



Zastosowanie metody georadarowej w górnictwie podziemnym soli kamiennej w kopalni O/ZG „Polkowice-Sieroszowice”

Using the ground penetrating radar methods in rock salt underground mining in the „Polkowice-Sieroszowice” mine

Tomasz CHRUL, Waldemar PAWLIK, Joanna WRZOSEK

KGHM Polska Miedź S.A., Oddział Zakłady Górnicze Polkowice-Sieroszowice, Kaźmierzów 100,
59-101 Polkowice, tomasz.chrul@kghm.com

STRESZCZENIE

W KGHM Polska Miedź S.A. w O/ZG „Polkowice-Sieroszowice” wykorzystywana jest metoda georadarowa do rozpoznawania budowy geologicznej pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1). Impulsem do zastosowania georadaru było pojawienie się zagrożenia gazowego w wykonywanych wyrobiskach górniczych. Metoda ta doskonale sprawdza się do lokalizowania bloków anhydrytowych, będących potencjalnym miejscem akumulacji siarkowodoru oraz jest pomocna przy określaniu stropu i spągu pokładu soli. W badaniach zastosowano anteny georadarowe o częstotliwościach 100MHz i 30MHz, którymi osiągnięto zasięgi odpowiednio 40m i 60m przy rozdzielczości 0,25m i 1,0m. Profilowania z użyciem georadaru wykonywano w otworach badawczych i wzdłuż spągu wyrobisk.

Słowa kluczowe: georadar, złoża soli, bloki anhydrytowe, siarkowodor.

ABSTRACT

In the KGHM Polska Miedź S.A. in the “Polkowice-Sieroszowice” mine, the georadar method is used to recognize the geological structure of the Zechstein (Upper Permian) Oldest Halite rock salt (Na1) deposits. The incentive to use the georadar was the occurrence of a gas risk in mining excavations. This method is ideal for locating anhydrite blocks, which are potential sites of hydrogen sulfide accumulation, and is helpful in determining the top and base of the salt deposits. In the tests, 100MHz and 30MHz antennas were used,

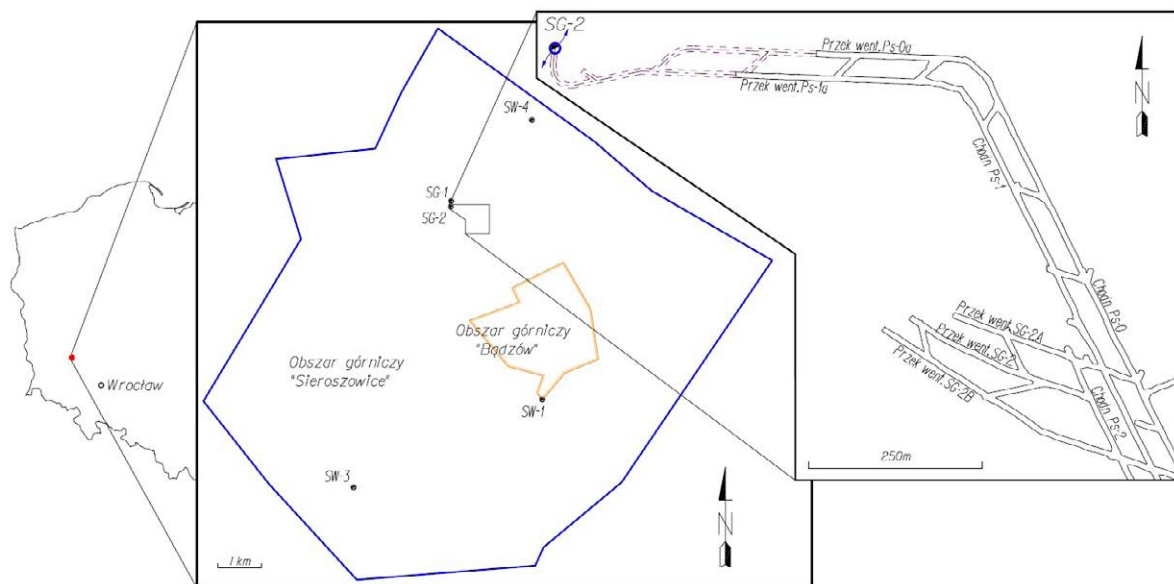
which reached the ranges of respectively 40m and 60m and resolutions of 0.25m and 1.0m. The profiling with use of a georadar was performed in research boreholes and along the floors of excavation drifts.

Key words: georadar, salt deposit, anhydrite blocks, hydrogen sulphide

WPROWADZENIE

Kopalnia „Polkowice-Sieroszowice” jest jedyną kopalnią w KGHM Polska Miedź S.A., która obok złoża rud miedzi eksploatuje również złoża soli kamiennej. Prowadzi ona działalność w pięciu obszarach górniczych ustanowionych dla wydobycia rudy miedzi, m.in. w OG Sieroszowice oraz w jednym obszarze górniczym ustanowionym dla wydobycia soli kamiennej – OG Bądzów. Poza tym obszarem w pokładzie soli kamiennej drażone są wyrobiska techniczne związane z eksploatacją złoża rud miedzi, a wydobyta sól kamienna w ramach tych robót stanowi kopalinę towarzyszącą. Takimi wyrobiskami technicznymi są Chodniki Ps-1 i Ps-0 oraz Przekopy wentylacyjne Ps-1a i Ps-0a, które docelowo mają połączyć wentylacyjnie szyb wydechowy SG-2 z wyrobiskami wykonanymi na poziomie złoża rud miedzi. W tym rejonie głównie koncentrowały się badania geofizyczne z wykorzystaniem georadaru (Soroko i in., 2015) (Ryc.1).

Impulsem do zastosowania metody georadarowej było wystąpienie zjawiska gazo-geodynamicznego podczas prowadzenia robót rozpoznawczych w złożu soli, poprzez niekontrolowany wpływ do wyrobisk siarkowodoru o znacz-



Ryc.1. Lokalizacja terenu badań.

Fig. 1. Location of the research area.

nym stężeniu. Gaz ten był uwięziony w bloku anhydrytu naświetlonym przez kombajn organem urabiającym.

Chcąc uniknąć w przyszłości podobnych wypadków opracowano nową metodologię rozpoznania złoża polegającą na: (a) wykonywaniu otworów badawczych w osiach wyrobisk zgodnie z azymutem i kątem zapadania projektowanych wyrobisk, (b) zastosowaniu badań georadarowych do rozpoznania górotworu pod kątem występowania w sąsiedztwie wyrobisk potencjalnie gazonośnych bloków anhydrytowych.

Poza oceną możliwości wystąpienia zagrożenia gazowego badanie georadarem stało się również narzędziem do monitorowania położenia stropu oraz spągu pokładu soli (Na1) w rejonach redukcji jego miąższości i konieczności prowadzenia wyrobisk bez kontaktu z anhydrytem górnym (A1g) i anhydrytem dolnym (A1d).

BUDOWA GEOLOGICZNA POKŁADU NAJSTARSZEJ SOLI KAMIENNEJ (Na1)

W Obszarze Górniczym Sieroszowice pokład soli kamiennej tworzy najstarsza sól, należąca do cyklotemu PZ1, ogniwa najstarszej soli kamiennej Na1. Bezpośrednio pod solami występuje anhydryt dolny (A1d) o miąższości od 20m do 152m, a nad nimi anhydryt górny (A1g) o miąższości od 42m do 72m.

