

## Ocena wpływu wybranych parametrów profilowań georadarowych w badaniach podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa na przykładzie zrębu Zakrzówek

Jerzy Karczewski<sup>1</sup>, Łukasz Ortyl<sup>2</sup>, Ewelina Mazurkiewicz<sup>1</sup>

**Evaluation of the influence of selected parameters of GPR profiling in the study of bedrock for construction needs on the example of the Zakrzówek horst.** Prz. Geol., 65: 796–802.

*Abstract.* The identification of bedrock for construction purposes in areas threatened by discontinuous deformations can be accomplished using various geophysical methods. The paper presents the results of studies conducted using the GPR method in the Zakrzówek horst area in Cracow as a site rich in karst structures (caves, cavities, sinkholes). A number of tests were carried out on the field using GPR equipment: ProEx System and RAMAC/GPR CU II of the Swedish company Mala Geoscience. During measurements 250 MHz shielded antennas were used. The following measurement parameters were changed during tests: sampling frequency, number of stacks and distance between traces. The influence of the above parameters on the quality of recorded GPR images was analyzed.

**Keywords:** Ground Penetrating Radar, stacking, sampling frequency, distance between traces, karst, limestones

Inwestycje budowlane realizowane obecnie są niejednokrotnie prowadzone na obszarach zagrożonych występowaniem deformacji nieciągłych. Na terenach tego typu często występuje zapotrzebowanie na rozbudowę istniejącej infrastruktury w zakresie budownictwa drogowego, mieszkaniowego i przemysłowego. Deformacje mogą być pochodzenia antropogenicznego bądź naturalnego, ich istnienie można zaobserwować zarówno w rejonach eksploatacji górniczej (również historycznej), jak i na obszarach ruchów masowych (osuwiska i inne) oraz terenach, na których występują zjawiska krasowe.

Decyzja o przeznaczeniu terenu pod inwestycje na takich obszarach wymaga kompleksowego przeprowadzenia prac, które mają na celu rozpoznanie stanu podłoża. Konieczne jest stosowanie efektywnych metod, które pozwalają zrealizować badania w sposób szybki i ekonomiczny. Punktem wyjścia takich prac mogą być badania geofizyczne, które są wymieniane jako jedna z grup połowych metod badawczych na etapie badań do celów projektowych w zapisach Norm Europejskich Eurokod 7 (PN-EN 1997-2). W obliczu rozwoju technologii (aparatury geofizycznej) i możliwości przetwarzania, znaczenie metod geofizycznych w rozwiązywaniu problemów budownictwa ciągle rośnie.

Należy podkreślić, że celem stosowania badań geofizycznych nie jest zastąpienie metod inwazyjnych, takich jak odwierty i inne badania geotechniczne, ale optymalizacja ich lokalizacji. Dzięki badaniom geofizycznym można ograniczyć liczbę kosztownych sondowań, a na podstawie wyników interpretacji geofizycznej typować optymalne położenie odwiertów. Ich lokalizacja ma szczególne znaczenie w rejonach zagrożonych deformacją nieciągłą, gdzie dla deformacji powierzchniowych mogą wystąpić zapadliska lub osuwiska (granice poślizgu), a w przypadku deformacji liniowych – progi lub rowy. Ze względu na swój quasi-ciągły charakter, metody geofizyczne pozwalają ustalić rozkład takich zjawisk w wymiarze przestrzen-

nym. W tym ostatnim aspekcie istotnym czynnikiem będzie umiejętne stosowanie geodezyjnych technik pomiarowych zapewniających właściwą georeferencję pozyskanych danych geofizycznych (Ortyl, Bałut, 2006; Ortyl, Owerko, 2007).

Spośród metod geofizycznych do rozwiązywania problemów geotechnicznych w warstwach przypowierzchniowych można stosować metody:

- sejsmiczne – metodę refleksyjną, refrakcyjną (Dec, 2010), tomografię i metodę MASW,
- geoelektryczne: w tym elektrooporowe (Mościcki i in., 2014) i elektromagnetyczne (Oryński i in., 2016),
- metody pól potencjalnych – magnetyczną, grawimetryczną (Štěpančíková i in., 2011) i inne.

Jedną z metod geofizycznych, której popularność znacznie wzrasta w ostatnich latach, jest metoda georadarowa – GPR (*Ground Penetrating Radar*, *Ground Probing Radar*). Formalnie jest ona jedną z metod elektromagnetycznych, z uwagi jednak na swoją popularność zyskała status niezależnej metody geofizycznej. W zależności od zastosowanych anten i warunków geologicznych, ma zasięg maksymalnie kilkudziesięciu metrów. Obszerne wprowadzenie do metody georadarowej można znaleźć w pracach m.in. Karczewskiego i in. (2011), Danielsa (2004) i Jola (2009). Metodę georadarową można z powodzeniem stosować do lokalizacji pustek na terenach górniczych (Tomecka-Suchoń, Marczak, 2015), do badania obszarów występowania struktur krasowych (Zieliński i in., 2016), do badania osuwisk (Pilecki, 2008) i rozwiązywania innych problemów w warstwach przypowierzchniowych.

W przedstawionej publikacji poddano ocenie jakościowej i analizie ilościowej rezultaty badań georadarowych wykonanych na obszarze zrębu Zakrzówek w Krakowie. Celem przeprowadzonych prac było określenie wpływu parametrów pomiarowych na jakość zarejestrowanych echogramów. W wyniku przeprowadzonych działań sformułowano wnioski opisujące te zależności. Przedstawione

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; karcz@agh.edu.pl, ewemazurkiewicz@gmail.com.

