

Charakterystyczne cechy radarogramów w badaniach georadarowych górotworu wokół podziemnego wyrobiska górniczego

Characteristic features of radarograms from GPR investigations of rock mass around underground excavation



*Dr hab. inż. Zenon Pilecki
prof. IGSMiE**



*Mgr inż. Paulina
Harba**



*Dr inż. Krzysztof
Krawiec**



*Mgr inż. Rafał Czarny**



*Mgr inż. Michał Chamarczuk**



*Dr hab. inż. Elżbieta Pilecka
prof. PK***



*Mgr inż. Tomasz Łątka**

Treść: Metoda georadarowa coraz częściej znajduje zastosowanie w badaniach jakości górotworu wokół podziemnych wyrobisk górniczych. Do podstawowych zadań badawczych należy lokalizacja pustek i stref rozluźnień, jak również większych spękań, uskoków i innych stref osłabienia. Uzyskanie użytecznych radarogramów jest trudne ze względu na wpływ wielu czynników pochodzenia górniczego zakłócających pomiar oraz względnie silne efekty fal wielokrotnych i rewerberacji. W pracy podjęto próbę sklasyfikowania refleksów na radarogramach z pomiarów GPR w podziemnych wyrobiskach górniczych. Podzielono charakterystyczne efekty na dwie grupy pochodzące od granic obiektów górniczych np.: powierzchni wyrobisk, elementów obudowy i wyposażenia wyrobisk itp. oraz od granic naturalnych o wyraźnym kontraście właściwości elektromagnetycznych, np.: pustek i stref rozluźnień, granic litologicznych, większych spękań, uskoków itp. W pracy przedstawiono przykłady takich radarogramów zarejestrowanych w badaniach wykonanych antenami 250 MHz i 100 MHz w wyrobiskach dołowych w różnych warunkach geologicznych. W podsumowaniu sformułowano uwagi dotyczące prowadzenia badań GPR w wyrobiskach górniczych w sposób możliwie efektywny.

Abstract: Ground Penetrating Radar (GPR) is more and more often used to determine the quality of rock-mass around underground excavations. The main purposes of using GPR underground are localization of voids and looseness zones, as well as greater discontinuities and other weak zones. High quality radarograms are hard to obtain due to influence of factors of mining origin

and relatively strong effects of multi-reflected waves and reverberations. In the article various types of GPR signal reflections were identified and classified. Characteristic effects visible on radarograms were divided into two groups. First group consists of reflections from mining objects like excavation surfaces, support elements and underground infrastructures. Second group consists of reflections from natural borders of distinct contrast of electromagnetic properties like voids and looseness zones, greater fractures, faults, lithological borders and others. The article presents examples of radarograms registered in underground excavations by antennas with central frequencies 250 MHz and 100 MHz in many different geological conditions. In conclusions, remarks for effective use of GPR method in underground excavations were formulated.

Słowa kluczowe:

metoda GPR, radarogramy, refleksy, sygnały zakłócające, wyrobisko górnicze, górotwór

Key words:

Ground Penetrating Radar, radarogram, reflecting signal, distorting signal, underground excavation, rock mass

1. Wprowadzenie

Metoda georadarowa GPR (ang. *Ground Penetration Georadar*) coraz częściej znajduje zastosowanie w badaniach jakości górotworu wokół podziemnych wyrobisk górniczych. Do podstawowych zadań badawczych należy lokalizacja pustek i stref rozluźnień, jak również większych spękań, uskoków i innych stref osłabienia. Pomiar GPR w wyrobiskach górniczych są szeroko opisywane w literaturze światowej [1, 6, 9]. W Polsce badania takie wykonywało wiele ośrodków naukowo-badawczych, takich jak Główny Instytut Górnictwa, Akademia Górniczo-Hutnicza lub Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN oraz specjalistycznych firm jak np. Geopartner, lecz najczęściej dokumentowano je w postaci raportów. Autorzy tych badań podkreślają duży stopień trudności w przetwarzaniu i interpretacji radarogramów oraz ich analizie.

Uzyskanie użytecznych radarogramów jest trudne ze względu na wpływ wielu czynników pochodzenia górniczego zakłócających pomiar oraz względnie silne efekty fal wielokrotnych i rewerberacji. Radarogram z pomiarów w sąsiedztwie obiektów metalowych i silnych granic odbijających jest najczęściej nieczytelny ze względu na silne refleksy „zakrywające” informację użyteczną. Usunięcie takich zakłóceń procedurami przetwarzania danych pomiarowych jest najczęściej niemożliwe. Zagadnienie to ma istotne znaczenie w analizie radarogramów, gdyż bardzo łatwo można przyjąć zakłócenie jako sygnał użyteczny, co w konsekwencji prowadzi do nieupoważnionych stwierdzeń i wniosków.

Analiza radarogramów wykonanych w podziemnych wyrobiskach górniczych jest złożona ze względu na refleksy od różnego rodzaju obiektów, głównie zawierających elementy metalowe. Wyrobiska górnicze są wzmocnione różnego rodzaju obudową górnictwem, najczęściej stalową, taką jak: łuki ŁP, stojaki, stropnice, rozpory dwustronnego działania, siatki, kotwy, itp. W wyrobiskach występują metalowe elementy wyposażenia technicznego, takie jak kable elektryczne i teletechniczne, rurociągi, lutnie, sygnalizatory, czujniki różnego rodzaju itp., znajdują się różnego rodzaju maszyny i urządzenia górnicze.

Na radarogramach bardzo silnie zaznaczają się refleksy od powierzchni obrysu wyrobisk: ociosów, stropu lub spągu. Widoczne są z różną intensywnością refleksy pochodzące od powierzchni wewnętrznych i zewnętrznych wyrobisk sąsiednich, znajdujących się w zasięgu rozpoznania systemu anten GPR. Silniejsze refleksy pochodzą od powierzchni wyrobisk zabezpieczonych obudową betonową lub murową. Efekty fal wielokrotnych i rewerberacji rejestruje się od intensywnych spękań o wyraźnym kontraście właściwości elektromagnetycznych i innych granic, w tym od pustek i powierzchni

litologicznych. Strefy rozluźnień i wypełnienia materiałem zasypowym zaznaczają się na ogół zróżnicowanym wytłumieniem sygnału.

Należy również mieć na uwadze sygnały zakłócające radarogramy na najmniejszych czasach rejestracji, związanych z falami powietrzną i bezpośrednią między nadajnikiem i odbiornikiem. Stosowanie anten ekranowanych niewystarczająco ogranicza te zakłócenia.

W ogólnym ujęciu refleksy, widoczne na radarogramach z pomiarów GPR w podziemnych wyrobiskach górniczych, można podzielić na dwie grupy pochodzące od granic:

- obiektów górniczych np.: powierzchni wyrobisk, elementów obudowy i wyposażenia wyrobisk, itp.,
- obiektów naturalnych np.: pustek i stref rozluźnień, granic litologicznych, większych spękań, uskoków itp.