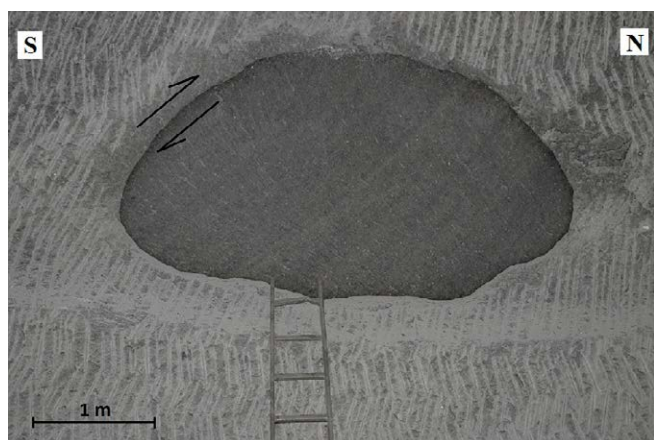
Miąższość soli kamiennej, w omawianym obszarze, waha się od ok. 3,6m (otwór S-71) do ok. 186m (otwór S-374), przy średniej miąższości ok. 80m. Spąg soli kamiennej zalega na głębokości od -630m p.p.m. w S części do -1355m p.p.m. w NE części obszaru. Strop pokładu soli zalega na głębokości od -627m p.p.m. w S części do -1145m p.p.m. w kierunku N. Odległość spągu soli od spągu cechsztynu waha się od 20m do 100m.

Pokład soli charakteryzuje się zmienną miąższością i złożoną budową wewnętrzną, objawiającą się deformacjami i zaburzeniami pierwotnego zalegania warstw (Ryc. 2 i 3), na które miały wpływ czynniki sedymentacyjne i tektoniczne (Szybist, 1976). Utrudnia to lub uniemożliwia określenie następstwa stratygraficznego i korelację poszczególnych wydzieleni litologicznych między wyrobiskami i otworami wiertniczymi. Poza różnicami w strukturze i teksturze soli kamiennych, głównym wyznacznikiem wydzielenia odmian petrologicznych soli jest ilość domieszek zanieczyszczeń anhydrytowych i ilastych. Na tej podstawie można wyróżnić szereg typów petrologicznych soli kamiennej, od soli czystej (bez widocznych makroskopowo zanieczyszczeń), do soli z grubymi przerostami anhydrytu (ze średnią lub dużą zawartością różnych form skupień anhydrytu) oraz warstw brekcji solno-anhydrytowej i anhydrytów śródsolnych.



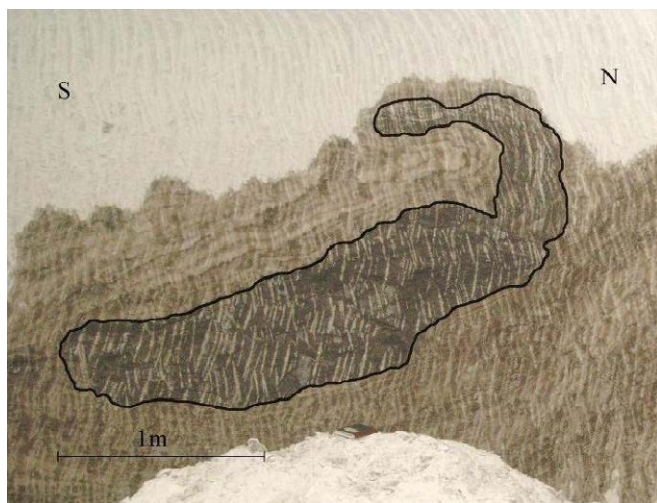
Ryc. 2. Zaburzone warstwowanie w soli (lokalizacja: Up. F-9).

Fig. 2. Disturbed layering in the rock salt bed (location site: Up.F-9).



Ryc. 3. Lustro tektoniczne odsłonięte w czole przodka Ps-0a.
Fig. 3. Slikenside along a fault surface exposed in the face of the Ps-0a excavation.

Przerosty anhydrytów śródsolnych w profilu złoża soli są częstym zjawiskiem. Występują one na ogół w pobliżu spągu pokładu soli, ale również w jego części środkowej i stropowej. Są to nieregularnie wykształcone warstwy o zmiennej miąższości, jak też nieregularne ciała anhydrytowe w formie soczew i bloków (Ryc.4).



Ryc. 4. Blok anhydrytowy w ociosie wyrobiska Ps-0a.
Fig. 4. Anhydrite block in the wall of the Ps-0a drift.

W profilu pokładu soli wspomniane anhydryty są reprezentowane przez jedną, dwie lub nawet trzy warstwy, a ich miąższość waha się od 0,04m do 9,0m. Korelacja przerostów anhydrytowych jest utrudniona ze względu na ich facjalne przechodzenie w sól kamienną (Szybist, 1976) zarówno w profilu pionowym jak i poziomym oraz tektoniczne deformacje w obrębie pokładu soli. Warstwy anhydrytu, jako skały sztywne w wyniku deformacji tektonicznej mogą występować w formie izolowanych, silnie spękanych bloków, poprzesuwanym względem siebie. Omawiane anhydryty mają strukturę mikro- i kryptokrystaliczną, teksturę zbitą, maszyną, ale nierzadko zdarzają się w nich tekstury porowate lub

wręcz kawerniste. W połączeniu z systemem szczelin i spękań, anhydryty takie są dobrym ośrodkiem akumulacji gazów.

Analizując parametry elektromagnetyczne soli i anhydrytu istnieją wystarczające różnice pomiędzy tymi dwoma utworami

METODYKA PRAC BADAWCZYCH

Wystąpienie zagrożenia gazowego w pokładzie soli kamiennej i konieczność zapewnienia bezpieczeństwa pracującej załozce oraz prowadzenia ruchu zakładu górniczego spowodowało konieczność zmodyfikowania dotychczasowych metod rozpoznania górotworu. Przed tym zdarzeniem rozpoznanie to ograniczało się do odwiercenia pojedynczego otworu badawczego, wyprzedzającego w czole przodka o kącie nachylenia i azymucie zgodnym z projektowanym wyrobiskiem. W zaistniałej sytuacji były to informacje niewystarczające, gdyż dostarczały jedynie punktowe dane, nie obejmujące całego przekroju wyrobiska. Zwiększenie obszaru badań umożliwiło zastosowanie metody georadarowej.

Podstawą użycia techniki georadarowej do prowadzenia rozpoznania budowy geologicznej i zagrożenia gazowego były wyniki prac zleconych przez Dział Geologiczny O/ZG „Polkowice-Sierszowice”. Wnioski z nich są następujące:

- przeprowadzanie badań georadarowych jest skuteczną metodą rozpoznania budowy geologicznej złoża soli oraz określenia wystąpienia zagrożenia gazowego (kontrast parametrów elektromagnetycznych soli i anhydrytu),
- badania geo-radarowe otworów wiertniczych, ociosów i spągów dobrze rejestrują występowanie struktur planarnych, (czyli np. przewarstwień anhydrytowo-ilastych), jak i obiektów występujących w soli (bloków anhydrytowych), identyfikując je, jako strefy silnego tłumienia fali elektromagnetycznej (Jedlecki i in., 2015).

Analizując parametry elektromagnetyczne soli i anhydrytu istnieją wystarczające różnice pomiędzy tymi dwoma utworami do zastosowania z powodzeniem metody georadarowej. Względna przenikalność elektryczna ϵ_r dla soli wynosi 5,6 natomiast dla anhydrytu 6,5 (Dortman, 1984), co umożliwia na granicach tych ośrodków zarejestrowanie na echogramach czytelnych refleksów i hiperbol dyfrakcyjnych. Innym z parametrów jest oporność elektryczna ρ , dla soli bardzo wysoka mieszcząca się w przedziale 10^{14} - $10^{15}\Omega\text{m}$, a dla anhydrytu niska, wynosząca 10^3 - $10^5\Omega\text{m}$. Wynika stąd, że w utworach solnych należy oczekiwać dobrej propagacji fal elektromagnetycznych i stosunkowo dużych zasięgów głębokościowych. Ponadto w strefach występowania bloków anhydrytu należy spodziewać się zwiększonego tłumienia fali elektromagnetycznej, co będzie widoczne na echogramie.