<sup>2</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; ortyl@agh.edu.

wyniki analizy i postawione wnioski mogą stanowić zarówno istotne wskazanie dla wykonawców badań georadarowych w celu ich właściwej realizacji, jak i doboru sprzętu pomiarowego. Publikacja może również posłużyć zleceniodawcom badań georadarowych w zrozumieniu zależności kształtujących jakość tego typu prac.

### UWAGI METODYCZNE

Obecnie na rynku jest dostępnych wiele różnorodnych systemów georadarowych, często o odmiennych parametrach pomiarowych. Możliwości techniczne stosowanego sprzętu pomiarowego mogą więc mieć istotny wpływ na ostateczny wynik prowadzonego rozpoznania. Coraz więcej nowoczesnych systemów georadarowych (np. Ground Explorer firmy Mala Geoscience, SIR-4000 firmy GSSI) nie umożliwia niestety swobodnego doboru parametrów pomiarowych w pełnym zakresie. Coraz częściej georadar staje się utylitarnym narzędziem w rękach służb budowlanych, archeologów, kryminologów. Osoby takie nie zawsze potrafią w pełni wykorzystać potencjał systemu GPR.

Jakość materiału pomiarowego zarejestrowanego aparaturą georadarową zależy od przyjętych parametrów. Do najbardziej istotnych należą: ilość próbek sygnału, częstotliwość próbkowania sygnału, składanie (sumowanie) sygnału i odległość pomiędzy trasami.

Z dwóch pierwszych parametrów można wyliczyć czas rejestracji sygnału powrotnego – okno czasowe (*time window*), mające wpływ na potencjalną głębokość penetracji. Czas rejestracji jest związany ze spodziewaną głębokością zalegania obiektu poszukiwanego. Częstotliwość próbkowania sygnału wraz z ilością próbek decyduje o długości czasu rejestracji. Obowiązuje tutaj prosta zależność:

$$T = n \cdot \frac{1}{f} = n \cdot \Delta T \quad [1]$$

gdzie:

$T$  – długość okna czasowego,

$f$  – częstotliwość próbkowania sygnału,

$n$  – ilość próbek,

$\Delta T$  – interwał czasu pomiędzy kolejnymi próbkami.

Częstotliwość próbkowania sygnału zależy przede wszystkim od częstotliwości anten georadaru. Analizując widmo amplitudowe sygnału rejestrowanego przez antenę, można powiedzieć, że maksymalne częstotliwości rejestrowane przez antenę trzykrotnie przekraczają częstotliwość środkową anteny. Zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu (Bracewell, 1968), częstotliwość próbkowania sygnału powinna być dwukrotnie wyższa niż maksymalna częstotliwość rejestrowana w sygnale. Dlatego zaleca się, żeby częstotliwość próbkowania sygnału była 6-krotnie wyższa niż częstotliwość środkowa anteny. Dla przykładu, dla anteny ekranowanej o częstotliwości środkowej 250 MHz minimalna częstotliwość próbkowania wynosi 1500 MHz.

Zwiększanie częstotliwości próbkowania (*oversampling*) przy zachowaniu tej samej ilości próbek prowadzi do skrócenia czasu rejestracji. Chcąc zrekompensować zmniejszenie długości okna czasowego wynikającego ze zwiększenia częstotliwości próbkowania, należy zwiększyć

ilość próbek w sygnale (tym samym zwiększamy czas rejestracji). Z drugiej strony, można powiedzieć, że zwiększając częstotliwość próbkowania, w pewnym stopniu poprawia się rozdzielczość rejestracji.

Sumowanie (składanie) sygnału ma wpływ na stosunek S/N (*Signal/Noise*). Przyjmuje się, że pierwiastek kwadratowy z ilości złożeń  $N$  jest proporcjonalny do poprawy stosunku S/N (Rietsch, 1980). Niestety wysokie składanie wymusza zmniejszenie szybkości przesuwania anten (szybkości całego pomiaru). Innym parametrem aparaturowym związanym ze składaniem i szybkością pomiaru jest PRF (*Pulse Repetition Frequency*). Jest to częstotliwość emitowania impulsu elektromagnetycznego w głąb ośrodka geologicznego. Im wyższe PRF posiada dana jednostka georadaru, tym wyższe składanie można wybrać, bez zmniejszania prędkości profilowania. Na przykład, w japońskim georadarze OYO model 2441 (model z końca lat 80. ub.w.) już składanie 16-krotne wymuszało znaczne zmniejszenie szybkości przesuwania anten (Karczewski, 1997). W nowoczesnych konstrukcjach georadarowych, takich jak SIR-4000 czy też Ground Explorer, nie ma możliwości wyboru składania jako parametru pomiarowego. Domyślnie jest włączona opcja *autostacking*, oznaczająca automatyczny wybór maksymalnego złożeń przy danej prędkości przesuwu anten.

Odległość pomiędzy trasami to parametr związany z pojęciem rozdzielczości pomiarów georadarowych. Zależy ona od częstotliwości stosowanych anten georadarowych i właściwości dielektrycznych ośrodka geologicznego (por. [2]), a także od rozmiaru poszukiwanego obiektu. Odległość ta wyrażona jest prostą zależnością (Annan, 2001):

$$\Delta x = \frac{c}{4 \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad [2]$$

gdzie:

$c$  – prędkość fali elektromagnetycznej w próżni,

$f$  – częstotliwość fali propagującej w ośrodku,

$\epsilon_r$  – względna stała dielektryczna ośrodka.

