

Bernadeta RAJCHEL, Tomasz PYTLOWANY

ZASTOSOWANIE METODY GEORADAROWEJ W ROZWIĄZYWANIU PROBLEMÓW INŻYNIERSKICH BUDOWNICTWA KOMUNIKACYJNEGO

Streszczenie

Metoda georadarowa pozwala poznać budowę warstw przypowierzchniowych, w szczególności określić profil litologiczny utworów, wyznaczyć granicę między skałą macierzystą a nadkładem. Dzięki tej metodzie można zlokalizować uskoki, pęknięcia czy szczeliny w górotworze, a także wyznaczyć zwierciadło wód gruntowych. W geofizyce otworowej za pomocą anten otworowych można wykonywać pomiary w głębokich otworach, ale również w niezbyt głębokich otworach wierconych poziomo na zboczach wzniesień z powierzchni ziemi. Potwierdzona została również przydatność metody georadarowej w zagadnieniach związanych z górnictwem odkrywkowym. Georadar może być efektywniejszym sposobem, w porównaniu do tradycyjnej metody otworowej, w zakresie m. in. identyfikacji miąższości płytkich pokładów, ich ciągłości, przewarstwień, czy innych naturalnych zjawisk występujących w pokładach. W artykule przedstawiono przykłady wykorzystania georadaru w geologii i górnictwie. Podjęto również próbę lokalizacji warstw geologicznych do głębokości 12,5 m. Do tego zadania użyto georadaru RIS-ONE włoskiej firmy IDS z anteną bistatyczną (osobno antena nadawcza i odbiorcza) o częstotliwości 80 MHz.

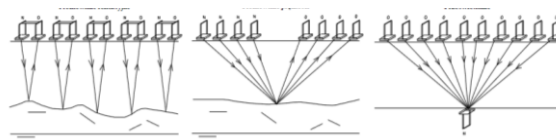
WSTĘP

Metoda georadarowa na początku wykorzystywana była w działaniach wojskowych oraz badaniach kosmicznych. Po umożliwieniu dostępu do niej osobom cywilnym znalazła zastosowanie m. in. w badaniach geologicznych. Potem z powodzeniem użyto jej w rozwiązywaniu problemów inżynierskich, tj. w drogownictwie, budownictwie, geodezji. Georadar stosowany jest zarówno w badaniach zjawisk naturalnych, jak i lokalizacji obiektów antropogenicznych. W georadarach stosuje się anteny o częstotliwościach od 10 MHz do 2,5 GHz. Antena o częstotliwości 250 MHz może zarejestrować informację użyteczną z głębokości do około 6 m (w zależności od warunków pomiarowych), zaś antena 750 MHz do głębokości około 1,5 m, za to z bardzo dobrą centymetrową rozdzielczością. Orientacyjne głębokości pomiarów w badaniach georadarowych w zależności od częstotliwości anten zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Orientacyjna głębokość dla badań GPR [7]

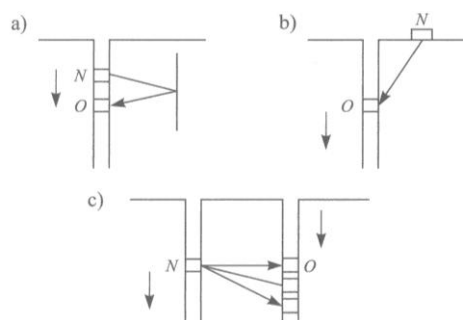
Nominalna częstotliwość anteny [MHz]	Zastosowanie	Maks. głębokość penetracji [m]
25 - 200	w geologii / badaniach środowiska geology / environmental research	ponad 30 more than 30
200 - 600	inżynieria / wykrywanie instalacji / archeologia engineering / detection of underground utilities/ archeology	10
900 - 2000	inżynieria / badanie chodników engineering / investigating pavements	1

Pomiary georadarowe można wykonywać w czterech wariantach: prześwietlenie, profilowanie otworowe, profilowanie refleksyjne, profilowanie prędkości - rysunek 1, 2:



Rys. 1. Schemat profilowania, odpowiednio: refleksyjnego, prędkości, prześwietlenia [4]

