

# Wykorzystanie metody georadarowej w wykrywaniu form krasowych i badaniu struktury złoża na przykładzie Zakładu Górniczego „Działoszyn”

mgr inż. Damian WOJTCZAK  
Cementownia „Warta” S.A., Trębaczew

**TREŚĆ:** Metoda georadarowa cieszy się popularnością i jest szeroko stosowana w wielu dziedzinach. Dzięki nieinwazyjności oraz zdolności do uzyskiwania szczegółowych danych na temat struktury badanego ośrodka stosuje się ją powszechnie m.in. w budownictwie do badania wewnętrznej struktury budynków i konstrukcji, w archeologii do poszukiwania reliktyw przeszłości, w płytkiej geologii do badania struktury skorupy ziemskiej, wykrywania podziemnych instalacji czy w kryminalistyce. Natomiast niezbyt powszechne jest wykorzystanie tej metody w badaniu struktury złoża na przedpolu podczas bieżącej eksploatacji w kopalniach odkrywkowych. W artykule przedstawiono przykład wykorzystania metody georadarowej do rozpoznawania budowy geologicznej, badania form krasowych, a także pustek skalnych w zawodnionych partiach złóż eksploatowanych w ZG „Działoszyn”.

**SŁOWA KLUCZOWE:** metoda georadarowa; pustki krasowe; odkrywkowy zakład górniczy

## 1. Wprowadzenie

Cementownia „Warta” S.A., jako jedna z największych i najnowocześniejszych cementowni w Polsce, bazuje na lokalnych zasobach surowców do produkcji cementu, co zapewnia stabilność dostaw i wysoką jakość produktu końcowego. Kluczowym składnikiem wykorzystywanym w procesie produkcji są wapienie górnurajskie wyżyny wieluńskiej, które cechują się wysoką zawartością węgla wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ) i jednorodnością składu chemicznego.

Obszar wyżyny wieluńskiej jest znany z licznych form krasowych, w tym jaskiń. W obrębie złóż cementowni warstwy stropowe wapieni są bardzo silnie skrasowiałe, a w niższych partiach złoża występują liczne pustki krasowe. Niewykryte w poziomach roboczych kopalni pustki stwarzają zagrożenie dla bezpieczeństwa pracujących tam ludzi oraz maszyn. Do badań złoża wapieni na przedpolu, w celu prognozowania i zminimalizowania zagrożenia dotyczącego występowania pustek, służby geologiczne zostały wyposażone w georadar firmy Mala z serii ProEx z anteną 250 MHz (rys. 1) do pomiarów metodą georadarową. Metodyka pomiarów polega na wykonaniu liniowych przekrojów GPR pozwalających na wstępne rozpoznanie budowy geologicznej górotworu.

Następnie w obszarach, w których stwierdzono anomalie, wykonywane są szczegółowe badania GPR w systemie 3D celem sprawdzenia, czy w złożu nie występują pustki. Otrzymane wyniki są pomocne w rozpoznawaniu złoża metodami wiertniczymi (otwory dokumentacyjne), jak również wykorzystywane do rozpoznawania budowy geologicznej oraz określania udziału leja krasowego w strukturze złoża. Takie działania są istotne z punktu widzenia rozpoznawania form krasowych, bowiem stanowią one przyczynę trudności występujących podczas eksploatacji złoża wapieni, powodując zwiększenie kosztów wydobycia surowca.

## 2. Zagrożenie dla ludzi i maszyn

Eksploatacja w zawodnionych partiach złoża wapieni Działoszyn-Trębaczew jest bezpośrednio związana z występowaniem niebezpiecznych zdarzeń w postaci pustek krasowych w ociosie ściany i w spągu. W celu zminimalizowania niebezpieczeństwa zapadania gruntu oraz bezpośredniego oddziaływania tych zdarzeń na ludzi i pracujące tam maszyny w zakładzie górniczym wykorzystuje się metodę GPR.

W 2016 r. na złożu Niwiska Górne-Grądy stwierdzono wystąpienie pustek krasowych, co nastąpiło podczas prac



► Rys. 1. Georadar ProEx firmy Mała z anteną 250 MHz  
► Fig. 1. Mala ProEx GPR with a 250 MHz antenna



► Rys. 2. Pustka skalna w stropie I poziomu złoży Działoszyn-Trębaczew  
► Fig. 2. Rock void in the ceiling of the first level of the Działoszyn-Trębaczew deposit

wydobywczym w momencie zawalenia się stropu calizny na III poziomie. Skalna pustka o objętości około  $1\text{ m}^3$  nie stanowiła bezpośredniego zagrożenia dla maszyn ani pracowników, ale ujawniła potencjalne ryzyko dla bezpieczeństwa zakładu górniczego. Podobne zdarzenia występowały kilkakrotnie w ciągu kolejnych 3 lat. Ostatnie miało miejsce w 2023 r. podczas eksploatacji na II poziomie złoży Działoszyn-Trębaczew. Ponownie doszło do zawalenia się stropu calizny (rys. 2), jednak tym razem ujawniona pustka miała bardziej skomplikowaną budowę, jej objętość wynosiła około  $4\text{ m}^3$ . Choć nie zagrażała bezpośrednio pracownikom ani sprzętowi, spowodowała przestój i konieczność zaangażowania dodatkowych zasobów sprzętowych do jej usunięcia. Wpłynęło to na efektywność prac oraz czasowe wyłączenie rejonu z eksploatacji. Ponadto podczas likwidacji zapadliska odkryto kolejne pustki.