Na przykład, dla anteny o częstotliwości 250 MHz krok pomiędzy trasami nie powinien być większy niż 10 cm (dla ośrodka o  $\epsilon_r = 9$ ). W praktyce ta odległość może być mniejsza. Rejestracja z mniejszym krokiem wydłuża czas pomiaru oraz powoduje zniekształcenie anomalii. Należy podkreślić, że w najnowszych konstrukcjach radarowych można je wykonywać z mniejszym krokiem, bez zmniejszania szybkości przesuwania anten. Można wtedy w programach do przetwarzania danych georadarowych wybierać np. co drugą trasę do dalszych operacji, a także interpolować trasy, tzn. między dwie trasy wstawiać interpolowaną trzecią.

Jak już wspomniano, wiele spośród obecnych na rynku systemów georadarowych nie posiada możliwości manualnego ustawienia pełnego spektrum opisanych parametrów pomiarowych, których odpowiedni dobór ma znaczący wpływ na jakość wyników. Chcąc ocenić zakres zmian na zarejestrowanych obrazach, wykonano w terenie szereg badań testowych i przeanalizowano uzyskane wyniki. Do pomiaru wykorzystano systemy RAMAC/GPR CUII i ProEx firmy Mala Geoscience, w których istnieje możliwość ma-



nualnego doboru opisanych parametrów. Ocenie poddano wpływ następujących parametrów pomiarowych: liczbę złożów (sumowań) sygnału, częstotliwość próbkowania sygnału oraz krok pomiarowy (odległość pomiędzy trasami). Efektem finalnym jest ocena wpływu tych parametrów na jakość pozyskanego materiału pomiarowego.

Na teren badań wybrano rejon występowania utworów, w których zachodzą procesy krasowienia. Na obszarze tym, podobnie jak na terenach górniczych, występują struktury podpowierzchniowe (pustki i leje zapadliskowe).

### REJON BADAŃ

Badania georadarowe zostały wykonane w południowo-zachodniej części Krakowa, w dzielnicy Podgórze. Administracyjnie, obszar znajduje się w obrębie parku Skąły Twardowski stanowiącego część Bielańsko-Tynieckiego Parku Krajobrazowego (ryc. 1).

Teren, na którym wykonano serię pomiarów, znajdował się w granicach działek ewidencyjnych 126104\_9.0008: 40/3, 63/1, 67/1. Został on wytypowany jako testowy poligon badawczy do badań geologicznych, geofizycznych i geodezyjnych realizowanych w ramach projektu Rozwój Innowacji Drogowych. Lokalizację tę wybrano ze względu na obecność w podłożu skał, w których zachodzi proces krasowienia.

Obszar pola pomiarowego to fragment zrębu Zakrzówka – niewielkiej struktury tektonicznej o wyjątkowych walorach geologiczno-przyrodniczych. Na obszarze ok. 1 km<sup>2</sup> występują trzy nieczynne już kamieniołomy (Zakrzówek, Na Kapelance oraz Skąły Twardowski), łomy i wiele struktur o genezie krasowej (Sermet, Rolka, 2013). Struktura zrębowa powstała w wyniku ruchów tektonicznych, które zachodziły w miocenie. Badany obszar budują głównie wapienie ulawiczone z krzemieniami, pochodzące z epoki jurajskiej, piętra oksfordu, których powstanie wiąże się z występowaniem na tym obszarze płytkiego, ciepłego morza epikontynentalnego (Sermet, Rolka, 2013). Zostały także udokumentowane formy krasowe, jak Jaskinia Twardowskiego oraz Jasna. Widoczne są również mniejsze struktury, np. zapadliska wypełnione częściowo rezydiami.

Na poligonie wyznaczono odcinek, wzdłuż którego przeprowadzono badania georadarowe. Przebieg lokalizacyjny profilu badawczego przedstawiono na podkładzie planu jaskini (ryc. 2). Podkład ten został wpasowany metodą transformacji afinicznej w metryczny obraz modelu terenu i jaskini, pozyskany naziemnym skanowaniem laserowym (TLS – *Terrain Laser Scanner*).

Geograficznie, zręb Zakrzówka jest położony w mezoregionie Obniżenie Cholerzyńskie, który stanowi część makroregionu Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej (Kondracki, 2002). W początkowej części profilu teren charakteryzuje się zmienną topografią – występują niewielkie zagłębienia i wzniesienia, które są niewątpliwie związane ze strukturami zapadliskowymi. Obszar jest porośnięty trawą, a po 85 m profil przebiega w terenie, na którym występują liczne drzewa i zarośla.