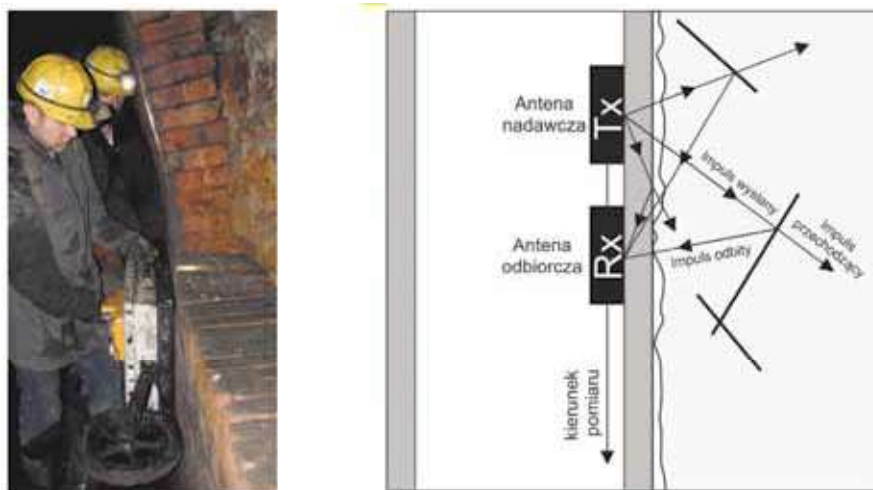
W pracy podjęto próbę sklasyfikowania refleksów na radarogramach z pomiarów GPR w podziemnych wyrobiskach górniczych. W części wstępnej przedstawiono wybrane podstawowe informacje o metodzie georadarowej. W kolejnych rozdziałach przedstawiono przykłady radarogramów z cechami charakterystycznymi dla badań GPR w wyrobisku górniczym. W podsumowaniu sformułowano uwagi dotyczące efektywnego prowadzenia badań GPR w wyrobiskach górniczych.

2. Podstawowe informacje o metodzie georadarowej GPR

Metoda georadarowa polega na wysyłaniu i rejestrowaniu impulsów fal elektromagnetycznych o częstotliwości z zakresu krótkich do ultrakrótkich fal radiowych od 10 MHz do kilku GHz. Częstotliwość ta pozwala na uzyskanie rozdzielczości rzędu od kilku centymetrów do kilku metrów.

Metoda georadarowa znalazła pierwsze praktyczne zastosowanie do badania ośrodka geologicznego w latach siedemdziesiątych XX w. [2]. Aktualnie metoda ta jest jedną z najpowszechniej używanych do rozpoznania budowy i właściwości przypowierzchniowej, płytkiej części ośrodka geologicznego. W porównaniu z innymi metodami geofizycznymi, metoda georadarowa pozwala na szybkie pozyskanie informacji o ośrodku, a w wielu warunkach wyniki osiągnięte tą metodą są najbardziej efektywne.

Aparatura pomiarowa posiada dwie anteny: nadawczą i odbiorczą (rys. 1). Z anteny nadawczej wysyłane są impulsy elektromagnetyczne. Impulsy przechodząc przez ośrodek, zostają odbite od granic rozróżnialnych przez falę elektromagnetyczną o określonym zakresie częstotliwości, nazywanych również reflektorami. Część odbitych impulsów jest rejestrowana przez antenę odbiorczą, podobnie jak np.



Rys. 1. Pomiar georadarowy – a) wzdłuż ościsłu wyrobiska, b) ogólny schemat działania metody georadarowej

Fig. 1. GPR measurements – a) along a sidewall of the drift b) general scheme of GPR measurements in rock mass

w klasycznych radarach lotniczych. Schemat ten jest również podobny do schematu sejsmiki refleksyjnej i jednocześnie podlega podstawowym prawom propagacji fal w ośrodku materialnym.

Przetwarzanie i interpretacja danych dla mniej złożonych warunków pomiarowych są w dużym stopniu zautomatyzowane, a często istotne informacje można odczytać bezpośrednio z rejestracji tzw. radarogramu, nazywanego również echogramem. Na radarogramie widoczne są tzw. refleksy, najczęściej przedstawiane w skali czasu i odległości (głębokości).

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 wyższa przewod-

ność lub 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. Fala elektromagnetyczna propagując w głąb ośrodka rozciera się (rys. 2). W antenach dipolowych obszar pomiarowy w ośrodku jednorodnym jest elipsą o średnicach a i b [1].

Rozdzielczość rozpoznania, a tym samym szczegółowość obrazów georadarowych wzrasta ze wzrostem częstotliwości. Dla wyższych częstotliwości, tłumienie energii fal elektromagnetycznych jest większe, a tym samym jest mniejszy zasięg głębokościowy. Według Annana [1] dwa punkty są rozróżniane, gdy w skali czasu np. minimum odbitego refleksu od pierwszego punktu jest rozróżnialne od minimum odbitego refleksu od drugiego punktu. Wielkość rozdzielczości ΔR jest opisana wzorem:

$$\Delta R = \frac{v}{4 \cdot B} \quad (1)$$

gdzie:

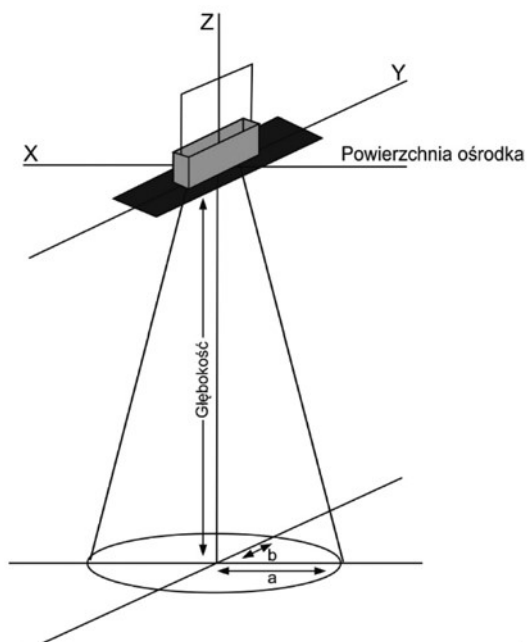
v – prędkość fali elektromagnetycznej,
 B – szerokość pasma częstotliwości wysłanego impulsu.

Rozdzielczość metody georadarowej zależy odwrotnie proporcjonalnie od szerokości pasma częstotliwości impulsu odbieranego przez antenę odbiorczą. Anteny o szerokim paśmie częstotliwości mają wyższą rozdzielczość niż anteny o wąskim paśmie częstotliwości. Anteny o szerokim paśmie częstotliwości mają wąski impuls, a w związku z tym niewielką średnią energię. Mają one również niewielki zasięg głębokościowy, zgodnie z podstawowym równaniem opisującym moc anteny odbiorczej, związanym z parametrami konstrukcyjnymi anten [7]

$$P_R = \frac{P_T \cdot G_{T_x} \cdot G_{R_x} \cdot \lambda^2 \cdot \sigma_T}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot R^4 \cdot L} \quad (2)$$

gdzie:

P_R – średnia moc zarejestrowana przez antenę odbiorczą,
 P_T – średnia moc transmitowana przez antenę nadawczą,
 G_{T_x} – sprawność anteny nadawczej przyjmowana jako stosunek gęstości promieniowania w danym kierunku do mocy dostarczonej na wejście anteny,
 G_{R_x} – sprawność anteny odbiorczej,
 λ – długość fali,
 σ_T – przekrój czynny przyjmowany jako skuteczna powierzchnia odbicia reflektora,



Rys. 2. Sposób propagacji fali elektromagnetycznej z anteny nadawczej [1]

Fig. 2. Scheme of electromagnetic wave propagation from transmitter [1]

R – odległość do reflektora (zasięg głębokościowy),
 L – sumaryczny współczynnik tłumienia.