Przedstawione incydenty podkreślają kluczową rolę dokładnego rozpoznania warunków geologicznych i konieczność podjęcia działań na rzecz zwiększenia bezpieczeństwa. Należy jednak zaznaczyć, że opisane przypadki dotyczą wyłącznie sytuacji, w których doszło do niekontrolowanego zawalenia się stropu calizny. W wielu przypadkach, mimo stwierdzenia obecności form krasowych w obrębie kopalni, nie było możliwości przeprowadzenia badań georadarowych. Utrudnienie stanowiły zarówno warunki terenowe w wyrobiskach, które nie pozwalały na wjazd sprzętu, jak i brak możliwości wstrzymania robót górniczych z uwagi na zapotrzebowanie na surowiec. Przed rozpoczęciem eksploatacji w danym obszarze w celu zachowania najwyższego poziomu bezpieczeństwa, gdy tylko warunki i czas na to pozwalały, wykonywano badania georadarowe zarówno w miejscach, gdzie stwierdzono zagrożenie, jak i w celach profilaktycznych.

### 3. Pustki w zawodnionych partiach złoży

Wielokrotnie podczas prowadzenia robót strzałowych dochodziło do wykrycia pustek skalnych, a w zawodnionym III poziomie złoży – bardzo obszernych i rozbudowanych sieci szczelinowo-krasowych. Sieci ta-

kie znacznie utrudniają prowadzenie robót strzałowych. Trudności pojawiają się już na etapie wiercenia otworów w strefie poniżej zwierciadła wody. Woda przepływająca szczelinami oraz powstające połączenia hydrauliczne z innymi odwierconymi otworami w siatce strzałowej utrudniają nowe wiercenie. Podczas ładowania otworów z tych samych przyczyn bardzo często dochodzi do wymywania załadowanego materiału wybuchowego, co drastycznie zmniejsza efektywność urabiania lub całkowicie dezaktywuje dany otwór.

Jednym z przypadków, które wystąpiły podczas wiercenia otworów strzałowych, była sytuacja z 10 października 2017 r., kiedy w przodku V na suchej warstwie stwierdzono obecność kilku pustek (rys. 3). Ze względu na dogodne warunki terenowe i możliwość przeniesienia robót strzałowych na inny przodek pojawiła się możliwość zbadania danego obszaru przy użyciu georadaru (rys. 4). W efekcie pustki te zostały zlikwidowane za pomocą koparki, która posłużyła do precyzyjnego wypełnienia przestrzeni odpowiednim materiałem skalnym i zasypania odsłoniętych kawern. Dzięki zastosowaniu metody GPR obszar ten mógł zostać ponownie udostępniony do eksploatacji metodami mechanicznymi.

Rozpoznanie przedpola georadarem w obrębie III poziomu było prowadzone wielokrotnie. Nierzadko okazywało się, że w wyznaczonej siatce wierceń otwory znajdowały się dokładnie nad formą krasową. Dzięki uzyskanym wynikom pomiarowym zarówno służby strzałowe, jak i geologiczne mogły dostosować lokalizację siatki strzałowej oraz sposób wiercenia do panujących warunków. Przeniesienie planowanego otworu pozwalało uniknąć wielu opisanych wcześniej komplikacji oraz zwiększyć efektywność robót strzałowych.

### 4. Rozpoznanie budowy geologicznej na obszarach perspektywicznych

Złoży zakładu górniczego „Działoszyn” tworzą zarówno osady mezozoiczne, jak i kenozoiczne. Kontakt pomiędzy tymi utworami jest niezgodny, często silnie zaburzony i niejednorodny. Rzędna terenu oscyluje pomiędzy 206 a 223 m n.p.m. Najbardziej urozmaicone są





► Rys. 3. Pustka krasowa nawiercona podczas wykonywania robót strzałowych w przodku V

► Fig. 3. Karst void drilled during blasting works in the V front



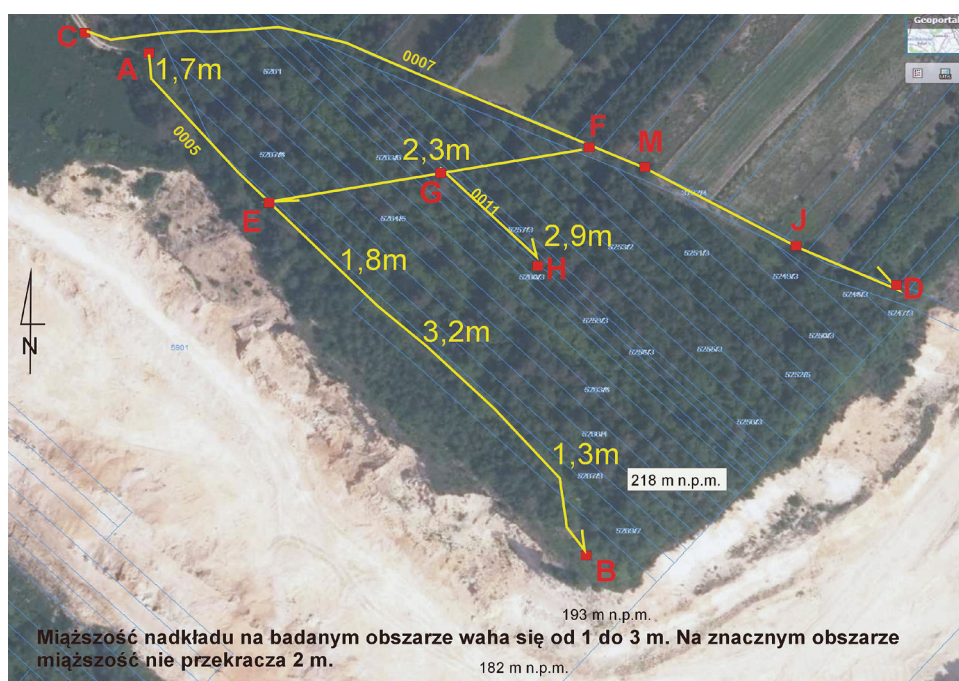
► Rys. 4. Badania georadarem w systemie 3D nad wykrytymi pustkami w przodku V