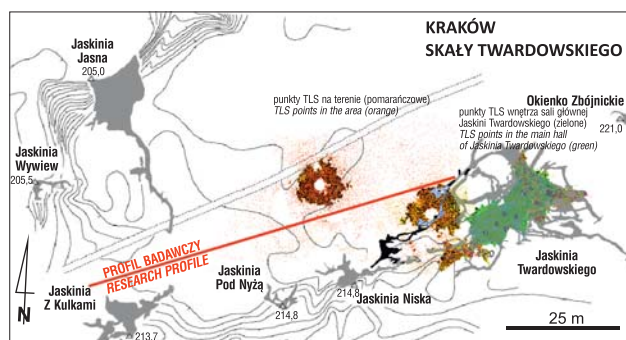
### METODYKA BADAŃ

Rejon Jaskini Twardowskiego na Zakrzówku stał się georadarowym poligonem pomiarowym. W niniejszym



Ryc. 1. Lokalizacja rejonu badań (na podstawie [www.geoport.gov.pl](http://www.geoport.gov.pl))

Fig. 1. Research site map (based on: [www.geoport.gov.pl](http://www.geoport.gov.pl))



Ryc. 2. Lokalizacja profilu badawczego na skalibrowanym planie jaskiń występujących w obszarze południowo zachodniej części parku Skąły Twardowski (na podstawie Górny, 2007, zmienione)

Fig. 2. Location of GPR profile viewed on the background of calibrated plan of caves in the south-west part on Skąły Twardowski park (based on: Górny, 2007, modified)

artykule przedstawiono wyniki uzyskane za pomocą georadarów firmy Mala GeoScience. Użyto dwóch radarów: RAMAC/GPR CU II i ProEx System. Wymienione systemy radarowe mają zbliżone parametry. W obu częstotliwość repetycji impulsu wynosi PRF=100 kHz. Aparatury te mają 16 bitowe przetworniki A/D. Oznacza to, że zakres amplitud próbek, który można rejestrować tymi radarami, zmienia się od 0 do 65535 (lub od -32768 do 32767). Stosunek amplitudy maksymalnej do minimalnej decyduje m.in. o stosunku S/N sygnału.

W radarze ProEx nieznacznie poprawiono stabilność sygnału rejestrowanego. Zmieniono też sposób komunikacji pomiędzy jednostką centralną a komputerem sterującym. Zastosowano złącze Ethernet o szybkości do 100 Mbit/s (w starszym radarze był to znacznie wolniejszy port równoległy IEEE 1284). W tym przypadku parametry jednostek centralnych obu radarów nie mają kluczowego wpływu na zarejestrowany obraz georadarowy.

Analizie zostały poddane wyniki zarejestrowane za pomocą anten ekranowanych o częstotliwości 250 MHz.

**Tab. 1.** Parametry pomiarowe analizowanych rejestracji  
**Table 1.** Measurement parameters

Nazwa Name	Krok Distance between traces [m]	Czas rejestracji Time window [ns]	Ilość próbek Number of samples	Częstotliwość próbkowania Sampling frequency [MHz]	Częstotliwość próbkowania Sampling frequency [MHz]	Długość profilu Long of the profile [m]	Czas realizacji profilu Profile execution time [min]
Prof001	0,05	306	508	1655	4	119	3 1/2
Prof002	0,05	306	508	1655	64	117	11
Prof003	0,05	148	508	3428	4	119	–
Profil2	0,05	306	508	1655	32	86	–
Profil3	0,10	306	508	1655	512	85	90
Profil4	0,05	306	508	1655	4	86	–

Podczas pomiaru w znacznym stopniu zmieniano parametry rejestracji, które mają decydujący wpływ na jakość uzyskanego obrazu georadarowego. Cały materiał pomiarowy zarejestrowano w jednym profilu, powtarzając wielokrotnie pomiary. Odcinek testowy miał długość ok. 85 m. Niektóre profile pomiarowe przedłużono (por. tab. 1). Punkt początkowy i końcowy profilu wytyczono z zastosowaniem pomiarów satelitarnych GNSS za pomocą odbiornika Leica 1200, pracującym w trybie RTK (*Real Time Kinematic* – pomiar kinematyczny w czasie rzeczywistym), z wykorzystaniem poprawek różnicowych z pojedynczej stacji referencyjnej KRAW zlokalizowanej na budynku C-4 AGH. Zastosowany tryb pomiarowy pozwalał na wyznaczenie i odtworzenie pozycji profilu z dokładnością sytuacyjną pojedynczych centymetrów. Celem lepszej kalibracji wzajemnej echogramów w kolejnych rejestracjach, wyznaczono na linii profilowej dodatkowe punkty pośrednie w odległości co 25 m. Parametry rejestracji analizowanych w niniejszej publikacji przedstawiono w tabeli 1.

Ponieważ profile miały różną długość, dlatego do analizy porównawczej wybrano ich początkowy fragment o długości 85 m. Wyzwalanie sygnału na rejestracji Profil3 – wykonywanej z bardzo wysokim składaniem (sumowaniem – 512 razy), było wykonywane manualnie – na sygnał z klawiatury. Antenę przesuwano co 0,1 m, a następnie rejestrowano pojedynczy sygnał. Pozostałe echogramy rejestrowano w sposób „ciągły”, były one wyzwalane na podstawie standardowego kółka pomiarowego. Dodatkowo, podczas niektórych pomiarów różniących się składaniem (Prof001, Prof002, Profil3), zmierzono czas profilowania – czas przesuwania anten wzdłuż profilu (por. tab. 1). Jest to czas orientacyjny zmierzony podczas testów dla konkretnego modelu georadaru, przy określonych parametrach pomiarowych. Mimo że pomierzony czas jedynie na kilku profilach nie jest w pełni miarodajny, to różnica czasu pomiaru jest znacząca i w dużym stopniu może wskazywać na zmiany szybkości profilowania, a więc wydajności pomiaru.

Zarejestrowane dane pomiarowe poddano standardowemu przetwarzaniu w programie ReflexW (niemieckiej firmy Sandmeier). Następnie przetworzone echogramy, zarejestrowane przy różnych parametrach pomiarowych, analizowano. Niektóre rejestracje zostały przetworzone za pomocą programów autorskich.