W tab. 1 przedstawiono zależność rozdzielczości pomiaru w ośrodku geologicznym o stałej dielektrycznej $\epsilon_r = 12$ od częstotliwości anten. Obliczona długość fali jest wartością szacunkową, gdyż rzeczywisty ośrodek geologiczny działa jak filtr dolnoprzepustowy i częstotliwość propagującej w nim fali jest mniejsza [5]. Rzeczywiste wartości rozdzielczości są nieznacznie niższe.

Tablica 1. Rozdzielczość metody georadarowej w zależności od częstotliwości anten dla ośrodka o stałej dielektrycznej $\epsilon_r = 12$ [5]

Table 1. Resolution of GPR method depending on antenna frequency for a medium with dielectric constant $\epsilon_r = 12$ [5]

Częstotliwość MHz	Długość fali m	Rozdzielczość m
50	1,7	0,45
200	0,43	0,11
400	0,22	0,05

Generalnie, w metodzie georadarowej rozdzielczość rozpoznania zależy od częstotliwości środkowej sygnału oraz szerokości pasma częstotliwości. Zależy ona również od polaryzacji fali elektromagnetycznej i kontrastu parametrów elektromagnetycznych ośrodka, a także geometrii rozpoznawanego obiektu. Istotny jest również kontakt z powierzchnią ośrodka, a właściwie sposób wejścia impulsu do ośrodka (średnica strefy Fresnela) oraz wielkość szumu w ośrodku [3].

Interpretując rejestracje georadarowe, nie uzyskujemy bezpośrednio informacji o głębokości położenia obiektu w ośrodku. W tym celu należy wykonać konwersję czasu rejestracji na odległość (głębokość). Jest to zadanie proste, jeżeli budowa ośrodka jest nieskomplikowana i są znane jego właściwości elektromagnetyczne. Najczęściej wyniki interpretacji uzyskuje się w wyniku doboru parametrów przez analogię do wyników badań archiwalnych, dodatkowych testów lub modelowania.

Istotny wpływ na wartość stałej dielektrycznej ośrodka (względna przenikalność dielektryczna) ma stopień zawodnienia ośrodka. Na rysunku 3 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 rzędu $Z = 0,4 - 0,8$. 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.

Prędkość fali elektromagnetycznej v w ośrodku geologicznym oblicza się na podstawie względnej stałej dielektrycznej według wzoru (3)

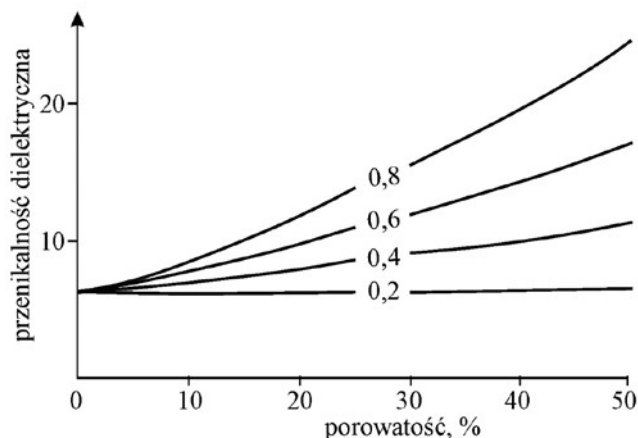
$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

gdzie:

c – prędkość fali elektromagnetycznej w próżni,
 ϵ_r – stała dielektryczna.

Natomiast długość fali elektromagnetycznej dla ośrodków rozluźnionych można oszacować z zależności 4

$$\lambda \approx \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$



Rys. 3. Zależność przenikalności dielektrycznej od porowatości i stopnia zawodnienia [4]

Fig. 3. Dependence of electric permittivity from porosity and water saturation [4]

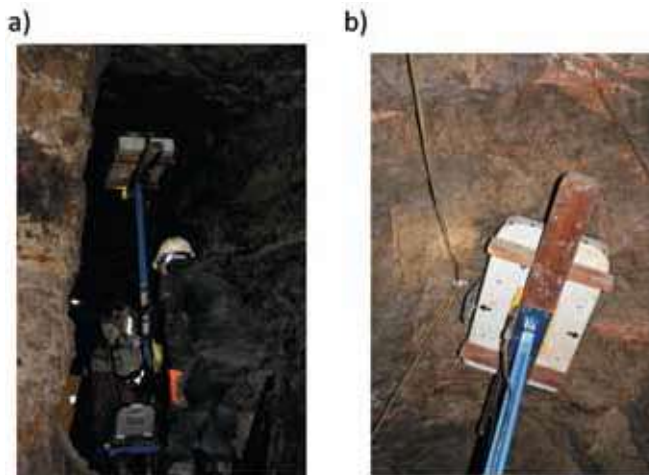
Na przykład dla ośrodka opisanego względną stałą dielektryczną $\epsilon_r = 9$ i prędkością fali $v = 0,1$ m/ns, dla częstotliwości 250 MHz długość fali wynosi 40 cm. Zależność 4 obowiązuje dla ośrodków słabo tłumiących, przy założeniu, że przenikalność magnetyczna jest równa jeden. Dla większości niemagnetycznych gruntów i skał założenie to jest poprawne. Korzystając ze wzoru 3 można obliczyć względną stałą dielektryczną na podstawie pomierzonej prędkości fali elektromagnetycznej w konkretnym ośrodku, np. metodą profilowania refrakcyjnego i refleksyjnego szerokopasmowego WARR (ang. *Wide Angle Reflection and Refraction*) lub wspólnego punktu głębokościowego CMP (ang. *Common Mid Point*).

W skład georadaru wchodzi anteny w dwóch obudowach bądź też w jednej obudowie, o różnej konstrukcji: ekranowane i nieekranowane. Anteny ekranowane mają bardziej skomplikowaną charakterystykę promieniowania, ale są zdecydowanie odporniejsze na zakłócenia wywołane odbiciami od różnych obiektów na powierzchni. Anteny połączone są z jednostką centralną światłowodami. Poprawia to zakres dynamiczny aparatury i ogranicza zakłócenia między kablami. W aparaturze georadarowej jednostka centralna współpracuje na ogół z laptopem przystosowanym do pracy w trudnych warunkach. Na laptopie są zapisywane rejestrowane dane. Podstawowe oprogramowanie narzędziowe umożliwia wybór podstawowych parametrów pomiarowych (długość okna czasowego, częstotliwość próbkowania sygnału, krok pomiarowy). Podstawowa częstotliwość repetycji sygnału dla np. aparatury ProEx Ramac produkcji szwedzkiej wynosi 100 kHz, co praktycznie pozwala rejestrować około 200 zapisów, nazywanych również trasami, na sekundę. Maksymalna, teoretyczna liczba złożeń (sumowań) sygnału wynosi 32 768. W praktyce nie wykonuje się pomiarów z liczbą składania impulsów większą niż 64 ze względu na znaczące ograniczenie prędkości prac pomiarowych. Wykonywanie pomiarów z wysokim składaniem ogranicza niskoaamplitudowy szum kulturowy i zwiększa stosunek sygnału do szumu.

