

Tomasz ŁĄTKA\*, Zenon PILECKI\*\*

## ***Zalety i ograniczenia otworowej metody georadarowej w badaniach geoinżynierskich***

Streszczenie: Otworowa metoda georadarowa BGPR należy do grupy metod falowych. Technika pomiaru BGPR jest bardzo podobna do techniki sejsmicznego profilowania refleksyjnego. Stosowane procedury przetwarzania i interpretacji danych pomiarowych są również bardzo zbliżone do procedur sejsmiki refleksyjnej. Otworowa metoda georadarowa jest użyteczna w badaniu budowy i właściwości ośrodka geologicznego, a zwłaszcza sprawdza się przy identyfikacji zaburzeń geologiczno-tektonicznych, lokalizacji pustek i stref rozluźnień różnego pochodzenia, lokalizacji podziemnych obiektów infrastruktury budowlanej oraz innych obiektów, rozpoznania zawodnienia ośrodka oraz przepływu zanieczyszczeń w ośrodku geologicznym lub kontroli stateczności obiektów geoinżynierskich.

Praca ma charakter przeglądowy. W artykule scharakteryzowano zakres dotychczasowych zastosowań otworowej metody georadarowej w zagadnieniach geoinżynierskich. Podkreślono podstawowe zasady metodyki badań w ośrodku geologicznym. Opisano przykład georadaru otworowego produkcji Malå GeoScience AB (Szwecja). W szerszym ujęciu omówione zostały zalety i ograniczenia BGPR. Wyróżniono ograniczenia o charakterze pomiarowym oraz interpretacyjnym. W podsumowaniu podkreślono nowe możliwości rozwoju BGPR.

Słowa kluczowe: otworowa metoda georadarowa BGPR, metodyka badań georadarowych, zalety i ograniczenia BGPR

## ***Advantages and limitations of borehole GPR method in the geoenvironmental investigations***

Abstract: The Borehole Ground Penetrating Radar (BGPR) method belongs to the wave methods. The measuring technique of this method is very similar to the seismic reflection profiling technique. Processing and interpretation of the radar data are also very similar to the procedures for the seismic reflection method. The BGPR method is useful in the measurements of structure and properties of the geological medium, and it is especially suited for the identification of geological and tectonic dislocations, for the location and detection of voids or fracture zones of different origin, for the location of underground building infrastructure and other facilities, for the identification

\* Mgr inż., United Oilfield Services.

\*\* Dr hab. inż., prof. IGSMiE PAN, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: pilecki@min-pan.krakow.pl.

of watered ground and the flow of pollutants in the geological medium, or for stability control of geo-engineering objects.

This paper presents a review of selected issues regarding the BGPR method. In the paper, the authors described the range of existing applications in geo-engineering of the BGPR method. The basic principles of the research methodology in the geological medium were emphasized. Example of BGPR equipment made by Malå Geoscience AB (Sweden) was also described. More broadly, the advantages and limitations of the BGPR method were discussed. The authors introduced a division of limitations for measurement and interpretation. The new opportunities for the BGPR method were emphasized in the summary.

Keywords: Borehole Ground Penetrating Radar (BGPR), research methodology, BGPR advantages and limitations

## **Wprowadzenie**

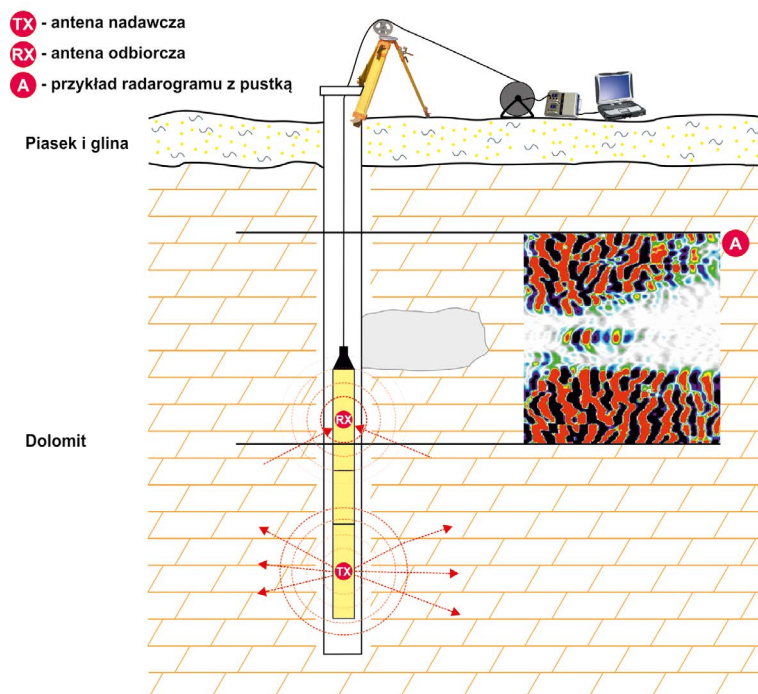
Otworowa metoda georadarowa BGPR (ang. *Borehole Ground Penetrating Radar*) jest jedną z metod geofizycznych służących do pozyskiwania informacji o budowie i właściwościach ośrodka geologicznego. Technika pomiaru georadarem otworowym (rys. 1) polega na ogólnych zasadach, analogicznie jak dla georadaru powierzchniowego, które zostały opisane w wielu pracach m.in. Conyera i Goodmana (1997); Annana (2003), Bristowa i Jola (2003); Danielsa (2004); Karczewskiego (2007), Jola (2009) lub Karczewskiego i in. (2012).