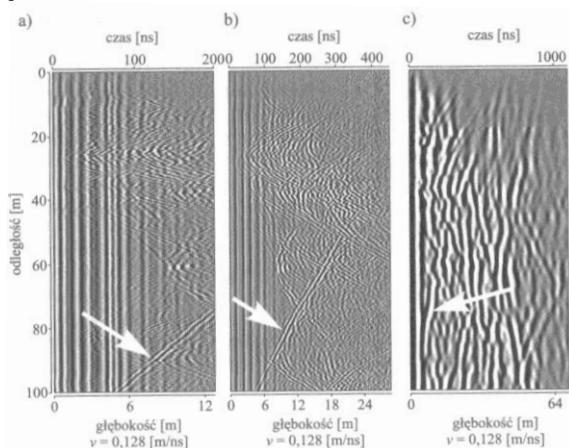
Prześwietlenie polega na umieszczeniu anten po obu stronach badanego obiektu, np. ścian budynków, przęseł mostów, również filarów w kopalniach itp. W metodzie tej najczęściej jedna antena jest położona nieruchomo z jednej strony prześwietlanego obiektu, a druga jest przesuwana z drugiej strony obiektu - rysunek 2.



Rys. 2. Schemat profilowania otworowego: a) klasyczne profilowanie refleksyjne, b) prześwietlenie: otwór – powierzchnia, c) prześwietlenie międzyotworowe [3]

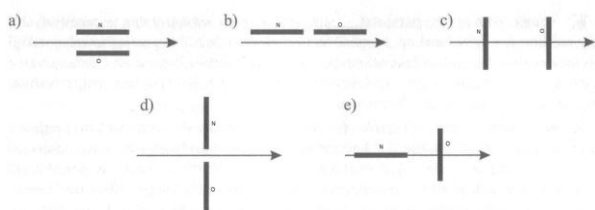
Profilowanie otworowe jest bardzo ciekawym profilowaniem, o którym warto wspomnieć. Profilowanie otworowe stosuje się w geofizyce wiertniczej w różnych wariantach, m. in.: klasyczne profilowanie refleksyjne, prześwietlenie międzyotworowe, prześwietlenie otwór – powierzchnia (rysunek 2, 3). W profilowaniu otworowym, odwrotnie niż w powierzchniowym, na osi rzędnych odczytuje się długość pomiaru (odległość), a na osi odciętych – czas. Na rysunku 3 podano przykład takiego profilowania. Najczęściej jednak wykonywane jest profilowanie refleksyjne (ponad 90 % pomiarów). W tej metodzie anteny (nadawcza i odbiorcza) ułożone równolegle

do siebie przesuwa się prostopadle do wyznaczonego profilu pomiarowego.



Rys. 3. Przykładowy echogram zarejestrowany antenami otworowymi o częstotliwościach: 250, 100 i 20 MHz odpowiednio. Strzałką zaznaczona anomalia [4]

Sposoby wzajemnego ułożenia anten i kierunku pomiaru przedstawiono na rysunku 4. Podczas przesuwania anten następuje rejestracja profilu na komputerze w postaci echogramu.



Rys. 4. Różne układy anten względem siebie i względem kierunku pomiaru: –kierunek pomiaru [3]

1. GEORADAR W BADANIACH GEOLOGICZNYCH

Metoda georadarowa pozwala poznać bardzo dokładnie budowę warstw przypowierzchniowych, w szczególności określić profil litologiczny utworów, wyznaczyć granicę między skałą macierzystą a nadkładem. Przy rozpoznawaniu struktury geologicznej za pomocą metody georadarowej szczególnie ważny jest parametr: stała dielektryczna ϵ . Na wartość stałej dielektrycznej w ośrodku geologicznym wpływają m. in. takie czynniki jak: skład mineralny skały, gęstość skały, porowatość skały; skład chemiczny fazy ciekłej i gazowej nasycających ośrodek, częstotliwość fali elektromagnetycznej propagującej w ośrodku [3].

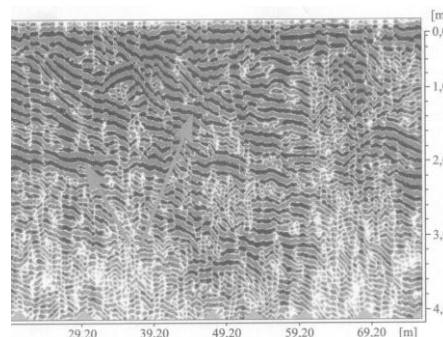
Niskie wartości stałej dielektrycznej obserwowane są w skałach osadowych, które posiadają wysoki współczynnik porowatości, ale nienasycone wodą, natomiast wysokie wartości – w tych samych skałach całkowicie nasyconych wodą. W skałach osadowych i magmowych wartość stałej dielektrycznej spada przy wzroście częstotliwości fali propagującej [5]. Wartość stałej dielektrycznej wpływa również na prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku – wzrost stałej dielektrycznej powoduje spadek prędkości fali. Stałe dielektryczne i prędkości fal elektromagnetycznych różnych ośrodków geologicznych przedstawiono w tabeli 2.