3. Charakterystyczne refleksy od granic naturalnych w górotworze wokół wyrobisk górniczych

Przedstawione radarogramy w rozdziałach 3 i 4 zostały wykonane antenami ekranowanymi, głównie o częstotliwości 250 MHz i 100 MHz. Anteny te były prowadzone bezpośrednio przy powierzchniach wyrobiska. W przypadku

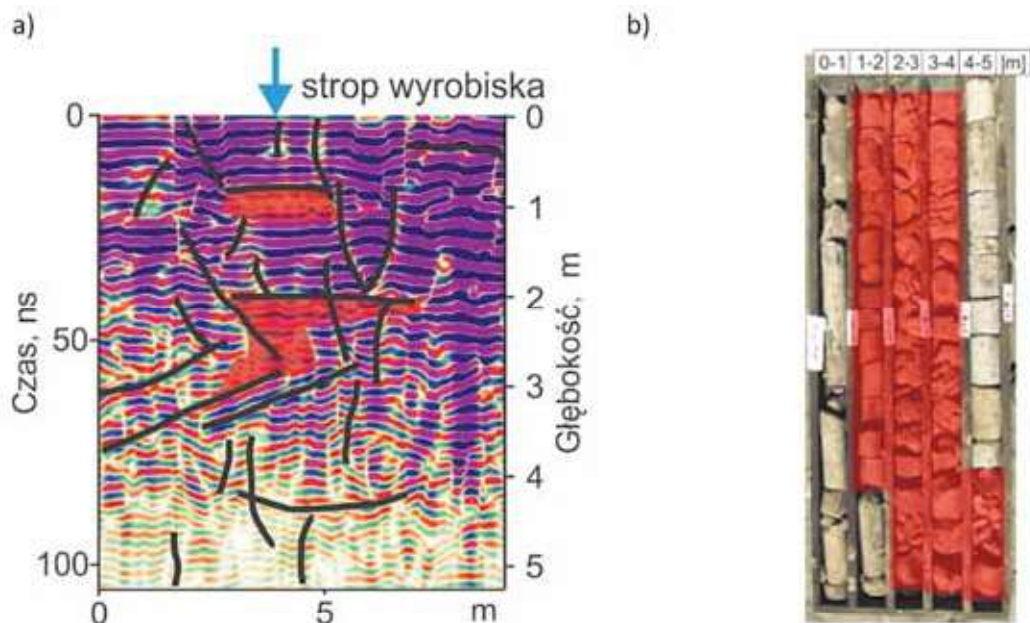
stropu stosowano specjalną mobilną platformę, umożliwiającą pomiar do wysokości ok. 4,0 m (rys. 4). W przedstawionych przykładach radarogramów przyjęto oznaczenia pokazane na rysunku 5.



Rys. 4. Pomiary GPR wzdłuż stropu wyrobiska chodnikowego a) z użyciem mobilnej platformy, b) sposób mocowania anteny

Fig. 4. GPR measurement along the roof of the drift with a) the help of mobile platform, b) the antenna fixing

Na rysunku 6 przedstawiono przykład rozpoznania strefy rozluźnień w stropie wyrobiska bez obudowy wykonanego w warstwie piaskowca za pomocą anteny o częstotliwości 250 MHz. Na radarogramie zaznaczają się strefy rozluźnień w postaci silniejszego wytłumienia sygnału. Strefy te przypuszczalnie zostały wytworzone w wyniku intensywnego przepływu wody w bardziej spękanym górotworze. Strefa rozluźnień jest również widoczna na rdzeniu otworu kontrolnego na odcinku od ok. 1,2 m do 4,3 m.



Rys. 6. Strefa rozluźnień w warstwie piaskowca – a) radarogram z pomiaru GPR anteną o częstotliwości 250 MHz na profilu wzdłuż osi stropu wyrobiska bez obudowy, b) rdzeń otworu kontrolnego w strefie anomalnej

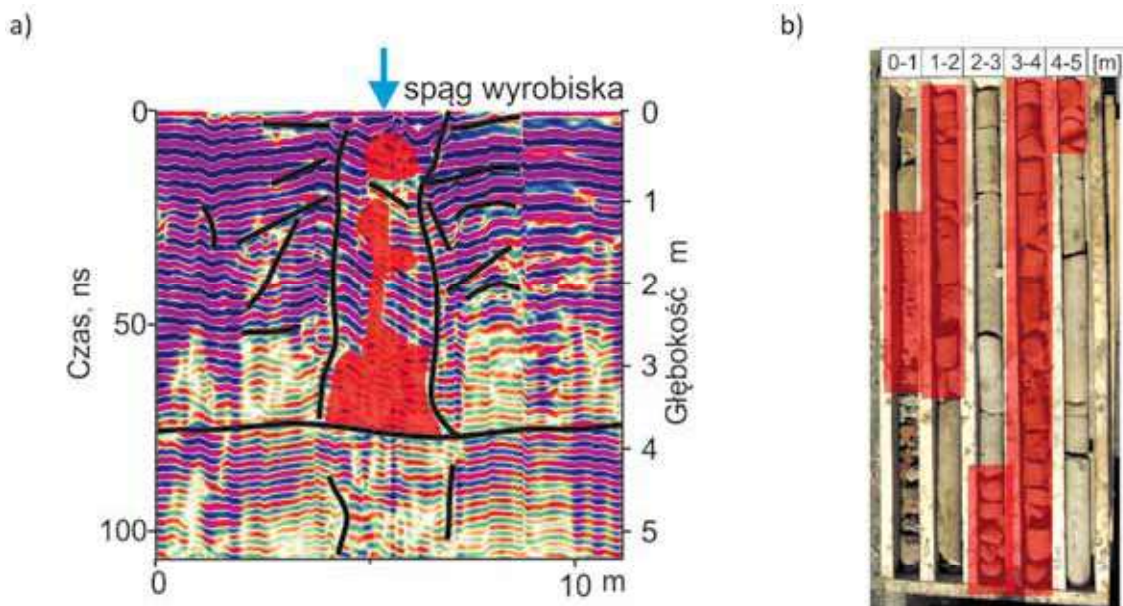
Fig. 6. Looseness zone in sandstone layer – a) radarogram gained by 250 MHz antenna on the profile along axis of excavation roof not supported, b) borehole core from anomaly zone



Rys. 5. Objasnienia symboli na radarogramach
Fig. 5. Explanations of symbols for radarograms

Na rysunku 7a przedstawiono przykład rozpoznania pustki oraz strefy rozluźnień w spągu wyrobiska wzmocnionego obudową murową z cegły o grubości ok. 40 cm wykonanego w warstwie piaskowca. Pomiary GPR przeprowadzono za pomocą anteny o częstotliwości 250 MHz. Na radarogramie zaznaczają się strefy silniejszego wytłumienia i zniekształcenia sygnału w odległości ok. 40 cm poniżej powierzchni spągu, czyli bezpośrednio pod obudową murową. Głębiej występuje wiele stref, które można przyjąć za strefy rozluźnień, co zostało pokazane na fotografii rdzenia z otworu kontrolnego (rys. 7b). Zaznaczająca się na radarogramie linia niemal pozioma na głębokości ok. 3,6 m jest przypuszczalnie refleksem od stropu wyrobiska, gdyż na rdzeniu nie zaznacza się granica litologiczna, lub większe spękanie.