Pierwsze próby zastosowania georadaru otworowego nie są jednoznacznie przedstawione w literaturze. Przypuszczalnie pierwsze 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. W 1978 roku Tarantolo i Unterberger 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 w eksploatacji pokładu węgla w USA (Suhler i in. 1978). W 1982 r. w Instytucie Southwest Research skonstruowano jedną z pierwszych kierunkowych anten otworowych (Suhler i Owen 1983). W 1985 r. firma SGAB (Swedish Geological Company) skonstruowała własną kierunkową antenę georadaru otworowego RAMAC (materiały Malå GeoScience AB).

W kolejnych latach nastąpił rozwój otworowej metody georadarowej w wielu zagadnieniach geoinżynierskich m.in. 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 stateczności i lokalizacji tuneli (Olhoeft 1988; Greenfield 1988; Cardarelli i in. 2003); 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 sedymentologii (Davis i Annan 1989; Hsi-Tien 1989).

W ogólności zakres dotychczasowych zastosowań otworowej metody georadarowej w zagadnieniach geoinżynierskich można scharakteryzować w następujący sposób:

- identyfikacja zaburzeń geologiczno-tektonicznych,
- lokalizacja pustek i stref rozluźnień,
- lokalizacja podziemnych obiektów infrastruktury budowlanej oraz innych obiektów,
- rozpoznanie zawodnienia oraz przepływu zanieczyszczeń w ośrodku geologicznym,



Rys. 1. Schemat pomiarowy otworowej metody georadarowej w pojedynczym otworze

Fig. 1. Scheme of borehole GPR measurements in a single borehole

— kontrola stateczności obiektów geoinżynierskich (zapór wodnych, tuneli i innych obiektów podziemnych).

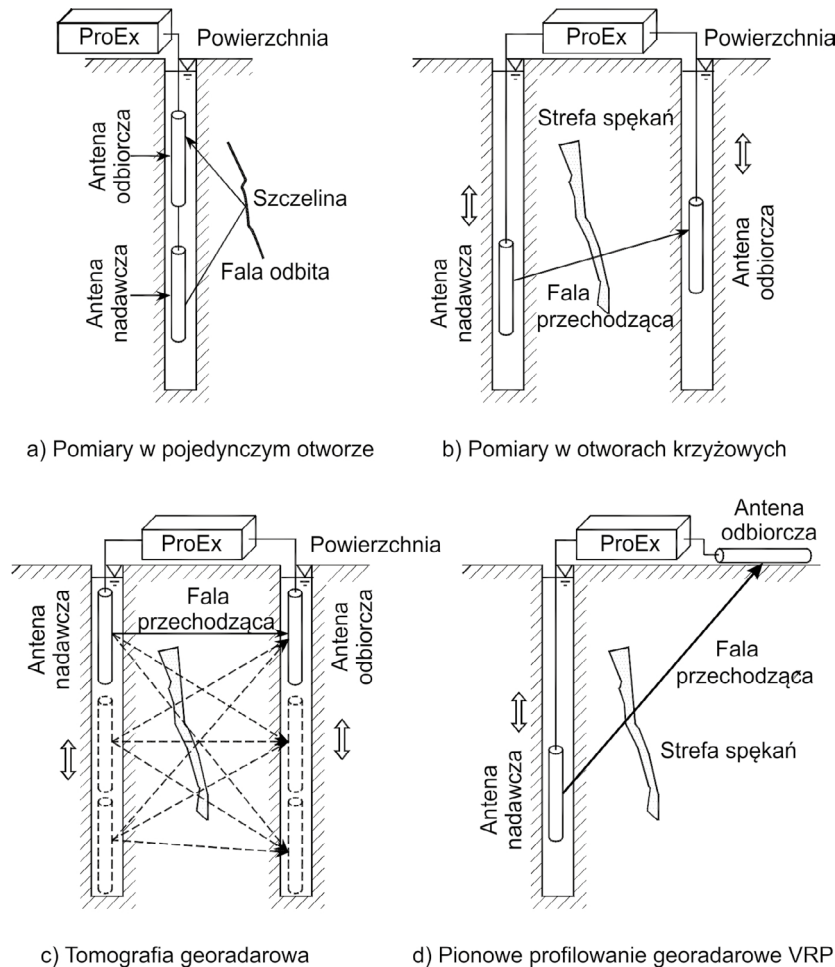
W pracy omówiono na wstępie podstawowe zasady metodyki badań otworową metodą georadarową. W części zasadniczej przedstawiono możliwie szeroko zalety i ograniczenia tej metody. W podsumowaniu zwrócono uwagę na nowe możliwości wykorzystania BGPR w zagadnieniach geoinżynierskich.

