

Zastosowanie metod ERT i MASW w rozpoznaniu geologicznym Rowu Krzeszowickiego

KRZYSZTOF BANAŚ

Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk, ul. Władysława Reymonta 27, 30-059 Kraków

KAMIL CICHOSTĘPSKI

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059, Kraków

Streszczenie

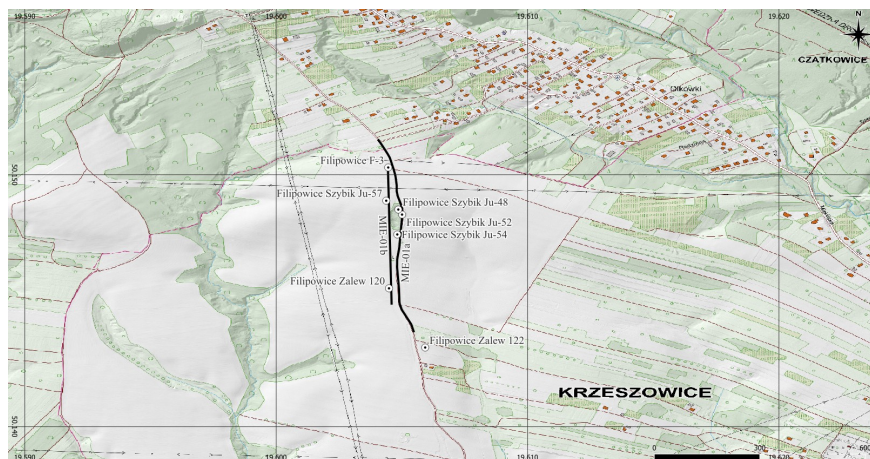
Artykuł prezentuje zastosowanie metod MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) oraz ERT (tomografii elektrooporowej) w rozpoznaniu budowy geologicznej północnej granicy Rowu Krzeszowickiego, gdzie obserwuje się sąsiedztwo utworów miocenских, mezozoicznych oraz karbońskich. Analizy ośrodka skalnego dokonano przy użyciu metod wykorzystujących różne pola falowe (elektryczne oraz fal sprężystych), co pozwoliło na ocenę korelacji między różnymi parametrami geofizycznymi. Akwizycję danych sejsmicznych przeprowadzono przy użyciu dwuteownika jako źródła fali S oraz geofonów spolaryzowanych horyzontalnie, a dane elektrooporowe zebrano przy wykorzystaniu protokołów pomiarowych: Schlumberger oraz Dipole-Dipole. Dane poddano przetwarzaniu i interpretacji z dowiązaniem danych otworowych. Wyniki przeprowadzonych badań zapewniają nowe informacje na temat budowy geologicznej i tektoniki rejonu.

Słowa kluczowe: Rów Krzeszowicki; tomografia elektrooporowa; MASW; ERT; geofizyka inżynierska; inwersja; akwizycja; fala poprzeczna; geologia

1. Wstęp

1.1. Lokalizacja

Rejon badań znajduje się na granicy miasta Krzeszowice i wsi Miękinia, w powiecie krakowskim, w województwie małopolskim (Rys. 1). Profile badawcze MIE-01a (metoda MASW) i MIE-01b (metoda



Rys. 1. Mapa lokalizacyjna profili MIE-01a i MIE-01b oraz otworów wykorzystanych w interpretacji uzyskanych wyników na podkładzie mapy topograficznej

