



Tomasz ŁĄTKA*, Rafał CZARNY*, Krzysztof KRAWIEC**, Mariusz KUDYK*, Zenon PILECKI***

Eksperymentalne badania położenia nieciągłości, pustek i stref rozluźnień w górotworze za pomocą georadaru otworowego

Streszczenie: W pracy omówiono wyniki eksperymentów mających na celu ocenę efektywności rozpoznania położenia nieciągłości oraz pustek i stref rozluźnień w górotworze za pomocą georadaru otworowego. Do badań wykorzystano georadar otworowy szwedzkiej firmy Malå GeoScience AB z antenami o częstotliwości 100 MHz. Badania rozpoznania położenia uskoku w pokładzie węgla przeprowadzono w warunkach dołowych w jednym z wyrobisk górniczych KWK Marcel. Badania rozpoznania położenia pustek i stref rozluźnień przeprowadzono na terenie pogórnym płytkiej eksploatacji rud cynku i ołowiu w niecce bytomskiej koło Piekary Śląskich. Pokazano zalety i ograniczenia przeprowadzonego rozpoznania za pomocą georadaru otworowego. Uzyskane wyniki są obiecujące i zachęcają do zaprojektowania dalszych badań w zróżnicowanych warunkach geologiczno-górnictwowych.

Słowa kluczowe: georadar otworowy, strefy uskokowe, pustki i strefy rozluźnienia

Experimental researches of discontinuous, empties and fracture zones location in rock mass by borehole georadar

Abstract: In the article, a result of experiments directed on effectiveness recognition of discontinuous, empties, and fracture zones in rock mass by the help of borehole georadar. For experiment borehole georadar of Malå GeoScience AB with 100 MHz antenna has been used. Researches of fault location determination in 507 coal bed have been carried out in underground conditions in one of the excavation of Marcel coal mine. Researches of empties and fracture zones location has been carried out on post mining terrain of shallow zinc and lead ores exploitation in bytomska syncline near Piekary Śl. town. Some advantages and limitations of borehole georadar use has been underlined. Obtained results are encouraging for next tests in different geological and mining conditions.

Key words: borehole georadar, faults, empties, fracture zones

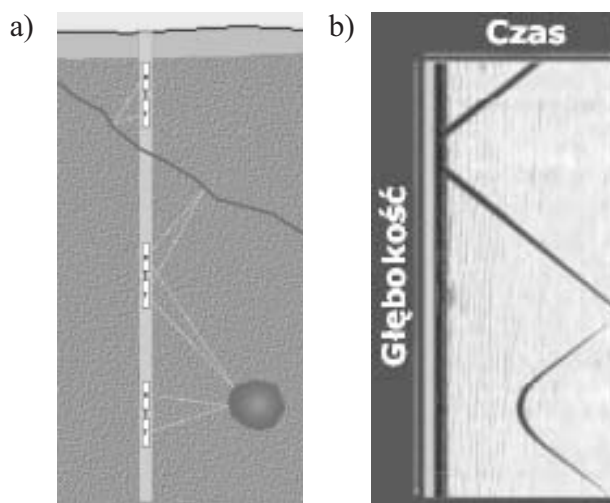
* Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków

** Mgr inż., *** Dr hab. inż., AGH Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska oraz Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: pilecki@min-pan.krakow.pl

Wprowadzenie

Georadar otworowy wprowadzony do właściwie wykonanego otworu w górotworze działa na podobnej zasadzie co systemy georadarowe na powierzchni. Podstawowa różnica polega na tym, że w przypadku georadarowych pomiarów powierzchniowych impulsy odbite pochodzą z jednej półprzestrzeni, natomiast w georadarze otworowym impulsy odbite odbierane są z pełnej przestrzeni wokół otworu. Fakt ten powoduje znaczne trudności w określeniu kierunku w przestrzeni wokół sondy georadaru otworowego, które nie posiadają dodatkowego urządzenia do określania takiego kierunku. Niezależnie od takich trudności można z dość wysoką dokładnością określić odległość do obiektu zaburzającego.