### 1. Podstawowe zasady metodyki badań BGPR

BGPR należy do grupy metod falowych. Technika pomiaru otworowej metody georadarowej jest bardzo podobna do techniki sejsmicznego profilowania refleksyjnego. Stosowane procedury przetwarzania i interpretacji danych pomiarowych są również bardzo zbliżone do procedur sejsmiki refleksyjnej. Powszechnie używany do przetwarzania i interpretacji program Reflex-Win (2013) jest wykorzystywany zarówno w metodzie georadarowej, jak i sejsmicznej. W odróżnieniu do badań sejsmicznych, anteny georadarowe nie muszą być w bezpośrednim kontakcie z ośrodkiem. Jednakże odległość między powierzchnią ośrodka a anteną powinna być jak najmniejsza, aby uniknąć strat energii wysyłanego impulsu.

Schematy pomiarowe BGPR mogą być różne. Najczęściej pomiary georadarem otworowym są przeprowadzane w pojedynczym otworze. Mogą być również przeprowadzane po-

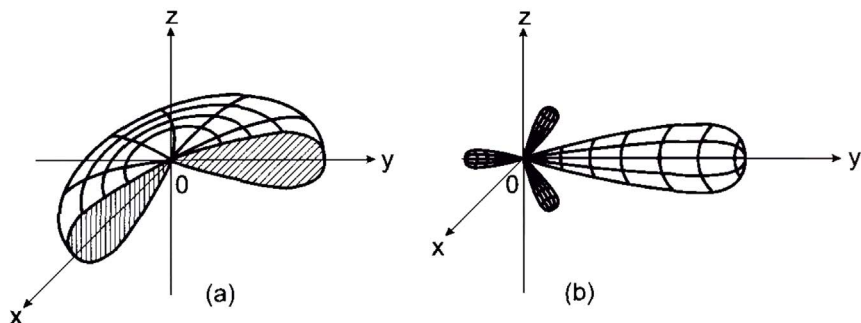
między dwoma otworami (tomografia międzyotworowa), pomiędzy otworem a powierzchnią terenu (pionowe profilowanie georadarowe VRP (ang. *Vertical Radar Profiling*) lub pomiędzy otworem a wyrobiskiem (rys. 2).



Rys. 2. Schematy pomiarowe georadarem otworowym (Yelf 2007)

Fig. 2. Measurement variations with BGPR (Yelf 2007)

Typowe georadarowe anteny otworowe posiadają dookólną charakterystykę emitowanego pola falowego, natomiast ekranowane anteny georadarowe stosowane na powierzchni terenu posiadają charakterystykę szpilkową (rys. 3). Produkowane są również otworowe anteny kierunkowe, lecz ich koszt wielokrotnie przekracza koszt anteny dookólnej. W celu osiągnięcia kierunkowości anten otworowych istnieje kilka rozwiązań (Lytle i Laine 1978; Eisenburger i in. 1993; Eisenburger i Gundelach 1999; van Dongen i in. 2002). W celu osiągnięcia kierunkowości sygnału w antenach otworowych została zastosowana antena dipolowa z reflektorem. Jednakże antena musi być obracana mechanicznie, co sprawia że system ten jest skomplikowany. Ten typ anten może zostać praktycznie zastosowany tylko



Rys. 3. Przykładowe charakterystyki promieniowania anten a) dookólna i b) szpilkowa (Szóstka 2001)

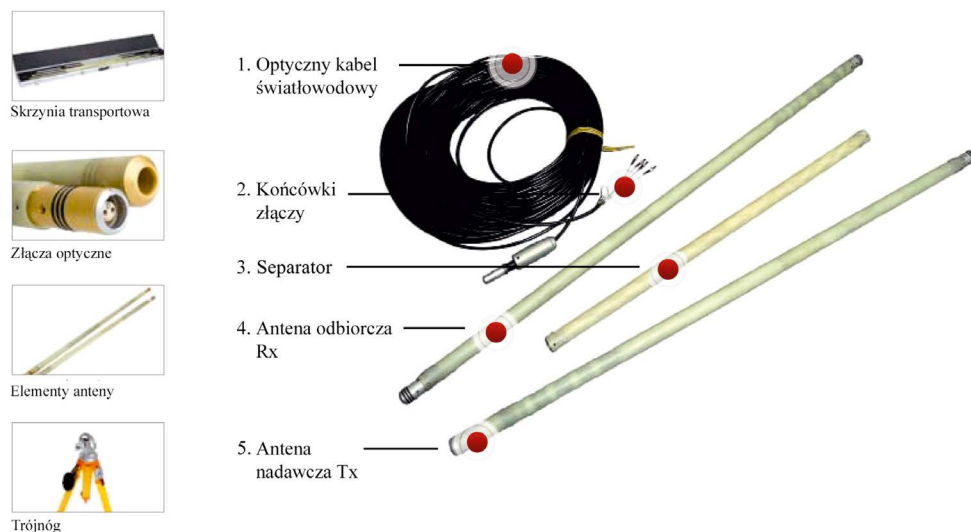
Fig. 3. Examples of antenna radiation characteristics a) omnidirectional and b) directive pattern (Szóstka 2001)

w otworach o relatywnie dużej średnicy (van Dongen i in. 2002), a metalowy reflektor obniża efektywność anteny.