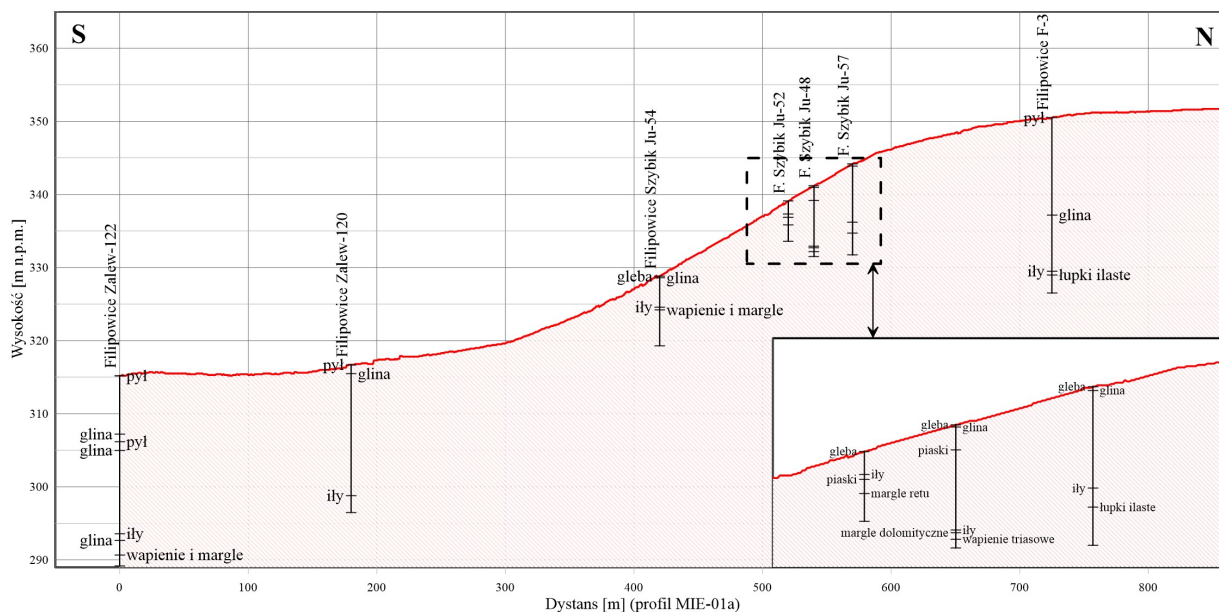
ERT) przebiegają w kierunku północ-południe, zatem prostopadle do granicy Rowu Krzeszowickiego, który wykazuje rozciągłość równoleżnikową od Zapadliska Chrzanowsko-Dulowskiego w rejonie Dulowej do Zapadliska Przedkarpacciego w rejonie Krakowa [Płonczyński i Łopusiński, 1993]. Rów ograniczony jest od południa i północy przez wysoczyzny o średnich wysokościach względnych względem dna Rowu wynoszących około 200 metrów [Milijanović i Satora, 2006].

1.2. Geologia obszaru badań

Granica geologiczna, będąca przedmiotem badań, przebiega pomiędzy mioceńskim wypełnieniem Rowu Krzeszowickiego, powstałego na skutek silnego uskokowania i transgresji morskich w trakcie miocenu [Alexandrowicz, 1965], a podłożem mezozoicznym i osadami karbońskimi [Milijanović i Satora, 2006; Grdziński, 1974]. Miocen prezentowany jest przez ility oraz gipsy w najstarszej części, mezozoik (Jura i Trias) to głównie wapienie i margle, lokalnie silnie spękane i zdeformowane tektonicznie, natomiast utwory karbonu to łupki ilaste z przewarstwieniami węgla [Płonczyński i Łopusiński, 1993]. W sensie właściwości fizycznych można wnioskować o kontakcie utworów niskooporowych o średniej prędkości fal sprężystych (ility, łupki) z wysokooporowymi o wysokich prędkościach fal sprężystych (węglany). Silny kontrast właściwości fizycznych daje szansę na uzyskanie wyraźnych granic geofizycznych i stref uskokowych.

1.3. Dane otworowe

W opracowaniu wykorzystano 7 otworów wiertniczych (Filipowice Zalew 120 i 122; Filipowice Szybik Ju 48, 52, 54 i 57; Filipowice F-3). Dane litostratygraficzne dostarczone z wierceń [Baza otworów wiertniczych 2024] zostały przygotowane w programie *Grapher* i przedstawione na Rys. 2 wraz z lokalizacją na profilu MIE-01a oraz morfologią terenu. Otwory zaprezentowane są w kierunku południe-północ (Filipowice F-3 jest najdalej na północ wysuniętym otworem). Zmiany litostratygraficzne w tym kierunku są wyraźnie widoczne: coraz mniejsza głębokość zalegania podłoża mezozoicznego (margle, wapienie), pojawienie się łupków ilastych z Karbonu w północnych otworach (F. Szybik Ju-57, F. F-3).



