

# Praktyczne przykłady badań geofizycznych z zastosowaniem georadaru i radaru otworowego do oceny struktury i zasobów złóż kopalni soli

## Practical examples of geophysical GPR and borehole radar investigations for the structural and resource assessment of salt mine deposits

Paul LECHMANN<sup>1</sup>, Thomas RICHTER<sup>1</sup>, Christian AßMUTH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bo-Ra-tec GmbH, Weimar

<sup>2</sup>ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, Erfurt

### STRESZCZENIE

Efektywność i bezpieczeństwo wydobywania soli w dużej mierze zależą od wszechstronnej wiedzy na temat geologicznych warunków złoża soli, w tym jego granic stratygraficznych oraz cech strukturalnych. Powszechnie stosowane metody badawcze, takie jak sondowanie poprzez wiercenie oraz interpolacja i ekstrapolacja na podstawie odsłonięć mogą pozostawiać spore wątpliwości co do dokładności między punktami pobierania próbek, zwłaszcza w przypadku złóż soli z trudnymi warunkami mechanicznymi. Metody geofizyczne, zwłaszcza georadar (GPR) i radar otworowy (BHR), stanowią odpowiednie, bezinwazyjne narzędzie do kompleksowego badania złóż soli, w tym halitu oraz złóż potasu. Umożliwiają one głęboką penetrację, najczęściej sięgającą kilkudziesięciu metrów (i więcej), co pozwala na dokładniejsze wypełnienie luk informacyjnych i uzyskanie pełniejszego obrazu złoża.

Przedstawimy kilka przykładów efektywnego zastosowania GPR i BHR w niemieckich kopalniach soli. Metody te są używane do oceny grubości pozostałego złoża na dużych obszarach, wykorzystując dane zarówno z dna i stropu istniejących wyrobisk, jak i z pionowych oraz (pół-) poziomych otworów wierconych w masywie skalnym.

**Słowa kluczowe:** wydobywanie soli, badania radarowe, zanieczyszczenia w soli kamiennej, warstwy anhydrytu, pęknięcia

### ABSTRACT

The efficiency and safety of salt mining is largely dependent on the most comprehensive knowledge about the geologic setting of the salt deposit including its stratigraphic boundaries and its structural features. The common investigation method of probing via drilling or interpolation and extrapolation from outcrops can leave large uncertainties between the sampling points especially in difficult salt mechanical situations. Geophysical methods, especially ground penetrating radar and borehole radar provide a very suitable, non-destructive tool to comprehensively investigate salt deposits, as especially halite, but also potash deposits allow significant penetration ranges mostly of several decameters and more to close these gaps.

We present various examples of the efficient application of GPR and BH radar surveys in German salt mines for the assessment of the remaining deposit thickness over large areas both from the floor and roof of existing drifts and from vertical or (sub-) horizontal boreholes into the undeveloped rock mass.

**Keywords:** salt mining, radar surveys, impurities in rock salt, anhydrite layers, cracks

## 1. WSTĘP

Górnictwo solne wciąż odgrywa kluczową rolę w produkcji nawozów rolniczych, produkcji soli drogowej oraz produktów przemysłu spożywczego i chemicznego, dlatego poprawa efektywności i produktywności wydobywania soli ze złóż jest niezwykle ważna dla sektora górniczego. Znaczące straty zasobów oraz wynikające z tego konsekwencje finansowe spowodowane niejasnościami co do objętości złóż mogą być ogromne. W związku z tym istnieje silna potrzeba doskonalenia metod pobierania próbek i eksploracji w celu uzyskania dokładniejszego obrazu rzeczywistego stanu złoża.

Powszechnie stosowana metoda bezpośredniego sondowania poprzez wiercenie otworów i interpolację lub ekstrapolację na podstawie bezpośrednich obserwacji odkrywek w już wyeksploatowanych obszarach kopalni może pozostawiać spore wątpliwości co do dokładności między tymi rozproszonymi punktami pobierania próbek. Zwłaszcza w trudnych warunkach geologicznych, takich jak uskoki i fałdowania, w połączeniu ze zmiennością grubości złoża spowodowaną procesami diagenety, złożoność sytuacji może być łatwo błędnie zinterpretowana, często z powodu zwykłego braku wystarczającej liczby punktów pobierania próbek.