► Fig. 4. 3D GPR survey of the detected voids in the V front

części północna i zachodnia. Generalny upad terenu jest z północy na południe w kierunku koryta rzeki Warty. Kenozoik reprezentowany jest przede wszystkim przez osady lodowcowe oraz wodnolodowcowe zlodowacenia środkowopolskiego Odry i Warty. Są to moreny czołowe zbudowane ze żwirów, piasków i głazów oraz rozległe pokrywy z glin lodowcowych. Pod nimi występuje kompleks górnojurajskich skał wapienno-marglistych oksfordu. Bardzo często są one zaburzone krasem powierzchniowym i wgłębnym w postaci lejów krasowych wcinających się nierzadko do kilkunastu metrów w głąb skał mezozoicznych. Zjawiska krasowe występują w pełnym kompleksie skał węglanowych górnej jury, ich rozwój był długotrwały i postępował w różnych warunkach paleogeograficznych (Głazek, 1989), (Głazek i in.,

1980), (Szyrkiewicz, 1993). Złoża zaliczane są do rejonu Działoszyna, który charakteryzuje się bogatym zespołem górnojurajskich skał wapienno-marglistych. Wydzielono kilkanaście kompleksów skał oksfordu górno. Wyodróżniamy: wapienie pylaste, wapienie skaliste, wapienie płytowe, wapienie kredowate, wapienie pylaste płytowe.

Badania geologiczne wykonywane na przełomie lat 60., 70. czy 80. nie dają wystarczająco dokładnego opisu budowy geologicznej danego obszaru. Często stan faktyczny jest rozbieżny z dokumentacją z tamtego okresu. Zmienność złoża pomiędzy odwiertami geologicznymi potrafi być znaczna i kilkukrotnie przechodzić z surowca wapiennego o wysokiej zawartości CaO (wapienie płytowe, wapienie skaliste oraz margle) do znacznych form krasowych wypełnionych osadami kenozoicznymi



► Rys. 5. Badany obszar perspektywiczny bezpośrednio sąsiadujący z przodkiem XIII. Na opracowaniu zaznaczono linie wykonanych profili georadarowych w systemie 2D

► Fig. 5. The investigated prospective area is directly adjacent to the XIII front. The study marks the lines of the 2D GPR profiles





► Rys. 6. Przygotowanie terenu i wyznaczenie siatki do badań georadarem w systemie 3D nad pustkami wykrytymi w przodku V

► Fig. 6. Preparation of the area and marking of a grid for 3D GPR surveys of the voids detected in the V front

– lodowcowymi i wodnolodowcowymi zlodowacenia środkowopolskiego Odry i Warty; dlatego w celu dokładniejszego rozpoznania prowadzone są badania georadarowe na danych obszarach perspektywnych. Ostatnie takie działania wykonano w złożu Działoszyn-Trębaczew na gruntach należących do cementowni, jednak będących poza granicami obszaru górniczego (rys. 5). Warto również wspomnieć, że ZG „Działoszyn” z uwagi na ogromne zapotrzebowanie na surowiec wapienny do produkcji cementu stale się rozwija i poszukuje nowych terenów w granicy udokumentowanych już złóż w celu ich eksploatacji.

Ze względu na urozmaiconą budowę geologiczną oraz bardzo zmienną miąższość utworów kenozoicznych, zalegających na utworach jurajskich, konieczne jest rozpoznanie warunków geologicznych i ocenienie zasobów przed rozpoczęciem eksploatacji danego terenu i przekształceniem go w obszar górniczy.

## 5. Metodyka prowadzonych badań

### 5.1. Przygotowanie terenu badań i dobór parametrów pracy georadaru

Przed rozpoczęciem badań georadarowych konieczne jest przygotowanie terenu. Zazwyczaj w komercyjnym zastosowaniu może się to ograniczyć do usunięcia kilku gałęzi, kamieni czy ławek lub mebli w przypadku badań w budynkach. Jednak w trakcie prac na terenie zakładu górniczego przygotowanie wymaga zaangażowania ciężkiego sprzętu. Jest to szczególnie istotne po opadach deszczu, kiedy powierzchnia terenu pokrywa się warstwą błota, a głębokie koleiny mogą utrudniać dostęp i przeprowadzenie badań. Najkorzystniejsze warunki do realizacji prac terenowych występują latem, w okresie suchym lub zimą, gdy niskie temperatury, poniżej 0°C, powodują przymrozki i stabilizują grunt.

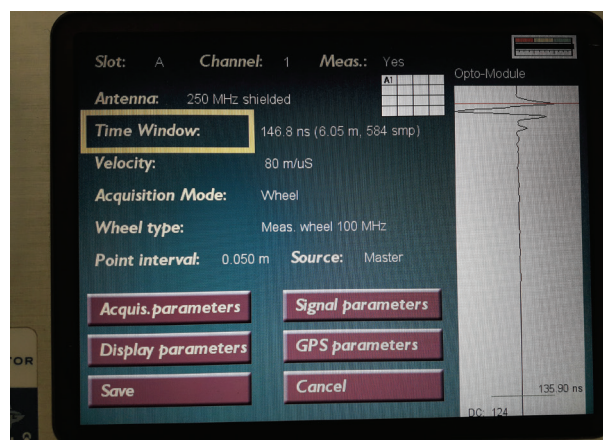
Po wyrównaniu powierzchni terenu przystępuje się do wyznaczania linii pomiarowych 2D lub siatki 3D, używając taśmy mierniczej i znaczników. Pozwala to na wykonanie badań w zaplanowanym układzie pomiaro-

wym. Przebieg kolejnych profili może być dodatkowo oznaczony farbą bezpośrednio na spągu (rys. 6), co ułatwia ich identyfikację w terenie.