Rys. 2. Zestawienie wydzieleni litologicznych w otworach wykorzystanych w procesie interpretacji na przekroju topograficznym profilu MIE-01a

1.4. Metoda MASW

Metoda MASW to nieinwazyjna metoda analizy stanu geomechanicznego ośrodka geologicznego, stosowana do wyznaczania rozkładu prędkości fali S w płytkich warstwach. W tym celu korzysta z niskoczęstotliwościowych (1-30 Hz) fal powierzchniowych Rayleigh'a i Love'a [Park i in., 2007]. Obydwa rodzaje fal wykazują zdolność dyspersji (większa długość fali przekłada się na większą głębokość penetracji).

Przetwarzanie badań MASW polega na wyznaczeniu krzywych dyspersji poprzez analizę zależności prędkości fazowej i częstotliwości, a następnie iteracyjnej inwersji danych poprzez modelowanie algorytmem z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. Efektem jest uzyskanie profilu z wymodelowanym rozkładem prędkości fali S w funkcji głębokości [Park i in., 1997].

Metoda MASW pozwala dodatkowo na wyznaczenie w sposób ciągły parametrów geotechnicznych gruntu, takich jak moduł Kirchhoffa, moduł Younga czy współczynnik Poissona.

1.5. Metoda ERT

Metoda tomografii elektrooporowej (ERT) bazuje na wyznaczeniu różnicy potencjałów powstającej na elektrodach potencjałowych (M i N) przy przepływie prądu między elektrodami prądowymi (A i B). Profil ERT składa się zazwyczaj z kilkudziesięciu lub kilkuset elektrod, z których w każdym cyklu pomiarowym wybierane są 4 (A, B, M i N) według ustalonego protokołu pomiarowego (tutaj: Schlumberger HD i Dipole-Dipole) [Loke, 2000].

Protokół Schlumberger HD jest najbardziej uniwersalnym sposobem realizacji pomiarów aparaturą ARES II, będącym rozszerzoną wersją zwykłego układu Schlumbergera, wykorzystującym wszystkie możliwe konfiguracje elektrod. Sam układ Schlumbergera składa się z dwóch par elektrod: potencjałowych (M i N) oraz prądowych (A i B). Elektrody A i B oraz M i N umieszczone są symetrycznie względem środka profilu, przy czym odległość między elektrodami potencjałowymi jest znacznie mniejsza niż odległość między elektrodami prądowymi. Zwiększanie rozstawu elektrod potencjałowych pozwala na przepływ prądu przez coraz głębsze warstwy, umożliwiając wyznaczenie oporności pozornej na zmiennych głębokościach [Everett, 2013].

Protokół dipol-dipol składa się również z 2 par elektrod: prądowych (A i B) oraz potencjałowych (M i N), umieszczonych w stałych, równych sobie odstępach. Zwiększenie rozstawu pomiędzy parami elektrod pozwala na oznaczanie oporności pozornej coraz głębszych warstw. Protokół ten doskonale sprawdza się w przypadku poziomych zmian właściwości elektrycznych ośrodka, zatem wykorzystywany jest dla obszarów o zróżnicowanej i silnie zdeformowanej, między innymi tektonicznie, budowie geologicznej [Loke, 2000]. Ze względu na tę cechę akwizycję przeprowadzono dodatkowo właśnie tym schematem pomiarowym.

Ostatecznym parametrem mierzonym w terenie jest oporność pozorna, która musi zostać poddana przetworzeniu przez inwersję, uzyskując oporność wyinterpretowaną [Loke, 2021]. Metoda należy do najpopularniejszych w geofizyce inżynierskiej [Lam i in., 2024] ze względu na szerokie zastosowanie (wyznaczanie powierzchni ukokowych, oznaczanie gruntów spoistych i niespoistych, stref osuwiskowych, złóż kwarcytów, piaskowców czy wapieni, rozpoznawanie pustek w ośrodku geologicznym oraz elementów infrastruktury).

2. Zakres badań

W ramach badań przeprowadzono akwizycję metodą sejsmiczną na profilu MIE-01a o długości 864 metrów, stosując aparaturę 48-kanałową *Geode* firmy *Geometrics*. Źródłem fali sejsmicznej był metalowy dwuteownik, na którym generowano falę S co 2 geofony (6 metrów) lub 1 geofon (3 metry) w centralnej części profilu, na granicy Rowu Krzeszowickiego, celem zwiększenia stosunku sygnału do szumu. Jako odbiorniki użyto geofonów o polaryzacji horyzontalnej, częstotliwości 4,5 Hz, w rozstawie co 3 metry.

