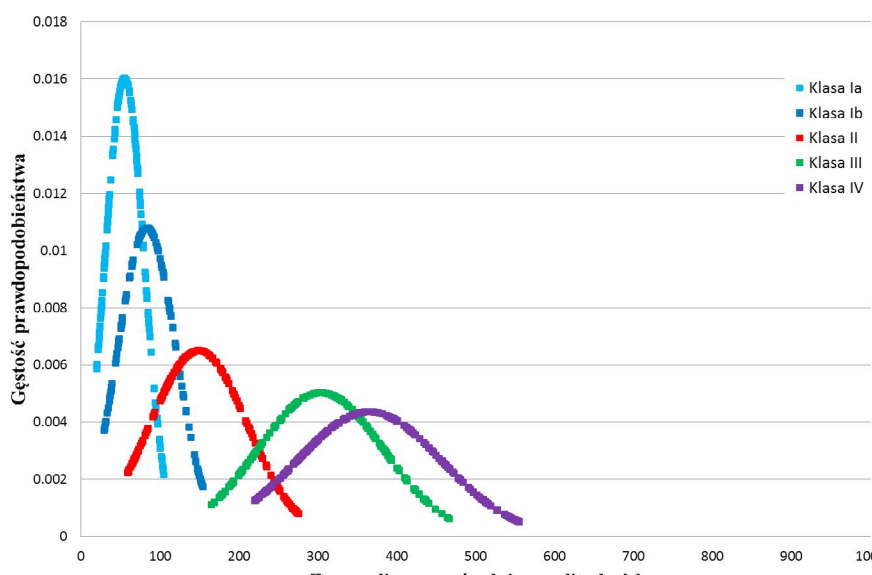
The results of the statistical analysis for RQD-BGPR classes for data within the range of variation specified in the criterion 6.1

Parametr		Klasa RQD-BGPR				
		Ia	Ib	II	III	IV
Średnia arytmetyczna		55,53	83,65	149,33	304,06	365,57
Średnia geometryczna		49,81	75,25	136,84	293,33	354,33
Mediana		51,50	78,92	134,74	305,15	355,06
Odchylenie standardowe		24,91	37,00	61,48	79,51	91,85
Współczynnik zmienności		44,85%	44,23%	41,17%	26,15%	25,12%
Błąd standardowy średniej		2,05	3,50	4,61	5,98	6,19
Błąd standardowy mediany		2,57	4,38	5,77	7,49	7,76
Błąd standardowy odch. stand.		1,45	2,47	3,26	4,23	4,38
Wariancja		6 20,30	1 369,00	3 780,18	6 321,71	8 436,09
Kurtzoza		-1,07	-0,93	-0,84	-1,06	-0,86
Skośność		0,34	0,38	0,49	0,07	0,41
Zakres		85,18	124,93	216,83	301,56	334,38
Minimum		20,21	29,57	59,29	165,30	220,79
Maksimum		105,38	154,50	276,12	466,86	555,18
Suma		8 217,89	9 368,40	26 580,61	53 819,07	80 426,28
Liczebność klasy		148	112	178	177	220
Przedział ufności dla średniej	min.	52,15	77,88	141,73	294,20	355,36
	max.	58,90	89,42	156,93	313,92	375,79
Przedział ufności dla średniej	min.	51,51	76,79	140,30	292,35	353,44
	max.	59,54	90,50	158,36	315,78	377,71
Przedział ufności dla mediany	min.	47,26	71,69	125,21	292,80	342,26
	max.	55,73	86,15	144,27	317,51	367,87
Przedział ufności dla mediany	min.	46,47	70,33	123,42	290,48	339,86
	max.	56,53	87,51	146,06	319,83	370,27
Typowy przedział zmienności dla średniej	min.	30,62	46,65	87,85	224,55	273,73
	max.	80,43	120,65	210,81	383,57	457,42
Typowy przedział zmienności dla mediany	min.	26,59	41,92	73,26	225,65	263,22
	max.	76,40	115,92	196,22	384,66	446,91



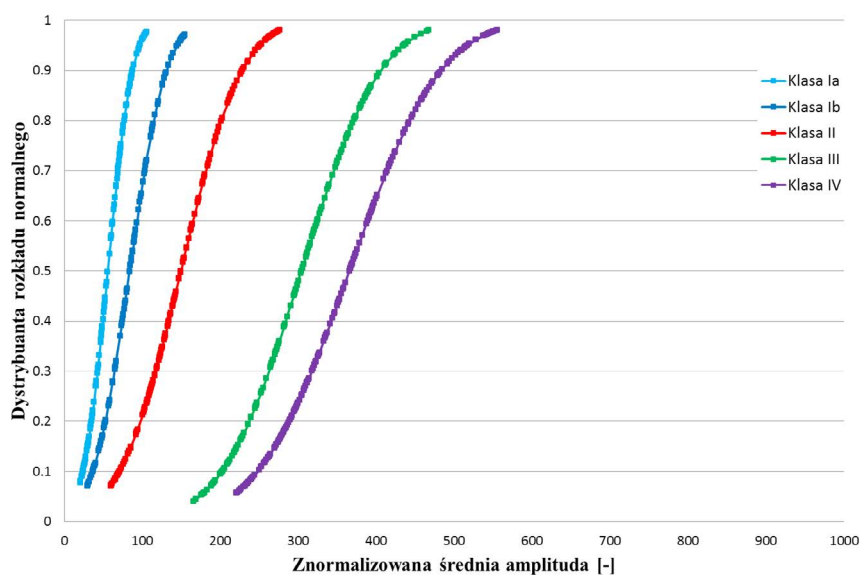
Rys. 5.23. Zestawienie wartości znormalizowanych średnich amplitud z klasami RQD-BGPR dla danych w przedziale zmienności określonym kryterium 6.1

Fig. 5.23. Values of normalized average amplitude with RQD-BGPR classes for data within the range of variation specified in the criterion 6.1



Rys. 5.24. Wykres gęstości prawdopodobieństwa dla klas RQD-BGPR dla danych w przedziale zmienności określonym kryterium 6.1

Fig. 5.24. Diagrams of the probability density for RQD-BGPR classes for data within the range of variation specified in the criterion 6.1



Rys. 5.25. Wykres dystrybuanty rozkładu normalnego dla klas RQD-BGPR dla danych w przedziale zmienności określonym kryterium 6.1

Fig. 5.25. Diagrams of normal distribution function for RQD-BGPR classes for data within the range of variation specified in the criterion 6.1

Tabela 5.9

Klasyfikacja RQD-BGPR oceny stopnia spełnienia ośrodka skalnego w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej

Table 5.9

RQD-BGPR classification of evaluation the degree of fracturing in the rock mass in geological and mining conditions of Bytom Basin

Klasy RQD	Jakość górotworu	Zakres znormalizowanych średnich amplitud [j.um.]		Zakres wskaźnika RQD-BGPR [%]
		min.	max	
Ia	wyjątkowo słaba	0	80	0–10
Ib	bardzo słaba	50	150	11–25
II	słaba	110	250	26–50
III	średnia	210	450	51–75
IV	dobra i bardzo dobra	310	1000	76–100

11 do 25%). Natomiast klasy IV i V RQD zostały połączone w jedną klasę IV RQD-BGPR (od 76 do 100%). Podział klasy I RQD wynikał z niedogodności sposobu liczenia wskaźnika RQD dla wyjątkowo słabych skał (z definicji Deere i in. 1967). Natomiast połączenie

klas IV i V wynikało z niekorzystnych właściwości górotworu w rejonie badań w niecce bytomskiej związanych z niewielką liczbą fragmentów ośrodka o bardzo dobrej jakości (V klasy RQD). W związku z tym wskaźnik RQD-BGPR ma ten sam zakres ogólnych zmian jak wskaźnik RQD, lecz odróżnia się:

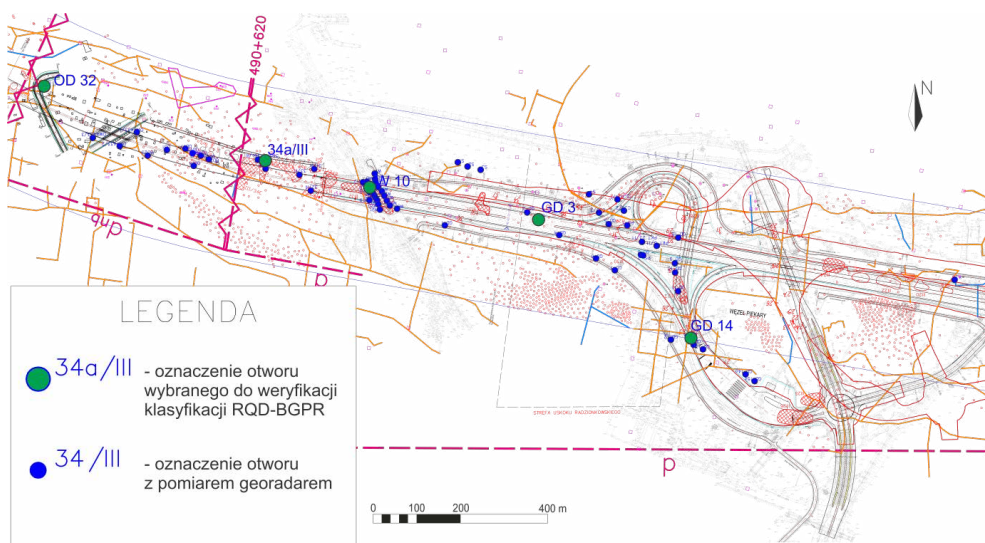
- dodatkowym podziałem klasy I RQD na klasy Ia i Ib oraz
- połączeniem klas IV i V RQD w jedną klasę IV.

Należy również zwrócić uwagę na to, że przedziały zmian wartości znormalizowanych średnich amplitud w sąsiadujących poszczególnych klasach RQD-BGPR zachodzą na siebie wzajemnie (rys. 5.19). W związku z tym klasyfikacja RQD-BGPR wymaga w razie potrzeby doprecyzowania kryteriów przez interpretatora. Takie podejście w klasyfikacjach geoinżynierskich jest typowe i można je również znaleźć w klasyfikacji RMR89 lub Q.

W przypadku klasyfikacji RQD-BGPR, jeżeli obliczona wartość znormalizowanej średniej amplitudy występuje w przedziałach charakterystycznych dla dwóch sąsiednich klas, wówczas w opisie należy zaznaczyć, że dotyczy to dwóch klas. Na przykład jeżeli obliczona wartość znormalizowanej średniej amplitudy wynosi 70 j.um., to jakość górotworu jest wyjątkowo słaba na granicy z bardzo słabą.

6. Przykład porównania wyników klasyfikacji RQD-BGPR i klasyfikacji w ocenie stopnia spękania ośrodka skalnego

Klasyfikację RQD-BGPR (tab. 5.9) zastosowano do oceny stopnia spękania ośrodka skalnego w pięciu wybranych otworach badawczych spoza analizowanego zbioru danych z rejonu niecki bytomskiej, oznaczonych 34a/III, GD 3, GD 14, OD 32 oraz W 10. W wybranych otworach badawczych ocena ta przeprowadzona została zgodnie z metodyką badań opisaną w rozdziale 5. Otwory kontrolne były zlokalizowane w różnych miejscach rejonu badań. Na rysunku 6.1 przedstawiona została lokalizacja wybranych otworów do weryfikacji klasyfikacji RQD-BGPR.

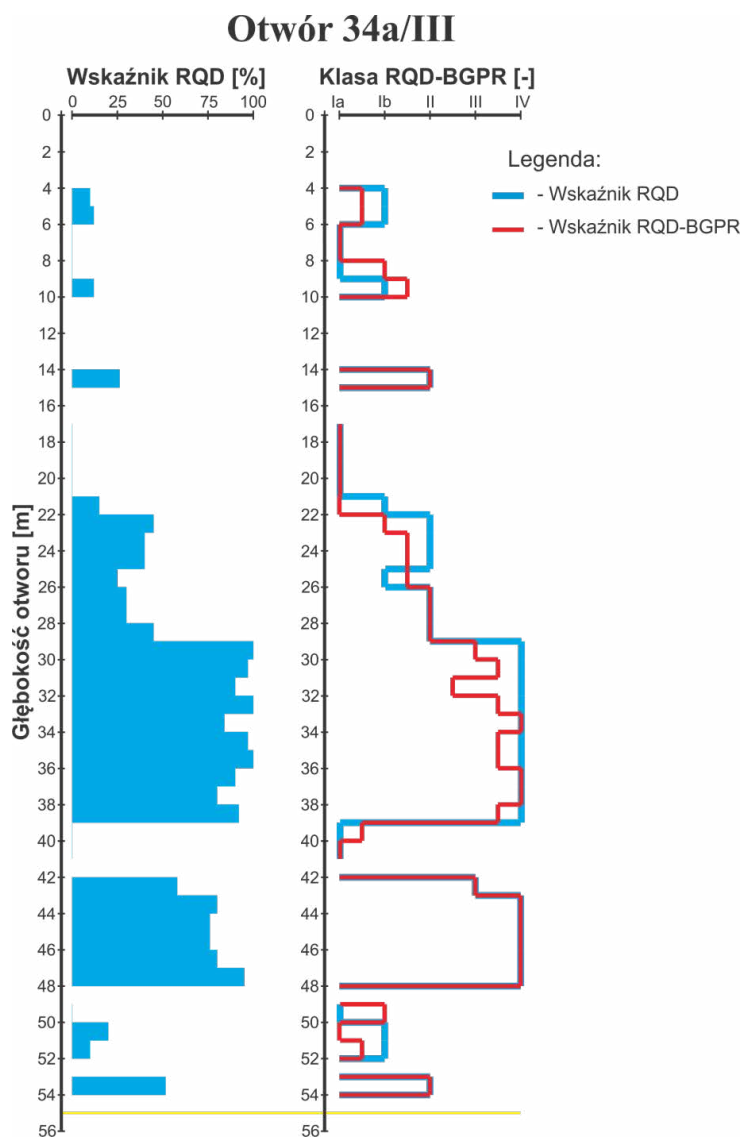


Rys. 6.1. Lokalizacja wybranych otworów do weryfikacji przydatności klasyfikacji RQD-BGPR na tle pozostałych analizowanych otworów

Fig. 6.1. Location of selected boreholes to verify the usefulness of the classification of RQD-BGPR against other analyzed boreholes

Weryfikacja przydatności klasyfikacji RQD-BGPR (tab. 5.9) polegała na porównaniu oceny stopnia spękania ośrodka skalnego z klasyczną oceną według klasyfikacji RQD oraz analizie rozkładu przetworzonych amplitud sygnału georadarowego.