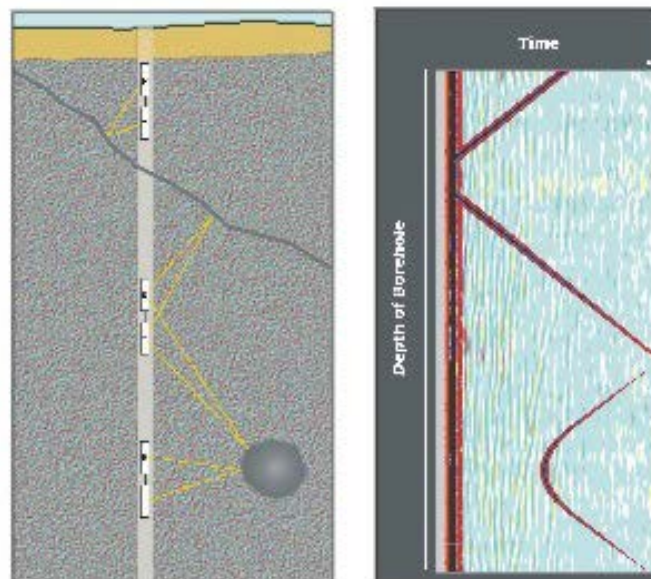
W trakcie prac górniczych w wyrobiskach drążonych w kierunku do zbitcia z szybem SG-2 (Przekopy wentylacyjne Ps-0, Ps-1), w rejonie południowo-zachodniej granicy zasięgu najstarszej soli kamiennej (Na1) pojawiła się dodatkowa

możliwość wykorzystania metody georadarowej, a mianowicie do monitorowania położenia stropu oraz spągu pokładu soli. Występowała tu konieczność utrzymania odpowiedniej półki bezpieczeństwa do kontaktu z anhydrytem dolnym (A1d) oraz anhydrytem górnym (A1g). Było to o tyle ważne, że zanotowano tu duże deniwelacje spągu i stropu pokładu soli oraz towarzyszące temu zjawisku zmniejszenie jego miąższości, jak również istniała też możliwość wystąpienia zagrożeń naturalnych z obu tych kierunków. Od anhydrytu dolnego mogło nastąpić realne zagrożenie gazowe, notowane w tym rejonie na poziomie złoża miedzi. Natomiast od anhydrytu górnego istniało potencjalne niebezpieczeństwo związane z zagrożeniem wodnym.

Biorąc pod uwagę wszystkie te czynniki dla realizacji drążenia wiązki wyrobisk w kierunku do zbiecia z szybem SG-2, opracowano sposób rozpoznania górotworu polegający na:

- wykonywaniu w każdym wyrobisku otworów wyprzedzających badawczych;
- przeprowadzaniu rozpoznania górotworu przy zastosowaniu badań georadarowych w otworach wiertniczych;
- prowadzeniu robot górniczych zgodnie z zaleceniami na podstawie wyników badań georadarowych;
- badaniu georadarowym wzdłuż spągu wykonanego wyrobiska celem weryfikacji badań georadarowych otworowych przy wykorzystaniu anten do profilowań powierzchniowych.

W metodzie georadarowej refleksyjnej wykorzystuje się zjawisko propagacji fal elektromagnetycznych w ośrodku geologicznym, ich odbicia na granicach ośrodków różniących się parametrami elektromagnetycznymi (Karczewski, 2007). Sygnał radarowy emitowany z anteny nadawczej (Tx) przenika przez górotwór i po odbiciu od granic ośrodków powraca do anteny odbiorczej (Rx). Wyznacznikiem głębokości jest czas, jaki upłynął od momentu wysłania sygnału do jego powrotu oraz prędkość rozchodzenia się fali w ośrodku skalnym. Powracająca fala jest rejestrowana w formie cyfrowej i zapisywana w postaci echogramu.



Ryc. 5. Schemat zasady działania georadaru otworowego (po lewej) oraz przykładowy echogram z badania powierzchni nieciągłości i ciała kulistego (po prawej). (Materiały informacyjne firmy Mala GS).

Fig. 5. A diagram showing a scheme of borehole ground penetrating radar operation (left) and an exemplary radargram presenting planar discontinuity and spherical body survey (right). (Mala GS promotion prospects).

Georadar otworowy działa na podobnej zasadzie, jak georadar do badania powierzchniowego, z tą różnicą, że w badaniu powierzchniowym impulsy odbite pochodzą z jednej półprzestrzeni, a w georadarze otworowym impulsy odbite są rejestrowane z pełnej przestrzeni (360°) wokół otworu i rzutowane na jedną powierzchnię. Utrudnia to określenie kierunku, w którym znajduje się obiekt powodujący zaburzenie, natomiast z dużą dokładnością można wyznaczyć jego odległość od otworu (Ryc.5)

Do badań otworowych wykorzystano system georadarowy 100MHz Slimhole Borehole Antenna firmy Malå Geoscience, w skład którego wchodzi antena nadawcza Tx (długość 1,89m, średnica 40mm), antena odbiorcza Rx (długość



Ryc. 6. A) Elementy zestawu 100MHz Slimhole Borehole Antenna producenta Malå Geoscience AB; B) Jednostka centralna georadaru ProEx wraz z monitorem XV; C) Antena ekranowana 100MHz; D) Antena nieekranowana RTA 30MHz. (Materiały informacyjne firmy Malå Geoscience AB).

Fig. 6. A) Elements of Malå Geoscience AB 100MHz Slimhole Borehole Antenna set; B) Control Unit of ProExground penetrating radar with a XV monitor; C) Shielded antenna 100MHz; D) Unshielded antenna RTA 30 MHz. (Mala GS promotion prospects).

1,76m, średnica 40mm) z wbudowanymi akumulatorami pozwalającymi na ponad 7 godzin pracy, separator z włókna szklanego o długości 1m łączący obie anteny oraz kabel światłowodowy, wzmacniony o długości 150mb i o nośności 650kg (Ryc.6). Połączone anteny są wprowadzane do otworu badawczego za pomocą skręcanych plastikowych rurek o dł.3m każda. Średnica otworu wynosi początkowo 32mm, a następnie jest rozwiercana do 93mm, aby można było zabezpieczyć otwór rurami PCV o średnicy 75mm (Ryc.7).



Ryc. 7. Pomiar georadarem otworowym w otworze wiertniczym.

Fig. 7. Borehole georadar survey.

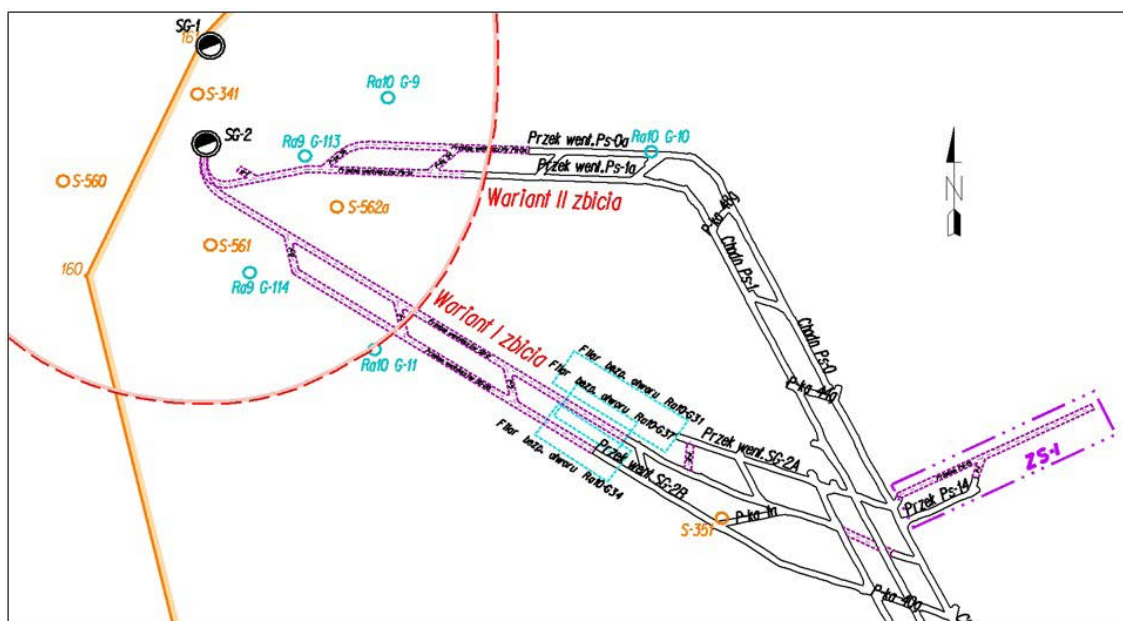
W badaniach spągu użyto antenę ekranowaną 100MHz oraz antenę nieekranowaną typu RTA 30MHz, którą dodatkowo wykorzystano do penetracji ociosu. Podczas pomiaru wybrana antena podłączana jest do jednostki centralnej georadaru ProEx, która jest podstawową częścią systemu. Do ustawienia parametrów pracy, odczytu i podglądu echogramu

służy XV Monitor (Ryc.6). Otrzymane dane z pomiarów są następnie poddane zaawansowanemu procesowi przetwarzania za pomocą programu ReflexW. Zapisany sygnał jest czyszczony z zakłóceń, filtrowany i wzmacniany.

W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych za pomocą anteny otworowej 100MHz oraz anteny do profilowań po spągu 100MHz. Zasięg głębokościowy obu anten wynosił do 40m, co daje wartość zbliżoną do podawanej przez producenta, a ich rozdzielczość pozwala na detekcje obiektów nie mniejszych niż 0,25m. Dla każdego profilowania przyjęto następujące parametry pracy: odległości między trasami – 0,1m, składanie – 8 razy, okno czasowe – 600ns, prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w soli – 0,13m/ns (wyznaczona na podstawie badań prędkościowych techniką WARR), a do przetworzenia otrzymanych echogramów zastosowano procedury programu ReflexW takie jak: korekcja czasu pierwszego wstąpienia (move starttime), usuwanie średniej (subtract-mean), usuwanie stałej składowej (subtract DC-shift), filtracja częstotliwościowa (bandpassbutterworth), wzmacnienie liniowe i logarytmiczne (gain function).

DWIE KONCEPCJE POŁĄCZENIA WYROBISK GÓRNICZYCH Z SZYBEM SG-2

Większość badań georadarowych koncentrowała się w rejonie wyrobisk drążonych do zbiecia z szybem wydechowym SG-2, gdzie po zaistnieniu w Przekopie Ps-14 zjawiska gazo-geodynamicznego, została wyznaczona powyżej przecinki 40g strefa niebezpieczna, czyli taka, w której istnieje możliwość wystąpienia zagrożenia gazowego (Ryc.8).



Ryc. 8. Dwa warianty połączenia wyrobisk górniczych z szybem SG-2 oraz stan rozpoznania górotworu otworami powierzchniowymi i pionowymi dołowymi.

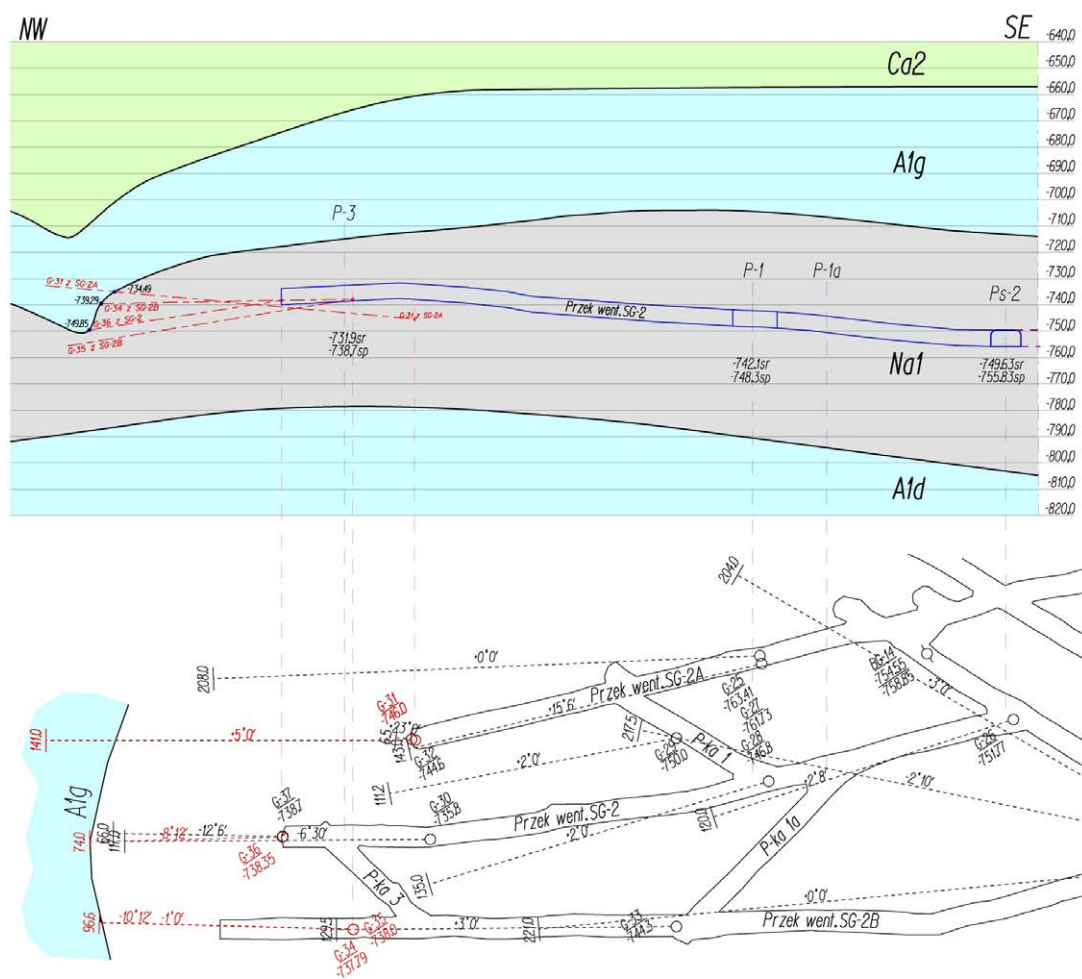
Fig. 8. Two variants of connecting drifts with the SG-2 shaft and the state of recognition of the rock massif with use of surface and vertical underground boreholes.

W pierwszym wariantcie zbitcia z szybem SG-2 zostały zaprojektowane przekopy SG-2 i SG-2A, a później również SG-2B. Rozpoznanie górotworu odbywało się tutaj standardowo przy pomocy otworów wyprzedzających, badawczych oraz badań georadarowych w otworach i po spągach wyrobisk, a usytuowanie spągu i stropu pokładu soli wydawało się być stabilne. Wskazywały na to informacje uzyskane z otworów pionowych odwierconych w tym rejonie (Ryc.8). W otworze powierzchniowym S-351 miąższość soli wyniosła 111m (przy rzędnej stropu pokładu -699,10m p.p.m i rzędnej spągu pokładu -810,10m p.p.m.), a w otworze pionowym Ra10 G-11 odwierconym z poziomu złoża miedzi ta miąższość wyniosła 96,8m (przy rzędnej stropu pokładu -697,50m p.p.m i rzędnej spągu pokładu -794,30m p.p.m.). Dużym zaskoczeniem było nawiercenie spągu anhydrytu górnego przy rzędnej -734,49m p.p.m. przez otwór wyprzedzający Ra10 G-31 odwierconym w czole przodka przekopu SG-2A na odległość 141m i pod kątem $+5^\circ$. Wykonane otwory badawcze z sąsiednich wyrobisk potwierdziły przypuszczenia o nagłym obniżeniu się spągu anhydrytu górnego (A1g) osiągającym ok. 40-50m, co wynika najprawdopodobniej z procesów tektonicznych. Ponadto ze wszystkich otworów badawczych, które osiągnęły anhydryt zaobserwowano wpływ wody o różnym nasileniu, co wskazywało na kontakt, poprzez spękania i szczeliny

w anhydrycie, z warstwą wodonośną w obrębie nadległych utworów dolomitu głównego (Ca2). W zaistniałych warunkach i z braku możliwości omińnięcia zawodnionej strefy tektonicznej, kierunek ten został zaniechany. Ryc.9 przedstawia przekrój wzdłuż przekopu SG-2 oraz przypuszczalne usytuowanie granic litologicznych w badanym rejonie.

Otwór badawczy Ra10 G-31 został po odwierczeniu i sprofilowaniu rdzenia przebadany za pomocą georadaru otworowego, a otrzymany echogram wydaje się być dosyć interesujący, gdyż wyraźnie widoczny jest na nim zarys spągu anhydrytu górnego.

Na echogramie przedstawionym na Ryc.10 pomiar rozpoczyna się od 5,0m, co spowodowane jest tłumieniem fal elektromagnetycznych przez stalową rurę obsadową. Następnie w przedziale głębokościowym 0-3m na całej długości otworu zaznacza się pas wysokoamplitudowych sygnałów pochodzących od nakładania się fali prostej, rozchodzącej się od anteny nadawczej do odbiorczej oraz fal odbitych od spękań okołotworowych. Nie zauważa się tutaj zaniku amplitudy sygnałów radarowych (stref tłumienia) oraz charakterystycznych hiperbol dyfrakcyjnych, co wskazuje na brak w najbliższym sąsiedztwie otworu, a tym samym przyszłego wyrobiska bloków anhydrytowych potencjalnie gazonośnych.



Ryc. 9. Przekrój geologiczny przez przekop wentylacyjny SG-2.

Fig. 9. Geological cross-section across SG-2 excavation.

Ra10 G-31

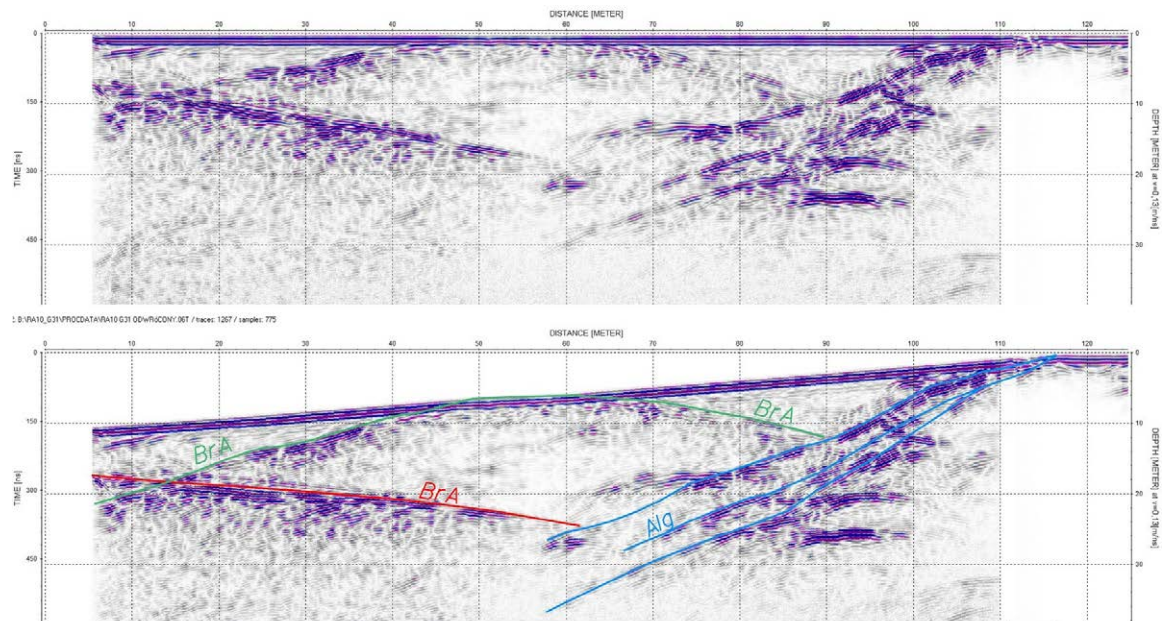
L.p.	Interwał (m) (interval)	Opis petrologiczny (Petrological description)	Miaższość (m) (Thickness)
1	0,00 - 10,00	Brak rdzenia (<i>without core</i>)	10,00
2	10,00 - 13,50	Sól kamienna czysta (<i>salt</i>)	3,50
3	13,50 - 17,00	Sól kamienna jasnoszara (<i>salt</i>)	3,50
4	17,00 - 19,00	Sól kamienna czysta (<i>salt</i>)	2,00
5	19,00 - 20,00	Sól kamienna jasnoszara (<i>salt</i>)	1,00
6	20,00 - 21,00	Sól kamienna ciemnoszara (<i>salt</i>)	1,00
7	21,00 - 23,70	Sól kamienna z laminami lub drobnymi skupieniami i okruchami anhydrytu (<i>salt</i>)	2,70
8	23,70 - 25,00	Sól kamienna ciemnoszara (<i>salt</i>)	1,30
9	25,00 - 26,20	Sól kamienna jasnoszara (<i>salt</i>)	1,20
10	26,20 - 28,20	Sól kamienna zanieczyszczona substancją ilastą z "warstewkami" lub licznymi okruchami anhydrytu (<i>salt</i>)	2,00
11	28,20 - 30,00	Sól kamienna jasnoszara (<i>salt</i>)	1,80
12	30,00 - 32,00	Sól kamienna czysta (<i>salt</i>)	2,00
13	32,00 - 33,85	Sól kamienna z laminami lub drobnymi skupieniami i okruchami anhydrytu (<i>salt</i>)	1,85
14	33,85 - 34,15	Anhydryt (<i>anhydrite</i>)	0,30
15	34,15 - 40,0	Sól kamienna jasnoszara (<i>salt</i>)	5,85
16	40,00 - 42,50	Sól kamienna z laminami lub drobnymi skupieniami i okruchami anhydrytu (<i>salt</i>)	2,50
17	42,50 - 44,00	Sól kamienna z grubymi przerostami anhydrytu (<i>salt</i>)	1,50
18	44,00 - 48,30	Sól kamienna czysta (<i>salt</i>)	4,30
19	48,30 - 49,00	Sól kamienna z laminami lub drobnymi skupieniami i okruchami anhydrytu (<i>salt</i>)	0,70
20	49,00 - 49,40	Sól kamienna z grubymi przerostami anhydrytu (<i>salt</i>)	0,40
21	49,40 - 50,00	Anhydryt i brekcja anhydrytowo-solna (<i>anhydrite and anhydrite-salt breccia</i>)	0,60
22	50,00 - 62,30	Sól kamienna z grubymi przerostami anhydrytu (<i>salt</i>)	12,30
23	62,30 - 76,55	Sól kamienna zanieczyszczona substancją ilastą i sporadycznie skupieniami lub smużkami anhydrytu (<i>salt</i>)	14,25
24	76,50 - 81,00	Sól kamienna jasnoszara (<i>salt</i>)	4,50
25	81,00 - 98,50	Sól kamienna zanieczyszczona substancją ilastą i sporadycznie skupieniami lub smużkami anhydrytu (<i>salt</i>)	17,50
26	98,50 - 110,00	Sól kamienna jasnoszara (<i>salt</i>)	11,50
27	110,00 - 114,00	Sól kamienna zanieczyszczona substancją ilastą i sporadycznie skupieniami lub smużkami anhydrytu (<i>salt</i>)	4,00
28	114,00 - 114,25	Anhydryt oczkowy (brekcja anhydrytowo-ilasta) (<i>anhydrite</i>)	0,25
29	114,25 - 114,60	Sól kamienna zanieczyszczona substancją ilastą i sporadycznymi skupieniami lub smużkami anhydrytu (<i>salt</i>)	0,35
30	114,60 - 115,20	Anhydryt oczkowy (<i>anhydrite</i>)	0,60
31	115,20 - 115,25	Sól kamienna czysta (<i>salt</i>)	0,05
32	115,25 - 115,50	Anhydryt oczkowy (<i>anhydrite</i>)	0,25
33	115,50 - 141,00	Anhydryt smużasty (<i>anhydrite</i>)	25,50

Tab. 1. Opis litologiczny rdzenia z otworu Ra10 G-31.

Tab.1. Lithological description of the core from Ra10 G-31 borhole.

Najbardziej interesujące są anomalie wyznaczające spąg anhydrytu górnego (A1g) przechodzące skośnie przez echogram w interwale 59-114m, tworzące trzy pasy o podwyższonych amplitudach refleksów i wskazując na przewarstwienia

anhydrytu i soli na kontakcie litologicznym. Linia refleksów tworzących horyzont zbiega się z linią otworu na 114m, dokładnie w miejscu wejścia otworu w anhydryt, co zostało stwierdzone w rdzeniu wiertniczym (Tab.1). Brak sygnałów



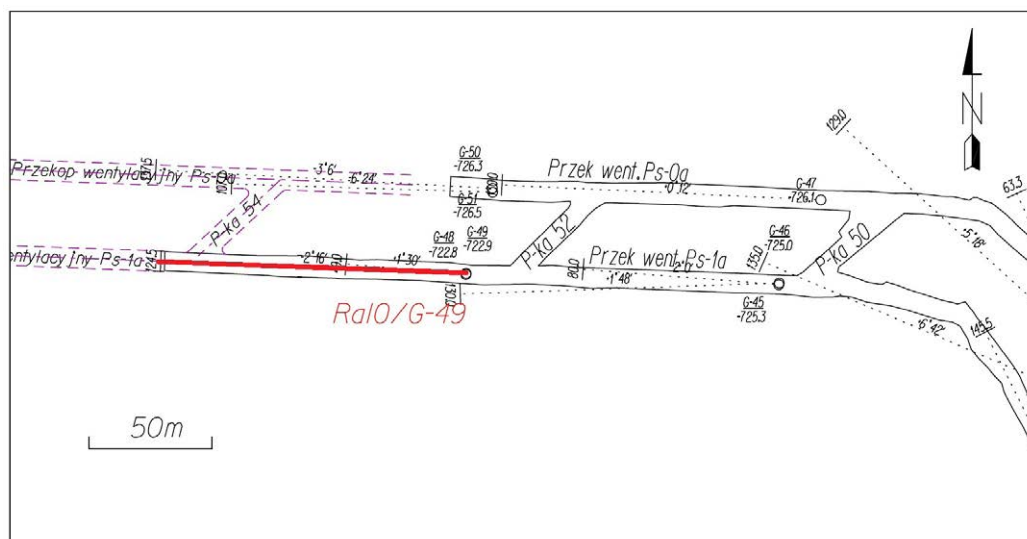
Ryc. 10. Echogram otworu Ra10 G-31 (a-echogram surowy, b-echogram z interpretacją), Alg-anhydryt górny, BrA-brekcja anhydrytowo-solna.

Fig. 10. Radargram of the Ra10/G-49 borehole (a-raw echogram, b-echogram with interpretation), Alg- upper anhydrite, BrA- anhydrite-salt breccia.

w strefie odległościowej w przedziale 110-125m i poniżej 5m głębokości związany jest z zawodnieniem anhydrytu solanką, która silnie tłumí fale radarowe.

Na echogramie widoczna jest również charakterystyczna łukowata struktura o podwyższonych amplitudach refleksów kontaktująca się z otworem w przedziale odległości 49-62m. Jest to niewątpliwie anomalia pochodząca od warstwy brekcji anhydrytowo-solnej i silnie zanieczyszczonej soli, co potwierdzone zostało w opisie petrologicznym rdzenia wiertniczego (Tab.1). Właśnie w tym interwale od 49,0m do 62,3m występuje sól kamienna z grubymi przerostami anhydrytu, brekcja anhydrytowo-solna i sam anhydryt. Mając

na uwadze dookólną charakterystykę anteny georadarowej otworowej z dużą pewnością można stwierdzić, że omawiana warstwa brekcji w przedziale 5-49m znajduje się nad otworem, w przedziale 49-62m otwór przechodzi przez nią, natomiast w interwale 62-90m warstwa ta przebiega pod otworem i najprawdopodobniej kontynuuje się dalej, co jednak nie jest widoczne na echogramie, gdyż refleksy pochodzące od tej struktury są przysłonięte przez silne sygnały wyznaczające spąg anhydrytu górnego. Podobnej planarnej struktury zbudowanej z brekcji anhydrytowej można się dopatrywać w anomalii w przedziale 5-58m, którą można umiejscowić poniżej otworu.



Ryc. 11. Lokalizacja omawianego obszaru.

Fig. 11. Location of the area under discussion.

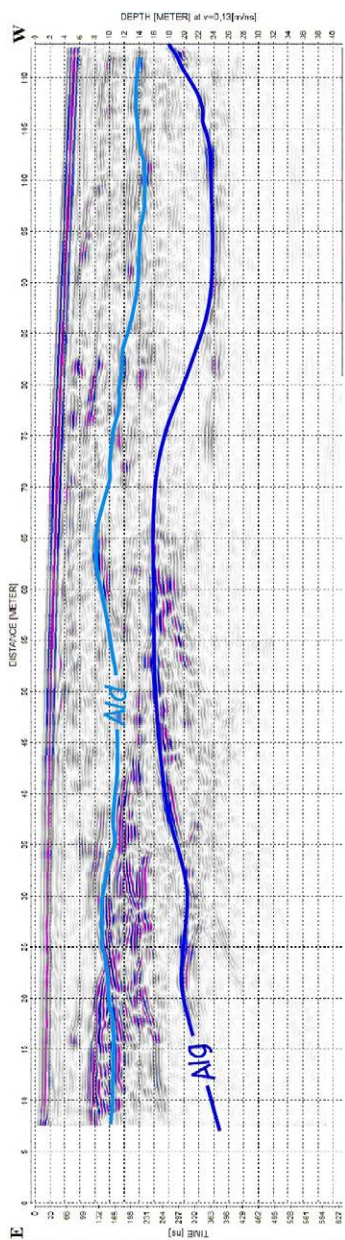
W drugim wariantcie zbitcia z szybem SG-2, kontynuowanym obecnie, wykonane zostały chodniki Ps-1 i Ps-0 oraz częściowo przekopy wentylacyjne Ps-0a i Ps-1a. Badania georadarowe w tym rejonie, jak już wcześniej wspomniano, oprócz identyfikacji zagrożenia gazowego miały na celu prowadzenie wyrobisk w bezpiecznej odległości od spągu i stropu pokładu soli bez kontaktu z anhydrytem dolnym lub anhydrytem górnym, gdzie można spodziewać się odpowiednio zagrożenia gazowego lub zagrożenia wodnego.

Dla przedstawienia wyników z interpretacji badań geofizycznych wybrano otwór wiertniczy Ra10/G-49 oraz dwa profile wykonane po spągu przekopu wentylacyjnego PS-1a

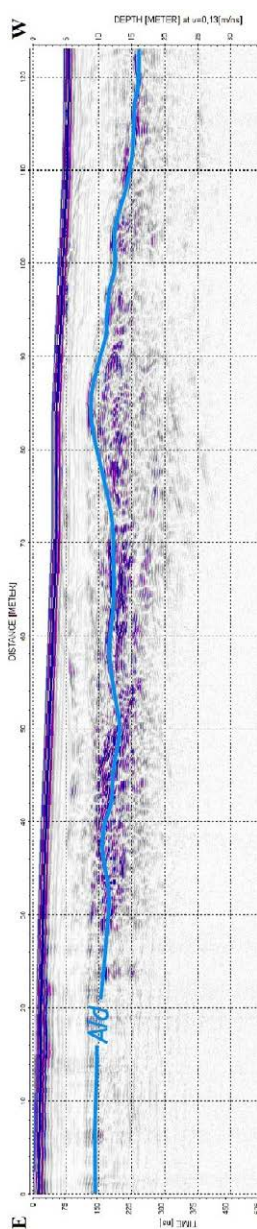
w rejonie tego otworu pomiędzy przecinką 52 i przecinką 54 (Ryc.11).

Na echogramie otworu Ra10/G-49, odwierconego w osi wyrobiska PS-1a na odległość 124,5m i kątem $-2^{\circ}16'$ (Ryc.12), zaznaczają się dwie charakterystyczne strefy anomalii.

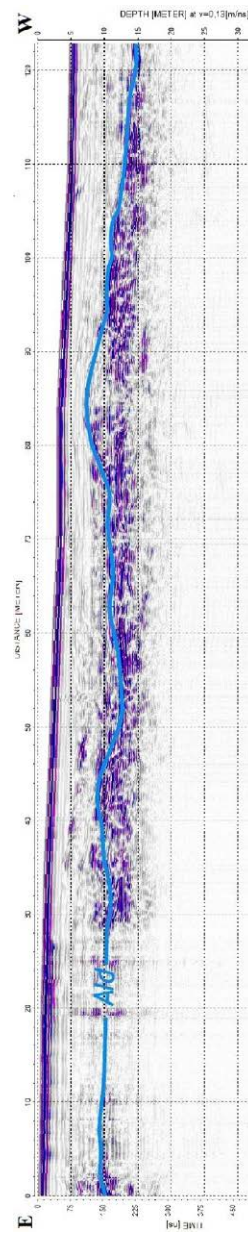
Pierwsza z nich w interwale od 9-113m na głębokości od 6 do 10m rejestruje strop anhydrytu dolnego (A1d), czyli spąg pokładu soli. Natomiast anomalie zarejestrowane na 17-113m z pewnymi przerwami na głębokości od 14m do 22m przedstawiają spąg utworów anhydrytu górnego (A1g), czyli strop pokładu soli.



Ryc. 12. Echogram otworu Ra10/G-49. A1g- anhydryt górny, A1d-anhydryt dolny.
Fig. 12. Radagram of the Ra10/G-49 borehole. A1g- upper anhydrite, A1d- lower anhydrite.



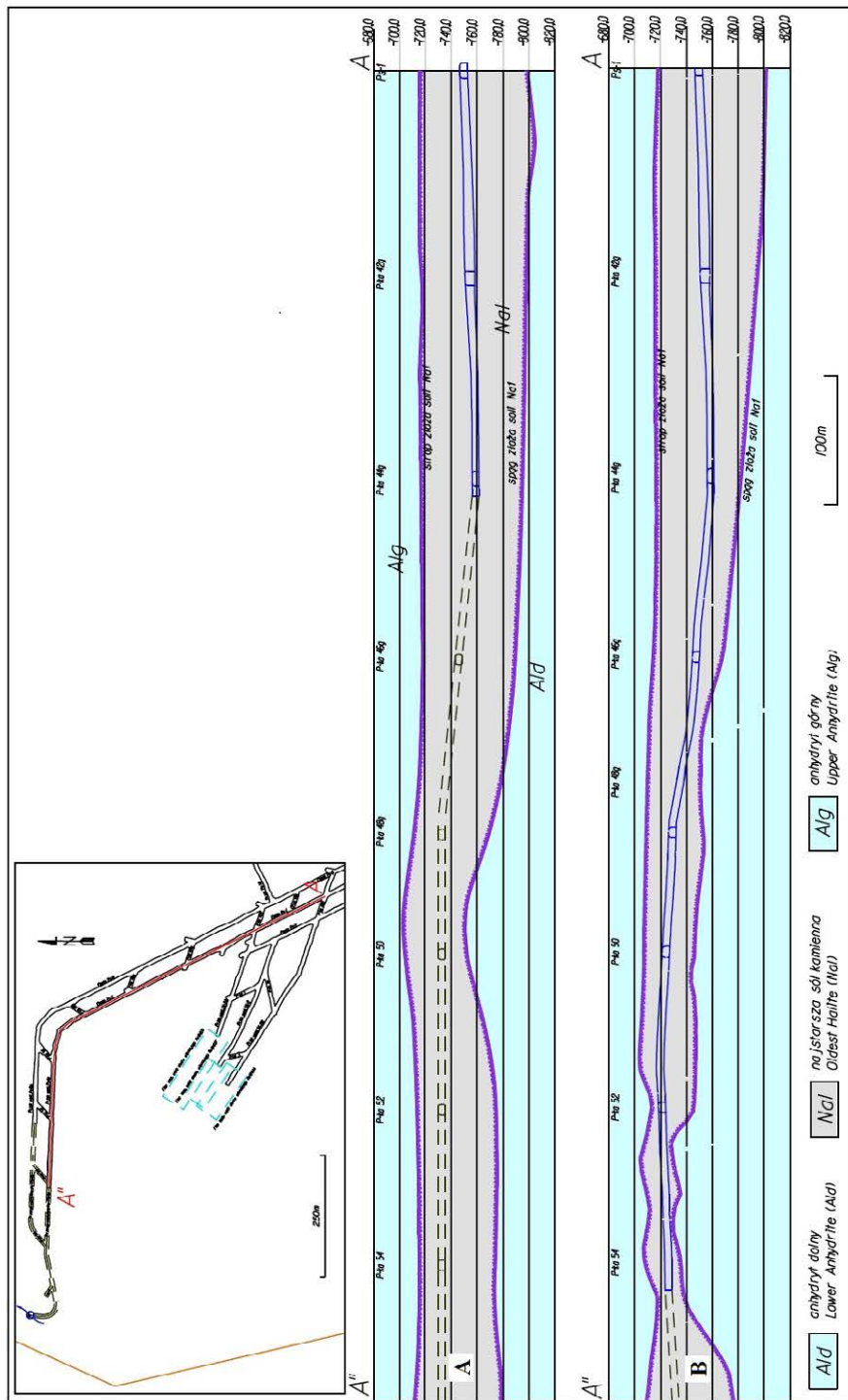
Ryc. 13. Echogram badań wykonanych po spągu wyrobiska PS-1a przy lewym odciosie A1d-anhydryt dolny.
Fig. 13. Radagram obtained in the floor of the PS-1a excavation, near the left wall. A1d-lower anhydrite.



Ryc. 14. Echogram badań wykonanych po spągu wyrobiska PS-1a przy prawym odciosie. A1d-anhydryt dolny
Fig. 14. Radagram obtained in the floor of the PS-1a excavation, near the right wall. A1d-lower anhydrite.