Wysoki kontrast przenikalności dielektrycznej obserwuje się między czterema parami ośrodków (tablica. 2): powietrze – dowolny ośrodek geologiczny, lód – woda, piasek – glina, piasek – torf. Trzeba jednak zauważyć, że rzadko kiedy badania georadarowe wykonuje się w ośrodku jednorodnym, dlatego też poniższe dane tabelaryczne należy traktować jako dane orientacyjne.

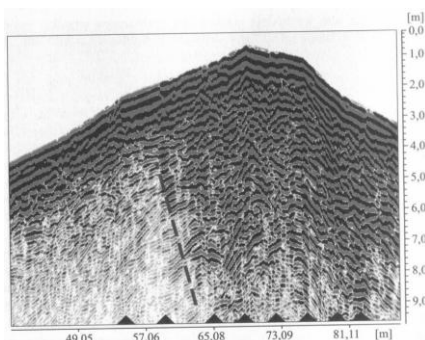
Tab. 2. Zestawienie wartości głównych parametrów fizycznych ośrodka geologicznego mających duże znaczenie w metodzie georadarowej (zmodyfikowano na podstawie [1])

Ośrodek geologiczny	Przewodność elektryczna σ [mS/m]	Współczynnik tłumienia α [dB/m]	Względna stała dielektryczna ϵ_r	Prędkość fali elektromagnetycznej v [cm/ns]
Powietrze	0,0	0,0	1,0	30
Słodka woda	0,5	0,1	80	3,3
Słona woda	3 000	1 000	80	1,0
Suchy piasek	0,01	0,01	3 – 5	15
Piasek nasycony wodą	0,1 – 1,0	0,03 – 0,3	20 – 30	6
Piaskowiec	0,5 – 2,0	0,4 – 1,0	9 – 14	8 – 10
Gлина	2,0 – 1 00	1,0 – 300	5 – 40	6
ł, muł	1,0 – 100	1,0 – 100	5 – 30	7
Wapień	0,5 – 2,0	0,4 – 1,0	4 – 8	12
Łupek	1,0 – 100	1,0 – 100	5 – 15	9
Granit	0,01 – 1,0	0,01 – 1,0	4 – 6	13
Halit	0,01 – 1,0	0,01 – 1,0	5 – 6	13
Lód	0,01	0,01	3 – 4	16

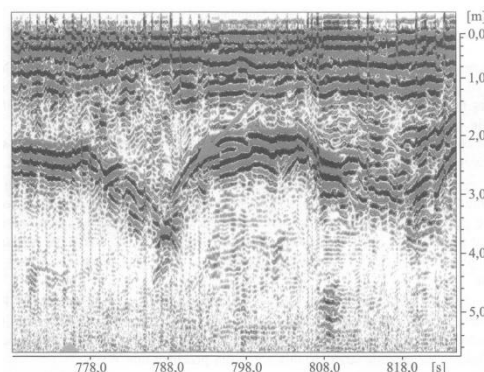
Dobre wyniki uzyskuje się przy badaniu wkladek rumoszu skalnego w utworach ilastych, warstwowaniu piasków i żwirów (rysunek 5), w skałach różniących się własnościami fizycznymi, np. piaski i gliny, czy wapień i nadkład czwartorzędowy (rysunek 6). Gorsze wyniki dają pomiary przy domieszkach materiałów ilastych, czy w obecności słonej wody, które powodują tłumienie fali elektromagnetycznej, czyli mniejszy zasięg głębokościowy metody. Dzięki tej metodzie można zlokalizować uskoki, pęknięcia czy szczeliny w górotworze (rysunek 7), a także wyznaczyć zwierciadło wód gruntowych (rysunek 8, 9). Za pomocą georadaru bada się również osady denne płytkich zbiorników wodnych [1] oraz torfowiska (rysunek. 10), próbując wyznaczyć ich głębokość i zasięg. Georadar pomocny jest też w poszukiwaniu pokładów kopalin, np. węgla, czy lokalizacji jaskiń [4].