Interpretacja pomiarów georadarowych w otworze jest podobna do pomiarów powierzchniowych. Przykładowy obraz georadarowy nieciągłości przecinającej otwór oraz obiektu kulistego przedstawiono na rysunku 1. Nieciągłość jest przedstawiona w postaci dwóch linii sygnałów odbitych i zanikających ze wzrostem odległości. Obiekt kulisty pokazany jest jako hiperbola, podobnie jak w przypadku pomiarów powierzchniowych. W celu określenia kierunku położenia obiektu można zastosować schemat prześwietlenia między otworami lub powierzchnia–otwór, ewentualnie wykorzystać dane z innych pomiarów geofizycznych. Szersze informacje dotyczące metodyki badań georadarowych można znaleźć w pracach (Annan 2001, 1999; Karczewski 2007).



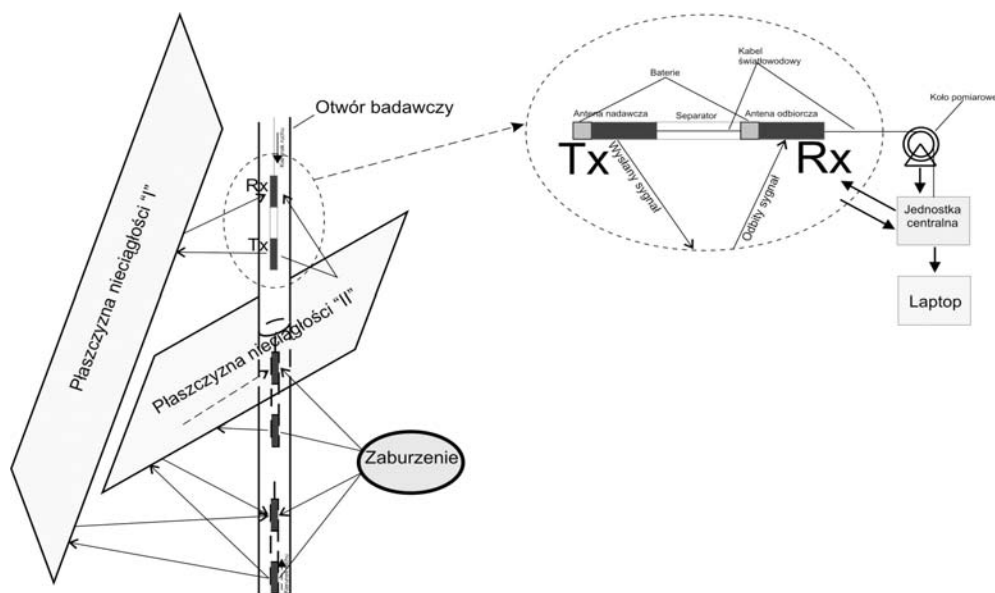
Rys. 1. Schemat pomiaru georadarem otworowym położenia nieciągłości i obiektu w kształcie kulistym
a) pomiar w otworze; b) radarogram (Mat. info. ...)

Fig. 1. Scheme of georadar borehole reflection survey and result of discontinuities and spherical object location a) measurement in the borehole; b) GPR record (Mat. info. ...)

1. Parametry techniczne georadaru otworowego

W skład przykładowego systemu georadaru otworowego ProEx firmy Malå GeoScience AB (Szwecja) wchodzi: sonda pomiarowa z anteną nadawczą Tx i odbiorczą Rx, kabel

światłowodowy łączący antenę z jednostką centralną, koło pomiarowe odległości sondy, jednostka centralna oraz komputer sterujący (rys. 2).



Rys. 2. Schemat systemu georadaru ProEx z anteną otworową

Fig. 2. Scheme of the GPR system ProEx with borehole antenna

Przedstawiona antena georadaru otworowego o częstotliwości 100 MHz składa się z dwóch podstawowych części – nadajnika (Tx) o długości 1,89 m i średnicy 40 mm oraz odbiornika (Rx) o długości 1,76 m i średnicy 40 mm (rys. 2). Obudowa zewnętrzna anteny, zbudowana z włókna szklanego, może wytrzymać ciśnienie 2 MPa. Wewnątrz obudowy zarówno odbiornika jak i nadajnika znajdują się anteny dipolowe (odpowiednio nadawcza i odbiorcza) oraz baterie umieszczone w jej dolnej części. Uruchomienie anteny nadawczej odbywa się za pomocą wtyczki włącznikowej, natomiast odbiorczej za pomocą wtyczki zawierającej kabel światłowodowy łączący nadajnik z odbiornikiem.