Po przygotowaniu obszaru i wyznaczeniu siatki pomiarowej dokonuje się kalibracji georadaru (rys. 7). Parametry pracy anteny (częstotliwość i czułość) dobierane są do założeń i celów badawczych. Determinują one głębokość penetracji, która w przedstawionym przypadku dla anteny 250 MHz może wynosić od kilku do około 13 m. Głębokość badanego ośrodka zależy nie tylko od częstotliwości anten i ich ekranizacji, ale również od obecności minerałów ilastych.

Dobór podstawowych parametrów (rys. 7):

1. Time Window – możemy dobrać odpowiednią głębokość penetracji ośrodka, do której chcemy zbadać podłoże. W tym wypadku dla określenia głębokości zalegania wapieni jurajskich pod utworami czwartorzędowymi przyjęto głębokość 6,05 m. Szukając płytko zalegających anomalii o niewielkich rozmiarach, przyjmuje się mniejszą głębokość penetracji, co przekłada się na wzrost rozdzielczości. W przypadku badania całego poziomu eksploatacyjnego głębokość jest ustalana na poziomie 12–13 m, jednak odbywa się to kosztem rozdzielczości.
2. Velocity – ustalamy prędkość rozchodzenia się fali w ośrodku. Dla badania nadkładu ustalono prędkość 80 m/μs. W przypadku badań w wyrobisku bezpośrednio na utworach jurajskich przyjęto wartość 100–110 m/μs. Odpowiednie dobranie tego parametru przekłada się na prawidłową skalę pionową echogramu. Na etapie obróbki echogramu mamy możliwość modyfikacji tego parametru, odpowiednio dobierając skalę pionową do danych uzyskanych z otworów badawczych lub skarp złożowych.
3. Point interval – ustalamy interwał głębokości emitowania impulsu. Dla długich profilowań rozpoznawczych przyjęto wartość 0,5–1,0 m. W przypadku poszukiwania pustek skalnych oraz krótkich profilowań dobrany został znacznie mniejszy interwał głębokości (0,05–0,1 m), co pozwoliło uzyskać dokładniejszy echogram i precyzyjnie określić kształt anomalii.
4. Wheels type – dobieramy sposób pomiaru odległości. W zależności od wykorzystywanego zestawu sprzętowego zastosowano koło pomiarowe, jeśli antena jest ciągnięta za operatorem, lub wózek, na którym



► Rys. 7. Dobór parametrów badań i kalibracja anteny

► Fig. 7. Selection of GPR antenna test and calibration parameters





► Rys. 8. Przykładowy echogram 2D. Profilowanie wykonane w przodku XIII w ramach rozpoznania obszaru perspektywicznego

► Fig. 8. 2D echogram example. Profiling carried out in front XIII as part of the exploration of the prospective area



► Rys. 9. Przykładowy echogram 2D w kolorach

► Fig. 9. 2D echogram in colours example

zamontowana jest antena wraz z pozostałą częścią aparatury (rys. 1).

## 5.2. Badania 2D

Profilowania 2D prowadzone są najczęściej jako ogólne rozpoznanie terenu, czyli wyznaczenie obszaru, który najbardziej nadaje się pod badania 3D. Oprócz tego przejścia liniowe wykorzystywane są pod rozpoznanie nowych terenów perspektywicznych. Trasa przejścia oraz długość profilu są dowolne, dostosowane do warunków terenowych, stąd może ona nieznacznie się załamywać (omijanie niewielkich przeszkód).

Do profilowań 2D wykorzystuje się program 2D Project, bardzo prosty w obsłudze, pozwalający na bieżąco śledzić echogram (rys. 8). Podgląd wyników pomiarowych i podstawowych ustawień pozwala już w terenie stwierdzić obecność anomalii bądź zmiany w strukturze badanego obszaru. W artykule przedstawiono przykład profilowań liniowych zastosowanych do rozpoznania obszaru perspektywicznego w rejonie przodka XIII i profilu 0005 (A–B) (rys. 8). Wybrany obszar badań to teren zalesiony, dlatego trasa przebiegu profilu (rys. 5)

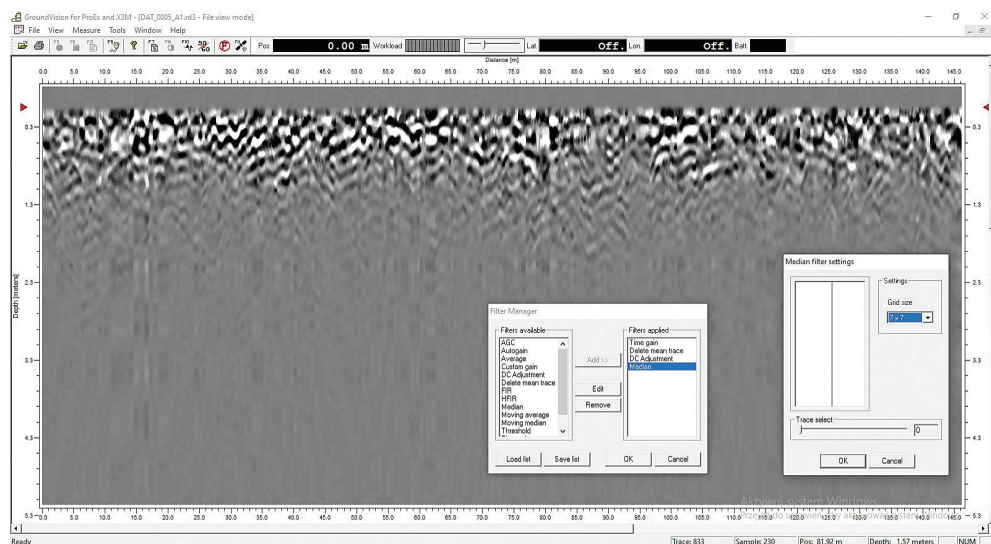
została wyznaczona wzdłuż jedynych możliwych miejsc do wykonania badań, jakimi były ścieżki i drogi leśne. Z tego powodu pokrycie obszaru profilami jest nierównomierne, a same profile nie są przeprowadzone po linii prostej. Stosowany Georadar firmy Mala nie jest wyposażony w zintegrowany nadajnik GPS, dlatego początek i koniec każdego profilu został zaznaczony przenośnym lokalizatorem GPS (według układu PL-2000, strefa 6), a następnie naniesiony na mapę. Dodatkowo w notatniku terenowym gromadzone są wszelkie informacje terenowe, szkice z ogólnym przebiegiem profili, ich numery oraz parametry sprzętu.