Dodatkowo, w ramach części badawczej zrealizowano profil MIE-01b długości 595 metrów metodą tomografii elektrooporowej przy zastosowaniu aparatury *ARES II* firmy *GF Instruments*. Rozstaw elektrod wyniósł 5 metrów. Akwizycję przeprowadzono, stosując dwa protokoły pomiarowe: Schlumberger HD oraz dipol-dipol, przy maksymalnym natężeniu prądu 200 mA, długości impulsu elektrycznego 0,3 s oraz maksymalnym aktywnym rozstawie 500 metrów (stąd zasięg głębokościowy to około 100-110 metrów pod powierzchnią terenu).

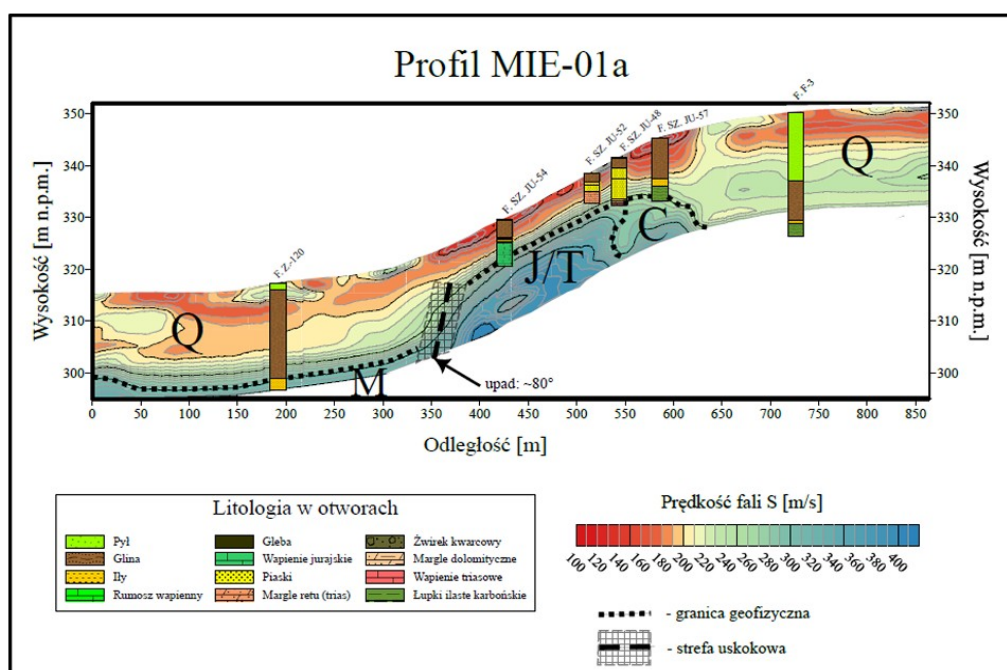
3. Przetwarzanie i interpretacja

3.1. Przetwarzanie i interpretacja MASW

Przetwarzanie danych sejsmicznych przeprowadzono w programie *SeisImager*, zaczynając od pre-processingu obejmującego usunięcie błędnych tras, filtrację częstotliwościową Butterwortha (m.in. ze względu

na sąsiedztwo linii wysokiego napięcia ponad profilem) oraz wycięcie danych rejestrowanych na czasach powyżej 1200 ms. Następnie obliczono kroskorelacyjne CMP (*CMPCC gatters*), na których przeanalizowano wartości prędkości fazowych oraz częstotliwości, by dokładniej dobrać kształt krzywych dyspersji. Dla każdego *CMPCC* wyznaczono jedną prędkość fazową i manualnie wyznaczono krzywe dyspersji, które następnie wygładzono i zedytowano poprzez m.in. usunięcie wyższych mod. Tak przygotowane dane poddano procedurze inwersji dla modelu 20-warstwowego miąższości 20 metrów i 5 iteracji. Uzyskane dane po inwersji zgridowano i przefiltrowano (filtracja Gaussa) w programie *Surfer*, a następnie zinterpretowano, dowiązując dane otworowe. Gotowy przekrój przedstawiono na Rys. 3.

Czwartorzęd zdefiniowany jest poprzez niskie prędkości fali S (około 100-200 m/s), co jest typowe dla utworów nieskonsolidowanych w warstwach przypowierzchniowych. Mioceńskie ily prezentowane są poprzez większe prędkości (ok. 300 m/s). Dodatkowo widoczne jest w przybliżeniu płasko-równoległe wypełnienie osadami trzeciorzędowymi Rowu Krzeszowickiego (kolejne izoliny odpowiadające kolejnym prędkościom leżą równoległe względem siebie i dość gęsto, co oznacza stały, wysoki gradient prędkości w pionie). Utwory karbońskie i mezozoiczne przyjmują najwyższe prędkości w obrębie danego profilu (łupki karbońskie: 300-360 m/s, a węglany mezozoiku: od 360 do ponad 400 m/s). Ze względu na brak kontrastu prędkościowego w obrębie utworów jury i triasu, badanie metodą MASW nie pozwoliło na wyznaczenie granicy geofizycznej między nimi.

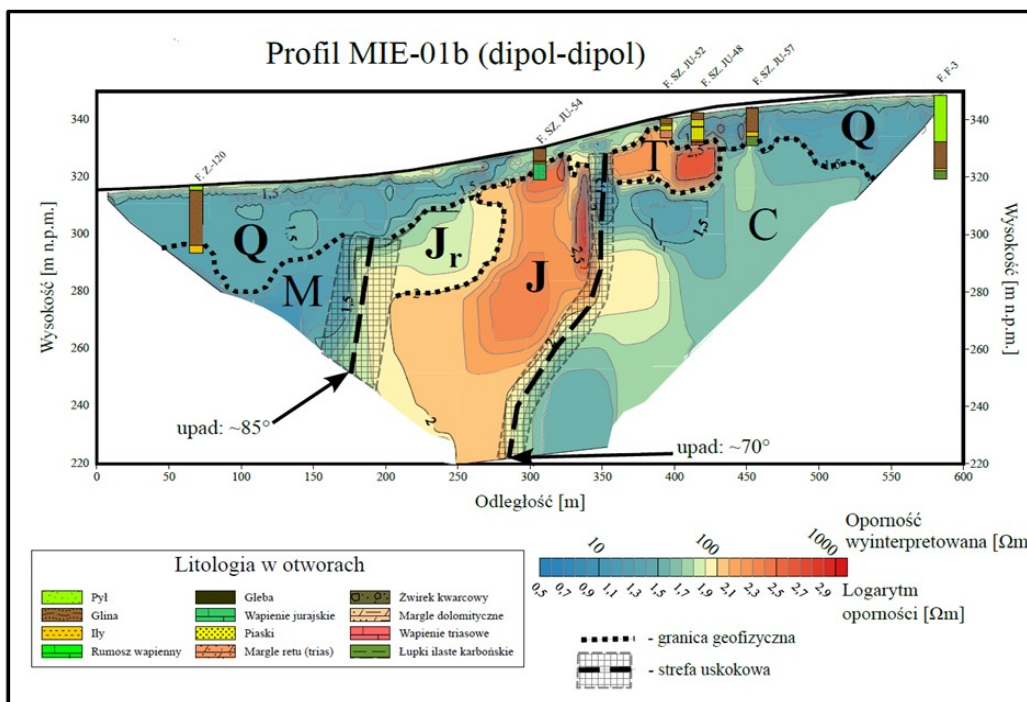


Rys. 3. Interpretacja przekroju MASW z profilu MIE-01a. Zastosowane skrótowe nazwy otworów: F. Z. – Filipowice Zalew, F. SZ. – Filipowice Szybik, F. – Filipowice oraz symbole nazw wydziałów stratygraficznych: Q – czwartorzęd, M – miocen, J/T – jura/trias, C – karbon

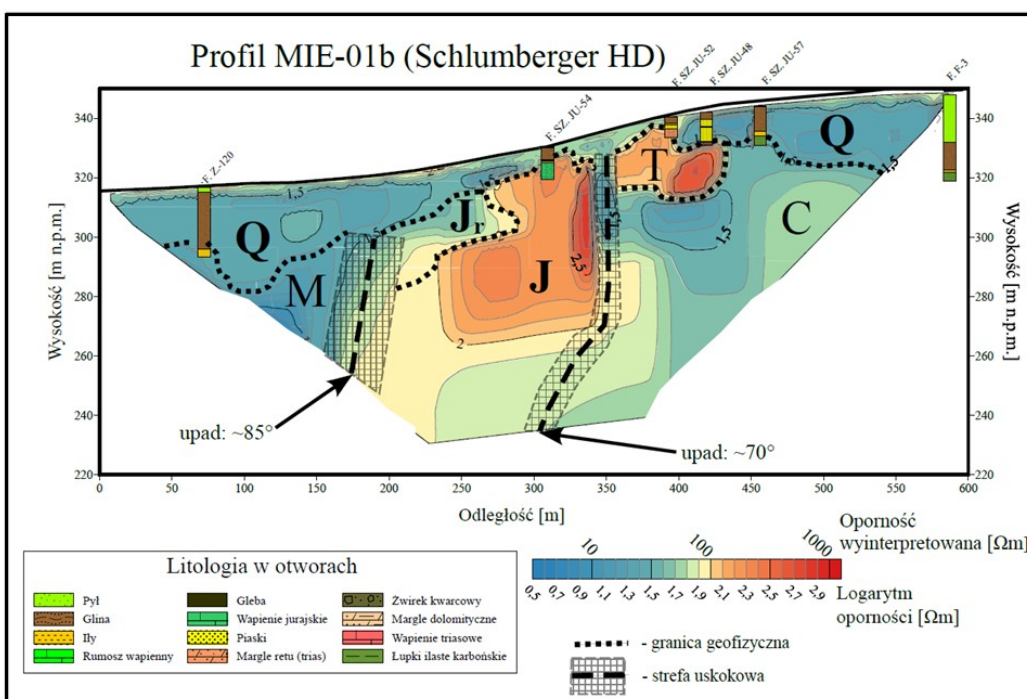
3.2. Przetwarzanie i interpretacja ERT

Przetwarzanie danych tomografii elektrooporowej objęło kontrolę węzłów pomiarowych, filtrację RMS, zaaplikowanie do pliku z danymi morfologii terenu pomierzonej z interwałem 20 metrów na linii profilu aparaturą geodezyjną oraz inwersję danych w programie *Res2Dinv*. Dla protokołu dipol-dipol zastosowano 5-iteracyjną inwersję, uzyskując końcowy błąd RMS równy 1,9%, zaś dla protokołu Schlumberger HD wykonano 7 iteracji, otrzymując ostateczny błąd RMS równy 0,77%, co świadczy o zadowalającym dopasowaniu danych modelowych do rzeczywistych. Dopuszczalny limit błędu RMS przyjęty w projekcie założono na poziomie 2,0%.

Dane po inwersji zostały zgridowane i przefiltrowane w programie *Surfer*, wyeliminowano również artefakty inwersji, tj. anomalne wartości oporności na granicach przekroju (tzw. "krawędziówki"). Tak przygotowane przekroje poddano interpretacji z dowiązaniem danych otworowych (Rys. 4 i 5).



Rys. 4. Interpretacja przekroju ERT z profilu MIE-01b, zmierzonego protokołem dipol-dipol. Skróczone nazwy otworów i wydzieleni stratygraficznych jak na Rys. 3



Rys. 5. Interpretacja przekroju ERT z profilu MIE-01b, zmierzonego protokołem Schlumberger HD. Skróczone nazwy otworów i wydzieleni stratygraficznych jak na Rys. 3

Utwory miocenu cechują się najniższymi opornościami wyinterpretowanymi, poniżej $10 \Omega m$, które są zgodne z zakładanymi w geofizyce wartościami dla ilów. Wapień jurajski i triasowe charakteryzują się najwyższymi opornościami, lokalnie nawet do około $1000 \Omega m$, margle triasowe zaś nieco niższymi opornościami, jednak wciąż znacznie odstającymi w wartościach od otoczenia skał karbońskich i czwartorzędowych. Dodatkowo, wydzielona łuska rumoszu wapiennego (J_r) została zinterpretowana ze względu na podwyższone oporności na lokalnym wypłaszczeniu utworów jurajskich, poniżej progu zbudowanego z tych utworów. Zakłada się, że niniejszy rumosz ma pochodzenie erozyjne z jednolitej warstwy jurajskiej.

Brzeg Rowu Krzeszowickiego można zinterpretować w okolicy 250 metrów profilu, gdzie utwory jurajskie dochodzą niemalże do powierzchni terenu. Granica Rowu wykazuje budowę schodkową (widoczne progi i lokalne wypłaszczenie warstwy jurajskiej). Widoczna jest znaczna różnica w budowie Antykliny Dębника (jura, trias, karbon) i wypełnienia Rowu Krzeszowickiego (utwory mioceneskie poniżej czwartorzędu). Interesująca ze względu na genezę wydaje się być wyinterpretowana warstwa węglanów triasu, oddzielona uskokiem od węglanów jury. Ustalenie jej dokładnej genezy wymagałoby przeprowadzenia większej ilości badań. Potencjalnie może to być pozostałość antyklinalnej warstwy triasu, w większości zerodowanej [Zajączkowski, 1970].

4. Wnioski

Rozpoznano i zlokalizowano północną granicę Rowu Krzeszowickiego, która zgodnie z przewidywaniami wykazuje charakter schodkowy, ze stromymi uskokiemi budującymi kolejne bloki.

Rumosz wapieni jurajskich, zalegających na blokach zrzucanych w obrębie granicy Rowu Krzeszowickiego, zdefiniowano jako pochodzenia erozyjnego na skutek procesów uskokowania występujących w trakcie miocenu, jednakże do potwierdzenia ich genezy wymagane są badania otworowe i laboratoryjne.

Wykorzystanie niestandardowej metodyki akwizycji danych sejsmicznych (tj. zastosowanie źródła w postaci fali S oraz geofonów horyzontalnych) pozwoliło na dokładne rozpoznanie strefy przypowierzchniowej ze względu na mniejszą prędkość propagacji fali S w porównaniu z falą P.

Zaobserwowano silną korelację między wynikami z metod MASW i ERT dla utworów węglanowych mezozoiku na metrażu ok. 400-550 m (Rys. 3-5). Dla niniejszych skał osadowych uzyskano wysokie oporności oraz stosunkowo wysokie prędkości fali S. Ponieważ są one niższe niż w skonsolidowanych wapieniach, można wnioskować o potencjalnym silnym spękaniu skał węglanowych bądź wysokiej porowatości [Palacky, 1988; Assefa i in., 2003]. Obydwa przekroje wskazują również na podobny kształt warstwy węglanowej oraz na obecność strefy uskokowej na metrażu ok. 350 m. Jednocześnie w obrębie formacji mezozoicznej uwidacznia się silna różnica między wynikami badań metodami ERT i MASW w postaci obecności pionowej strefy niskich oporności na przekroju tomografii elektrooporowej w obrębie utworów wysokooporowych, co zinterpretowano jako strefę uskokową. Dla przekroju MASW brak jest tej strefy anomalnej.

Zasięg głębokościowy uzyskany protokołem pomiarowym Schlumberger HD (ponad 85 metrów) jest mniejszy dla warunków geologicznych w obrębie profilu MIE-01b niż zasięg uzyskany protokołem dipol-dipol (około 100 metrów).

W warunkach geologicznych na granicy Rowu Krzeszowickiego i Antykliny Dębника więcej informacji uzyskano dzięki zastosowaniu metody ERT, ze względu na jej wrażliwość również na zmiany poziome, znacznie większy zasięg głębokościowy oraz reaktywność na kolejne litologie obecne na profilu.

Wydzielenia litostratygraficzne pozyskane z otworów wiertniczych wykazują dobre dopasowanie do danych geofizycznych. Dzięki temu dopasowaniu można wnioskować na podstawie przekrojów o właściwościach fizycznych skał oraz skonfrontować otrzymane wartości z dostępnymi w literaturze [Assefa i in., 2003; Palacky, 1988].

W celu potwierdzenia i dalszej analizy budowy geologicznej wzdłuż profilu MIE-01b wskazana byłaby realizacja odwiertu do głębokości około 20 metrów na 250 metrze profilu, gdzie wyinterpretowano warstwę rumoszu wapieni jurajskich, prawdopodobnie pochodzenia erozyjnego, w celu określenia jej genezy i składu chemicznego oraz realizacja odwiertu do głębokości około 30 metrów na 425 metrze profilu w celu rozpoznania granicy między triasem a karbonem oraz charakterystyki węglanów triasowych.

Realizacja inwestycji drogowej [*Budowa nowej drogi gminnej łączącej DK79 z terenami inwestycyjnymi* 2023] w sąsiedztwie wykonanych profili może potencjalnie przyciągnąć inwestorów do zabudowy mieszkaniowej na obszarze badań. Wówczas wykonane pomiary w ramach niniejszego projektu mogą posłużyć np. do wyznaczenia najlepszych lokalizacji pomp ciepła (w utworach o dobrej przewodności cieplnej – tutaj utwory węglanowe mezozoiku) czy studni głębinowych.

Warstwa wapieni jurajskich, zalegająca płytko pod powierzchnią terenu, po wykonaniu dodatkowych odwiertów i określeniu w warunkach laboratoryjnych jej właściwości fizykochemicznych, potencjalnie może zostać wykorzystana jako kamieniołom wapieni. W przypadku oznaczenia pożądanego w przemyśle cech, konieczne byłoby wykonanie również dodatkowych profili ERT o większym zasięgu głębokościowym w celu dokładnego zmapowania złoża.

Finansowanie: badania zostały częściowo sfinansowane ze środków subwencji przyznanej AGH w Krakowie przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Bibliografia

- Alexandrowicz S. *Rozwój zapadliska Przedkarpackiego w świetle wyników badań nad stratygrafią miocenu Południowej Polski*. Biuletyn Instytutu Geologicznego, (1965).
- Assefa S., McCann C., Sothcott J. *Velocities of Compressional and Shear Waves in Limestones*. *Geophysical Prospecting* 51, 1, 1-13 (2003).
- Baza otworów wiertniczych* [2024]. dostęp: 24.10.2024. url: <https://otworywiertnicze.pgi.gov.pl/>.
- Budowa nowej drogi gminnej łączącej DK79 z terenami inwestycyjnymi* [2023]. dostęp: 24.10.2024. url: <https://www.gminakrzeszowice.pl/aktualnosci/index/Budowa-nowej-drogi%20gminnej-laczacej-DK-79-z-terenamiinwestycyjnymi/idn:3003>.
- Everett M. *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press (2013).
- Gradziński R. *Budowa geologiczna terytorium Krakowa*. Wydawnictwa Geologiczne (1974).
- Lam K., Ahmed T., Alam Z. *Application of Electrical Resistivity Tomography in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. *Journal of Applied Geophysics* (2024).
- Loke M. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*. (2000).
- Loke M. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. (2021).
- Milijanović D., Satora J. *Wpływ budowy geologicznej na występowanie wód mineralnych w rowie tektonicznym Krzeszowic*. (2006).
- Palacky G. *Resistivity Characteristics of Geologic Targets*. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, SEG (1988).
- Park C., Miller R., Xia J. *Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW)*. Kansas Geological Survey (1997).
- Park C., Miller R., Xia J., Ivanov J. *Multichannel analysis of surface waves (MASW) – active and passive methods*. The Leading Edge (2007).
- Płoczyński Z., Łopusiński A. *Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski. Arkusz Krzeszowice*. Państwowy Instytut Geologiczny (1993).
- Zajązkowski A. *Mapa geologiczna okolic Dębника 1:5000*. Archiwum PIG (1970).

Application of ERT and MASW methods for geological characterization of the Krzeszowice Graben

Abstract

The article presents the application of MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) and ERT (Electrical Resistivity Tomography) methods for investigating the geological structure of the northern boundary of the Krzeszowice Graben, where Miocene, Mesozoic, and Carboniferous formations occur in close proximity. The lithological analysis was carried out using methods based on different wave fields (electrical and elastic), which enabled the examination of correlations between various parameters of the rock mass. Seismic data acquisition was performed using an I-beam as a source of Swaves and horizontally polarized geophones, while resistivity data were collected using Schlumberger and Dipole–Dipole measurement arrays. The data were subsequently processed and interpreted with reference to borehole data. The results of the study provide new insights into the geological structure and tectonics of the area.

Keywords: Krzeszowice Graben; electrical resistivity tomography; MASW; ERT; engineering geophysics; inversion; acquisition; shear wave; geology