Metody geofizyczne oferują skuteczny i zazwyczaj nieinwazyjny sposób na uzyskanie brakujących informacji, poprzez dokładne badanie złóż soli dzięki falom radarowym, które w zależności od częstotliwości anteny radarowej i rodzaju skały solnej, mogą przenikać suchą sól na głębokość od kilku do ponad 100 metrów (Thierbach, 1994).

Przedstawimy wybrane przykłady badań geofizycznych z wykorzystaniem georadaru (GPR) oraz radaru otworowego (BHR) w kopalni soli kamiennej w południowych Niemczech.

## 2. BADANIA RADAROWE

Kopalnia soli w Heilbronn eksploatuje sól kamienną z okresu triasu od 1883 roku. Wydobywana jest ona z poziomego złoża o grubości od 5 do 25 m, na głębokości około 150–200 m, przy użyciu metody komorowo-filarowej.

### 2.1. Badania georadarem (GPR) prowadzone z powierzchni

W latach 2014–2021 przeprowadziliśmy szereg badań radarowych, w celu oceny grubości pozostałego złoża w różnych obszarach kopalni, obejmujących łączną długość profilu wynoszącą ponad 6 km. W większości z tych obszarów metoda komorowo-filarowa pozostawiła półkę ochronną o grubości kilku metrów zarówno powyżej, jak i poniżej wyeksploatowanych miejsc. Jednakże grubość ta była szacowana na podstawie ekstrapolacji i interpolacji między punktami, w których grubość warstwy mierzyliśmy przez wiercenie. Głównym wyzwaniem w tej kopalni były lokalne zanieczyszczenia w warstwie soli kamiennej, charakteryzujące się nierównomiernie rozłożonymi wtrętami anhydrytu o szerokości

## 1. MOTIVATION

Salt mining continues to play an important role in the supply and production of agricultural fertilizer, road salt as well as the food and chemical industry, among others. Hence, the efficiency and productivity of mining in existing salt deposits is of great importance to the mining industry. The resource losses and resulting financial losses connected to uncertainties in the remaining volumes of the salt deposit can be immense and thus present a motivational factor for better sampling and exploration methods to provide a more comprehensive picture of the real situation of the salt deposit.

The commonly used method of direct probing via drilling of boreholes and the interpolation or extrapolation from direct observations of outcrops in already excavated areas of the mine can leave large uncertainties between these discrete sampling points. Especially in difficult rock mechanical situations of faulting and folding combined with diagenetically varying deposit thicknesses, the complexity of the situation can easily be misinterpreted simply because of a shortage of sampling points.

Geophysical methods provide a suitable and (mostly) non-destructive tool to close these knowledge gaps by comprehensively investigating salt deposits, as radar waves can travel great distances of up several meters to more than 100 m in dry salt, depending on the center frequency of the radar antenna and on the type of salt rock (Thierbach, 1994).

We present selected examples of geophysical investigations using Ground Penetrating Radar (GPR) and Borehole Radar (BHR) surveys in a rock salt mine in the South of Germany.

## 2. RADAR SURVEYS

The salt mine in Heilbronn has been producing Triassic rock salt since 1883 in a horizontal deposit of a thickness of 5 to 25 m at about 150 to 200 m depth using room and pillar mining.

### 2.1. Surface-based GPR surveys

Between 2014 and 2021 we conducted several radar surveys with the goal of determining the remaining deposit thickness in different areas of the mine, at a total profile length of more than 6 km. In most of these areas the room and pillar mining left a remaining safety slab above and below of several meters thickness. However, this areal thickness was only assumed from extrapolation and interpolation between discrete spots where the slab thickness was controlled via drilling. The special challenge in this mine arose from local impurities of the salt rock layer, as it featured irregularly distributed local inhomogeneities in the form of anhydrite inclusions of few decimeters width. When the drilling hit such an inclusion amidst the thicker salt layer the interpretation and

kilku decymetrów. Gdy podczas wiercenia napotymano na takie wtręty w grubszej warstwie soli, interpretacja i interpolacja granicy między solą a anhydrytem często wskazywały na znacznie płytszą głębokość i w rezultacie na mniejszą pozostałą objętość soli, niż była rzeczywistość obecna.