Po wykonaniu kilku krótkich profilowań wprowadzane są poprawki w opisanych parametrach. Pozwala to na prowadzenie badań na optymalnych ustawieniach georadaru. W czasie przejazdów urządzenia na ekranie rysuje się echogram. Skale poziome i pionowe wskazują na lokalizację anomalii. Pomiary umożliwiają obserwację zaburzeń struktury w górnej warstwie profilu, do głębokości 2 m (rys. 8), co stanowi nadkład zbudowany z kenozoicznych utworów wodnolodowcowych. W miejscach, gdzie nadkład zbudowany jest z utworów ilastych, sygnał GPR ulega zaburzeniu. Uniemożliwia to dokładne zbadanie ośrodka poniżej 2 m głębokości (tworząc na echogramie efekt szachownicy). W strefie tej echogram znacznie się wygładza, co wskazuje na strefę wapienia jurajskiego. Należy zwrócić uwagę, że ze względu na zwietrzelinę, która powstaje na kontakcie nadkładu i wapieni, granica ta nie jest wyraźna. Echogram rysowany w odcieniach szarości pozwala już w terenie zaobserwować liczne anomalie oraz hipotetyczne granice pomiędzy zaobserwowanymi ośrodkami, określanymi dalej jako facje radarowe (ang. *radar face*) (rys. 13). Program umożliwia wybranie nie tylko skali barw (rys. 9), z poziomu ekranu podczas badań można także skalibrować poziom zerowy, głębokość, zaznaczyć punkty kontrolne, dobrąć odpowiedni poziom kontrastu i wyostrenia dolnej partii wykresu dla uwydatnienia poszczególnych fragmentów echogramu oraz śledzić anomalie.

Wyniki pomiarowe poddawane są następnie obróbce w programie MALA Ground Vision (rys. 10). Podczas obróbki profilowań GPR nie jest możliwe stosowanie jednego zestawu filtrów. W praktyce do każdego profilu konieczne jest wprowadzenie zmian w filtrowaniu oraz ich parametrach, a proces ten jest niezbędny dla poprawnego zinterpretowania echogramu i uwydatnienia wykrytych anomalii. Uzyskane wyniki pozwalają na dalszą interpretację pomiarów.

## 5.3. Badania 3D

Profilowania określane jako 3D polegają na wykonaniu wielu profili w siatce równoległej. Najczęściej ich celem jest wykrywanie niewielkich obiektów, w tym o charakterze liniowym (Karczewski, Ortyl i Pasternak, 2011). Badania 3D możemy prowadzić georadarem dwoma sposobami. Pierwszy sprowadza się do wykorzystania programu 3D Grid Project (rys. 11), który pozwala na wykonanie badań terenowych na niewielkim obszarze, jednak w znacznie zautomatyzowany sposób. Polega na tym, że po uruchomieniu urządzenia program oczekuje na dobór parametrów siatki badań, tj. długości oraz szerokości, odległości profilu od profilu i co jaką od-



► Rys. 10. Filtrowanie echogramu w programie MALA Ground Vision. Przekrój 0005 dla punktów A-B. Profilowanie wykonane w przodku XIII w ramach rozpoznania obszaru

► Fig. 10. Filtering the echogram in the MALA Ground Vision program. Cross-section 0005 for points A-B. Profiling carried out in front XIII as part of the exploration of the prospective area

ległość ma być wysyłany impuls w podłoże. Parametry nie są jednak dowolne. Proporcjonalnie do zwiększenia długości i szerokości siatki program wymaga zwiększenia odległości pomiędzy profilami i wartości Point Interval. Program wyznacza kolejno profil, po którym należy przeprowadzić badania georadarem. Profile zawsze wykonywane są w tym samym kierunku i kolejności. W odróżnieniu od profilowania 2D nie możemy na bieżąco obserwować echogramu z danego profilu. Po wykonaniu pełnej liczby profili w jednym kierunku (X) konieczny jest przejazd przez profile prostopadłe (kierunek Y). Po wykonaniu pomiarów program automatycznie przetwarza echogramy w blok 3D (rys. 11). Uzyskany echogram możemy dowolnie ciąć w 3 wymiarach (XYZ), a każde miejsce cięcia zaznaczone jest na rzucie z góry. Oprogramowanie umożliwia podgląd na profile X lub Y. Dzięki skalom poziomym i pionowym jesteśmy w stanie z łatwością zlokalizować miejsce występowania anomalii w terenie. Zaletą stosowania georadaru jest to, że wyniki uzyskane w programie pozwalają na natychmiastowe obserwowanie obszaru badań w systemie 3D, bez konieczności obrabiania ich w komputerze. Należy jednak podkreślić, że metoda 3D nie jest często wykorzystywana. Spowodowane jest to ograniczeniami dotyczącymi wymiarów siatki obejmującej badany obszar, co w warunkach kopalnianych niejednokrotnie jest dużym problemem.