W celu analizy rejestracji wykonanych przy różnym składaniu obliczono energię wszystkich tras na profilach.

Jako estymator energii zastosowano następującą zależność (Karczewski i in., 2011):

$$E_j = \sqrt{\sum_{n_1}^{n_2} x_i^2} \quad [3]$$

gdzie:

$E_j$  – miara energii j-tej trasy,

$x_i$  – amplituda i-tej próbki,

$n_1, n_2$  – wartości graniczne okna, w którym liczone energię.

Dalszej analizie poddano również rejestracje różniące się częstotliwością próbkowania sygnału – Prof001 i Prof003 (por. tab. 1). Inne parametry pomiarowe były w tym przypadku identyczne. Ostatni porównywany parametr pomiarowy to krok pomiarowy (odległość pomiędzy trasami). Analizowano echogramy uzyskane z krokiem 0,05; 0,025 i 0,30 m.

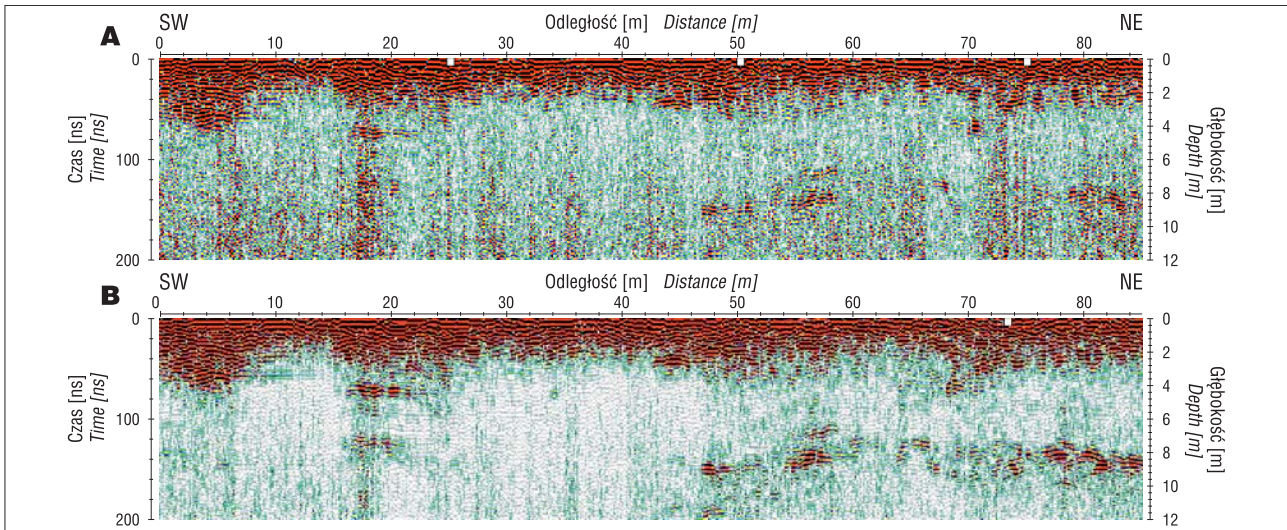
Na badanym obszarze wykonano również profilowania prędkości WARR, na podstawie których określono prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w miejscu pomiaru. Wynosi ona  $v = 0,12$  m/ns. Wykorzystując tę wartość, utworzono skalę głębokościową na wszystkich echogramach.

## WYNIKI I INTERPRETACJA

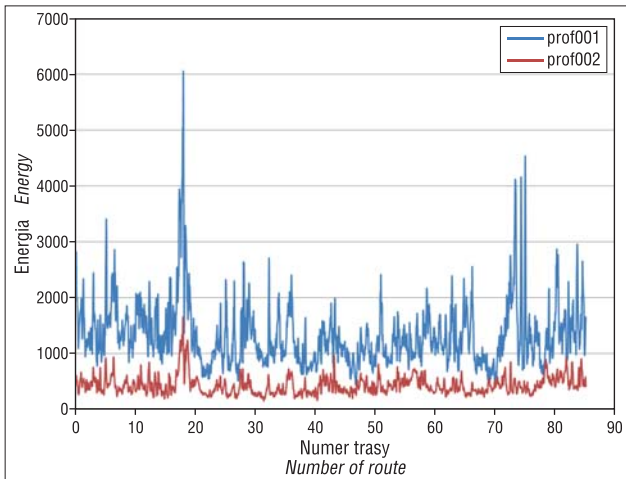
Pierwszym parametrem pomiarowym, który poddano analizie jest sumowanie (składanie) sygnału. Na rycinie 3 zaprezentowano dwa echogramy: u góry zarejestrowany przy składaniu 4, na dole przy składaniu 64. Materiał pomiarowy zarejestrowany na prof001 (ryc. 3A) i prof002 (ryc. 3B) został identycznie przetworzony.