Radarowe badanie obejmujące cały obszar umożliwiłoby rozróżnienie lokalnych wtrąceń od granicy warstwy na większych głębokościach, jak pokazano na przykładzie radarogramów przedstawionych na rysunkach 2 i 3.

Część badania wykonano przy użyciu georadaru (GPR), skanując spągi i stropy istniejących szybów i komór w kopalni. Anteny radarowe o częstotliwościach centralnych od 100 do 400 MHz były przesuwane wzdłuż kilku równoległych linii pomiarowych. Dzięki specjalnej konstrukcji tych osłoniętych anten radarowych, emitowane fale radarowe penetrują masyw skalny poniżej (w przypadku pomiarów wykonanych na spągu) lub powyżej (w przypadku pomiarów wykonanych na stropie). Fale te odbijają się od granic warstw, takich jak anhydryt, który ogranicza złożę od góry i od dołu. Anhydryt działa jako bardzo efektywny, niemal doskonały reflektor, co umożliwia oszacowanie jego głębokości na podstawie czasu dwukierunkowego przejścia odbitej fali radarowej, przy założeniu standardowej prędkości fali dla soli kamiennej z okresu triasu wynoszącej 0,114 m/s.

Oddzielne badania w kopalni były przeprowadzane w celu wykrywania oznak łuszczenia się ścian i stropów w miejscach, gdzie było wiadomo lub istniało podejrzenie, że to zjawisko może wystąpić. Zaletą użycia radaru w tym przypadku jest to, że skutecznie odbija sygnały od pęknięć, szczelin i miejsc na płytach, gdzie materiał już się łuszczy. Pomiarami radarowymi można śledzić nie tylko rozmiar pęknięć w masywie skalnym, gdy łuszczenie jest już widoczne na powierzchni, ale również wykrywać podobne

interpolacja of the salt layer boundary to the anhydrite would indicate a much shallower depth and thus much less remaining salt volume than it actually was.

An area-wide radar survey would be able to differentiate between these locally limited inclusions and the contiguous layer boundary at greater depths, as seen in the exemplary radargrams in Figures 2 and 3.

Part of the survey was done by GPR measurements on the floor and roofs of existing drifts and rooms. The radar antennas of different center frequencies between 100 and 400 MHz were moved along several parallel profiles. According to the specific design of the shielded radar antennas the emitted radar waves travel mainly into the rock mass below (floor-based survey) or above (roof-based survey) where they are reflected by layer boundaries (of different dielectric properties) like the anhydrite limiting the deposit from above and below. The anhydrite presents an almost perfect reflector, so the depth of that reflector can be surmised from the two-way travel time of the reflected radar wave, assuming a generally valid radar wave velocity of 0.114 m/s in this Triassic rock salt.

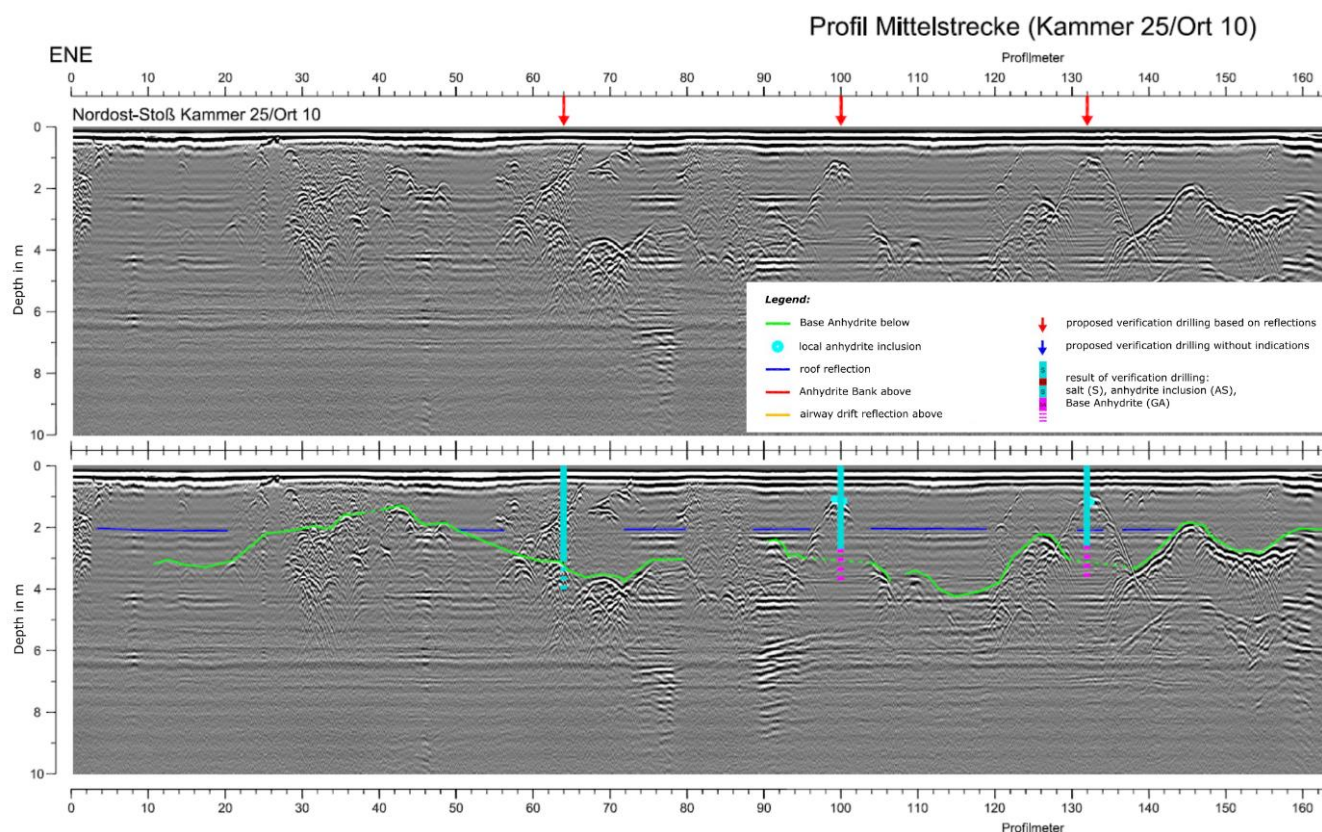
Separate surveys in the mine were aimed at detecting signs of spalling of the walls and roofs of parts of the mine where this common salt mechanical phenomenon was known or suspected to happen. The advantage of radar in this case is based on the clear reflectivity of cracks, fissures and already fully spalled slabs. Radar measurements can thus not only follow the extent of cracks in the rock mass, if spalling is already apparent at the surface but can also see if similar looking cracks and fissures have formed beneath the surface before they break through to the surface. The systematic search for these signs using non-destructive method of GPR presents a great value to the safety of ongoing mining operations.



**Ryc. 1:** Anteny GPR ciągnięte za pojazdem podczas badania na spągu (po lewej) oraz przymocowane do suwnicy podczas badania na stropie (po prawej).

**Fig 1:** GPR antennas pulled behind vehicle during floor-based survey (left) and attached to a gantry crane for roof-based survey (right).





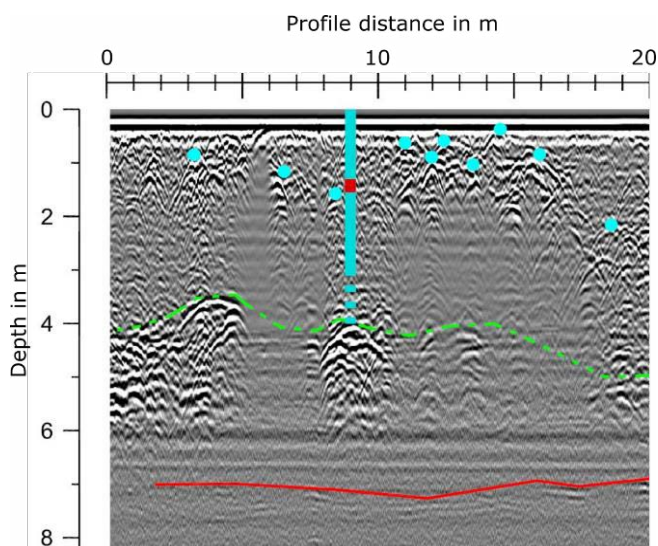
**Ryc. 2.** Przetworzony i oznaczony radarogram z badania opartego na spągu z użyciem anteny 200 MHz, z zaznaczoną granicą anhydrytu poniżej (kolor zielony) oraz lokalnymi wtrętami anhydrytu (kolor turkusowy). Słupki przedstawiają wyniki wierceń weryfikacyjnych.