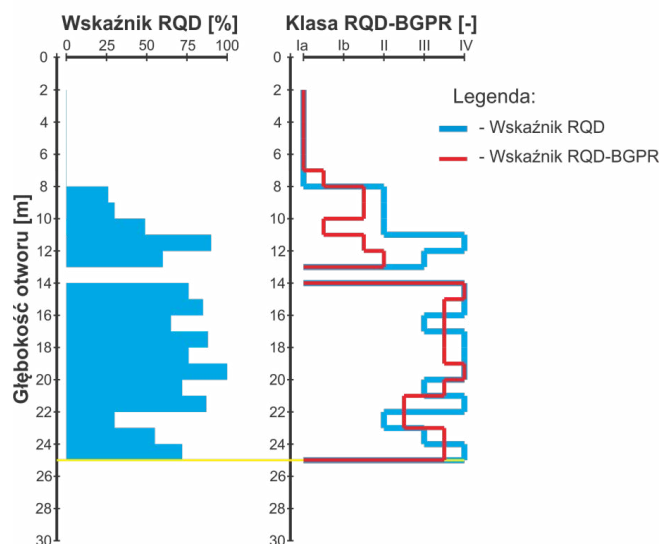
Na rysunkach od 6.2 do 6.6 przedstawiono porównanie wykresów zmian wskaźnika RQD oraz RQD-BGPR uzyskanych na podstawie zarejestrowanych amplitud odpowiedzi impuls-



Rys. 6.2. Wartości wskaźnika RQD dla otworu 34a/III oraz porównanie wartości wskaźnika RQD z uzyskanymi wartościami wskaźnika RQD-BGPR na podstawie zarejestrowanych amplitud

Fig. 6.2. RQD index value for the borehole 34a/III and the comparison of the RQD index values obtained from RQD-BGPR index based on recorded amplitudes

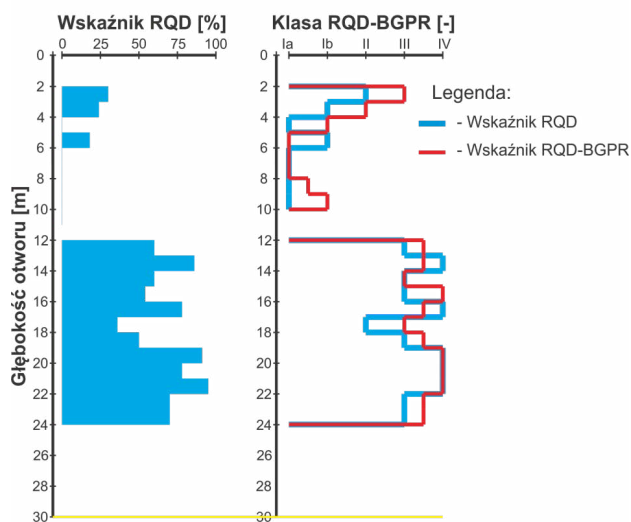
Otwór GD 3



Rys. 6.3. Wartości wskaźnika RQD dla otworu GD 3 oraz porównanie wartości wskaźnika RQD z uzyskanymi wartościami wskaźnika RQD-BGPR na podstawie zarejestrowanych amplitud

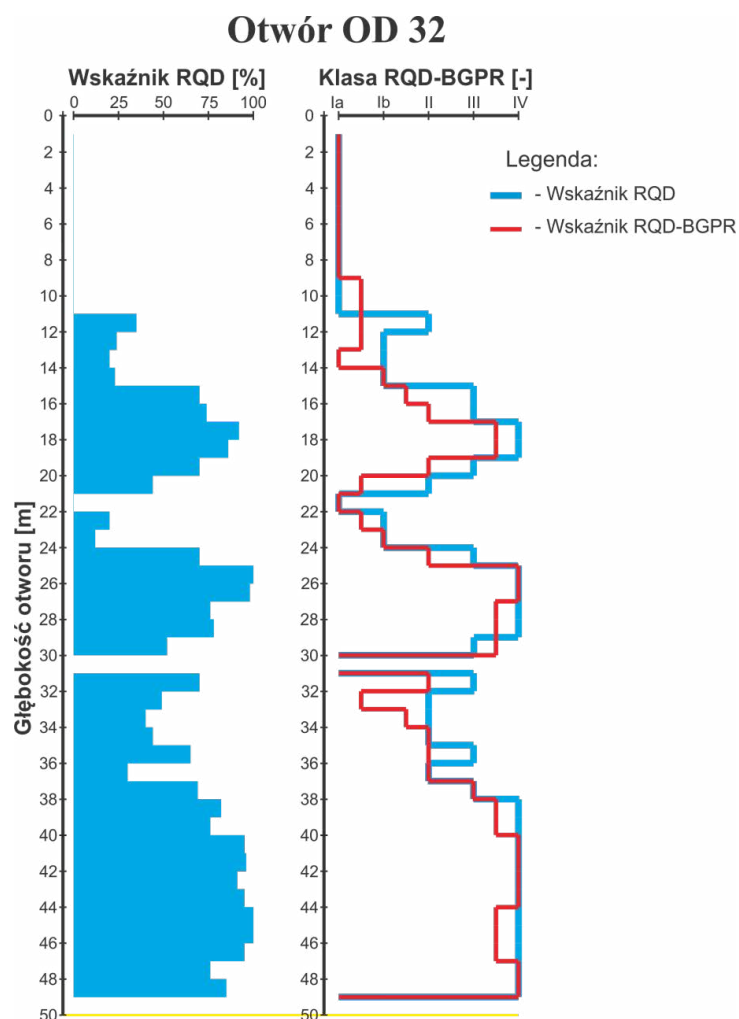
Fig. 6.3. RQD index value for the borehole GD 3 and the comparison of the RQD index values obtained from RQD-BGPR index based on recorded amplitudes

Otwór V



Rys. 6.4. Wartości wskaźnika RQD dla otworu GD 14 oraz porównanie wartości wskaźnika RQD z uzyskanymi wartościami wskaźnika RQD-BGPR na podstawie zarejestrowanych amplitud

Fig. 6.4. RQD index value for the borehole GD 14 and the comparison of the RQD index values obtained from RQD-BGPR index based on recorded amplitudes



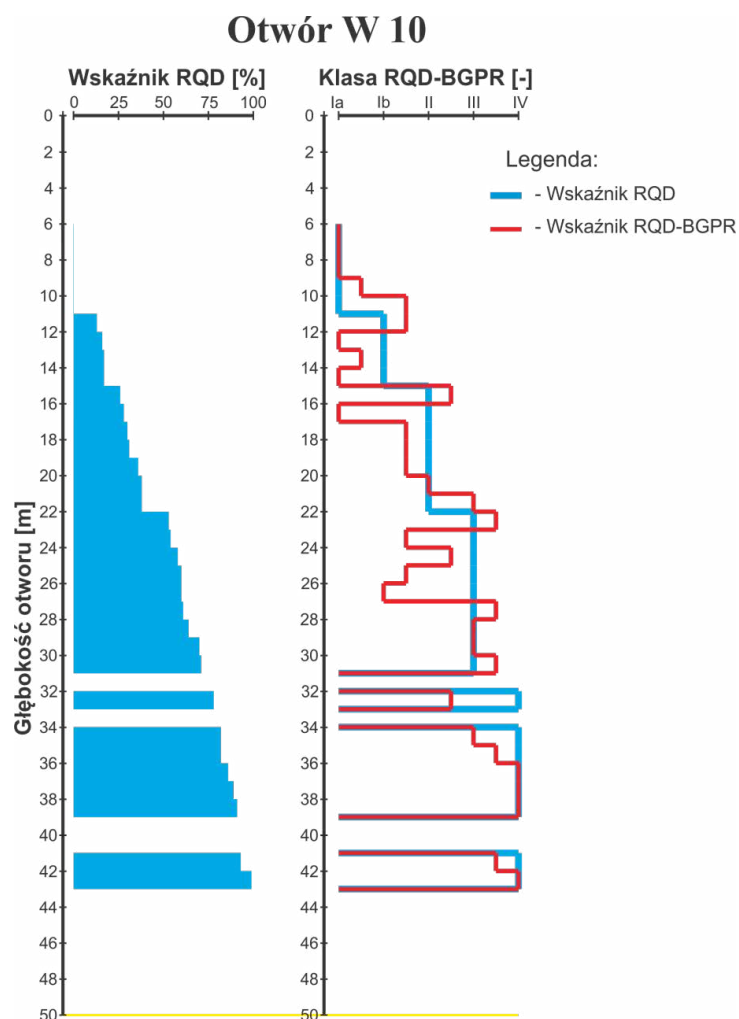
Rys. 6.5. Wartości wskaźnika RQD dla otworu OD 32 oraz porównanie wartości wskaźnika RQD z uzyskanymi wartościami wskaźnika RQD-BGPR na podstawie zarejestrowanych amplitud

Fig. 6.5. RQD index value for the borehole OD 32 and the comparison of the RQD index values obtained from RQD-BGPR index based on recorded amplitudes

sowej ośrodka skalnego. Widać wyraźnie, że obliczone wartości wskaźnika RQD-BGPR wykazują zbliżony przebieg do zmian wartości wskaźnika RQD.

W celu weryfikacji opracowanej klasyfikacji przyjęto 163 wartości wskaźnika RQD oraz odpowiadające im wartości obliczonych znormalizowanych średnich amplitud pochodzące z pięciu wybranych otworów. Na rysunku 6.7 zestawiono wartości znormalizowanych średnich amplitud w klasach RQD.

Można zauważyć, że dane zachowują trend wzrostu liniowego ze wzrostem wskaźnika RQD, przyjmując dość dobry współczynnik determinacji $R^2 = 0,65$. Podkreślić należy, że

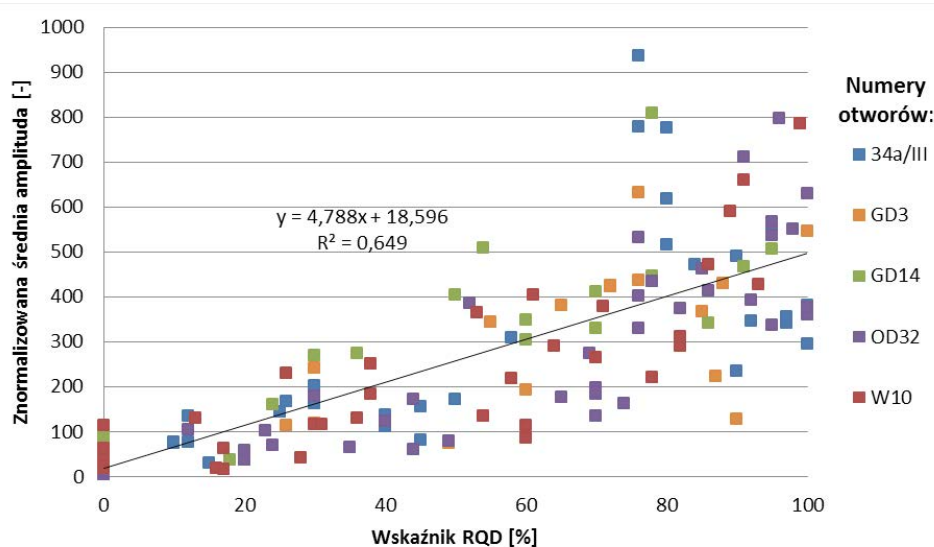


Rys. 6.6. Wartości wskaźnika RQD dla otworu W 10 oraz porównanie wartości wskaźnika RQD z uzyskanymi wartościami wskaźnika RQD-BGPR na podstawie zarejestrowanych amplitud

Fig. 6.6. RQD index value for the borehole W 10 and the comparison of the RQD index values obtained from RQD-BGPR index based on recorded amplitudes

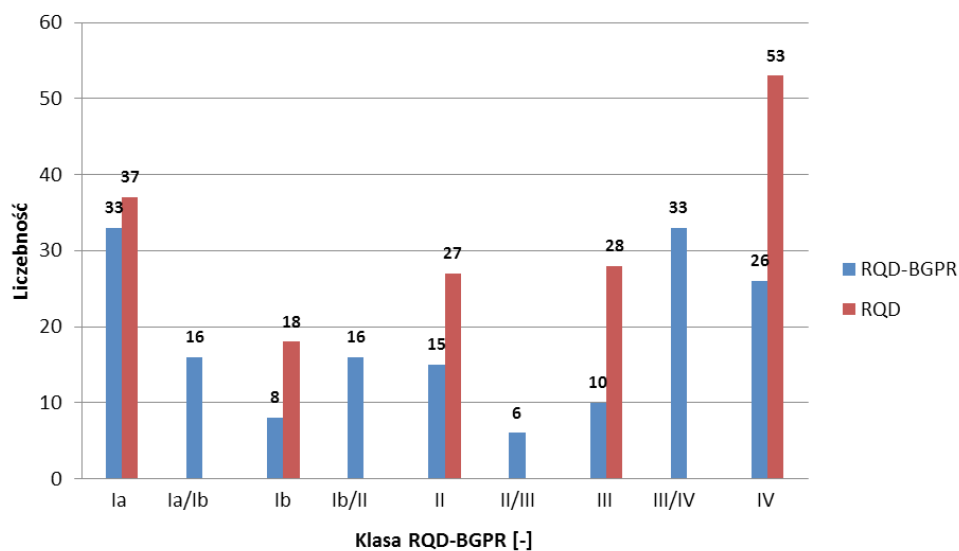
71 obliczonych wartości znormalizowanych średnich amplitud mieściło się w przedziałach przejściowych, tzn. przyjmujących wartości należące do dwóch sąsiednich klas. Najbardziej liczną była klasa Ia oraz przedział przejściowy pomiędzy klasami III/IV. Najmniej liczną okazał się przedział przejściowy pomiędzy klasami II/III oraz klasa Ib.

Na rysunku 6.8 przedstawione zostało porównanie wartości wskaźników RQD obliczonych na rdzeniach wiertniczych do wartości wskaźników RQD-BGPR w klasach RQD-BGPR. Porównanie to wskazuje, że w klasach charakteryzujących słabszy ośrodek skalny (klasy Ia, Ib i II) występuje niewielka przewaga liczności wskaźników RQD-BGPR.



Rys. 6.7. Przyporządkowanie wartości znormalizowanych średnich amplitud do wartości wskaźników RQD dla 5 otworów z rejonu niecki bytomskiej

Fig. 6.7. Assigning values of normalized average amplitude to values of RQD index for 5 boreholes in the area of Bytom Basin

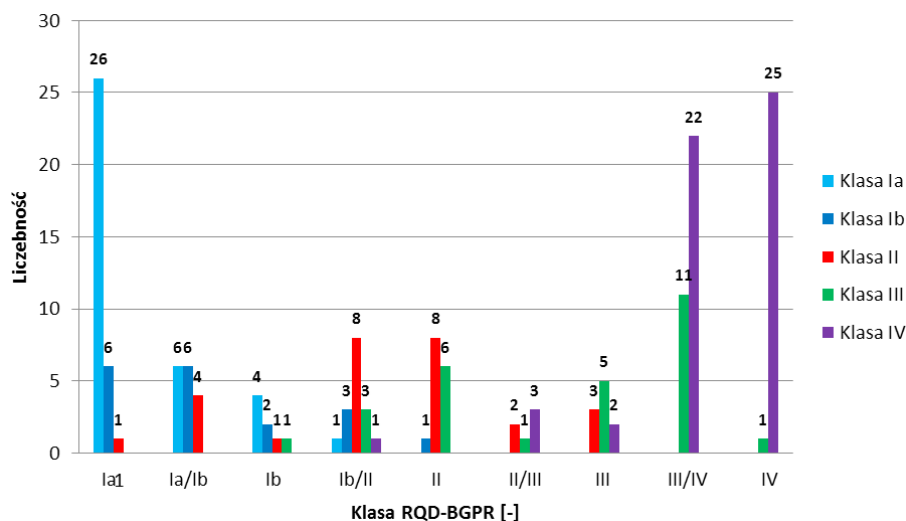


Rys. 6.8. Histogram wskaźników RQD obliczonych na rdzeniach wiertniczych i wskaźników RQD-BGPR w klasach RQD-BGPR

Fig. 6.8. Histogram of RQD index values calculated on drill cores and RQD-BGPR index values in RQD-BGPR classes

Natomiast w klasach silniejszego ośrodka (klasy III i IV) występuje niewielka przewaga liczebności wskaźników RQD. Świadczy to o tym, że klasyfikacja RQD-BGPR jest bardziej konserwatywna w porównaniu do klasyfikacji RQD, tzn. wskazuje na niewiele większe osłabienie ośrodka. Taki efekt można wytłumaczyć w pierwszej kolejności sposobem obliczenia wskaźnika RQD, który jest zbyt mało rozdzielnicy w ośrodku silniej sfragmentaryzowanym.

Rysunek 6.9 przedstawia rozkład wskaźników RQD w klasach RQD-BGPR wraz z przedziałami przejściowymi. Natomiast w tabeli 6.1 porównano procentowy udział wyników, dla których klasa RQD-BGPR była zgodna z klasą RQD. Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że największą zgodność w ocenie stopnia spełniania ośrodka skalnego uzyskano w klasie IV oraz Ia. Z kolei najmniejsza zgodność dotyczyła klasy III, która charakteryzuje się największym rozproszeniem uzyskanych wyników.



Rys. 6.9. Histogram wskaźników RQD w klasach RQD-BGPR wraz z przedziałami przejściowymi

Fig. 6.9. Histogram of RQD index in RQD-BGPR classes with the transitional classes

Tabela 6.1

Zestawienie procentowej zgodności klas RQD-BGPR i RQD w poszczególnych klasach RQD-BGPR

Table 6.1

Percentage compliance for RQD-BGPR classes with RQD in each class of RQD-BGPR

Klasa	Udział procentowy w klasach RQD-BGPR		Udział procentowy z uwzględnieniem dwóch sąsiednich klas RQD-BGPR	
Ia	32	86,49%	36	97,30%
Ib	11	66,67%	18	100,00%
II	18	66,67%	22	81,48%
III	17	60,71%	24	85,71%
IV	47	88,68%	49	92,45%

7. Zalety i ograniczenia sposobu oceny stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą otworowej metody georadarowej (na podstawie Łątki i Pileckiego 2015)

Główną zaletą przedstawionego w pracy rozwiązania jest możliwość określenia stopnia spękania ośrodka skalnego na podstawie zarejestrowanej odpowiedzi impulsowej georadaru otworowego. Ocena stopnia spękania górotworu zaproponowana przez autora pozwala na efektywną oraz szybką analizę stanu spękania ośrodka skalnego. Metoda ta nie wymaga dodatkowych nakładów związanych z pozyskaniem rdzenia wiertniczego oraz wyniki tej analizy stopnia spękania ośrodka nie są zakłócone na skutek powstawania spękań lub uszkodzeń mechanicznych, jakie tworzą się w wyniku wykonania samego otworu. Stopień spękania ośrodka jest określany w przestrzeni o kształcie pierścienia w odległości od około 1 do około 2 metrów od otworu. Dodatkowo w przeciwieństwie do metody RQD przy pomiarach georadarowych możliwe jest wydzielenie stref osłabienia lub zasięgu nienaruszonego górotworu poprzez analizę dowolnie dobranych długości odcinków.