Na rysunku 8 przedstawiono inny przykład rozpoznania pustki oraz strefy rozluźnień wytworzonych w pokładzie węgla w ociosie historycznego wyrobiska wzmocnionego obudową murową z kamienia (piaskowca) (rys.9). Pustka widoczna na rdzeniu z otworu kontrolnego (rys. 3.4b) znajduje się na odcinku do 1m, bezpośrednio za obudową murową. Pustka



Rys. 7. Pustka oraz strefy rozluźnień w warstwie piaskowca – a) radarogram z pomiaru GPR anteną o częstotliwości 250 MHz na profilu wzdłuż osi spągu wyrobiska wzmocnionego obudową murową z cegły, b) rdzeń otworu kontrolnego w strefie anomalnej

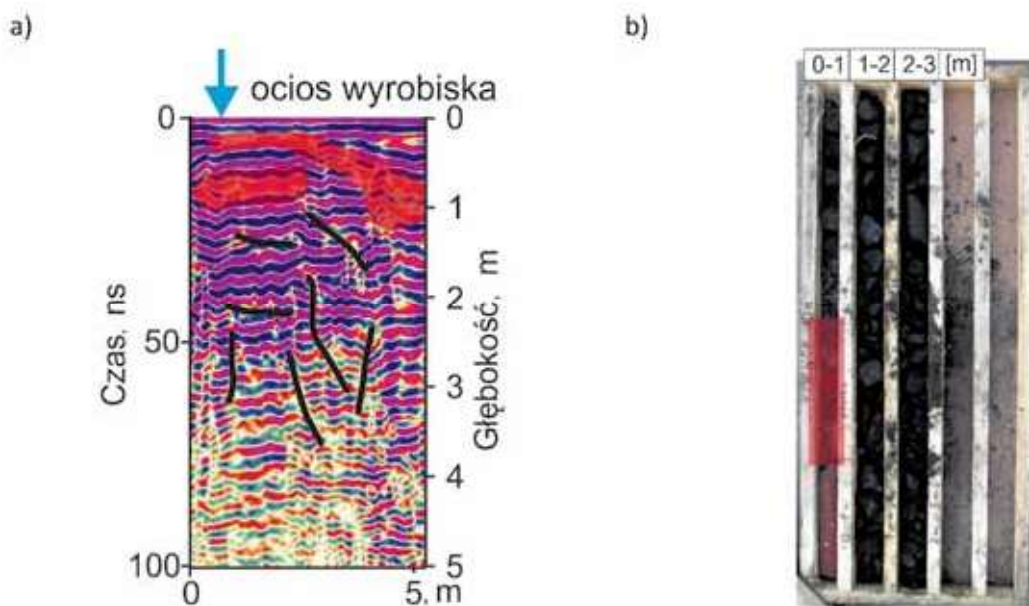
Fig. 7. Void and looseness zones in sandstone layer – a) radarogram gained by 250 MHz antenna on the profile along the excavation floor with brick support, b) borehole core from anomaly zone

i strefy rozluźnień przypuszczalnie są efektem długotrwałego przepływu wody w spękanym pokładzie węgla.

Na rysunku 10 przedstawiono przykład rozpoznania ugięcia z rozsłojeniem warstwy piaskowca w spągu wyrobiska wzmocnionego obudową murową z cegły. Bezpośrednio poniżej obudowy murowej o grubości 40 cm występuje niewielka pustka kilkunastocentymetrowej wysokości (3.5b). Obniżenie i spękanie warstw skalnych było efektem wykonania sąsiedniego wyrobiska w warstwach spągowych w odległości do kilkunastu metrów.

Na rysunku 11 przedstawiono przykład odwzorowania na radarogramie szczeliny uskokowej w warstwie karbońskiego piaskowca o rozwarciu ok. 0,7m. Szczelina należała do dużego uskoku o zrzucie ok. 4 m i była widoczna w całym przekroju nieobudowanego wyrobiska. Szczelina była wypełniona brekcją piaskowcową.

Na rysunku 12 przedstawiono przykład rozpoznania przebiegu granicy litologicznej między warstwami piaskowca i mułowca. Granica ta jest szczególnie dobrze widoczna ze względu na większą przenikalność elektryczną mułowca w



Rys. 8. Pustka i strefa rozluźnień w pokładzie węgla za obudową murową z kamienia (piaskowca) a) radarogram z pomiaru GPR anteną o częstotliwości 250 MHz na profilu wzdłuż ociosu wyrobiska, b) rdzeń otworu kontrolnego w strefie anomalnej

Fig. 8. Void and looseness zones in coal seam behind stone support built of sandstone fragments a) radarogram gained by 250 MHz antenna on profile along side wall, b) borehole core from anomaly zone



Rys. 9. Obudowa murowa z kamienia (piaskowiec) w odcisie historycznego wyrobiska

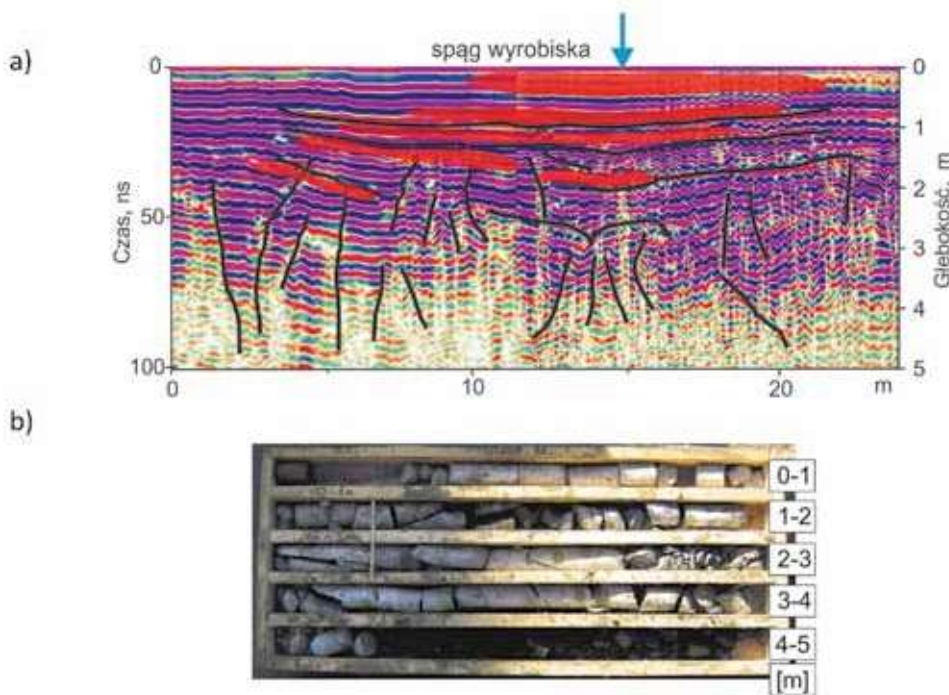
Fig. 9. Stone support of sandstone fragments in sidewall of historical excavation

porównaniu do piaskowca ze względu na większą zawartość materiału ilastego. Obie warstwy są intensywnie spękane w wyniku dokonanej eksploatacji pokładów węgla w głębiej położonym złożu. W związku z tym w obu warstwach występują większe spękania, lecz ich nie zaznaczono dla uzyskania większej czytelności radarogramu.