Wizualna analiza porównawcza pozwala stwierdzić, że składanie 64-krotne powoduje znaczącą poprawę stosunku S/N. Średni poziom szumu na echogramie przedstawionym na rycinie 3B jest znacznie niższy niż na 3A (uzyskanym przy zastosowaniu niższego składania). Na obu echogramach jest widoczna wyraźna anomalia od 45 m b. do końca profilu na głębokości 6–8 m. Z dużym prawdopodobieństwem jest ona odzwierciedleniem górnego piętra jaskini (ryc. 2). Anomalia ta zaznacza się zdecydowanie wyraźniej na echogramie pokazanym na rycinie 3B, ponieważ wraz ze wzrostem liczby złożań poprawiła się korelacja i ciągłość refleksów użytecznych. Negatywną stroną stosowania wysokiego składania sygnału jest znaczne spowolnienie pomiaru (por. tab. 1) – przynajmniej w





**Ryc. 3.** Rejestracje georadarowe przy zastosowaniu różnej wartości składowania sygnału. **A** – składowanie 4-krotne, **B** – składowanie 64-krotne  
**Fig. 3.** Echograms recorded with different number of stacks; **A** – 4 times **B** – 64 times



**Ryc. 4.** Wykres estymacji energii tras dla profili prof001 (4 złożenia) i prof002 (64 złożenia)  
**Fig. 4.** Chart of the estimation of energy of traces for profiles: prof001 (4 stacks) and prof002 (64 stacks)

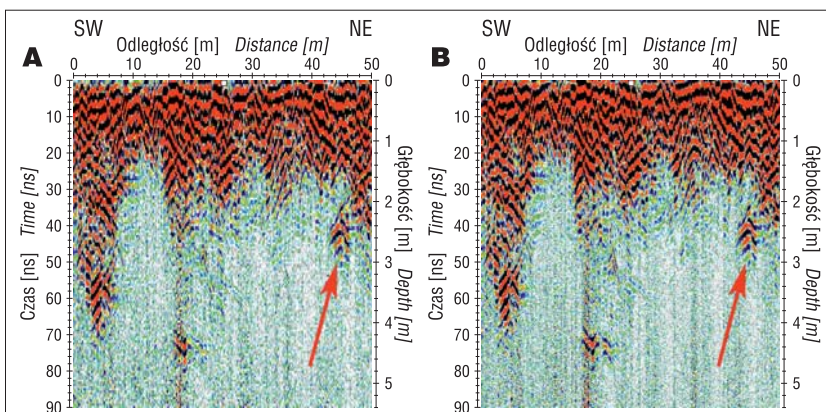
przypadku zastosowanych w niniejszym teście georadarów RAMAC/GPR CUII czy też ProEx System.

Dla tych samych rejestracji poddano również analizie energię kolejnych tras na profilach prof001 i prof002 (ryc. 4). Energię obliczono, posługując się zależnością [3], z materiału nieprzetworzonego (jedynie po wyrównaniu średniego poziomu sygnału do zera) i oknie 150–508 próbek na każdej trasie. Celem zastosowania takiego okna było nieuwzględnienie w obliczeniach próbek o najwyższych amplitudach na początku sygnału.

Analizując dane przedstawione na rycinie 4, można zauważyć, że średni poziom energii dla tras zarejestrowanych z wysokim składowaniem jest znacznie niższy niż dla tych z małą liczbą złożań. Można jednocześnie zaobserwować, że rozrzut energii dla tras o wysokim składowaniu jest znacznie mniejszy. Lokalne maksimum na 18 m b. profilu jest związane z anomalią pochodzącą od struktury o pionowym przebiegu (ryc. 3).

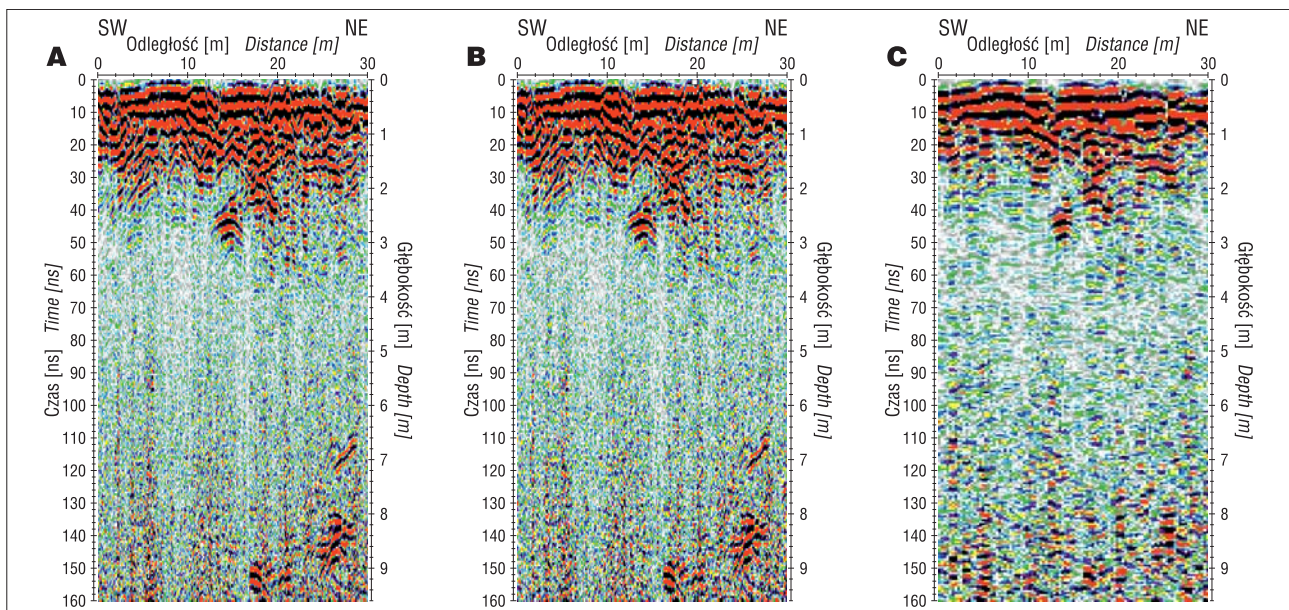
Na rycinie 5 pokazano dwie rejestracje różniące się częstotliwością próbkowania sygnału. W przypadku A zastosowano częstotliwość próbkowania  $f = 1655$  MHz, zaś w B –  $f = 3428$  MHz. Obie rejestracje zostały przetworzone w identyczny sposób. Należy podkreślić, że celowo nie zastosowano w tym przypadku filtracji dolnoprzepustowej (obcinającej wyższe częstotliwości sygnału).

Analizując powyższy przykład, można zaobserwować niewielką poprawę rozdzielczości na echogramie zarejestrowanym przy wyższej częstotliwości próbkowania sygnału (ryc. 5B). Na rycinie 5 wskazano strzałką fragment, na którym zjawisko to jest wyraźnie widoczne. Oczywiście obie rejestracje wykonano, stosując prawidłowe parametry pomiarowe (częstotliwość przetwarzania sygnału przekracza ponad sześciokrotnie częstotliwość środkową anteny – ryc. 5A). Jak już wspomniano, zwiększanie częstotliwości próbkowania prowadzi do zmniejszenia



**Ryc. 5.** Porównanie dwóch rejestracji, na których zastosowano różne częstotliwości próbkowania sygnału. **A** –  $f = 1655$  MHz, **B** –  $f = 3428$  MHz. Strzałką zaznaczono anomalię na obu echogramach  
**Fig. 5.** Comparison of echograms recorded with different sampling frequency. **A** –  $f = 1655$  MHz, **B** –  $f = 3428$  MHz. Arrows indicate the anomaly





**Ryc. 6.** Fragmenty tej samej rejestracji pokazane z różnym krokiem pomiarowym. **A** – 0,025 m, **B** – 0,05 m, **C** – 0,3 m  
**Fig. 6.** Parts of echograms showed with different distance between traces; **A** – 0,025 m, **B** – 0,05 m, **C** – 0,3 m

szczenia czasu rejestracji sygnału. Chcąc wydłużyć czas rejestracji, należy więc zwiększyć liczbę próbek sygnału. Prowadzi to z kolei do wydłużenia czasu pomiaru (czasu przesuwania anten wzdłuż profilu).

Ostatnim parametrem, który poddano analizie jest krok pomiarowy (odległość pomiędzy trasami). Na rycinie 6B przedstawiono oryginalny fragment echogramu prof001 z krokiem pomiarowym równym 0,05 m. W lewej części ryciny (ryc. 6A) pokazano ten sam fragment z interpolowanym krokiem pomiarowym równym 0,025 m. Po prawej stronie (ryc. 6C) widnieje analogiczny wycinek z krokiem równym 0,3 m.

Należy podkreślić, że jedynie fragment zaprezentowany na rycinie 6B został zarejestrowany w terenie. Dwa pozostałe echogramy utworzono podczas przetwarzania – przy rycinie 6A posłużono się interpolacją liniową, a 6C – pozostawiono co szóstą trasę na oryginalnym echogramie. W ten sposób krok pomiarowy „wzrósł” do 0,3 m. Proces interpolacji nie powoduje wzrostu informacji użytecznej – jest to prosta operacja matematyczna, w której na podstawie wartości w punktach wylicza się wartości pośrednie różnymi algorytmami. Analizując echogram z ryciny 6A, można zaobserwować, że zbyt mały krok nie powoduje znaczącego zniekształcenia anomalii, ale wydłuża czas pomiaru. Z kolei, przyjęcie zbyt dużego kroku pomiarowego może skutkować zmniejszeniem uszczegółowienia rozdzielczości poziomej rejestracji (ryc. 6C). Szczególnie wyraźne jest to w dolnej części echogramów (ryc. 6B i C).

## PODSUMOWANIE

W artykule pokazano wyniki rejestracji georadarowych zrealizowanych na poligonie pomiarowym na krakowskim Zakrzówku. Podczas akwizycji zmieniano następujące parametry pomiarowe: liczbę złożeń (sumowań) i częstotliwość próbkowania sygnału (mającą wpływ na długość czasu rejestracji). Analizowano także wyniki uzyskane przy różnym kroku pomiarowym (odległości pomiędzy trasami).

Najbardziej istotnym parametrem pomiarowym, mającym wpływ na jakość zarejestrowanego obrazu georadarowego, jest składanie sygnału. Należy dążyć do tego, żeby było jak największe, przy zachowaniu optymalnej prędkości profilowania. Zwiększenie liczby złożeń poprawia stosunek S/N i może podnieść korelację refleksów użytecznych na większych głębokościach.

Wzrost częstotliwości próbkowania sygnału skutkuje zmniejszeniem długości czasu rejestracji przy zachowaniu stałej liczby próbek. Podczas wyższej częstotliwości próbkowania można zaobserwować nieznaczną poprawę jakości zarejestrowanego obrazu (ryc. 5) Zwiększanie częstotliwości próbkowania i ilości próbek, celem utrzymania takiej samej potencjalnej głębokości penetracji, wydaje się jednak mało zasadne w relacji: czas pomiaru – jakość rejestrowanego materiału. Zdaniem autorów zmiana ilości próbek rejestrowanego sygnału (przy zachowaniu stałej częstotliwości próbkowania) nie powoduje zmiany realnego zasięgu głębokościowego (zmienia się jedynie zasięg teoretyczny rejestracji). Kształt i częstotliwość sygnału rejestrowanego jest identyczny.

Dobór kroku pomiarowego (odległości pomiędzy trasami) ma istotny wpływ na kształt rejestrowanych anomalii. Zwłaszcza zbyt duży krok deformuje ich kształt. Ma to również istotny znaczenie jeśli chodzi o czas profilowania.

Bardzo istotnym czynnikiem, mającym wpływ na zasięg i rozdzielczość metody georadarowej, jest oczywiście częstotliwość stosowanych anten. Nie było to jednak przedmiotem analizy w niniejszej pracy.

Praca została sfinansowana ze środków NCBiR i GDDKiA w ramach projektu I konkursu Wspólnego Przedsięwzięcia RID „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie” o akronimie OT1-1E/PIG-AGH-PW. Autorzy składają serdeczne podziękowania Recenzentom publikacji.

## LITERATURA

ANNAN A.P. 2001 – Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Sensors & Software Inc., Ontario.

- BRACEWELL R. 1968 – Przekształcenie Fouriera i jego zastosowania. WNT, Warszawa.
- DANIELS D.J. (red.) 2004 – Ground Penetrating Radar. 2<sup>nd</sup> Edition, The Institution of Engineering and Technology, London.
- DEC J. 2010 – High resolution seismic investigations for the determination of water flow directions during sulphur deposits exploitation. *Acta Geophys.*, 58 (1): 5–14.
- GÓRNY A. 2007 – Co nowego na Zakrzówku? *Jaskinie*, 1 (46): 7–8.
- JOL H.M. 2009 – Ground Penetrating Radar Theory and Applications, Elsevier, Amsterdam.
- KARCZEWSKI J. 1997 – Metody przetwarzania georadarowych danych pomiarowych dla lokalizacji antropogenicznych i naturalnych zaburzeń w warstwach przypowierzchniowych. Rozprawa Doktorska, WGGiOŚ AGH.
- KARCZEWSKI J., ORTYL Ł., PASTERNAK M. 2011 – Zarys metody georadarowej. Wyd. II poprawione i rozszerzone. Wydaw. AGH, Kraków.
- KONDRACKI J. 2002 – Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.
- MOŚCICKI W.J., BANIA G., ĆWIKILK M., BORECKA A. 2014 – DC resistivity studies of shallow geology in the vicinity of Vistula River flood bank in Czernichow village (near Krakow in Poland). *Stud. Geotech. Mech.*, 36 (1): 63–70.
- MOTYKA J., CZOP M., POLAK K. 2003 – Wpływ warunków wodnych w kamieniołomie „Zakrzówek” w Krakowie na jego funkcję rekreacyjną. [W:] Kształtowanie krajobrazu terenów poeksploatacyjnych w górnictwie. Międzynarodowa Konf. Nauk., 10–12 grudnia 2003 Kraków: 208–219.
- ORYŃSKI S., OKOŃ M., KLITYŃSKI W. 2016 – Very Low Frequency electromagnetic induction surveys in hydrogeological investigations; case study from Poland. *Acta Geophys.*, 64 (6): 2322–2336.
- ORTYL Ł., BAŁUT A. 2006 – Applications of a RTK-GPS technique in the process of 3-D location of georadar profile traces. *Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission. Geodesy*, 42: 27–43.
- ORTYL Ł., OWERKO T. 2007 – Korekta wpływu deniwelacji terenu oraz częstotliwości wyznaczenia pozycji przez system GNSS lub tachymetry TCA w procesie przestrzennej lokalizacji obiektów wykrywanych georadarem. *Zesz. Nauk. PŚL., Górnictwo*, 278: 335–352.
- PILECKI Z., KŁOSIŃSKI J., PILECKA E., KARCZEWSKI J., ZIĘTEK J. 2008 – Wpływ zawodnienia osuwiska na rozpoznanie granic jego nieciągłości metodami falowymi – Influence of water saturation on landslide discontinuities borders recognition by wave methods. *Gosp. Sur. Miner.*, 24 (2/3): 427–444.
- PN-EN 1997-2:2007 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Badania podłoża gruntowego (oryginalna wersja językowa).
- RIETSCH E. 1980 – Estimation of the signal-to-noise ratio of seismic data with an application to stacking. *Geophys. Prospect.*, 28 (4): 531–550.
- SERMET E., ROLKA G. 2013 – Pogórnicy spadek na zrębie Zakrzówka. [W:] Żagożdżon P. P., Madziarz M., Dzieje górnictwa – element europejskiego dziedzictwa kultury. Wrocław, 5: 329–338.
- ŠTĚPANČÍKOVÁ P., DOHNAL J., PÁNEK T., LŮJ M., SMOLKOVÁ V., ŠILHÁN K. 2011 – The application of electrical resistivity tomography and gravimetric survey as useful tools in an active tectonics study of the Sudetic Marginal Fault (Bohemian Massif, central Europe). *J. Appl. Geophys.*, 74 (1): 69–80.
- TOMECKA-SUCHOŃ S., MARCAK H. 2015 – Interpretation of ground penetrating radar attributes in identifying the risk of mining subsidence - Użycie atrybutów GPR do wyznaczania rejonów zagrożonych pojawieniem się pustek poeksploatacyjnych. *Arch. Min. Sci.*, 60 (2): 645–656. [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)
- ZIELIŃSKI A., MAZURKIEWICZ E., ŁYSKOWSKI M. 2016 – GPR mapping of karst formations under a historic building in Szydłów, Poland. *Geofizyka*, 33 (1): 101–111.