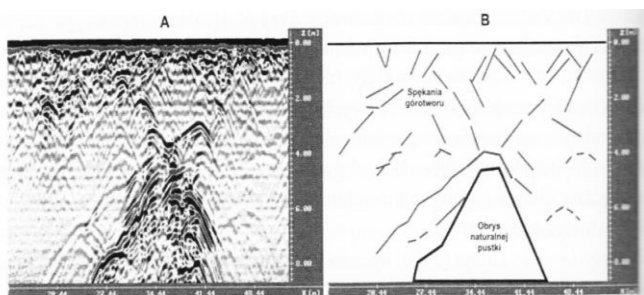
Rys. 5. Echogram zarejestrowany w Świnoujściu, widoczne warstwowanie piasków (zaznaczono strzałkami) i żwirów. Aparatura RAMAC/GPR, anteny nieekranowane 400 MHz [3]



Rys. 6. Echogram zarejestrowany w Piekarach koło Krakowa, widoczna granica lessy – wapienie. Do około 60 m profilu występują gleby lessowe - niewielki zasięg głębokościowy; od 60 m – wychodnie wapieni – zasięg propagacji fali znacznie większy. Aparatura RAMAC/GPR, anteny nieekranowane 200 MHz [3]



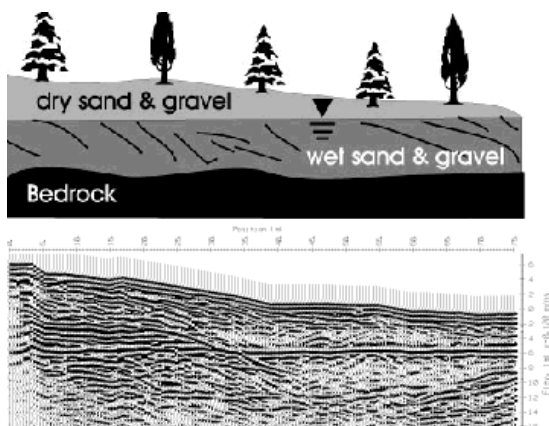
Rys. 10. Echogram zarejestrowany na torfowisku w Ustce, widoczny spąg torfów. Aparatura RAMAC/GPR, anteny nieekranowane 100 MHz [6]



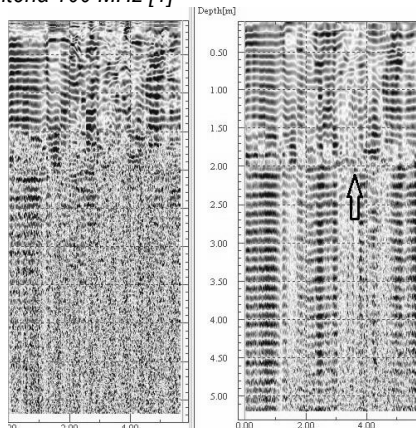
Rys. 7. Przykład zastosowania metody GPR do lokalizacji naturalnych stref spękań w górotworze [2]

2. GEORADAR W GÓRNICTWIE OTWOROWYM I ODKRYWKOWYM

Georadar w górnictwie otworowym jest cennym narzędziem. Za pomocą anten otworowych (rysunek11) można wykonywać pomiary w głębokich otworach, ale również w niezbyt głębokich otworach wierconych poziomo na zboczach wzniesień z powierzchni ziemi. Metodę georadarową stosuje się głównie do określenia budowy złoża (ustalenie granicy złoża i skały płonnej), lokalizacji stref uskokowych, spękań górotworu, pustek, a także do sondowań w chodnikach kopalnianych (rysunek11).



Rys. 8. Echogram zarejestrowany w Ontario, Kanada, niedaleko Jeziora Superior, widoczna skała macierzysta oraz zwierciadło wody w utworach glacialnych piasków i żwirów. Aparatura pulseEKKO radar, antena 100 MHz [1]