Przeprowadzenie badań wzdłuż spągu wyrobiska PS-1a (Ryc.13 i Ryc.14) umożliwiło wyznaczenie stropu anhydrytu dolnego (A1d). Wykonanie dwóch profili georadarowych wzdłuż wyrobiska (Ryc.13 i Ryc.14) pozwala na wyznaczenie kąta i kierunku zapadania stropu wydzielenia anhydrytu dolnego. W tym przypadku profile zostały wykonane w odstępnie 2,0m, różnica głębokości zalegania spągu pokładu soli wynosi ok. 1,1m, co daje nachylenie ok. 33° ku S.

Poprzez bieżące określanie zalegania stropu i spągu pokładu soli, możliwe jest prowadzenie robót górniczych w taki sposób, aby zapewnić odpowiedniej miąższości półkę bezpieczeństwa i uniknąć kontaktu z dolnym lub górnym anhydrytem. Bezpośrednio przekłada się to na bezpieczeństwo pracującej załogi i prowadzenia robót górniczych. Na Ryc. 15A przedstawiono przekrój przez pokład soli wzdłuż chodnika PS-1, z zaznaczonym stropem i spągiem, wykonany na pod-



Ryc. 15. Przekrój pokładu soli kamiennej (Na1) wykonany na podstawie otworów powierzchniowych i otworów badawczych pionowych (A) oraz przekrój pokładu soli kamiennej wykonany (uaktualniony) na podstawie badań georadarowych (B).

Fig. 15. A cross-section across the Na1 rock salt deposits – interpretation based on surface boreholes and vertical research boreholes (A) and (updated) upon the georadar investigations (B).

stawie otworów wiertniczych powierzchniowych oraz otworów dołowych pionowych. Natomiast przekrój na Ryc.15B został zmodyfikowany w trakcie postępu robót górniczych na podstawie badań georadarowych dołowych. W sytuacjach, w których mamy do czynienia z bardzo zmienną morfologią stropu i spągu pokładu soli, badania georadarowe są cennym uzupełnieniem informacji geologicznej. Dodatkowym i bardzo istotnym źródłem informacji jest profilowanie georadarowe prowadzone wzdłuż spągu wyrobisk. Poza określeniem przebiegu morfologii stropu anhydrytu dolnego pozwala ono również z dużą precyzją, przy dwóch profilowaniach przy przeciwnych odciosach i przy rozdzielczości anteny 0,25m, określić jego zaleganie poprzecznie względem osi wyrobiska.

PODSUMOWANIE

Zastosowanie badań georadarowych w górnictwie solnym w O/ZG „Polkowice-Sieroszowice” umożliwiło uszczegółowienie budowy wewnętrznej pokładu najstarszej soli kamiennej. Kontrast parametrów elektromagnetycznych między anhydrytem i solą, czyli różnica względnych przenikalności elektrycznych ϵ_r , wynosząca ok. 1 oraz różnica elektrycznych oporności właściwych ρ rzędu $10^{10}\Omega\text{m}$, pozwala na wykrycie różnej wielkości ciał anhydrytowych w masie solnej. Również wysoka oporność elektryczna ρ soli umożliwia uzyskanie stosunkowo dużych zasięgów głębokościowych: 40 m dla anten 100MHz i 60m dla anteny 30MHz, co doskonale sprawdza się przy określaniu granic pokładu soli, tj. stropu i spągu. W celu prawidłowego prowadzenia wyrobisk w strefie spodziewanej zmiennej miąższości pokładu soli ustalona została odpowiednia metodyka badawcza bazująca na użyciu metody georadarowej. W pierwszej kolejności w czole przodka wiercony jest badawczy otwór wyprzedzający o azymucie i kącie nachylenia zgodnym z zaprojektowanym wyrobiskiem. Na podstawie rdzenia wiertniczego uzyskuje się punktową informację o budowie geologicznej, litologii, odmianach petrograficznych soli i przerostach anhydrytu. Następnie, po wykonaniu badania georadarem otworowym otrzymuje się echogram, a po jego interpretacji i wyznaczeniu spągu oraz stropu pokładu możliwe jest prawidłowe zaprojektowanie przebiegu wyrobiska, uwzględniające utrzymanie odpowiedniej, bezpiecznej odległości od granic litologicznych oraz omijający potencjalne zagrożenie gazowe i wodne. Po wykonaniu przekopu przeprowadza się profilowanie georadarem powierzchniowym wzdłuż jego spągu, dla potwierdzenia prawidłowości określenia dolnej granicy pokładu. Ponadto profilując wzdłuż spągu wyrobiska przy lewym i prawym odciosie wyrobiska, można określić kierunek i kąt poprzecznego względem osi wyrobiska zapadania granic litologicznych. Przedstawiony tok postępowania umożliwia kompleksowe rozpoznanie budowy geologicznej badanej strefy, zminimalizowania niebezpieczeństw naruszenia stref zagrożeń naturalnych oraz ko-

relację informacji geologicznych otrzymanych w sąsiednich wyrobiskach.

SUMMARY

Use of georadar tests in salt mining at the “Polkowice-Sieroszowice” Mine has enabled detailing the internal structure of the oldest rock salt deposit. The contrast of electromagnetic parameters between anhydrite and salt, i.e. the difference of relative permittivity ϵ_r , which is around 1, and the difference of electrical resistivity ρ of approximately $10^{10}\Omega\text{m}$, allows for the detection of anhydrite bodies of different sizes in the salt mass. Also the high electrical resistivity ρ of salt allows for obtaining relatively wide depth ranges: 40m for 100MHz antennas and 60m for 30MHz antennas, which is perfect for determining the limits of salt deposits, i.e. the roof and floor. For the proper route of the excavations in the area of expected changeable thickness of the salt deposit, an appropriate testing methodology based on the use of a georadar method has been determined. First, in the face of the front, a pilot borehole is drilled having azimuth and inclination angle compatible with the designed excavation site. Based on the drilling core, a point feedback is obtained on the geological structure, lithology, petrographic species of the salt and anhydrite partings. Then, after the borehole georadar test has been carried out, an echogram is obtained. Having interpreted it and determined the floor and roof of the deposit, it is possible to design the course of the excavation site properly, taking into account maintaining an appropriate and safe distance from lithological limits and overriding potential gas and water flooding hazards. Having performed a ditch, surface georadar profiling is conducted along its floor, in order to confirm the validity of determining the lower limit of the deposit. Furthermore, when profiling along the floor of the excavation site at its left hand and right hand sidewalls, the direction and angle of the transverse, with respect to the axis of the excavation site, collapse of lithological limits can be determined. The presented course of action allows for comprehensive recognition of the geological structure of the area being tested, minimisation of the risk of infringement of natural hazard zones and correlation among geological information received from neighbouring excavation sites.

LITERATURA

- DORTMAN N.B., 1984. Fizyceskije swojstwa gornych parod i poljeznych iskopajemych. Wydawnictwo Nedra, Moskwa.
- JEDLECKI R., CHRUL T., PAWLIK W., SOROKO K., GOLA S., 2015. Metody georadarowe w identyfikacji potencjalnych źródeł siarkowodoru w wyrobiskach złoża soli kamiennej w O/ZG „Polkowice-Sieroszowice”. W: Międzynarodowy Kongres Górnictwa Rud Miedzi: 174-185.
- KARCZEWSKI J., 2007. Zarys metody georadarowej. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.

- SOROKO K., DANIS M., GOLA S., TURKIEWICZ W., 2015. Propozycja wykorzystania wyrobisk złoża soli w zakresie wentylacji oraz prewencji aerologicznych zagrożeń naturalnych na poziomie złoża rud miedzi w obszarze „GGP”. *CUPRUM*, 76 (3): 115–129.
- SZYBIST A., 1976. Złoże soli kamiennej w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym. *Prz. Geol.*, 24 (1), 572–576.
- WAGNER R., 1994. Stratygrafia i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. *Prace PIG*, t. 146, Warszawa.
- Materiały informacyjne firmy Mała GPR. (www.malagpr.com.au)