Większość kierunkowych anten otworowych składa się z tzw. szyku antenowego Adcocka (1959) lub skrzyżowanych magnetycznych anten pętlowych, w których kierunkowość osiągana jest przez odpowiednie przetwarzanie sygnału (Olsson i in. 1992). W szyku antenowym Adcocka kierunkowość sygnału uzyskuje się przez pomiar różnicy fazy pomiędzy kilkoma równoległymi antenami dipolowymi. Natomiast poprzez wykorzystanie pary anten pętlowych możliwe jest kierowanie kątem maksymalnej amplitudy w celu oszacowania kierunku zarejestrowanego sygnału (Nickel i in 1983). Szersze informacje dotyczące wzajemnego oddziaływania anten oraz ośrodka geologicznego można znaleźć w pracach Lytle i Laine (1978), Kinga i Smitha (1981) oraz Scotta i Changa (1984).

Pomiary BGPR przeprowadzane są zarówno w pustych otworach, jak i w otworach wypełnionych wodą lub płuczką. W związku z tym elektroniczne elementy anteny nadawczej oraz odbiorczej zostały umieszczone w wodoodpornej obudowie. Przyjmuje się, że punktem pomiarowym jest środek odległości pomiędzy anteną odbiorczą i nadawczą. Na rysunku 4 została przedstawiona przykładowa sonda otworowa o częstotliwości 100 MHz produkcji szwedzkiej firmy Malå GeoScience AB, natomiast w tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry anten o częstotliwości środkowej 100 MHz oraz 250 MHz produkcji Malå GeoScience AB. Kanadyjska firma Sensor & Software oferuje anteny otworowe pulseEKKO o częstotliwościach 50, 100 oraz 200 MHz, szwedzka firma Geoscanners AB posiada w swojej ofercie anteny otworowe o częstotliwości środkowej 119,5 MHz (BA-100), 485 MHz (BA-500) oraz 692 MHz (BA-1000). Z kolei inna szwedzka firma Radarteam Sweden AB oferuje antenę otworową TW-100 o częstotliwości środkowej 100 MHz. Ciekawe rozwiązanie posiada włoska firma IDS, która oprócz standardowych otworowych anten biostatycznych o częstotliwościach środkowych 150 (BA-150), 300 (BA-300) oraz 600 MHz (BA-600), wprowadziła autonomiczne anteny otworowe o tych samych częstotliwościach. Anteny te wyposażone są w zintegrowany z nimi system rejestrujący, który zapisuje pomiary w pamięci typu flash. W tabeli 2 porównano maksymalną głębokość pomiarów komercyjnych otworowych anten georadarowych.

Ze względu na skomplikowany sposób emisji, propagacji i rejestracji fal georadarowych w otworze w niejednorodnym ośrodku geologicznym podjęto różnego rodzaju próby analizy



Rys. 4. Elementy sondy georadaru otworowego z anteną o częstotliwości 100 MHz (materiały Malå GeoScience AB)

Fig. 4. Elements of BGPR probe of a 100 MHz frequency (Malå GeoScience AB materials)

takiego pola falowego za pomocą modelowania numerycznego (Teixeira i Chew 2000; Holliger i Bergmann 2002; Liu i Sato 2005; Irving i Knight 2006; Ernst i in. 2006). Numeryczne modele są wykorzystywane do weryfikacji różnego rodzaju badań BGPR.

## 2. Zalety otworowej metody georadarowej

Metoda BGPR charakteryzuje się typowymi zaletami przypisanymi dla powierzchniowej metody georadarowej, a dodatkowo umożliwia głębszą penetrację ośrodka poprzez otwór badawczy.

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).

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).

Z dotychczasowych doświadczeń autorów z badań w ośrodkach skalnych i gruntowych (Łątka i in. 2010; Pilecki i in. 2011; Pilecki i in. 2013; Pilecki 2014; Łątka 2014) BGPR charakteryzuje się powtarzalnością wyników. Kolejne pomiary w tym samym otworze wykonane anteną dookólną dają niemal identyczne zobrazowania (rys. 5). Wyniki pomiaru przy przesuwaniu sondy w dół otworu są identyczne jak przy przesuwaniu w górę, do powierzch-

TABELA 1. Parametry techniczne sond georadaru otworowego produkcji Malå GeoScience AB (materiały Malå GeoScience AB)

TABLE 1. Technical specifications of BGPR probes made by Malå Geoscience AB (Malå GeoScience AB materials)

Parametr sondy otworowej	Slim Borehole 100 MHz	Slim Borehole 250 MHz
Średnica	40 mm	48 mm
Całkowita długość zestawu anteny	4,65 m	3,08 m
Odległość Tx – Rx	2,77 m	1,71 m
Separator	1 m	0,5 m
Antena nadawcza sondy otworowej	Slim Borehole 100 MHz	Slim Borehole 250 MHz
Waga	3,3 kg	4,75 kg
Długość elementu anteny	1,89 m	1,29 m
Czas pracy	21 godz.	19 godz.
Częstotliwość centralna	100 MHz	250 MHz
Antena odbiorcza sondy otworowej	Slim Borehole 100 MHz	Slim Borehole 250 MHz
Waga	3,6 kg	4,75 kg
Długość elementu anteny	1,76 m	1,29 m
Czas pracy	7,6 godz.	7,6 godz.
Częstotliwość centralna	100 MHz	250 MHz

TABELA 2. Porównanie maksymalnych głębokości pomiarowych otworowych anten georadarowych różnych producentów

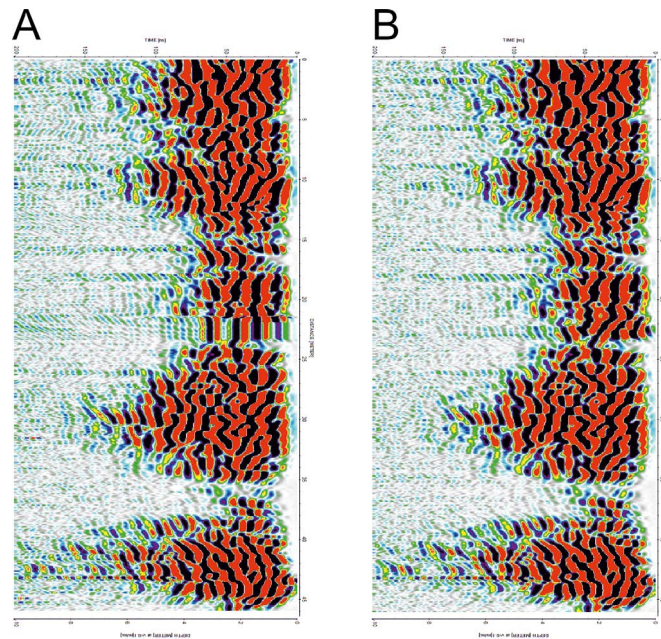
TABLE 2. Comparison of maximum depth of measurements with BGPR antennas of different manufacturers

Producent	Maksymalna głębokość pomiaru
Malå Geoscience AB (Szwecja)	150 m (do 2500 m na specjalne zamówienie)
Sensor & Software (Kanada)	40 m
Geoscanners AB (Szwecja)	30 do 150 m
Radarteam (Szwecja)	30 do 100 m
IDS (Włochy)	40 m (w wersji autonomicznej >1000 m)

ni terenu. BGPR jest wrażliwa na zawodnienie w ośrodku (rys. 6). Radarogram w ośrodku zawodnionym jest odfiltrowany z wyższych częstotliwości, a zasięg penetracji zmniejszony. Najczęściej wejście sondy poniżej poziomu wody w otworze charakteryzuje się wyraźnym pogorszeniem rozdzielczości obrazu.

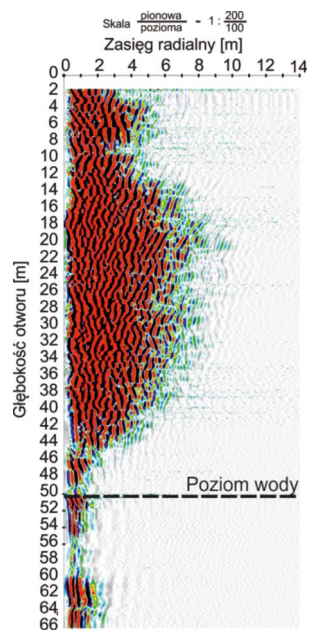
Metoda pozwala również na czytelne wyróżnienie granic litologicznych oraz nieciągłości, a zwłaszcza uskoków. Silny kontrast właściwości elektromagnetycznych w ośrodku, związany np. z przebiegiem uskoku ma wpływ na zaburzenia w propagacji fal elektromagnetycznych. Z własnych doświadczeń (Pilecki i in. 2011; Pilecki 2014) wynika, że przy przechodzeniu sondą georadarową przez strefę uskokową decydujący wpływ na zmiany na radarogramie ma zjawisko silnego odbicia impulsów georadarowych od powierzchni uskoku, które znacząco ogranicza energię impulsów dochodzących do anteny odbiorczej (rys. 7).

BGPR w porównaniu do innych otworowych metod geofizycznych, których zasięg rozpoznania z reguły nie przekracza kilkudziesięciu centymetrów, ma zdecydowanie większy



Rys. 5. Radarogram z otworu badawczego (A) oraz otrzymany z tego samego otworu w kolejnym dniu pomiarów (B) przedstawiające powtarzalność otworowych pomiarów georadarowych w rejonie Niecki Bytomskiej

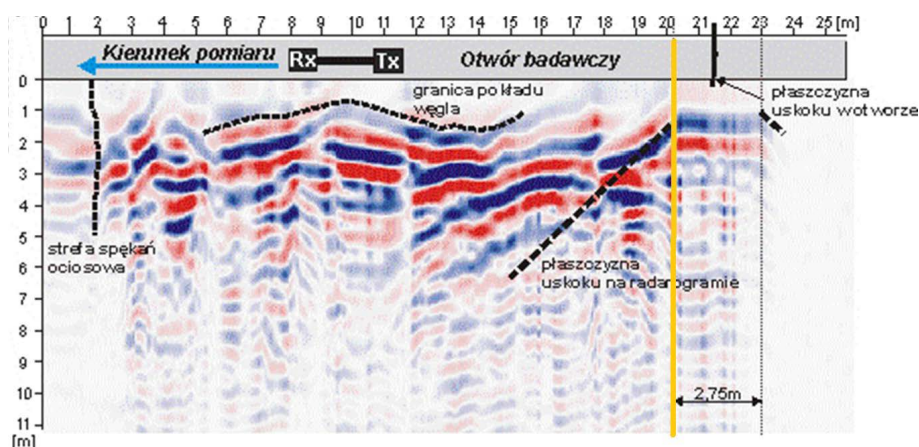
Fig. 5. Radarogram from the borehole (A) and elaborated from the same borehole the next day (B) showing repeatability of the BGPR measurements in area of the Bytom basin



Rys. 6. Radarogram z otworu badawczego silnie zawadnionego poniżej 50 m z rejonu Niecki Bytomskiej

Fig. 6. Radarogram from the borehole strongly watered below 50 m from area of the Bytom basin





Rys. 7. Radarogram z otworu badawczego przy przejściu przez strefę uskokuwą w KWK Marcel (żółtą linią zaznaczono granicę wyraźnych zmian refleksów) (Łątka i in. 2010)

Fig. 7. Radarogram from the borehole with fault zone in the Marcel coal mine (yellow line denotes the border of distinct reflex changes) (Łątka i in. 2010)

zasięg penetracji wokół otworu. Najczęściej stosowane są anteny o częstotliwości 100 MHz, co pozwala na osiągnięcie zasięgu penetracji w granicach od 5 do ok. kilkunastu metrów w typowych ośrodkach gruntowych i skalnych, a np. w skałach krystalicznych w granicach od 20 do 50 metrów.

### 3. Ograniczenia otworowej metody georadarowej

Ograniczenia otworowej metody georadarowej można podzielić na pomiarowe i interpretacyjne.

Do pierwszej grupy ograniczeń należy zaliczyć konieczność 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 ok. 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).

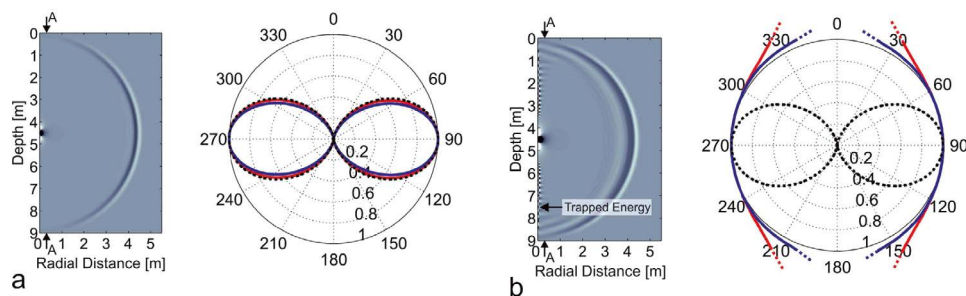
Pomimo iż prędkość fali elektromagnetycznej może być mierzona różnymi sposobami, zazwyczaj przyjmuje się ją na podstawie pomiarów terenowych (mierzona w jednym miejscu i zakładana dla całego obszaru badań poprzez wykorzystanie zestawu anten powierzchniowych metodą WARR). Wraz ze zmianą warunków pomiarowych, założenie takie generuje większe ryzyko popełnienia błędu.

W georadarze otworowym, w którym kierunkowość osiągniata jest przez zastosowanie wielu anten składowych, zachodzi wzajemne oddziaływanie tych anten między sobą (Nickel

i in. 1983; Olsson i in. 1992; Eisenburger i in. 1993; Eisenburger i Gundelach 1999). Powoduje to zniekształcenie fazy sygnału, a w konsekwencji zmniejszenie dokładności określenia anomalii. Dodatkowo wymagają one zastosowania dodatkowych wzmacniaczy, które również mogą powodować zakłócenia fazy sygnału. Sato i Takayama (2007) zaproponowali zastosowanie optycznych czujników pola elektrycznego w celu wyeliminowania wpływu dodatkowych podzespołów, takich jak na przykład wzmacniacz wstępny.

W zakresie 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 8 przedstawiono porównanie obliczeń numerycznych charakterystyki promieniowania fali elektromagnetycznej w ośrodku jednorodnym w otworze wiertniczym wypełnionym powietrzem (a) oraz



Rys. 8. Porównanie charakterystyki promieniowania anteny w otworze wiertniczym wypełnionym powietrzem (a) oraz wodą (b) (Ernst i in. 2006)

Fig. 8. Comparison of antenna radiation pattern in air-filled (a) and water-filled (b) boreholes (Ernst i in. 2006)

wodą (b). Widać wyraźnie, że znacząca część energii w otworze zawodnionym została „uwięziona” w otworze.

## **Podsumowanie**

Otworowa metoda georadarowa jest stosunkowo szybko rozwijana w ostatnich latach od strony konstrukcyjnej, metodycznej i nowych zastosowań. Dotychczasowa praktyka pokazuje, że zobrazowanie ośrodka geologicznego tą metodą ma charakter jakościowy. Obecne badania wskazują na możliwość prowadzenia również ilościowej interpretacji danych georadarowych (Slob i in. 2010). Możliwość ilościowej analizy zarejestrowanej odpowiedzi impulsowej może okazać się kluczowa dla dalszego rozwoju tej metody.

BGPR ma szerokie możliwości zastosowania w zagadnieniach geoinżynierskich. Na podkreślenie zasługują rozwijane zastosowania w górnictwie do rozpoznania zagrożeń naturalnych towarzyszących eksploatacji (Pilecki i in. 2011; Pilecki i in. 2013).

Badania georadarem otworowym charakteryzują się zdecydowanie większym zasięgiem penetracji wokół otworu w porównaniu do innych otworowych metod geofizycznych, których zasięg rozpoznania z reguły nie przekracza kilkudziesięciu centymetrów.

BGPR posiada charakterystyczne zalety metody georadarowej, lecz istnieją ograniczenia, które powodują, że właściwe opracowanie radarogramów jest bardzo skomplikowane. W artykule zwrócono w szczególności uwagę na ograniczenia interpretacyjne, które mogą być istotną przeszkodą, nawet dla osób z dużym doświadczeniem w posługiwaniu się metodą.

Podkreślenia wymaga również strona ekonomiczna badań BGPR. Metoda ta jest kilkakrotnie tańsza od klasycznych metod sejsmicznej lub elektrooporowej, głównie ze względu na szybkość i prostotę realizacji pomiarów.

## **Literatura**

- Adcock, R. 1959. Radio direction finding in three dimensions. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 20, s. 7–11.
- 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.
- Bristow, C. i Jol, H. 2003. *Ground penetrating radar in sediments*. Geological Society of London.
- Cardarelli E. i in. 2003 – Cardarelli, E., Marrone, C. i Orlando, L. 2003. Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods. *Journal of Applied Geophysics* vol. 52, s. 93–102.
- Chang, H.T. 1986. A downhole system for fracture detection. *Geothermal Resources Council, Transactions* vol. 10, Sept.
- Chang P. i in. 2006 – Chang, P., Alumbaugh, D., Brainard, J. i Hall, L. 2006. Cross-borehole ground-penetrating radar for monitoring and imaging solute transport within the vadose zone. *Water Resources Research* vol. 42, W10413.
- Charlton, M.B. 2008. Principles of ground-penetrating radar for soil moisture assessment. *MBCharlton.com Research Note* 3, 2nd June 2008.
- Conyers, L. i Goodman, D. 1997. *Ground-penetrating radar: An introduction for archaeologists*. AltaMira Press.
- 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.

- Daniels, D.J. ed. 2004. *Ground penetrating radar*, 2nd ed.: Institution of Engineering and Technology.
- Davis, J.L. i Annan, A.P. 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37, s. 531–551.
- Eisenburger, D. i Gundelach V. 1999. GPR measurements for determining structures within salt deposits: Proceedings of the Canadian Institute of Mining Conference on Geophysical Applications in Potash Mines.
- Eisenburger D. i in. 1993 – Eisenburger, D., Sender, F. i Thierbach, R. 1993. Borehole radar – An efficient geophysical tool to aid in the planning of salt caverns and mines. 7th Symposium on Salt, Proceedings, s. 279–284.
- Ernst, J.R., Holliger, K., Maurer, H. i Green, A.G. 2006. Realistic FDTD modeling of borehole georadar antenna radiation. Methodology and application. *Near Surface Geophysics* 4, s. 19–30.
- Fredriksson O.A. i in. 1969 – Fredriksson, O.A., Fossati, F.N. i Robert, F.A. 1969. Helical antenna for irradiating an earth formation penetrated by a borehole and method of using same: U. S. 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.
- Haeni F.P. i in. 2002 – Haeni, F.P., Halleux, L., Johnson, C.D. i Lane, J.W. Jr. 2002. Detection and mapping of fractures and cavities using borehole radar, in Fractured Rock. Denver, Colorado, March 13–15, 2002, Proceedings: Westerville, Ohio, National Ground Water Association, 4 s.
- Hsi-Tien, C. 1989. Borehole directional radar system for geological mapping. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 51, s. 819–828.
- Holliger, K. i Bergmann, T. 2002. Numerical modeling of borehole georadar data. *Geophysics* 67, s. 1249–1257.
- Holser W.T. i in. 1972 – Holser, W.T., Brown, J.J.S., Roberts, F.A., Frederikson, O.A. i Unterberger R.R. 1972. Radar Logging of a salt dome. *Geophysics* vol. 37, No. 5, s. 889–906.
- Irving, J. i Knight, R. 2005. Effects of antennas on velocity estimates obtained from crosshole GPR data. *Geophysics* 70, no. 5, K39–K42.
- Irving, J. i Knight, R. 2006. Numerical simulation of antenna transmission and reception for crosshole ground-penetrating radar. *Geophysics* 71, no. 2, K37–K45.
- Jol, H.M. 2009. *Ground penetrating radar theory and applications*. Elsevier Science.
- Karczewski, J. 2007. *Zarys metody georadarowej*. Kraków, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH.
- Karczewski J. i in. 2012 – Karczewski, J., Ortyl, Ł. i Pasternak, M. 2012. *Zarys metody georadarowej, wydanie drugie poprawione i rozszerzone*. Kraków, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH.
- King, R.W.P. i Smith, G.L. 1981. *Antennas in matter*. MIT Press.
- Lane J.W. Jr. i in. 1996 – Lane, J.W. Jr., Haeni, P.P., Placzek, G. i Wright D.L. 1996. Use of borehole-radar methods to detect saline tracer in fractured crystalline bedrock at Mirror Lake, Grafton County, New Hampshire, USA, in *Sixth International Conference on Ground-Penetrating Radar (GPR '96)*, Sendai, Japan, September 30-October 3, 1996, Proceedings: Sendai, Japan, Tohoku University Department of Geoscience and Technology, s. 185–190.
- Liu, S. i Sato, M. 2005. Transient radiation from an unloaded, finite dipole antenna in a borehole: Experimental and numerical results. *Geophysics* 70, no. 6, K43–K51.
- Lytle, R.J. i Laine, E.F. 1978. Design of a miniature directional antenna for geophysical probing from boreholes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 16, s. 304–307.
- Łątka T. i in. 2010 – Łątka, T., Czarny, R., Krawiec, K., Kudyk, M. i 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* nr 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* nr 06, s. 43–48.
- Materiały informacyjne firmy Malå GeoScience AB.
- Mundry E. i in. 1983 – Mundry, E., Sender, F., Thierbach, R. i 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. i in. 1983 – Nickel, H., Sender, F., Thierbach, R. i Weichart H., 1983: Exploring the interior of salt domes from boreholes. *Geophysical Prospecting* 31, no. 1, s. 131–148.
- Niva B. 1988 – Niva, B., Olsson, O. i 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.