Znacznie bardziej przydatny do badań 3D jest program Object-Mapper Project. Nie wykonuje on w terenie korelacji profili na obraz 3D jak w pierwszym sposobie, jednak nie nakłada na operatora tak dokładnych wytycznych. Możliwości terenowe są nieograniczone zarówno w odniesieniu do długości profili, ich liczby, jak i doboru parametrów sprzętu. Oczywiście jeśli profile będą od siebie zbyt oddalone, to po korelacji do 3D uzyskane obszary pomiędzy profilami mogą odbiegać od stanu faktycznego i być obciążone dużym błędem. Kolejny plus tej metody to możliwość wykonania przejazdów tylko w jednym kierunku, np. X lub Y. Do obróbki danych nie są

jednocześnie potrzebne profile X i Y, ale dla lepszego rozpoznania terenu korzystniej wykonywać siatkę składającą się z profili X i Y (rys. 6). Po skorelowaniu profili X uzyskany obraz 3D możemy porównać z obrazem stworzonym na bazie profili Y. Jednak zabieg taki nie jest niezbędny. Tworzony projekt 3D jest przede wszystkim zbiorem wykonanych po sobie profili 2D.

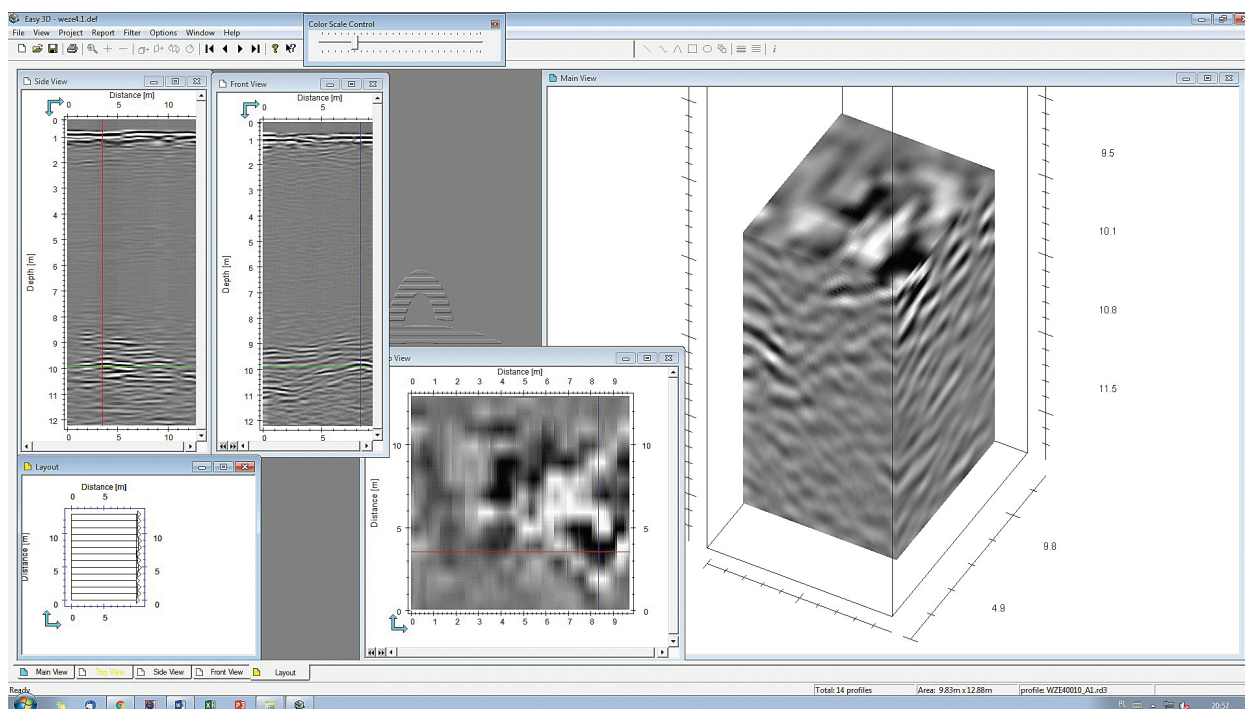
Przeprowadzane w terenie badania 3D nie różnią się niczym od profilowań 2D wykonanych w programie 2D Project (rys. 8, 9). Analogicznie dokonujemy strojenia sprzętu i doboru parametrów. Konieczne jest jednak wykonywanie profilowań w linii prostej i z zachowaniem wytyczonej siatki. Nierównoległość profili w jednej osi prowadzi do zniekształceń podczas konwersji echogramów 2D na obraz 3D. W rezultacie zaobserwowana anomalia bywa przedstawiana z nieprawidłowymi rozmiarami i objętością. Zdarza się też, że podczas pomiarów na danym profilu dochodzi do rozładowania się baterii lub zawieszenia sprzętu. Konieczne jest wtedy powtórzenie pomiarów na tym profilu. Po wykonaniu pomiarów na



► Rys. 11. Wynik obróbki danych w postaci echogramu 3D w programie 3D Grid Project

► Fig. 11. The result of data processing in the form of a 3D echogram in the 3D Grid Project program





► Rys. 12. Obróbka danych z profilowania 3D w programie EASY 3D firmy Mala. Dane z badań prowadzonych nad jaskinią Węże. Widoczne komory zlokalizowane na głębokości około 10 m p.p.t.