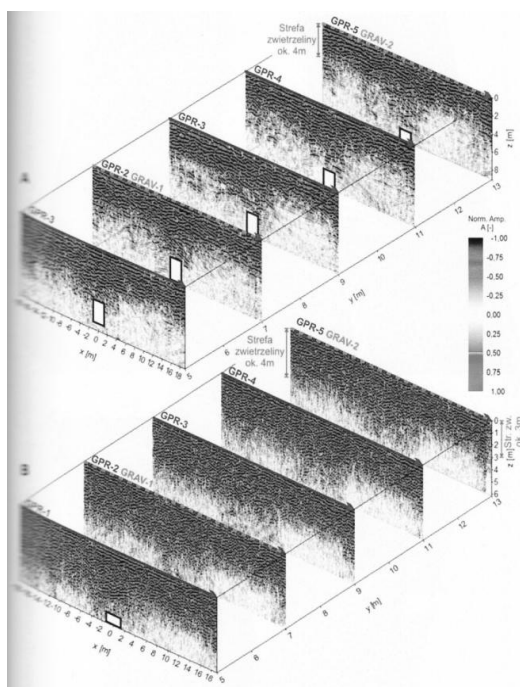
Rys. 9. Echogram zarejestrowany po prawej stronie kapliczki po podłożu naturalnym, na głębokości od 1,50 do 2,0 m widoczna



Rys. 11. Antena otworowa, 100 MHz firmy GSSI (www.georadary.pl) [7]

Potwierdzona została również przydatność metody georadarowej w zagadnieniach związanych z górnictwem odkrywkowym. Georadar może być efektywniejszym sposobem, w porównaniu do tradycyjnej metody otworowej, w zakresie m. in. identyfikacji miąższości płytkich pokładów, ich ciągłości, przewarstwień, czy innych naturalnych zjawisk występujących w pokładach [4]. Przykładem są tutaj zjawiska krasowe towarzyszące wydobywaniu pokładów gipsu. Ważna jest identyfikacja poziomów wodonośnych czy przypowierzchniowych cieków wodnych, które mogą zaburzyć proces eksploatacji złoża.

Pomiary georadarowe można stosować, poza rozwiązywaniem problemów związanych bezpośrednio z eksploatacją złóż, również do analizy infrastruktury otaczającej i niezbędnej przy wydobywaniu. Do takich problemów zalicza się m. in. identyfikację osadów w zbiornikach poflotacyjnych, badanie obwałowań tych zbiorników itp.



Rys. 12. Wizualizacja 3D rozkładu anomalii w rejonie sztolni w Jugowicach Górnych, dla anten 250 MHz (A) i 500 MHz (B) po zastosowaniu standardowego przetwarzania echogramów i ich klasycznej wizualizacji [4]

Analiza powyższych echogramów pokazuje, że:

- zarówno nad obudową, jak i nad nieobudowaną częścią sztolni rejestrują się silne refleksy od zwietrzalej strefy przypowierzchniowej, a strefę tą można przybliżyć warstwą o stałej miąższości, równej ok. 4 m;
- na echogramach rejestrują się wyraźne refleksy od spękań lokujących się nad stropem wyrobiska, a strefa spękań rozszerza się w poziomie do szerokości ok. 10 m; - ze względu na małą rozdzielczość anteny 250 MHz trudno w warstwie zwietrzalej wydzielić rejon nad wyrobiskiem, w którym widoczne byłyby charakterystyczne refleksy pochodzące od spękań indukowanych działalnością górniczą, które mogłyby zagrażać stabilności powierzchni [2].

3. METODYKA BADAŃ

W artykule podjęto próbę lokalizacji warstw geologicznych do głębokości 12,5 m. Do tego zadania użyto georadaru RIS-ONE włoskiej firmy IDS (Rys. 15). Posiada on antenę bistatyczną (osobno antena nadawcza i odbiorcza) o częstotliwości 80 MHz. Dzięki tej antenie o stosunkowo niskiej częstotliwości możliwa jest analiza podłoża, przy sprzyjających warunkach pomiaru, do głębokości kilkunastu metrów.

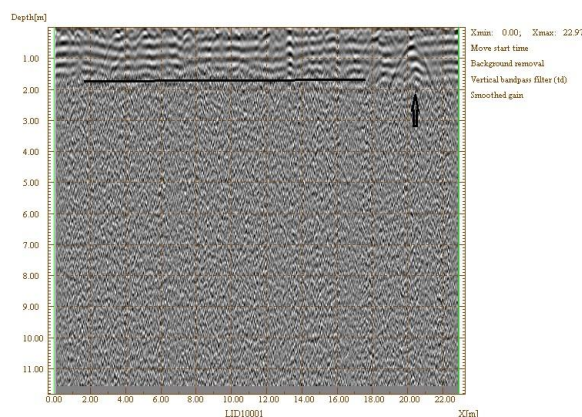


Rys. 13. Georadar RIS-ONE, TR 80 (80 MHz, antena bistatyczna), fot. Rajchel B.