Nadajnik wyposażony jest w jedno złącze światłowodowe, które odbiera impuls wzbudzenia od jednostki głównej. Odbiornik wyposażony jest w trzy złącza służące do odbierania impulsu wzbudzenia od jednostki centralnej, przekazywania impulsu do nadajnika oraz wysyłania danych.

W technice profilowania refleksyjnego używa się dodatkowo twardej tuby o długości 1,0 m, wykonanej z włókna szklanego jako separatora, który dodatkowo osłania przewód światłowodowy doprowadzający sygnał wzbudzenia do nadajnika.

Kabel składa się z czterech przewodów światłowodowych – dwóch służących do przesyłania sygnałów do anteny nadawczej i odbiorczej, jednego służącego do przesyłania danych do jednostki centralnej oraz przewodu rezerwowego. Długość kabla światłowodowego wynosi 150 m. Kabel wzmocniony jest keowlarową membraną oraz wyposażony jest dodatkowo w zabezpieczenie (stalową linkę) przeciw rozerwaniu. Wytrzymałość kabla obliczona jest na około 650 kg.

Jednostka centralna ProEx jest podstawową częścią systemu georadaru otworowego; jej główną funkcją jest generowanie sygnałów fali elektromagnetycznej oraz rejestracja danych pomiarowych. Zasilana jest przez litowo-jonową baterię 7,5 V pozwalającą na pracę od 4–6 godzin. Wyposażona jest w sekcję analogową generującą sygnał. Posiada wewnętrzny komputer składający się z trzech równoległych 32-bitowych procesorów kontrolujących: taktowanie nadajnika i odbiornika, próbkowanie i odstępy czasowe, zapisywanie w pamięci danych w odpowiednim formacie oraz transmisję danych do komputera sterującego.

W tabelach 1 i 2 przedstawiono parametry techniczne nadajnika i odbiornika georadaru otworowego firmy Malå GeoScience AB użytego do pomiarów opisanych w dalszej części tej pracy, natomiast wszystkie elementy georadaru otworowego pokazano na fotografii 1.

TABELA 1. Specyfikacja techniczna nadajnika anteny 100 MHz georadaru otworowego

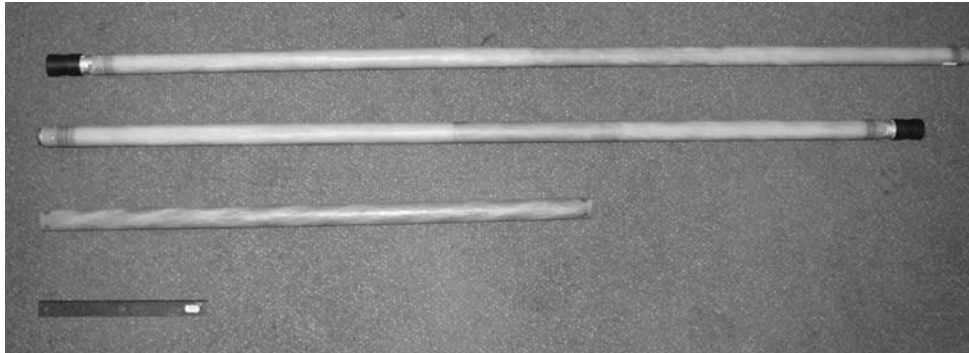
TABLE 1. Technical specifications of 100 MHz borehole antenna transmitter

Parametr nadajnika	Wartość
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	7,4V 6,4Ah litowo-jonowa
Nominalna częstotliwość centralna	100 MHz
Czas pracy	21 godzin

TABELA 2. Specyfikacja techniczna odbiornika anteny 100 MHz georadaru otworowego

TABLE 2. Technical specifications of 100 MHz borehole antenna receiver

Parametr odbiornika	Wartość
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	7,4V 6,4Ah litowo-jonowa
Przedwzmacniacz	18 [dB]
Całkowite wzmocnienie	~29 [dB]
Teoretyczny zakres dynamiczny	96 [dB] (16 bit)
Nominalna częstotliwość centralna	100 MHz
Czas pracy	7,6 godzin



Fot. 1. Widok elementów sondy georadarowej 100 MHz prod. Malå GeoScience AB
(od góry nadajnik, odbiornik, separator i element łączący)

Phot. 1. A view of 100 MHz borehole antenna elements of Malå GeoScience AB
(from top: transmitter, receiver, separator and connector)