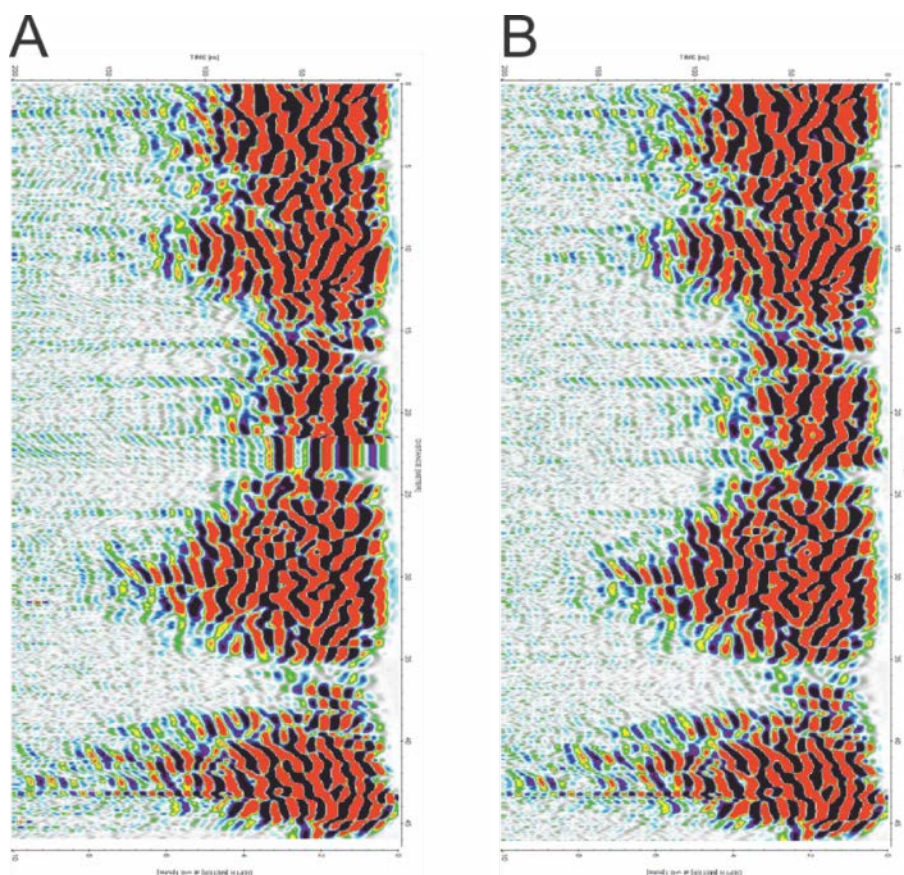
Metoda BGPR charakteryzuje się typowymi zaletami przypisanymi dla powierzchniowej metody georadarowej. Wykonywanie pomiarów georadarem otworowym jest bardzo szybkie i łatwe w przeprowadzeniu. Otwory badawcze mogą mieć niewielką średnicę ze względu na średnicę sondy georadaru i kabla transmisyjnego. Minimalną średnicą zalecaną dla sondy 100 MHz produkcji Malå GeoScience AB jest 70 mm (materiały Malå GeoScience AB).

Metoda BGPR posiada możliwość szybkiego, natychmiastowego obrazowania wyników pomiarów, lecz należy pamiętać, że jest to radarogram zniekształcony różnymi czynnikami i wymaga jeszcze zastosowania właściwych procedur przetwarzania i interpretacji. Dużą zaletą tej metody jest możliwość zastosowania analogicznych procedur jak w metodzie sejsmicznej (Annan 2001, 2002, 2003).

W metodzie georadaru otworowego stosowane są anteny o niskich częstotliwościach pozwalające na osiągnięcie dużego zasięgu penetracji. Zazwyczaj stosowane są anteny o częstotliwościach 100 MHz, co pozwala na osiągnięcie zasięgu od około 20 do 50 metrów w skałach krystalicznych, aż do kilkuset metrów w utworach solnych. Z kolei w utworach takich jak skały ilaste zasięg głębokościowy może się zmniejszyć nawet do około kilku metrów. Jednakże, w porównaniu do innych metod geofizycznych stosowanych w otworach wiertniczych zasięg penetracji georadaru jest wielokrotnie większy. Zasięg penetracji zwią-

zany jest głównie z tłumieniem fali elektromagnetycznej w ośrodku, które z kolei związane jest z jego przewodnością elektryczną oraz względną przenikalnością dielektryczną ośrodka. Oznacza to, że im więcej minerałów ilastych znajduje się w ośrodku geologicznym lub im bardziej ośrodek jest zawodniony lub spękany tym mniejszy jest zasięg radialny metody. Rozdzielczość pionowa oraz pozioma metody jest relatywnie wysoka i głównie uzależniona jest od częstotliwości środkowej zastosowanej anteny otworowej.

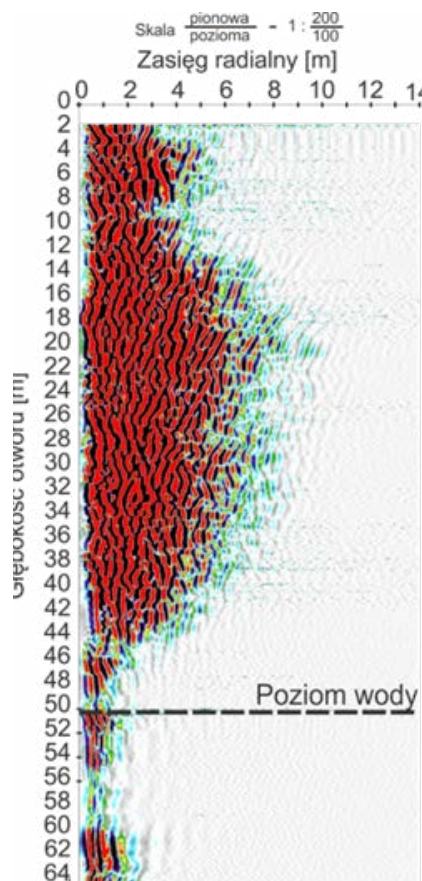
Z dotychczasowych doświadczeń autorów z badań w ośrodkach skalnych i grunto-
wych (Łątka i in. 2010; Pilecki i in. 2011, 2013; Łątka 2014) metoda BGPR charaktery-
zuje się powtarzalnością wyników. Kolejne pomiary w tym samym otworze wykonane
anteną dookólną dają niemal identyczne zobrazowania (rys. 7.1). Wyniki pomiaru przy
przesuwaniu sondy w dół otworu są identyczne jak przy przesuwaniu w górę, do po-
wierzchni terenu.



Rys. 7.1. Radarogramy z jednego otworu badawczego (A) przy przesuwaniu sondy w dół otworu (B) przy przesuwaniu sondy w górę (Łątka i Pilecki 2015)

Fig. 7.1. Radarogram from one borehole (A) when moving the probe down (B) when moving the probe up (Łątka and Pilecki 2015)

Metoda BGPR jest wrażliwa na zawodnienie w ośrodku (rys. 8.2). Radarogram w ośrodku zawodnionym jest odfiltrowany z wyższych częstotliwości, a zasięg penetracji zmniejszony. Najczęściej wejście sondy w otworze poniżej poziomu wody charakteryzuje się wyraźnym pogorszeniem rozdzielczości obrazu.

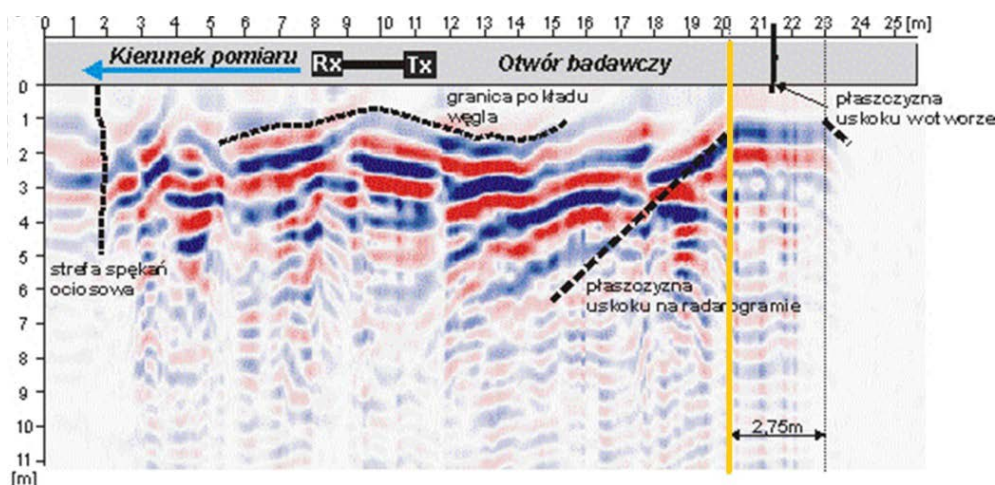


Rys. 7.2. Radarogram z otworu badawczego silnie zawodnionego poniżej 50 m z rejonu niecki bytomskiej (Łątka i Pilecki 2015)

Fig. 7.2. Radarogram from the borehole strongly watered below 50 m from the area of Bytom Basin (Łątka and Pilecki 2015)

Metoda pozwala również na czytelne wyróżnienie nieciągłości i pustek. Silny kontrast właściwości elektromagnetycznych w ośrodku, związany z nieciągłością ma wpływ na zaburzenia w propagacji fal elektromagnetycznych.

Z własnych doświadczeń (Pilecki i in. 2011) wynika, że przy przechodzeniu sondą georadarową przez strefę nieciągłą decydujący wpływ na zmiany na radarogramie ma zjawisko silnego odbicia impulsów georadarowych od powierzchni nieciągłości, które znacząco ogranicza energię impulsów dochodzących do anteny odbiorczej (rys. 7.3).



Rys. 7.3. Radarogram z otworu badawczego przy przejściu przez strefę uskoku w KWK Marcel (żółta linia zaznaczono granicę wyraźnych zmian refleksów) (Łątka i in. 2010)

Fig. 7.3. Radarogram from the borehole when passing through the fault zone in the KWK Marcel (yellow line marked the border of significant changes of reflections) (Łątka et al. 2010)

Ograniczenia metody BGPR można podzielić na:

- pomiarowe,
- przetwarzania i interpretacji danych.

Do pierwszej grupy ograniczeń należy zaliczyć konieczność specjalnego przygotowania otworu do pomiaru w ośrodku słabym. Wymaga to zainstalowania rury obsadowej z polietylenu (PE) lub polichlorku winylu (PCW), które charakteryzują się małą względną stałą dielektryczną odpowiednio około 2,5 oraz 3,5. Zastosowanie obsadowej rury plastikowej pozwala na zachowanie stateczności otworu badawczego oraz zabezpiecza antenę otworową przed trwałym zakleszczeniem w otworze. Otwór badawczy nie może być obsadzony metalową rurą lub posiadać metalowe elementy.

Konstrukcja sondy pomiarowej może mieć wpływ na charakterystykę rejestrowanego pola falowego. Fale, przy dużych kątach odbicia, odbierane są przez antenę w pozycji z dala od punktu pomiarowego (środek sondy), co może zniekształcać obraz georadarowy (Irving i Knight 2005).

Znajomość prędkości fali elektromagnetycznej w ośrodku ma istotne znaczenie do obliczenia zasięgu głębokościowego rozpoznania. Prędkość ta może być mierzona różnymi sposobami. W przypadku pomiarów na powierzchni terenu stosuje się tzw. układ WARR. W przypadku pomiarów otworowych najkorzystniej jest przyjąć prędkość z badań w podobnych warunkach.

W zakresie przetwarzania i interpretacji danych georadarowych występuje kilka podstawowych ograniczeń:

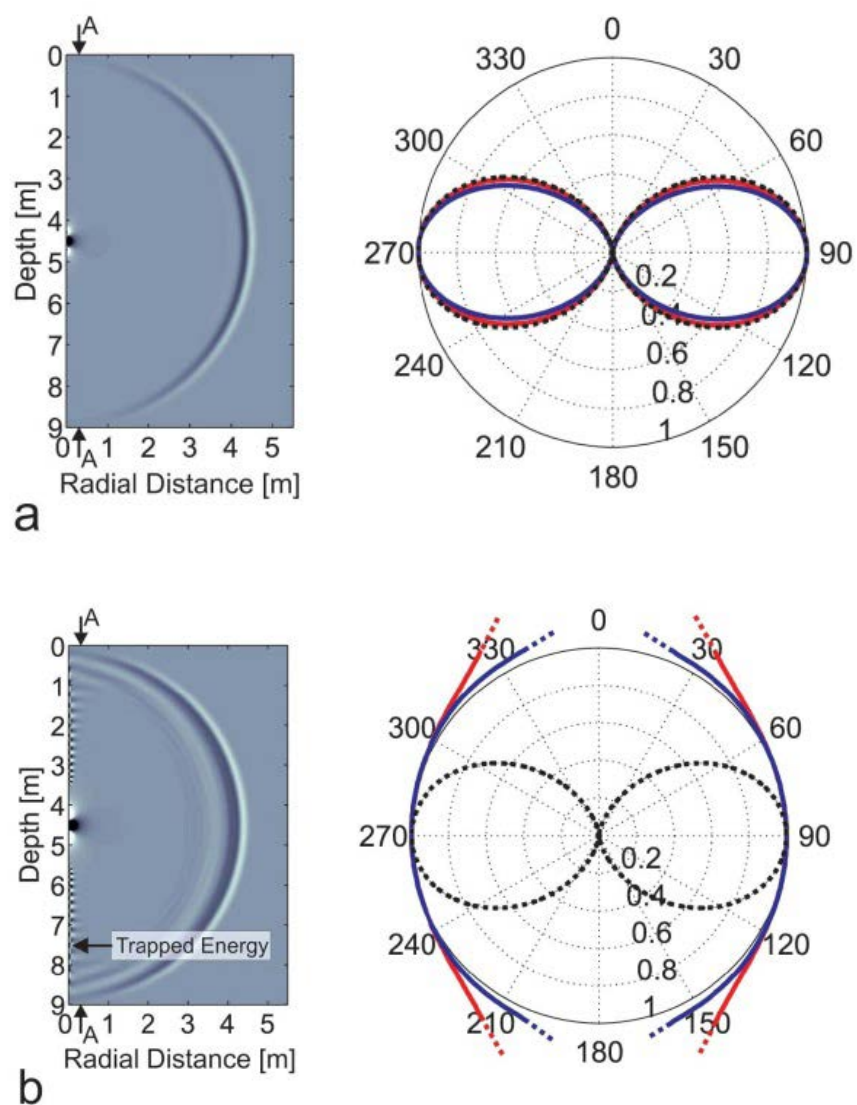
- Zarejestrowany sygnał z sondy dookólnej pochodzi z całej przestrzeni wokół otworu i jest odwzorowany na płaszczyźnie względem czasu jego rejestracji. W związku

z tym, interpretacja danych georadarowych w celu określenia położenia obiektu zaburzającego jest trudna i wymaga dużego doświadczenia w analizie radarogramów. Jednym z rozwiązań ułatwiających analizę jest wykorzystanie dodatkowego źródła informacji o ośrodku geologicznym, lub wykonanie dodatkowych badań geofizycznych (Łątka i in. 2010; Łątka 2014; Pilecki 2014).

- W analizie radarogramów powszechnie występuje zjawisko „zakrywania” sygnałów z większych odległości przez sygnały wielokrotnie odbite od bliżej położonych wyraźnych granic georadarowych. Innym przykładem bardzo często spotykanym podczas interpretacji danych georadarowych są wielokrotne odbicia np. od stropu i spągu pustek lub innych obiektów, w postaci wielokrotnych hiperbol, które mogą być zinterpretowane jako dwa niezależne obiekty.
- W przypadku profilowania synkliny, podobnie jak w sejsmice (Yilmaz 2001), może pojawić się sztuczna hiperbola sugerująca występowanie dodatkowego obiektu zaburzającego.
- W wielowarstwowym ośrodku geologicznym, użyteczne fale odbite mogą interferować z falami wielokrotnymi zniekształcając położenie zarówno pionowe, jak i poziome anomalii georadarowych (Sander i in. 1992).