- Olhoeft, G.R. 1988. Interpretation of hole-to-hole radar measurements. *Proceedings of the 3rd Technical Symposium on Tunnel Detection*, s. 616–629.
- Olsson O. i in. 1992 – Olsson, O., Falk, L., Forslund, O., Lundmark, L. i 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. i in. 1985 – Olsson, O., Sandberg, E., Forslund, O., Lundmark, L. i Falk, L. 1985. The mapping of fracture zones by borehole radar. *Geoexploration* 23, no. 3, s. 427–428.
- Owen, T.E. i Suhler, S.E. 1982. Borehole directional radar detection of subsurface cavities. *Geophysics* 47, 416–416.
- Pilecki Z. i in. 2011 – Pilecki, Z., Baluch, K., Łątka, T., Czarny, R. i Krawiec, K. 2011. Nowe możliwości rozpoznania nieciągłości w pokładzie węgla za pomocą georadaru otworowego. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górniczego. Górnictwo i Środowisko. Górnicze Zagrożenia Naturalne* nr 4/2.
- Pilecki Z. i in. 2013 – Pilecki, Z., Laskowski, M., Hryciuk, A., Pilecka, E., Czarny, R., Wróbel, J., Koziarz, E. i 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. *Studia, Rozprawy, Monografie* 184, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Reflex-Win, 2013: REFLEXW guide Sandmeier geophysical software.
- Sander K.A. i in. 1992 – Sander, K.A., Olhoeft, G.R. i 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.
- Sato, M. i Takayama T. 2007. A novel directional borehole radar system using optical electric field sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, s. 2529–2535.
- Scott, L.D. i Chang, H.T. 1984. Field pattern for antennas situated in a borehole. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, s. 113–116.
- Slob E. i in. 2010 – Slob, E., Sato, M. i Olhoeft, G. 2010. Surface and borehole ground-penetrating-radar developments. *Geophysics* 75, 75A103-75A120.
- Suhler S.A. i in. 1978 – Suhler, S.A., Owen, T.E., Hipp, J.E. i 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, 124 s., NTIS PB 80-208614.
- Suhler, S.A. i Owen, T.E. 1983. Field Demonstration of Deep-Penetrating Geophysical Techniques. Contract H0212018, Southwest Research Insitute. Draft final report, 59 s., U.S. Bureau of Mines, Denver, Colorado.
- Szóstka, J. 2001. *Fale i anteny*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Tarantalo, P.J. Jr. i Unterberger, R.R. 1978. Radar Detection of Boreholes in Advance of Mining (Rock Salt). *Geophysical Prospecting* vol. 26, No. 2, s. 359–382.
- Teixeira, F.L. i Chew, W.C. 2000. Finite-difference computation of transient electromagnetic waves for cylindrical geometries in complex media. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38, s. 1530–1543.
- van Dongen K.W. i in. 2002 – van Dongen, K.W., van Waard, R., van der Baan, S., van den Berg, P.M. i Fokkema, J.T. 2002. A directional borehole radar system. *Subsurface Sensing Technologies and Applications* 3, no. 4, s. 327–346.
- 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. i in. 2005 – Vogt, D., Van Schoor, M. i 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.
- Yelf, R.J. 2007. Application of Ground Penetrating Radar to Civil and Geotechnical Engineering. *Electromagnetic Phenomena* V.7, No 1 (18).
- Yilmaz, O. 2001. *Seismic data analysis*. 2nd ed.: SEG.