► Fig. 12. Processing 3D profiling data in the EASY 3D program from Mala. Data from research conducted on the Węże cave. Visible chambers located at a depth of approximately 10 m below sea level

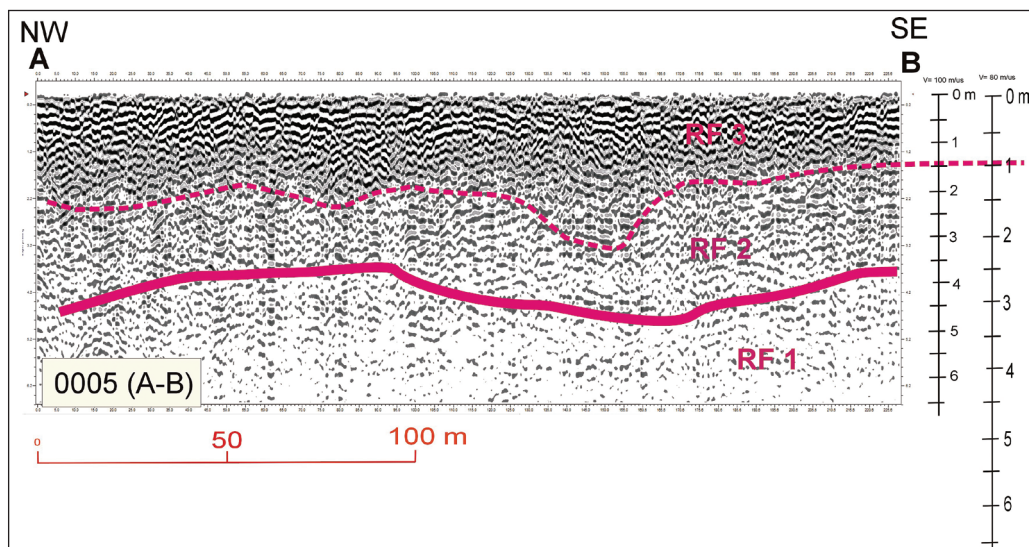
wszystkich profilach zaprojektowanej siatki uzyskane dane należy zgrać do komputera i opracować w specjalistycznym programie.

Do obróbki danych uzyskanych z Object-Mapper Project wykorzystywany jest program EASY 3D (rys. 12). Zakładając nowy projekt, podaje się profile wykonane w jednej osi (X lub Y) z uwzględnieniem ich orientacji względem siebie (Karczewski, Ortyl i Pasternak, 2011). Po załadowaniu profile konwertowane są na bryłę 3D (rys. 12). Można dokonywać cięć, tak samo jak w programie 3D Grid Project, poziomych i pionowych wzdłuż profili. Możemy również w dowolny sposób obracać

powstałą bryłę 3D, odcinając od niej fragmenty wzdłuż zadanych płaszczyzn. Dzięki filtrom możemy dokonywać takich samych korekt jak w przypadku programu MALA Ground Vision.

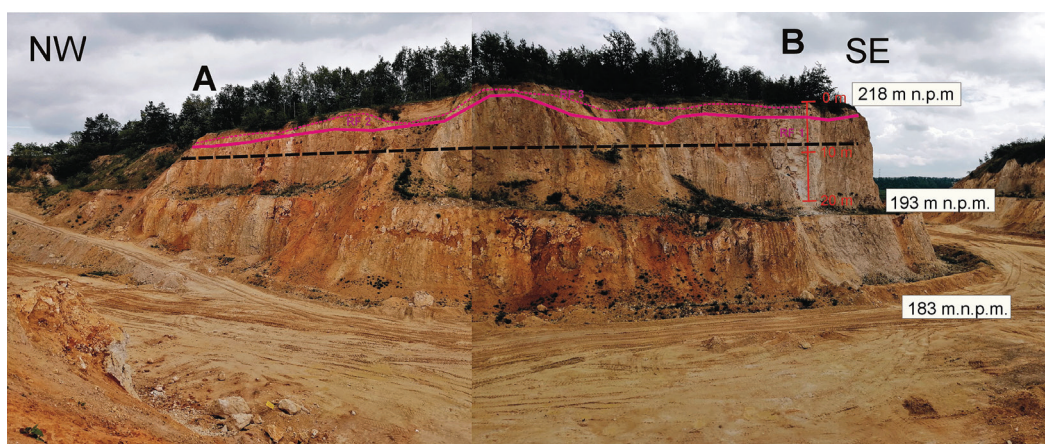
#### 5.4. Interpretacja wyników

Po zakończeniu obróbki danych w specjalistycznym oprogramowaniu komputerowym możliwe jest przystąpienie do ostatecznej fazy prac. Proces ten stanowi zwieńczenie długiego i złożonego cyklu, obejmującego przygotowanie terenu, wyznaczenie siatki pomiarowej



► Rys. 13. Przykładowy echogram 2D. Profilowanie wykonane w przodku XIII w ramach rozpoznania obszaru perspektywicznego

► Fig. 13. 2D echogram example. Profiling carried out in front XIII as part of the exploration of the prospective area



► Rys. 14. Badany obszar perspektywiczny bezpośrednio sąsiadujący z przodkiem XIII. Na opracowaniu zaznaczono facje radarowe stwierdzone z profili georadarowych w systemie 2D

► Fig. 14. The investigated prospective area is directly adjacent to the XIII front. The study highlights the radar facies identified from the 2D GPR profiles

oraz przeprowadzenie badań georadarowych. Zebrane dane, po dokładnej analizie i przetworzeniu, pozwalają na wizualizację wyników w postaci profili georadarowych lub trójwymiarowych modeli przedstawiających strukturę badanego obszaru. W kolejnym etapie uzyskane profile lub bryły 3D są poddawane dalszej obróbce graficznej przy użyciu oprogramowania, takiego jak CorrelDRAW. Zabiegi te mają na celu szczegółowe opisanie profili, wyraźne zaznaczenie wykrytych anomalii oraz identyfikację i oznaczenie facji radarowych. Opracowane wizualizacje umożliwiają precyzyjne przedstawienie struktury geologicznej badanego obszaru, co stanowi kluczowy element w dokumentacji wyników badań. Dzięki zastosowaniu zaawansowanych narzędzi graficznych możliwe jest uzyskanie czytelnych i przejrzystych opracowań, które ułatwiają interpretację danych oraz pozwalają na efektywne przekazanie wyników w raportach technicznych i dokumentacjach projektowych.