Media wypełniające otwór wiertniczy (powietrze, woda lub płuczka wiertnicza) powodują zmiany w charakterystyce emitowanego oraz rejestrowanego impulsu elektromagnetycznego (Ernst i in. 2006). Na rysunku 7.4 przedstawiono porównanie wyników obliczeń numerycznych charakterystyki promieniowania fali elektromagnetycznej w ośrodku jednorodnym w otworze wiertniczym wypełnionym powietrzem (rys. 7.4a) oraz wodą (rys. 7.4b). Widać wyraźnie, że znacząca część energii w otworze zawodnionym została uwieczniona w otworze.

W odróżnieniu od badań sejsmicznych, anteny georadarowe nie muszą być w bezpośrednim kontakcie z ośrodkiem. Jednakże odległość między ścianką otworu a anteną powinna być jak najmniejsza, aby uniknąć strat energii wysyłanego impulsu.



Rys. 7.4. Porównanie charakterystyki promieniowania anteny w otworze wiertniczym wypełnionym powietrzem (a) oraz wodą (b) (Ernst i in. 2006)

Fig. 7.4. Comparison of antenna radiation in a borehole filled by air (a) and water (b) (Ernst et al. 2006)

Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy przedstawiono sposób oceny stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą metody georadaru otworowego (BGPR). Pokazano, że istnieje liniowy związek między gęstością spękań ośrodka skalnego, wyrażoną przez wskaźnik spękań RQD a wielkością znormalizowanej i uśrednionej amplitudy sygnału georadarowego. Wskaźnik RQD został obliczony na podstawie rdzeni wiertniczych. Natomiast amplituda sygnału georadarowego została pomierzona w otworach badawczych na odcinkach obliczonego wskaźnika RQD, poza strefą wpływu wykonanego otworu.

W pracy przedstawiono specjalny sposób przetwarzania i interpretacji amplitudy sygnału georadarowego (rozdział 4). Badania według tej metodyki wykonano w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej, na obszarze płytkiej eksploatacji złoża rud metali między Piekarami Śląskimi a Bytomiem. Rejon badań charakteryzował się skomplikowanymi właściwościami fizyczno-mechanicznymi ośrodka skalnego ze względu na wpływ procesu wietrzenia oraz wpływ płytkiej i głębokiej eksploatacji górniczej. Do badań, po wstępnej weryfikacji wytypowano 65 otworów badawczych o łącznej długości około 2650 mb., dla których wykonano pomiary georadarem otworowym o łącznej długości około 2400 mb. oraz wyznaczono wskaźniki stopnia spękania górotworu RQD.

Ze względu na bardzo dużą liczbę próbek sygnału, rzędu kilkuset tysięcy dla jednego otworu o głębokości około kilkudziesięciu metrów, opracowanie danych wymagało zastosowania narzędzi statystycznych. Sposób rejestracji, przetwarzania i interpretacji amplitudy sygnału georadarowego został zrealizowany w czterech podstawowych etapach:

- Etap I – rejestracja danych georadarowych na odcinkach otworu z obliczonym wskaźnikiem RQD.
- Etap II – przetwarzanie i interpretacja danych georadarowych w określonej trójwymiarowej przestrzeni wokół otworu badawczego.
- Etap III – analiza statystyczna danych georadarowych w celu wyznaczenia zależności między znormalizowaną średnią amplitudą sygnału BGPR a stopniem spękania ośrodka skalnego opisanego wskaźnikiem RQD.
- Etap IV – opracowanie klasyfikacji BGPR-RQD w charakterystycznych warunkach geologiczno-inżynierskich.

W efekcie przeprowadzonych obliczeń opracowano empiryczną klasyfikację oceny stopnia spękania ośrodka skalnego na podstawie rejestracji amplitudy sygnału georadarowego

dla warunków geologiczno-inżynierskich niecki bytomskiej. Opracowana klasyfikacja RQD-BGPR (tab. 5.8) ma ten sam zakres zmian wskaźnika jak klasyfikacja RQD, lecz charakteryzuje się modyfikacją przedziałów wewnętrznych. Połączono dwie klasy IV i V RQD w jedną wspólną klasę IV RQD-BGPR charakteryzującą ośrodek skalny o dobrej i bardzo dobrej jakości, dla której wartości wskaźnika RQD są większe niż 76%. Ponadto rozdzielono I klasę RQD na dwie klasy RQD-BGPR Ia oraz Ib w celu uszczegółowienia rozpoznania najsłabszego ośrodka skalnego. Opracowana klasyfikacja RQD-BGPR została porównana pod względem zgodności wskazań z klasyfikacją RQD dla 5 wybranych otworów badawczych. W końcowej części pracy podkreślono zalety i wady zastosowanej metody BGPR. W badaniach zastosowano georadar ProEx szwedzkiej firmy MALÅ GeoScience AB wraz z anteną otworową o częstotliwości środkowej 100 MHz.

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Opracowany sposób umożliwia ocenę stopnia spękania ośrodka skalnego otworową metodą georadarową w zakresie zmian wskaźnika RQD. Opracowana klasyfikacja RQD-BGPR może być zastosowana w warunkach geologiczno-inżynierskich niecki bytomskiej lub w warunkach zbliżonych. Natomiast opracowany sposób może być zastosowany do wyznaczenia zależności aproksymacyjnych w dowolnych warunkach geologiczno-inżynierskich ośrodka skalnego.
2. Istotną zaletą klasyfikacji RQD-BGPR jest ocena stopnia spękania ośrodka skalnego poza strefą wpływu wykonania otworu badawczego. W ten sposób ocena stopnia spękania nie jest zniekształcona spękaniami wytworzonymi w trakcie wiercenia otworu badawczego. Ponadto pomiar stopnia spękania ośrodka skalnego można wykonać w otworach odwierconych bezrdzeniowo, mniej kosztownych.
3. W badaniach georadarem otworowym, analogicznie jak w przypadku georadaru powierzchniowego istotną rolę pełni dobór częstotliwości anteny georadarowej. Opracowana klasyfikacja RQD-BGPR jest dostosowana do anteny o częstotliwości 100 MHz (prod. MALÅ GeoScience). Zastosowanie innej częstotliwości anteny wymaga ponownego obliczenia zależności korelacyjnych zgodnie z opracowaną metodyką.
4. Ważnym zagadnieniem w posługiwaniu się klasyfikacją RQD-BGPR jest pomiar wartości tzw. jednostki umownej dla obliczenia znormalizowanej średniej amplitudy. Zastosowanie innej aparatury badawczej od użytej w badaniach przedstawionych w rozprawie wymaga wprowadzenia współczynnika korygującego wskazania.
5. Obliczenia wskaźnika RQD dla potrzeb korelacji z danymi georadarowymi wymagają przyjęcia niezmiennej metodyki jego wyznaczania. Obliczenia wskaźnika powinny być wykonane przez jednego interpretatora.
6. Metoda BGPR ma liczne zalety, lecz należy mieć na uwadze jej ograniczenia w zakresie pomiarów, przetwarzania i interpretacji danych georadarowych szerzej omówionych w rozdziale 7.

Przedstawione rozwiązanie badawcze ma znaczenie poznawcze, gdyż uściśla wiedzę o ocenie stopnia spękania ośrodka, a także ma istotne znaczenie aplikacyjne w projektowa-

niu posadowienia obiektów budowlanych w skomplikowanych warunkach geologiczno-inżynierskich. Sposób ten może znaleźć zastosowanie w zagadnieniach górniczych do oceny stopnia zniszczenia górotworu w miejscach dostępnych otworami wiertniczymi.

Dalsze badania związane z opracowanym sposobem przedstawionym w niniejszej monografii należałoby ukierunkować na weryfikację klasyfikacji RQD-BGPR w warunkach zbliżonych do występujących w rejonie badań. Interesującym zagadnieniem badawczym byłaby weryfikacja klasyfikacji RQD-BGPR w warunkach fliszu karpackiego lub opracowanie dla tego ośrodka własnej klasyfikacji RQD-BGPR. Może to mieć duże znaczenie ze względu na projektowanie różnych wielkopowierzchniowych obiektów budowlanych typu tuneli, zbiorników wodnych, obwałowań itp. w Karpatach fliszowych.

Literatura

- Afrouz A.A., 1992 – Practical Handbook of Rock Mass Classification Systems and Models of Ground Failure. London: CRC Press.
- Annan A.P., 2001 – Ground Penetrating Radar. Workshop Notes, Sensor and Software, Ontario.
- Annan A.P., 2002 – Subsurface Sensing Technologies and Applications. 3, No. 4, s. 253–270.
- Annan A.P., 2003 – Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications. Sensors & Software Inc. Technical Paper.
- Annan A.P., 2005 – Ground penetrating radar. [W:] D. K. Butler: Near-surface geophysics SEG, s. 357–438.
- Annan A.P., Davis J.L., 1977 – Radar range analysis for geological material. Report of Activities, Part B. Geological Survey of Canada, Paper 77-1B, s. 117–124.
- 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, s. 133–144.
- Barton N.R., Lien R., Lunde J., 1974 – Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics 6, s. 189–239.
- Bently J.O., 1928 – Airplane altitude indicating system. US Patents 2011392.
- Bestyński Z., 1997 – Ocena właściwości geotechnicznych fliszu karpackiego na podstawie badań geofizycznych. Praca doktorska, AGH, Kraków.
- Bieniawski Z.T., 1989 – Engineering rock mass classification. Wiley, New York.
- Borchert O., 2008 – Receiver Design for a Directional Borehole Radar System. Doctoral dissertation, Department of Electrical, Information and Media Engineering of the Bergische Universität in Wuppertal.
- Bristow C., Jol H., 2003 – Ground penetrating radar in sediments. Geological Society of London.
- Brown L., 1999 – A radar history of World War II: Technical and military imperatives. Taylor & Francis, London.
- Cardarelli E., Marrone C., Orlando L., 2003 – Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods. Journal of Applied Geophysics 52, s. 93–102.
- Chang H.T., 1986 – A downhole system for fracture detection. Geothermal Resources Council, Transactions 10, s. 217–222.
- Chang P., Alumbaugh D., Brainard J., Hall L., 2006 – Cross-borehole ground-penetrating radar for monitoring and imaging solute transport within the vadose zone. Water Resources Research 42, W10413.

- Charlton M.B., 2008 – Principles of ground-penetrating radar for soil moisture assessment. MBCharlton.com Research Note 3.
- Choy T.C., 1999 – Effective medium theory: Principles and applications. Clarendon Press, Oxford.
- Conyers L., Goodman D., 1997 – Ground-penetrating radar: An introduction for archaeologists. Alta-Mira Press. Walnut Creek, London and New Delhi.
- Cook J.C., 1973 – Radar exploration through rock in advance of mining. Transactions of the Society of Mining Engineers, AIME 254, s. 140–146.
- Cook J.C., 1977 – Borehole-radar exploration in a coal seam. Geophysics 42, s. 1254–1257.
- Dadlez R., Jaroszewski W., 1994 – Tektonika. Warszawa: Wydawnictwo PWN.
- Daniels D.J. eds, 2004 – Ground penetrating radar, 2nd ed. Institution of Engineering and Technology, London.
- Davis J.L., Annan A.P., 1989 – Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting 37, s. 531–551.
- Deere D.U., Deere D.W., 1988 – The rock quality designation (RQD) index in practice. [W:] Rock classification systems for engineering purposes, ed. L. Kirkaldie, ASTM Special Publication 984, 91–101. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Deere D.U., Hendron A.J., Patton F.D., Cording E.J., 1967 – Design of surface and near surface construction in rock. Proceedings of the 8th US Symposium on Rock Mechanics, New York, s. 237–302.
- Dennis J.G., 1987 – Structural geology: an introduction. Wm C. Brown Publishers, Dubuque.
- Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla projektu budowy autostrady A1 od Węzła Piekary Śl. do Węzła Maciejów, odcinek km 490 + 427 – km 510 + 530 = km 510 + 502,82. Geoprojekt Śląsk, wrzesień 2007.
- Dokumentacja końcowa z prac uzdatniających podłoże autostrady A-1 na odcinku od Węzła Piekary Śląskie do Węzła Maciejów km 490+427 do 510+530. Katowice, listopad 2011.
- Drewniak R., 1980 – Karbońska niecka bytomska – jej kształt i regionalny zasięg. Wiadomości Górnicze 8–9, s. 225–229.
- Dubiński J., 1989 – Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górnictwymi w kopalniach węgla kamiennego. Prace Głównego Instytutu Górniczego, seria dodatkowa.
- Dubiński J., Konopko W., 2000 – Tąpnięcia: ocena, prognoza, zwalczanie. Katowice: GIG.
- Ekiert F., Gałkiewicz T., 1960 – Śląsko-krakowskie złoża rud cynku i ołowiu. [W:] R. Krajewski red. Geologia złóż surowców mineralnych Polski, surowce metaliczne. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego (bez numeru), s. 276–299.
- Ernst J.R., Holliger K., Maurer H., Green A.G., 2006 – Realistic FDTD modeling of borehole georadar antenna radiation: Methodology and application: Near Surface Geophysics 4, s. 19–30.
- Ernst J.R., 2007 – 2-D finite-difference time-domain full-waveform inversion of crosshole georadar data. Doctoral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Fisher E., McMechan G.A., Annan A.P., 1992 – Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating radar data. Geophysics 57, 495 s.
- Fredrikson O.A., Fossati F.N., Robert F.A., 1969 – Helical antenna for irradiating an earth formation penetrated by borehole and method of using same. US Patent No. 3,449,657.
- Greenfield R.J., 1988 – Modeling of electromagnetic propagation between boreholes. Proceedings of the 3rd Technical Symposium on Tunnel Detection, s. 156–172.

- Gruszczyk H., 1956 – Uwagi w sprawie wykształcenia morskich utworów triasu śląsko-krakowskiego. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 107.
- Haeni F.P., Halleux L., Johnson C.D., Lane J.W.Jr., 2002 – Detection and mapping of fractures and cavities using borehole radar. [W:] *Fractured Rock*. Denver, Colorado, Proceedings: Westerville, Ohio, National Ground Water Association.
- Hobbs B.E., Means W.D., Williams P.F., 1976 – *An outline of structural geology*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F., 1995 – *Support of underground excavation in hard rock*. Balkema, Rotterdam.
- Hollmann M., 2001 – Christian Hülsmeier, the inventor. [Online] Dostępne w: www.radarworld.org/huelsmeyer.html [Dostęp: 1.06.2016].
- Holser W.T., Brown J.J.S., Roberts F.A., Frederikson O.A., Unterberger R.R., 1972 – Radar Logging of a salt dome. *Geophysics* Vol. 37, No. 5, s. 889–906.
- Hsi-Tien C., 1989 – Borehole directional radar system for geological mapping. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 51, s. 819–828.
- Hülsenbeck & Co., 1926 – Verfahren zur elektrischen Bodenerforschung. German Patents DE 489434.
- Hülsmeier C., 1904 – Hertzian-wave projecting and receiving apparatus adapted to indicate or give warning of the presence of a metallic body, such as a ship or a train, in the line of projection of such waves. German Patent DE 165 546.
- Irving, J., Knight R., 2006 – Numerical simulation of antenna transmission and reception for crosshole ground-penetrating radar. *Geophysics* 71, No. 2, s. 37–45.
- ISRM, 1978 – Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanic Abstr.* Vol. 16, s. 135–140.
- Jol H.M., 2009 – *Ground penetrating radar theory and applications*. Elsevier Science, Amsterdam.
- Karczewski J., 2007 – *Zarys metody georadarowej*. Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH.
- Karczewski J., Ortyl Ł., Pasternak M., 2011 – *Zarys metody georadarowej, wydanie drugie poprawione i rozszerzone*. Kraków: Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH.
- Kidybiński A., 1982 – *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- Kirsch R., 2006 – *Groundwater geophysics a tool for hydrogeology*. Berlin: Springer-Verlag.
- Kleczkowski A.S., 1990 – *Mapa obszarów Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony w skali 1:500 000*. AGH, Kraków.
- Kropka J., Kowalczyk A., Rubin K., 1998 – *Mapa hydrogeologiczna Polski, skala 1:50 000, ark. Bytom*. Warszawa: Centralne Archiwum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego.
- Książkiewicz M., 1972 – *Geologia dynamiczna*. Warszawa: Wyd. Geologiczne.
- Lane J.W., Haeni F.P., Placzek G., Wright D.L., 1996 – Use of borehole-radar methods to detect a saline tracer in fractured crystalline bedrock at Mirror Lake. Grafton County, New Hampshire, USA. *Proceedings of the Sixth International Conference on Ground-Penetrating Radar (GPR'96)*, Sendai, s. 185–190.
- Liszkowski J., Stochlak J., 1976 – *Szczelinowatość masywów skalnych*. Warszawa: Wydawnictwo Geologiczne.

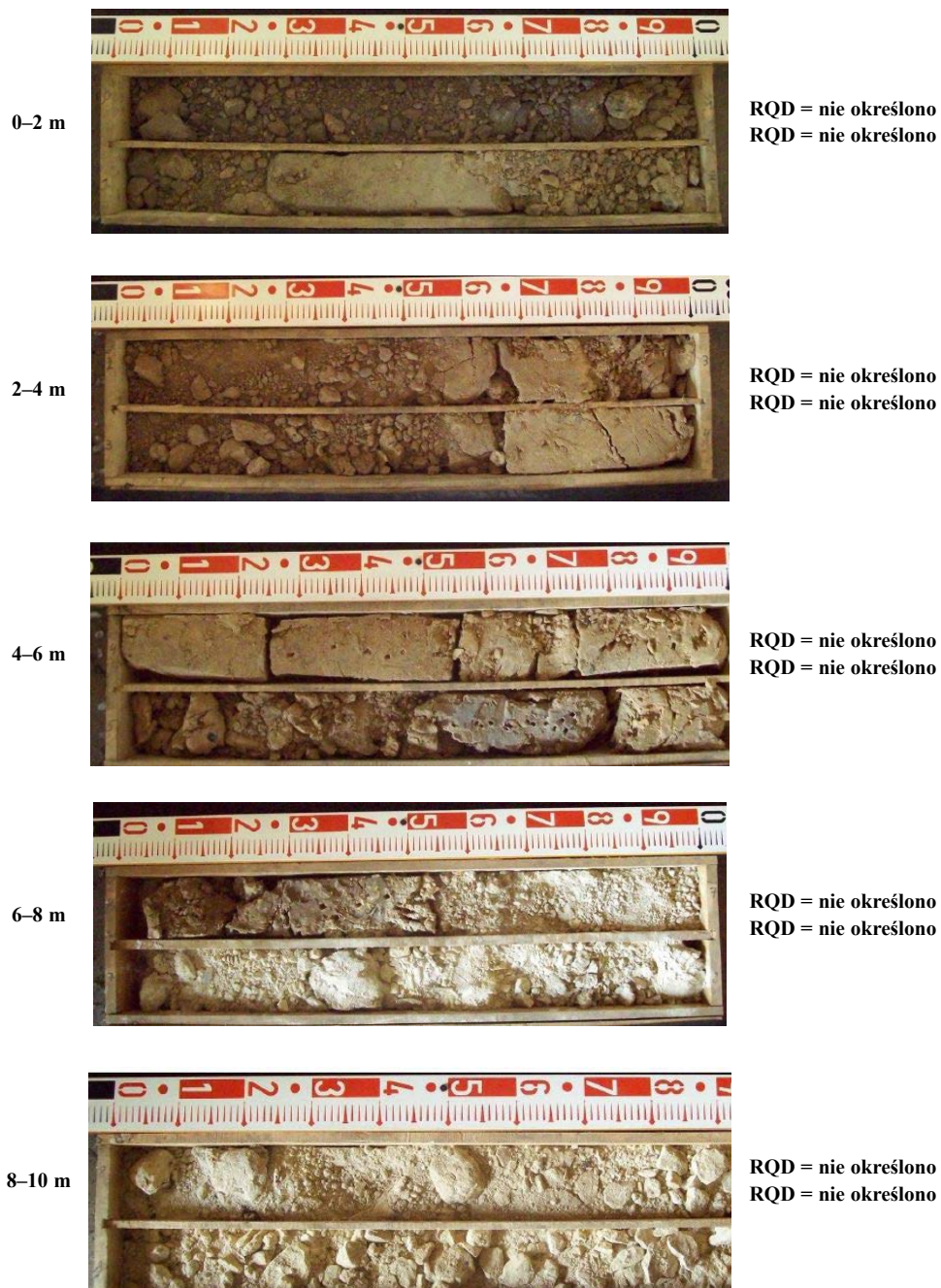
- Löwy H., 1910 – Eine elektrodynamische Methode zur Erforschung des Erdinneren. *Physikalische Zeitschrift* 11, s. 697–705.
- Łątka T., Czarny R., Krawiec K., Kudyk M., Pilecki Z., 2010 – Eksperymentalne badania położenia nieciągłości, pustek i stref rozluźnień w górotworze za pomocą georadaru otworowego, *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk* 77, Kraków, s. 67–75.
- Łątka T., 2014 – Zastosowanie georadaru otworowego do poprawy skuteczności prac uzdatniających podłoża autostrady A-1 na terenach płytkiej eksploatacji rud metali, *Miesięcznik Wyższego Urzędu Górniczego w Katowicach* 2014 06/2014, s. 43–48.
- Łątka T., Pilecki Z., 2015 – Zalety i ograniczenia otworowej metody georadarowej w badaniach geoinżynierskich. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk* 89, Kraków, s. 19–31.
- Mapa historycznej eksploatacji rud metali: Karte Oberschlesischen Erzbergbauers – Herausgegeben von dem Königlichen Oberbergamt zu Breslau In den Jahren 1911–1912 – skala 1: 10 000.
- Marcak H., 1993 – Zmiany własności geofizycznych ośrodka skalnego wokół skupionego zaburzenia naprężeń. *Zesz. Nauk. AGH, Geofizyka Stosowana* 13, s. 25–37.
- Marcak H., 1998 – Zmiany własności elektrycznych i sejsmicznych górotworu poddanego naprężeniom. *Materiały XXI Zimowej Szkoły Mechaniki Górotworu, Zakopane*.
- Materiały informacyjne firmy Malå GeoScience AB.
- Materiały informacyjne firmy Sensor and Software Inc.
- Milton G.W., 2002 – *The theory of composites*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Morawski T., Gwarek W., 1985 – *Teoria pola elektromagnetycznego*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne.
- Mundry E., Sender F., Thierbach R., Weichart H., 1983 – Borehole radar probing in salt deposits. *Proceedings of the 6th International Symposium on Salt, The Salt Institute*, s. 585–599.
- Nickel H., Sender F., Thierbach R., Weichart H., 1983 – Exploring the interior of salt domes from boreholes. *Geophysical Prospecting* 31, No. 1, s. 131–148.
- Nieć M., 1990 – *Geologia kopalniana*. Warszawa: Wyd. Geologiczne.
- Niva B., Olsson O., Blueming P., 1988 – Radar cross hole tomography with application to migration of saline tracer through fracture zones, Grimsel Test Site. *Swiss National Cooperative for the Storage of Nuclear Waste (NAGRA) Technical Report*, s. 88–31.
- Noon D.A., Stickley G.F., Longstaff D., 1998 – A frequency-independent characterisation of GPR penetration and resolution performance. *Journal of Applied Geophysics* 40, No. 1–3, s. 127–137.
- Olhoeft G.R., 1987 – Electrical properties from 10⁻³ to 10⁺⁹ Hz — Physics and chemistry. *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Physics and Chemistry of Porous Media, American Institute of Physics*, s. 281–298.
- Olhoeft G.R., 1988 – Interpretation of hole-to-hole radar measurements. *Proceedings of the 3rd Technical Symposium on Tunnel Detection*, s. 616–629.
- Olhoeft G.R., Capron D.E., 1994 – Petrophysical causes of electromagnetic dispersion. *Proceedings of the 5th International Conference on Ground Penetrating Radar*, s. 145–152.
- Olsson O., Falk L., Forslund O., Lundmark L., Sandberg E., 1992 – Borehole radar applied to the characterization of hydraulically conductive fracture-zones in crystalline rock. *Geophysical Prospecting* 40, No. 2, s. 109–142.

- Olsson O., Sandberg E., Forslund O., Lundmark L., Falk L., 1985 – The mapping of fracture zones by borehole radar. *Geoexploration* 23, No. 3. s. 427–428.
- Önorm EN ISO 14689, 2001 – Geotechnical engineering – Identification and description of rock.
- Owen T.E., Suhler S.E., 1982 – Borehole directional radar detection of subsurface cavities. *Geophysics* 47, s. 416–416.
- Paczyński B., 1993 – Atlas hydrogeologiczny Polski 1:500 000. Cz. I. Systemy zwykłych wód podziemnych. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Palmström A., 1974 – Characterization of jointing density and the quality of rock masses. Internal report, A.B. Berdal.
- Pazdro Z., 1964 – Hydrogeologia ogólna. Warszawa: Wyd. Geologiczne.
- Piermjakow J.N., 1949 – Tiektoničeskaja trieszczinowatost Russkoj platformy. Moskiew. Obszcz. Isp. Priir.
- Pilecki Z., 2002 – Wyznaczanie parametrów górotworu na podstawie klasyfikacji geotechnicznych. Kraków, Wyd. Drukrol.
- Pilecki Z., Baluch K., Łątka T., Czarny R., Krawiec K., 2011 – Nowe możliwości rozpoznania nieciągłości w pokładzie węgla za pomocą georadaru otworowego. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa. Górnictwo i Środowisko. Górnice Zagrożenia Naturalne* 2011 4/2/2011.
- Pilecki Z., Laskowski M., Hryciuk A., Pilecka E., Czarny R., Wróbel J., Koziarz E., Krawiec K., 2013 – Identification of gaso–geodynamic zones in the structure of copper ore deposits using geophysical methods. *Canadian Institute of Mining Journal* Vol. 5, No. 3, s. 194–202.
- Pilecki Z., 2014 – Uzdatnienie podłoża autostrady A-1 na terenach pogórnich płytkiej eksploatacji rud metali, Studoa, Rozprawy, Monografie 184, Kraków: Wydawnictwo IGSMiE PAN.
- Pilecki Z., Harba P., Krawiec K., Czarny R., Chamarczuk M., Pilecka E., Łątka T., 2016 – Charakterystyczne cechy radarogramów w badaniach georadarowych górotworu wokół podziemnego wyrobiska górniczego. *Przegląd Górniczy* (w druku).
- Piwowski W., Żeglicki J., 1977 – Charakterystyka złóż w rejonie bytomskim. [W:] Charakterystyka rud cynku i ołowiu na obszarze śląsko-krakowskim, red. J. Pawłowska, Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- Priest S.D., Hudson J.A., 1976 – Discontinuity Spacings in Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 13, s. 135–148.
- Pszonka J., 2007 – Charakterystyka zagrożenia zapadliskowego w niecce bytomskiej na terenach historycznej eksploatacji rud metali w świetle warunków geologicznych i górniczych. *Materiały Warsztatów z cyklu: Zagrożenia naturalne w górnictwie*, Ślesin, s. 117–136.
- Reflex-Win, 2013 – REFLEXW guide Sandmeier geophysical software.
- Romana M., 1985 – New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics*, s. 49–53.
- Rózkowski A., Chmura A., Siemiński A., 1997 – Użytkowe wody podziemne Górnośląskiego Zagłębia Węglowego i jego obrzeżenia. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny.
- Sander K.A., Olhoeft G.R., Lucius J.E., 1992 – Surface and borehole radar monitoring of a DNAPL spill in 3D versus frequency, look angle and time. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems SAGEEP*, s. 455–469.
- Sihvola A., 1999 – Electromagnetic mixing formulas and applications. IEE Electromagnetic Waves Series, The Institute of Electrical Engineers, London.

- Singh B., Goel R.K., 1999 – Rock Mass Classification – A Practical Approach in Civil Engineering, Elsevier Science, U.K.
- Sjögren B., Ofsthus A., Sandberg J., 1979 – Seismic classification of rock mass qualities. *Geophysical Prospecting* 27, s. 409–422.
- Skolnik M.I., 1990 – Radar handbook. 2d ed. McGraw-Hill, New York.
- Slob E., Sato M., Olhoeft G., 2010 – Surface and borehole ground-penetrating-radar developments. *Geophysics* 75, s. 103–120.
- Smith J.W., 1997 – Simple linear inline field arrays may save the day for 3-D direct-arrival noise rejection. *Proceedings, SEG Summer Research Workshop*.
- Stern W., 1929 – Versuch einer elektrodynamischen Dickenmessung von Gletschereis: Beitrage zur Geophysik 23, s. 292–333.
- Suhler S.A., Owen T.E., Hipp J.E., Peters W.R., 1978 – Development of a Deep Penetrating Borehole Geophysical Technique for Predicting Hazards Ahead of Coal Mining. Contract H0252033, Southwest Research Institute, BuMines OFH 77-80, NTIS PB 80-208614.
- Suhler S.A., Owen T.E., 1983 – Field Demonstration of Deep-Penetrating Geophysical Techniques. Contract H0212018, Southwest Research Insitute. Draft final report, U.S. Bureau of Mines, Denver, Colorado.
- Szóstka J., 2001 – Fale i anteny. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.
- Smiechow J.M., 1974 – Teoreticzeskije i mietodiczeskije osnovy poiskow treszczinnych kolektorow нефти i gaza. Nedra, Leningrad.
- Tarantalo P.J.Jr., Unterberger R.R., 1978 – Radar Detection of Boreholes in Advance of Mining (Rock Salt). *Geophysical Prospecting* Vol. 26, No. 2, s. 359–382.
- Thiel K., 1980 – Mechanika skał w inżynierii wodnej. Warszawa: PWN.
- Thiel K., 1989 – Rock mechanics in hydroengineering. PWN – Elsevier, Warszawa–Amsterdam.
- van Dam R.L., Schlager W., 2000 – Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimento-logical analysis. *Sedimentology* 47, s. 435–449.
- van Dam R.L., Schlager W., Dekkers M.J., Huisman J.A., 2002 – Iron oxides as a cause of GPR reflections. *Geophysics* 67, s. 536–545.
- Vogt D., 2006 – A borehole radar system for South African gold and platinum mines. *South African Journal of Geology* 109, s. 521–552.
- Vogt D., Van Schoor M., Du Pisani P., 2005 – The application of radar techniques for in-mine feature mapping in the Bushveld Complex of South Africa. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 105, s. 391–400.
- von Hippel A.R., 1954 – Dielectrics and waves. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Williams T., 2008 – Image and fracture analysis. *Well Logging Principles and Applications: Borehole Image Analysis*. Borehole Research Group, LDEO, New York.
- Yelf R.J., 2007 – Application of Ground Penetrating Radar to Civil and Geotechnical Engineering. *Electromagnetic Phenomena* Vol. 7, No. 1 (18).
- Yilmaz O., 2001 – Seismic data analysis. 2nd ed.: SEG.
- Zajac C., 2012 – Miernictwo Górnicze. Katowice: Wydawnictwo Naukowe Śląsk.

Załącznik 1 – Rdzenie z otworu wiertniczego OD 32

Rdzenie z otworu wiertniczego OD 32



110

10–12 m



RQD = 0%
RQD = 65%

12–14 m



RQD = 42%
RQD = 40%

14–16 m



RQD = 23%
RQD = 88%

16–18 m



RQD = 76%
RQD = 92%

18–20 m



RQD = 86%
RQD = 70%

20–22 m



RQD = 44%
RQD = 18%

22–24 m



RQD = 28%
RQD = 0%

24–26 m



RQD = 77%
RQD = 100%

26–28 m



RQD = 98%
RQD = 70%

28–30 m



RQD = 72%
RQD = 26%

112

30–32 m



RQD = 0%
RQD = 70%

32–34 m



RQD = 60%
RQD = 40%

34–36 m



RQD = 44%
RQD = 65%

36–38 m



RQD = 30%
RQD = 69%

38–40 m



RQD = 82%
RQD = 74%

40–42 m



RQD = 95%
RQD = 96%

42–44 m



RQD = 91%
RQD = 95%

44–46 m



RQD = 100%
RQD = 100%

46–48 m



RQD = 95%
RQD = 72%

48–50 m



RQD = 85 %
RQD = 88 %

Załącznik 2 – Podstawowe dane z otworów wiertniczych przyjęte do opracowania klasyfikacji RQD-BGPR

Przykłady podstawowych danych z otworów wiertniczych przyjętych do opracowania klasyfikacji RQD-BGPR

Miejscowość: Bytom		OTWÓR NR 31/III				
		Współrzędne:		X – 881954,70	Y – 234433,90	
		Kilometraż:		490+460		
		Długość otworu:		46 m		
Warunki terenowe pomiaru: pokrywa śnieżna grubości 10 cm, temperatura powietrza –1°C, pełne zachmurzenie.						
Długość profilu w otworze:				43,0	m	
Głębokość poziomu wody:				–	m	
Nazwy plików z rejestracją i parametrami pomiaru:				OIII_P31.rd3 OIII_P31.rad		
Głębokość [m]	RQD [%]	Opis litologiczny	Głębokość [m]	RQD [%]	Opis litologiczny	
0–1	–	Gleba humusowa	28–29	58	Dolomit szarobeżowy, zbity, miejscami mikroporowaty, w spągu 0,5 m rumoszu dolomitowego barwy żółtobrazowej	
1–2	–	Zwietrzelina marglistą szaro-beżowa z gniazdem, żółto-rdzawym na gł. od 3,8–4 m	29–30	95		
2–3	–		30–31	77		
3–4	–		31–32	60		
4–5	–		32–33	60		
5–6	–		33–34	91		
6–7	10	Rumosz zwietrzelinowy dolomitowy, żółtobrunatny. W stropowej części małe uzyski rdzenia. Dolomit posiada makropory oraz często jamki (wżery) o średnicy max. do 2 cm	34–35	65		
7–8	10		35–36	66		
8–9	20		36–37	38		
9–10	24		37–38	76		
10–11	0		38–39	12		
11–12	30		39–40	18	Rumosz dolomitowy, rdzawy i ciemno-brunatny z widocznymi sporadycznie dendrytami manganowymi	
12–13	39		40–41	0		
13–14	17		41–42	0		
14–15	30		42–43	12	Rumosz dolomitowy, szarobrazowy z dendrytami manganowymi	
15–16	12		43–44	17		
16–17	0		44–45	24		
17–18	0		Dolomit szarobeżowy, zbity, miejscami mikroporowaty	45–46	0	
18–19	24					
19–20	11					
20–21	0					
21–22	0					
22–23	15					
23–24	60					
24–25	57					
25–26	78					
26–27	77					
27–28	54					

Miejscowość: Bytom		OTWÓR NR 33/III						
		Współrzędne:		X – 881936,30	Y – 234401,80			
		Kilometraż:		490+492				
		Długość otworu:		50 m				
Warunki terenowe pomiaru: temperatura powietrza 8°C, pełne zachmurzenie z lokalnymi przejaśnieniami								
Długość profilu w otworze:				45,6	m			
Głębokość poziomu wody:				–	m			
Nazwy plików z rejestracją i parametrami pomiaru:				OIII_P33.rd3 OIII_P33.rad				
Głębokość [m]	RQD [%]	Opis litologiczny	Głębokość [m]	RQD [%]	Opis litologiczny			
0–1	–	Gleba	28–29	34	j. w.			
1–2	–	Bardzo słabo zwięzłe margle (mączaste) sporadycznie z odmianami bardziej zwięzłych oraz z niewielkimi gniazdami kalcytu. Barwa od beżowej (strop) do szarobrazowej (spąg)	29–30	42	Dolomit barwy ochry, szczelinowaty z kilkoma strefami druzgotu o miąższości do 30 cm			
2–3	–		30–31	28				
3–4	–		31–32	40				
4–5	–		32–33	20				
5–6	–		33–34	35				
6–7	–		34–35	42				
7–8	–		35–36	48				
8–9	–		36–37	100				
9–10	–		37–38	95				
10–11	–		38–39	97				
11–12	–	j. w. tylko barwy ochry (żółtobrazowy) z większą ilością frakcji piaskowej	39–40	20	Dolomit barwy ochry. Pustki 2–3 cm od 45,4 m do 50 m			
12–13	–		40–41	63				
13–14	–		41–42	72				
14–15	–		42–43	95				
15–16	–		43–44	74				
16–17	–		44–45	91				
17–18	–		45–46	34				
18–19	–		46–47	44				
19–20	–		47–48	0				
20–21	–		48–49	10				
21–22	11	Druzgot dolomitu	49–50	53				
22–23	45	Dolomit barwy ochry, zbity, kawernisty						
23–24	43							
24–25	10	Dolomit barwy ochry z licznymi przerostami materiału pylasto-ilastego						
25–26	15							
26–27	20							
27–28	35							

Miejscowość: Bytom		OTWÓR NR 34/III			
		Współrzędne:	X – 881939,90	Y – 234323,50	
		Kilometraż:	490+570		
		Długość otworu:	50 m		
Warunki terenowe pomiaru: pokrywa śnieżna grubości 10 cm, temperatura powietrza –4°C, pełne zachmurzenie					
Długość profilu w otworze:			47,5	m	
Głębokość poziomu wody:			–	m	
Nazwy plików z rejestracją i parametrami pomiaru:			OIII_P34.rd3 OIII_P34.rad		
Głębokość [m]	RQD [%]	Opis litologiczny	Głębokość [m]	RQD [%]	Opis litologiczny
0–1	–	Gleba i drobny piasek	28–29	0	Rumosz dolomitowy szaro- żółto-brązowy
1–2	–	Zwietrzelnina wapienia z przerostami ilastymi	29–30	12	
2–3	–		30–31	13	
3–4	–	Rumosz dolomitu jasnoszarego	31–32	17	Margiel dolomityczny z przerostami dolomitu
4–5	–		32–33	45	
5–6	–			33–34	22
6–7	40	Dolomit makroporowaty, szarożółty, pasemkowaty, silnie szczelinowaty	34–35	0	
7–8	10		35–36	38	Dolomit szarożółty, zbity, szczelinowaty i kawernisty. Pustka na gł. 46,28–46,40 m
8–9	60		36–37	70	
9–10	35		37–38	57	
10–11	62		38–39	90	
11–12	10	39–40	98		
12–13	15	40–41	51		
13–14	10	41–42	26		
14–15	0	42–43	45		
15–16	0	43–44	38		
16–17	0	44–45	56		
17–18	0	45–46	72		
18–19	12	46–47	84		
19–20	34	47–48	90		
20–21	0	48–49	74		
21–22	84	Dolomit kawernisty	49–50	48	
22–23	26	Rumosz dolomitowy szaro-żółto- brązowy			
23–24	27				
24–25	46				
25–26	15				
26–27	13	II zwietrzelinowy rdzawy			
27–28	16				

Miejscowość: Bytom		OTWÓR NR 34c/III			
		Współrzędne:		X – 881959,90	Y – 234304,65
		Kilometraż:		491+180	
		Długość otworu:		55,5 m	
Warunki terenowe pomiaru: temperatura powietrza +13°C, zachmurzenie całkowite					
Długość profilu w otworze:				51,9	m
Głębokość poziomu wody:				–	m
Nazwy plików z rejestracją i parametrami pomiaru:				OIII_P34c.rd3 OIII_P34c.rad	
Głębokość [m]	RQD [%]	Opis litologiczny	Głębokość [m]	RQD [%]	Opis litologiczny
0–1	–	Piasek drobny	28–29	26	j. w.
1–2	–	Zwietrzelnina margla szaro-beżowego z przerostami wapieni max. do 15 cm	29–30	15	
2–3	–		30–31	55	
3–4	–		31–32	92	
4–5	–		32–33	100	
5–6	–		33–34	85	
6–7	–		34–35	60	
7–8	–		35–36	80	
8–9	–		36–37	90	
9–10	–		37–38	94	
10–11	34	Wapień jamisty brunatny, spękany z przewarstwieniami zwietrzałych margli szarozółtych max. do 1,6 m	38–39	58	Dolomit wapnisty szarobeżowy ze strefami druzgotu
11–12	37		39–40	45	
12–13	0		40–41	35	
13–14	24		41–42	60	Wapień brunatny, spękany
14–15	0		42–43	35	
15–16	15		43–44	92	
16–17	40		44–45	42	
17–18	30	Pustka	45–46	65	
18–19	0	Druzgot dolomitu wapnistego, żółtobrazowy	46–47	45	
19–20	12		47–48	55	
20–21	15		48–49	58	
21–22	52		49–50	55	
22–23	53	Dolomit wapnisty żółtobeżowy, spękany, sporadycznie silnie spękany	50–51	76	
23–24	40		51–52	24	
24–25	90		52–53	14	
25–26	26		53–54	40	
26–27	70		54–55	40	
27–28	15		55–56	–	

Metoda oceny stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą georadaru otworowego

Streszczenie

Głównym celem pracy jest ilościowa ocena stopnia spękania ośrodka skalnego za pomocą otworowej metody georadarowej (BGPR). Dla osiągnięcia celu badań przeprowadzono analizę statystyczną związku pomiędzy gęstością spękań ośrodka skalnego, wyrażoną przez wskaźnik stopnia spękania RQD a wielkością znormalizowanej i uśrednionej amplitudy sygnału georadarowego. Wskaźnik RQD został obliczony na podstawie rdzeni z otworów wiertniczych wykonanych w warunkach geologiczno-inżynierskich niecki bytomskiej. Amplituda sygnału georadarowego została pomierzona w otworach badawczych na odcinkach obliczonego wskaźnika RQD, poza strefą wpływu wykonanego otworu.

W pracy przedstawiono studium literaturowe zagadnień teoretycznych dotyczące metody BGPR oraz metod oceny stopnia spękania ośrodka skalnego, w tym wskaźnika spękania RQD. Wykonano przetwarzanie i interpretację danych pomiarowych według opracowanego oryginalnego sposobu dla 46 otworów badawczych o głębokości od kilkunastu do około 70 m odwierconych w różnych warunkach geologiczno-inżynierskich. W celu przeprowadzenia obliczeń dla dużej liczby danych georadarowych, rzędu kilkuset tysięcy wartości amplitud sygnału na każdy metr bieżący badanego otworu, zastosowano specjalny sposób uśredniania. W celach porównawczych dane te były również normalizowane. Na podstawie opracowanych zależności liniowych znormalizowanej i uśrednionej amplitudy sygnału georadarowego od wielkości wskaźnika RQD opracowano klasyfikację RQD-BGPR dla warunków geologiczno-inżynierskich niecki bytomskiej. Klasyfikacja ta została wstępnie pozytywnie zweryfikowana w przypadku kilku otworów badawczych.

Przedstawione rozwiązanie badawcze ma znaczenie poznawcze, gdyż może posłużyć do uściślenia wiedzy o stopniu spękania masywu skalnego, a także ma istotne znaczenie aplikacyjne w projektowaniu posadowienia obiektów budowlanych w skomplikowanych warunkach geologiczno-inżynierskich. Sposób ten może znaleźć zastosowanie w zagadnieniach górniczych do oceny stopnia zniszczenia górotworu w miejscach dostępnych otworami wiertniczymi.

Method of evaluation the degree of fracturing in the rock mass using borehole GPR

Abstract

The main purpose of the work is a quantitative evaluation of the degree of fractures in the rock mass with the use of Borehole Ground Penetrating Radar (BGPR) method. A statistical analysis for a relation between a density of fractures in the rock mass, represented by the Rock Quality Designation index (RQD) and a normalized and averaged amplitude of the GPR signal was carried out, to achieve the aim of this research. The analysis was done under geological engineering conditions in the Bytom Basin. The RQD index calculations were based on the drill core samples. Amplitudes of the GPR signal were measured in boreholes at the sections where the RQD index was calculated, outside the influence of the borehole.

The work presents the literature study on the subject of the BGPR method as well as the evaluation methods of the degree of fracture in the rock mass including the rock quality designation RQD. In this work the processing and interpretation of measurement data was made according to the original method developed for 46 boreholes. A few to about 70 m in a depth boreholes and their measurements were performed under different geological engineering conditions. A special way of averaging was applied in order to perform the calculations for huge amounts of GPR data of containing several hundreds of thousands signal amplitudes for each meter of tested boreholes. The data were as well normalized, in order to check data from boreholes. The RQD-BGPR classification was developed for geological engineering conditions in the Bytom Basin based on linear dependence between the normalized and averaged georadar signal amplitude and the RQD index. Initially this classification was positively verified in the case of several boreholes.

The proposed method of problem solving has a cognitive significance as it can be used to specify the knowledge about rock mass destructions and is essential for the application in designing of building foundations in the complex geological engineering conditions. This method can be used in mining areas to evaluate the rock mass destruction in regions accessible through drilling of boreholes.

STUDIA, ROZPRAWY, MONOGRAFIE

- 1** J. Dziewański (red.):
Oddziaływanie przemysłu siarkowego na środowisko przyrodnicze województwa tarnobrzskiego
- 2** M. Księżyk:
Racjonalne gospodarowanie pierwotnymi nośnikami energii w Polsce
- 3** E. Mokrzycki:
Metoda obliczania kosztów pozyskania sortymentów handlowych węgla kamiennego
- 4** I. Soliński:
Metoda wyznaczania kosztów przyrostu pozyskania nośników energii w aspekcie zapotrzebowania gospodarki
- 5** Z. Maciejewski i in.:
Określenie potrzeb energetycznych kraju na podstawie zmieniającego się w latach prognozy wskaźnika elastyczności zużycia energii względem dochodu narodowego wytworzonego

Z. Maciejewski i in.:
Koncepcja komputerowego systemu wspomaganie decyzji w zakresie kompleksu paliwowo-energetycznego
- 6** K. Wanielista, J. Kicki:
Sterowanie wykorzystaniem zasobów naturalnych kopalin w systemie nakazowym i w warunkach gospodarki rynkowej
- 7** I. Soliński i in.:
Opracowanie metodyki ustalania kompleksowych kosztów pozyskiwania i przetwarzania krajowych surowców mineralnych
- 8** J. Dziewański (red.):
Opracowanie kompleksowej metodyki badania oddziaływania górnictwa i przetwórstwa na środowisko oraz zasad i metod rekultywacji obszarów zdegradowanych (Synteza)
- 9** J. Dziewański, U. Józefko:
Budowa geologiczna doliny środkowego Sanu między Niewistką a Dynowem
- 10** J. Sokołowska:
Metodyka poszukiwania złóż kopalin płynnych
- 11** S. Węclawik:
Kompleksowa metodyka badań ochrony surowców balneologicznych przed oddziaływaniem przemysłu
- 12** R. Ney (red.) i in.:
Zwiększenie efektywności pozyskiwania i wykorzystania surowców mineralnych
- 13** W. Suwała i in.:
Pakiet modeli gospodarki surowcami mineralnymi
- 14** W. Blaschke i in.:
Metodyka optymalizacji wykorzystania surowców mineralnych w procesach przeróbki i przetwórstwa
- 15** K. Wanielista i in.:
Zasady racjonalnej gospodarki zasobami naturalnymi złóż kopalin stałych
- 16** E. Mokrzycki, S.A. Blaschke:
Metodyka liczenia kosztów wzbogacania węgla kamiennego

E. Mokrzycki, Z. Grudziński:
Metodyka liczenia kosztów przeróbki rud cynkowo-ołowiowych
- 17** J. Dziewański (red.):
Zasady badań środowiska przyrodniczego w aspekcie jego ochrony

- 18 S. Szukalski i in.:
Przegląd metod określania wpływu czynników ogólnogospodarczych na gospodarkę paliwowo-energetyczną kraju
- 19 M. Nieć, Z. Kokesz:
Metody geostatystyczne w rozpoznawaniu i dokumentowaniu złóż oraz w ochronie środowiska
- 20 E. Mokrzycki i in.:
Skutki oddziaływania zanieczyszczeń na środowisko przyrodnicze i metody szacowania strat
- 21 Z. Pilecki:
Statystyczna analiza emisji sejsmoakustycznej dla kontroli zagrożenia tąpniętami
- 22 Praca zbiorowa pod red. E. Mokrzyckiego
Problemy kompleksowego wykorzystania surowców mineralnych
- 23 K. Wanielista:
Wartość i metoda wyceny zasobów złóż kopalin stałych
- 24 J. Waclawski, J. Kicki:
Gospodarka zasobami złóż węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym w latach 1981–1990, cz. I
- 25 J. Dziewański:
Budowa geologiczna terenów i problemy geologiczno-inżynierskie zbudowanych i projektowanych stopni wodnych w dolinie Sanu
- 26 H. Gaj i in.
Model makroekonomiczny energia–ekologia–ekonomia. Podejście metodyczne
- 27 E. Pietrzyk-Sokulska:
Petrogeneza utworów skalnych okolicy Młotów w Górach Bystrzyckich
- 28 Praca zbiorowa pod red. I. Solińskiego:
Opłacalność pozyskiwania i wykorzystania wód geotermalnych w wybranych regionach Polski
- 29 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Metodyka oceny walorów środowiska przyrodniczego na przykładzie województwa tarnobrzeskiego
- 30 J. Kicki, J. Waclawski:
Gospodarka zasobami złóż węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym w latach 1981–1990, cz. II
- 31 Praca zbiorowa pod red. W. Blaschke:
Koncepcja systemu cen na węgiel kamienny w warunkach przejściowych do gospodarki rynkowej
- 32 Praca zbiorowa pod red. R. Neya:
Energia odnawialna
- 33 W. Sroczyński:
Karpackie grunty pokrywowe (nieskaliste) i ich rola w budownictwie wodnym
- 34 Praca zbiorowa pod red. I. Solińskiego:
Prognozy kosztów oraz konkurencyjność odnawialnych i nieodnawialnych nośników energii w Polsce
- 35 Praca zbiorowa pod red. E. Mokrzyckiego:
Technologie czystego węgla na etapie przeróbki i przygotowania węgla do procesu użytkowania
- 36 M. Kudelko:
*Koszty ekologiczne w strukturze kosztów polskiego przemysłu węglowego
Projekt badawczy nr 0789/P1/93/05*
- 37 Praca zbiorowa pod red. W. Blaschke i E. Mokrzyckiego:
Węgiel koksowy na rynkach światowym i krajowym
- 38 W. Suwała:
Badania modelowe perspektyw górnictwa i rynku węgla kamiennego w Polsce

- 39 E. Pietrzyk-Sokulska:
Wpływ podziemnej eksploatacji i przeróbki węgla kamiennego na środowisko przyrodnicze w Polsce
- E. Panek:
Wpływ eksploatacji i spalania węgla brunatnego na środowisko przyrodnicze w Polsce
- 40 Praca zbiorowa pod red. J.J. Hycnara i E. Mokrzyckiego:
Technologie czystego węgla – odsiarczanie i demineralizacja za pomocą silnych zasad
- 41 J. Dziewański, Z. Olszamowski:
Likwidacja filtracji wody przez masyw skalny prawego przyczółka zapory Wisła-Czarne
- 42 J. Dziewański, E. Gąsiorowska, A. Mirosławska:
Zagadnienia geologiczno-inżynierskie rejonu stopnia wodnego Sromowce Wyżne na Dunajcu
- 43 Praca zbiorowa pod red. K. Ślizowskiego:
Występowanie i rozkład jodu w biosferze rzeki Wisły
- 44 S. Siewierski
Strategiczne i operacyjne modele optymalizacji, eksploatacji i przeróbki rud metali nieżelaznych
- 45 Praca zbiorowa pod red. I. Solińskiego:
Wybrane zagadnienia metodyki badań efektywności górnictwa węgla kamiennego
- 46 J. Jarosz:
Sposób wyznaczania zasięgu strefy spękań i lokalizacji odspojień w stropie wyrobisk górniczych za pomocą metody sejsmicznej
- 47 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Denudacja stoków w górnych odcinkach zlewni rzek karpackich
- 48 B. Kępińska:
Model geologiczno-geotermalny niecki podhalańskiej
- 49 K. Wanielista, S. Siewierski, J. Kicki, J. Butra:
Ekonomiczne aspekty eksploatacji zasobów złóż rud miedzi
- 50 E. Pietrzyk-Sokulska:
Zagadnienia sozologiczne eksploatacji surowców skalnych (na przykładzie województwa nowosądeckiego)
- 51 W. Suwała, M. Kudęko:
Analiza rynku paliw w Polsce w aspekcie wprowadzania instrumentów rynkowych w dziedzinie ochrony środowiska
- 52 G. Gawrońska:
Metoda szacowania strat w rolnictwie i leśnictwie spowodowanych zanieczyszczeniem atmosfery
- 53 W. Sroczyński:
Karpackie pokrywy czwartorzędowe w świetle wyników standardowych badań laboratoryjnych dla budownictwa wodnego (obiekty: Dobczyce, Krempna, Niewistka)
- 54 J. Kicki, E. J. Sobczyk:
Zasoby przemysłowe węgla kamiennego kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w latach 1981–1994
Analiza i trend zmian
- 55 J. Binder, J. Dziewański:
Budownictwo wodne a ochrona środowiska przyrodniczego
System wodny Gabczikowo na Dunaju
- 56 W. Dziurzyński:
Prognozowanie procesu przewietrzania kopalni głębinowej w warunkach pożaru podziemnego
- 57 Praca zbiorowa pod red. W. Blaschke i R. Neya:
Formuły sprzedażne węgla kamiennego zmodyfikowane do wymogów sprawozdawczości Unii Europejskiej
- 58 A. Sroka:
Dynamika eksploatacji górniczej w punktu widzenia szkód górniczych

- 59 Z. Pilecki:
Modelowanie zachowania się masywu skalnego na podstawie badań empirycznych in-situ
- 60 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Warunki geologiczno-inżynierskie podłoża Zespołu Zbiorników Wodnych Czorsztyn-Niedzica i Sromowce Wyżne im. Gabriela Narutowicza na Dunajcu
- 61 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Określenie podatności stoków i brzegów potoków na erozję na przykładzie zlewni Ropy
- 62 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Sozologiczne problemy w budownictwie wodnym
- 63 Z. Grudziński:
System cenowy w górnictwie węgla brunatnego
- 64 U. Lorenz:
Metoda oceny wartości węgla kamiennego energetycznego uwzględniająca skutki jego spalania dla środowiska przyrodniczego
- 65 P. Dobak:
Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów
- 66 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Prognoza oddziaływania projektowanego zbiornika wodnego Krempna na środowisko przyrodnicze
- 67 J. Topolnicki:
Wyrzuty skalno-gazowe w świetle badań laboratoryjnych i modelowych
- 68 B. Uliasz-Misiak:
Technologia opróbowania poziomów wodonośnych rurowym próbnikiem złoża
- 69 M. Kudelko, W. Suwała:
Analiza wpływu wprowadzenia w Polsce opłat produktowych i depozytów na koszty funkcjonowania podmiotów gospodarczych i gospodarstw domowych oraz poziom inflacji
- 70 K. Czajka:
Geochemiczna i petrologiczna charakterystyka kontaktów złoża siarczkowego rud Zn–Pb ze skałami otaczającymi, w rejonie bytomskim
- 71 S. Stryczek, A. Gonet:
Geoinżynieria
- 72 M. Kudelko:
Model oceny funkcjonowania instrumentów zarządzania procesami redukcji emisji dwutlenku siarki w elektroenergetyce
- 73 J. Dziewański, D. Grodecki:
Przesłona przeciwfiltracyjna pod lewym skrzydłem zapory w Myczkowcach na Sanie
- 74 Praca zbiorowa pod red. R. Neya:
Energia odnawialna w ochronie środowiska
- 75 Praca zbiorowa pod red. S. Rychlickiego:
Metody wykrywania zanieczyszczeń ropopochodnych w środowisku gruntowo-wodnym
- 76 Praca zbiorowa pod red. W. Bujakowskiego:
Wybrane problemy wykorzystania geotermii – I
- 77 W. Blaschke:
System cen energetycznego węgla kamiennego
- 78 E.J. Sobczyk:
Wpływ zmian modelu gospodarczego na gospodarkę zasobami złóż węgla kamiennego w górnośląskim zagłębiu węglowym
- 79 E. Panek:
Metale śladowe w glebach i wybranych gatunkach roślin obszaru polskiej części Karpat

- 80 A. Uliasz-Bocheńczyk:
Wpływ wybranych dodatków mineralnych na właściwości mieszanin uszczelniających i wypełniających stosowanych w górnictwie podziemnym
- 81 E. Pietrzyk-Sokulska, E. Panek:
Podstawy strategii ekorozwoju w aspekcie zmian administracyjnych kraju – wybrane elementy
- 82 U. Lorenz:
Parytet importowy węgla kamiennego energetycznego
- 83 J. Dziewański, J. Dudek, Z. Olszamowski:
Nowa przesłona przeciwfiltracyjna w podłożu lewego skrzydła i przyczółka zapory Wisła–Czarne
- 84 Z. Pilecki, E. Popiołek:
Wpływ eksploatacji rud na zagrożenie powierzchni deformacjami nieciągłymi i jego badanie za pomocą metod geofizycznych
- 85 J. Darski, J. Kicki, E.J. Sobczyk:
Raport o stanie gospodarki zasobami złóż węgla kamiennego
- 86 J. Kwaśniewski:
Zastosowanie wybranych metod analizy sygnałów niestacjonarnych w diagnozowaniu lin i rur stalowych
- 87 E. Mokrzycki:
Ceny węgla energetycznego oferowanego w latach 1990–1999 w portach głównych eksporterów
- 88 L. Pająk:
Model numeryczny rozwoju strefy przemarzania gruntu w warunkach eksploatacji energii cieplnej
- 89 J. Butra:
Metoda doboru systemu eksploatacji złóż rud miedzi w polach o jednorodnej charakterystyce geologicznej
- 90 Praca zbiorowa pod red. S. Plewy:
Rozpoznanie pola cieplnego ziemi w obszarze Górnoląskiego Zagłębia Węglowego dla potrzeb górnictwa i ciepłownictwa
- 91 Praca zbiorowa pod red. J. Dziewańskiego:
Tematyka prac naukowo-badawczych realizowanych w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w XV-letnim okresie
- 92 Praca zbiorowa pod red. W. Neya:
Wybrane problemy wykorzystania geotermii – II
- 93 B. Kępińska:
Warunki hydrotermalne i termiczne podhalańskiego systemu geotermalnego w rejonie otworu Biały Dunajec PAN-1
- 94 E. Mokrzycki:
Ceny węgla koksowego oferowanego w latach 1990–1999 w portach głównych eksporterów
- 95 W. Suwała, M. Kudęko, J. Kamiński:
Rynek węgla kamiennego w Polsce
- 96 J. Dziewański, Z. Pilecki, W. Sroczyński:
Zagadnienia badań geologiczno-inżynierskich w projektowaniu tuneli komunikacyjnych w utworach fliszu karpackiego – na przykładzie tunelu w Lalikach
- 97 W. Dziurzyński, T. Pałka:
Komputerowy system monitoringu zagrożenia pożarowego i wyznaczania dróg ucieczkowych w warunkach pożaru w kopalni podziemnej
- 98 E. Pietrzyk-Sokulska:
Waloryzacja obszarów występowania i eksploatacji złóż zwięzłych surowców skalnych na przykładzie Beskidów Zachodnich
- 99 W. Sroczyński, A.K. Wota:
Prognozowanie oddziaływania karpackich zbiorników wodnych na środowisko geologiczne i powierzchnię ziemi

- 100** U. Ozga-Blaschke:
Parytet importowy węgla koksowego
- 101** P. Czaja:
Analiza nośności segmentowej obudowy szybów upodatnionej materiałem nieliniowo sprężystym
- 102** J. Dziewański, J. Starowicz:
Zastosowanie kruszywa z miejscowych złóż materiałów budowlanych do betonów hydrotechnicznych (na przykładzie zapory w Solinie)
- 103** A. Wójcik:
Otrzymywanie pochodnych poliwinylkarbazolu o właściwościach elektroluminescencyjnych
- 104** M. Giergiel:
Komputerowe wspomaganie w projektowaniu maszyn wibracyjnych
- 105** P. Batko:
Wpływ właściwości strzelniczych materiału wybuchowego na efekt sejsmiczny strzelania
- 106** L. Gawlik, I. Grzybek
Szacowanie emisji metanu w polskich zagłębach (system węgla kamiennego)
- 107** M. Wójcik
Awaryjne hamowanie górniczych wyciągów szybowych urządzeniami ciernymi – teoria, badania i aplikacje przemysłowe
- 108** J. Mucha
Struktura zmienności zawartości [Zn] i [Pb] w śląsko-krakowskich złożach rud Zn-Pb
- 109** J. Dziewański, Z. Pilecki
Ocena warunków geologiczno-inżynierskich na terenie powierzchniowych ruchów masowych na przykładzie osuwiska w Zgłobicach
- 110** Praca zbiorowa pod redakcją E. Pietrzyk-Sokulskiej:
Uwarunkowania przyrodniczo-kulturowe funkcjonowania turystyki zrównoważonej w Beskidach Zachodnich
- 111** W. Suwała, M. Kudęłko, J. Kamiński:
Rynek węgla kamiennego w Polsce w latach 1991–2001
- 112** U. Lorenz, W. Blaschke, Z. Grudziński:
Propozycja nowej formuły sprzedaży węgla energetycznego przeznaczonego dla energetyki zawodowej
- 113** B. Kępińska, A. Łowczowska:
Wody geotermalne w lecznictwie, rekreacji i turystyce
- 114** J. Cieślak:
Metody natężeniowe w analizie elementów konstrukcyjnych
- 115** Praca zbiorowa pod redakcją W. Sroczyńskiego:
Uwarunkowania geologiczne realizacji zbiornika przeciwpowodziowego Racibórz Dolny na Odrze
- 116** Z. Blaschke, W. Blaschke:
Ocena celowości wzbogacania węgla na potrzeby energetyki w samodzielnych zakładach przerobczych
- 117** B. Kłojzy-Karczmarczyk:
Zastosowanie odpadów energetycznych w ograniczaniu transportu zanieczyszczeń ze składowisk odpadów górniczych
- 118** J. Dziewański, A.K. Wota, D. Limanówka, E. Cebulak, S. Michalik:
Katastrofalny spływ wodno-gliniasty w Muszynie w lipcu 2002 roku
- 119** U. Ozga-Blaschke:
Metoda powiązania parametrów jakościowych węgla koksowego z jego wartością użytkową
- 120** J. Dziewański, Z. Pilecki:
Problemy rozpoznania geologiczno-inżynierskiego w projektowaniu tuneli drogowych Węgierska Górka i Milówka

- 121** M. Kudelko:
Efektywna alokacja zasobów w krajowym systemie energetycznym
- 122** Praca zbiorowa pod redakcją W. Blaschke:
Funkcjonowanie górnictwa węgla kamiennego na podstawie uregulowań prawnych Unii Europejskiej w latach 1993–2002
- 123** Praca zbiorowa pod redakcją W. Blaschke:
Możliwości funkcjonowania kopalń węgla kamiennego w Polsce w świetle przepisów UE dotyczących zasad świadczenia pomocy państwa dla górnictwa w latach 2002–2010
- 124** T. Olkusiński:
Straty energii chemicznej w procesach energetycznego wykorzystania węgla kamiennego
- 125** A.P. Barbacki:
Zbiorniki wód geotermalnych niecki miechowskiej i środkowej części zapadliska przedkarpackiego
- 126** J. Sałacki:
Model złoża rud miedzi dla potrzeb projektowania i prowadzenia eksploatacji
- 127** Suwała W., Kudelko M., Kamiński J.:
The primary energy market in Poland in 1993–2002
- 128** Nieć M., Matł K., Wyrwicki R., Wiśniewski J.:
Iły turowskie mit kopalni towarzyszących
- 129** K. Ślizowski, J. Köhsling, L. Lankof:
Uwarunkowania podziemnego składowania odpadów niebezpiecznych w Polsce
- 130** Publikacja zbiorowa pod redakcją E. Panek:
Uwarunkowania przyrodniczo-kulturowe rozwoju turystyki zrównoważonej w Bieszczadach
- 131** E. Pietrzyk-Sokulska:
Kryteria i kierunki adaptacji terenów po eksploatacji surowców skalnych. Studium dla wybranych obszarów Polski
- 132** R. Tarkowski:
Geologiczna sekwestracja CO₂
- 133** D. Grodecki:
Zależność wodo- i cementochłonności od budowy geologicznej podłoża zapory w Myczkowcach
- 134** J. Kicki, E.J. Sobczyk:
Restrukturyzacja górnictwa w Polsce a struktura i wystarczalność zasobów węgla kamiennego
- 135** B. Kępińska:
Warunki termiczne i hydrotermalne podhalańskiego systemu geotermalnego
- 136** Praca zbiorowa pod red. B. Uliasz-Misiak:
Badania mikrobiologiczne wycieków CO₂ w rejonie Muszyny w celu opracowania metod biomonitoringu
- 137** J. Ślizowski:
Geomechaniczne podstawy projektowania komór magazynowych gazu ziemnego w złożach soli kamiennej
- 138** M. Kaliski, D. Staśko:
Bezpieczeństwo energetyczne w gospodarce paliwowej Polski
- 139** M. Kudelko, W. Suwała, J. Kamiński:
Koszty zewnętrzne w energetyce – zastosowanie w badaniach modelowych
- 140** L. Zawisza:
Hydrodynamiczne modelowanie basenów naftowych dla oceny ich perspektyw złożowych
- 141** U. Ozga-Blaschke:
Międzynarodowy rynek węgla koksowego

- 142** B. Uliasz-Misiak:
Pojemność podziemnego składowania CO₂ dla wybranych mezozoicznych poziomów wodonośnych oraz złóż węglowodorów w Polsce
- 143** Praca zbiorowa pod red. M. Kudelko:
Scenariusze rozwoju krajowego sektora węgla kamiennego do 2020 roku – foresight technologiczny
- 144** E. Pilecka:
Indukowane podziemną działalnością górniczą wysokoenergetyczne wstrząsy górotworu a lineamenty na obrazach satelitarnych
- 145** A.K. Wota:
Optymalizacja wyboru lokalizacji składowisk odpadów komunalnych z wykorzystaniem metody AHP (Analytic Hierarchy Process)
- 146** M. Filipowicz:
Experimental investigations of m-atomic and m-molecular processes in muon catalysis of nuclear fusion reactions
- 147** A. Szurlej:
Rola gazu ziemnego w bilansie paliwowo-energetycznym kraju ze szczególnym uwzględnieniem energetyki, w aspekcie wymogów ochrony środowiska
- 148** L. Gawlik:
Wpływ poziomu wydobycia węgla kamiennego na koszty jego pozyskania w kopalniach
- 149** H. Woźniak:
Osiadanie gruntów zwałowanych w świetle badań modelowych
- 150** E.J. Sobczyk:
Uciążliwość geologiczno-górnictwowych warunków eksploatacji węgla kamiennego i jej wpływ na gospodarkę złożem
- 151** R. Skrzypczak:
Jednostki przyrodniczo-kulturowe Beskidów w aspekcie turystyki zrównoważonej
- 152** P. Saługa:
Ocena ekonomiczna projektów i analiza ryzyka w górnictwie
- 153** A. Uliasz-Bocheńczyk:
Mineralna sekwestracja CO₂ w wybranych odpadach
- 154** A. Malinowska:
Ocena zagrożenia uszkodzeniami obiektów budowlanych na terenach górniczych z wykorzystaniem wnioskowania rozmytego
- 155** Praca zbiorowa pod red. W. Suwały:
Analiza problemu relokacji źródeł energii elektrycznej dla polskiego systemu elektroenergetycznego i przedsiębiorstw w wyniku polityki klimatycznej UE
- 156** U. Lorenz, Z. Grudziński:
Międzynarodowe rynki węgla kamiennego energetycznego
- 157** Praca zbiorowa pod red. K. Galosa:
Waloryzacja bazy zasobowej piasków szklarskich i ocena perspektyw złożowych w świetle współczesnych wymagań przemysłu szklarskiego
- 158** B. Tomaszewska:
Transformations of soil and aquatic environment under the impact of anthropogenic factors – examples from the selected area in Skawina
- 159** M. Kopacz:
Metoda wyceny projektów inwestycyjnych w polskim górnictwie rud miedzi z wykorzystaniem symulacji stochastycznej
- 160** M. Nieć:
Kryteria geologiczne złoża (kryteria bilansowości)

- 161** K. Galos:
Wpływ składu mineralnego wybranych itów na właściwości tworzyw gresowych
- 162** T. Danek, A. Leśniak, A. Pięta:
Numerical modeling of seismic wave propagation in selected anisotropic media
- 163** E. Lewicka:
Ocena kopaliny skaleniowo-kwarcowej ze Sławniowic (Sudety Wschodnie) jako potencjalnego surowca ceramicznego
- 164** Praca zbiorowa pod redakcją R. Tarkowskiego:
Potencjalne struktury geologiczne do składowania CO₂ w utworach mezozoiku Niżu Polskiego (charakterystyka oraz ranking)
- 165** W. Suwała, J. Kamiński, P. Kaszyński, M. Kudelko:
The primary energy tendencies in Poland
- 166** L. Lankof:
Analiza odkształcalności i utraty masy zubrów brunatnych w aspekcie składowania odpadów promieniotwórczych w środkowopolskich wysadach solnych
- 167** P. Saługa:
Elastyczność decyzyjna w procesach wyceny projektów geologiczno-górnictwowych
- 168** J. Ślizowski, K. Urbańczyk, D. Wiewiórka, M. Kowalski, K. Serbin:
Stateczność wyrobisk w pokładach ewaporatów LGOM w aspekcie budowy podziemnego laboratorium badawczego
- 169** J. Kulczycka:
Ekoefektywność projektów inwestycyjnych z wykorzystaniem koncepcji cyklu życia produktu
- 170** W.M. Bajdur:
Eko-polielektrolity syntetyczne redukujące ładunki zanieczyszczeń w ściekach i wodach przemysłowych
- 171** H. Wirth:
Wieloczynnikowa wycena złóż i ich zasobów na przykładzie przemysłu metali nieżelaznych
- 172** B. Rajpolt, B. Tomaszewska:
Zanieczyszczenie środowiska gruntowo-wodnego fluorem na przykładzie Huty Aluminium w Skawinie
- 173** M. Kudelko, W. Suwała, J. Kamiński, P. Kaszyński:
Modelowanie rynków energii dla różnych systemów dystrybucji uprawnień do emisji dwutlenku węgla
- 174** T. Olkusi:
Analiza produkcji węgla kamiennego i jego wykorzystanie w wytwarzaniu energii elektrycznej w Polsce
- 175** J. Kamiński:
Siła rynkowa w krajowym sektorze wytwarzania energii elektrycznej
- 176** Praca zbiorowa pod redakcją A. Uliasz-Bocheńczyk:
Zaczyny cementowe w technologiach wiertniczych geologicznego składowania CO₂
- 177** Praca zbiorowa pod redakcją E. Lewickiej:
Innowacyjne technologie pozyskiwania najważniejszych surowców ceramicznych i szklarskich
- 178** M. Kudelko, W. Suwała, J. Kamiński, P. Kaszyński:
Handel uprawnieniami do emisji dwutlenku węgla w Unii Europejskiej
- 179** K. Stala-Szlugaj:
Polish imports of steam coal from the East (CIS) in the year 1990–2011
- 180** Z. Grudziński:
Metody oceny konkurencyjności krajowego węgla kamiennego do produkcji energii elektrycznej
- 181** D. Foszcz:
Zasady określania optymalnych rezultatów wzbogacania wieloskładnikowych rud miedzi

- 182** T. Niedoba:
Wielowymiarowe charakterystyki zmiennych losowych w opisie materiałów uziarnionych i procesów ich rozdziału
- 183** U. Lorenz, U. Ozga-Blaschke, K. Stala-Szlugaj, Z. Grudziński:
Węgiel kamienny w kraju i na świecie w latach 2005–2012
- 184** Z. Pilecki:
Uzdatnienie podłoża autostrady A-1 na terenach pogórnich płytkiej eksploatacji rud metali
- 185** R. Tarkowski, L. Dziewińska, S. Marek:
The characteristics of selected potential geological structures for CO₂ underground storage in Mesozoic deposits of the Szczecin–Mogilno–Uniejów Trough
- 186** Praca zbiorowa pod redakcją E. Lewickiej:
Market analysis of selected raw materials for the ceramic and glass industries in Poland over the years 1990–2012
- 187** M. Nieć, M. Młynarczyk:
Gospodarowanie zasobami węgla kamiennego w Polsce
- 188** U. Lorenz:
Ocena oddziaływania zmian cen węgla energetycznego na rynkach międzynarodowych na krajowy rynek węgla
- 189** A. Kot-Niewiadomska:
Uwarunkowania geologiczne zagospodarowania terenu przemysłowego Zakładów Metalurgicznych „Trzebinia” w Trzebini
- 190** B. Tomaszewska:
Ocena możliwości efektywnego wykorzystania schłodzonych wód termalnych
- 191** I. Baic:
Analiza wielokierunkowego wykorzystania depozytów mułków węglowych wraz z oceną ich oddziaływania na środowisko
- 192** M. Kudelko, J. Kamiński, P. Kaszyński, M. Malec:
Analiza wrażliwości sektora wytwarzania energii elektrycznej i ciepła
- 193** W. Bujakowski:
Geologiczne, środowiskowe i techniczne uwarunkowania projektowania i funkcjonowania zakładów geotermalnych w Polsce
- 194** T. Ratajczak, E. Hyncar, P. Bożęcki:
Kryterium mineralogiczne jako element oceny przydatności niektórych polskich surowców ilastych do budowy przesłon hydroizolacyjnych
- 195** D. Kryzia:
Wybór technologii wytwarzania energii elektrycznej w warunkach ryzyka
- 196** J. Pszonka:
Studium sedymentologiczne warstw cergowskich w jednostce dukielskiej i przeddukielskiej Karpat fliszowych
- 197** K. Krawiec:
Analiza wrażliwości numerycznego modelu procesu zapadliskowego na zmianę wartości parametrów fizyczno-mechanicznych metodą zbiorów losowych w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej
- 198** R. Tarkowski, W. Sroczyński:
Zmienność sezonowa stężenia CO₂ w powietrzu glebowym w warunkach klimatu południowej Polski
- 199** A. Makara:
Przetwarzanie gnojowicy świńskiej i jej separacja metodą filtracyjną

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW DOTYCZĄCE OPRACOWANIA I PRZYGOTOWANIA DO DRUKU PUBLIKACJI W DZIALE WYDAWNICZYM: STUDIA, ROZPRAWY, MONOGRAFIE

1. Treść merytoryczna publikacji i sposób ich ujęcia powinny odpowiadać poziomowi działu i powinny odnosić się do tytułu działu: Studia, Rozprawy, Monografie.
2. Układ publikacji powinien być przejrzysty, zwarty, a jego treść podzielona na rozdziały tworzące zamkniętą całość. Objętość publikacji nie powinna być mniejsza od 5 arkuszy wydawniczych i nie powinna przekraczać 10 arkuszy wydawniczych (ok. 120 stron).
3. Każda publikacja powinna zawierać streszczenie w języku angielskim w objętości 1,5–2 strony maszynopisu. Tabele i rysunki zawarte w publikacji powinny również zawierać podpisy w języku angielskim.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW DOTYCZĄCE PRZYGOTOWANIA TEKSTU NA DYSKIECIE

Wskazówki techniczne (przygotowanie elektronicznej wersji artykułu)

Kompletny materiał do druku powinien zawierać (wersja elektroniczna):

- tekst zasadniczy,
- tytuł w języku polskim i angielskim,
- tytuły naukowe Autorów, miejsca pracy oraz adres e-mail do korespondencji,
- tabele i rysunki,
- podpisy pod tabele i rysunki w języku polskim oraz angielskim,
- streszczenia i słowa kluczowe w obu językach,
- podziękowania, jeśli występują,
- oświadczenie o źródłach finansowania (jeśli inne niż domyślne).

Autorzy spoza Polski, zgłaszający artykuł do druku w języku angielskim nie muszą przedstawiać polskiej wersji językowej – zostanie ona uzupełniona w Redakcji.

Dostarczenie elektronicznej wersji artykułu jest obowiązkowe.

Tekst powinien być zapisany w programie WORD FOR WINDOWS.

Zaleca się zastosowanie czcionki Times Roman 12 lub Arial 12.

Całkowita objętość artykułu nie powinna przekraczać 15 stron.

W trakcie wpisywania tekstu prosimy o przestrzeganie następujących zasad:

- nie dzielić ręcznie wyrazów,
- nie justować poszczególnych linii akapitu za pomocą klawisza spacji,
- nie spacjaować wyrazów (np. t y t u ł),
- nie podkreślać wyrazów, zdań (np. podkreślony).

Streszczenia w obu językach powinny zawierać co najmniej 1900 znaków ze spacjami i powinny odzwierciedlać merytoryczną zawartość artykułu.

Tytuły i podtytuły należy oddzielić od tekstu odstępem górnym i dolnym. Przy podziale tekstu na rozdziały i podrozdziały należy stosować numerację cyfrową wielorzędową:

- rozdziały – 1, 2, ...
- podrozdziały pierwszego stopnia – 1.1, 1.2, ..., 2.1, 2.2, ...
- podrozdziały drugiego stopnia – 1.1.1, 1.1.2, ..., 1.2.1, 1.2.2, ...
- podrozdziały trzeciego stopnia i ewentualnie inne tytuły pozostawia się zazwyczaj nienumerowane.

Tabele i rysunki należy umieścić w tekście po powołaniach. Zaleca się numerować je od 1 do *n* w obrębie całej publikacji.

Rysunki prosimy dostarczać również w wersji elektronicznej w osobnych plikach w formatach obsługiwanych przez program Corel DRAW 16 (np. *.CDR, *.CGM, *.TIF, *.JPG, *.PCX, *.IMG, *.XLS).

Wzory matematyczne numeruje się podając numer ujęty w nawiasy okrągłe na prawym marginesie (jeśli jest ich mało, nie wymagają numeracji). **Wszelkie symbole we wzorach** i powołaniach na nie w tekście prosimy pisać pismem pochylonym. Ważne jest, by 0 (zero) wpisane było przez klawisz cyfrowy, w celu odróżnienia go od litery O(o).

Powołania na cytowaną literaturę w tekście artykułu są obowiązkowe. W powołaniach na literaturę podajemy w nawiasie okrągłym nazwisko autora i rok wydania, np. (Rysiowa 1969) – jeden autor; (Nowakowski, Kapinos 1992) – dwóch autorów; (Kluz i in. 1972) – więcej niż dwóch autorów.

W przypadku prac zbiorowych posiadających redaktorów w nawiasie okrągłym podajemy nazwisko redaktora z adnotacją red. i rok wydania, np. (Zdun, red. 2004) – jeden redaktor; (Nowak, Kopa, red. 2003) – dwóch redaktorów; (Krus i in., red. 2000) – więcej niż dwóch redaktorów.

W przypadku prac zbiorowych nie posiadających redaktorów w nawiasie okrągłym podajemy początek tytułu i rok wydania, np. (Poradnik... 1971).

Literatura powinna być umieszczona na końcu pracy z oznaczeniem „LITERATURA”. Autor sporządza jeden wykaz literatury dla całej pracy, w której znajdują się tylko te pozycje, na które powołano się w tekście artykułu. Kolejność pozycji cytowanej literatury powinna być alfabetyczna (wg tekstów powołań).

Prawidłowy zapis bibliograficzny powinien zawierać:

- Książki jednego lub dwóch autorów:
Nazwisko i inicjały imion autora, rok wydania: Tytuł. Oznaczenie kolejności wydania (Wyd. 1, 2, ...).
Miejsce wyd., nazwa wydawcy, np.:
Rysiowa H., 1969 – Wstęp do matematyki współczesnej. Wyd. 2. Warszawa, PWN.
Rysiowa H., Nowakowski J., 1969 – Wstęp do matematyki współczesnej. Wyd. 2. Warszawa, PWN.
- Książki kilku autorów (powyżej dwóch):
Powołanie plus prawidłowy zapis bibliografii:
Rysiowa i in. 1969 – Rysiowa H., Nowakowski J., Kapinos J., 1969 – Wstęp do matematyki współczesnej. Wyd. 2. Warszawa, PWN.
- Artykuły z czasopism i innych wydawnictw ciągłych (jeden lub dwóch autorów):
Nazwisko i inicjały imion autora, rok wydania: Tytuł artykułu. Pełny tytuł czasopisma (nie skrót), numer rocznika (tomu), numer zeszytu, strony, np.:
Nowakowski J., Kapinos J., 1992 – Przemysł aluminiowy – stan obecny i tendencje zmian. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 23, z. 1, s. 17–28.
- Artykuły z czasopism i innych wydawnictw ciągłych (powyżej dwóch autorów):
Powołanie plus prawidłowy zapis bibliograficzny:
Rysiowa i in. 1992 – Rysiowa H., Nowakowski J., Kapinos J., 1992 – Przemysł aluminiowy – stan obecny i tendencje zmian. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 23, z. 1, s. 17–28.
- Prace zbiorowe (pod redakcją jednego lub dwóch redaktorów):
Nazwisko i inicjały imion redaktora naukowego (z zaznaczonym skrótem red.), rok wydania: Tytuł. Oznaczenie kolejności wydania. Numer tomu (części, jeżeli jest). Wydawca, miejsce wydania, liczba stron, np.:
Paszowski B., red., 1971 – Poradnik inżyniera. Elektronika. Wyd. 2, t. 1. WNT, Warszawa, s. 256.
Pasikowski T., Gdowski A., red., 1994 – Zarys krystalografii. Wyd. 1, Wydawnictwo Praca i Płaca, Wrocław, s. 145.
- Prace zbiorowe (pod redakcją więcej niż dwóch redaktorów):
Powołanie plus prawidłowy zapis bibliografii:
Jackowski i in., red. 2007 – Jackowski T., Kryza O., Pasikow R., red., 2007 – Analiza gospodarki wodnej. Wyd. 1, WNT, Warszawa, s. 55.
- Prace zbiorowe nie posiadające redaktorów:
Powołanie plus pełny zapis bibliografii: Tytuł. Oznaczenie kolejności wydania, Numer tomu (jeśli bibliografia wielotomowa). Wydawca, miejsce wydania, strony lub liczba stron, specyficzne oznaczenia, np.
Decyzja... 2003 – Decyzja nr 1230/2003/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 czerwca 2003 r. przyjmująca wieloletni program działania w dziedzinie energii: Inteligentna Energia – Europa (2003–2006). Dziennik Urzędowy L 176, 15/07/2003 s. 0029–0036; 32003D1230.
Program... 2007 – Program rozwoju elektroenergetyki w latach 2007–2010. Ministerstwo Gospodarki, Warszawa, s. 68.