**Fig. 2.** Processed and marked radargram of a floor-based GPR survey with a 200 MHz antenna with marking of the anhydritic boundary below (green) as well as locally limited anhydrite inclusions (cyan). The bars represent the results of verification drillings.

pęknięcia i szczeliny, które pojawiły się pod powierzchnią, zanim staną się widoczne na zewnątrz. Systematyczne poszukiwanie tych oznak za pomocą nieinwazyjnej metody GPR ma ogromne znaczenie dla bezpieczeństwa prowadzonych prac górniczych.

## 2.2. Badania radarem otworowym

W innej części obrzeży wyrobiska przewidywano, że grubość warstwy solnej zmniejszy się do kilku metrów, w miarę jak złożo stopniowo zanika między warstwami anhydrytu. Ponieważ nie było dostępnych chodników ani komór, z których można by przeprowadzić pomiary przy użyciu bardziej masywnych naziemnych systemów anten georadarowych, badanie zostało przeprowadzone za pomocą anten radarowych zainstalowanych w długich, poziomych otworach wiertniczych o długości do 300 m. Chociaż doświadczony zespół wiertniczy starał się utrzymać wszystkie otwory wiertnicze w obrębie warstwy solnej, niektóre z nich częściowo trafiły na anhydryt, co uniemożliwiło kontynuowanie wiercenia do pełnej planowanej długości. W badaniu radarowym odcinki otworów wiertniczych, które trafiły na anhydryt, nie mogły być wykorzystane, ponieważ skała anhydrytowa (w większości przypadków) całkowicie tłumi sygnał radarowy, uniemoż-



**Ryc. 3.** Oznaczony radarogram z lokalnymi przewarstwieniami anhydrytu (kolor turkusowy) oraz wierceniami weryfikacyjnymi, które trafiły na przewarstwienia (kolor czerwony) w złożu soli.

**Fig. 3.** Marked radargram with locally limited anhydrite inclusions (cyan) and verification drilling that encountered inclusion (red) within the salt rock.



Ryc. 4. Liny i wciągarki kablowe służące do przemieszczania sond radarowych w głębokim poziomym otworze wiertniczym.

Fig. 4. Rope and cable winches to move the radar probes inside a deep horizontal borehole during measurement.

liwiając tym samym wyciągnięcie wniosków na temat granic warstw na podstawie uzyskanych danych.

Ponieważ otwory wiertnicze były nieznacznie nachylone ku górze (od  $3^\circ$  do  $5^\circ$ ), sondy wiertnicze musiały być przesuwane w otworze przy użyciu specjalnie skonstruowanego, systemu kotwowego z liną do wciągania sond oraz wciągarki kablowej do ich wyciągania podczas pomiaru, jak pokazano na rysunku 4. W ten sposób możliwe jest badanie dużych głębokości poziomych otworów wiertniczych o długości do 500 m, a w specjalnych warunkach także w dłuższych poziomych otworach, za pomocą systemów pomiarowych opartych na kablu lub radarze.

Pomiary radarowe rejestrowane w pobliżu otworu wykazały, że warstwa anhydrytu podstawowego w dolnej części skanowanego obszaru generowała odbicia, które były widoczne jako nieregularne i nieciągłe. W przeciwieństwie do tego, odbicia od anhydrytu brzeżnego, znajdującego się dalej i powyżej otworu wiertniczego, były bardziej wyraźne i ciągłe (Ryc. 5). Różnice te można wyjaśnić odmiennymi właściwościami obu warstw anhydrytu. Anhydryt podstawowy, który jest bardziej kruchy i fragmentaryczny, generuje mniej jednorodne odbicia, podczas gdy anhydryt brzeżnego, mający ciągłą strukturę przypominającą sąsiadujące płyty, wytwarza bardziej spójne odbicia. Dzięki tym różnicom łatwiej jest interpretować i rozróżniać odbicia pochodzące z warstw znajdujących się powyżej i poniżej otworu wiertniczego. Antena w otworze wiertniczym emituje i odbiera fale radarowe we wszystkich kierunkach, co pozwala na rejestrowanie odbicia z wszystkich stron otaczających otwór.

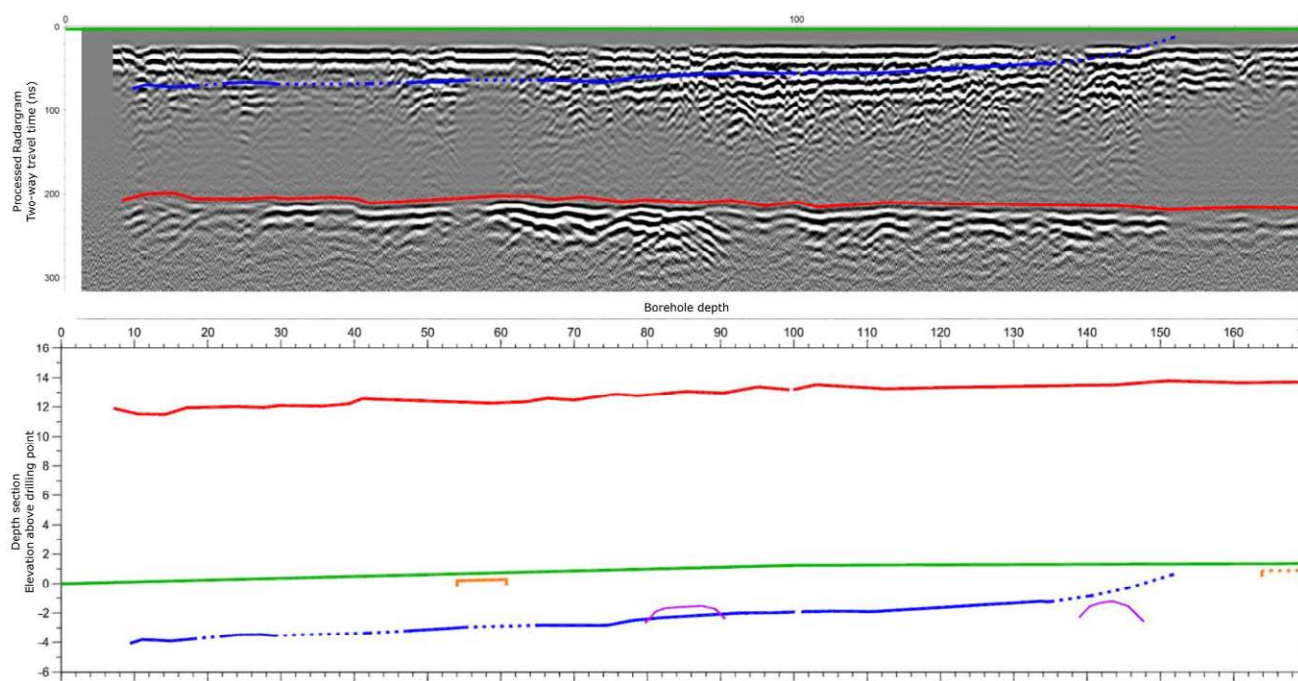
## 2.2. Borehole radar surveys

In another area at the edges of the excavated mine the salt layer thickness was expected to decrease to few meters as the deposit gradually peters out between the anhydrite strata. Since there was no existing drift or room to measure from using the bulkier surface GPR antenna systems, the investigation was conducted using borehole radar antennas from long horizontal boreholes of up to 300 m length. While the experienced drilling team tried to keep the path of all boreholes within the wedged salt layer, some of the boreholes partially hit and crossed the anhydrite and could not be continued to the full planned length. For the radar investigation the parts where borehole entered the anhydrite could not be used, since the anhydrite rock (in most cases) fully attenuates the radar signal, so no information about layer boundaries can be deduced from the radar data.

As the boreholes were slightly inclined upwards ( $3^\circ$  to  $5^\circ$ ) the borehole probes had to be moved in the borehole using custom-built anchored pulley system with a rope to pull the probes in and the cable winch to pull it back out during measurement, as seen in Fig. 4. This way large horizontal borehole depths of up to 500 m and under special conditions also in longer horizontal holes can be investigated with cable-bound borehole logging or radar systems.

The radar data showed clear reflections from the Base Anhydrite from below, which showed as a somewhat irregular, not continuous reflection signal close to the borehole, as well as the clearer, more significant and continuous reflection from the Anhydrite Bank at a greater distance from above the borehole (Fig. 5). These differences in the reflection signal





**Ryc. 5.** Radarogram anteny radarowej o częstotliwości 100 MHz z zaznaczonymi odbiciami od warstwy anhydrytu podstawowego (kolor niebieski) od dołu oraz warstwy anhydrytu brzeżnego (kolor czerwony) od góry.

**Fig. 5.** Radargram of the 100 MHz borehole radar antenna with marked reflections from Base Anhydrite (blue) from below and Anhydrite Bank (red) from above.

### 3. WNIOSKI

Technologia radarowa, stosowana jako georadar (GPR) na powierzchniach przekopów i komór w kopalni soli, jak i w otworach wiertniczych z użyciem specjalistycznych anten, oferuje cenne i szczegółowe informacje na temat struktury geologicznej badanego masywu skalnego. Jej główne zalety to łatwość użycia i szybka aplikacja, która umożliwia badanie setek do tysięcy metrów w czasie jednej zmiany roboczej, oraz proste przetwarzanie danych, które w krótkim czasie pozwala na uzyskanie szczegółowych obrazów 2D i 3D masywu skalnego. Radar najlepiej sprawdza się w materiałach o niskiej przewodności, takich jak sucha sól, osiągając głębokość penetracji od kilku do kilkuset metrów, w zależności od częstotliwości systemu radarowego. Jego użycie może być poważnie ograniczone w skałach o wysokiej przewodności, takich jak anhydryt, lub jeśli sól jest wilgotna lub nasycona solanką, ponieważ właściwości fizyczne tych materiałów znacznie tłumią lub nawet całkowicie absorbują energię fal radarowych. W ostatnim przypadku radar może być skutecznie użyty do wykrywania potencjalnych stref wilgoci w suchych masach solnych.

Przykłady przedstawione w tym artykule obejmują jedynie pomiary w solach kamiennych z okresu triasu z serii wapienia muszlowego (Muschelkalk), które charakteryzują się niższą jakością i czystością, co ogranicza głębokość penetracji do kilkudziesięciu metrów. Warto jednak zaznaczyć, że w starszych permskich złożach soli z epoki cechsztyńskiej

characteristics can be explained with the different properties of the lower Base Anhydrite, which has more brittle, broken-up composition whereas the Anhydrite Bank features a solid slab-like contiguous body. These known differences facilitate the more certain interpretation and differentiation between reflections coming from below and above in a radargram that shows reflections from all sides around the borehole, as the borehole antenna emits and receives radar waves omnidirectionally.

### 3. CONCLUSION

Radar technology, either applied as GPR from surfaces of excavated drifts and rooms of a salt mine or applied from boreholes with special borehole sized antennas, can provide valuable and comprehensive insight into the geological structure of the investigated rock mass. The great advantage arises from its easy and fast applicability, as several hundreds to thousands of meters can be investigated in one work shift, as well as its simple data processing which can yield instructive 2D or even 3D representations of the rock mass in short time. Radar works best in low-conductivity materials like dry salt achieving penetration depths of tens to hundreds of meters, depending on the frequency of the radar system. However, its use can be severely limited in high-conductivity rock types like anhydrite or also if the salt is affected by moisture or brine, as their physical properties severely attenuate or even completely absorb the energy of the radar waves. In the lat-

w Europie warunki są zazwyczaj jeszcze bardziej sprzyjające technologii radarowej, co pozwala na osiąganie głębokości penetracji radarowej do 100 metrów i więcej.

ter case radar can successfully be applied for the detection of suspected moisture zones in the otherwise dry salt body.

The examples presented here merely covered measurements in Triassic rock salts of the Muschelkalk series, which were of lower quality and pureness, thus reducing penetration depths to few tens of meters. It needs to be pointed out, however, that in older Permian salt series of the Zechstein era, the salt conditions in Europe are usually even more favorable for the radar technology as they easily yield radar penetration depths of up to 100 m and more.

#### LITERATURA/ REFERENCES

THIERBACH, R., *Twenty Years of Ground-Probing Radar in Salt and Potash Mines* (Dwadzieścia lat georadaru w kopalniach soli i potasu). In: *Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar* (Piąta Międzynarodowa Konferencja na temat Georadaru). *European Association of Geoscientists & Engineers* 1994. s. cp-300-00069.