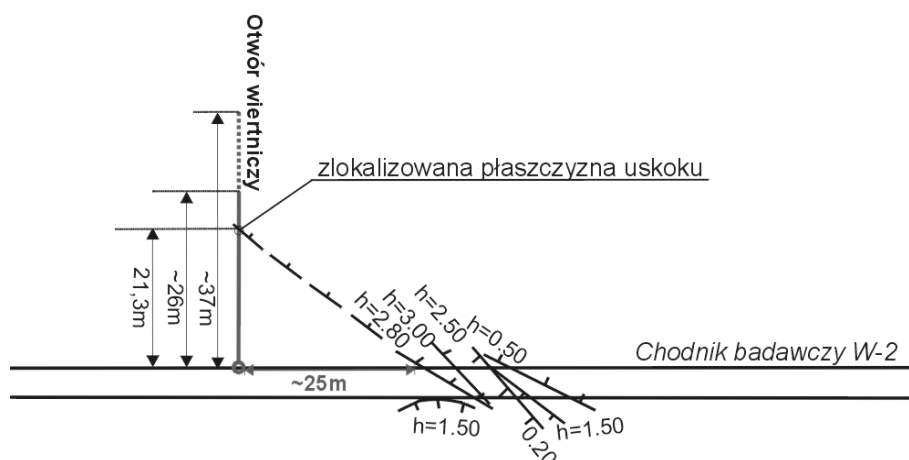
2. Rozpoznanie przebiegu uskoku w pokładzie węgla

Rejon badań zlokalizowany był w partii „W” pokładu 507 w KW S.A. Oddział KWK „Marcel”. Miąższość węgla w analizowanym rejonie wahała się od 2,80 do 3,60 m. Średnia grubość pokładu wynosiła 3,10 m. Nachylenie pokładu zmieniało się od 8° do 15° w kierunku na NW.

Pomiary przeprowadzono w chodniku badawczym W-2 ściany 29 w pokładzie 507 na głębokości około 320 m (rys. 3). Otwór technologiczny wykonano około 23 m na zachód od uskoku o rzucie 2,8 m po ociosie północnym (w parceli ściany W-2 w pokładzie 507) i zgodnie z nachyleniem pokładu. Długość otworu wyniosła 37 m, do badań wykorzystano około 26 m (pozostała część otworu została prawdopodobnie zamulona). Średnica otworu po zabezpieczeniu rurami PCV wynosiła 75 mm. W otworze w odległości 21,3 m od ociosu nawiercono strefę uskokową. W początkowej części otworu występuje węgiel, a na odcinku od początku strefy uskokowej (21,3 m) do końca otworu występuje iłowiec. W stropie i spągu pokładu 507 występuje również iłowiec.

Pomiary georadarem otworowym wykonano metodą refleksyjną, a parametry wykonanego pomiaru przedstawiono w tabeli 3. Sonda pomiarowa wprowadzana była do otworu badawczego za pomocą rurek plastikowych o długości 3,0 m łączonych przewodem gumowym (tzw. „ładoki”). Wyciąganie sondy odbywało się za pomocą linki stalowej (fot. 2). Badania radarem otworowym wykonano czterokrotnie, za każdym razem zmieniając parametry generowanego impulsu fali elektromagnetycznej. Przetworzenie zarejestrowanych echogramów georadarowych polegało na:

- wprowadzeniu poprawki statycznej,
- usunięciu tła,
- przekształceniu sygnałów do postaci o zerowej wartości średniej,
- wprowadzeniu zmiennego w czasie wzmocnienia sygnału,



Rys. 3. Schemat położenia otworu do pomiarów georadarem w chodniku badawczym w pokładzie 507

Fig. 3. Scheme of borehole position for GPR survey in the pilot tunnel in 507 coal bed

TABELA 3. Parametry pomiarowe zastosowane w badaniach georadarem otworowym

TABLE 3. The measurement parameters used in borehole georadar survey

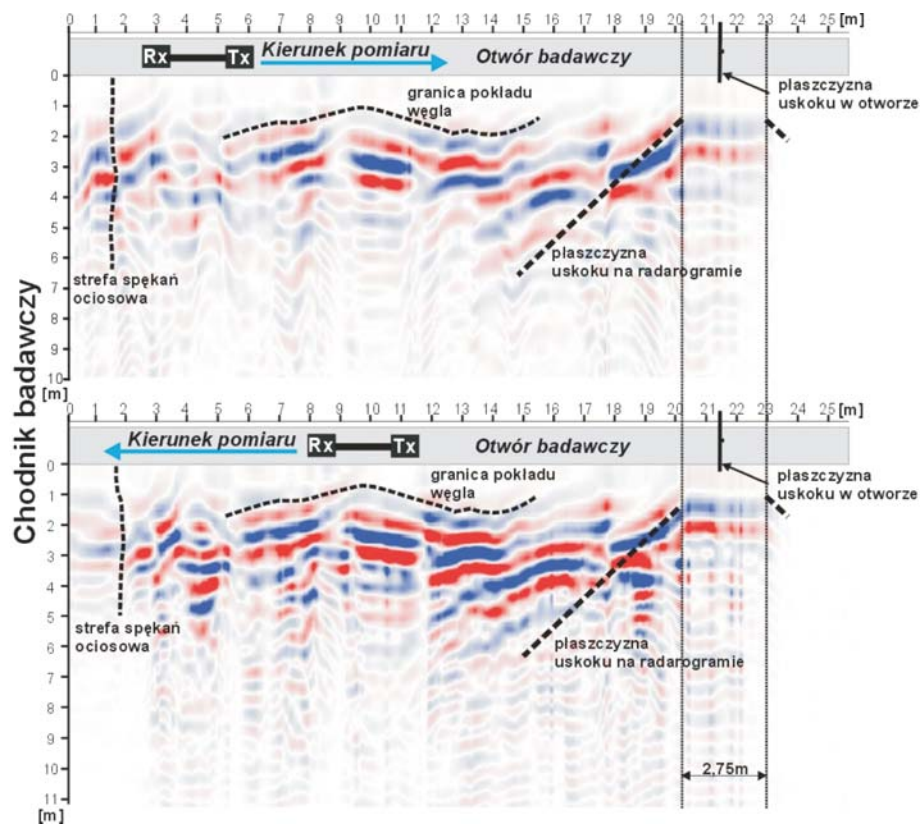
Parametr pomiarowy	Wartość
Częstotliwość	100 MHz
Odległość między anteną nadawczą a odbiorczą	2,75 m
Składanie próbek	64 krotne
Interwał między trasami	25 cm

- filtracji częstotliwościowej,
- dekonwolucji sygnału.

Do przetwarzania danych wykorzystano program RadExplorer Version 1.41_GX.

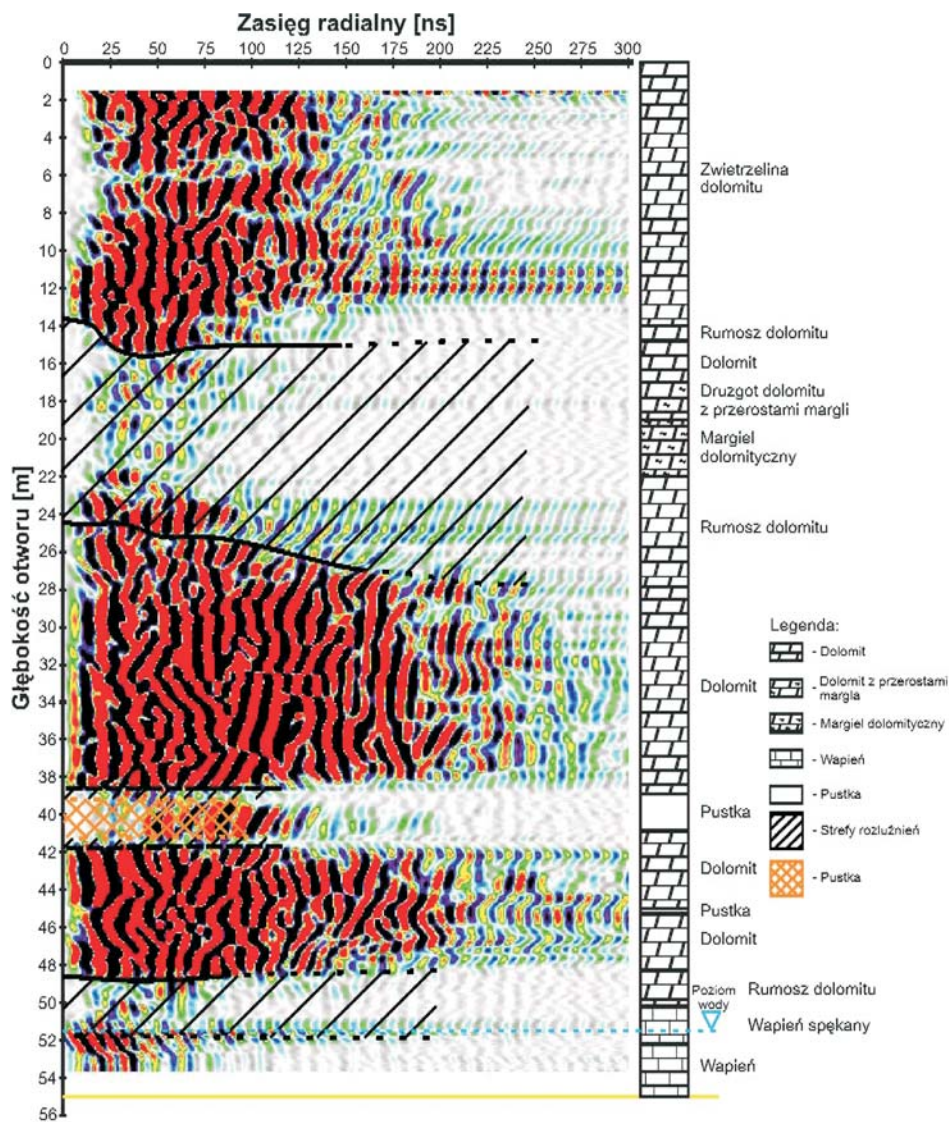
Wyniki pomiarów zilustrowano na rysunku 4, gdzie zaznaczono zidentyfikowaną strefę uskokuwą w pokładzie 507. W warunkach, gdy nadajnik znajdował się w warstwie ilowca, a odbiornik w pokładzie węgla sygnał georadarowy został silnie rozproszony. Na radarogramie zaobserwowano wyprostowanie sygnału w kierunku równoległym do otworu i silne wytłumienie wyższych częstotliwości. Pełny obraz georadarowy prawdopodobnie można było ponownie uzyskać po przejściu odbiornika do strefy uskokuwej (warstwy ilowca), lecz było to niemożliwe ze względu na ograniczoną długość otworu.

Użyteczny sygnał z anteny 100 MHz osiągał głębokość penetracji wokół wykonanego otworu badawczego do około 7,0–8,0 m. Ograniczony zasięg dla tej anteny należy wytłumaczyć silnym wytłumieniem energii fali elektromagnetycznej od granicy pokład węgla – skała płonna (ilowiec). Przypuszcza się, iż pomiędzy pokładem węgla a warstwą ilowców występował silny gradient przewodności elektrycznej.



Rys. 4. Radarogram z badań georadarem otworowym z zaznaczonym odwzorowaniem strefy uskokuwej, ociosowej strefy spękań i granicy pokładu 507

Fig. 4. GPR record from borehole georadar survey with marked fault zone, side wall's fracture zone, and the border of 507 coal bed



Rys. 5. Radarogram z otworowych badań georadarowych z zaznaczoną pustką i strefami rozluźnień na zapadliskowym terenie pogórnym płytkiej eksploatacji rud cynku i ołowiu w niecce bytomskiej

Fig. 5. GPR record from borehole survey with marked empties and fracture zones on the post mining terrain of shallow zinc and lead ores exploitation in bytomaska syncline



Fot. 2. Wyprowadzanie sondy georadarowej z otworu badawczego

Phot. 2. Removal of the GPR antenna from the borehole

Na radarogramie zaznacza się również ociosowa strefa spękań, której szerokość wynosi od 1,3 do 1,5 m.

3. Rozpoznanie położenia pustek i stref rozluźnień na terenach płytkiej, historycznej eksploatacji rud cynku i ołowiu

Badania georadarem otworowym wykonano na terenie pogórnym w niecce bytomskiej, na którym prowadzona była intensywna, płytka eksploatacja złóż cynku i ołowiu w pobliżu miasta Piekary Śl.

Warunki geologiczne w przypowierzchniowych partiach górotworu zostały rozpoznane wierceńiami. Do głębokości około 5 m stwierdzono występowanie zwietrzelin skał triasowych wykształconych w postaci gruntów gliniastych i miękkich gruntów skalistych. Głębiej zalegają margle, wapień i dolomity.

W rejonie badań georadarowych w głębszym podłożu występuje seria dolomitów kruszonośnych, zawierająca złoża rud cynku, ołowiu, żelaza i srebra. Z materiałów geologiczno-górnicyznych wynika, że okruszczowane są partie skał zalegających na głębokościach od kilkunastu do 70 metrów.

Metodyka pomiarowa była podobna do tej opisanej w rozdziale 2, z tą podstawową różnicą, że pomiar wykonano w otworze pionowym. Zastosowano ten sam sprzęt pomiarowy, a wybrane parametry pomiarowe przedstawiono w tabeli 4.

Na radarogramie stwierdzono występowanie dużej strefy rozluźnienia na głębokości od 15 do 24 m oraz mniejszej strefy rozluźnienia na głębokości 48,5–51,5 m (rys. 5). Ponadto na głębokości 38,5–41,5 m zaobserwowano pustkę o wysokości 3 metrów. Strefy rozluźnienia są częściowo wypełnione materiałem ilastym, stąd stosunkowo silne tłumienie sygnału.

TABELA 4. Parametry pomiarowe zastosowane w badaniach georadarem otworowym

TABLE 4. The measurement parameters used in borehole georadar survey

Nazwa parametru	Wartość
Częstotliwość próbkowania	1228 MHz
Okno czasowe	508 ns
Interwał pomiędzy trasami	0,05 m
Składanie	64
Liczba tras	1082

W pustce obserwuje się sygnały odbite prawdopodobnie od powierzchni skalnej. Geometria pustki na radarogramie – w tym jej wysokość – odwzorowuje wyrobisko chodnikowe. Wyżej położona strefa rozluźnienia jest silnie rozwinięta i może być związana ze zrobami wytworzonymi w sąsiedztwie wyrobiska. Niżej położona strefa rozluźnienia jest mniejsza i można ją porównać do wyrobiska chodnikowego wypełnionego fragmentami skał i materiałem ilastym. W spągu tej strefy występuje poziom wodonośny zaznaczony na radarogramie charakterystycznymi powtarzalnymi, pionowymi refleksami.

Podsumowanie

W pracy omówiono wyniki eksperymentów mających na celu ocenę efektywności rozpoznania położenia nieciągłości oraz pustek i stref rozluźnień w górotworze za pomocą georadaru otworowego. Do badań wykorzystano georadar otworowy produkcji szwedzkiej firmy Malå GeoScience AB z anteną o częstotliwości 100 MHz. Badania rozpoznania położenia uskoku w pokładzie węgla przeprowadzono w warunkach dołowych w jednym z wyrobisk górniczych KWK „Marcel”. Badania rozpoznania położenia pustek i stref rozluźnień przeprowadzono na terenie pogórnym płytkiej eksploatacji rud cynku i ołowiu w niecce bytomskiej koło Piekar Śląskich.

W przypadku badań w pokładzie węgla obraz georadarowy dał jednoznaczne wskazanie położenia uskoku. Związane to było z przechodzeniem anteny georadarowej przez granicę między węglem a iłowcem. Uzyskano również informację o położeniu granicy ociosowej strefy spękań, a także granicy litologicznej węgiel-skała płonna. W przypadku badań w rozpoznaniu położenia pustek i stref rozluźnienia w dolomitach kruszonośnych, zarejestrowane radarogramy wyraźnie pokazują głębokość ich położenia oraz odległość od otworu. Występuje trudność w określeniu kierunku położenia rozpoznawanych obiektów. W takich przypadkach, dla mniejszych głębokości, można uściślać lokalizację obiektów dodatkowymi badaniami wykonanymi na powierzchni terenu, np. grawimetrycznymi, sejsmicznymi lub georadarowymi powierzchniowymi. Na większych głębokościach należy zastosować urządzenie otworowe instalowane na kablu lub sondzie georadarowej pozwalające na określenie kierunków, przy jednoczesnym ukierunkowaniu wysyłanych sygnałów georadarowych.

Uzyskane wyniki są obiecujące i zachęcają do zaprojektowania dalszych badań w zróżnicowanych warunkach geologiczno-górnictwowych.

Literatura

Annan A.P., 2001 – Ground Penetrating Radar: Workshop Notes; Sensors and Software, Ontario.

Annan A.P., 1999 – Practical Processing of GPR Data: Workshop Notes; Sensors and Software, Ontario.

Karczewski J., 2007 – Zarys metody georadarowej. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH,
Kraków.

Materiały informacyjne firmy Malá GeoScience AB.