4. Charakterystyczne refleksy od granic obiektów inżynierskich w górotworze wokół wyrobisk górniczych

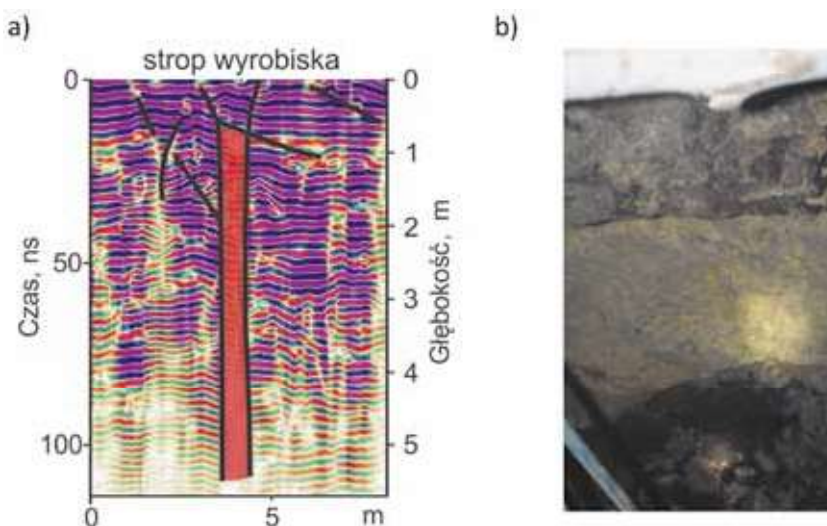
W rozdziale przedstawiono kolejne charakterystyczne refleksy, tym razem od granic obiektów inżynierskich w górotworze wokół wyrobisk górniczych. Bardzo często zarejestrowane efekty są bardzo podobne do efektów przedstawionych w rozdziale 3. W związku z tym, w badaniach georadarowych należy zebrać możliwie szeroką informację o rejonie pomiarowym, w tym o genezie procesów fizyczno-mechanicznych zachodzących w górotworze.

Na rysunku 13 przedstawiono dwa przykłady refleksów od „wewnętrznych” odciosów prostopadłego wyrobiska



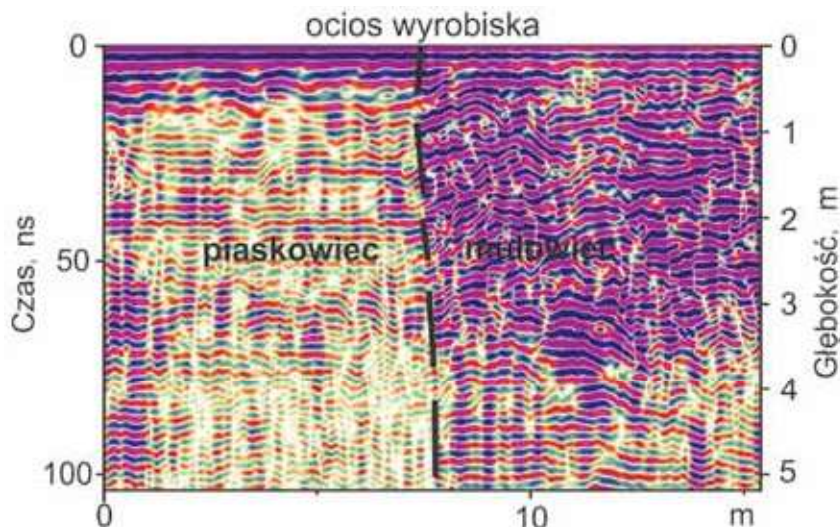
Rys. 10. Ugięcie z rozłożeniem warstwy piaskowca – a) radarogram z pomiaru GPR anteną o częstotliwości 250 MHz na profilu wzdłuż osi spągu wyrobiska wzmocnionego obudową murową z cegły, b) rdzeń otworu kontrolnego w strefie anomalnej

Fig. 10. Sandstone layers deflected and splitted – a) radarogram gained by 250 MHz antenna on the profile along excavation floor strengthened by brick support, b) borehole core from anomaly zone



Rys. 11. Szczelina uskawkowa w warstwie piaskowca o rozwarciu ok. 0,7m a) radarogram z pomiaru GPR anteną o częstotliwości 250 MHz na profilu wzdłuż osi stropu wyrobiska, b) wypełnienie szczeliny

Fig. 11. Fault fissure in sandstone layer with 0.7 m aperture a) radarogram gained by 250 MHz antenna on the profile along axis of excavation roof (a), b) fissure filling material



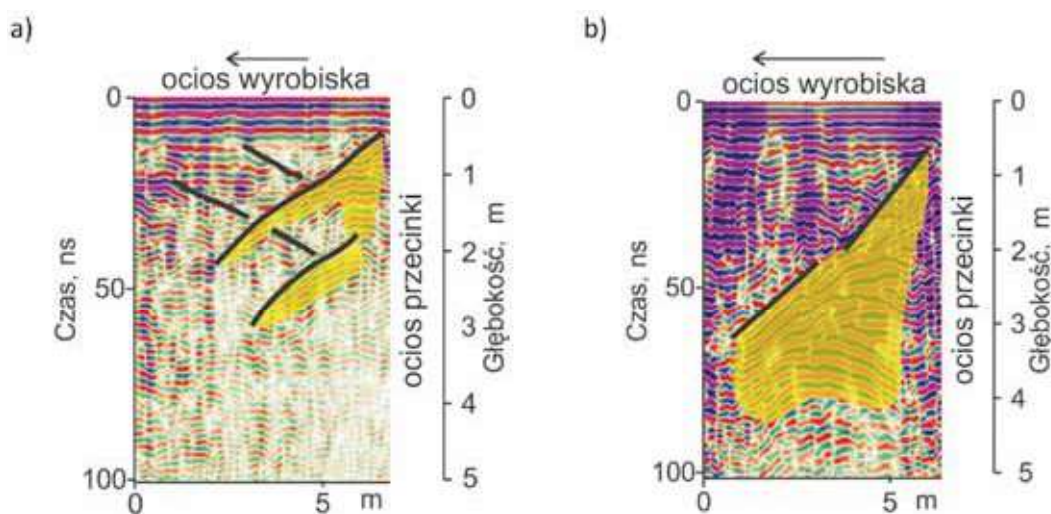
Rys. 12. Granica litologiczna między piaskowcem a mułowcem. Radarogram z pomiaru GPR anteną o częstotliwości 250 MHz na profilu w odciosie wyrobiska

Fig. 12. Lithological border between sandstone and mudstone. Radarogram gained by 250 MHz antenna along the excavation side wall

(przecinki) w warunkach spękanego piaskowca (rys. 13a) i spękanego mułowca (rys. 13b). Pomiar GPR został przeprowadzony na profilu w odciosie wyrobiska w taki sposób, że oddalano się od skrzyżowania z wyrobiskiem prostopadłym. Na radarogramach widać, że refleksy są silne i wielokrotne oraz „przykrywają” użyteczną informację.

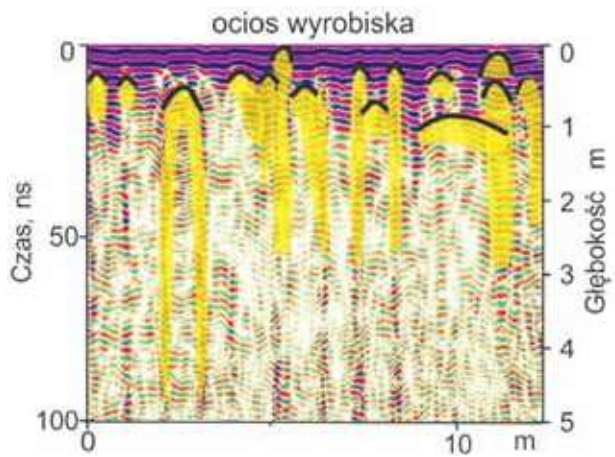
Na rysunku 14 przedstawiono przykład refleksów od metalowych elementów zbrojenia betonowej obudowy szybu. Elementy te, dające wyraźne refleksy w postaci łuków i wtórnych refleksów znajdują się na różnej głębokości do ok. 1m. Na radarogramie widać, że refleksy zakłócające są tak silne, że praktycznie nie odwzorowuje się wewnętrzna powierzchnia obudowy szybu.

Na rysunku 15a i 15b przedstawiono przykład rozpoznania zlikwidowanego świetlika (szybek pionowy o niewielkich rozmiarach) w warstwie mułowca i piaskowca przecinający pionowo wyrobisko. Materiał wypełniający przestrzeń świetlika składał się z drobnych fragmentów piaskowca i mułowca oraz piasku. Na radarogramach odwzorowuje się również strefa spękań towarzysząca świetlikowi. Na radarogramach (rys. 15c i 15d) widać różnice w rozdzielczości rozpoznania ośrodka za pomocą anten 250 MHz i 100 MHz. Często obraz nieciągłości różni się dla obu radarogramów. Natomiast zasięg głębokościowy rozpoznania jest znacząco korzystniejszy dla anteny 100 MHz.



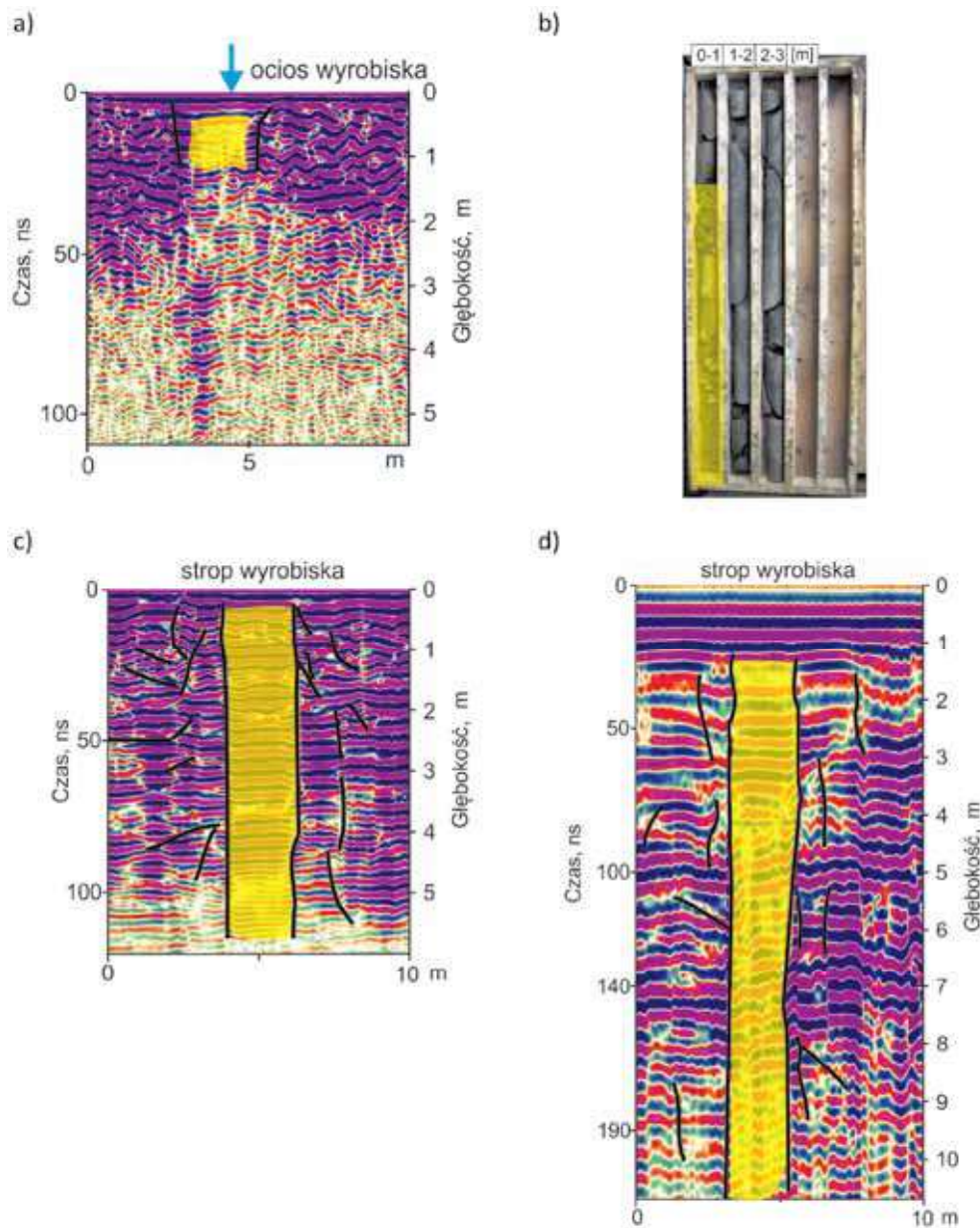
Rys. 13. Refleksy od „wewnętrznych” odciosów prostopadłego wyrobiska (przecinki) – a) radarogramy z pomiaru GPR o częstotliwości 250 MHz na profilu w odciosie wyrobiska w warstwie piaskowca, b) mułowca

Fig. 13. Reflections from „internal” sidewalls which are perpendicular to the GPR profile –a) radarograms gained by 250 MHz antenna on the profile along excavation sidewall in sandstone layer, b) mudstone layer



Rys. 14. Refleksy pochodzące od zbrojenia murowej obudowy szybu. Radarogram z pomiaru GPR anteną o częstotliwości 250 MHz

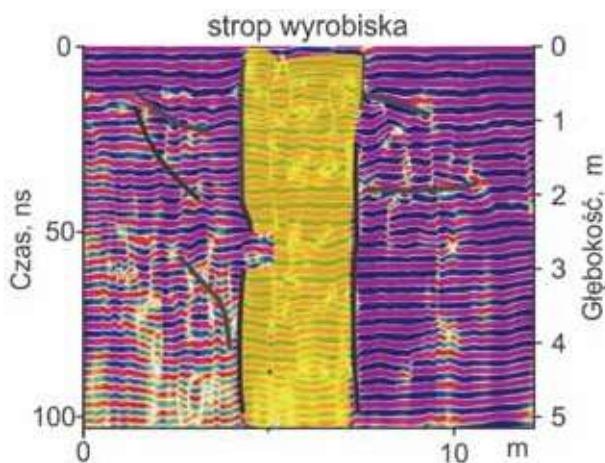
Fig. 14. Reflections from steel reinforcement in brick support of the shaft. Radarogram gained by 250 MHz antenna



Rys. 15. Zlikwidowany świetlik (szybek pionowy o niewielkich rozmiarach) w warstwie mułowca i piaskowca przecinający pionowo wyrobisko – a) radarogram z pomiaru GPR anteną o częstotliwości 250 MHz w ociosie wyrobiska, b) rdzeń otworu kontrolnego w strefie anomalnej w ociosie wyrobiska, c) w stropie wyrobiska antenami o częstotliwościach 250 MHz, i d) 100 MHz

Fig. 15. The ventilation shaft in mudstone and sandstone layers crossing excavation – a) radarogram gained by 250 MHz antenna along side wall, b) and borehole core from anomaly zone comes from side wall, c) radarogram along excavation roof gained by 250 MHz and d) 100 MHz antennas

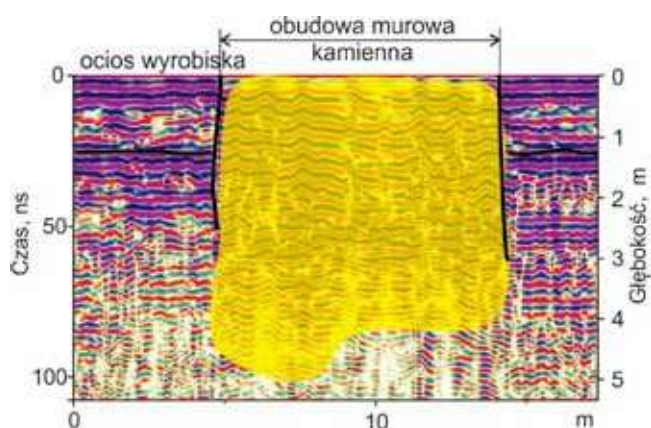
Na rysunku 16 przedstawiono przykład odwzorowania granic wyrobiska prostopadłego (przecinki) do wyrobiska głównego, w którym były wykonywane pomiary GPR. Profil GPR przebiegał w stropie w osi wyrobiska i przechodził przez skrzyżowanie z przecinką. W tym przypadku sygnał zakłócający nie jest silny i zaznacza się głównie granica obrysu wyrobiska.



Rys. 16. Refleksy od granic obrysu skrzyżowania wyrobisk. Radarogram z pomiaru GPR anteną o częstotliwości 250 MHz na profilu wzdłuż osi stropu wyrobiska krzyżującego się z przecinką

Fig. 16. Reflections from crossing excavation. Radarogram gained by 250 MHz antenna on the profile along the roof of excavation crossing

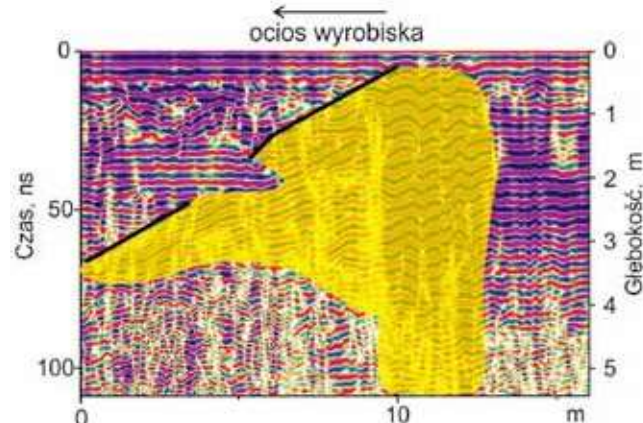
Na rysunku 17 przedstawiono przykład refleksów od obudowy murowej z kamienia (piaskowca) w górotworze karbońskiego piaskowca. Na radarogramie, oba końce obudowy zaznaczają się silniej w porównaniu do części środkowej. Charakterystyczne falowania przypuszczalnie mają związek z większymi fragmentami piaskowca tworzącymi obudowę. Bezpośrednio za obudową zaznacza się kilkunastocentymetrowa pustka na całej długości odcinka obudowy. W odległości ok 1,2 m zaznacza się refleks od identycznej obudowy przyległego ociosu wyrobiska.



Rys. 17. Refleksy od obudowy murowej z kamienia (piaskowca) w warstwie piaskowca. Radarogram z pomiaru GPR na profilu wzdłuż ociosu wyrobiska anteną o częstotliwości 250 MHz

Fig. 17. Reflections from stone support built from sandstone fragments. Radarogram gained by 250 MHz antenna along sidewall

Na rysunku 18 przedstawiono przykład refleksów od kabla elektrycznego przecinającego profil pomiarowy. Refleksy te są bardzo silne i „zakrywają” informacje użyteczne. Należy zauważyć niesymetryczność sygnału zakłócającego ze względu na kierunek pomiaru.



Rys. 18. Refleksy pochodzące od kabla elektrycznego przecinającego profil pomiarowy. Radarogram z pomiaru GPR anteną o częstotliwości 250 MHz wzdłuż ociosu wyrobiska

Fig. 18. Reflections from electric cable crossing the GPR profile. Radarogram gained by 250 MHz antenna along sidewall

5. Podsumowanie

Analiza radarogramów wykonanych w podziemnych wyrobiskach górniczych jest złożona ze względu na wpływ wielu czynników pochodzenia górniczego, zakłócających pomiar oraz względnie silne efekty fal wielokrotnych i rewerberacji. W pracy przedstawiono przykłady takich radarogramów zarejestrowanych w badaniach wykonanych antenami 250 MHz i 100 MHz w wyrobiskach dołowych w różnych warunkach geologiczno-górnictwa.

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń można sformułować następujące spostrzeżenia:

1. Metoda georadarowa dostarcza interesujących informacji o granicach z silnym kontrastem właściwości elektromagnetycznych. W warunkach górniczych wynik pomiaru zależy od skuteczności ograniczenia wpływu czynników zakłócających rejestrację.
2. Refleksy, widoczne na radarogramach z pomiarów GPR w podziemnych wyrobiskach górniczych, można podzielić na dwie grupy pochodzące od granic:
 - obiektów górniczych, np. powierzchni wyrobisk, elementów obudowy i wyposażenia wyrobisk, itp.,
 - obiektów naturalnych, np. pustek i stref rozluźnień, granic litologicznych, większych spękań, uskoków itp.
3. Radarogram z pomiarów w sąsiedztwie obiektów metalowych jest najczęściej nieczytelny ze względu na silne refleksy "zakrywające" informację użyteczną.
4. W badaniach górotworu wokół wyrobiska górniczego zaleca się używanie anten o częstotliwości 200-250 MHz, jako wystarczających do identyfikacji większych spękań, pustek i stref rozluźnień. Dla rozpoznania większych obiektów, można użyć anteny 100 MHz. W badaniach jakości obudowy i ośrodka bezpośrednio za obudową do głębokości ok. 1 m zaleca się stosowanie anten o częstotliwości 400-500 MHz.

5. Wyniki pomiaru w górotworze silnie spękanym zależą od kierunku pomiaru.

Literatura

1. *Annan A.P.*: Ground Penetrating Radar, Principles, Procedures and Applications. Sensors and Software Inc., Mississauga, 2003, Kanada.
2. *Annan A.P.*, *Davis J.L.*: Impulse radar sounding in permafrost. Radio Science Vol. 11, Issue 4, 2003, 1976, 383–394.
3. *Karczewski J.*, *Ortyl L.*, *Pasternak M.*: Zarys Metody Georadarowej, Wydawnictwa AGH, Kraków 2011.
4. *Kirsch R.*: Groundwater geophysics a tool for hydrogeology. Springer-Verlag Berlin, 2006.
5. *Lehmann F.*, *Green A.G.*: Semiautomated georadar data acquisition in three dimensions. Geophysics vol. 64, 1999, 719-731.
6. *Monaghan W.D.*, *Trevits M.A.*, *Sapko M.J.*: Evaluation of Mine Seals Using Ground Penetrating Radar. Proc. of 18th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (extended abstract), 2005.
7. *Noon D.*: Stepped-frequency radar design and signal processing enhances ground penetrating and resolution performance. Rozprawa doktorska, Uniw. Queensland, 1996.
8. *Popiolek E.*, *Pilecki Z.*, *Karczewski J.*, *Ziętek J.*, *Kłosiński J.*, *Baranowski A.*, *Pilecka E.*, *Ortyl L.*, *Pszonka J.*, *Krawiec K.*: Wpływ rozdzielczości metod falowych na efektywność rozpoznania granic nieciągłości osuwiska, (Pilecki Z. red.). Agencja Wydawniczo-Poligraficzna „ART-TEKST”, Kraków, 98, 2008.
9. *White H.*, *du Plessis A.*, *Noble K.*, *Treloar M.*: Routine Application of Radar in Underground Mining Applications. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1999, 197-206.