4. METODYKA BADAŃ

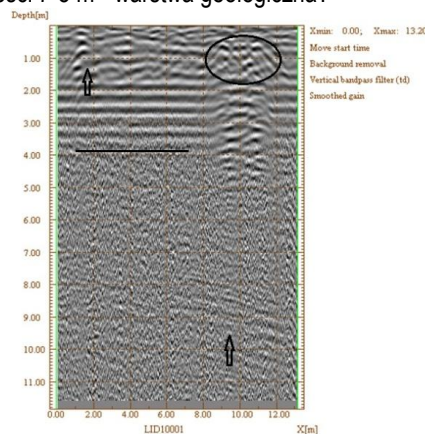
W celu rozpoznania przypowierzchniowej budowy geologicznej wybranego terenu przeprowadzono pomiary georadarowe w dwóch miejscach. Pierwsze na podłożu naturalnym, trawiastym, niezmiennym antropogenicznie w Kampusie Politechnicznym PWSZ w Krośnie (Rys. 14), drugie po nawierzchni zmienionej antropogenicznie, po kostce brukowej, na terenie JDK w Jaśle (Rys. 15, 16).

Na echogramie poniżej (Rys. 14) na głębokości 2,0 m widoczna jest prawdopodobnie granica między dwoma warstwami geologicznymi. Granicę tą stanowi zwierciadło wody gruntowej. Na tej głębokości ppt. w odległości kilkunastu metrów od wykonanego pomiaru znajduje się potok Badoń. Dodatkowo na echogramie widoczna jest anomalia na długości 20 m pomiaru na głębokości 0,5 m - być może jest to większy fragment skalny, nie jest to obiekt liniowy, ponieważ w wykonanym obok niniejszego pomiarze nie zanotowano podobnej anomalii.

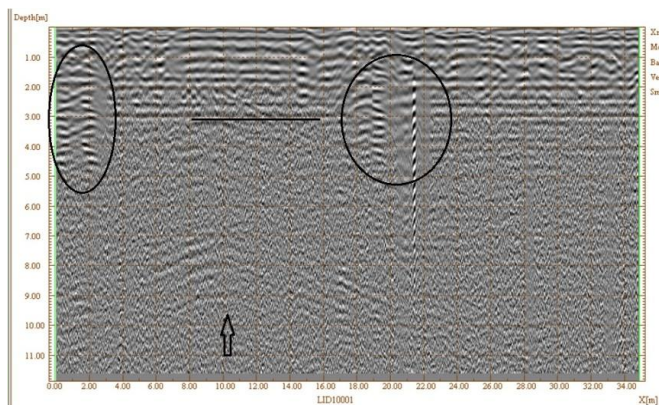


Rys. 14. Wyniki rozpoznawczych badań GPR uzyskane przy użyciu anteny 80 MHz na terenie Kampusu Politechnicznego, ul. Dmochowskiego, teren naturalny, podmokłe podłoże trawiaste (pomiar własne).

Podczas pomiarów georadarowych na terenie zmienionym antropogenicznie (Rys. 15, 16) zanotowano szereg anomalii, pochodzących od podziemnej infrastruktury technicznej, ale również od korzeni drzew rosnących w pobliżu wykonywanych pomiarów oraz od frakcji żwirowej jako podbudowy pod kostkę brukową. Na echogramie 15 widoczna jest warstwa o grubości ok. 1 m na głębokości od 1,8 do 2,8 m oraz warstwa o grubości ok. 0,7 m na głębokości 3,1 do 3,8 m, obie na całej długości wykonanego pomiaru. Dodatkowo na obu poniższych echogramach zaznaczają się ciekawe anomalie na głębokości 7-8 m - warstwa geologiczna?



Rys. 15. Wyniki rozpoznawczych badań GPR uzyskane przy użyciu anteny 80 MHz na terenie JDK Jasło, teren antropogenicznie zmieniony 1 (pomiar własne)



Rys. 16. Wyniki rozpoznawczych badań GPR uzyskane przy użyciu anteny 80 MHz na terenie JDK Jasto, teren antropogenicznie zmieniony 2 (pomiar własne).

PODSUMOWANIE

Georadar jest szybkim, bezinwazyjnym narzędziem do rozpoznania podłoża geologicznego, pamiętając, że sama interpretacja echogramów bez innej dokumentacji badanego terenu, np. w postaci map oraz doświadczenia osoby analizującej nie jest prosta. Pozwala na precyzyjne uzyskanie liniowych (nie punktowych) przekrojów głębokościowych utworów skalnych. Za pomocą metody georadarowej można lokalizować przypowierzchniowe warstwy geologiczne i ich miąższość, spełkania górotworów oraz prowadzić monitoring ich zmian w czasie.

Odbicie i załamanie fali elektromagnetycznej obserwuje się na granicy dwóch ośrodków (gruntów, obiektów), które różnią się właściwościami elektrycznymi, np. na granicy grunt – metal, grunt – pustka powietrzna itp. Ze wzrostem przewodności elektrycznej gruntu wzrasta tłumienie ośrodka, co wiąże się ze spadkiem zasięgu penetracji głębokościowej georadaru. Wzrost wilgotności gruntu, wzrost porowatości gruntu nasyconego wodą oraz występowanie minerałów o wysokiej przewodności przyczynia się do wzrostu tłumienia fali elektromagnetycznej, co również powoduje spadek zasięgu głębokościowego georadaru.

Metodę georadarową można stosować jako metodę wstępnego rozpoznania przypowierzchniowej budowy geologicznej. Pozwoli ona na ograniczenie liczby wierceń geologicznych. Jest to metoda, która w rękach geologa może zwiększyć zakres wykonywanych pomiarów geologiczno-inżynierskich, a przy tym zmniejszyć ich koszty.

BIBLIOGRAFIA

1. Annan A.P. 2001 - Ground Penetrating Radar. Workshop Notes, Sensor and Software Inc., Canada, s. 1-197.
2. Gołębiowski T., 2012 - Zastosowanie metody georadarowej do detekcji i monitoringu obiektów o stochastycznym rozkładzie w ośrodku geologicznym. Rozprawy, monografie. Wyd. AGH, s. 1-257.
3. Karczewski J., 2007 - Zarys metody georadarowej. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, s. 1-246.
4. Ortyl Ł., 2006 - Badanie przydatności metody georadarowej w geodezyjnej inwentaryzacji struktur i obiektów przypowierzchniowych. Roz. dokt., AGH Kraków, s. 1-172.
5. Plewa M., Plewa S., 1992 - Petrofizyka. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
6. Rajchel B., 2011 - Możliwość zastosowania metody georadarowej w badaniach archeologicznych i hydrogeologicznych. [W:] Środowisko przyrodnicze i walory turystyczne południowo-

wschodniej Polski i zachodniej Ukrainy, redakcja: Rak J. Wtd. Muzeum Regionalne, Brzozów, s. 179-200.

7. System Detector Duo - instrukcja obsługi. IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p. A. N.
8. www.georadary.pl

THE APPLICATION OF THE GROUND PENETRATING RADAR METHOD IN GEOLOGY AND MINING

Abstract

The ground-penetrating radar method (GPR) allows to investigate the structure of subsurface layers, in particular to determine the lithological profile of deposits as well as to determine the boundary between the bedrock and the overburden. This technique allows to localize faults, cracks and gaps in a rock mass, as well as to outline groundwater table. Borehole geophysics uses borehole antennas to perform measurements not only in deep boreholes, but also in shallower, holes horizontally drilled on hill slopes. The usefulness of the GPR method was further confirmed in relation to the issues associated with open-pit mining. The ground-penetrating radar may prove more effective in e.g. estimating the thickness of shallow deposits, their continuity, interbedding or other natural phenomena that occur in deposits, as compared to the traditional hole-drilling method. This paper presents examples of the use of the ground-penetrating radar in geology and mining. An attempt was also made to localize geological layers at a depth of up to 12.5 m. For this purpose, RIS-ONE ground-penetrating radar (IDS, Italy) featuring 80 MHz bistatic antenna (separate transmitting and receiving antennas) was used.

Autorzy:

dr inż. **Bernadeta Rajchel** – PWSZ im. St. Pigońia w Krośnie, Instytut Politechniczny, Zakład Inżynierii Środowiska, ul. Dmochowskiego 12, brajchel@wp.pl

dr inż. **Tomasz Pytlowany** – PWSZ im. St. Pigońia w Krośnie, Instytut Politechniczny, Zakład Budownictwa, ul. Dmochowskiego 12, tompyt@pwsz.krosno.pl