Na jednym z przeprowadzonych badań georadarowych 2D, na obszarze perspektywicznym w okolicy przodka XIII przedstawionym na rys. 5 i 13, wydzielono 3 facje radarowe (RF). Wyniki wskazują, że facja RF3 to wierzchnia warstwa humusu oraz utwory kenozoiczne zalegające na wapieniach jurajskich, facja RF2 stanowi wierzchnią część utworów jurajskich, które uległy procesom wietrzenia, stąd obraz na echogramie w tej facji radarowej jest bardziej zaburzony. Facja RF1 to natomiast nienaruszone utwory jurajskie. Granica pomiędzy RF3 a RF2 jest wystarczająco wyraźna, dlatego miąższość nadkładu w tym rejonie można łatwo określić – wynosi ona od 1 do 3 m. Granica pomiędzy RF2 a RF1 jest bardziej umowna, jej przebieg na echogramie może być zmienny w zależności od dobranej filtracji oraz kontrastu.

Tak opracowane wyniki możemy nanieść na mapę terenu, zaznaczając przebieg profili oraz miąższość nadkładu w danym punkcie (rys. 5). Kolejno należy sko-

relować uzyskane dane z profilu 0005 (A–B) ze skarpą biegnącą wzdłuż profilu (rys. 14) i nanieść facje radarowe po skorelowaniu echogramu z pomierzonymi wysokościami na skarpie. Takie opracowanie jest jedynie pogładowe i nie odzwierciedla w sposób idealny rzeczywistego przebiegu granicy pomiędzy nadkładem a wapieniami, tym bardziej że linia profilu A–B przebiega w odległości kilku metrów od widocznej skarpy złożowej. Mimo to dzięki takiemu opracowaniu wyników w naoczny sposób można ocenić wartość obszaru perspektywicznego. Efektem większości badań jest wykonanie opracowań zawierających informacje o lokalizacji badanego obszaru wraz z naniesieniem go na mapę złożową, parametrach aparatury przyjętych do badań oraz opracowanych echogramach wraz z dokumentacją fotograficzną.

## 6. Podsumowanie

Skomplikowana budowa geologiczna złóż wapieni oksfordzkich Zakładu Górniczego „Działoszyn” może stwarzać zagrożenia w postaci pustek skalnych oraz licznych form krasowych. Prezentowana w artykule metoda georadarowa umożliwia dokładne rozpoznanie budowy geologicznej przed przystąpieniem do prac wydobywczych oraz wykrycie potencjalnych zagrożeń.

Badania 2D na obszarach perspektywicznych i przedpolu wspomagają zaplanowanie frontów eksploatacyjnych z uwzględnieniem parametrów surowca. Dzięki temu możemy rozpoznać budowę geologiczną oraz stopień jej skomplikowania.

Badania 3D umożliwiają ponadto zlokalizowanie anomalii włącznie z pustkami skalnymi stanowiącymi zagrożenie dla ludzi i maszyn. Metoda ta pozwala na optymalne wykorzystanie zasobów, zwiększenie wydajności eksploatacji oraz ograniczenie strat wynikających z nieoczekiwanych trudności geologicznych.



## The use of the georadar method in detecting karst formations and examining the structure of the deposit on the example of the Działoszyn Mining Plant

**Abstract:** The Działoszyn Mining Plant exploits Oxford limestone from the Wieluń Upland intended for cement production. Limestone deposits are characterized by high lithological variability. Numerous karst formations filled with Cenozoic sediments generate complications during exploitation, and rock voids pose a threat to workers and machines, with the greatest risk associated with rock voids occurring in the water-logged part of the deposit. In order to more accurately identify the geological structure and detect rock voids, the plant's geological services use the ground-penetrating radar (GPR) method. At the Działoszyn Mining Plant, a Mala georadar with a 250 MHz antenna is used for GPR research. Thanks to the tests carried out in the foreground presented in the article, voids were revealed, and their elimination contributed to improving the safety and quality of blasting works. This is important due to the formation of fissure and karst networks that make blasting operations difficult. Tests can be performed in 2D and 3D. The 3D method is used to thoroughly investigate the foreground structure and detect rock voids. First, the terrain and measurement grid are prepared, then the appropriate equipment parameters are selected. The choice of parameters depends on the terrain conditions and structures we want to examine. The measurements allow us to determine the thickness of the overburden, the homogeneity of the deposit and the presence of disturbances (karst, voids). During field research, it is possible to analyze the medium using echograms. More detailed analysis is performed using a computer program using numerous filters. Performing a dense grid of parallel measurements allows for capturing the smallest disturbances over a large area. These data are re-analyzed in a computer program on three levels.

The GPR method is used to recognize not only the geological structure in prospective areas, but also newly developed parts of the deposit. GPR surveys make it possible to determine the suitability of a given part of the deposit, better plan the directions of exploitation and increase production efficiency. The use of the GPR method contributed to improved safety and streamlined the operation and production planning process at the Działoszyn Mining Plant.

### Literatura

1. Głazek, J. (1989). „Paleokarst in Poland”. W: Bosák P. (red.), *Paleokarst: A Systematic and Regional Review*, s. 77–110. Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo.
2. Głazek, J., Sulimski, A., Szynkiewicz, A., Wierzbowski, A. (1980). „Górnijurajskie wapienie i kras w rejonie Działoszyna”. W: *Przewodnik LII Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego Białchatów*, s. 234-267. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
3. Karczewski, J., Ortyl, Ł., Pasternak, M. (2011). *Zarys metody georadarowej*. Kraków: Wydawnictwo AGH.
4. Szynkiewicz, A. (1993). „Rozwój zjawisk krasowych i kopalnych dolin rzecznych między Częstochową, Wieluniem i Białchatowem”. W: *Praca doktorska (niepublikowana)*. Warszawa: Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski.